

Utjecaj postupka zavarivanja i unosa topline kod zavarivanja na geometrijska svojstva područja zavarivanja

Varga, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Polytechnic of Međimurje in Čakovec / Međimursko veleučilište u Čakovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:110:468266>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-15**



Repository / Repozitorij:

[Polytechnic of Međimurje in Čakovec Repository](#) -
[Polytechnic of Međimurje Undergraduate and Graduate Theses Repository](#)





MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ ODRŽIVI RAZVOJ

Karlo Varga, JMBAG - 0035206862

**Utjecaj postupka zavarivanja i unosa topline kod
zavarivanja na geometrijska svojstva područja
zavarivanja**

Završni rad

Čakovec, kolovoz 2024.



MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ ODRŽIVI RAZVOJ

Karlo Varga, JMBAG - 0035206862

**Utjecaj postupka zavarivanja i unosa topline kod
zavarivanja na geometrijska svojstva područja
zavarivanja**

**Influence of the welding process and heat input during
welding on the geometric properties of the welding area**

Završni rad

Mentor:

Mr. sc. Vjeran Panić, pred.

Čakovec, kolovoz 2024.



MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

PRIJAVA TEME I OBRANE ZAVRŠNOG/DIPLOMSKOG RADA

Stručni prijediplomski studij:

Računarstvo

Održivi razvoj

Menadžment turizma i sporta

Stručni diplomski studij Menadžment turizma i sporta:

Pristupnik: KARLO VARGA, JMBAG: 0035206862
(ime i prezime)

Kolegij: ZAVARIVANJE II
(na kojem se piše rad)

Mentor: VJERAN PANIĆ, PREDAVAC
(ime i prezime, zvanje)

Naslov rada: UTJECAJ POSTUPKA ZAVARIVANJA I UNOSA

TOPLINE KOD ZAVARIVANJA NA GEOMETRIJSKA SVOJSTVA
PODRUČJA ZAVARIVANJA

Naslov rada na engleskom jeziku: INFLUENCE OF THE WELDING PROCESS

AND HEAT INPUT DURING WELDING ON GEOMETRIC PROPERTIES
OF THE WELDING AREA.

- Članovi povjerenstva: 1. TOMISLAV HUBLIN, V. PRED., predsjednik
(ime i prezime, zvanje)
2. MARIO ŠERGER, V. PRED., član
(ime i prezime, zvanje)
3. VJERAN PANIĆ, PRED., mentor
(ime i prezime, zvanje)
4. TIBOR PODIGER, V. PRED., zamjenski član
(ime i prezime, zvanje)

Broj zadatka: 2023-OR-12

Kratki opis zadatka: PRISTUPNIK ANALIZIRA UTJECAJ
RAZLIČITIH POSTUPAKA ZAVARIVANJA I
UNOSA TOPLINE KOD ZAVARIVANJE NA
GEOMETRIJSKA SVOJSTVA ZAVARA NA
PRIMJERIMA DEBLJINE ČELIČNIM LIMOVA
ZA KONSTRUKCIJE TRANSPORTNE NAMJENE,

Datum: 2.3.2024.

Potpis mentora: 

Predgovor

Cilj ovog završnog rada je usporediti dva najčešće korištena postupka zavarivanja u strojarskoj proizvodnji, kako bi se olakšalo razumijevanje koji postupak je optimalan u izradi zavarenih konstrukcija transportne namjene, uzimajući u obzir toplinske deformacije, svojstva zavarenog spoja i vizualnu kvalitetu spoja.

Ovaj rad je rezultat suradnje s mentorom, profesorom Mr. sc. Vjeranom Panićem, kojem se iskreno zahvaljujem na podršci, savjetima i strpljenju tijekom cijelog procesa istraživanja i pisanja. Također, izražavam zahvalnost svim profesorima koji su mi prenijeli svoje znanje tijekom školovanja na Međimurskom veleučilištu u Čakovcu.

Na kraju, ali ne manje bitno, želim zahvaliti kolegama i prijateljima koji su mi pružali tehničku i moralnu podršku, kao i mojoj obitelji na neizmjernej potpori, ljubavi i razumijevanju.

Popis korištenih kratica

Oznaka	Opis	Jedinica
HI	unos topline	[kJ/mm]
V	napon izvora	[V]
I	jakost struje izvora	[A]
v	brzina zavarivanja	[mm/min]
Re	granica razvlačenja	[MPa]
MIG	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina	
MAG	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina	
TIG	zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina	
T	taljenje	
TM	toplinsko mehanička energija	
M	mehanička energija	
OM	osnovni materijal	
MZ	materijal zavara	
ZT	zona taljenja	
ZUT	zona utjecaja topline	
ZN	zaostala naprezanja	
ZD	zaostale deformacije	
Ar	argon	
He	helij	
CO ₂	ugljičkov dioksid	
WPS	eng. <i>welding procedure specification</i>	
SPZ	specifikacija postupka zavarivanja	
AC	Izmjenična struja	
DC	Istosmjerna struja	

Sažetak

U završnom radu je dat pregled dvaju najvažnijih elektrolučnih postupaka zavarivanja, MIG/MAG i TIG, koji se koriste u konstrukcijama transportne namjene. Analizirane su njihove prednosti i nedostaci, te specifičnosti problematike unosa topline kod zavarivanja s posebnim naglaskom na geometrijska svojstva zavara i zone utjecaja topline.

U praktičnom dijelu rada, provedeni su pokusi zavarivanja kutnog spoja na dvije debljine nehrđajućeg čelika korištenjem dva tipična navedena ručna elektrolučna postupaka zavarivanja s ciljem da se dobiju tehnički korektni te usporedivi zavari prema svim standardnim mjerilima. Tako dobiveni zavari su pregledani i ocijenjeni postupcima vizualne kontrole, mjerenjem deformacija i usporedbom makroizbrusaka zavara. Rezultati pokusa su dokumentirani, analizirani i opisani.

Ključni pojmovi: MIG/MAG zavarivanje, TIG zavarivanje, zona utjecaja topline, geometrijska svojstva zavara, makroskopska analiza zavara

Abstract

In the final paper, an overview of the two most important arc welding processes, MIG/MAG and TIG, used in transport-related constructions, is presented. Their advantages and disadvantages are analyzed, as well as the specific issues related to heat input during welding, with a special emphasis on the geometrical properties of the weld and the heat-affected zone.

