

Analiza utjecaja zaštitnog plina na profil penetracije kod MIG zavarivanja aluminija

Majetić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:422333>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-12**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Filip Majetić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Filip Majetić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Ivici Garašiću i asistentici dr.sc. Maji Jurici na stručnoj pomoći i strpljenju u izradi ovog rada.

Također se zahvaljujem laborantima Katedre za zavarene konstrukcije koji su pružili stručnu pomoć prilikom izrade ovog rada te omogućili kvalitetno izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Filip Majetić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Majetić** JMBAG: **0035212375**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza utjecaja zaštitnog plina na profil penetracije kod MIG zavarivanja aluminija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of shielding gas influence on penetration profile at MIG welding of aluminium**

Opis zadatka:

Na temelju literaturnog pregleda analizirati i opisati utjecaj zaštitnog plina na svojstva zavarenog spoja pri MIG zavarivanju aluminija. Klasificirati zaštitne plinove za aluminij prema normi HRN EN ISO 14175. Ustanoviti glavne karakteristike zaštitnih plinova koje utječu na penetraciju i oblik spoja.

U eksperimentalnom dijelu osmisлити plan zavarivanja MIG postupkom za više vrsta zaštitnih plinova. Oblik spoja prilagoditi parametrima zavarivanja i načinu prijenosa metala. Na uzorcima provesti ispitivanja vizualnom i penetrantskom metodom te dodatno provesti mjerenje geometrije zavara na makroizbruscima. Ocijeniti mogućnost primjene različitih plinskih mješavina pri MIG zavarivanju aluminija u stvarnim proizvodnim uvjetima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ	2
2.1. Aluminijske legure.....	3
2.1.1. Podjela aluminijskih legura.....	3
2.1.1.1. Lijewane legure.....	4
2.1.1.2. Gnječene legure	4
3. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ALUMINIJSKIH LEGURA.....	6
3.1. MIG postupak zavarivanja	6
3.2. Oprema za zavarivanje.....	7
3.2.1. Pištolj za zavarivanje	7
3.2.2. Dodavač žice	8
3.3. Prijenos metala.....	9
3.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima.....	9
3.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom	10
3.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom.....	10
3.3.4. Impulsni način prijenosa metala	12
4. Zaštitni plinovi.....	13
4.1. Norma HRN EN ISO 14175	13
4.2. Klasifikacija i označavanje zaštitnih plinova.....	14
4.3. Fizikalna svojstva.....	15
4.3.1. Ionizacijski potencijal	16
4.3.2. Toplinska vodljivost.....	17
4.3.3. Kemijska reaktivnost	18
4.3.4. Disocijacija i rekombinacija.....	18
4.3.5. Gustoća i čistoća plina	19
4.3.6. Vrste zaštitnih plinova	19
4.3.6.1. Argon	19
4.3.6.2. Helij.....	20
4.3.7. Zaštitne plinske mješavine kod MIG/MAG zavarivanja	20
4.3.7.1. Mješavine s većim udjelom argona.....	20
4.3.7.2. Mješavine s većim udjelom helija.....	21
4.3.8. Zaštitni plinovi kod MIG zavarivanja aluminijskih legura.....	21
5. EKSPERIMENTALNI DIO	24
5.1. Oprema za zavarivanje.....	24

5.2. Osnovni i dodatni materijal.....	25
5.3. Priprema uzoraka	27
5.4. Zavarivanje uzoraka	28
5.5. Analiza zavara.....	31
5.5.1. Analiza penetrantskom metodom	31
5.6. Priprema makroizbrusaka	31
5.7. Analiza makroizbrusaka.....	34
6. ZAKLJUČAK.....	40
LITERATURA.....	42

POPIS SLIKA

Slika 1.	MIG postupak zavarivanja [1].....	7
Slika 2.	Pištalj za zavarivanje MIG postupkom u poprečnom presjeku [9].....	8
Slika 3.	Prijenos metala kratkim spojem [9].....	9
Slika 4.	Prijenos metala prijelaznim lukom [9].....	10
Slika 5.	Prijenos metala štrcajućim lukom [9].....	11
Slika 6.	Toplinska vodljivost zaštitnih plinova [18].....	18
Slika 7.	Disocijacija i ionizacija[20].....	19
Slika 8.	Utjecaj Ar, Ar – He i He - Ar mješavina na izgled zavarenog spoja [3].....	21
Slika 9.	Uloga zaštitnih plinova kod MIG/MAG postupaka [20].....	22
Slika 10.	MIG, zavar izveden s mješavinom Ar 50%; He 50% [1].....	23
Slika 11.	Welbee WB-P500L, Daihen Varstroj.....	24
Slika 12.	Karakteristike dodatnog materijala [22].....	26
Slika 13.	Uzorci spremni za zavarivanje	27
Slika 14.	Položaj zavarivanja.....	28
Slika 15.	Vizualno pregledana površina zavara.....	31
Slika 16.	Tračna pila korištena za rezanje uzoraka	32
Slika 17.	Strojna brusilica korištena u eksperimentu	33
Slika 18.	Profesionalni fotoaparat Cannon 1000D	34
Slika 19.	Fotografija makroizbruska uzorka A.....	35
Slika 20.	Fotografija makroizbruska uzorka B	35
Slika 21.	Fotografija makroizbruska uzorka C	36
Slika 22.	Usporedba geometrije zavara uzoraka A, B i C	37
Slika 23.	Postupak mjerenja penetracije pomoću imageJ programa	38
Slika 24.	Dijagram usporedbe rezultata dubine penetracije	39

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razlika između mehaničkih svojstava aluminijevih legura i konstrukcijskih čelika [2].....	1
Tablica 2. Karakteristike lijevanih aluminijskih legura [3].....	4
Tablica 3. Gnječene aluminijske legure [3].....	5
Tablica 4. Povijest razvoja korištenja zaštitnih plinova za zavarivanje [13]	13
Tablica 5. Klasifikacija i označavanje zaštitnih plinova [5]	15
Tablica 6. Vrijednosti ionizacijskih potencijala i energije disocijacije pojedinih plinova [15]	17
Tablica 7. Karakteristike uređaja Welbee WB-P500L [21]	25
Tablica 8. Kemijski sastav legure 5083 [4].....	25
Tablica 9. svojstva legure 5083 [4]	26
Tablica 10. Postavljene vrijednosti parametara zavarivanja	29
Tablica 11. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka A.....	29
Tablica 12. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka B.....	30
Tablica 13. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka C.....	30
Tablica 14. Prikaz izmjerenih geometrijskih veličina na uzorcima A, B i C.....	38
Tablica 15. Rezultati mjerenja penetracije	39

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a	mm	Visina zavara
Ar	-	Argon
E	MPa	Modul elastičnosti
G	S	Električna vodljivost
He	-	Helij
I	A	Jakost struje
MIG	-	Metal inert gas
P	W	Snaga
p	mm	Iznos penetracije
Q	kJ/mm	Unos topline
q	l/min	Protok plina
R _m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
R _{p0,2}	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
T _{ok}	°C	Temperatura otapanja aluminijskog oksida
T _t	°C	Temperatura tališta
U	V	Napon struje
v	m/s	Brzina zavarivanja
α	10 ⁻⁶ /K	Koeficijent linearnog istezanja
λ	W/mK	Toplinska vodljivost
ρ	kg/m ³	Gustoća

SAŽETAK

Tema ovog rada je „Analiza utjecaja zaštitnog plina na profil penetracije kod MIG zavarivanja aluminija“

Teorijski dio rada opisuje svojstva aluminija i aluminijskih legura, njihovu primjenu i proizvodnju. Obradene su tehnologije zavarivanja aluminija te ukratko opisan MIG postupak zavarivanja aluminija. Detaljno su opisani zaštitni plinovi korišteni kod zavarivanja aluminija – argon, helij te plinske mješavine argona i helija.

Eksperimentalni dio rada sastoji se od pripreme 3 uzorka aluminijske legure 5083 debljine 10 mm, izvođenja postupka MIG zavarivanja pulsnim lukom i istim parametrima zavarivanja te analizom dobivenih rezultata zavarivanja. Zavareni kutni spojevi podvrgnuti su vizualnoj i penetrantskoj kontroli zavara, izradi makroizbrusaka i mjerenju geometrije. Analizom rezultata ispitivanja utvrđen je utjecaj različitih plinskih mješavina na profil penetracije. Pokazana je razlika u iznosu dubine i obliku penetracije u ovisnosti o postocima argona i helija u zaštitnoj plinskoj mješavini.

Ključne riječi: Aluminij, MIG postupak zavarivanja, plinska mješavina argona i helija, penetracija zavara.

SUMMARY

The topic of this paper is "Analysis of shielding gas influence on penetration profile at MIG welding of aluminum."

The theoretical part of the thesis describes the properties of aluminum and aluminum alloys, their applications, and production. Welding technologies of aluminum are discussed, and the MIG welding process of aluminum is described. The protective gases used in aluminum welding - argon, helium, and gas mixtures of argon and helium - are described in detail.

The experimental part of the paper consists of preparing three samples of 10 mm thick aluminum alloy 5083, performing the MIG welding process with a spray arc and the same welding parameters and analyzing the obtained welding results. The welded corner joints were visually and penetrant inspected, and macro examinations were done, followed by measuring the geometry. The analysis of the results showed the influence of different shielding gas mixtures on penetration profile. The difference was shown in the depth and shape of the penetration, depending on the percentage of argon and helium in the shielding gas mixture.

Key words: Aluminum, MIG welding process, argon-helium gas mixture, weld penetration

1. UVOD

Aluminij je drugi najrasprostranjeniji element u zemljinoj kori s 8%, odmah iza kisika. Iako je jedan od relativno mlađih metala u uporabi, od aluminija i njegovih legura, više se koristi samo čelik. Dobiva se iz rude boksita - koja se mora preraditi u glinicu (Al_2O_3). Zatim se iz glinice elektrolizom dobiva čisti aluminij. Aluminij i aluminijeve legure koriste se kao proizvodi, poluproizvodi te prešani, valjani i lijevani materijali. Imaju široku primjenu- prehrambena industrija, bijela tehnika, građevinarstvo, kriogena tehnika te se mogu koristiti u izradi posuda pod tlakom u vojnoj tehnici. Kako u svom čistom obliku aluminij nema zadovoljavajuća mehanička i kemijska svojstva za navedene primjene, češće se koristi u legurama s drugim metalima. Najčešći od tih metala su magnezij, bakar, cink, mangan te silicij. Zavarivanje aluminija i legura najčešće se izvodi MIG i TIG postupkom, a zaštitni plinovi koji se koriste u najvećoj mjeri su argon i helij [1].

U tablici 1. navedene su osnovne razlike u mehaničkim svojstvima aluminija i čelika.

Tablica 1. Razlika između mehaničkih svojstava aluminijevih legura i konstrukcijskih čelika [2]

Svojstva	Aluminijeve legure	Konstrukcijski čelici
Gustoća [kg/m^3]	2700	7850
Youngov modul elastičnosti [MPa]	72000	2005000
Toplinska vodljivost [W/mK]	235	79
Temperatura taljenja [$^{\circ}\text{C}$]	550 – 560	1500
Temperatura otapanja oksida [$^{\circ}\text{C}$]	2060 (Al_2O_3)	800 – 900 (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4)
Električna vodljivost [$\Omega \text{ cm}$]	$\sim 2,65 \times 10^{-6}$	$\sim 10 \times 10^{-6}$
Relativna magnetska permeabilnost	~ 1 (paramagnetičan)	80 – 160 (feromagnetičan)
Kristalna struktura	Jednofazni (FCC)	BCC – FCC

[2]

2. ALUMINIJ

Jedan od najvažnijih i najkorisnijih elemenata koji se mogu naći u zemljinoj kori je aluminij. U prirodi se ne može naći u elementarnom stanju, već u obliku oksida pomiješan s oksidima nekih drugih elemenata kao što su željezo, titan, silicij, itd. Aluminij je prvi put izoliran 1825. godine.[1]

Izdvajanje aluminijske rudi postalo je komercijalno isplativo tek razvojem elektrolitičkoga procesa redukcije glinice, koji su 1886. otkrili Charles Martin Hall iz SAD-a i Paul Louis Toussaint Héroult iz Francuske (Hall-Héroultov proces). Unatoč otkriću Hall-Héroultova procesa, aluminij se kao materijal nije pokazao prikladnim za lijevanje sve do razvoja ljevačkih procesa i specifičnih ljevačkih slitina s poboljšanim svojstvima. Najveći je proizvođač aluminijske rudi u svijetu Kina s proizvedenih oko 37,3 milijuna tona u 2020., što iznosi više od polovice ukupne svjetske proizvodnje koja je u istoj godini procijenjena na 65,3 milijuna tona. [2]

Osnovne razlike između čelika i aluminijske rudi koje utječu na njihovo zavarivanje[1]:

- Oksidi željeza otapaju se na otprilike jednakoj temperaturi kao što je temperatura taljenja samog čelika, dok se aluminijski oksidi otapaju na čak i do 1400 °C višoj temperaturi od temperature tališta aluminijske rudi.
- Koeficijent toplinske istezljivosti aluminijske rudi je otprilike dvostruko veći nego čelika, što može dovesti do neprihvatljivih deformacija tijekom zavarivanja.
- Koeficijent toplinske vodljivosti aluminijske rudi je 6 puta veći od čelika. To znači da izvor topline za zavarivanje aluminijske rudi mora biti puno intenzivniji i fokusiraniji nego u čeliku. Ovo posebno vrijedi za deblje uzorke.
- Specifična toplota aluminijske rudi je dvostruko veća od specifične toplote čelika.
- Aluminij ima visoku električnu provodnost- čak 6 puta veću nego čelik.
- Boja aluminijske rudi se ne mijenja s porastom temperature za razliku od čelika. Ovo može uzrokovati poteškoće jer je teško procijeniti kad će doći do taljenja materijala.
- Aluminij nema magnetska svojstva, što znači da je problem puhanja električnog luka eliminiran.
- Aluminij ima trostruko veći modul elastičnosti od čelika, što znači da se savija tri puta više od čelika pod opterećenjem, ali može apsorbirati više energije pri udarnom opterećenju

- Činjenica da aluminij ima FCC kristalnu strukturu, znači da ne pati od gubitka žilavosti sa smanjivanjem temperature. Neke legure čak pokazuju porast vlačne čvrstoće i duktilnosti s padom temperature.
- Kristalna struktura aluminija ne mijenja se grijanjem i hlađenjem- suprotno čeliku.

