

# Primjena mikroskopije u industrijskim mjerenjima

---

**Cvek, Roko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:535617>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-30**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



image not found or type unknown

ISTARSKO VELEUČILIŠTE – UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE  
APPLICATE

Roko Cvek

**PRIMJENA MIKROSKOPIJE U INDUSTRIJSKIM  
MJERENJIMA**

Završni rad

Pula, 2023.

ISTARSKO VELEUČILIŠTE – UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE  
APPLICATE

Roko Cvek

## **PRIMJENA MIKROSKOPIJE U INDUSTRIJSKIM MJERENJIMA**

Završni rad

**JMBAG:** 0242010286 (28-IV), izvanredni student

**Studijski smjer:** Preddiplomski stručni studij Mehatronika

**Predmet:** Mjeriteljstvo i upravljanje kvalitetom

**Mentor:** doc.dr.sc. Vedrana Špada, dipl.ing.kem.teh.

Pula, rujan 2023.



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Roko Cvek, kandidat za prvostupnika Mehatronike, ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

U Puli, \_\_\_\_\_ godine

Student

---



## IZJAVA O KORIŠTENJU AUTORSKOG DJELA

Ja, Roko Cvek, dajem odobrenje Istarskom veleučilištu – Università Istriana di scienze applicate, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom „**Primjena mikroskopije u industrijskim mjerenjima**“ koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, \_\_\_\_\_ godine

Student

---

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TIG ZAVARIVANJE.....	2
3. ALUMINIJSKA LEGURA 5083 H321M.....	3
4. POSTUPAK PRIPREME UZORAKA.....	4
4.1. PRIPREMA UZORAKA U BRODOGRADILIŠTU.....	4
5.1. PRIPREMA UZORAKA U LABORATORIJU.....	8
5. METALOGRAFSKA ANALIZA UZORAKA.....	10
6. MIKROSKOPSKA MJERENJA VELIČINE ZUT-a.....	18
7. ZAKLJUČAK.....	19
LITERATURA.....	20
POPIS SLIKA.....	21
POPIS TABLICA.....	22
SAŽETAK.....	23
SUMMARY.....	23

# 1. UVOD

Zbog njihovih povoljnih svojstava, aluminijske legure se sve više koriste u raznim tehničkim industrijama, uključujući brodogradnju, gdje im je uobičajena primjena za izradu brodskih trupova i konstrukcija. Budući da aluminijske legure ne korodiraju, nije ih potrebno dodatno površinski zaštititi, već je shodno tome površina vidljiva i nakon završne obrade te se nastoji dovesti svaku neravninu unutar raspona tolerancije zbog estetskih, ali i funkcionalnih razloga. Aluminijske legure pogodne su za korištenje u brodogradnji zbog sigurnosti i pouzdanosti koje nude u okruženju koje djeluje na materijal značajnim naprezanjima. Za razliku od drugih materijala, aluminijske legure ne zahtijevaju dodatnu površinsku zaštitu zbog otpornosti na koroziju, čime se vidljiva površina može zadržati i nakon završne obrade.

Certificirani postupak za ravnanje limova od aluminijske legure, koji se primjenjuje u Tehnomont brodogradilištu d.o.o. je TIG (eng. *Tungsten Inert Gas*) ili GTAW (eng. *Gas tungsten arc welding*) što je u osnovi elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom od volframa u zaštiti inertnog plina bez dodatka drugog materijala.

U ovom radu razmatra se na stvarnom industrijskom primjeru uloga mikroskopije u industrijskim mjerenjima. Rad je podijeljen na četiri glavna poglavlja koja obrađuju tematiku, a započinje s uvodom u TIG zavarivanje i aluminijske legure. Četvrto poglavlje detaljno opisuje postupak pripreme uzoraka, dok srž ovog rada predstavlja metalografska analiza uzoraka brodskih limova nakon ravnjanja korištenjem opreme za TIG zavarivanje u različitim uvjetima pripreme površine limova za zavarivanje, unošenja topline i ohlađivanja limova te ispitivanja zadovoljava li materijal kriterije za daljnju upotrebu ili se njegova mikrostruktura izmijenila do te mjere da ga je nužno odbaciti. Također, uspoređene su i veličine zona utjecaja topline nastale utjecajem TIG-a u svim uzorcima, kako bi se također donio sud o budućim mehaničkim svojstvima materijala.

Hipoteza rada jest da se za navedeni sud i kontrolu može koristiti mikroskopija te je mikroskopija pogodna metoda za vršenje industrijskih mjerenja s izuzetnim brojem preglednih i korisnih informacija koje dovode do pouzdanih i brzih rezultata.

## 2. TIG ZAVARIVANJE

Postupak za ravnanje limova aluminijske legure koji se primjenjuje u ovom radu je TIG ili GTAW što je u osnovi elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina. Elektrolučno zavarivanje s netaljivom elektrodom u zaštiti od inertnog plina također je poznato kao zavarivanje s plinskim volframom (GTAW) ili zavarivanje s volframovim inertnim plinom (TIG), (Horvat, 2014).

TIG zavarivanje je precizan i visokokvalitetan postupak zavarivanja koji daje vrlo čiste i precizne varove. Prilikom zavarivanja, netaljiva volframova elektroda se koristi za stvaranje električnog luka s osnovnim metalom, dok se inertni plin, poput argona ili helija, koristi za zaštitu područja zavara od atmosfere kontaminacije. Elektroda se ne troši tijekom procesa zavarivanja, za razliku od drugih postupaka zavarivanja, kao što su MIG ili štapno zavarivanje, gdje se elektroda troši i djeluje kao dodatni materijal.

TIG postupak zavarivanja se u velikoj mjeri koristi u zrakoplovnoj, brodograđevnoj, automobilskoj i medicinskoj industriji, između ostalog, gdje su potrebni visokokvalitetni i precizni varovi. Posebno je učinkovit za zavarivanje tankih materijala, kao što su aluminij ili nehrđajući čelik, gdje je potrebna visoka razina kontrole kako bi se spriječilo progorijevanje i izobličenje materijala. Zavar se izrađuje primjenom luka koji rastapa obradak i dodatni materijal, a nakon hlađenja se dobiva zavareni spoj. Postoji više kombinacija u parametrima struje i polariteta, ovisno o tome koji se materijal zavaruje, vrsti pripreme spoja, debljini itd. Navedeni parametri su važni jer omogućuju kontrolu utjecaja na materijal u skladu s zahtjevima kvalitete i kritičnih vrijednosti mehaničkih svojstava, poput vlačne čvrstoće, koje su propisane normama ili specifičnim zahtjevima i moraju dosegnuti određene vrijednosti.



### 3. ALUMINIJSKA LEGURA 5083 H321M

Aluminijska legura 5083 je izuzetno svestrana legura koju je, zbog sadržaja silicija i magnezija, moguće obrađivati sukladno tehnološkim postupcima obrade te je glavni legirni element u navedenoj leguri magnezij (Mg). Nadalje M oznaka označava da je materijal testiran na otpornost od korozije, dok slovo H označava duktilni materijal koji nema definiranu granicu elastičnosti te brojevi u nastavku oznake označavaju slijed procesa.

Kemijski sastav legure 5083 (AlMg4.5Mn0.7) propisan je europskom normom EN 573-3, a zahtjevi norme prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Kemijski sastav legure 5083 prema EN 573-3 izražen u postocima masenog udjela pojedinog kemijskog elementa

Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	Ostali elementi - pojedinačno %	Ostali elementi - ukupno %
0,40	0,40	0,10	0,40 - 1,0	4,0 - 4,9	0,05 - 0,25	0,25	0,15	0,05	0,15

U Centru za istraživanje METRIS u svrhu kontrole kvalitete ispitan je kemijski sastav referentnog uzorka legure i utvrđeno je kako je sukladan s certifikatom.