In the practical part of the paper, welding experiments were conducted on a fillet joint on two different thicknesses of stainless steel using two typical manual arc welding processes mentioned, with the aim of obtaining technically correct and comparable welds according to all standard criteria. The resulting welds were examined and evaluated using visual inspection methods, deformation measurements, and by comparing weld macro-sections. The results of the experiments were documented, analyzed, and described.

Key terms: MIG/MAG welding, TIG welding, heat-affected zone, geometrical properties of the weld, macroscopic weld analysis

SADRŽAJ

SADRŽAJ	8
1. UVOD.....	1
2. Općenito o zavarivanju.....	2
2.1. Podjela postupaka zavarivanja	3
2.2. Elementi i geometrijska svojstva zavarenog spoja.....	4
2.3. Oblici zavarenih spojeva i položaji zavarivanja.....	6
2.4. Prednosti i nedostaci zavarenih spojeva.....	9
2.5. Unos topline u materijal	9
2.6. Uloga plinova pri zavarivanju	11
3. Pogreške oblika zavara i vizualna kontrola zavara.....	14
3.1. Nepravilan oblik zavarenog spoja	14
3.2. Deformacije kod zavarivanja	18
3.3. Makroskopska analiza zavara.....	21
4. TIG postupak zavarivanja.....	23
4.1. Značajke postupka TIG zavarivanja.....	23
4.2. Električni luk i izvori struje za TIG zavarivanje	24
4.3. Oprema kod TIG zavarivanja	26
4.4. Dodatni materijal kod TIG zavarivanja.....	28
4.5. Zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja	29
4.6. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja	29
5. MIG/MAG postupak zavarivanja	30
5.1. Značajke postupka MIG/MAG zavarivanja	30
5.2. Električni luk i izvori struje za MIG/MAG zavarivanje	31
5.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima	32
5.2.2. Prijenos metala mješovitim lukom.....	32
5.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom	33

5.2.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom.....	33
5.3. Oprema kod MIG/MAG zavarivanja	34
5.4. Dodatni materijal kod MIG/MAG zavarivanja	36
5.5. Zaštitni plinovi kod MIG/MAG zavarivanja.....	37
5.6. Prednosti i nedostaci MIG/MAG zavarivanja.....	37
6. Praktični dio.....	38
6.1. Uvod u praktični dio.....	38
6.2. Zavarivačka dokumentacija.....	39
6.2.1. Specifikacija postupka zavarivanja: Proba 1 – TIG – 3mm.....	40
6.2.2. Specifikacija postupka zavarivanja: Proba 2 – MAG – 3mm	41
6.2.3. Specifikacija postupka zavarivanja: Proba 3 – TIG – 6mm.....	42
6.2.4. Specifikacija postupka zavarivanja: Proba 4 – MAG – 6mm	43
6.3. Uređaji za zavarivanje i dodatni materijali i zaštitni plinovi	44
6.3.1. Uređaj za TIG zavarivanje	44
6.3.2. Uređaj za MIG/MAG zavarivanje.....	46
6.4. Tehnološki postupak zavarivanja i pripreme makroizbruska	48
6.5. Proračun unosa topline u zavareni spoj.....	56
6.5.1. Proračun - Proba 1 – TIG – 3mm.....	57
6.5.2. Proračun - Proba 2 – MAG – 3mm	58
6.5.3. Proračun - Proba 3 – TIG – 6mm.....	58
6.5.4. Proračun - Proba 4 – MAG – 6mm	59
6.6. Vizualna kontrola	60
6.7. Mjerenje i rezultati mjerenja	61
6.7.1. Mjerenje – Proba 1 – TIG – 3mm	61
6.7.2. Mjerenje – Proba 2 – MAG – 3mm.....	62
6.7.3. Mjerenje – Proba 3 – TIG – 6mm	64
6.7.4. Mjerenje – Proba 4 – MAG – 6mm.....	65

6.7.5. Usporedba unosa topline i kutne deformacije	68
7. Zaključak	69
Literatura	71
Popis slika	73
Popis tablica	76
Popis grafikona.....	77

1. UVOD

U izradi zavarenih konstrukcija transportne namjene, kao što su automobili, vozila javnog cestovnog i željezničkog prijevoza ili zrakoplovi, koriste se dijelovi izrađeni od različitih materijala. Materijali poput konstrukcijskog ili nehrđajućeg čelika, lakih metala i njihovih legura, te polimernih i kompozitnih materijala, sve se više ugrađuju u moderne transportne konstrukcije. U tom kontekstu, tehnologija spajanja zavarivanjem zauzima ključno mjesto zbog svojih brojnih prednosti.

Proces zavarivanja uključuje unos topline u područje zavarenog spoja, što direktno utječe na geometrijska svojstva zavara. Količina unijete topline ovisi o primijenjenom postupku zavarivanja i debljini materijala koji se zavaruje. Stoga je važno razumjeti kako različiti postupci zavarivanja utječu na svojstva zavara i zone utjecaja topline.

2. Općenito o zavarivanju

„Zavarivanje je spajanje ili prevlačenje osnovnog materijala primjenom topline i/ili pritiska, s ili bez dodatnog materijala. Zavareni spoj je nerastavljivi spoj dvaju ili više dijelova istovrsnog ili raznorodnog materijala ostvaren zavarivanjem. Zona spoja za vrijeme zavarivanja dovedena je u tekuće ili plastično stanje. Mjesto neposrednog dodira i susjedna zona u kojoj je došlo do strukturnih promjena tvore zavareni spoj. Svojstva zavarenog spoja zavise o vrsti osnovnog i dodatnog materijala te o postupku zavarivanja“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)

Iako je zavarivanjem moguće spajanje metala s metalom, nemetala s nemetalom i metala s nemetalom, u praksi je najrasprostranjenije upravo zavarivanje metala s metalom.

„Danas se čelik za konstrukcije u 45% slučajeva spaja zavarivanjem. Najviše je zastupljeno elektrolučno zavarivanje (70%), potom elektro otporno zavarivanje (25%), a ostatak čine svi ostali načini zavarivanja.“ (Nikolić, Hiti 1998.)