2.1. Aluminijske legure

Legiranje ima za cilj poboljšanje mehaničkih svojstava, ponajprije vlačne čvrstoće i tvrdoće, zatim krutosti, rezljivosti, a ponekad žilavosti i livljivosti. Aluminijske legure upotrebljavaju se u lijevanom i gnječenom stanju. Mnogima od njih mehanička svojstva mogu se poboljšati i precipitacijskim očvrnućem. Najvažniji legirni elementi su bakar, magnezij, cink, silicij i mangan.[3]

Legura s bakrom ima povećanu čvrstoću i tvrdoću. Prisutnost bakra znači da se smanjuje korozijska postojanost te se kod nekih legura povećava osjetljivost na napetosnu koroziju, no obradljivost raste.

Legiranje magnezijom daje povećanje zavarljivosti, čvrstoće i korozijske otpornosti uz bolja svojstva aluminija za hladno oblikovanje.

Mangan je također česti legirni element aluminiju. Legure s manganom nisu podobne za toplo oblikovanje, ali imaju veću čvrstoću.[4]

2.1.1. Podjela aluminijskih legura

Legure aluminija mogu se prema namjeni podijeliti na dvije skupine:

- Legure za preradu gnječenjem
- Legure za preradu lijevanjem

Lijevane legure se mogu podjednako dobro oblikovati s tri osnovne metode: lijevanjem u pijesak, lijevanjem u kokile te tlačnim lijevanjem

Gnječene legure se prvo lijevaju u ingote ili šipke te se zatim hladno ili toplo deformiraju željenim postupkom.[3]

2.1.1.1. Lijewane legure

Lijewane aluminijske legure mogu se svrstati u tri osnovne skupine: Al-Si, Al-Mg i Al-Cu. Njihovom kombinacijom mogu se dobiti legure s boljim karakteristikama što je prikazano u tablici 2 [3].

Tablica 2. Karakteristike lijevanih aluminijskih legura [3]

Vrste legura	Livljivost	Rezljivost	Otpornost na koroziju	Mehanička otpornost	Predstavnik grupe legura	
Al-Mg	Srednja	Dobra	Vrlo dobra	Mala	AlMg ₃ , AlMg ₅	
Al-Si-Mg					AlSi ₁₀ Mg AlSi ₇ Mg	Mg omogućuje toplinsko očvrnuće
Al-Si	Vrlo dobra	Slaba	Dobra	Mala	AlSi ₁₂	
Al-Si-Cu					AlSi ₅ Cu AlSi ₆ Cu ₂	Si negativno utječe na rezljivost, Cu omogućuje smanjenje Si, ali pogoršava otpornost na koroziju
Al-Cu	Slaba	Vrlo slaba	Vrlo slaba	Osrednja	AlCu ₄ MgTi	Ti i Mg usitnjuju zrno

2.1.1.2. Gnječene legure

Gnječene aluminijske legure osnovno se dijele prema mogućnosti precipitacijskog očvrnuća što je prikazano u tablici 3.

Tablica 3. Gnječene aluminijske legure [3]

Vrsta legure	Način očvršćivanja	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²
Al-Mn	Deformirano u hladnom stanju	200-350
Al-Mg		
Al-Mg-Mn		
Al-Mg-Si	Precipitacijom	~330
Al-Cu-Mg		~450
Al-Zn-Mg		~400
Al-Zn-Mg-Cu		~550
Al-Li-Cu-Mg		~500

Al-Mg-Mn legura pripada gnječnim legurama deformiranim u hladnom stanju. Od takvih legura se zahtijeva dobra čvrstoća i krutost u hladnom stanju te dobra korozivna postojanost. Većina ovakvih legura ima mikrostrukturu koja se sastoji samo od čvrstih otopina što ide u prilog dobroj korozivnoj postojanosti i velikoj duktilnosti. Legure s većim udjelom magnezija imaju dobru postojanost u morskoj vodi te se zato koriste u brodogradnji. Potrebna mehanička svojstva dobit će se stupnjem ugnječavanja primijenjenim u konačnoj fazi hladnog oblikovanja deformiranjem. Zato se takve legure u pravilu isporučuju nakon određenog stupnja hladnog ugnječavanja ili u mekom stanju. Nedostatak ovih legura je nemogućnost mijenjanja mehaničkih svojstava materijala, proizvedenog na konačne dimenzije, jedino dolazi u obzir mekšanje postupkom žarenja [3].

3. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA ALUMINIJSKIH LEGURA

Aluminijske legure mogu se zavarivati raznim postupcima. U obzir dolaze plinsko, elektrootporno i elektrolučno zavarivanje te plazma, eksplozija, difuzijski, ultrazvuk, laserski i elektronski snop.

Ipak, najčešće su u upotrebi TIG (Tungsten Inert Gas) te MIG (Metal Inert Gas) baš zbog osigurane zaštitne atmosfere. MIG se koristi kod debljih materijala ($>6\text{ mm}$), a za tanje se koristi TIG [5].

3.1. MIG postupak zavarivanja

MIG zavarivanje je jedan od najpopularnijih postupaka zavarivanja u industriji zbog svoje jednostavnosti i brzine. MIG postupak zavarivanja je elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova te pripada postupcima zavarivanja taljenjem. Prvi put se upotrijebio sredinom 1940.-ih godina u Sjedinjenim Američkim Državama. Od tih ranih dana našao je primjenu u širokom spektru industrija od autoindustrije do cjevovoda [1].

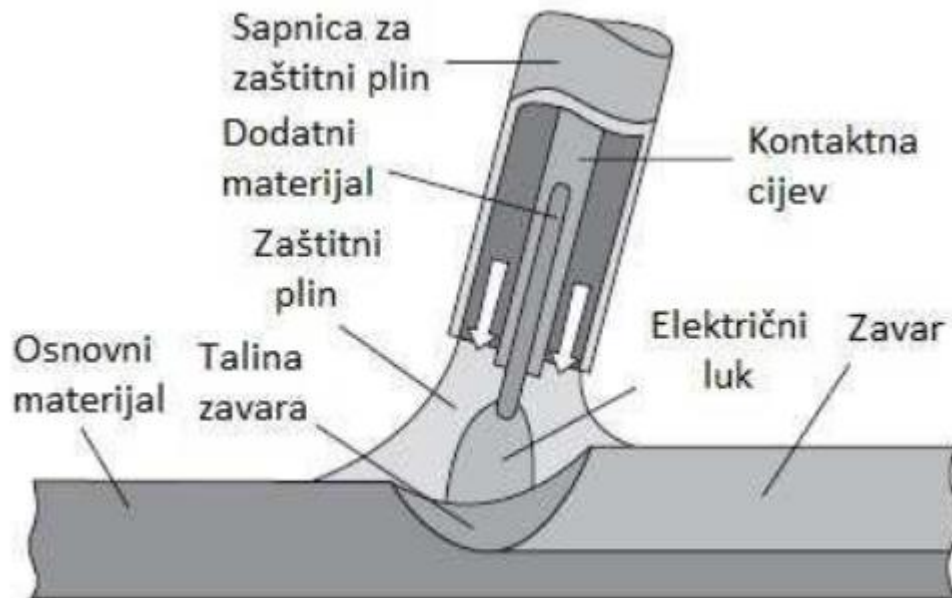
Cijeli postupak odvija se u zaštitnoj atmosferi osiguranoj inertnim plinovima argonom i helijem. Zaštitni plinovi korišteni u ovom postupku štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere te se dovode na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju za zavarivanje. [6]

Ovaj postupak bazira se na neprekidnom dodavanju žice koja služi kao elektroda i dodatni materijal. Elektroda, koja je metalna, najčešće je spojena na pozitivan pol istosmjernog izvora i struje te se osnovni materijal tali uslijed utjecaja topline električnog luka. Veliki dio topline luka generira se na pozitivnom polu koji je na elektrodi te zbog toga nastaje velika količina rastaljenog dodatnog metala i efikasan prijenos topline u samu talinu zavara.

Prednosti MAG postupka su[1] :

- Izvrsno čišćenje oksidnog sloja tijekom zavarivanja
- Velike brzine zavarivanja
- Manji ZUT nego kod TIG-a
- Mogućnost zavarivanja u svim položajima

Na slici 1. prikazani su zavar te dijelovi sapnice kod MIG postupka zavarivanja. [1]



Slika 1. MIG postupak zavarivanja [1]

Aluminij i legure zavaruju se uglavnom lijevom tehnikom u svrhu uklanjanja oksidnog sloja s površine materijala. Kod zavarivanja aluminijskih legura lijevom tehnikom kut pod kojim se mora održavati pištolj je od 5° do 10° te se on naziva „push angle“ [7].

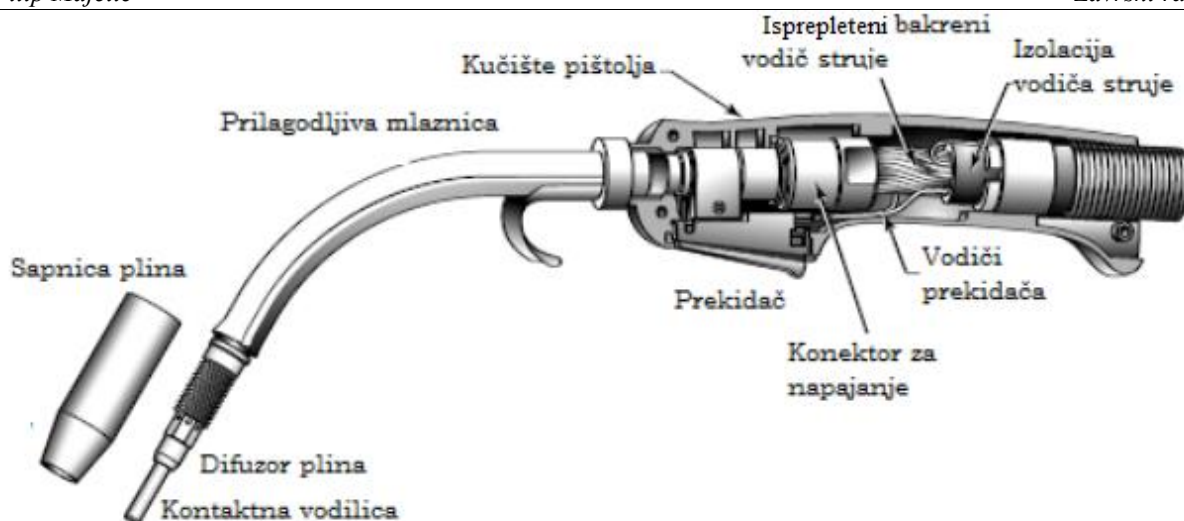
3.2. Oprema za zavarivanje

U opremu za zavarivanje koja će se ovdje opisati spadaju pištolj za zavarivanje te dodavač žice.

3.2.1. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za zavarivanje MIG postupkom, prikazan na slici br., je polikabelom vezan s pogonskim sustavom žice. Polikabel služi kao vod za električnu struju, dodatni materijal i zaštitni plin. Unutarnja građa polikabela ovisi o tome koristi li se izvor struje s vodenim ili običnim zračnim hlađenjem pištolja za zavarivanje. Sitna precizno namotana vlakna polikabelu daju veću fleksibilnost. Pored odvoda i dovoda vode za hlađenje u kabelu postoji i dovod za žicu i zaštitni plin. Uz to su također i strujni pinovi za provod signala za paljenje i gašenje luka te raznih novih funkcija kao zaslona ili kontrola na suvremenim pištoljima za zavarivanje [8].

Na slici 2. je prikazan pištolj za zavarivanje MIG postupkom.



