

# Ispitivanje utjecaja parametara ravnanja limova TIG postupkom na mehanička svojstva aluminijskih limova

---

Savić, Igor

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:212:569486>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



image not found or type unknown

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



image not found or type unknown



ISTARSKO VELEUČILIŠTE – UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE  
APPLICATE

Igor Savić

**ISPITIVANJE UTJECAJA PARAMETARA RAVNANJA LIMOVA TIG  
POSTUPKOM NA MEHANIČKA SVOJSTVA ALUMINIJEVIH LIMOVA**

Završni rad

Pula, 2022



ISTARSKO VELEUČILIŠTE – UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE  
APPLICATE

Igor Savić

**ISPITIVANJE UTJECAJA PARAMETARA RAVNANJA LIMOVA TIG  
POSTUPKOM NA MEHANIČKA SVOJSTVA ALUMINIJEVIH LIMOVA**

Završni rad

**JMBAG:** 0303076447, izvanredni student

**Studijski smjer:** Stručni preddiplomski studij Mehatronika

**Predmet:** Mjeriteljstvo i upravljanje kvalitetom

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

Pula, 2022



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani Igor Savić, 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, Igor Savić, dajem odobrenje Istarskom veleučilištu – Università Istriana di scienze applicate, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom „**Ispitivanje utjecaja parametara ravnanja limova TIG postupkom na mehanička svojstva aluminijevih limova**“ 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

---

## ZAHVALA

Zahvaljujem svojoj mentorici doc.dr.sc. Vedrani Špadi, dipl.ing.kem.teh. i asistentu Ivanu Penteku, mag.ing.mech. na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći.

Također zahvaljujem kolegi Milanu Bičiću, dipl.ing., EWE koji mi je bio inspiracija za ovaj rad te na vođenju i podršci.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji i životnoj partnerici Emi koja je na ovom putu bila uz mene, jer bez njih moja postignuća nemaju nikakvu vrijednost.

## Tablica sadržaja

Tablica sadržaja .....	6
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJEVE LEGURE .....	2
2.1 Aluminijska legura 5083 H321M.....	3
3. TIG (GTAW) POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	4
3.1 Opis TIG (GTAW) postupka zavarivanja .....	5
4. PRIPREMA I PROVEDBA RAVNANJA LIMOVA TIG POSTUPKOM .....	5
4.1 Lim aluminijske legure 5083 H321M .....	5
4.2 Izrada konstrukcije .....	6
4.3 Provedba TIG postupka u svrhu ravnjanja limova.....	7
4.4 Izrada uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava .....	9
5. REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA .....	13
5.1 Kontrola kvalitete aluminijskih limova.....	13
5.2 Ispitivanje vlačne čvrstoće limova izravnatih TIG postupkom.....	15
5.3 Ispitivanje savijanjem limova izravnatih TIG postupkom .....	18
6. ZAKLJUČAK .....	19
POPIS SLIKA .....	21
POPIS TABLICA.....	22
PRILOZI.....	23
SAŽETAK .....	24
SUMMARY .....	25

## 1. UVOD

Porastom upotrebe aluminijevih legura u svim tehničkim granama, zbog svojih se dobrih svojstava sve više koriste i u brodogradnji za izradu brodskog trupa i konstrukcija. Aluminijeve legure nije potrebno dodatno površinski zaštititi, jer ne korodiraju te većina izrađenih elemenata ostaje tijekom primjene izložena vanjskim utjecajima. Slijedom toga, površina je i nakon završne obrade vidljiva te se nastoji svaku neravninu dovesti unutar raspona tolerancije radi funkcionalnosti same konstrukcije, a na koncu i estetike.

U ovom radu istražena je i opisana promjena mehaničkih svojstava nastala uslijed utjecaja topline pri ravnanju aluminijevih limova TIG (eng. *tungsten inert gas*) postupkom u svrhu optimizacije samog postupka za primjenu u proizvodnji. S obzirom kako ne postoji pisana i prihvaćena procedura ravnanja limova TIG postupkom postavlja se pitanje prihvatljivosti materijala po koncu postupka, odnosno zadovoljavaju li njegova promijenjena svojstva, zadane konstrukcijske zahtjeve. Naglasak je bio na planu i pripremi eksperimenta, preciznoj provedbi eksperimenta korištenjem mjeriteljskih metoda i mjeriteljske opreme, obradi rezultata i primjeni odgovarajućih ISO normi u svim koracima rada.

Kroz sljedeća poglavlja ovoga rada, biti će opisani materijali i metode, provedba postupka ravnanja s pripadajućim parametrima te uzorkovanje i pripremanje uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava u laboratoriju propisanim metodama. Nakon ispitivanja u laboratoriju, usporedit će se dobiveni rezultati s podacima o osnovnom materijalu i kao cilj ovog rada, utvrditi zadovoljava li materijal (lim aluminijeve legure) izravnanim određenim parametrima TIG postupka kriterije za daljnje korištenje ili ga treba odbaciti.



## 2. ALUMINIJEVE LEGURE

Posebne kombinacije svojstava koje imaju aluminij i njegove legure, čine ih jednim od najsvestranijih, najekonomičnijih i zapravo optimalnih materijala za vrlo širok raspon primjene. Aluminij i njegove legure se koriste kao mekane, duktilne folije za omatanje pa sve do najzahtjevnijih inženjerskih konstrukcija. Danas su aluminijske legure druge po redu u primjeni kao konstrukcijski metali, odmah nakon čelika.[1]

Gustoća aluminija od  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , što je otprilike jedna trećina gustoće čelika, uz visoku čvrstoću, dopušta projektiranje i izradu izdržljivih, a istovremeno laganih konstrukcija.[1]

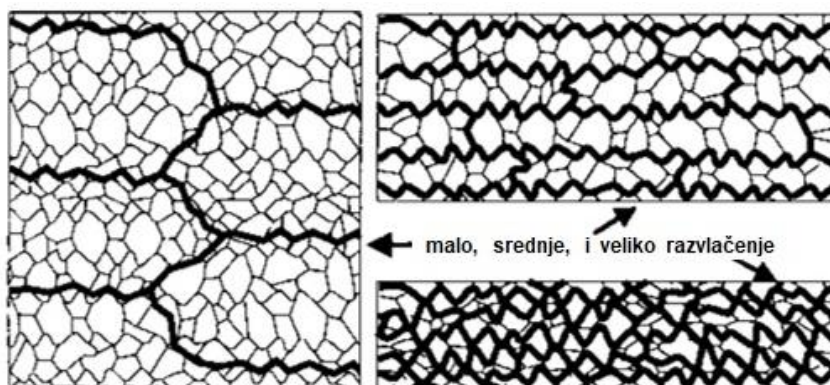
Izložene površine reagiraju s kisikom i stvaraju inertni tanki film aluminijskog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) koji zaustavlja stvaranje daljnje korozije, a u slučaju mehaničkog utjecaja i uklanjanja sloja oksida taj film se u kontaktu s kisikom ponovno stvara na površini. Prikladno legirani i obrađeni aluminij može imati visoku otpornost na vlagu, salinitet i ostale vanjske utjecaje uključujući i širok spektar kemijskih tvari.[1]

Proizvodi od aluminijskih legura mogu biti valjani i lijevani te se nadalje dijele prema legirnom elementu i toplinskoj obradi. Neprofitno društvo iz Amerike (eng. „*Aluminum Association*“) razvilo je sistem označavanja aluminija.[1] Utjecaj topline na mehanička svojstva materijala, koja se unosi pri ravnanju limova TIG postupkom ispitan je na aluminijskoj leguri oznake 5083 H321M koja se između ostalog koristi u brodogradnji.

Za upravljanje kvalitetom u proizvodnji postoji čitav niz propisanih postupaka uvođenja novih metoda i njihove validacije i radnji koje omogućuju sljedivost i poslovanje s manjim brojem grešaka i problema. Prvi korak uvijek predstavlja utvrđivanje početnih parametara, ispitivanja ili provedbe eksperimenta te na temelju rezultata mjerenja provodi se optimizacija postupka ili njegovo odbacivanje. U ovom radu je ispitana mogućnost uvođenja novog postupka ravnanja limova pri čemu je bilo potrebno ispitati parametre postupka i materijala te ih ocijeniti na temelju rezultata mjerenja. Potom se prema svim važećim procedurama mogu propisati postupci i uvesti u proizvodnju uz zahtjev za odobrenje postupka od strane certifikacijskog tijela koje će tada provjeriti i sve eksperimentalne mjeriteljske podatke na kojima se temelji sam postupak, a koji su dio ovog završnog rada.

## 2.1 Aluminijeva legura 5083 H321M

Aluminijeva legura 5083 H321M u pravilu ne zahtjeva toplinsku obradu. Glavni legirni element u leguri 5083 je magnezij (Mg). Kod legura koje se ne tretiraju toplinski, njihova se čvrstoća postiže hladnim postupkom deformiranja odnosno deformiranjem na sobnoj temperaturi. Metoda razvlačenja koristi se za duktilne materijale koji nemaju definiranu granicu elastičnosti te se označava sa slovom H dok brojevi u nastavku označavaju slijed procesa.[1] Na slici 1. prikazana je promjena granica kristalnih zrna uslijed postupaka razvlačenja.