Slika 1. – Zavarivanje MIG/MAG postupkom



Izvor: <https://www.pit.ba/vrste-zavarivanja-prednosti-i-nedostaci/>

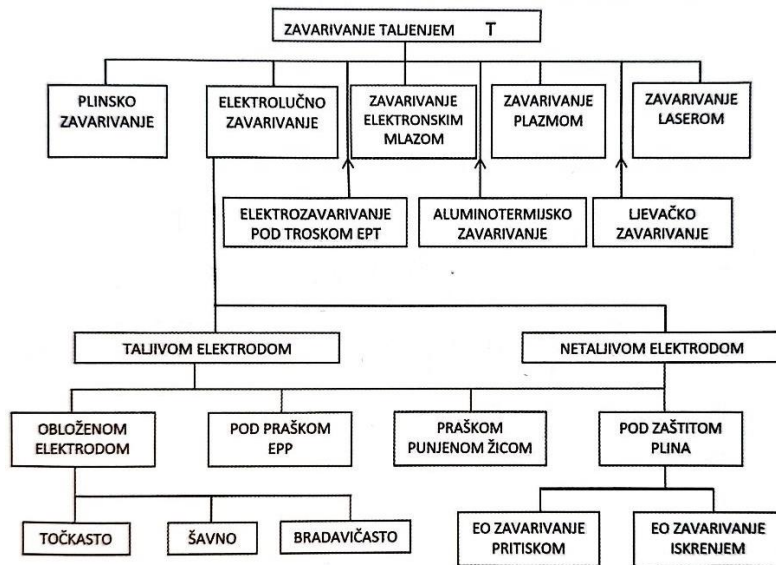
(Datum pristupa: 25.7.2024.)

2.1. Podjela postupaka zavarivanja

Osnovna podjela postupaka zavarivanja prema načinu ostvarivanja zavarenog spoja je:

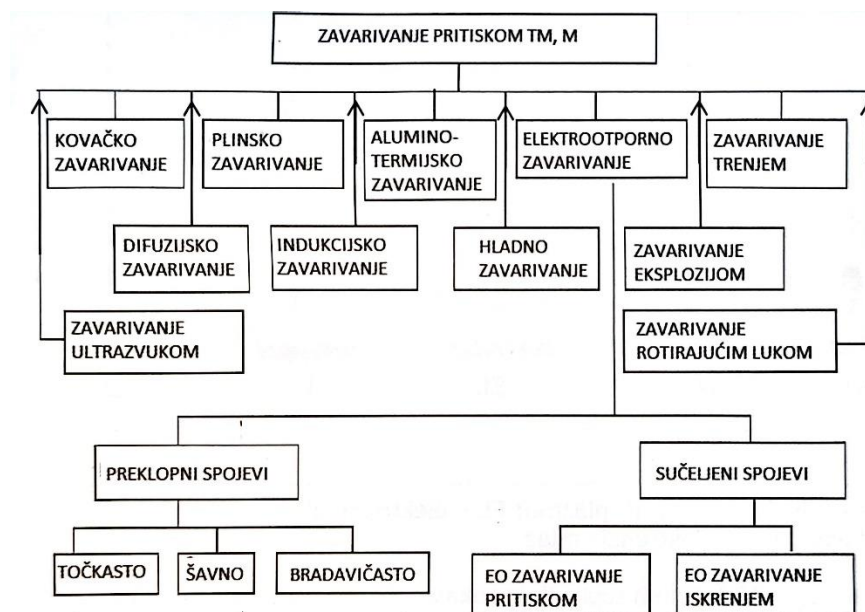
- Zavarivanje taljenjem
- Zavarivanje pritiskom ili taljenjem i pritiskom

Slika 2. – Podjela postupaka zavarivanja taljenjem



Izvor: Kralj, Kožuh, Andrić 2015.

Slika 3. – Podjela postupaka zavarivanja pritiskom (toplinsko-mehanička i mehanička energija)



Izvor: Kralj, Kožuh, Andrić 2015.

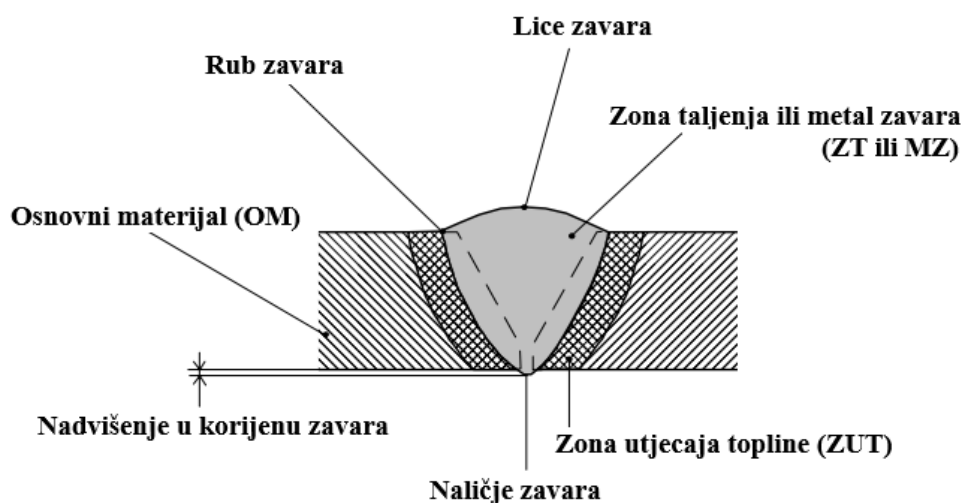
2.2. Elementi i geometrijska svojstva zavarenog spoja

„Zavareni spoj je zavarivanjem ostvarena veza između dva ili više osnovnih materijala. Kod zavarivanja metala taljenjem spoj se sastoji, uz osnovni materijal, od metala zavara, granice pretaljivanja i zone utjecaja topline. Zavar je pretaljeni i skrtnuti metal dodatnog i osnovnog materijala ili samo osnovnog materijala, ako se dodatni materijal ne upotrebljava.

Osnovni materijal je onaj koji se obrađuje, zavaruje ili navaruje. Dodatni materijal je onaj koji se dodaje i rastaljuje u procesu zavarivanja ili navarivanja, kao na primjer: elektrode, žice, trake, prašak. Pomoćni materijal pomaže u procesu zavarivanja ili navarivanja, kao na primjer zaštitni plinovi.