Slika 2. Pištolj za zavarivanje MIG postupkom u poprečnom presjeku [9]

3.2.2. Dodavač žice

MIG postupak zavarivanja zahtijeva kontinuirano dodavanje žice što znači da je za njega uvijek potreban dodavač žice koji služi za automatsko dodavanje žice. Pomoću dodavača žice može se utjecati na brzinu dodavanja i slobodni kraj žice. Dodavač žice ili pogonski sustav može se nalaziti u sklopu kućišta izvora struje za zavarivanje kako bi se postigli manji volumen uređaja, ušteda na cijeni proizvodnje i bolja mobilnost. Usprkos tome u današnje vrijeme se dodavači žice najčešće montiraju izvan kućišta kao odvojena jedinica zbog raznih prednosti kao što je rotacija modula s obzirom na izvor struje za zavarivanje. To je jako korisno kod velikih radnih komada kojima je otežan pristup. Još jedna od prednosti vanjskog montiranja je bolja preglednost namotaja žice na samom kolutu u slučaju pojave greške pri uvođenju. [9]

Problem učinkovitog dovođenja žice kroz pogonski sustav, polikabel, pištolj te do radnog lokaliteta javlja se kod MIG zavarivanja aluminijskih legura zbog manje krutosti aluminijskih legura u odnosu na čelične legure. Zbog toga se koriste posebno razvijeni pogonski sustavi i pištolji za zavarivanje koji olakšavaju dovođenje dodatnog materijala. Dvije vrste pogonskih sustava koji se koriste za dovođenje žice kod zavarivanja aluminijskih legura su push i push-pull sustav [7].

Kod „push“ sustava žica se gura kontroliranom brzinom kroz vodilicu žice u pištolju do samog mjesta zavarivanja pomoću pogonskih kotačića. Elektronički reguliranim istosmjernim motorom se osigurava kontrolirana brzina. Ovim načinom mogu se efikasno dodavati žice aluminijske i njegovih legura u promjerima od 1,2 mm do 2,4 mm dok su sve vodilice u sustavu

u pravilu grafitne, poluamidne ili teflonske. Najčešće korišten način dodavanja žice danas je upravo guranjem koji je skoro pa obavezan kod impulsnih izvora [10].

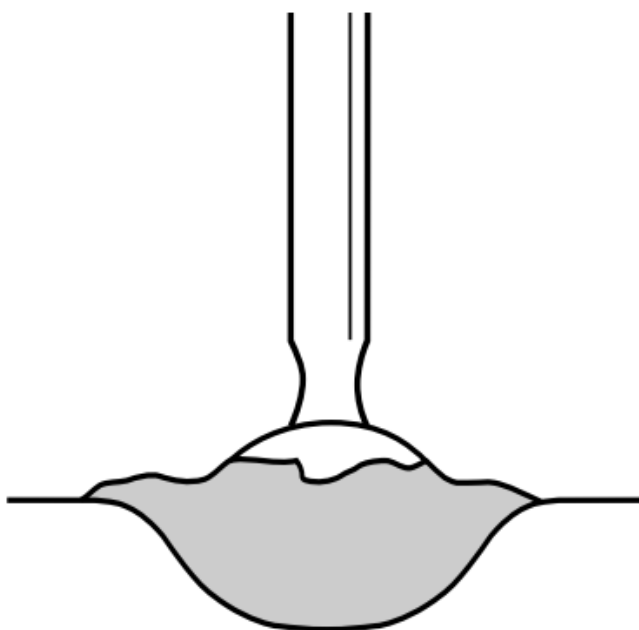
3.3. Prijenos metala

Načini prijenosa metala kod MIG postupka zavarivanja su[7]:

- Kratki spoj
- Prijelazni luk
- Štrecajući luk
- Impulsno zavarivanje

3.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima

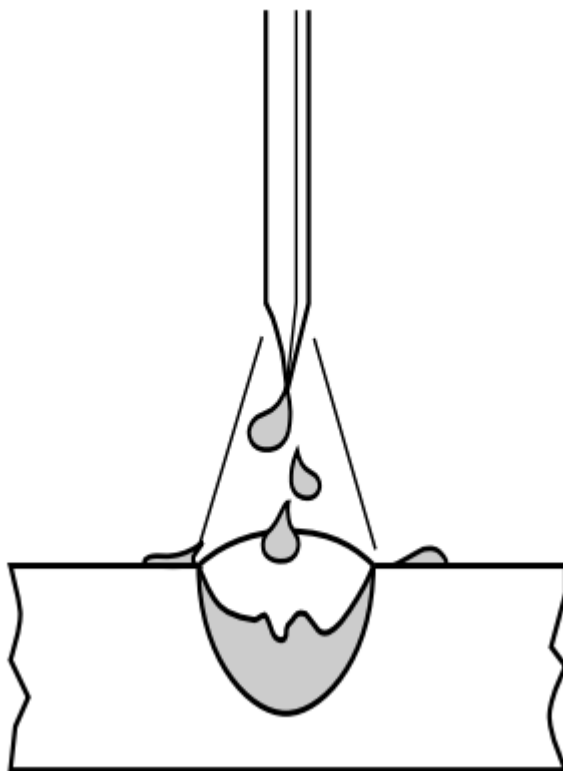
Za ovaj prijenos metala karakteristična je niska unesena energija te je pogodna za zavarivanje tanjih limova (0,6 mm – 5 mm) zbog male količine rastaljenog metala, deformacija za korijenske prolaze te unosa topline. Moguć je u prisilnim položajima. Okvirne vrijednosti struje zavarivanja (50 – 170 V) te napona (13 – 21 V) za dodatni materijal promjera 1,2 mm. Nije pogodan za zavarivanje aluminijskih legura zbog malog unosa topline [7]. Na slici 3. prikazan je prijenos metala kratkim spojem.



Slika 3. Prijenos metala kratkim spojem [9]

3.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

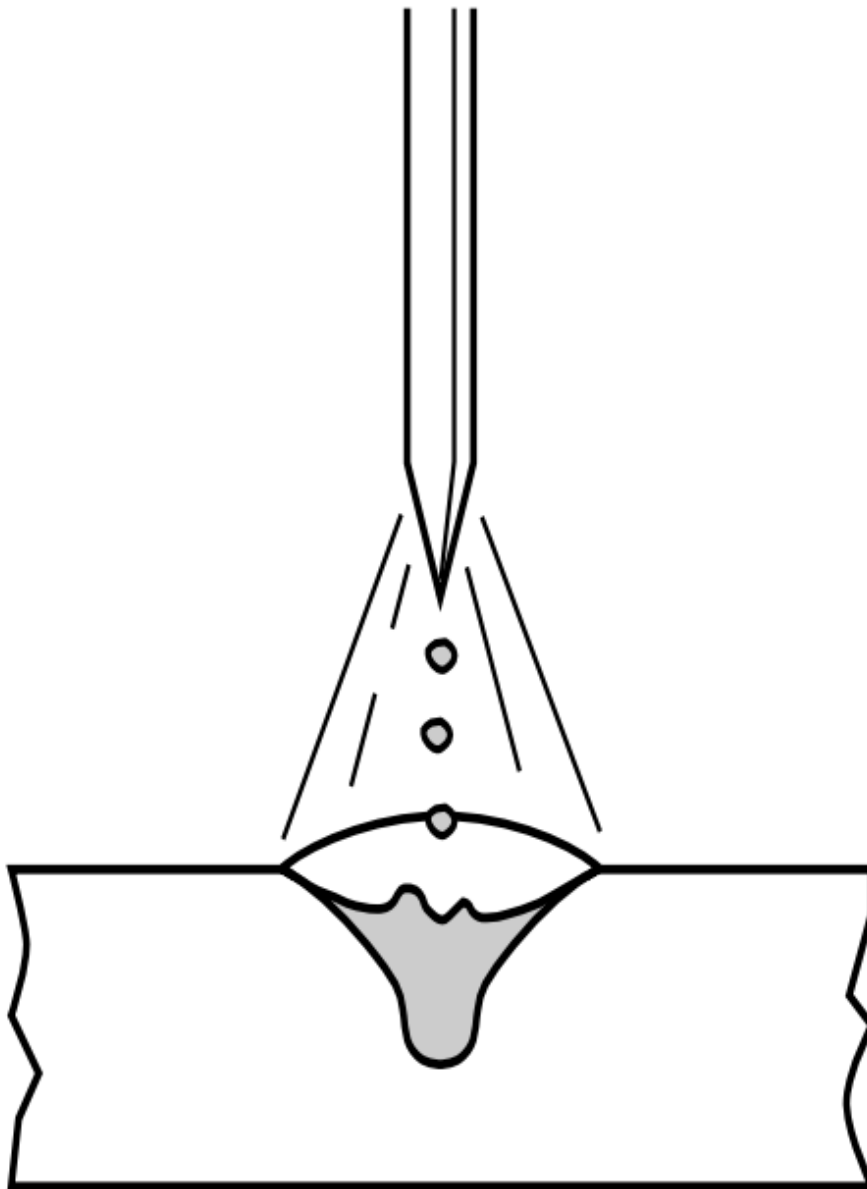
Prijenos metala prijelaznim lukom (slika 4.) je kombinacija kratkih spojeva i štrcajućeg luka. Koriste se struje od 170 do 235 A te naponi od 22 do 25 V za dodatni materijal od 1,2 mm. Vrlo je nestabilan te se njegova primjena, što je više moguće, izbjegava. Prisutna je velika količina rasprskavanja te nepoželjnih dimova [9].



Slika 4. Prijenos metala prijelaznim lukom [9]

3.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom (slika 5.) karakterističan je po tome da se rastaljeni metal s vrha elektrode prenosi slobodnim letom u obliku sitnih kapljica kroz atmosferu luka i istodobno elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom, kao što je vidljivo na slici 5. Ovaj tip prijenosa metala zbog jačih struja od 200 do 600 A i većih napona od 25 do 40 V (za dodatni materijal promjera 1.2 mm) prikladan je za zavarivanje debljih materijala. Još neke prednosti su veliki učinak taljenja materijala uz malo prskanja, lijepa estetika zavara, omogućena velika penetracija te moguće zavarivanje u položenom položaju [9].



Slika 5. Prijenos metala štrcajućim lukom [9]

Neki nedostaci su [9]:

- Zavarivanje moguće samo u položenom položaju
- Povećano je zračenje topline i svjetlosti zbog čega je potrebna veća zaštita okoline i zavarivača
- Povećano generiranje zavarivačkih para
- Potrebna je zaštita od okolnih uvjeta kod rada na terenu
- Veća cijena mješavine plinova.

3.3.4. Impulsni način prijenosa metala

Krajem 1960.-ih godina počelo je razvijanje impulsnog MIG/MAG zavarivanja. Ova inačica MIG zavarivanja osigurava prijenos metala slobodnim letom kapljice bez pojave kratkih spojeva, tj. izvor struje stvara promjenjiv oblik impulsa struje koji omogućava otkidanje isključivo jedne kapljice tijekom impulsa[10].

Glavne karakteristike impulsnog načina prijenosa metala su [8]:

- Promjeri žica od 0,8 mm do 2,4 mm
- Jakost struje od 80 A do 500 A te napon od 13 V do 30 V
- Preporučena uporaba inertnog zaštitnog plina
- Kontroliran unos topline
- Spajanje komada debljine veće od 1 mm
- Konstantna visina električnog luka uz minimalno rasprskavanje
- Moguće zavarivanje u svim položajima ovisno o parametrima
- Mlaz sitnih kapljica kontinuirano i ujednačeno pada na radni komad
- Prikladan za mehanizaciju i robotizaciju
- Izrada završnih i popunskih prolaza

Glavne prednosti impulsnog postupka zavarivanja su [10]:

- Oblik zavara je ujednačen
- Zavarivanje bez rasprskavanja je prenijeto i u nisko područje parametara što omogućuje uspješno zavarivanje tanjih limova te zavarivanje u prisilnim položajima debljim dodatnim materijalom s boljim rezultatima od onih dobivenih kratkim lukom
- Zbog preciznog odvajanja kapljica onemogućeno je njihovo pregrijavanje čime se ujedno smanjuje i emisija dimova
- Omogućena je bolja penetracija u materijal unutar područja štrcajućeg luka

Glavni nedostaci su [10]:

- Manja produktivnost u području velikih parametara u usporedbi sa štrcajućim lukom
- Veća cijena uređaja za zavarivanje

4. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi imaju važnu ulogu kod MIG postupka. Njihova glavna funkcija je zaštita rastaljenog zavarivačkog metala i elektrode od atmosferskih plinova, što omogućava stvaranje kvalitetnog i čistog zavara. Uobičajeno korišteni plinovi u MIG zavarivanju su argon, helij i mješavine argona i helija [11].