Slika 1. Granice zrna prilikom razvlačenja [2]

Ukoliko je materijal testiran na otpornost od korozije, dodaje se oznaka M. Zbog svoje cjenovne dostupnosti, a dobrih karakteristika kao što su visoka čvrstoća, otpornost na koroziju te zavarljivost legura 5083 u širokoj je primjeni u izradi plovila, letjelica, kriogenih spremnika, posuda pod tlakom te za mnogo vrsta zavarenih sklopova.

Oznaka legure prema europskoj normi (EN 573-3) je AlMg4.5Mn0.7. Kemijski sastav legure 5083 prema istoj normi izražen preko masenih udjela u postocima pojedinog kemijskog elementa u leguri, dan je u tablici 1.

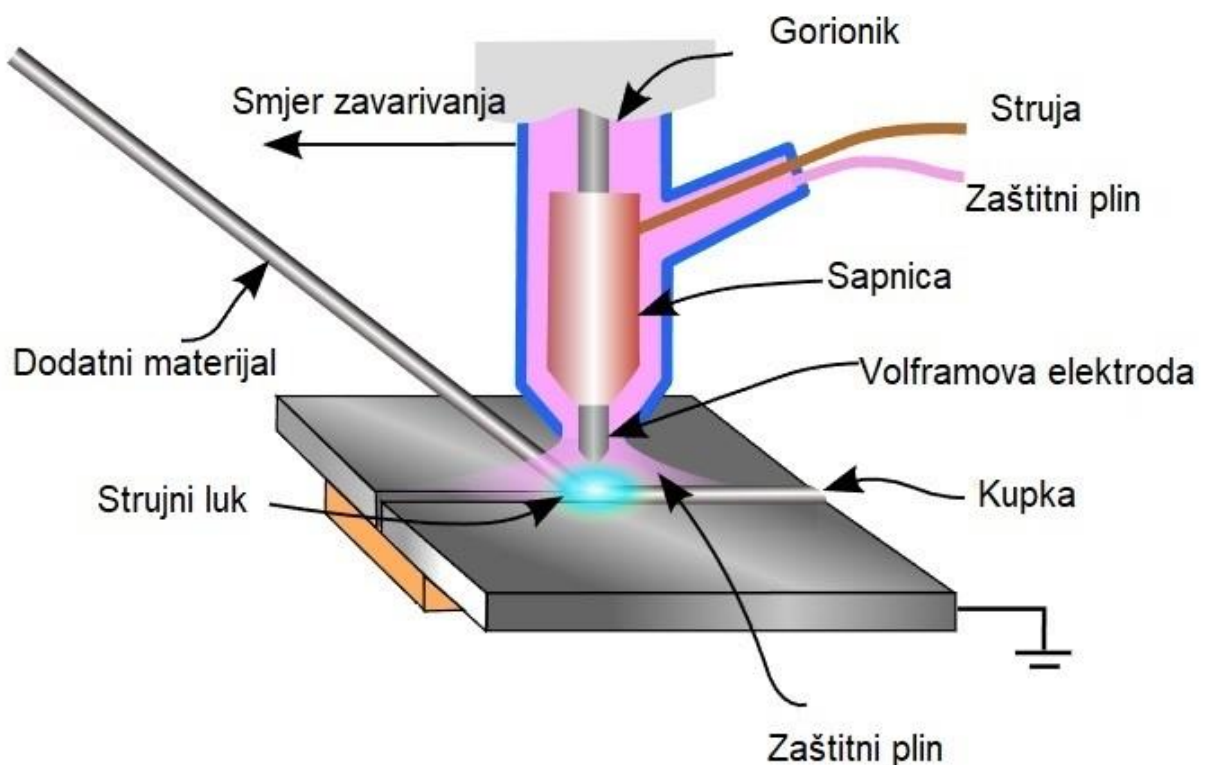
Tablica 1. Kemijski sastav legure 5083 prema EN 573-3 [3]

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

Legura 5083 ima vlačnu čvrstoću u rasponu od 305 MPa do 385 MPa, granicu razvlačenja između 215 i 295 MPa i istežanje 12 %.[4]

### 3. TIG (GTAW) POSTUPAK ZAVARIVANJA

TIG postupak zavarivanja je dobio naziv prema plinskom elektrolučnom zavarivanju volframovom netaljivom elektrodom. Rjeđe korištena oznaka GTAW potječe od eng. *gas tungsten arc welding*, dok je u Europi popularniji naziv TIG koji potječe od eng. *tungsten inert gas*. TIG je vrlo čest postupak za zavarivanje aluminija razvijen davne 1944. godine te se i danas koristi za zavarivanje aluminijevih legura. Ovaj postupak zavarivanja se izvodi kada se zahtijevaju najkvalitetniji zavareni spojevi koji se koriste u kritičnim primjenama kao primjerice cijevni zavareni spojevi potpune penetracije na kriogenim tlačnim posudama. Za većinu primjena koristi se izmjenična struja. Iako danas postupak zavarivanja taljivim elektrodama zamjenjuje TIG postupak, iz razloga što je sporiji pri zavarivanju debljih limova, TIG postupak i dalje ima neizostavno mjesto u zavarivanju aluminija. Zavarivanje volframovom netaljivom elektrodom s izmjeničnom strujom u atmosferi čistog argona trenutno je najkorištenije za zavarivanje tanjih aluminijevih limova (debljine do 6,5 mm) te kod zavarenih spojeva gdje je izgled veoma bitan.[5]



Slika 2. Sastavni dijelovi TIG procesa [6]

### **3.1 Opis TIG (GTAW) postupka zavarivanja**

Toplina potrebna za plinsko elektrolučno zavarivanje volframovom netaljivom elektrodom postiže se uspostavljanjem električnog luka između netaljive volframove elektrode i obratka. Elektroda je izrađena od čistog volframa ili od volframovih legura. Zona utjecaja topline, talina i volframova elektroda su zaštićene od atmosferskih utjecaja, inertnim plinom argonom. Zavar se izrađuje primjenom luka, koji tali obradak i dodatni materijal, te se nakon hlađenja dobije zavareni spoj. Postoji više kombinacija u parametrima struje i polariteta ovisno o tome koji se materijal zavaruje, vrsti pripreme spoja, debljini, itd. Upravo su ti parametri značajni, jer se njima može kontrolirati utjecaj na materijal spram zahtjeva kvalitete te kritičnih vrijednosti mehaničkih svojstava, primjerice vlačne čvrstoće, zadanih normama koje se moraju provjeriti te moraju postići određenu vrijednost propisanu normama ili specifičnim zahtjevima.

## **4. PRIPREMA I PROVEDBA RAVNANJA LIMOVA TIG POSTUPKOM**

### **4.1 Lim aluminijeve legure 5083 H321M**

Za simuliranje brodske strukture na kojoj će se provoditi TIG postupak u svrhu ravnjanja, korišten je lim aluminijeve legure 5083 H321M. Materijal dolazi u limovima dimenzija 4,00 mm x 2.000,00 mm x 6.000,00 mm (debljina x širina x dužina) šarže 572640100. Certifikat materijala (LR HAM000004-347, 3.2 certifikat) omogućava sljedivost te je istovremeno i potvrda kako je proizveden u kontroliranom i prihvaćenom procesu i vizualno pregledan od strane inspektora Lloyd Registra. Naknadno je zbog potrebe gradnje pregledan i prihvaćen od strane inspektora Bureau Veritasa (u nastavku BV) što se može vidjeti u prilogu 1.

Na tvorničkom certifikatu su vidljivi rezultati ispitivanja kemijskog sastava i mehaničkih svojstava izvršenih od strane proizvođača tako da serija iz koje ovaj lim dolazi ima svoje specifične podatke prikazane u tablicama 2 i 3. Kemijski sastav izražen je preko masenih udjela pojedinih kemijskih elemenata u postocima.