Ispitivanja utjecaja TIG postupka ravnjanja limova na mehanička svojstva Al-limova legure 5083 su također izvršena u akreditiranom ispitnom laboratoriju Centra za istraživanje METRIS (Savić, 2022). Prema rezultatima odabrani su parametri za pripremu uzoraka za ovaj rad kako bi se nastavila istraživanja i kako bi se mikroskopski utvrdio utjecaj TIG postupka ravnjanja na mikrostrukturu materijala, koja opet ima posljedično utjecaj na mehanička svojstva, a vjerojatno i na otpornost na koroziju, što može biti predmet nekih daljnjih istraživanja.

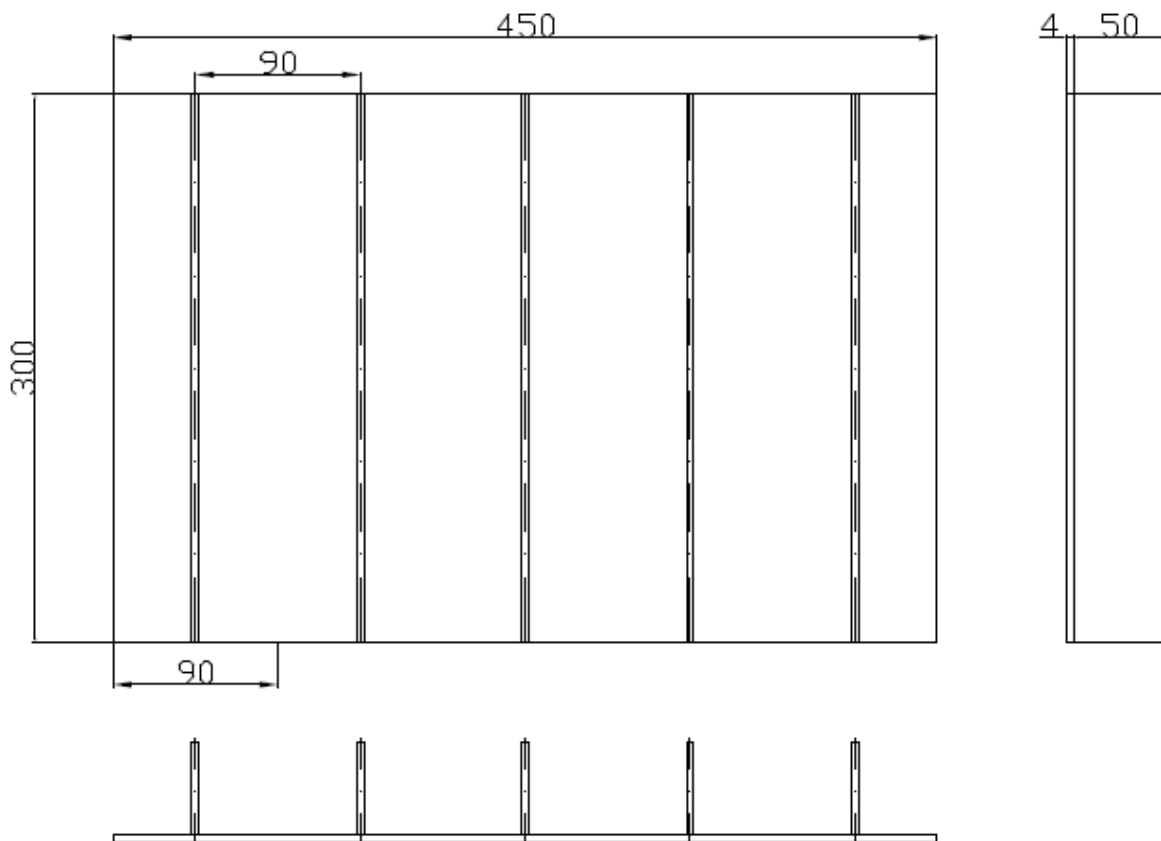
## 4. POSTUPAK PRIPREME UZORAKA

Priprema uzorka je odrađena na dvije lokacije odnosno u brodogradilištu, gdje je izvršena priprema strukture i gdje je unesena toplina, te u laboratoriju gdje je izvršena priprema za promatranje mikrostrukture na mikroskopu.

### 4.1. PRIPREMA UZORAKA U BRODOGRADILIŠTU

Prije nego što započne postupak ravnjanja zagrijavanjem, potrebno je na neki način simulirati strukturu broda. Izravno zagrijavanje bi dovelo do deformacija ploče koja nije ugrađena u konstrukciju te bi postala neupotrebljiva te se zbog toga ploča, dimenzija 490 x 300 x 4 mm, ojačava dodatnom konstrukcijom na zoni utjecaja topline, sa suprotne strane, što je prikazano na slikama 1 i 2.

Slika 1. Skica ploče korištene kao trup broda



Slika 2. Pojačanja na trupu broda



Na površini koja simulira trup broda, na kojoj se vrši unos topline, odstranjen je aluminijev oksid na četiri od šest uzoraka, od kojih je jedan referentni. Tako pripremljen „trup“ je spreman za unos topline koji se vrši prema nekoliko različitih vrijednosti unosa topline odnosno uvjeta. Zbog povjerljivih podataka poduzeća Tehnomont brodogradilište d.o.o. nije moguće otkriti sve parametre, no formula po kojoj je dobivena količina unosa topline je:

$$Q = \left( \frac{U \times I \times 60}{S \times 1000} \right) \times \text{Efficiency}$$

U navedenoj formuli  $Q$  predstavlja količinu unesene topline,  $U$  predstavlja napon te  $I$  jakost električne struje dok  $S$  predstavlja brzinu „povlačenja“ zavara. Svi unosi topline izvršeni uzdužno u duljini od 300 mm, unutar istog razmaka između ZUT-a, korištenjem volframove elektrode promjera 2 mm koju je ručno unosio zavarivač u brodogradilištu, što je vidljivo na slici 3.

Slika 3. Prikaz ravnjanja odnosno unosa topline i prikaz zone utjecaja topline (ZUT)



U procesu unosa topline elektroda je udaljena od površine, na koju se unosi toplina, 15 mm te je korišten zaštitni plin argon (100% Ar). Podaci o unosu topline prikazani su u tablici 2 te su dodane napomene vezane za različite načine pripreme uzorka. Uzorci P3 i P5 su pripremljeni na isti način no razlikuje se količina unesene topline.

Tablica 2. Podaci o unosu topline na Al-lim TIG postupkom

Uzorak	Količina unesene topline = Q	Napomena
R	0 kJ/mm	<i>Referentni uzorak, bez unosa topline</i>
P1	0,257 kJ/mm	<i>Nije uklonjen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>
P2	0,239 kJ/mm	<i>Hlađen sa H<sub>2</sub>O nakon unosa topline</i>
P3	0,235 kJ/mm	<i>Uklonjen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i izvršen je unos Q</i>
P4	0,510 kJ/mm	<i>Dvostruki unos topline</i>
P5	0,385 kJ/mm	<i>Uklonjen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i izvršen je unos Q</i>



Na slici 4 je vidljiva ploča koja simulira strukturu broda te se na njoj također jasno vidi da za uzorak P1 nije odstranjen sloj aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Slika 4. Odstranjen površinski sloj  $\text{Al}_2\text{O}_3$