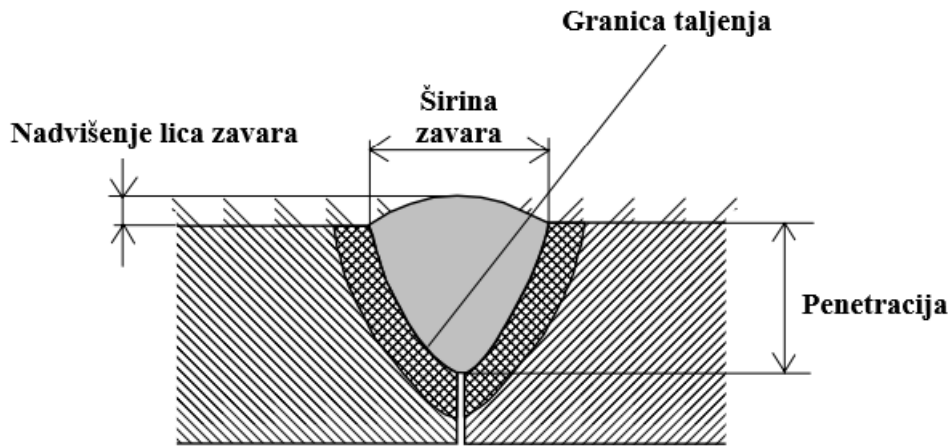
Granica pretaljivanja je vrlo usko područje između zavarivanjem ili navarivanjem pretaljenog i nepretaljenog osnovnog materijala. Zona utjecaja topline je područje uz zavar ili navar nepretaljenog osnovnog materijala u kojemu su se utjecajem unesene topline dogodile određene strukturne promjene. Označava se kraćenicom ZUT. Talina zavara ili kupka je tekući rastaljeni metal u zoni zavarivanja ili navarivanja. Miješanje materijala u procesu zavarivanja ili navarivanja je miješanje osnovnog s dodatnim materijalom.“ (Juraga, Ljubić, Živčić 1998.)

Na sljedećim slikama označeni su osnovni elementi i geometrijska svojstva u kutnom i sučeljenom zavarenom spoju, te su upisani njihovi nazivi:



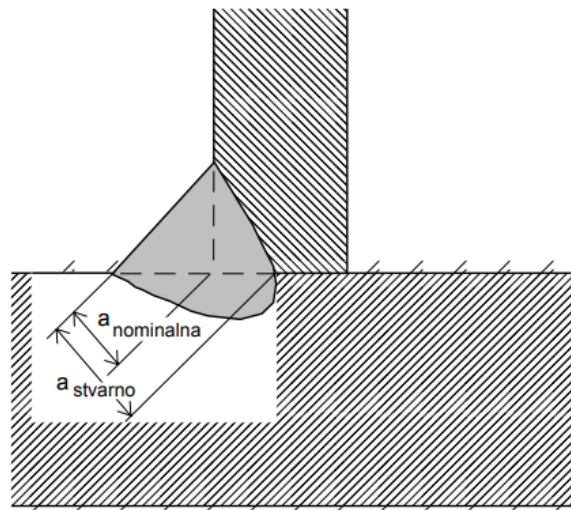
Slika 4. – Elementi sučeljenog zavara

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)



Slika 5. – Geometrijska svojstva sučeljenog zavara

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)



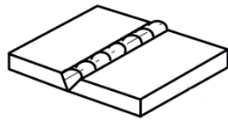
Slika 6. – Nominalna i stvarna visina kutnog zavara

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

2.3. Oblici zavarenih spojeva i položaji zavarivanja

Oblici zavarenih spojeva mogu se kategorizirati na razne načine, ovisno o položaju zavarivanja i tehnici zavarivanja koja se koristi, neki od osnovnih oblika zavarenih spojeva uključuju:

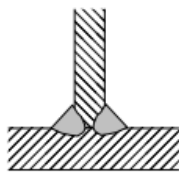
- **Sučeoni spoj** – dva dijela materijala su postavljena krajnjim dijelovima jedan uz drugi i zavarena na mjestu kontakta.



Slika 7. – Sučeoni spoj

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

- **T-spoj** – jedan dio materijala je postavljen pod pravim kutom u odnosu na drugi i zavareni su na mjestu kontakta.



Slika 8. – T-spoj

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

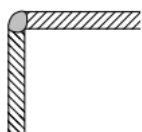
- **Preklopni spoj** – Jedan dio materijala je postavljen preko dijela drugog materijala i zavareni su na mjestima kontakta.



Slika 9. – Preklopni spoj

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

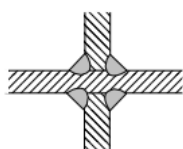
- **Rubni spoj** – rubovi dva materijala su postavljeni jedan uz drugi i zavareni su duž tih rubova.



Slika 10. – *Rubni spoj*

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

- **Križni spoj** – tri komada materijala postavljena su jedan na drugi pod pravim kutom, formirajući oblik križa.



Slika 11. – *Križni spoj*

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

- **Naliježujući spoj** – dva komada materijala postavljeni jedan preko drugoga, te zavareni na mjestima preklapanja.