Tablica 2. Kemijski sastav legure 5083 šarže 572640100 [7]

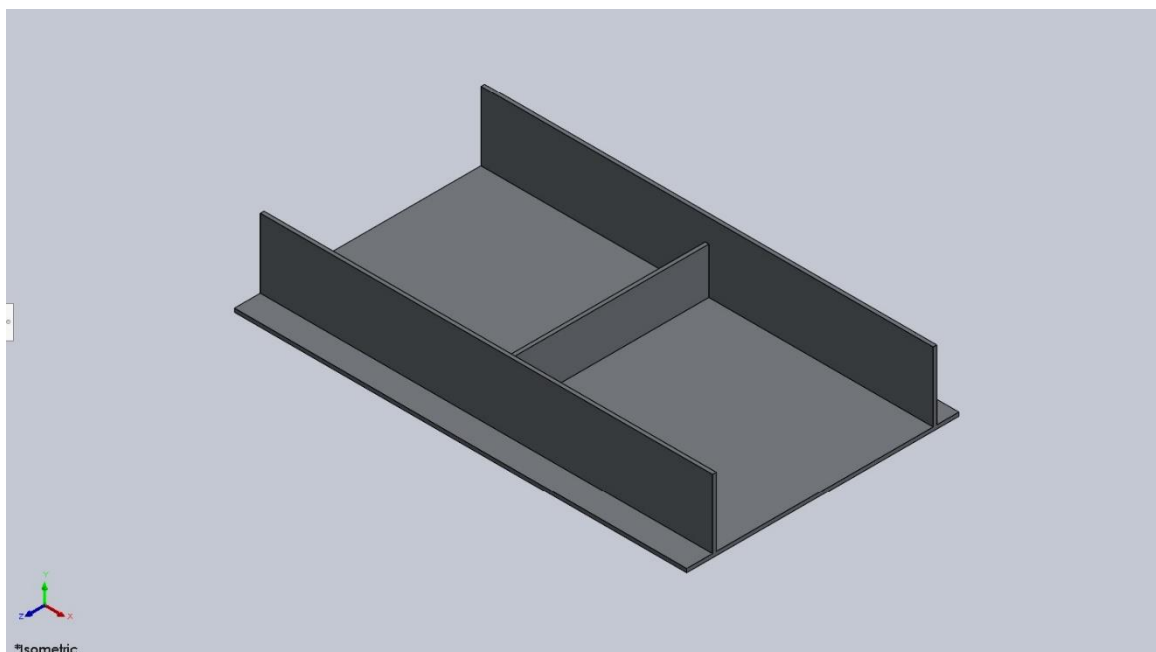
Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ti%
0,17	0,27	0,04	0,77	4,70	0,07	0,01	0,01

Tablica 3. Mehanička svojstva legure 5083 šarže 572640100 [7]

Vlačna čvrstoća $R_m$ [MPa]	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [MPa]	Istezanje A [%]
344	243	13

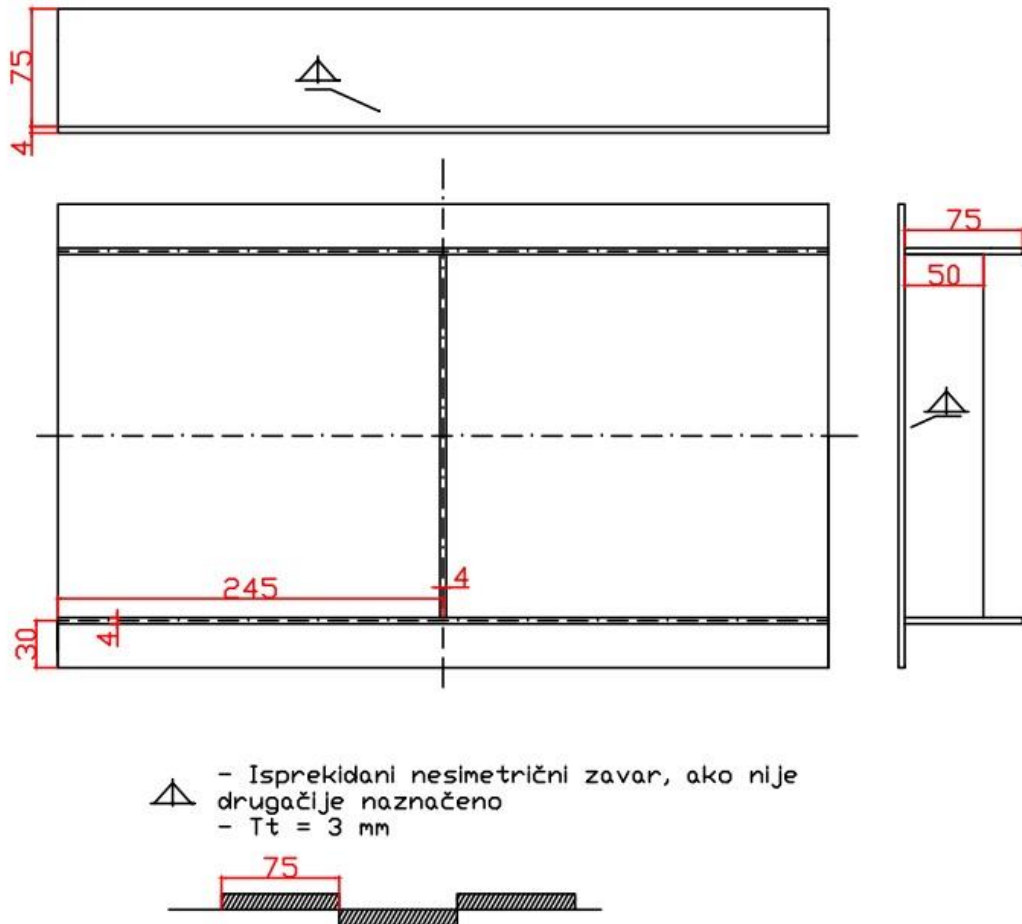
## 4.2 Izrada konstrukcije

Prije samog početka unošenja topline u svrhu ravnjanja, potrebno je na neki način simulirati brodsku strukturu. Direktno unošenje topline bi ploču bez konstrukcije samo deformiralo i bila bi neupotrebljiva. Iz tog razloga ploča je pojačana dodatnom konstrukcijom čiji je model prikazan na slici 3.



Slika 3. Model konstrukcije, Solidworks

Nakon osmišljenog projektnog modela, spajaju se pojačanja za osnovni aluminijski lim i izrađuje konstrukcija. Toplina ima utjecaj na lim i kod zavarivanja te u svrhu što točnijih podataka kasnije konstrukcija mora biti zavarena istim tipom spoja kao i brodska konstrukcija. Na slici 4. prikazan je nacrt izrade i opisana je vrsta spoja.