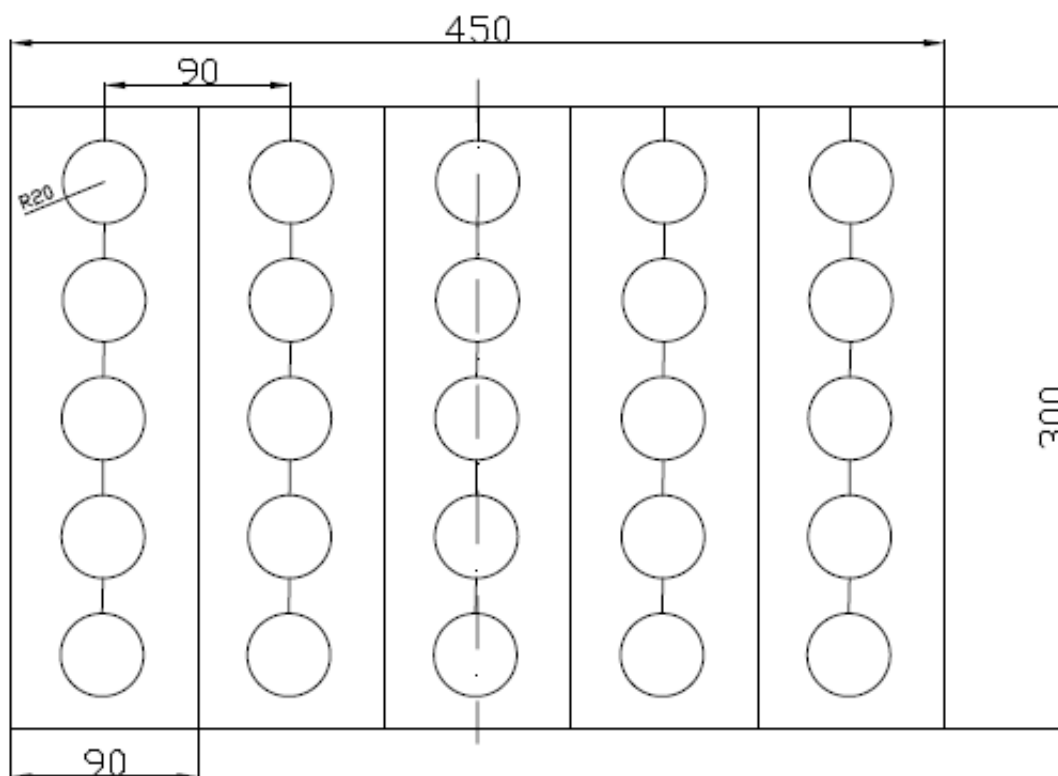


Lim na kojem je odrađena TIG procedura ravnanja izrezan je na manje epruvete, promjera 40 mm (slike 5 i 6), koje se naknadno detaljnije prilagođava, u laboratoriju, kako bi bile pogodne za promatranje na mikroskopu.

Slika 5. Uzorci neposredno prije pripreme za ispitivanje u laboratoriju odnosno prije prilagodbe za kalup



Slika 6. Skica uzimanja uzoraka iz lima

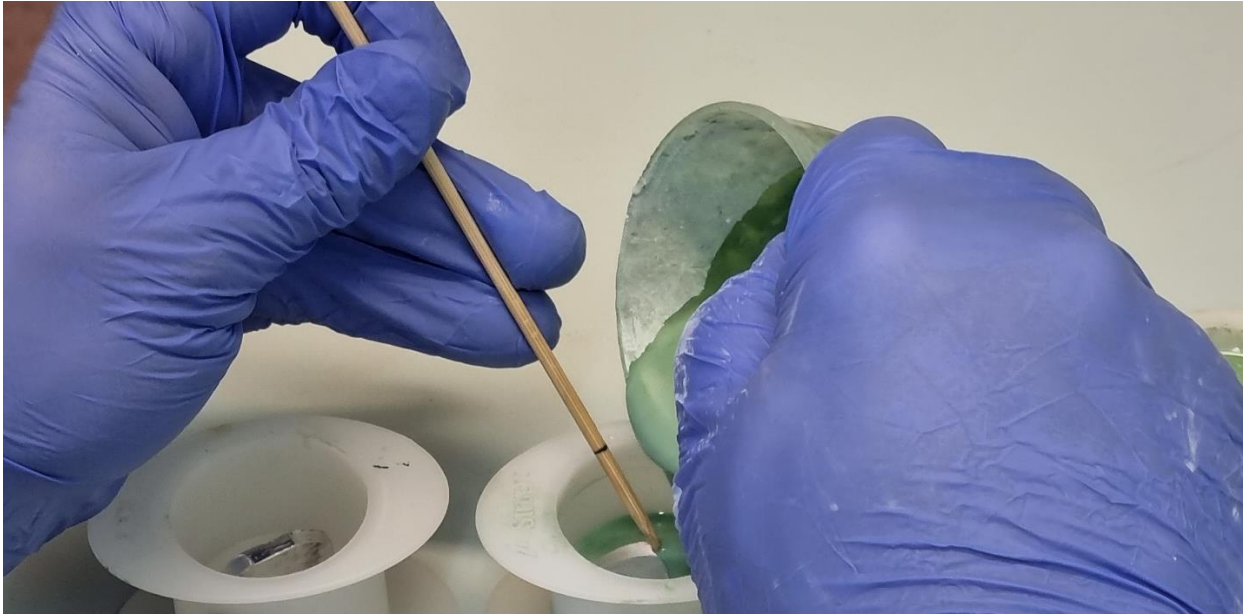


### 5.1. PRIPREMA UZORAKA U LABORATORIJU

Priprema uzoraka za promatranje na mikroskopu započinje prilagođavanjem epruveta za određeni kalup. Budući se u Centru za istraživanje METRIS koriste kalupi promjera 40 mm potrebno je prilagoditi epruvete, na način da se promatrana površina nalazi na dnu kalupa, a da epruveta bude u okvirima kalupa. Smola koja se odabire mora zadovoljavati potrebe pripreme i analize, odnosno da se troši jednakom brzinom kao i metal koji se ispituje, a konkretna smola u ovom slučaju se dobiva od tri komponente. Prva komponenta je „DuroCit liquid 1“ koja je u stvari tekućina, koja sadrži metil metakrilat stiren, a koja je kemijska komponenta koja se polimerizira i na taj način daje otpornost na habanje. U nastavku se dodaje praškasta komponenta „DuroCit Powder“ koji smjesi daje čvrstoću te se najzad dodaje „DuroCit liquid 2“ koji sadrži stiren i katalizator, koji u konkretnom slučaju služi za brže skrućivanje smjese. Važna napomena je da se prilikom pripreme smole koristi vrste kemikalija koje mogu biti štetne po zdravlje, kako dodiranjem tako i udisanjem njihovih para, stoga je obavezno korištenje zaštitnih rukavica i zaštitnih naočala te ukoliko je moguće digestora.

Nakon što je smola ulivena u kalupe, prikazano na slici 7, mora proći 24 sata kako bi se smola ukrutila te bi uzorak bio spreman za vađenje.

Slika 7. Ulijevanje smole u kalup



Nakon protoka 24 sata, uzorke je potom potrebno obraditi, tako da se postupno skidaju slojevi, brušenjem i poliranjem, kako bi se uklonio tanki sloj korozije i nečistoća koji je nevidljiv golim okom. Navedene nečistoće su mogle nastati prijenosom s ploče za rezanje, kalupa, radnog stola ili bilo kojeg vanjskog faktora.

Proces brušenja je proveden na alatnom stroju „Struers Labpool“ u četiri koraka, koristeći PRESI SiC brusni papir gardacije od 120 do 2400, a u procesu brušenja uzorak je hlađen vodom. Nakon brušenja je slijedi poliranje, za koje se koristi Struers MD-Plus sa DiaPro abrazivnom suspenzijom od 3  $\mu\text{m}$  s 96%-tnim etanolom i MD-Chem tkanina za poliranje s Presi SPM 0,03  $\mu\text{m}$  suspenzijom. Kako bi se nagrizla površina i otkrila mikrostruktura promatranih uzoraka oni se nakon poliranja uranjaju na 40 sekundi u otopinu od 0,5 ml HF i 100 ml destilirane vode.