Tijekom elektrolučnog i plazma zavarivanja dolazi do reakcije atmosferskih plinova sa rastaljenim metalom što negativno utječe na svojstva i izgled zavara. Iz tog razloga potrebno je primijeniti određenu vrstu zaštite. Kod ručnog elektrolučnog zavarivanja koriste se obložene elektrode kod kojih obloga ima više uloga- jedna od njih je stvaranje troske tijekom taljenja u svrhu zaštite taline od nečistoća i atmosferskih plinova. Kod elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom praška, prašak štiti talinu od djelovanja okolne atmosfere, oblikuje zavar i sprječava naglo hlađenje zavara. Kod elektrolučnog postupka taljivom žicom, talina se štiti uz pomoć zaštitnih plinova ili mješavina plinova [12]. U tablici 4. predstavljena su razdoblja povijesti značajna za korištenje zaštitnih plinova kod postupaka zavarivanja.

Tablica 4. Povijest razvoja korištenja zaštitnih plinova za zavarivanje [13]

1941.	razvijen TIG (Tunsten Inert Gas) postupak, zaštitni plinovi: Ar i He
1948.	razvijen MIG (Metal Inert Gas) postupak, zaštitni plinovi: Ar i He
1951.	razvijen MAG (Metal Active Gas) postupak, zaštitni plin - CO ₂
1950.-te	pojava plazma zavarivanja, zaštitni plinovi: Ar i He
1960.-te	pojava LASER zavarivanja, zaštitni plinovi: Ar i He
1960.-te	uvođenje mješavina Ar - CO ₂ za MAG zavarivanje nelegiranih, nisko i mikrolegiranih čelika
sredina 1970.-ih	uvođenje mješavina Ar-O ₂ za MAG zavarivanje korozijski postojanih čelika
kraj 1970.-ih	uvođenje mješavina Ar-CO ₂ -O ₂ za MAG zavarivanje nelegiranih, nisko i mikrolegiranih čelika
1980. te	uvođenje mješavine Ar-N ₂ za MAG zavarivanje bakra i bakrenih legura
1980.- te i 1990.- te	automatizacija i robotizacija MIG/MAG postupaka, povećana primjena trokomponentnih (Ar - He - CO ₂ , Ar - He - O ₂) i razvoj četverokomponentnih mješavina (Ar - He - CO ₂ - O ₂)

4.1. Norma HRN EN ISO 14175

Za definiranje vrste zaštitnih plinova i plinskih mješavina kod procesa spajanja i zavarivanja upotrebljava se norma ISO 14175:2008; EN ISO 14175:2008. Korištenje normi bitno je zbog određivanja i klasifikacije zaštitnih plinova i njihovih mješavina u skladu s njihovim

metalurškim ponašanjem i kemijskim sastavom. Čistoća plina i tolerancije miješanja navedeni su prema dobavljaču (proizvođaču). Plinovi ili plinske mješavine mogu se isporučivati u plinovitom ili tekućem obliku, ali kada se rabe za zavarivanje i srodne postupke, plinovi se uvijek koriste u plinovitom obliku. Acetilen, propan, prirodni plin itd. te rezonator plinova koji se upotrebljavaju u plinskim laserima norma ne obuhvaća. Prijevoz i rukovanje plinovima i spremnicima moraju biti u skladu s lokalnim, nacionalnim i regionalnim standardima i propisima prema potrebi [14].

4.2. Klasifikacija i označavanje zaštitnih plinova

Zaštitni plinovi se označavaju s nazivom "Zaštitni plin", brojem norme, grupe i oznake prema tablici 5. Plinovi i plinske mješavine koje pripadaju glavnoj grupi moraju biti klasificirane po simbolima norme i po brojevima. Slovom:

M - označene su oksidirajuće plinske mješavine koje se temelje na argonu, a sadrži O₂, CO₂ ili O₂ +CO

R - reducirajuća plinska mješavina I - inertni plinovi i inertne plinske mješavine C - jače oksidirajući plinovi ili plinske mješavine

F - plin trome reaktivnosti ili reducirajuće plinske mješavine za korijensku zaštitu

S - specijalna plinska mješavina, kada se dodaju komponente koje nisu navedene u tablici 5.

Sve glavne grupe, osim S grupe su podijeljene u podgrupe. Na osnovi razine komponenti koje utječu na reaktivnost i na prisutnost vrši se podjela. Razvrstavanje plinova i plinskih mješavina provodi se prema simbolima od kemijskih komponenti i klasifikacije te se nakon toga unose volumni postotci [5].

Tablica 5. Klasifikacija i označavanje zaštitnih plinova [5]

Grupa	Broj	CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂	Uporaba
R	1			Ostatak*	> 0 – 15			TIG, Plazma zavarivanje i rezanje, zaštita korijena
	2			Ostatak*	> 15 - 35			
I	1			100				MIG, TIG, Plazma zavarivanje, zaštita korijena
	2				100			
	3			Ostatak*	> 0 - 95			
M1	1	> 0 – 5		Ostatak*				MAG
	2	> 0 – 5		Ostatak*				
	3		> 0 – 3	Ostatak*		> 0 - 5		
	4	> 0 - 5	> 0 - 3	Ostatak*				
M2	1	> 5 – 25		Ostatak*				MAG
	2		> 3 – 10	Ostatak*				
	3	> 0 – 5	> 3 – 10	Ostatak*				
	4	> 5 - 25	> 0 - 8	Ostatak*				
M3	1	> 25 – 50		Ostatak*				MAG
	2		> 10 –	Ostatak*				
	3	> 5 - 50	15 > 8 - 15	Ostatak*				
C	1	100						MAG
	2	Ostatak	> 0 - 30					
F	1						100	Plazma rezanje
	2					> 0 - 50	Ostatak	

*Argon se do 95 vol.% može zamijeniti helijem

(broj 1 znači od 0 do 30 vol.% He, broj 2 znači od 33 do 66 vol. % He , a broj 3 znači od 66 do 95 vol.% He). [5]

4.3. Fizikalna svojstva

Izbor odgovarajućeg zaštitnog plina u procesu zavarivanja praktički je presudan za izgled i kvalitetu zavara. Kod odabira su bitne sljedeće točke [5]:

- materijal dodatnog materijala,
- željena mehanička svojstva zavara,
- debljina osnovnog materijala i oblik spoja

- stanje materijala – prisutnost oksida, korozije, prljavštine, otpornih prevlaka, ulja,
- metoda prijenosa metala,
- položaj zavarivanja,
- kvaliteta pripreme,
- željeni profil penetracije,
- željeni izgled zavara,
- cijena

Da bi mogli razumjeti ponašanje i utjecaj zaštitnih plinova prilikom zavarivanja definitivno je nužno poznavati njihova fizikalna svojstva poput ionizacijskog potencijala, toplinske vodljivosti, disocijacije i rekombinacije, kemijske reaktivnosti, gustoće te čistoće plina.[15]

4.3.1. Ionizacijski potencijal

Ionizacijski potencijal zaštitnih plinova ima važnu ulogu u njihovoj primjeni u zavarivanju. To je energija potrebna da se ukloni elektron iz atoma ili molekule, stvarajući time pozitivno nabijeni ion. Pri zadržavanju ostalih čimbenika konstantnima, ionizacijski potencijal je manji što je veća molekulska odnosno atomska masa plina. Argon, koji ima osamnaest elektrona u elektronskom omotaču, veće je atomske mase od helija koji ima dva elektrona u elektronskom omotaču. Privlačna sila koja zadržava vanjske elektrone u orbiti obrnuto je proporcionalna kvadratu njihove udaljenosti od jezgre pa je energija potrebna da argon otpusti elektron znatno manja nego u slučaju helija te iznosi 15,7 eV, a kod He 24,5 eV. Pri spomenutim energetske razinama za ova dva plina, dolazi do ionizacije u prostoru električnog luka i nastaje plazma, koju stoga sačinjavaju ionizirani plin ili mješavina te metalne pare. Iako i drugi čimbenici utječu na uspostavljanje i održavanje plazme, kritične razine energije svejedno trebaju biti zadovoljene. U primjeni helija i helijem obogaćenih mješavina, za jednake duljine električnog luka, jakosti struje i naponi veći su nego kad se rabi argon i mješavine s većinskim udjelom argona. S obzirom da se toplina u luku, grubo rečeno, može izraziti kao produkt jakosti struje i napona, uporaba helija također rezultira mnogo većom raspoloživom toplinom. Uspostavljanje i održavanje električnog luka uvelike ovisi o ionizacijskom potencijalu. Zaštitni plinovi s relativno nižim vrijednostima ionizacijskog potencijala lakše oslobađaju elektrone i time se, u njihovoj primjeni, olakšava uspostavljanje električnog luka i održavanje u stabilnom radu. Kod zavarivanja ionizacijski potencijal plinova bitan je zbog održavanja stabilnosti i izostanka

reakcije plina s ostalim atmosferskim plinovima. U tablici 6. vidljive su vrijednosti ionizacijskog potencijala, ali i energije disociranja pojedinih plinova [15].

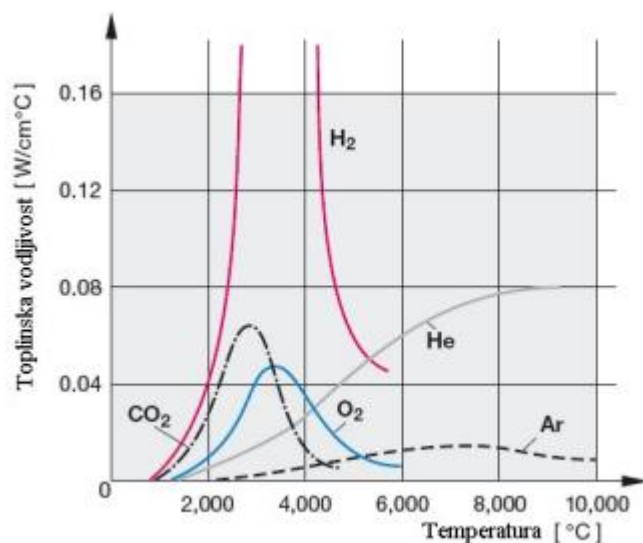
Tablica 6. Vrijednosti ionizacijskih potencijala i energije disocijacije pojedinih plinova [15]

PLIN	ENERGIJA DISOCIJACIJE (eV)	IONIZACIJSKI POTENCIJAL (eV)
VODIK	4,5	12,6
KISIK	5,1	12,6
DUŠIK	9,7	14,5
UGLJIČNI DIOKSID	5,3	14,4
HELIJ		26,4
ARGON		15,8

Općenito, plinovi s višim ionizacijskim potencijalom (argon) imaju veću stabilnost i manju reaktivnost u odnosu na one s nižim (dušik). Zato se plinovi s većim ionizacijskim potencijalom koriste češće kako bi se smanjila kontaminacija zavarenog materijala i poboljšala kvaliteta zavara [16].

4.3.2. Toplinska vodljivost

Toplinska vodljivost zaštitnih plinova određuje koliko učinkovito ti plinovi prenose toplinu tijekom zavarivanja i koliko brzo se toplina prenosi u susjedne dijelove materijala. Općenito, plinovi koji se koriste kao zaštitni plinovi kod zavarivanja imaju nisku toplinsku vodljivost u usporedbi s metalima koje se zavaruju. Primjerice, argon ima toplinsku vodljivost od približno 0,017 W/mK, dok je toplinska vodljivost čelika oko 50 W/mK. To utječe na uspostavljanje električnog luka koji čine dvije zone: uska, vruća jezgra te hladnija, vanjska zona. Plinovi s većom toplinskom vodljivošću imaju mogućnost provođenja više topline u vanjsku zonu pa je električni luk širi s boljom raspodjelom temperature. Ovakva se vodljivost topline događa kod helija, mješavina argon/ugljični dioksid i argon/vodik te daje širi penetracijski profil na mjestu spajanja [17]. Slika 6. prikazuje toplinsku vodljivost zaštitnih plinova pri različitim temperaturama.