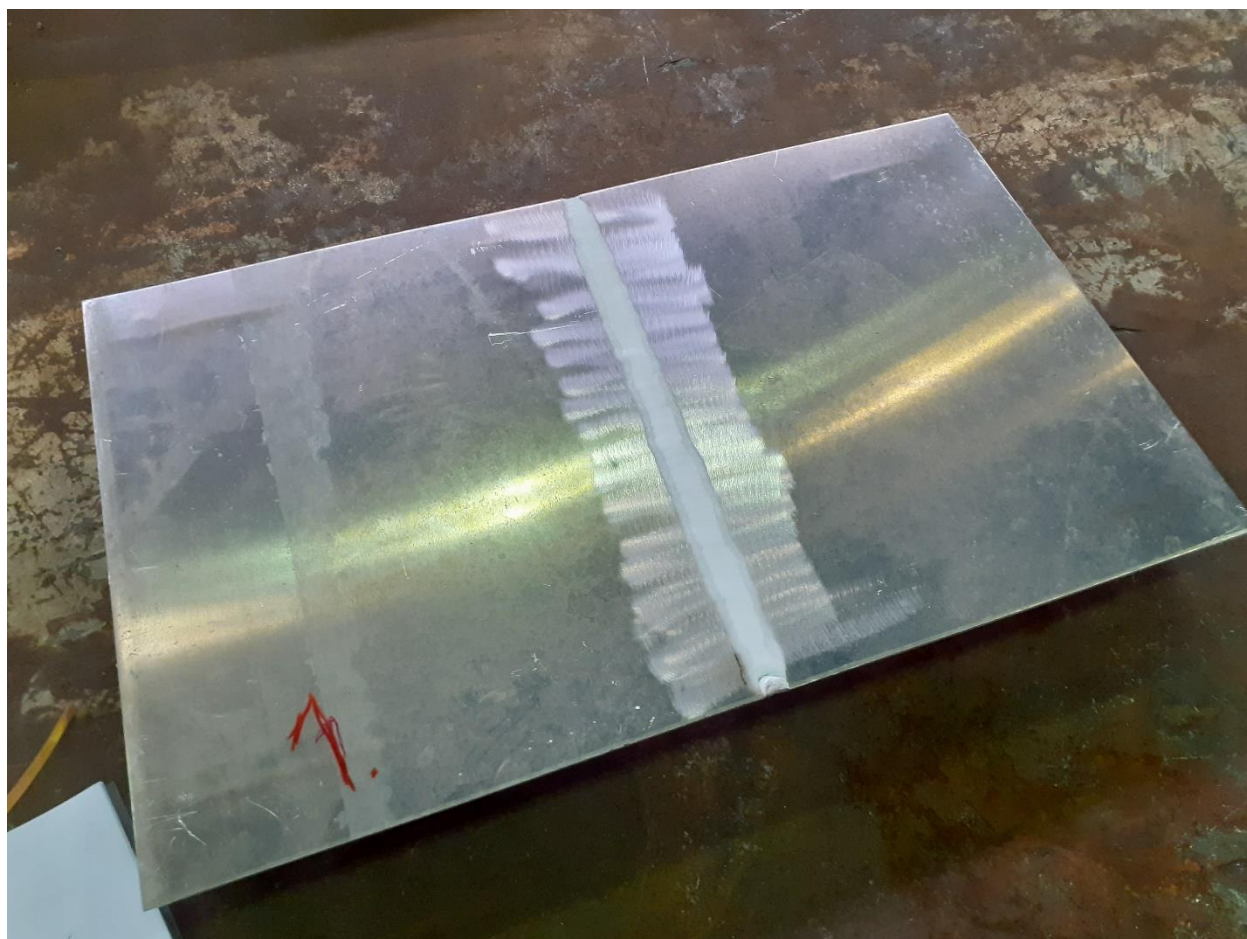
Slika 4. Nacrt konstrukcije, AutoCad

### 4.3 Provedba TIG postupka u svrhu ravnanja limova

Prije početka paljenja električnog luka i unosa topline, na aluminijevom limu je izbrušeno područje ravnanja i skinut je aluminijev oksid kao što je prikazano na slici 5. Limovi su grijani prema dugogodišnjem iskustvu tehnologa u brodogradilištu (podaci poznati autoru). Za provedbu postupka ravnanja korišten je izmjenični TIG uređaj (Kemppi master TIG), zaobljena volframova elektroda, promjera 2,4 mm i argon kao zaštitni plin. Pripremljeno je 9 limova legure 5083 oznake 1-9 iz kojih su izrađeni uzorci (7 uzoraka za svaki lim – 5 za vlačno ispitivanje i 2 za ispitivanje savijanjem) te je na njima proveden postupak ravnanja različitim parametrima unosa topline. Na limu broj 5, nije izbrušen aluminijev oksid. Dok su limovi 6 i 9 nakon završenog grijanja, ohlađeni vodom, što se u

praksi ne koristi, ali u svrhu istraživanja bilo je korisno utvrditi i utjecaj eventualnog hlađenja vodom na mehanička svojstva.

Ravnanje se provodi točno na mjestu poprečnog pojačanja, kako ne bi došlo do deformacije.



Slika 5. Lim nakon ravnanja

U skladu sa normom EN ISO 1011-1:2009, izračunat je i zapisan unos topline (Q).

Tablica 4., pokazuje podatke o unesenoj toplini (parametre ravnanja) na pojedini lim, odnosno dvaput na limove 5 i 9.

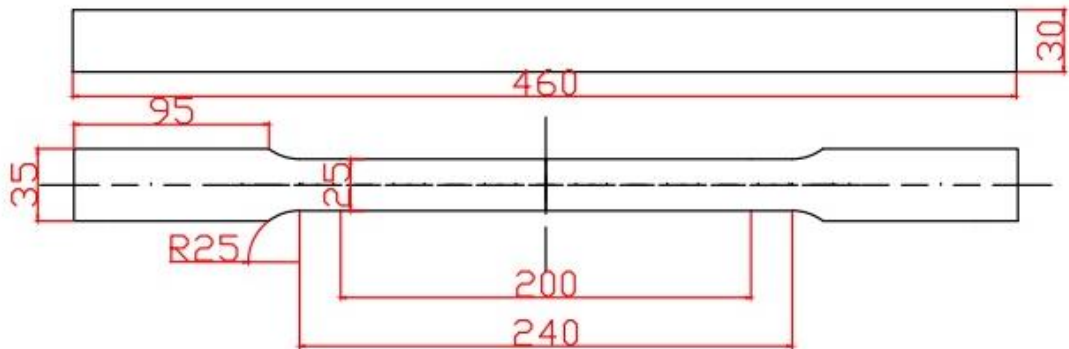
Tablica 4. Parametri ravnanja

Broj ploče	Unos topline Q [ kJ/mm ]
1.	0,4252
2.	0,3477
3.	0,3264
4.	0,3049
5.1	0,3376
5.2	0,3795
6.	0,4958
7.	0,7491
8.	0,4427
9.1	0,4264
9.2	0,4217

#### 4.4 Izrada uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava

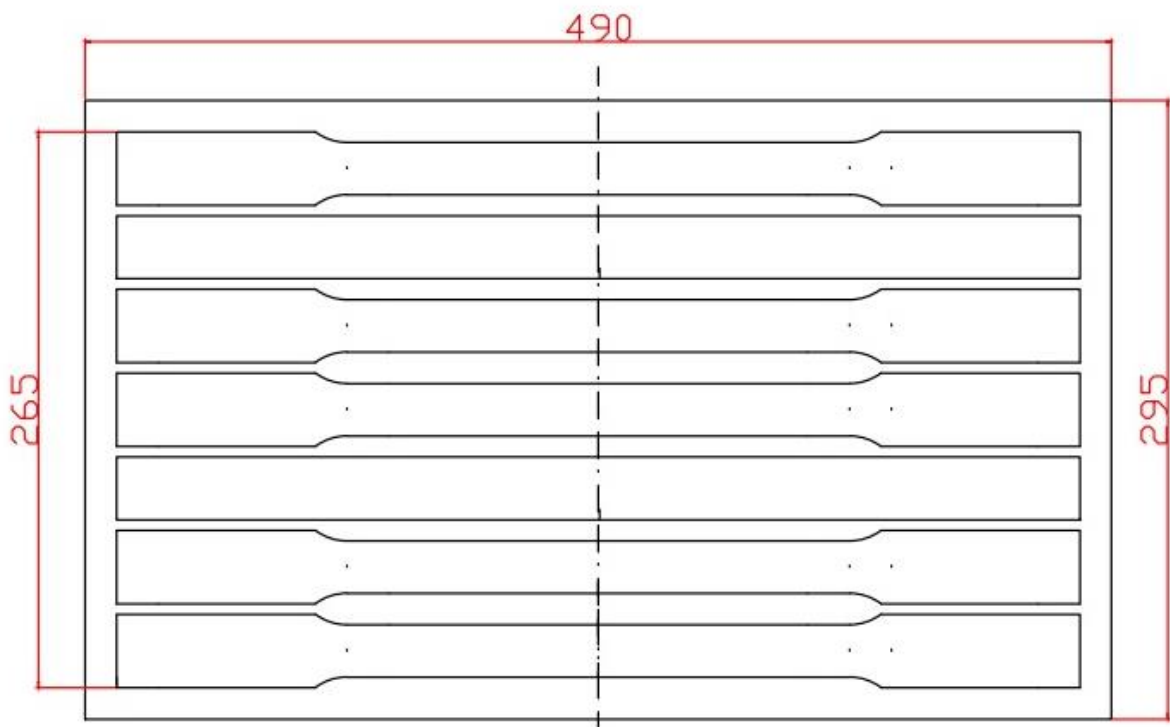
Za izradu ispitnih uzoraka prema pravilima BV-a [4], izrađen je nacrt uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava (slika 6) koji prikazuje epruvetu za ispitivanje čvrstoće savijanjem (pravokutnik) te epruvetu za vlačno ispitivanje.





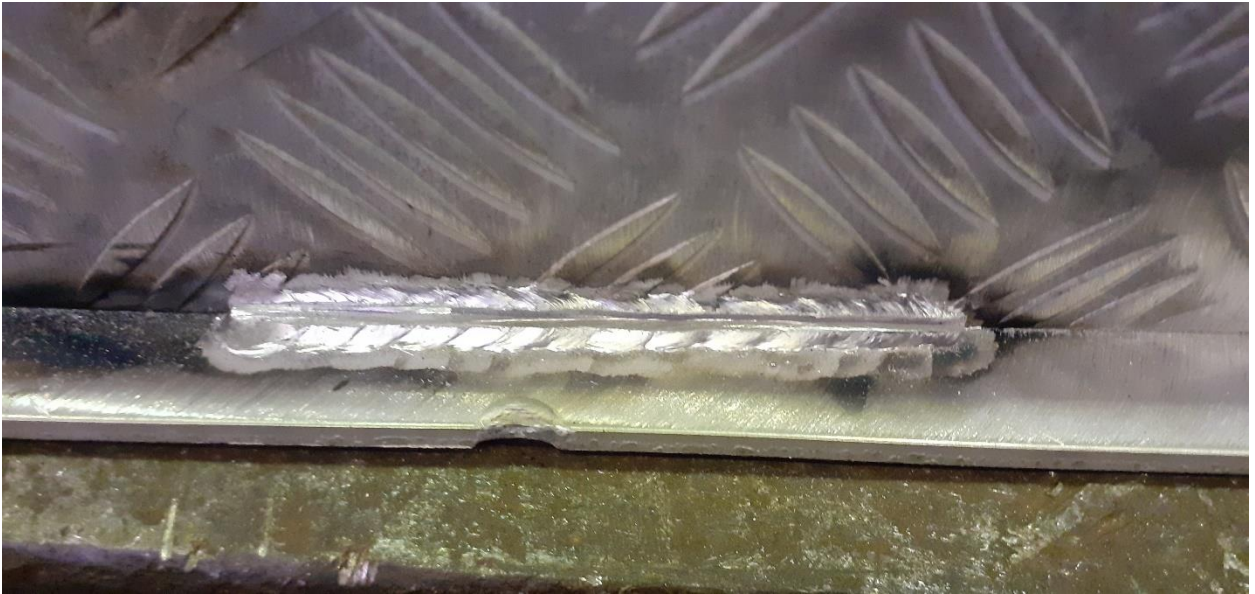
Slika 6. Nacrt ispitnih uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava, AutoCad

Ispitni su uzorci izrezani iz ploča od početka paljenja luka prema završetku (redom M1, S1, M2, M3, S2, M4, M5). Iz pojedinog grijanog aluminijevog lima pripremljeno je tri uzorka za vlačno ispitivanje i dva uzorka za savijanje, prema nacrtu krojenja prikazanom na slici 7.