Tako pripremljeni uzorci ispituju se na mikroskopu kako bi se utvrdile promjene u mikrostrukturi nakon ravnjanja odnosno nakon unosa topline.

## 5. METALOGRAFSKA ANALIZA UZORAKA

Organizacija atoma u malom mjerilu, odnosno na mikroskopskoj razini, ono je što definira mikrostrukturu aluminija i njegovih legura. Atomi u leguri tvore kristalne strukture specifičnog izgleda kristalnih zrna vidljivih metalografskim mikroskopskim ispitivanjem.

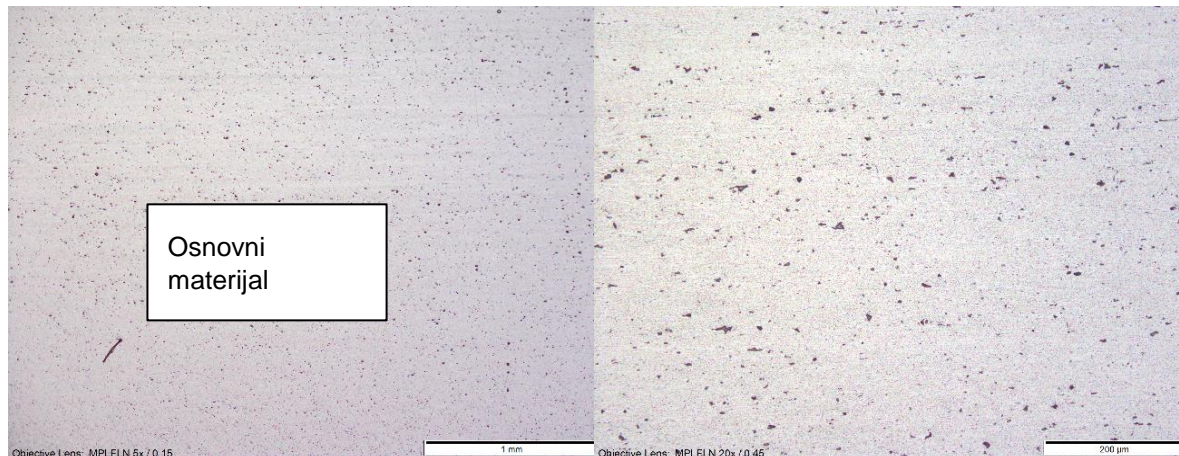
TIG postupak unosi toplinu materijalu i utječe na mikrostrukturu, a cilj rada je takve promjene usporediti, izmjeriti i snimiti te dokazati prednost upotrebe mikroskopije u industrijskim mjerenjima. Mikroskopom se dobiju slike koje operateru mogu dati izravnu korelaciju s mehaničkim svojstvima materijala zato je mikrostrukturna analiza, uz kemijsku i mehaničku analizu, neizostavan korak u ispitivanju materijala.

Mikrostrukturna analiza pojedinih uzoraka provedena je nakon izravnivanja brodskih limova korištenjem opreme za TIG zavarivanje u različitim uvjetima pripreme površine limova za zavarivanje, unošenja topline i ohlađivanja limova.

Pripremljeno je ukupno pet (5) uzoraka nakon ravnjanja limova i referentni uzorak lima (R) bez tretmana sa TIG postupkom. Na slikama od 8. do 13. prikazane su karakteristične snimke mikrostrukture i mikrostrukturnih konsituenata uzoraka limova nakon ravnjanja sa TIG opremom za zavarivanje označenih od P1 do P5 te je prikazana i mikrostruktura referentnog uzorka (Pentek, 2023).