Slika 12. – *Naliježujući spoj*

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

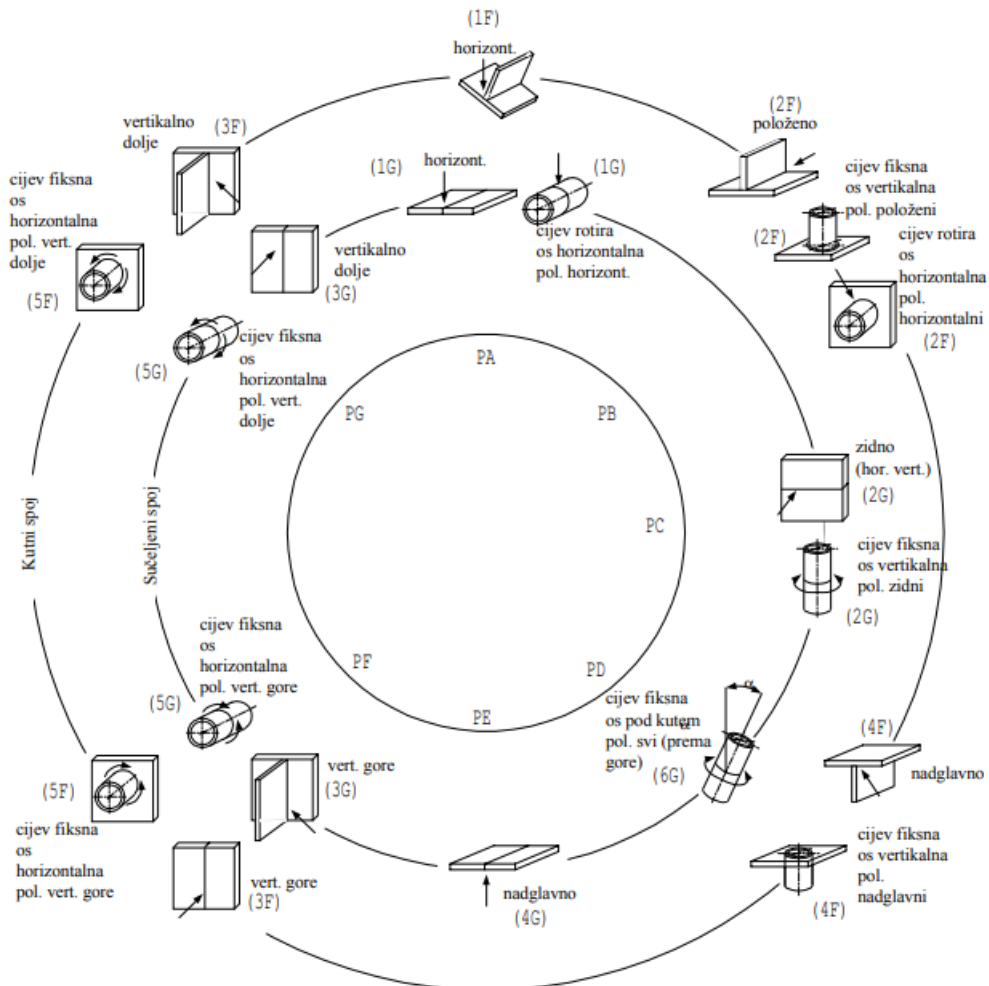
- **Prirubni spoj** – jedan dio materijala, obično prirubnica, zavaruje se na ravnu površinu drugog materijala ili drugu prirubnicu.



Slika 13. – *Prirubni spoj*

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

Položaji zavarivanja definiraju se prema orijentaciji zavara i položaju radnog komada u odnosu na zavarivača, a prema normi DIN EN ISO 6947 razlikujemo sljedeće položaje zavarivanja:



Slika 14. – Položaji zavarivanja

Izvor: <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)

2.4. Prednosti i nedostaci zavarenih spojeva

Tablica 1. – Usporedba prednosti i nedostatka zavarenih spojeva

Prednosti zavarenih spojeva	Nedostaci zavarenih spojeva
Svojstva krutosti i čvrstoće spoja gotovo jednaka kao i kod osnovnog materijala.	Za izvođenje kvalitetnih spojeva potrebna je visoka stručnost zavarivača.
Neznatna dodatna masa zbog zavarenog spoja.	Opasnosti povezane sa zaštitom na radu (bljeskovi svjetlosti, plinovi, električni udar)
Estetski privlačni, nepropusni i korozijski otporni spojevi.	Nemogućnost rastavljanja spoja bez oštećenja.
Dobra otpornost na dinamička opterećenja.	Rizik od stvaranja unutarnjih naprezanja i deformacija.
Smanjenje troškova materijala zbog eliminacije pričvrtnih elemenata.	Prije spajanja zavarivanjem potrebno je pripremiti obradak, što uključuje oblikovanje žlijeba i čišćenje mjesta spoja.
Mogućnost spajanja različitih raznolikih materijala.	Osnovni materijal elemenata u spoju mora biti istorodni, to jest ne smije se bitno razlikovati po kemijskom sastavu i strukturi.
Ekonomični su za proizvode u malim serijama	Nije pogodno za složene konstrukcije.
Može se robotizirati	Potrebna je posebna, često skupa, oprema za zavarivanje.

Izvor: (Nikolić 1998., Kujundžić-Lujan 2023.)

2.5. Unos topline u materijal

„Unosom topline u osnovni materijal dolazi do promjene agregatnog stanja materijala u dijelu zavara, ali i zagrijavanja osnovnog materijala. Zagrijavanje osnovnog materijala uzrokuje rastezanje. Kasnije prilikom hlađenja dolazi do ponovnog stezanja, odnosno vraćanja u prvobitni oblik. To uzrokuje pojavu zaostalih naprezanja u zavarenoj konstrukciji. Ako naprezanja prelaze granicu razvlačenja (R_e), dolazi do nastajanja trajne deformacije. Generalno gledano, veći unos topline znači veće zagrijavanje materijala što rezultira većim trajnim deformacijama. Ponekad premali unos topline rezultira prebrzim hlađenjem što dovodi do prevelikih unutarnjih sila koje mogu izazvati puknuće zavara kod krućih materijala. Isto tako preveliki unos topline, kod mekanijih materijala, rezultira nastajanjem ugorina ili pregarenjem materijala u mjestu zavara.“ (Peter 2020.)

„Unesena toplina je zapravo količina isporučene energije prema radnom komadu, putem električnog luka, s ciljem nastajanja zavara. Mjeri se jedinicama energije po dužini [kJ/mm].“

(Peter 2020.)

Formula za unos topline u zavareni spoj glasi:

$$Hl = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} [kJ/mm]$$

Gdje je:

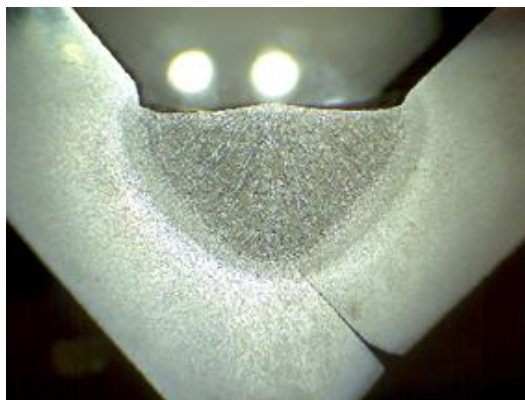
Hl – unos topline [kJ/mm]

V – napon izvora [V]

I – jakost struje izvora [A]

v – brzina zavarivanja [mm/min]

Unos topline tijekom zavarivanja značajno utječe na svojstva zavarenog spoja. Visoke temperature mijenjaju mikrostrukturu materijala, što utječe na tvrdoću, čvrstoću i duktilnost. Brzo zagrijavanje i hlađenje mogu stvoriti unutarnja naprezanja i deformacije, što može uzrokovati pukotine. ZUT oko zavarenog spoja mijenja svojstva materijala, utječući na čvrstoću i izdržljivost spoja. Oksidacija i kontaminacija spoja smanjuju kvalitetu i otpornost na koroziju. Pravilno upravljanje toplinom ključno je za kvalitetan zavar; previše topline uzrokuje deformacije, dok premalo neadekvatno spaja materijale. Unos topline stoga određuje kvalitetu i svojstva zavarenog spoja, te je njegovo pravilno upravljanje od velike važnosti za kvalitetan zavareni spoj.