Slika 7. Nacrt krojenja, AutoCad

Za samu izradu uzoraka od velikog je značaja priprema površine. Potrebno je po završetku ravnanja, odnosno nakon hlađenja, ukloniti pojačanja. Pojačanja se uklone na način da se brusilicom proreže zavareni spoj, bez dodirivanja površine lima, odnosno osnovnog materijala (slika 8). Zatim se ostatak zavarenog spoja (slika 9) mora ukloniti brušenjem, kako ne bi došlo do oštećenja ispitne površine.



Slika 8. Prorez na zavarenom spoju



Slika 9. Ostaci zavarenog spoja

Po završetku pripreme uzoraka svi uzorci su označeni s tri oznake. Prva oznaka označava broj lima, druga označava vrstu ispitivanja i treća broj ispitnog uzorka. Kako je

prije navedeno, redoslijed je od paljenja električnog luka nadalje. Na slici 10 prikazano je 5 epruveta pripremljenih za vlačno ispitivanje u laboratoriju.



Slika 10. Ispitni uzorci za vlačno ispitivanje

## 5. REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

Ispitivanja utjecaja TIG postupka ravnjanja limova na mehanička svojstva Al-limova legure 5083 su izvršena u akreditiranom ispitnom laboratoriju Centra za istraživanje materijala METRIS koji uspješno održava sustav za upravljanje kvalitetom prema zahtjevima norme HRN EN ISO/IEC 17025 i koji posjeduje akreditaciju za 5 ispitnih metoda. Ispitivanja su provedena na akreditiranoj i umjerenoj ispitnoj opremi od strane ovlaštenog i educiranog osoblja. Kemijski sastav ispitan je na optičkom emisijskom spektrometru s pobudom uzorka metodom tinjajućeg izboja GDS LECO 500A, a ispitivanje čvrstoće vlačnim testom je provedeno u skladu sa normom HRN EN ISO 6892-1:2019 na uređaju Messphysik Beta 250. Ispitivanje savijanjem također je izvršeno na univerzalnoj statičkoj kidalici Messphysik Beta 250 prema pravilima BV-a.[4]

### 5.1 Kontrola kvalitete aluminijskih limova

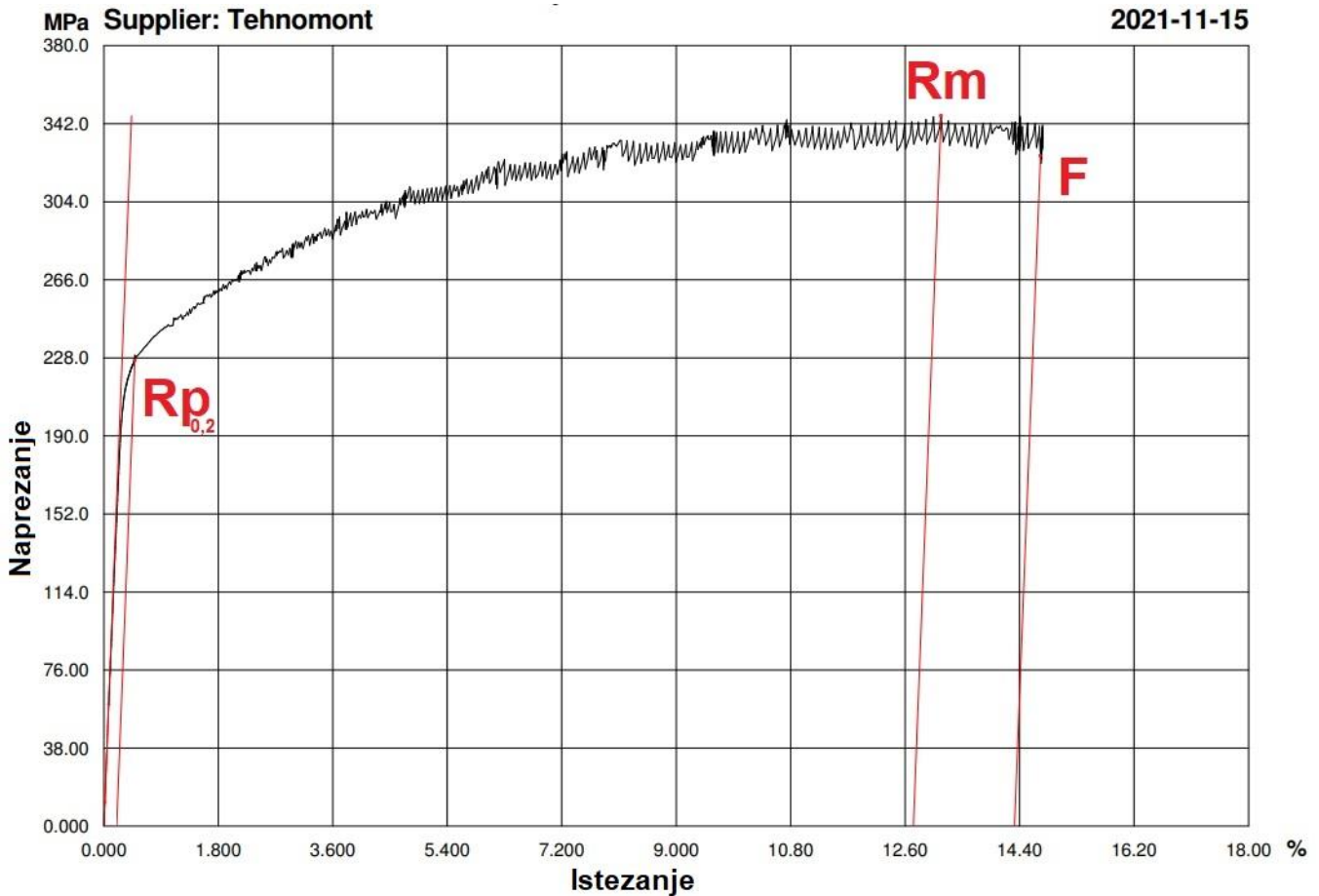
Prije ispitivanja utjecaja parametara ravnjanja na ispitnim uzorcima, od istog aluminijskog lima (šarže 572640100), izrađena su prema pravilima BV-a, dva referentna ispitna uzorka za vlačno ispitivanje (u daljnjem tekstu označeni kao R1 i R2). Ispitan je kemijski sastav u svrhu kontrole kvalitete te je napravljen vlačni test. Prema kemijskom sastavu materijal je sukladan certifikatu te kemijski sastav nije svojstvo na koje se utječe ravnjanjem TIG postupkom. Dobiveni rezultati mehaničkih svojstava lima osim kontrole kvalitete i sukladnosti s certifikatom materijala (tablica 5) omogućuju usporedbu s vrijednostima vlačne čvrstoće i granice razvlačenja za materijal podvrgnut uvjetima ravnjanja.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja referentnih uzoraka [8]

Oznaka uzorka	Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ [MPa]	Vlačna čvrstoća $R_m$ [MPa]	Maksimalna sila $F_m$ [kN]	Istezanje $A$ [%]
R1	226,6	345,8	34,52	14,32
R2	226,2	344,8	34,40	15,97

Krivulja provedbe ispitivanja, odnosno dijagram naprezanje – istezanje prikazan je na slici 11. Točka  $R_{p0,2}$  označava konvencionalnu, odnosno dogovorenu granicu razvlačenja, a

predstavlja naprezanje koje se pojavljuje u materijalu kada se ostvari 0,2% plastične U točki gdje krivulja počinje padati postignuta je vlačna čvrstoća, odnosno to je točka maksimalnog naprezanja  $R_m$ . Nakon ove točke dolazi do dodatnog istezanja čak i smanjenjem primijenjene sile te dolazi do prijeloma u točki F.



Slika 11. Dijagram naprezanje - istezanje kao rezultat vlačnog testa uzorka R1

## 5.2 Ispitivanje vlačne čvrstoće limova izravnatih TIG postupkom

Slika 12 prikazuje ispitni uzorak uhvaćen čeljustima stroja tako da je grijana zona u centru te se vide i oznake laserskog ekstenzometra koji omogućava mjerenje pomaka odnosno produljenja epruvete. U tablici 6 prikazani su dobiveni rezultati vlačnog ispitivanja za svaki pojedini uzorak te je napravljena usporedba sa referentnim uzorcima.