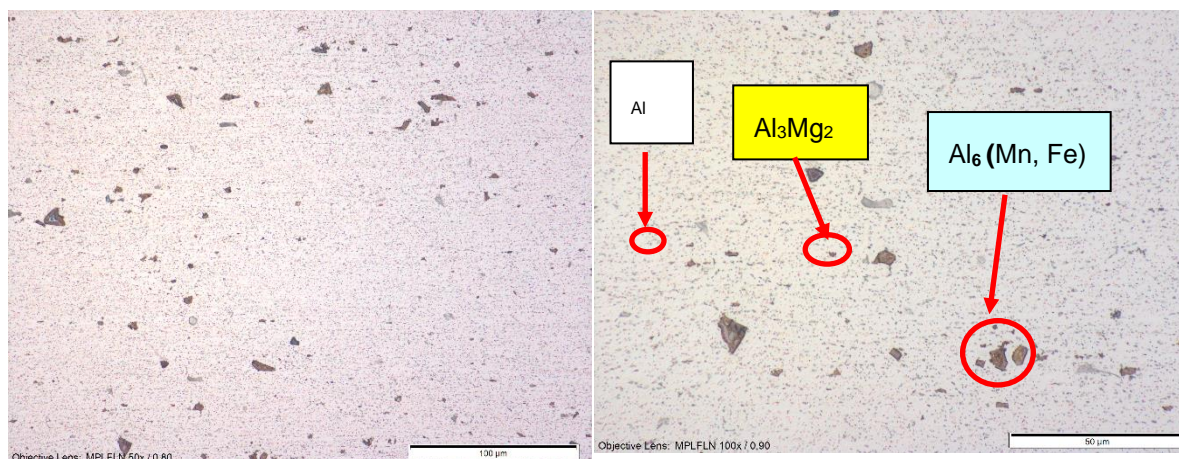


Slika 8. Mikrostrukturna analiza referentnog uzorka (R), bez ravnjanja limova



a) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 50x

b) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 200x

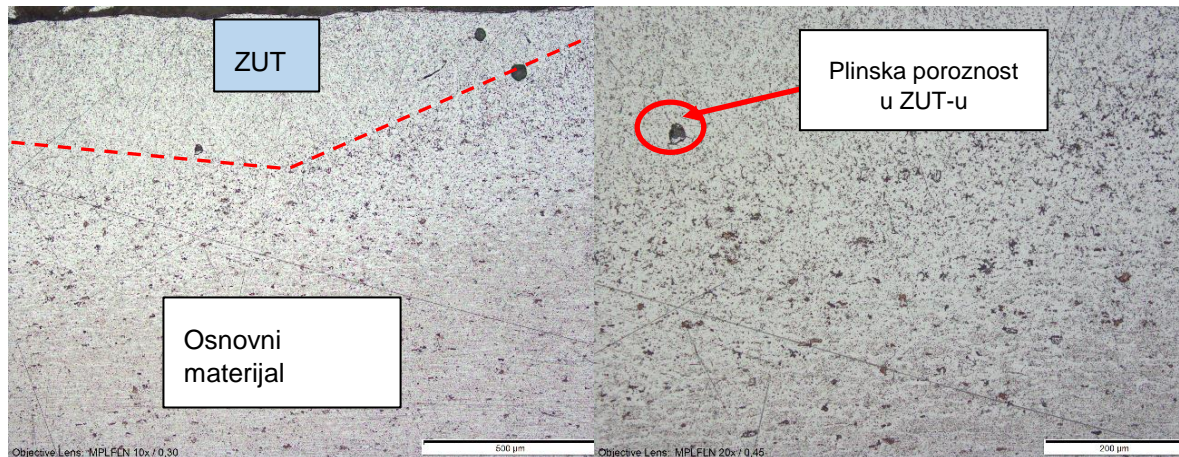


c) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 500x

d) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 1000x

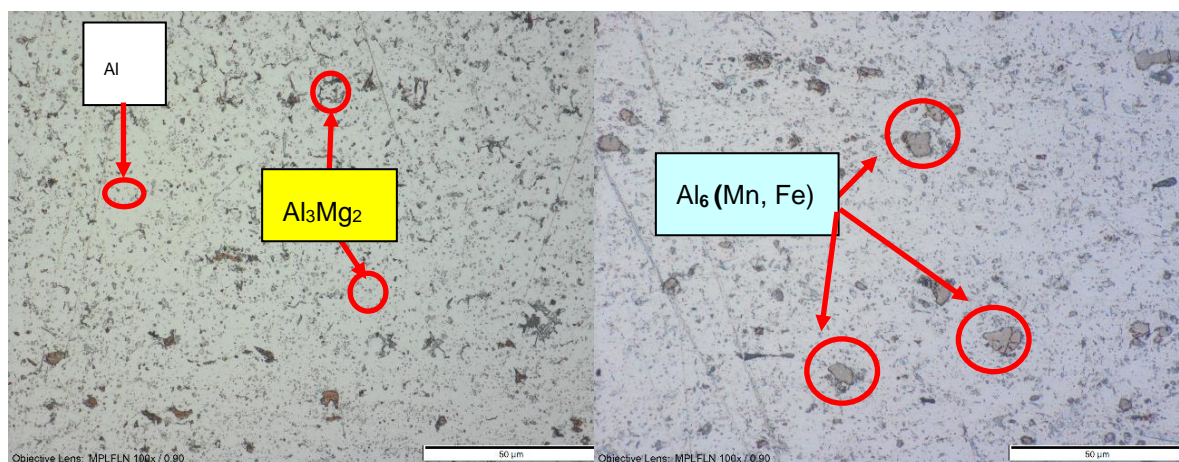
Na slici 8 a-c prikazani su glavni mikrostrukturni konstituenti u mikrostrukturi osnovnog (R) referentnog materijala. Također su na slici 8 d označene prisutne faze: primarna faza aluminija ( $\alpha_{Al}$ ), zatim najzastupljenija intermetalna faza aluminija i magnezija ( $Al_3Mg_2$ ) i kompleksna intermetalna faza aluminija, mangana i željeza,  $Al_6(Mn, Fe)$ .

Slika 9. Mikrostrukturalna analiza uzorka (P1), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom



a) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 50x

b) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 200x



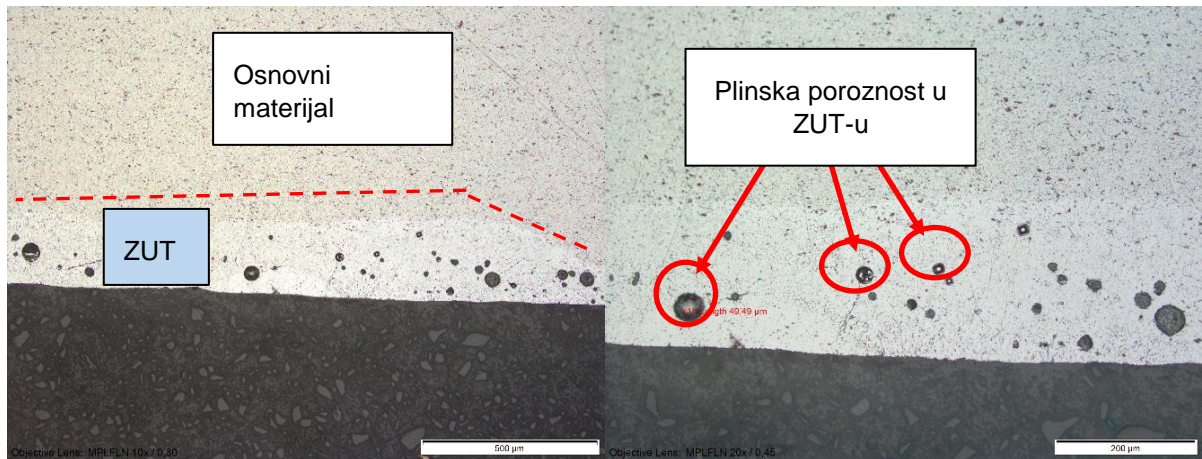
c) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 500x

d) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 1000x

U prvom promatranom uzorku, P1, vidljivo je blago razvijanje plinske poroznosti unutar ZUT-a te povećanje segmenata kompleksne intermetalne faze aluminija, mangana i željeza,  $Al_6 (Mn, Fe)$ .

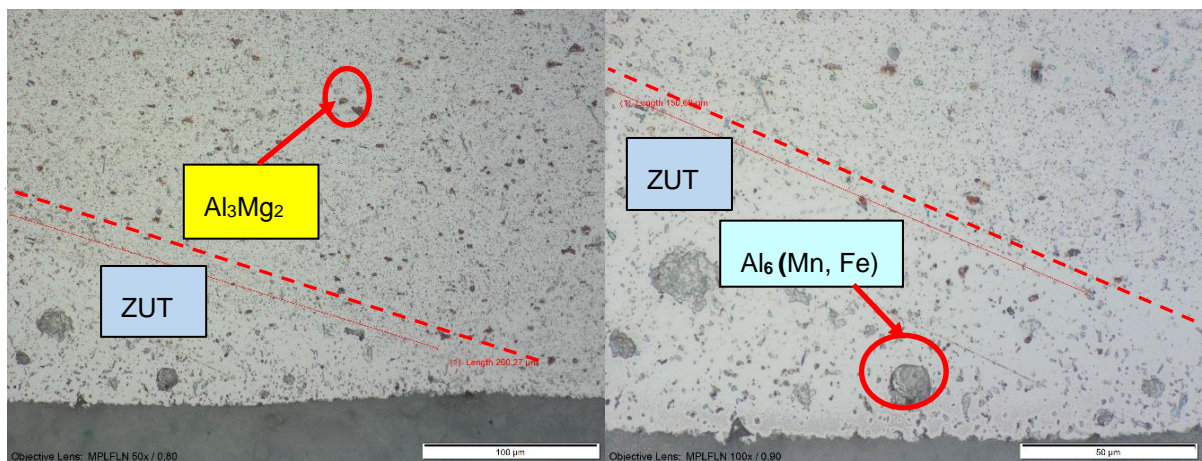


Slika 10. Mikrostrukturna analiza uzorka (P2), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom



a) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 100x

b) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 200x

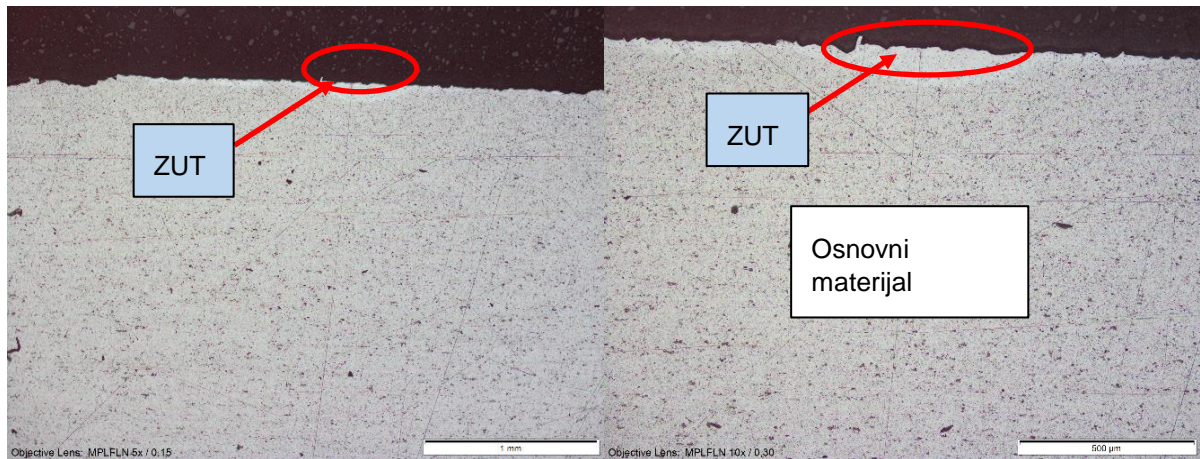


c) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 500x

d) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 1000x

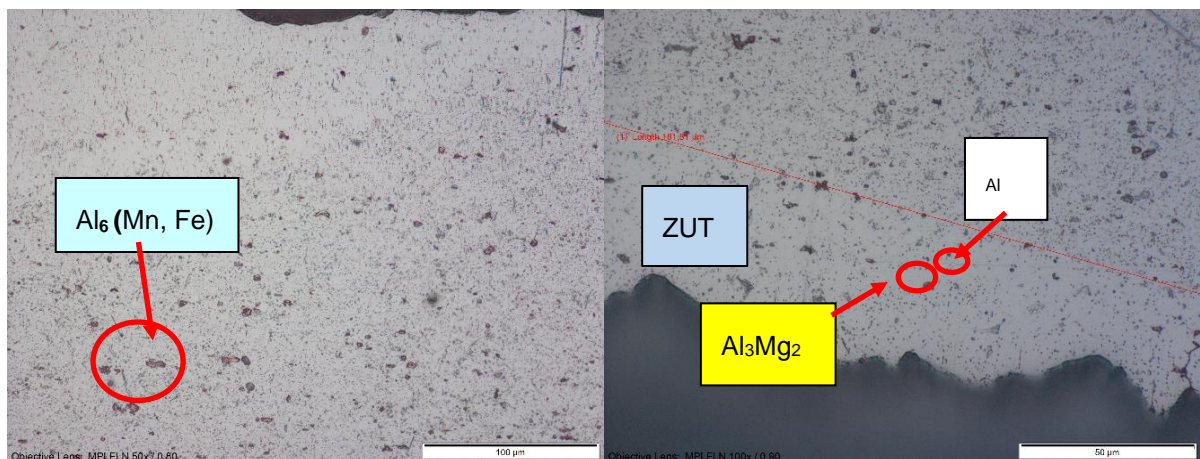
Pri promatranju uzorka P2, na slici 10, uočena je značajna količina plinske poroznosti u ZUT-u. Tu su zrna u prosjeku promjera cca 49 μm. Nadalje uočena je i određena količina intermetalnih faza Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> i kompleksne intermetalne Al<sub>6</sub>(Mn,Fe).

Slika 11. Mikrostrukturalna analiza uzorka (P3), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom



a) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 50x – mali ZUT

b) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 100x



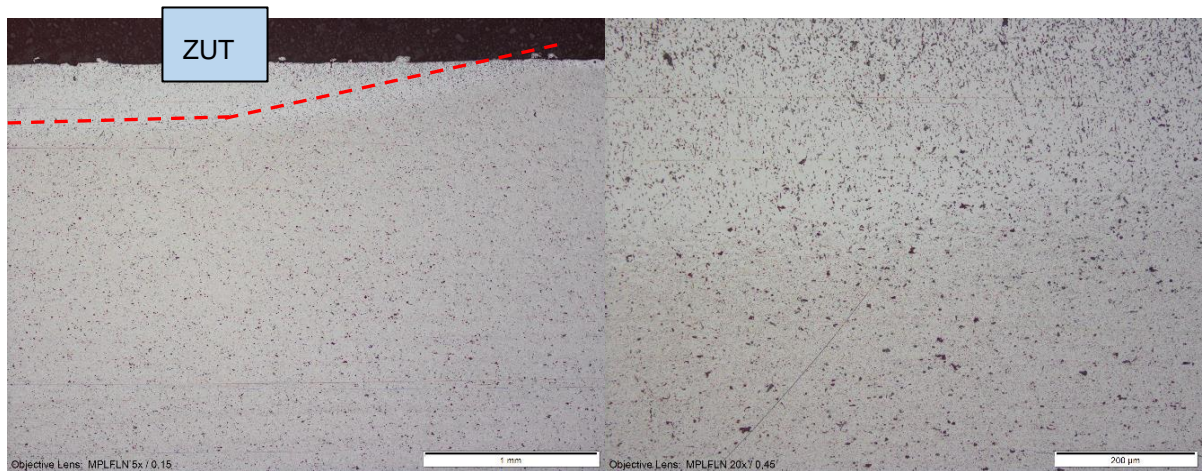
c) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 500x

d) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 1000x

Na uzorku P3, slika 11, vidi se stabilni i uredni ZUT bez grešaka bez obzira na dvostruki unos topline. Glavni konstituenti osnovnog materijala vidljivi su u obliku primarne alfa aluminijске faze  $\alpha_{Al}$ , najobilnije intermetalne faze Al i Mg odnosno  $Al_3Mg_2$  i kompleksne intermetalne faze Al, Mn i Fe odnosno  $Al_6(Mn,Fe)$ . Također uz navedenu mikrostrukturu primjetne su nečistoće i mikropukotine u ZUT-u.

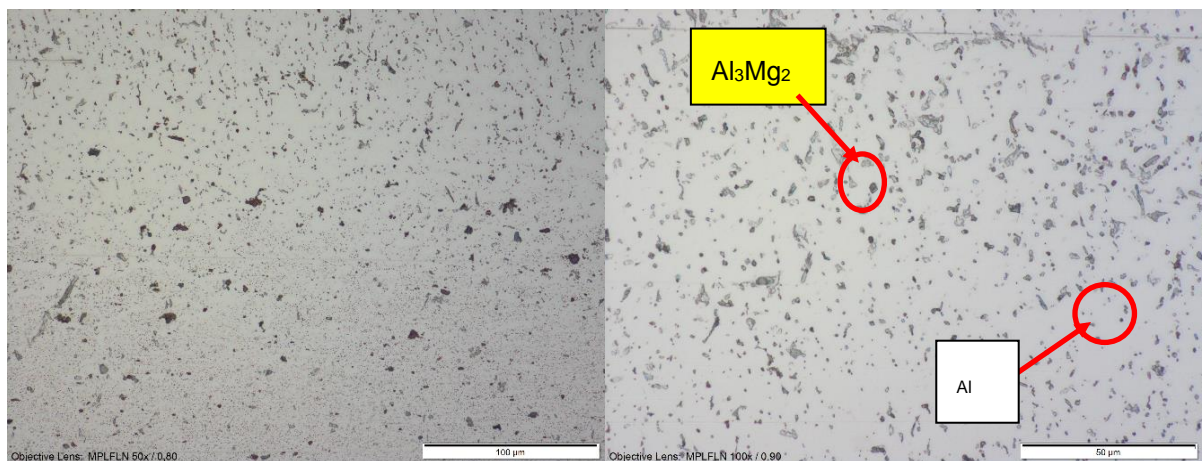


Slika 12. Mikrostrukturna analiza uzorka (P4), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnanja limova TIG opremom



a) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 50x

b) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 200x

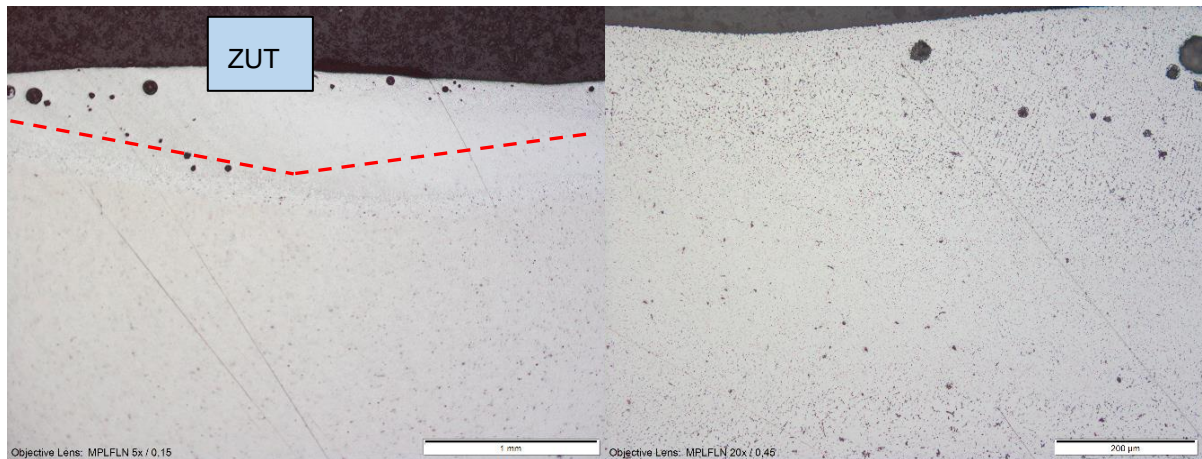


c) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 500x – čisti ZUT

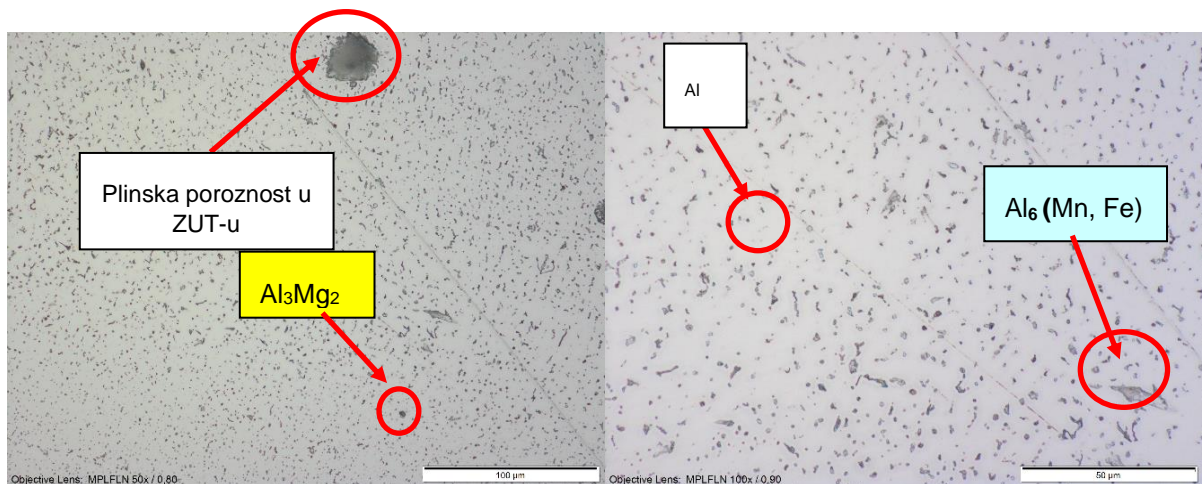
d) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 1000x – čisti ZUT

Na uzorku P4 vidljive su najmanje promjene u mikrostrukтури u odnosu na referentni uzorak.

Slika 13. Mikrostrukturna analiza uzorka (P5), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom



a) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 50x      b) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 200x



c) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 500x – čisti ZUT      d) Mikrostruktura uzorka pri povećanju od 1000x – čisti ZUT

Na uzorku P5 izražena je plinska poroznost u ZUT-u. Osim mikrostrukturnih konstituenata na slikama 8 do 13 su vidljive i greške u materijalu, naročito u zoni ZUT-a vidljive kao poroznost plinskog tipa i mikropukotine.

Poroznost nastaje kao rezultat otopljenog plina u talini metala zavara. Prilikom stvrdnjavanja otopljeni plin ostaje zarobljen u obliku pora u ohlađenom i skrutnutom

metalnu zavaru. Poroznost može varirati od izuzetno sitne mikroporoznosti pa sve do grubih pora promjera 3 ili 4 mm (Dubrovečak, 2021.).

Utvrđeno je da se morfologija kompleksne intermetalne faze  $Al_6$  (Mn, Fe) značajno razlikuje u ZUT-u i u osnovnom materijalu, ovisno o brzini hlađenja i odvođenja topline nakon zagrijavanja i ravnjanja lima. Kao što je prikazano na slici 9 d, u području ZUT-a se pojavljuje kao „globularna“ faza okruglastog ili rozetastog oblika. U osnovnom materijalu intermetalna faza  $Al_6$  (Mn, Fe) se pojavljuje u „poligonalno štapičastom“ obliku kao što je prikazano na slici 8 d.

Intermetalna faza  $Al_3Mg_2$  pravilno je dispergirana u mikrostrukturi i nema nekih bitnih morfoloških razlika u oblicima, obično su fino-globularnog oblika u zoni ZUT-a i osnovnog materijala.

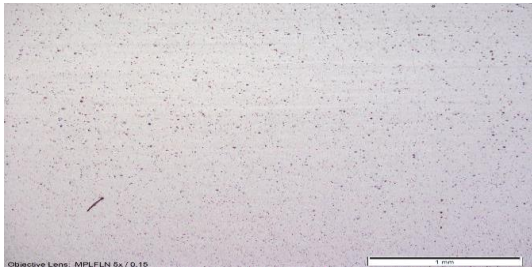
Uzevši u obzir sva navedena zapažanja i analizirajući snimke mikrostrukture upotrebom mikroskopije, nedvojbeno je jasno kako je unos topline imao utjecaj na samu mikrostrukturu promatranih aluminijskih limova, upravo u samom ZUT-u. Bez obzira na izmjene koje su se pojavile, u vidu nečistoća i plinske poroznosti unutar ZUT-a, one nisu utjecale značajno na svojstva osnovnog materijala R.



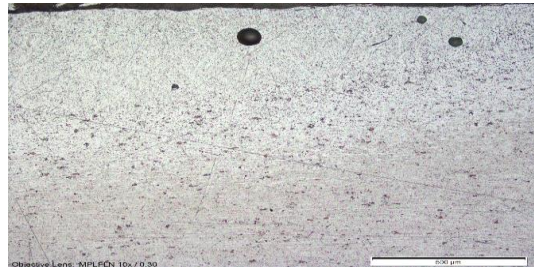
## 6. MIKROSKOPSKA MJERENJA VELIČINE ZUT-a

Na slici 14 prikazani su svi uzorci snimljeni metalografskim mikroskopom pri istom uvećanju 50 x u svrhu usporedbe veličine ZUT-a.