Slika 6. Toplinska vodljivost zaštitnih plinova [18]

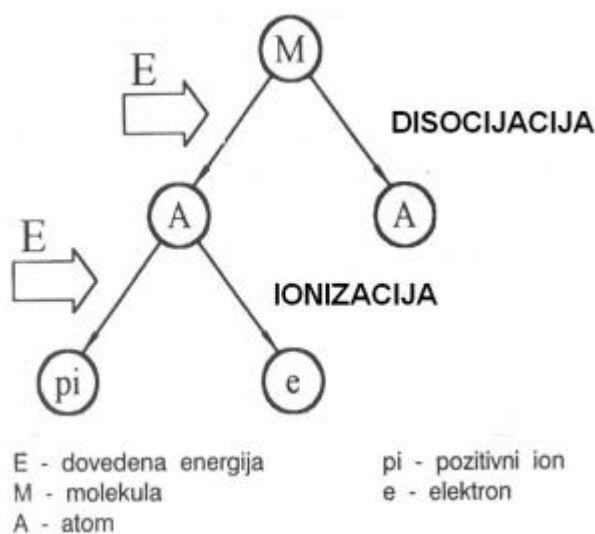
4.3.3. *Kemijska reaktivnost*

Kemijska se reaktivnost odnosi na sklonost određenog zaštitnog plina da pri temperaturama električnog luka reagira s elementima koji se nalaze u talini. Inertni plinovi kao što su argon helij nemaju nikakav kemijski utjecaj na zavar te sprječavaju oksidaciju i druge kemijske reakcije koje bi naštetile kvaliteti zavara. Dušik, kisik i ugljikov dioksid su na temperaturama zavarivanja prilično reaktivni i mogu imati negativan utjecaj na kemijski sastav zavara. Reakcija ovih plinova s rastaljenim metalom u luku stvaraju okside i otpadne plinove. Vodik je također reaktivan, ali reagira s oksidacijskim sredstvima pa time sprječava nastanak oksida. No treba biti oprezan s dodavanjem prevelike količine vodika zbog mogućnosti nastajanja hladnih pukotina, poroznosti te drugih grešaka. [19]

4.3.4. *Disocijacija i rekombinacija*

Procesi koji se odnose na razdvajanje i ponovno spajanje kemijskih veza između atoma ili molekula. Ugljikov dioksid, vodik, kisik su građeni od molekula te se pri visokim temperaturama u električnom luku dolazi do njihove disocijacije na atome. Oni se zatim djelomično ioniziraju dajući elektrone i istovremeno poboljšavajući tok struje. Disocirani plin dolaskom u kontakt s hladnijom površinom radnog komada pretvara svoje atome u molekule rekombinacijom, pri čemu se oslobađa velika količina energije te se metal brže tali. Ovo se ne događa kod plinova kao što su argon i helij jer se ne nalaze u molekularnom obliku pa ne može nastupiti disocijacija. Za istu temperaturu električnog luka, toplina generirana na radnoj

površini veća je kod korištenja plinova koji su građeni od molekula [19]. Slika 7. prikazuje shemu disocijacije i ionizacije.



Slika 7. Disocijacija i ionizacija[20]

4.3.5. Gustoća i čistoća plina

Plinovi veće gustoće od zraka zahtijevaju manji dotok od plinova koji imaju manju gustoću od zraka da bi postigli istu zaštitu taline zavara.

Čistoća plina, tj. nečistoća može imati nepovoljne učinke na zavarivanje i kvalitetu zavarenog spoja. Čak i mala nečistoća može negativno utjecati na brzinu zavarivanja, potpunost spajanja, oblik i izgled zavara te količinu poroznosti. Treba paziti da zaštitni plin zadovoljava minimalnu čistoću koja je određena normama [19].

4.3.6. Vrste zaštitnih plinova

Zaštitni plinovi dolaze kao čisti te zbog određenih zahtjeva dolaze kao plinske mješavine. Najčešće korišteni zaštitni plinovi kod zavarivanja aluminija su argon i helij.

4.3.6.1. Argon

Inertni plin koji se sastoji od jednog atoma, bez boje mirisa i okusa. Nije zapaljiv, otrovan ni topiv u talini. U zemljinoj atmosferi možemo ga naći u manje od 1% slučajeva, od zraka je gušći 1.4 puta, a dobiven je postupkom ukapljivanja i destilacije zraka. Velika gustoća i svojstvo inercije čine ga izrazito povoljnim za zaštitu od atmosferskog zraka pa se u zavarivanju

često koristi kao zaštitni plin. Koristi se samostalno ili u plinskoj smjesi zbog postizanja veće stabilnosti električnog luka. Skoro svi elektrolučni procesi zavarivanja dozvoljavaju primjenu argona kako bi se postigao kvalitetan zavar sa zadovoljavajućim mehaničkim svojstvima. Najčešće se koristi u zavarivanju aluminijskih, bakra, nikla, magnezijevih legura te titana i cirkonija. Zbog niske energije ionizacije doprinosi samom uspostavljanju i stabilnosti električnog luka s velikom gustoćom struje. Plinske smjese s visokim udjelom argona podržavaju sve nekonvencionalne načine prijenosa metala. Argon je danas, uz sve ovo i zbog dobre cijene, najčešće upotrebljavani inertni plin [19].

4.3.6.2. Helij

Isto kao i argon, helij je jednoatomni inertni plin koji ima malu masu i gustoću. Cjenovno je puno skuplji nego argon pa se slabije koristi. Postupak dobivanja helija je separacijom iz prirodnog plina gdje je višak, tj. nečistoća. Omogućava veći unos topline čime se dobiva veća žitkost taline, brzina zavarivanja te dubina provara. Također ima širi stup električnog luka. Koristan je kod zavarivanja magnezija i aluminijskih koji nisu tolerantni na uključke oksida. Helij nalazi primjenu i kod zavarivanja korozijski postojanih čelika. Pridonosi stabilnosti električnog luka [19].

Ostali zaštitni plinovi koji se koriste pri zavarivanju su ugljikov dioksid, kisik, vodik i dušik.

4.3.7. Zaštitne plinske mješavine kod MIG/MAG zavarivanja

U okviru ovog rada bavit ćemo se samo dvokomponentnim plinskim mješavinama argon - helij te helij - argon. Također još postoje razne dvokomponentne mješavine te mješavine koje sadrže tri ili četiri plina koji uključuju argon, helij, ugljikov dioksid, vodik, dušik, kisik te klor.

4.3.7.1. Mješavine s većim udjelom argona

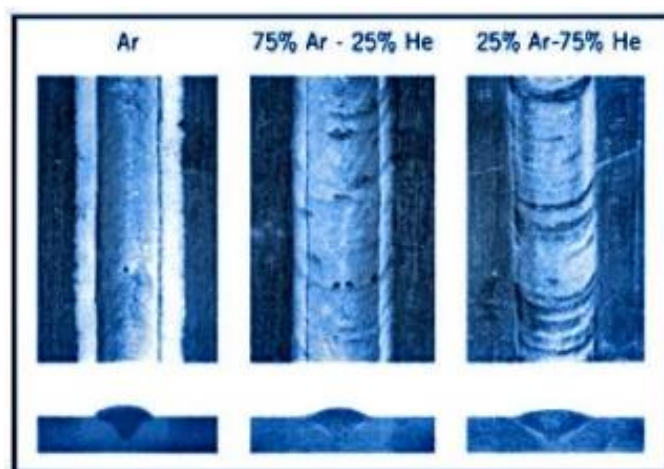
Mješavine argon – helij posebno su korisne kod zavarivanja aluminijskih ukoliko je potrebno imati široke provare i prijenos metala slobodnim letom kapljica. Za deblje osnovne metale nužno je povećati udio helija zbog većeg unosa topline. Porastom količine helija u mješavini reducira se prstoliki penetracijski profil koji je karakterističan za čisti argon. Brzine zavarivanja su veće, postižu se dublji zavari i dolazi do pada poroznosti.

75% Ar + 25% He – dvokomponentna mješavina, služi za postizanje veće penetracije kod rada s aluminijem, bakrom i niklom. Talina je veće žitkosti nego u slučaju čistog argona [19].

4.3.7.2. Mješavine s većim udjelom helija

Plinske mješavine helij – argon se uglavnom primjenjuju kod zavarivanja aluminija, bakra, nikla, magnezija i njihovih legura te kod nekih ugljčnih čelika. Koristi se kod zavarivanja debljih radnih komada. Ovdje se argon dodaje heliju, a time se postiže manji unos topline, bolja uspostava električnog luka, smanjeni napon luka i reduciranje nepotrebnog rasprskavanja. Najčešće se koristi 20% Ar kako bi se postigao stabilan električni luk.

75% He + 25% Ar – visokim udjelom helija postiže se dobra toplinska vodljivost i izrazita žitkost taline. Penetracijski profil je širok te je prisutna dobra bočna penetracija i spajanje. Ipak, ova mješavina se rijetko upotrebljava, a može se zateći kod automatiziranog zavarivanja aluminija [19]. Na slici 8. možemo vidjeti utjecaje različitih udjela argona i helija na izgled zavara.



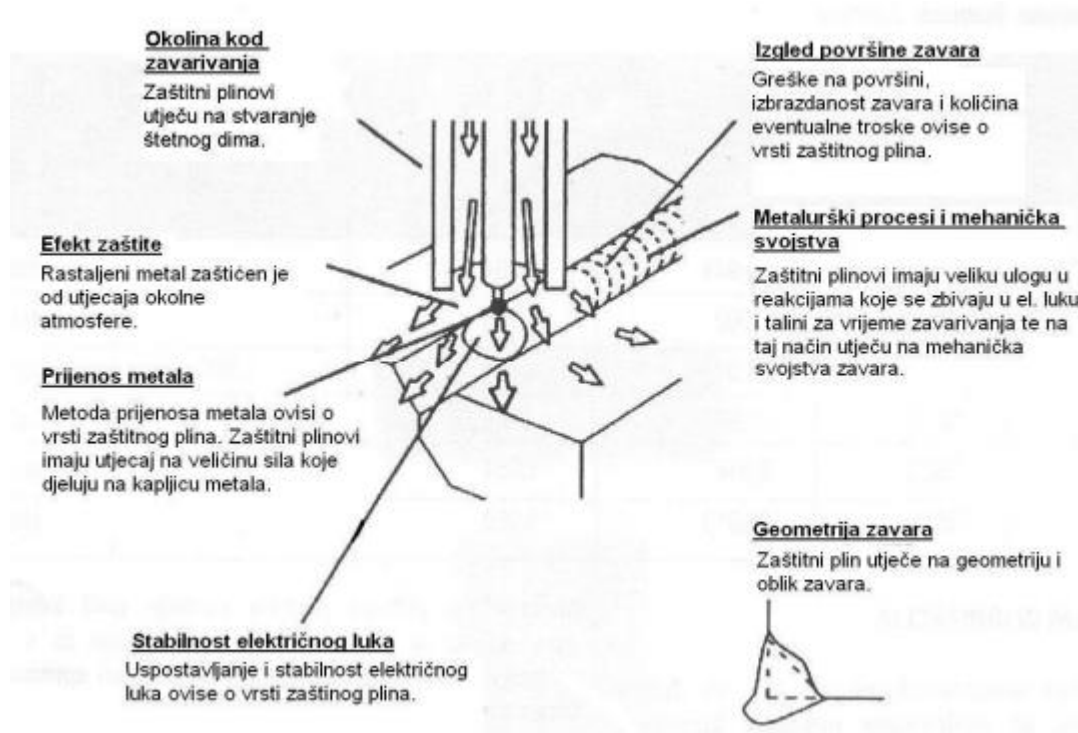
Slika 8. Utjecaj Ar, Ar – He i He - Ar mješavina na izgled zavarenog spoja [3]

4.3.8. Zaštitni plinovi kod MIG zavarivanja aluminijskih legura

Zaštitni plinovi imaju velik utjecaj na efektivnost MIG/MAG postupaka zavarivanja. Uz osnovnu ulogu čuvanja rastaljenog metala i kapljica dodatnog materijala, plinovi doprinose uspostavljanju i održavanju električnog luka te zajedno s parametrima procesa uvjetuju prijenos

metala. Ovako vrsta plina utječe na cijeli proces zavarivanja i kvalitetu izvedenog zavara. Fizikalna svojstva plinova utječu na količinu rastaljenog materijala, izgled površine dubinu i oblik penetracije te mehanička svojstva zavara. Sudjeluju u kemijskim reakcijama električnog luka i taline- utječu na nastajanje karbida i oksida, smanjuju rezidualni dušik, kisik i vodik u zavaru, formiraju trosku i oslobađaju otpadne plinove. Reagiranjem s dodatnim materijalom sudjeluju u stukturnim promjenama metala zavara što ima utjecaj na svojstva poput žilavosti, čvrstoće i korozijske postojanosti spoja. Između radnog komada i žice uspostavlja se luk te plin prelazi u ionizirano stanje plazme i postaje električni vodič. Razumijevanje fizikalnih i kemijskih svojstava plinova i plinskih mješavina je presudno da bi se proces zavarivanja optimirao za specifičnu primjenu i postizanje traženih učinaka [1].

Slika 9. prikazuje ulogu zaštitnih plinova kod MIG/MAG postupaka.



Slika 9. Uloga zaštitnih plinova kod MIG/MAG postupaka [20]

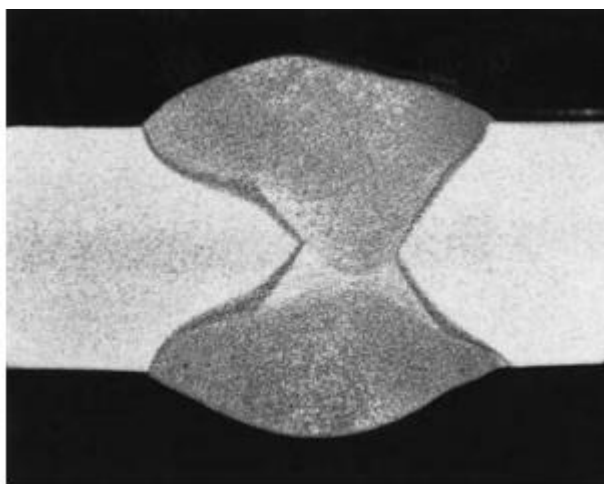
Prilikom zavarivanja aluminijskih legura najčešće se koriste argon, mješavine argona i helija te plinovi s dodacima dušika. Plinovi kao što su kisik, vodik i ugljikov dioksid imaju loš utjecaj na kvalitetu zavara (poroznost). Argon je dosta jeftiniji od helija i stvara tihi i stabilni luk s penetracijom nalik na prst kojom dobijemo poprečni presjek zavara u obliku gljive. Argon daje najmanji unos topline i time najsporije brzine zavarivanja. Stoga postoji rizik od nedostatka

stapanja i poroznosti na debljim dijelovima. Argon također može ostaviti crnu čađavu trosku na površini zavara. To se lako može ukloniti četkanjem žicom.