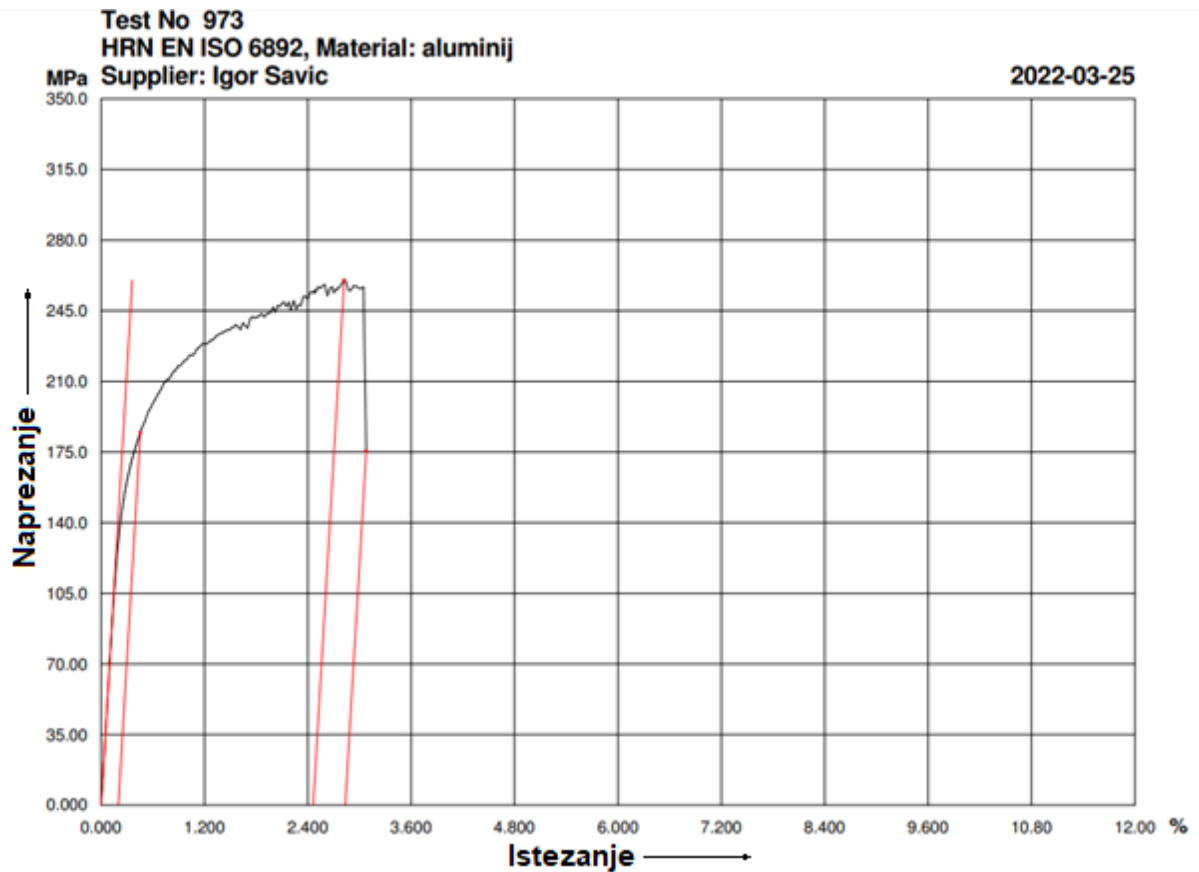
Slika 12. Uzorak na kidalici prije početka ispitivanja

Bitno je naglasiti kako se dobiveni rezultati ocjenjuju prema tablici iz pravila BV-a [4], u kojoj zadana minimalna (kritična) vrijednost vlačne čvrstoće za leguru 5083 iznosi 305 MPa. Iz tablice 6 vidljivo je kako uzorak iz aluminijevog lima, oznake 7M5 nema zadovoljavajuću vlačnu čvrstoću te nije za daljnje korištenje. Od ostalih mehaničkih svojstava, provedenim vlačnim testom su izmjerene i granice razvlačenja, maksimalna sila i istežanje svih uzoraka izravnatih limova te referentne legure bez ravnjanja u svrhu kontrole kvalitete te usporedbe utjecaja toplinske obrade TIG postupkom (različitih parametara) pri ravnjanju na sam materijal Al-lim legure 5083 debljine 4 mm.

Tablica 6. Rezultati vlačnog ispitivanja

BNo	Rp0.2 MPa	ΔRp0.2 %		Rm MPa	ΔRm %		Fm kN	ΔFm %		A %	ΔA %	
		R1	R2		R1	R2		R1	R2		R1	R2
R1	226.6	0	0.18	345.8	0	0.29	34.52	0	0.35	14.32	0	-10.33
R2	226.2	-0.18	0	344.8	-0.29	0	34.40	-0.35	0	15.97	11.52	0
2022/IS-1M1	209.7	-7.46	-7.29	327.10	-5.41	-5.13	32.40	-6.14	-5.81	10.14	-29.19	-36.51
2022/IS-1M2	215.4	-4.94	-4.77	330.20	-4.51	-4.23	32.92	-4.63	-4.30	8.935	-37.60	-44.05
2022/IS-1M3	211.3	-6.75	-6.59	316.10	-8.59	-8.32	31.79	-7.91	-7.59	7.797	-45.55	-51.18
2022/IS-1M4	212.1	-6.40	-6.23	323.10	-6.56	-6.29	32.41	-6.11	-5.78	8.625	-39.77	-45.99
2022/IS-1M5	207.8	-8.30	-8.13	319.50	-7.61	-7.34	32.07	-7.10	-6.77	9.020	-37.01	-43.52
2022/IS-2M1	208.1	-8.16	-8.00	319.70	-7.55	-7.28	32.24	-6.60	-6.28	9.417	-34.24	-41.03
2022/IS-2M2	210.7	-7.02	-6.85	311.90	-9.80	-9.54	31.04	-10.08	-9.77	6.606	-53.87	-58.63
2022/IS-2M3	205.9	-9.14	-8.97	315.20	-8.85	-8.58	31.65	-8.31	-7.99	7.771	-45.73	-51.34
2022/IS-2M4	205.8	-9.18	-9.02	319.00	-7.75	-7.48	32.27	-6.52	-6.19	8.979	-42.05	-48.78
2022/IS-2M5	203.5	-10.19	-10.04	316.50	-8.47	-8.21	31.60	-8.46	-8.14	8.298	-42.05	-48.04
2022/IS-3M1	209.8	-7.41	-7.25	308.70	-10.73	-10.47	31.39	-9.07	-8.75	7.182	-49.85	-55.03
2022/IS-3M2	207.7	-8.34	-8.18	302.50	-12.52	-12.27	30.44	-11.82	-11.51	4.971	-65.29	-68.87
2022/IS-3M3	206.0	-9.09	-8.93	314.00	-9.20	-8.93	32.04	-7.18	-6.86	7.576	-47.09	-52.56
2022/IS-3M4	206.4	-8.91	-8.75	317.20	-8.27	-8.00	31.98	-7.36	-7.03	8.844	-38.24	-44.62
2022/IS-3M5	196.8	-13.15	-13.00	314.80	-8.96	-8.70	31.66	-8.29	-7.97	8.019	-44.00	-49.79
2022/IS-4M1	212.3	-6.31	-6.15	326.10	-5.70	-5.42	32.42	-6.08	-5.76	10.32	-27.93	-35.38
2022/IS-4M2	212.7	-6.13	-5.97	321.50	-7.03	-6.76	32.54	-5.74	-5.41	8.155	-43.05	-48.94
2022/IS-4M3	209.6	-7.50	-7.34	314.80	-8.96	-8.70	31.56	-8.57	-8.26	7.663	-46.49	-52.02
2022/IS-4M4	214.9	-5.16	-5.00	328.70	-4.95	-4.67	32.86	-4.81	-4.48	8.950	-37.50	-43.96
2022/IS-4M5	209.6	-7.50	-7.34	318.80	-7.81	-7.54	31.56	-8.57	-8.26	8.145	-43.12	-49.00
2022/IS-5M1	203.3	-10.28	-10.12	320.40	-7.35	-7.08	32.40	-6.14	-5.81	9.951	-30.51	-37.69
2022/IS-5M2	204.4	-9.80	-9.64	309.70	-10.44	-10.18	31.51	-8.72	-8.40	7.123	-50.26	-55.40
2022/IS-5M3	200.2	-11.65	-11.49	323.30	-6.51	-6.24	33.10	-4.11	-3.78	9.805	-31.53	-38.60
2022/IS-5M4	205.8	-9.18	-9.02	319.40	-7.63	-7.37	32.38	-6.20	-5.87	9.563	-33.22	-40.12
2022/IS-5M5	199.6	-11.92	-11.76	310.70	-10.15	-9.89	31.84	-7.76	-7.44	8.226	-42.56	-48.49
2022/IS-6M1	198.6	-12.36	-12.20	316.80	-8.39	-8.12	31.81	-7.85	-7.53	7.155	-50.03	-55.20
2022/IS-6M2	204.6	-9.71	-9.55	313.80	-9.25	-8.99	31.60	-8.46	-8.14	7.573	-47.12	-52.58
2022/IS-6M3	194.0	-14.39	-14.24	312.20	-9.72	-9.45	31.38	-9.10	-8.78	7.801	-45.52	-51.15
2022/IS-6M4	203.1	-10.37	-10.21	317.10	-8.30	-8.03	32.25	-6.58	-6.25	8.730	-39.04	-45.34
2022/IS-6M5	202.9	-10.46	-10.30	314.10	-9.17	-8.90	31.24	-9.50	-9.19	7.396	-48.35	-53.69
2022/IS-7M1	194.5	-14.17	-14.01	307.50	-11.08	-10.82	30.75	-10.92	-10.61	7.306	-48.98	-54.25
2022/IS-7M2	184.9	-18.40	-18.26	296.50	-14.26	-14.01	29.91	-13.35	-13.05	5.975	-58.28	-62.59
2022/IS-7M3	176.0	-22.33	-22.19	276.20	-20.13	-19.90	27.78	-19.52	-19.24	4.590	-67.95	-71.26
2022/IS-7M4	178.7	-21.14	-21.00	293.90	-15.01	-14.76	29.49	-14.57	-14.27	6.150	-57.05	-61.49
2022/IS-7M5	184.6	-18.53	-18.39	260.10	-24.78	-24.56	25.69	-25.58	-25.32	2.833	-80.22	-82.26
2022/IS-8M1	211.3	-6.75	-6.59	323.80	-6.36	-6.09	32.75	-5.13	-4.80	8.817	-38.43	-44.79
2022/IS-8M2	203.8	-10.06	-9.90	307.50	-11.08	-10.82	30.89	-10.52	-10.20	6.746	-52.89	-57.76
2022/IS-8M3	206.7	-8.78	-8.62	311.50	-9.92	-9.66	31.49	-8.78	-8.46	6.972	-51.31	-56.34
2022/IS-8M4	203.8	-10.06	-9.90	315.70	-8.70	-8.44	31.87	-7.68	-7.35	7.100	-50.42	-55.54
2022/IS-8M5	203.0	-10.41	-10.26	311.70	-9.86	-9.60	31.19	-9.65	-9.33	7.359	-48.61	-53.92
2022/IS-9M1	201.2	-11.21	-11.05	307.10	-11.19	-10.93	30.54	-11.53	-11.22	6.026	-57.92	-62.27
2022/IS-9M2	197.4	-12.89	-12.73	312.30	-9.69	-9.43	30.48	-11.70	-11.40	6.726	-53.03	-57.88
2022/IS-9M3	203.3	-10.28	-10.12	313.80	-9.25	-8.99	30.67	-11.15	-10.84	7.097	-50.44	-55.56
2022/IS-9M4	194.5	-14.17	-14.01	305.40	-11.88	-11.43	30.67	-11.15	-10.84	6.566	-54.15	-58.89
2022/IS-9M5	198.4	-12.44	-12.29	304.30	-12.00	-11.75	30.54	-11.53	-11.22	6.297	-56.03	-60.57