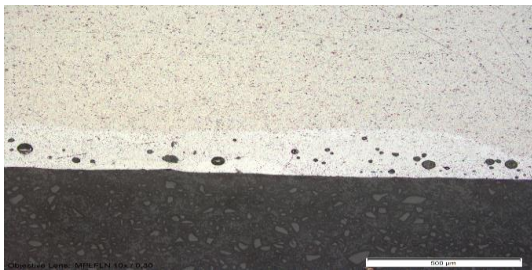
Slika 14. Slike uzoraka pri uvećanju 50x u svrhu usporedbe veličine ZUT-a



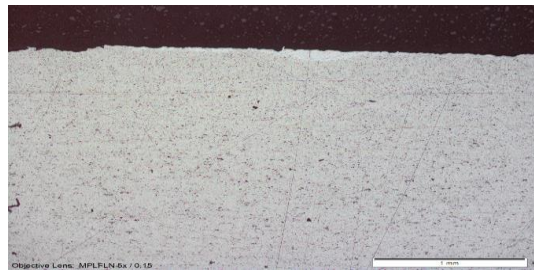
a) Mikrostrukturalna analiza referentnog uzorka (R), bez ravnjanja limova



b) Mikrostrukturalna analiza uzorka (P1), područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom



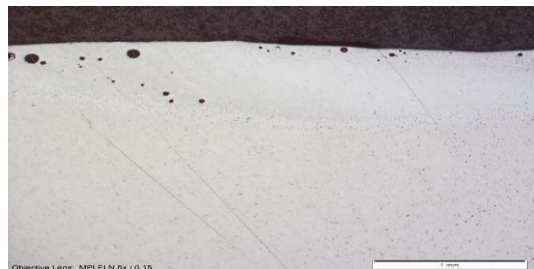
c) Mikrostrukturalna analiza uzorka (P2), područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom



d) Mikrostrukturalna analiza uzorka (P3), područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom



e) Mikrostrukturalna analiza uzorka (P4), područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova TIG opremom



f) Mikrostrukturalna analiza uzorka (P5), područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom

Prilikom analize mikroskopskih mjerenja ZUT-a, promatranih uzoraka od P1 do P5, pri uvećanju 50x, jasno je vidljiv utjecaj unosa topline na pojedine uzorke odnosno kako se s povećanjem količine topline prema parametrima u tablici 2, povećava i sam ZUT, odnosno osnovni materijal slabi u navedenoj zoni te postaje podložan koroziji i lomu, upravo u ZUT-u te što je on veći, veće je i oslabljenje.



## 7. ZAKLJUČAK

Budući da izloženost vanjskom izvoru topline može utjecati na mikrostrukturu materijala, ovisno o uvjetima grijanja i hlađenja, mehanička svojstva materijala mogu biti izmijenjena.

Za potrebe ovog završnog rada provedena je detaljna analiza mikrostrukture aluminijske legure 5083 H321M nakon procesa TIG zavarivanja i ravnjanja limova. Unatoč promjenama u mikrostrukturi, za sve opisane parametre obrade, promjene mikrostrukture nisu značajno različite od osnovnog materijala te se, ovisno o zagrijavanju i brzini hlađenja odnosno odvođenja topline, u nekim je uzorcima ZUT pokazao više ili niže promjene u mikrostrukturi.

Slijedom numeričkih vrijednosti unosa topline te promatranih rezultata na mikroskopu dokazano je kako se već i mikroskopom može dati sud o mehaničkim svojstvima te su mikroskopska mjerenja kao takva neizostavna industrijska mjerenja. Ovo istraživanje također potvrđuje važnost mikrostrukturne analize u industrijskim mjerenjima kako bi se ocijenila kvaliteta materijala i osigurala sigurnost i pouzdanost u brodogradnji i drugim tehničkim industrijama. To i jest razlog zašto su ona propisana u brojnim normama, primjerice za kontrolu kvalitete zavarenih spojeva HRN EN 13018.

Prilikom analiziranja uzoraka te pojašnjavanja analize i očitavanja istih, u poglavlju 5 i 6, dokazuje se utjecaj zagrijavanja te nastale promjene u osnovno materijalu kao i njegovo slabljenje pri povećavanju unosa topline te veća izloženost koroziji ili lomu materijala u samoj zoni utjecaja topline.

U konačnici, mikroskopija se pokazala kao izuzetno korisna metoda za provođenje industrijskih mjerenja s obiljem informacija koje doprinose pouzdanim rezultatima. Daljnja istraživanja mogla bi se usmjeriti na dublje razumijevanje veze između mikrostrukture i mehaničkih svojstava legure 5083 H321M te na razvoj optimiziranih postupaka zavarivanja i ravnjanja limova u brodogradnji i drugim tehničkim aplikacijama.

## LITERATURA

Dubovečak, L. (2021). Primjena aluminijskih legura u brodogradnji (Završni rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:712040>

Horvat, M, R.et.al. (2014). Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja. Tehnički glasnik 8, (4), 426 – 432.

Pentek, I. R.et.al. (2023). "MICROSTRUCTURE CHANGES ANALYSIS IN AlMg4,5Mn0,7 ALLOY AFTER TIG METHOD HEAT INPUT ", International Conference MATRIB 2023, 273 – 284.

Savić, I. (2022). „Ispitivanje utjecaja parametara ravnjanja limova TIG postupkom na mehanička svojstva aluminijskih limova“ (Završni rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:212:569486>

## Popis slika

Slika 1. Skica ploče korištene kao trup broda .....	4
Slika 2. Pojačanja na trupu broda .....	5
Slika 3. Prikaz ravnjanja odnosno unosa topline i prikaz zone utjecaja topline (ZUT) .	6
Slika 4. <i>Odstranjen površinski sloj Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i> .....	7
Slika 5. Uzorci neposredno prije pripreme za ispitivanje u laboratoriju odnosno prije prilagodbe za kalup .....	7
Slika 6. Skica uzimanja uzoraka iz lima .....	8
Slika 7. Ulijevanje smole u kalup .....	9
Slika 8. Mikrostrukturna analiza referentnog uzorka (R), bez ravnjanja limova .....	11
Slika 9. Mikrostrukturna analiza uzorka (P1), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom .....	12
Slika 10. Mikrostrukturna analiza uzorka (P2), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom .....	13
Slika 11. Mikrostrukturna analiza uzorka (P3), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom .....	14
Slika 12. Mikrostrukturna analiza uzorka (P4), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova TIG opremom .....	15
Slika 13. Mikrostrukturna analiza uzorka (P5), osnovnog materijala i područja zone utjecaja topline (ZUT), nakon ravnjanja limova sa TIG opremom .....	16
Slika 14. Slike uzoraka pri uvećanju 50x u svrhu usporedbe veličine ZUT-a .....	18

## **Popis tablica**

Tablica 1. Kemijski sastav legure 5083 prema EN 573-3 izražen u postocima masenog udjela pojedinog kemijskog elementa.....	3
Tablica 2. Podaci o unosu topline na Al-lim TIG postupkom.....	6

## **SAŽETAK**

Ovaj rad istražuje mikrostrukturne promjene aluminijske legure u zoni utjecaja topline do kojih dolazi radi unosa topline pri primjeni TIG postupka (eng. *tungsten inert gas*) kod ravnanja limova u Tehnomont Brodogradilištu d.o.o.. Promjene u mikrostrukтури analizirane su metalografski primjenom mikroskopije kao mjeriteljske metode s industrijskom primjenom. Mikroskopija se pokazala kao jedna od mjeriteljskih metoda koja vrlo brzo i jednostavno može dati sud o provedenom postupku ravnanja i provjeriti kvalitetu materijala po provedenim tehnološkim postupcima s različitim korištenim parametrima.

*Ključne riječi: mikrostruktura, zona utjecaja topline, aluminijske legure, TIG postupak*

## **SUMMARY**

This paper investigates the microstructural changes of an aluminum alloy in the heat-affected zone, which occur due to heat input during the application of the TIG process (tungsten inert gas) when straightening sheets in Tehnomont Shipyard. The changes in the microstructure were analyzed metallographically using microscopy as a measurement method with industrial application. Microscopy has proven to be one of the metrology methods that can quickly and simply make a judgment about the straightening procedure carried out and check the quality of the material according to the technological procedures carried out with different parameters used.

*Keywords: microstructure, heat-affected zone, aluminum alloy, TIG procedure*