Slika 15. – ZUT na makroizbrusku kutnog spoja

Izvor: D. Rose 2019. Benefits of the Stabiliers Praxis example

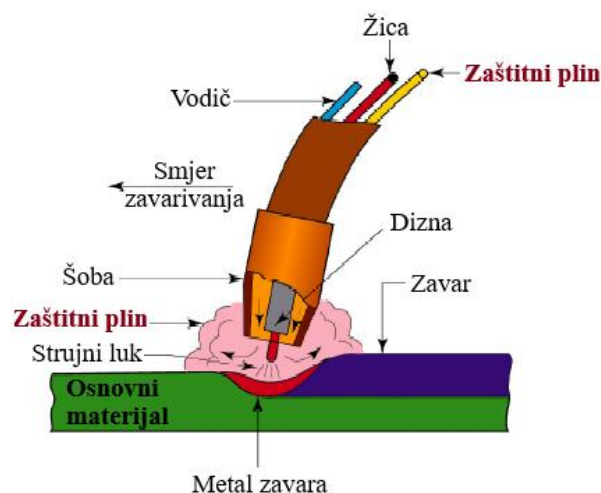
2.6. Uloga plinova pri zavarivanju

„Mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala za vrijeme leta kroz električni luk i talina moraju se zaštititi od djelovanja okolne atmosfere. Ta zaštita se uspješno može izvesti pomoću odgovarajućih plinova. Postoji mogućnost primjene čitavog niza plinova bilo inertnih bilo aktivnih ili njihov mješavina.

Poznavanje utjecaja zaštitnih plinova neophodno je da bi se moglo ocijeniti njihovo djelovanje. Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na:

- električno-fizikalna svojstva električnog luka i time na prijenos metala s elektrode na radni komad,
- metalurške procese u talini zavora,
- tehnološke parametre.

Specifična gustoća zaštitnog plina ima veliki značaj za efikasnost zaštite mjesta zavarivanja od utjecaja okolne atmosfere. Ako se usporede najčešće upotrebljavani plinovi, može se uočiti da argon, koji je najgušći od inertnih plinova (10 puta gušći od helija), te ugljikov dioksid, koji je za 1/10 gušći od argona oblikuju dobar zaštitni omotač. S druge strane dušik, helij i vodik skloni su turbulentnom strujanju pri izlazu iz sapnice. Posebno je kod helija potreban veći protok za istu kvalitetu zaštite u položenu položaju (jedino je zbog male gustoće prikladan pri zavarivanju u naglavnom položaju). Toplinska vodljivost plinske atmosfere i pojave u njoj utječu na radijalne gubitke topline što utječe na oblik jezgre luka i njegovu geometriju.“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)



Slika 16. – Shema strujanja zaštitnog plina u MIG/MAG postupku

Izvor: <https://bancrofteng.com/how-to-choose-shielding-gas-types-for-gmaw/>

(Datum pristupa 28.7.2024.)

Tablica 2. – Vrste zaštitnih plinova i njihova svojstva

Vrsta zaštitnog plina	Udio pojedinog plina vol %	Materijal za koje je zaštita promjenjiva	Postupak zavarivanja
Ar (čisti)	99,998 % Ar	Materijali osjetljivi na plinove Ti, Ta, Nb, V	TIG
Ar (tehnički)	99,995 % Ar	Svi metali (osim ekstremno osjetljivih na plinove)	TIG
Ar+O ₂	99% Ar+1% O ₂ 98% Ar+2% O ₂ 97% Ar+3% O ₂ 95% Ar+5% O ₂ 92% Ar+8% O ₂ 88% Ar+12% O ₂	visokolegirani, niskolegirani čelici niskolegirani nelegirani čelici	MIG MAG
Ar+CO ₂	98% Ar+2% CO ₂ 95% Ar+5% CO ₂ 85% Ar+15% CO ₂ 82% Ar+18% CO ₂ 75% Ar+25% CO ₂	visokolegirani, niskolegirani i nelegirani čelici	MIG ili MAG
Ar+CO ₂ +O ₂	91% Ar+5% CO ₂ +4% O ₂ 90% Ar+5% CO ₂ +5% O ₂ 83% Ar+13% CO ₂ +4% O ₂ 82% Ar+14% CO ₂ +4% O ₂ 75% Ar+20% CO ₂ +5% O ₂	nelegirani i niskolegirani čelici	MAG

Ar+H ₂	98% Ar+2% H ₂ 94% Ar+6% H ₂ 90% Ar+10% H ₂ 85% Ar+15% H ₂	Ni i Ni legure, visokolegirani čelici	TIG
Ar+N ₂	85% Ar+15% N ₂	Cu i neke CU legure	TIG ili MIG
Ar+He	80% Ar+20% He 70% Ar+30% He i ostali omjeri sve do 25% Ar+75% He	svi metali posebne prednosti pri zavari vanju aluminijskih legura	MIG ili TIG
He	99,99 % He	svi metali	MIG ili TIG
He+Ar+CO ₂ +H ₂	-	visokolegirani i čelici s 9% Ni	MIG
CO ₂	99,9% CO ₂	nelegirani konstruktivni čelici	MAG
CO ₂ +O ₂	-	nelegirani konstruktivni čelici	MAG
N ₂	99,9% N ₂	bakar i neke legure bakra	MIG
N ₂ +H ₂	90% N ₂ +10% H ₂ 80% N ₂ +20% H ₂ 70% N ₂ +30% H ₂	svi metali	TIG ili MIG

Izvor: Izvor: Kralj, Kožuh, Andrić 2015.