U nastavku, na slici 13 prikazan je dijagram naprezanje-istezanje uzorka 7M5 kod kojeg je najveći ispitani unos topline  $Q$  iznosio 0,7491 kJ/mm (tablica 4). Utjecaj topline učinio je materijal krhkim i smanjio vlačnu čvrstoću ispod donje dozvoljene granice za primjenu te legure.



Slika 13. Dijagram naprezanje – istezanje kao rezultat vlačnog testa uzorka 7M5

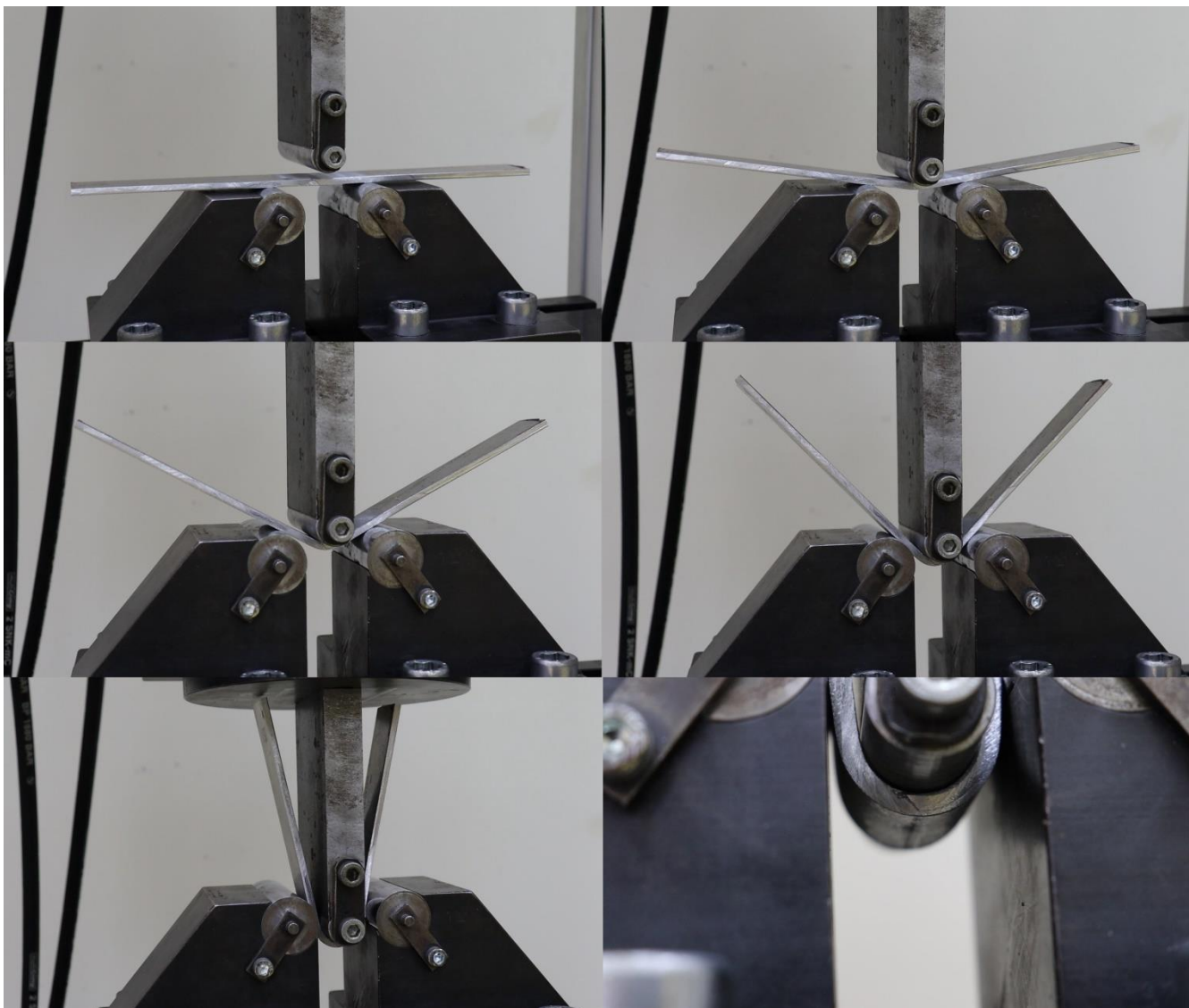
Kod ravnjanja aluminijevog lima broj sedam, unos topline je 46,6% veći od iskustvene vrijednosti, naravno sa takvim unosom topline se u praksi ravnjanje aluminijevih limova ne provodi. Ti su parametri korišteni samo u svrhu izrade ispitnih uzoraka te provedbe eksperimenta za točno određivanje koliko utjecaj topline zapravo „slabi“ materijal kako bi se znali odrediti parametri, granice unosa topline i optimizirati predloženi TIG postupak ravnjanja. Svrha je konačna izrada postupka koji se može primjenjivati u proizvodnji, kao i atestacija samog postupka. Za nove postupke u proizvodnji eksperimentalni (mjeriteljski) podaci su ulazni dokument bez kojeg validacija i verifikacija novih metoda nije moguća, posebice u proizvodnim sustavima koji su usklađeni sa zahtjevima upravljanja kvalitetom prema relevantnim ISO normama te koji podliježu nadzoru od strane ovlaštenih registara (primjerice brodograđevni sektor).



### 5.3 Ispitivanje savijanjem limova izravnatih TIG postupkom

Ispitivanje savijanjem izvodi se sukladno normi HRN EN ISO 7438 prema kojoj je potrebno saviti uzorak u toplinskoj zoni do kuta od  $180^\circ$  te ukoliko uzorak nema pukotina smatra se kako je zadovoljen kriterij norme. Prema debljini ispitnog materijala koristi se trn promjera 20 mm (slika 14).

Svi ispitivani uzorci zadovoljili su kriterije ispitivanja savijanjem.



Slika 14. Ispitivanje savijanjem

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je ispitana mogućnost uvođenja nove metode ravnjanja limova aluminijske legure TIG postupkom prema svim važećim procedurama u proizvodnji. Pripadajućim normama i pravilima spram zahtjeva kvalitete materijala, a prema rezultatima rada mogu se propisati postupci i uvesti u proizvodnju uz zahtjev za odobrenje postupka od strane certifikacijskog tijela koje će tada provjeriti sve eksperimentalne mjeriteljske podatke na kojima se temelji sam postupak, a koji su dio ovog rada.