Helij povećava napon luka do 20% u usporedbi s argonom, što rezultira toplijim lukom, većom penetracijom i širim zavarenim završecima. Širi završeci zahtijevaju manje kritično pozicioniranje luka i pomažu u izbjegavanju tipova nedostataka poput propuštanja ruba i nedovoljne penetracije. Sporije se hladeći zavareni bazen također omogućuje difuziju vodika iz taline, čime se smanjuje količina poroznosti. Povećana toplina također omogućuje veće brzine zavarivanja, čak do tri puta veće nego kod sličnog spoja izvedenog upotrebom argona kao plina za zaštitu.

Međutim, helij je skup i daje manje stabilan luk od argona. Stoga se čisti helij najviše koristi u mehaniziranim ili automatiziranim aplikacijama zavarivanja. Za ručno zavarivanje i neke mehanizirane aplikacije mješavine argona i helija daju dobre rezultate s karakteristikama obaju plinova. Te se mješavine koriste na debljim materijalima jer povećavaju toplinski ulaz i osiguravaju prihvatljivije parametre zavarivanja nego čisti argon. Također će poboljšati produktivnost omogućujući veću brzinu kretanja. Najpopularnije kombinacije su 50% i 75% helija u argonu. Tipični zavari korištenjem 50% helija i 50% argona prikazani su na slici 10. Takvi zavari pokazuju oblike zavara koji su na prijelazu između zavara s čistim argonom i čistim helijem.

Zaštitni plinovi moraju imati minimalnu čistoću od 99,998% i nisku razinu vlage, idealno s točkom rosišta manjom od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (manje od 39 ppm H_2O) [1].



Slika 10. MIG, zavar izveden s mješavinom Ar 50%; He 50% [1]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada bilo je potrebno zavariti, koristeći razne plinske mješavine, 3 kutna spoja ploča od aluminijske legure MIG zavarivanjem pulsnom lukom te analizirati utjecaje različitih zaštitnih plinova na profil penetracije.

Eksperimentalni dio rada je napravljen u Laboratoriju za zavarivanje te Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu.

5.1. Oprema za zavarivanje

Za eksperiment je bio korišten uređaj Welbee WB-P500L, Daihen Varstroj. Uređaj je prikazan na slici 11.



Slika 11. Welbee WB-P500L, Daihen Varstroj

Tablica 7. prikazuje karakteristike uređaja Welbee WB-P500L

Tablica 7. Karakteristike uređaja Welbee WB-P500L [21]

Mrežni napon, V	400 (+/- 15%)
Broj faza	3
Potrošnja snage, kW	22,9
Nazivna izlazna struja, A	DC : 500 A / Puls : 400 A
Nazivni izlazni napon, V	DC : 39 V / Puls : 34 V
Raspon struje zavarivanja, A	30 – 500 A
Raspon napona zavarivanja, V	12 V – 45 V
Radna temperatura, °C	~10 - 40
Masa uređaja, kg	83
Dimenzije uređaja (Š×D×V), mm	395 × 710 × 762

5.2. Osnovni i dodatni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentu su ploče od aluminijske legure Al Mg4.5Mn0.7-5083. Dimenzije ploče su sljedeće: debljina 10 mm, širina 125 te duljina 300 mm.

U tablici 8. i 9. prikazan je kemijski sastav te svojstva legure 5083.

Tablica 8. Kemijski sastav legure 5083 [4]

Kemijski element	Al	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Cr
Udio, %	93,1 – 95,55	4,0 – 4,9	0,4 – 1,0	0 – 0,4	0 – 0,1	0 – 0,25	0,05 – 0,25

Tablica 9. svojstva legure 5083 [4]

Gustoća, g/cm ³	2,66
Temperatura taljenja, °C	638
Modul elastičnosti, GPa	70 - 75
Poissonov faktor	0,33
Toplinska provodnost, W/mK	127
Toplinsko širenje 10 ⁻⁶ /°C	24,2

Za dodatni materijal kod zavarivanja po normi HRN EN ISO 18723 korištena je žica promjera 1,2 mm od aluminijske legure AlMg5 te proizvođača Elektroda Zagreb. Karakteristike žice korištene kao dodatni materijal prikazane su na slici 12.

EZ - MIG AlMg5						
NORME						
HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10		W. Nr.			
S Al 5356 / Al Mg5Cr(A)	ER5356		3.3556			
SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE						
Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s 5% magnezija. Namijenjena za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legura. Metal zavara relativno visoke čvrstoće, korozijski postojan u morskoj atmosferi. Pogodna za zavarivanje dijelova namijenjenih eloksiranju.						
MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA						
R _{pe,2} N/mm ²	R _n N/mm ²		A ₅ %			
120	260		> 25			
ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE						
	Al	Mg	Mn	Cr	Si	Fe
%	bal.	5,0	0,15	0,10	0,05	0,15
ZAŠTITNI PLIN						
I1 (Ar)						
PAKIRANJE						
Promjer žice mm			Namotaj			
0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0			Žica do žice (S-S)			
7 kg - žičani kolut						

Slika 12. Karakteristike dodatnog materijala [22]

Zaštitni plinovi korišteni u ovom eksperimentu prema normi HRN EN ISO 14175 su:

- Uzorak A – zaštitni plin EN439-I1 (Argon 5.0)
- Uzorak B – zaštitni plin EN439-I3 (Ar He 15)
- Uzorak C – zaštitni plin EN439-I3 (Ar 50%; He 50%)

5.3. Priprema uzoraka

Uzeto je 6 ploča istih dimenzija već navedene aluminijske legure Al Mg4.5Mn te su podređene temeljitom čišćenju i odmašćivanju zbog osjetljivosti legure na pore. Za čišćenje je upotrijebljen alkohol. Uzorci su tada namješteni u horizontalan položaj za zavarivanje kutnog spoja. Na slici 13. su prikazane ploče spremne za zavarivanje.



Slika 13. Uzorci spremni za zavarivanje

5.4. Zavarivanje uzoraka

Da bi se ispitao utjecaj zaštitnog plina na profil penetracije izveden je jedan prolaz pištoljem za zavarivanje. Dodatni materijal je bio spojen na pozitivan pol, dok je priključak mase bio spojen na negativan pol. U postupku je korištena lijeva tehnika zavarivanja radi boljeg čišćenja oksidnog sloja. Slobodni kraj žice iznosio je 20 mm uz protok plina od 20 l/min. Na slici 14. je prikazan položaj netom prije početka zavarivanja.



Slika 14. Položaj zavarivanja

Tijekom cijelog ispitivanja postavljeni parametri navedeni u tablici 10. su konstantni kako bi se moglo analizirati utjecaj različitih zaštitnih plinova na profil penetracije. Unos topline računa se prema sljedećem izrazu (1):

$$Q = k \frac{U \times I}{v} \times \frac{60}{1000} = 0,8 \times \frac{26,7 \times 270}{54} \times \frac{60}{1000} = 6,408 \frac{\text{kJ}}{\text{cm}} = 0,6408 \frac{\text{kJ}}{\text{mm}}$$

U tablici 10. mogu se vidjeti postavljene vrijednosti parametara zavarivanja.

Tablica 10. Postavljene vrijednosti parametara zavarivanja

Parametri zavarivanja	Postavljene vrijednosti
Struja zavarivanja, A	270
Napon zavarivanja, V	26,7
Brzina zavarivanja, cm/min	54
Unos topline, kJ/mm	0,6408
Promjer žice, mm	1,2
Slobodni kraj žice, mm	20
Protok plina, l/min	20

Stvarni parametri zavarivanja Uzoraka A, B i C prikazani su u tablicama 11.,12. i 13.

Tablica 11. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka A

Parametri zavarivanja	Stvarne vrijednosti
Struja zavarivanja, A	272
Napon zavarivanja, V	27
Brzina zavarivanja, cm/min	45,74
Unos topline, kJ/mm	0,7707
Promjer žice, mm	1,2
Slobodni kraj žice, mm	20
Protok plina, l/min	20

Tablica 12. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka B

Parametri zavarivanja	Stvarne vrijednosti
Struja zavarivanja, A	262
Napon zavarivanja, V	28,2
Brzina zavarivanja, cm/min	47,11
Unos topline, kJ/mm	0,7528
Promjer žice, mm	1,2
Slobodni kraj žice, mm	20
Protok plina, l/min	20

Tablica 13. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka C

Parametri zavarivanja	Stvarne vrijednosti
Struja zavarivanja, A	255
Napon zavarivanja, V	29,7
Brzina zavarivanja, cm/min	48,18
Unos topline, kJ/mm	0,7545
Promjer žice, mm	1,2
Slobodni kraj žice, mm	20
Protok plina, l/min	20

Stvarni parametri tijekom zavarivanja su bili različiti od postavljenih vrijednosti što utječe na izračun unosa topline. Povećanjem udjela helija u plinskoj mješavini iznos struje je padao, dok su napon i brzina zavarivanja rasli.

Stabilnost električnog luka smanjivala se kako je rastao postotak helija u plinskoj mješavini pa je time bilo i veće rasprskavanje.

5.5. Analiza zavora

Nakon zavarivanja, uzorci su ostavljeni na sobnoj temperaturi da se hlade. Zatim se čeličnom četkom ručno zavar površinski očistio i pregledao na sva tri uzorka. Nisu uočene nikakve nepravilnosti ni na jednom uzorku kao što se vidi na slici 15.



Slika 15. Vizualno pregledana površina zavora

5.5.1. Analiza penetrantskom metodom

Poslije vizualnog pregleda, slijedi nerazorno ispitivanje penetrantima po normi HRN ISO 15614-2. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje te su tijekom ispitivanja korištena sljedeća sredstva: čistač SKC-S, crveni penetrant K7B2p (proizvođač Elite Flaw-Findr) i razvijач SKD-S2 (proizvođač Magnaflux).

Cijela površina se prvo čisti alkoholom te se nanosi čistač u svrhu čišćenja uzorka. Zatim se po cijelom zavaru nanosi penetrant i ostavlja 10 minuta. Nakon toga, uzorak se ispiru te se nanosi razvijач i čeka se još 10 minuta. Analizom nisu ustvrđene nikakve indikacije.

5.6. Priprema makroizbrusaka

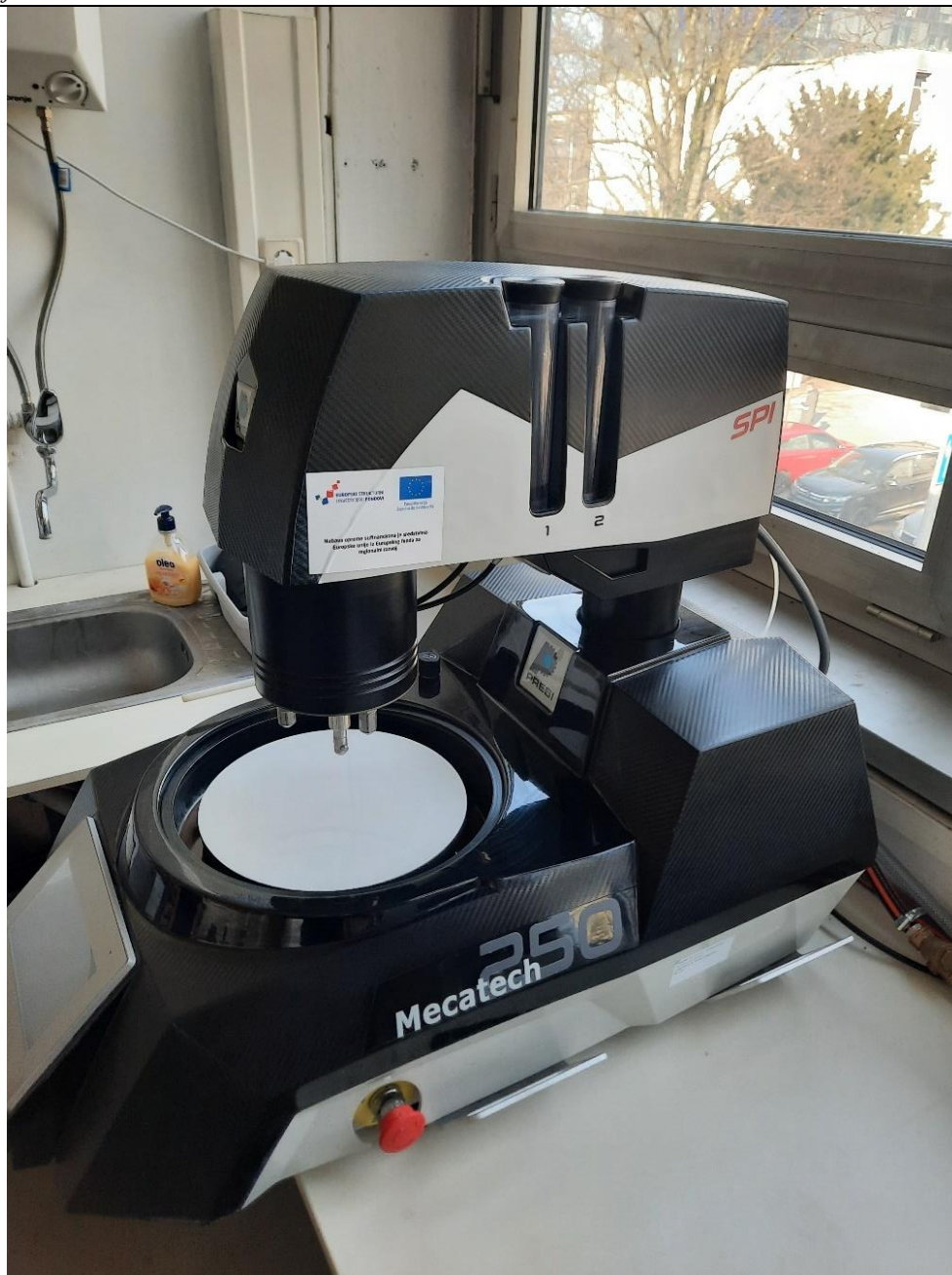
Priprema za analizu makroizbrusaka tekla je na sljedeći način:

- Uzorci su izrezani strojnim rezanjem na tračnoj pili koja je prikazana na slici 16.