3. Pogreške oblika zavara i vizualna kontrola zavara

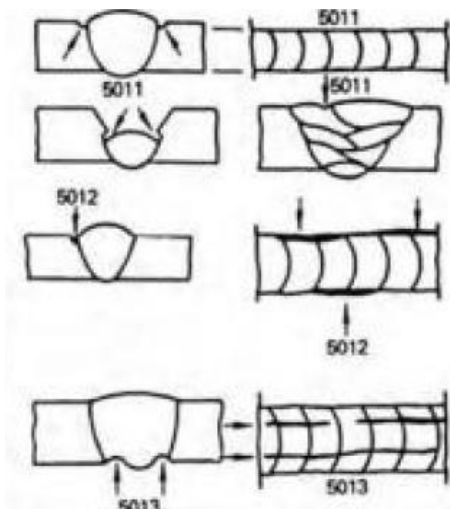
Pogreške oblika zavara (Skupina 500) su nepravilnosti ili nedostaci koji se mogu pojaviti u zavarenim spojevima tijekom ili nakon procesa zavarivanja. To su odstupanja od propisnog oblika zavara i zavarenog spoja. Te pogreške mogu utjecati na čvrstoću, izdržljivost i sigurnost zavara, te je stoga važno identificirati ih i ispraviti.

Vizualna kontrola je osnovna metoda za prepoznavanje pogrešaka oblika zavara i može se provesti bez specijalizirane opreme. Vizualna kontrola može biti dopunjena i jednostavnim alatima kao što su povećalo za bolji pregled manjih nepravilnosti ili ravnalo i kutomjer za provjeru ravnosti zavara. Redovitim pregledom i pravovremenim prepoznavanjem ovih pogrešaka mogu se poduzeti potrebne korektivne mjere kako bi se osigurala kvaliteta zavara.

3.1. Nepravilan oblik zavarenog spoja

Ugorine uz zavar (Oznaka 501)

- „Ugorine uz zavar su oštećenja oblika oštih udubina uz zavar na stranicama žlijeba ili kutnog zavara, te na prijelazu kod vezanih slojeva u žlijebu koja mogu biti:
 - Po cijeloj dužini uz zavar (Oznaka 5011)
 - Mjestimično uz zavar (Oznaka 5012)
 - Na korijenu zavara (Oznaka 5013)“

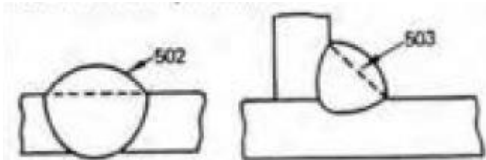


Slika 17. – Ugorine uz zavar

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Preveliko nadvišenje zavara (Oznaka 502, 503)

- „Preveliko nadvišenje ili preveliko ispupčenje lica zavara koje može biti:
 - Na sučeljenom spoju (Oznaka 502)
 - Na kutnom spoju (Oznaka 503)“

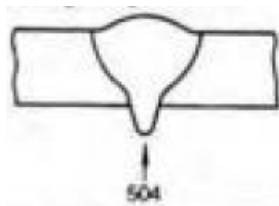


Slika 18. – Preveliko nadvišenje lica zavara

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Preveliko nadvišenje korijena zavara (Oznaka 504)

- Preveliko nadvišenje korijena zavara, koje može biti:
 - Na većim dužinama korijena zavara
 - Mješovito kao prokapljina“

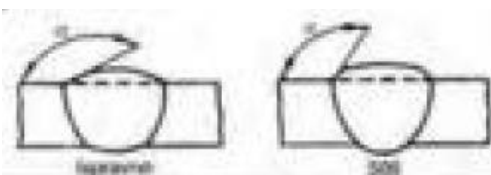


Slika 19. – Preveliko nadvišenje korijena zavara

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Oštar prijelaz zavara (Oznaka 505)

- „Premali, „oštar“ kut α kod prijelaza površine zavara na osnovni materijal“

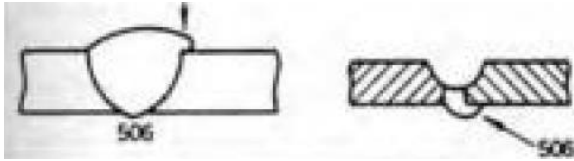


Slika 20. – Oštar prijelaz zavara

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Preklop zavara (Oznaka 506)

- „Preklop materijala zavara na površinu osnovnog materijala izvan žlijeba bez staljivanja s osnovnim materijalom“



Slika 21. – Preklop zavara

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Pomaknutost u sučeljavanju (Oznaka 507)

- „Odstupanje od ravnine u sučeljavanju dvaju elementa.“



Slika 22. – Pomak u sučeljavanju

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Odstupanje od zadanog pravca (Oznaka 508)

- „Odstupanje od zadanog pravca kod dva ili više zavarenih elemenata.“

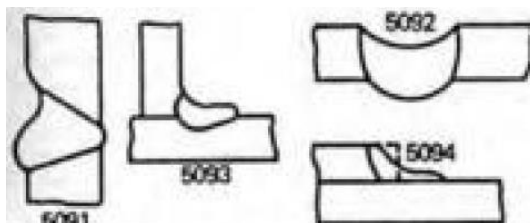


Slika 23. – Odstupanje od pravca

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Utonulost zavara (Oznaka 509)

- „Utonulost zavara kod zavarivanja pod utjecajem sile teže, može biti na:
 - Sučeljenom spoju u zidnom položaju,
 - sučeljenom spoju u vodoravnom položaju,
 - kutnom spoju u vodoravnom položaju,
 - preklopnom spoju.,,

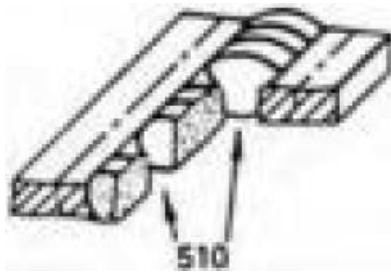


Slika 24. – Utonulost zavara

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Progaranje (Oznaka 510)

- „Otvor (rupa) u zavaru nastala progaranjem ili propaljivanjem“

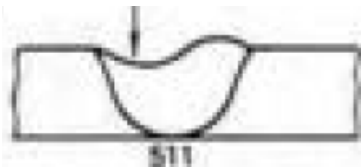


Slika 25. – *Progaranje*

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Nedovoljno popunjen zavar (Oznaka 511)