Ovim radom potvrđena je hipoteza kako je TIG postupak prikladan postupak koji se može koristiti pri ravnaju Al-limova bez narušavanja mehaničkih svojstava ispod normom dozvoljene donje granice. Parametri eksperimenta su birani prema iskustvu tehnologa u proizvodnji i zavarivanju Al-limova. Lim (debljina, legura) je odabran prema stvarnoj potrebi u proizvodnji te je cilj rada zapravo optimizacija parametra te određivanje ulaznih podataka za kasniju radnu uputu i atestaciju postupka. Zato je odabrana jedna vrsta i debljina lima te 10 različitih parametara TIG postupka. Ispitivanjem mehaničkih svojstava dokazano je kako je vlačna čvrstoća unutar zadovoljavajućih kriterija te kako svi uzorci prolaze zahtjeve spram ispitivanja savijanjem. Potvrđeno je da limovi koji su dva puta grijani, ohlađeni vodom, kao i oni koji na svojoj površini imaju aluminijski oksid, nemaju značajnija smanjenja mehaničkih svojstava. Ovo istraživanje dalo je odgovor na pitanje što se događa sa aluminijskim limovima nakon grijanja, ali je istodobno otvorilo još mnoga pitanja, ponašaju li se i različite debljine ove aluminijske legure jednako kod unosa topline ili dolazi do drugačijih promjena i u tu svrhu su neophodna daljnja istraživanja.

Ovaj rad može poslužiti kao smjer kod sljedećih ispitivanja aluminijskoj leguri Al 5083 koja će se u budućnosti vjerojatno sve više koristiti.

## Literatura

- [1] Davis, J. R. (1993 ) *Aluminum and aluminum alloys*. ASM international
- [2] Toten, E., Mackenzie, D. (2003) *Handbook of Aluminum - Physical Metallurgy and Process*
- [3] EN, B. (2019) 573-3: Aluminium and aluminium alloys. *Chemical composition and form of wrought products*
- [4] Veritas, B. (2018) BV NR 216: Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units. *Paris: BV*
- [5] Handbook, W. (1978) *Welding Processes: Arc and Gas Welding and Cutting. Brazing and Soldering*
- [6] <https://www.weldingis.com/gtaw-welding>, preuzeto 12.05.2022.
- [7] Hydro Aluminium Rolled Products, inspection certificate No.0001146933
- [8] METRIS, izvještaj ispitivanja br: 2021/81

## POPIS SLIKA

Slika 1. Granice zrna prilikom razvlačenja.....	3
Slika 2. Sastavni dijelovi TIG procesa.....	4
Slika 3. Model konstrukcije, Solidworks.....	6
Slika 4. Nacrt konstrukcije, AutoCAD.....	7
Slika 5. Lim nakon ravnjanja.....	8
Slika 6. Nacrt ispitnih uzoraka, AutoCAD.....	10
Slika 7. Nacrt krojenja, AutoCAD .....	10
Slika 8. Prorez na zavarenom spoju.....	11
Slika 9. Ostaci zavarenog spoja.....	11
Slika 10. Ispitni uzorci za vlačno ispitivanje.....	12
Slika 11. Dijagram naprezanje - istezanje uzorka R1.....	14
Slika 12. Uzorak na kidalici prije početka ispitivanja.....	15
Slika 13. Dijagram naprezanje – istezanje kao rezultat vlačnog testa uzorka 7M5.....	17
Slika 14. Ispitivanje savijanjem.....	18

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav legure 5083 prema EN 573-3.....	3
Tablica 2. Kemijski sastav legure 5083 šarže 572640100.....	6
Tablica 3. Mehanička svojstva legure 5083 šarže 572640100.....	6
Tablica 4. Parametri ravnanja.....	9
Tablica 5. Rezultati ispitivanja referentnih uzoraka.....	13
Tablica 6. Rezultati ispitivanja vlačnog testa.....	16

# PRILOZI

Prilog 1

Inspection Certificate DIN EN 10204 3.2  
 Certificate No.0001146933/ 001  
 Page 1 / 2

Hydro Aluminium  
 Rolled Products



A

Plant Grevenbroich

Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, Aluminiumstrasse 1, D-41515 Grevenbroich Alumeco NL B.V. Ketelmeer 25 5347 JX OSS NIEDERLANDE	Packing List No./Position	136407796 000010
	Order-No./Pos./Custo.-No.	944566/ 000010/ 124982
	Customer order No.	120517957 21.09.2020
	Material-No.	65879057
	Alloy	5083
	Temper	H321M
Dimensions (Th. x W x L)	4,000 x 2000,00 x 6000,00 mm	

<b>Technical Requirements</b> Width, -Length- and Diagonal differences are measured with calibrated tape measure.	<b>Sales text</b> 5083 H321M-4,0X2000X6000 - LR-PIR ALU-SHEETS, COLD ROLLED, 5083 H321M, ACC. ASTM B928 ACC. TO EN 485.2+ 4 / EN 573.3 CERTIFICATE ACCORD. TO EN 10204 CERTIFICATION LLOYD'S REGISTER EMEA
--	--

### Batch Traceability

Package-No.	Cast Batch No.	Coil-No.	weight	No. of Pieces
9445661001	1004366402020	5726401000	2.036 [KG]	16
9445661002	1004366402020	5726401000	2.036 [KG]	16
9445661003	1004366402020	5726401000	2.036 [KG]	16
9445661004	1004366402020	5726401000	2.038 [KG]	16
9445661005	1004366402020	5726401000	1.276 [KG]	10

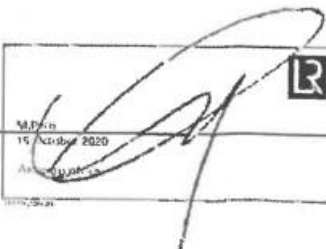

### Inspection Results

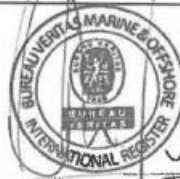
Coil-No.	Mech.Prop. transverse-direction coil-beg			Mech.Prop. transverse-direction coil-end			Asset-Test acc. ASTM G68		NAMLT-Test acc. ASTM G67	
	Rp0,2 MPa	Rm MPa	A50 %	Rp0,2 MPa	Rm MPa	A50 %	.	.	mg/cm2	.
min max	215	305	12	215	305	12				15
5726401000	243	344	13	247	341	14	PA			2

### Chemical Composition (wt.%) of Batch(es)

Cast Batch No.	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %		
min	-	-	-	0.40	4.0	0.05	-	-		
max	0.40	0.40	0.10	1.0	4.9	0.25	0.25	0.15		
100436640 2020	0.17	0.27	0.04	0.77	4.7	0.07	0.01	0.01		

We hereby certify that the material has been made by an approved process and satisfactorily tested in accordance with the Rules of Lloyd's Register.(Latest Edition)  
 \*Visual Inspection carried out with acceptable result\*

  
 M.P.E. in  
 15 October 2020  
 Approved by  




28-10-20

## SAŽETAK

U ovome radu opisano je ispitivanje utjecaja ravnanja limova TIG postupkom na mehanička svojstva aluminijskih limova legure 5083 H321. Svrha rada je bila optimizacija postupka ravnanja eksperimentalnim određivanjem i usporedbom mehaničkih svojstava referentnog materijala i materijala nakon različitih uvjeta grijanja TIG postupkom. Provedbom vlačnog testa i ispitivanja savijanjem potvrđeno je kako limovi koji su dva puta grijani, ohlađeni vodom, kao i oni koji na svojoj površini imaju aluminijski oksid, nemaju značajnija smanjenja mehaničkih svojstava. Prema rezultatima rada mogu se propisati postupci ravnanja i uvesti u proizvodnju uz zahtjev za odobrenje postupka od strane certifikacijskog tijela koje za atestaciju postupka, postupak mora potvrditi uvidom u eksperimentalne mjeriteljske podatke.

**Ključne riječi:** Al-5083 H321, ravnanje limova, AlMg4.5Mn0.7, TIG , TIG ravnanje

## **SUMMARY**

The topic of this paper is investigation of TIG parameters influence on mechanical properties of aluminum sheets in aluminum alloy 5083 H321. The scope is the investigation of the influence of TIG sheet metal straightening on the mechanical properties of 5083 H321 aluminum alloy sheets. The purpose of this paper was to optimize the straightening procedure by experimentally determining and comparing the mechanical properties of the reference material and the material after different TIG parameters. The tensile test and bending test confirmed that sheets that are heated twice, cooled by water, as well as those that have oxide film on their surface, do not have significant reductions in mechanical properties. According to the results of the work, straightening procedures can be prescribed and put into production with a request for approval of the procedure by the certification body, which must certify the procedure by inspecting the experimental metrological data.

**Keywords:** Al-5083 H321, straightening sheets, AlMg4.5Mn0.7, TIG, TIG straightening