Slika 16. Tračna pila korištena za rezanje uzoraka

- Nakon toga, uzorci su se grubo brusili granulacijom brusnog papira do 220 te su poslani na strojnu brusilicu
- Na strojnoj brusilici (slika 17.) provedeno je brušenje papirima granulacije 320, 600, 1000, 2400 te 4000
- Brzina vrtnje brušenja bila je 300 o/min
- Tijekom brušenja cijelo vrijeme je tekla voda koja služi za hlađenje i podmazivanje



Slika 17. Strojna brusilica korištena u eksperimentu

Zatim su se uzorci nagrivali u Kellers reagent otopini. Kellers reagent sastoji se od 2.5 ml HNO_3 , 1.5 ml HCl , 1 ml HF te 95 ml destilirane vode. Postupak se provodi kako bi se bolje vidjela makrostruktura zavara te se nakon nagrivanja uzorak isprao u vodi te ostavio da se suši.

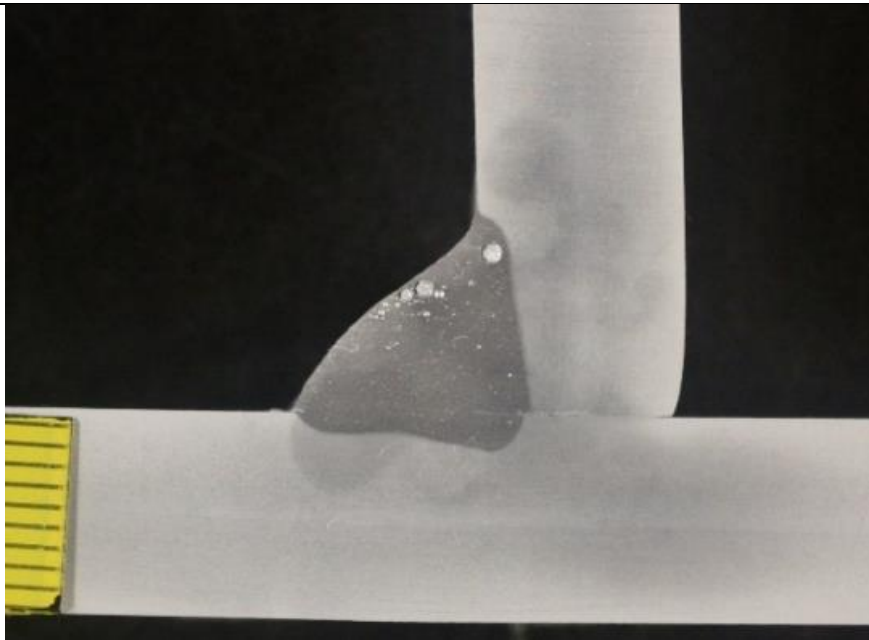
5.7. Analiza makroizbrusaka

Za izradu fotografija za analizu uzoraka je korišten fotoaparati Cannon 1000D prikazan na slici 18. te su dobivene slike pomoću kojih se u programu ImageJ mogu točno izmjeriti geometrijske značajke zavora. Fotografije makroizbrusaka zavora koriste se za provođenje analize profila zavora.

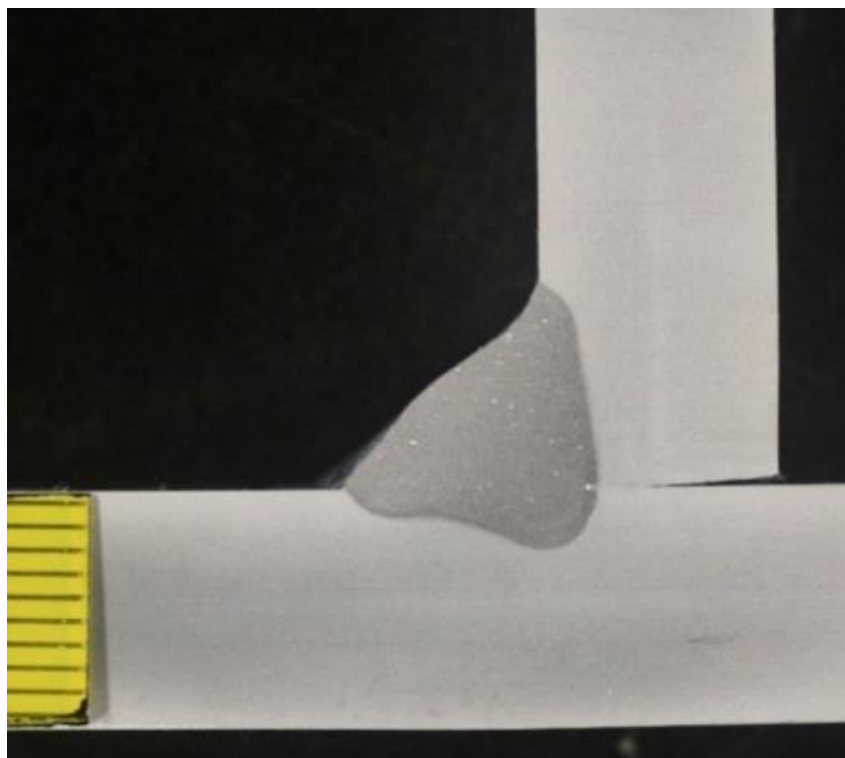


Slika 18. Profesionalni fotoaparati Cannon 1000D

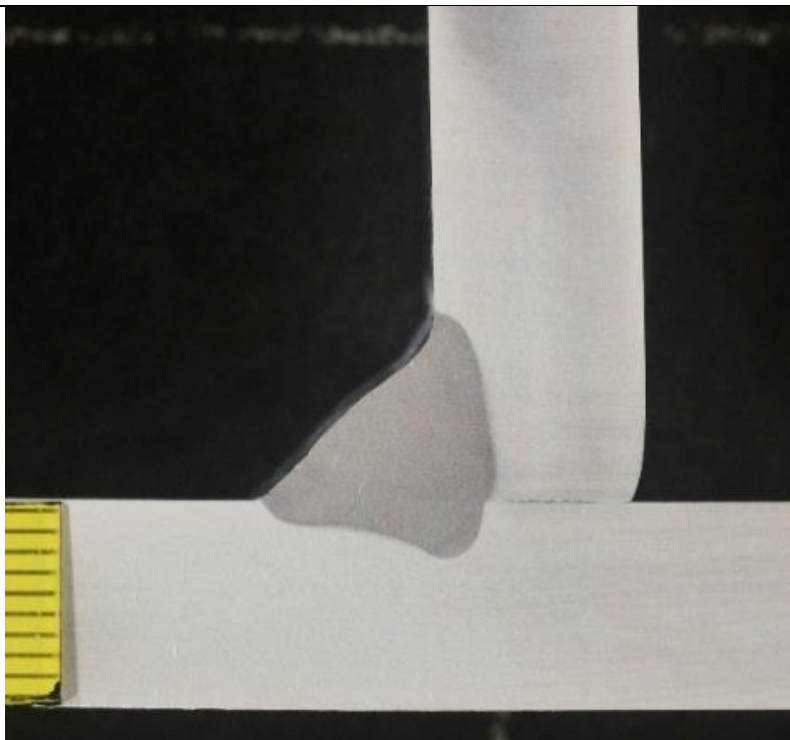
Dobiveni rezultati fotografiranja makroizbrusaka prikazani su na slikama 19., 20. i 21.



Slika 19. Fotografija makroizbruska uzorka A



Slika 20. Fotografija makroizbruska uzorka B



Slika 21. Fotografija makroizbruska uzorka C

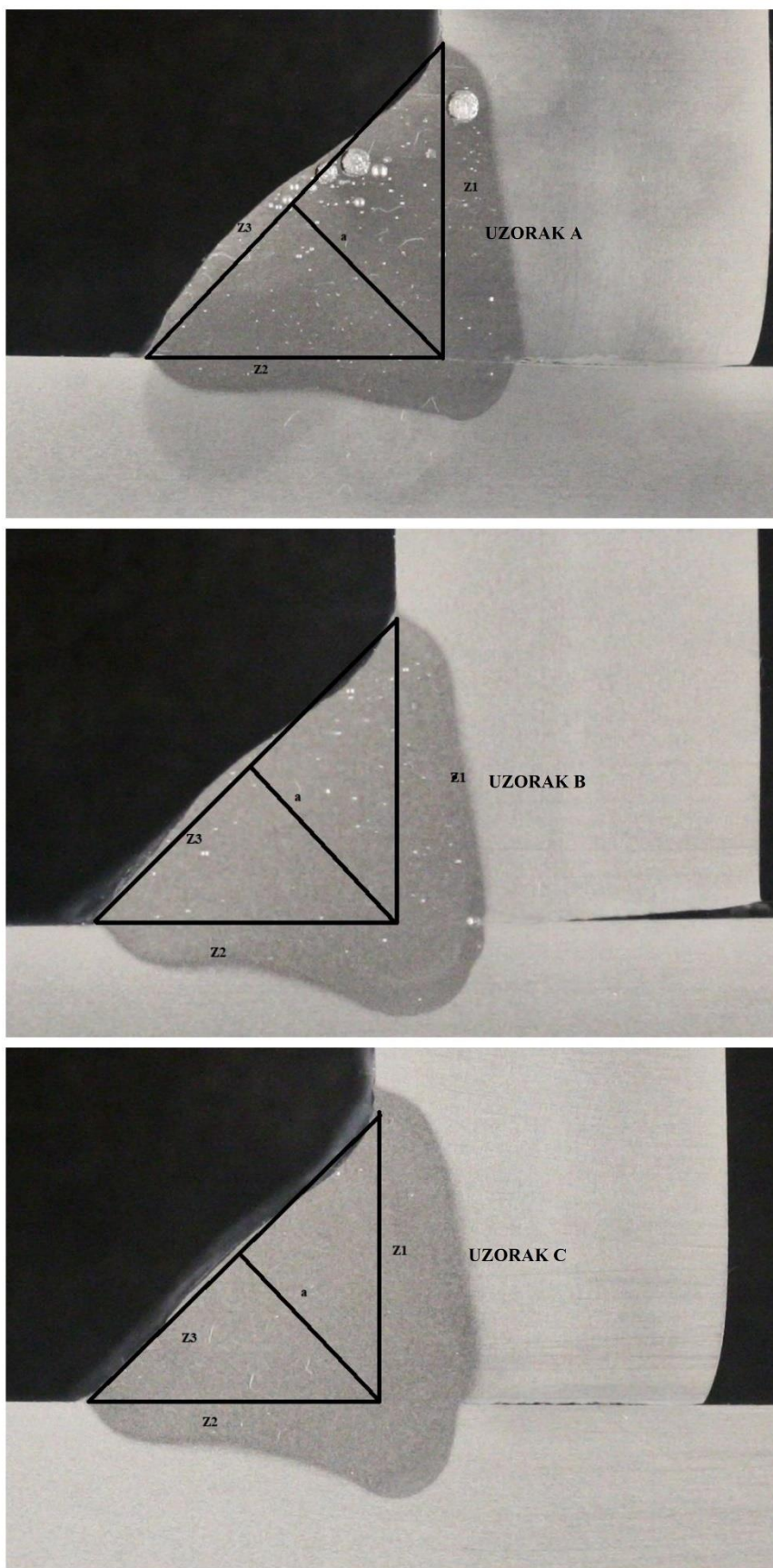
Uzorak A pokazuje najveću poroznost. Oblik zavora najbliži je trokutastom obliku.

Uzorak B pokazuje smanjenu poroznost. Oblik zavora može se opisati kao zaobljeni prstasti. Ovdje postoji odvajanje ploča na dijelu koji nije bio protaljen zbog nedovoljno dobre pripreme prije samog postupka zavarivanja.

Uzorak C pokazuje najmanju poroznost. Oblik zavora najbliži je prstastom obliku.

Vizualnom analizom fotografija makroizbrusaka može se zaključiti da je poroznost najveća kod zavora uzorka A, a na B i C se poroznost smanjuje. To je pokazatelj da se povećavanjem udjela helija u plinskoj mješavini smanjuje poroznost.

Na slici 22. prikazana je usporedba geometrije zavora uzoraka A, B i C.



Slika 22. Usporedba geometrije zavora uzoraka A, B i C

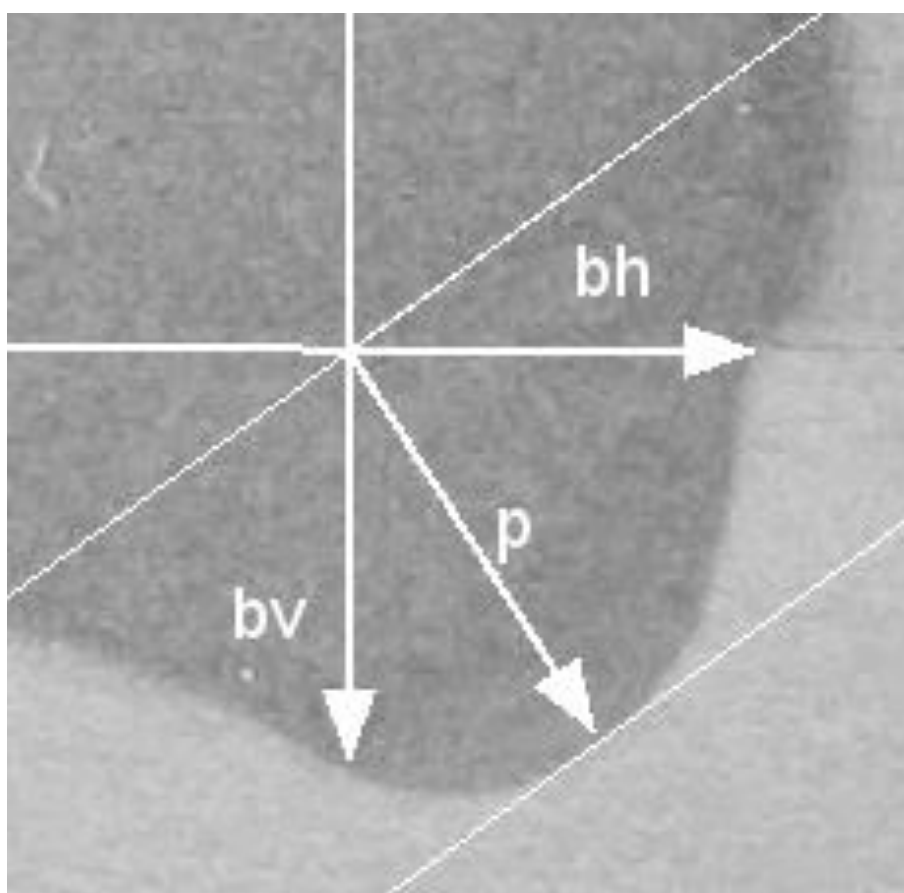
Prema podacima u tablici 14. vidljivo je da je prisutna pogreška nesimetričnog kuta zavora. Ova pogreška najčešće nastaje kao rezultat neispravnog nagiba pištolja tijekom zavarivanja, a uzimajući u obzir da je zavarivanje bilo ručno ovo je potpuno unutar očekivanog.

Tablica 14. Prikaz izmjerenih geometrijskih veličina na uzorcima A, B i C

	Uzorak A	Uzorak B	Uzorak C
Z1, mm	9,137	8,597	8,739
Z2, mm	9,066	8,453	8,548
Z3, mm	12,870	11,836	11,603
Visina zavora a	6,430	6,205	6,438

Primjećuje se da je visina zavora približno jednaka kod uzoraka A i C, a nešto manja kod uzorka B.

Na slici 23. prikazan je postupak mjerenja penetracije pomoću imageJ programa.



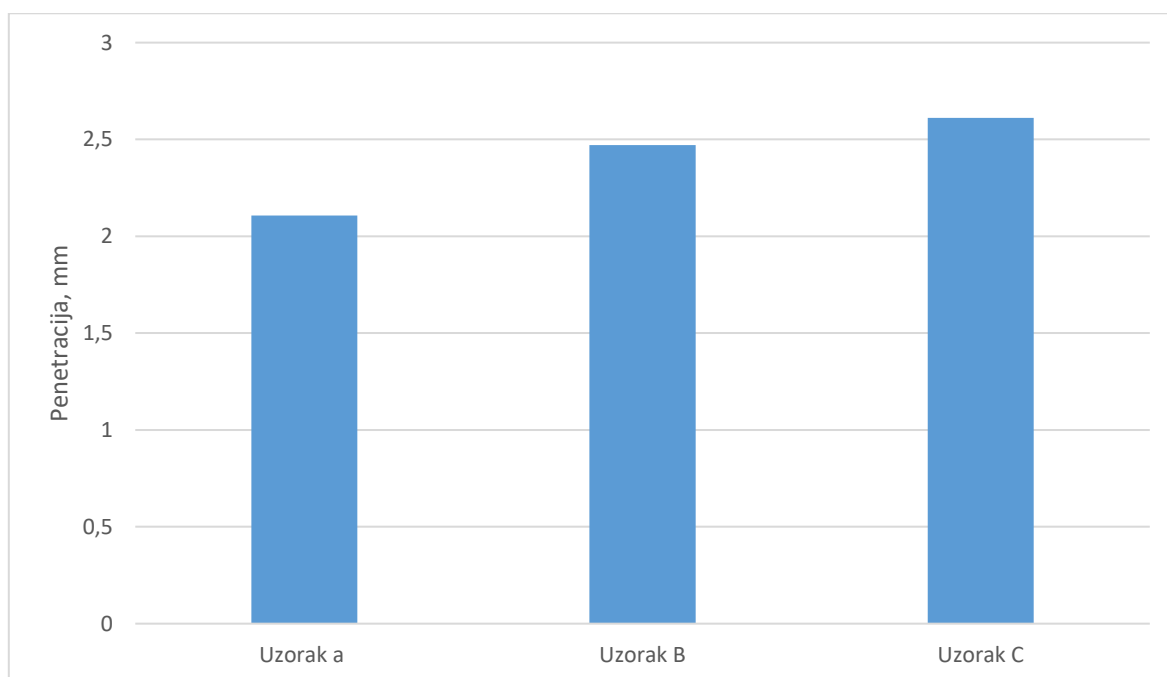
Slika 23. Postupak mjerenja penetracije pomoću imageJ programa

Rezultati mjerenja iznosa penetracije prikazani su u tablici 15. i na slici 24.

Tablica 15. Rezultati mjerenja penetracije

	Uzorak A	Uzorak B	Uzorak C
Penetracija, mm	2,108	2,471	2,611

Iz rezultata je vidljivo da se povećanjem udjela helija, povećava dubina penetracije.

**Slika 24. Dijagram usporedbe rezultata dubine penetracije**

6. ZAKLJUČAK

Aluminij je jedan od najvažnijih i najkorisnijih elemenata koji se mogu pronaći u zemljinoj kori. U prirodi se ne nalazi u elementarnom stanju pa nam je bitan postupak izdvajanja aluminija. Mehanička svojstva samog aluminija nisu zadovoljavajuća za široku upotrebu pa se često koriste legure aluminija. Zavarivanje aluminijskih legura je vrlo bitno u postupku izrade proizvoda. Najčešće metode zavarivanja aluminija su TIG i MIG postupci zavarivanja. Najčešće korišteni zaštitni plinovi su helij, argon i njihove mješavine.

Eksperimentalnim radom istraživao se utjecaj zaštitnog plina na profil penetracije kod MIG zavarivanja aluminija. Osnovni materijal korišten u eksperimentu je Al Mg4.5Mn0.7- legura 5083. Korištena su 3 zaštitna plina klasificirana po normi HRN EN ISO 14175:

- Uzorak A – I1 (Ar 5.0)
- Uzorak B – I3 (Ar He15)
- Uzorak C – I3 (Ar 50%; He 50%)

Analizom rezultata utvrđeno je sljedeće:

1. Najstabilniji električni luk dobiva se korištenjem čistog argona. Dodavanjem helija u mješavinu, električni luk postaje nestabilniji i dolazi do rasprskavanja.
2. Vizualnom i penetrantskom metodom nisu ustvrđene nikakve indikacije
3. Poroznost je kod zavarivanja aluminijskih legura skoro nemoguće izbjeći, no dodavanjem helija kao kod uzorka B, poroznost se vidno smanjuje.
4. Kod ručnog zavarivanja teško je izbjeći grešku nesimetričnog kuta zavara
5. Najpovoljniji oblik penetracije dobiven je na uzorku C- prstasti oblik. Dakle s više helija dobiva se povoljniji oblik penetracije
6. Iznosi penetracije su rasli kako se povećavao udio helija u zaštitnoj plinskoj mješavini, najveći iznos penetracije bio je kod uzorka C.

Svaka plinska mješavina ima svoje prednosti i nedostatke. I1 uzrokuje najveću poroznost, najmanji iznos penetracije i najjednačeni oblik penetracije, ali električni luk zavarivanja je najstabilniji. Dodavanjem helija kod uzorka B i C dobivena je manja poroznost, veći iznos penetracije i povoljniji oblik penetracije uz nešto nestabilniji električni luk kod zavarivanja uzorka B te vidno nestabilniji električni luk kod zavarivanja uzorka C. Helij kao zaštitni plin je puno skuplji pa je najbolja opcija za zavarivanje osnovnog materijala korištenog u eksperimentu debljine 10 mm zaštitni plin I3 (Ar He15). Iako ima nešto

nepovoljnija svojstva penetracije od EN439-I3 (Ar 50%; He 50%) – iznosi penetracije uzoraka B i C razlikuju se samo 5,47% te je električni luk relativno stabilan.

LITERATURA

- [1] Mathers, G.: The welding of aluminium and its alloys, Cambridge, 2002.
- [2] Ferraris, S., Volpone, L.M.: Aluminium alloys in third millennium shipbuilding: Materials, technologies, perspectives, The Fifth International Forum on Aluminum Ships, Tokyo, 2005.
- [3] Kovačićek, F., Indof, J., Filetin, T.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2009.
- [4] Više autora: ASM Handbook, Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous alloys and special – purpose materials, ASM International, 1992.
- [5] Mirko Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak, 2008
- [6] Minnick, William H.: Gas Metal Arc Welding Handbook
- [7] http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_AluminumMIGGM_AWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5356TM/c8100.pdf 29.01.2023.
- [8] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, FSB, Zagreb, 2016.
- [9] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf 29.01.2023
- [10] Rudan, M.: MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova, 5. SEMINAR, Aluminij i aluminijske legure – rukovanje, priprema, zavarivanje, Pula, 2008.
- [11] <https://tehnika.lzmk.hr/aluminij/> 20.01.2023.
- [12] „Lincoln Electric“, <http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/c4200.pdf> 05.02.2023.
- [13] V. Panić; Utjecaj plinova pri zavarivanju na svojstva zavara; Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [14] Norma HRN EN ISO 14175 Preuzeto s <https://repozitorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+14175%3A2008> 30.01.2023.
- [15] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Zavarivački i srodni postupci, FSB, Zagreb, 2015
- [16] Bonhart, Edward R.: Welding: Principles and Practices
- [17] AWS: Welding Handbook: Volume 2
- [18] „LindeGas“, [http://www.lindegas.de/International/web/1g/de/like351gde.nsf/repositorybyalias/schweisschutzgaseprospekt/\\$file/Schutzgasschweissen_0805.pdf](http://www.lindegas.de/International/web/1g/de/like351gde.nsf/repositorybyalias/schweisschutzgaseprospekt/$file/Schutzgasschweissen_0805.pdf) , 06.02.2023.

-
- [19] Bilić, L. (2009). Utjecaj plinova na svojstva zavarenog spoja pri MAG zavarivanju konstrukcijskih čelika (Završni rad). Preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:047476> 08.02.2023.
- [20] M. Suban, J. Tušek; Osnovne zanačilnosti zaštitnih plinova in njihovih mešanica za MIG/MAG varjenje, 1.del, Varilna tehnika, (1997)
- [21] https://saind.eu/pdf/equipos/otc/MIG/WB-P500L_EN_CE_final.pdf , 07.02.2023.
- [22] “EZ - MIG AlMg5,” Elektroda zagreb: [https://www.ezg.hr/download/prod/071 EZ - MIG AlMg5.pdf](https://www.ezg.hr/download/prod/071_EZ_-_MIG_AlMg5.pdf) 07.02.2023.