- „Pokrovni sloj ili popuna zavara preniska, mjestimično ili po cijeloj dužini.“

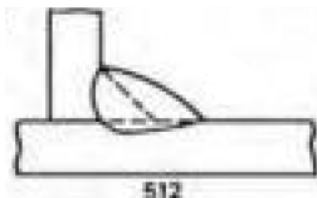


Slika 26. – *Nedovoljno popunjen zavar*

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Nesimetričan kutni zavar (Oznaka 512)

- „Nesimetrični kutni zavar, najčešće položena stranica kutnog zavara duža od okomite.“

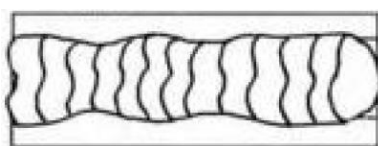


Slika 27. – *Nesimetrični kutni zavar*

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Nepравilan izgled zavara (Oznaka 513, 514)

- „Nepравilan izgled zavara može biti:
 - Neravnomjerna širina, mjestimično uži pa širi zavar
 - Neravnomjerna, jako naborana, površina zavara.“

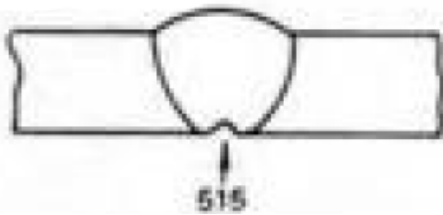


Slika 28. – *Nepравilan izgled zavara*

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Uvučen korijen zavora (Oznaka 515)

- „Nedovoljno popunjen, plitak, korijen zavora.“



Slika 29. – Uvučen korijen zavora

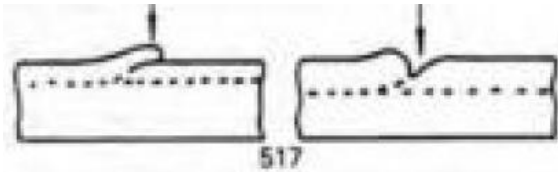
Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

Šupljikav korijen zavora (Oznaka 516)

- Stvaranje šupljikavom materijala spužvastog izgleda u korijenu zavora.

Nepravilno izveden nastavak (Oznaka 517)

- Nepravilno izveden nastavak na površini zavora, nedovoljno spojen ili previše nadvišen.



Slika 30. – Nepravilni nastavak zavora

Izvor: Juraga, Ljubić, Živčić 1998.

3.2. Deformacije kod zavarivanja

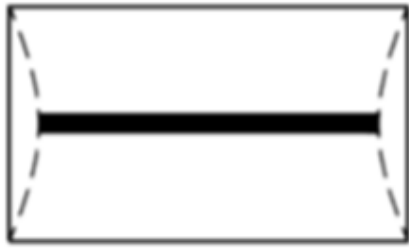
„Za vrijeme i nakon zavarivanja, termičkog rezanja ili žlijebljenja javljaju se zaostala naprezanja i deformacije. Zbog pojmovnog razlikovanja zaostala naprezanja od zavarivanja nazivaju se i zaostale napetosti. U daljnjem tekstu se razmatraju ZN i ZD nakon zavarivanja. Zaostale napetosti kod zavarivanja su posljedica lokalnog zagrijavanja.“

Uzrok i mehanizam nastajanja ZN i ZD

Lokalno unošenje topline je uzrok ZN i ZD. Kada se pri zagrijavanju ili hlađenju javljaju naprezanja u bilo kojoj zoni preko Re (granice razvlačenja) dolazi do trajnih deformacija, tada će se nakon potpunog hlađenja u tom dijelu javiti ZN. ZN se javljaju i u hladno deformiranim predmetima, pri toplinskim obradama u odljevcima i otkivcima, pri svakom lokalnom grijanju na temperature kada materijal prelazi u plastično stanje. I brušenje sa jakim lokalnim zagrijavanjem rezultirat će vlačne ZN.“ (Lukačević 1998.)

„Kod zavarenih spojeva najčešće nalazimo slijedeće deformacije:

- **uzdužna deformacija** – skraćenje elemenata u uzdužnom smjeru



Slika 31. – *Uzdužna deformacija*

Izvor: P. Žbirin 2018.

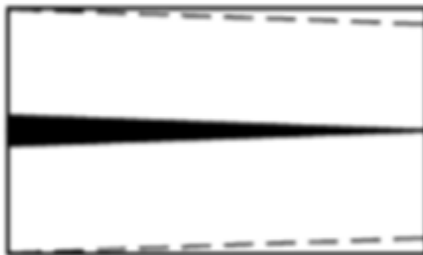
- **poprečna deformacija** – skraćenje elemenata poprečno na uzdužnu os



Slika 32. – *Poprečna deformacija*

Izvor: P. Žbirin 2018.

- **rotacijska deformacija** – kutno iskrivljenje u ravnini ploče zbog toplinske ekspanzije ili kontrakcije



Slika 33. – *Rotacijska deformacija*

Izvor: P. Žbirin 2018.

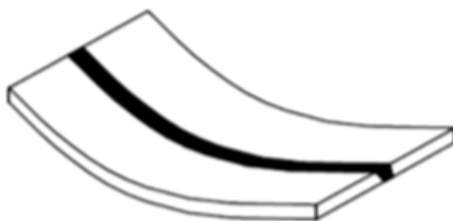
- **kutna deformacija** – iskrivljenje uzrokovano nejednolikom raspodjelom temperature u poprečnom smjeru



Slika 34. – *Kutna deformacija*

Izvor: P. Žbirin 2018.

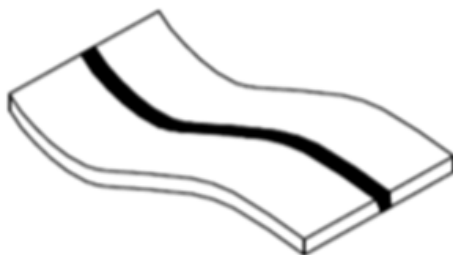
- **savijanje** – iskrivljenje u ravnini dužine zavarava



Slika 35. – *Savijanje*

Izvor: P. Žbirin 2018.

- **izvijanje** – iskrivljenje uzrokovano tlačnim napreznjima zbog nestabilnosti jer su ploče tanke“



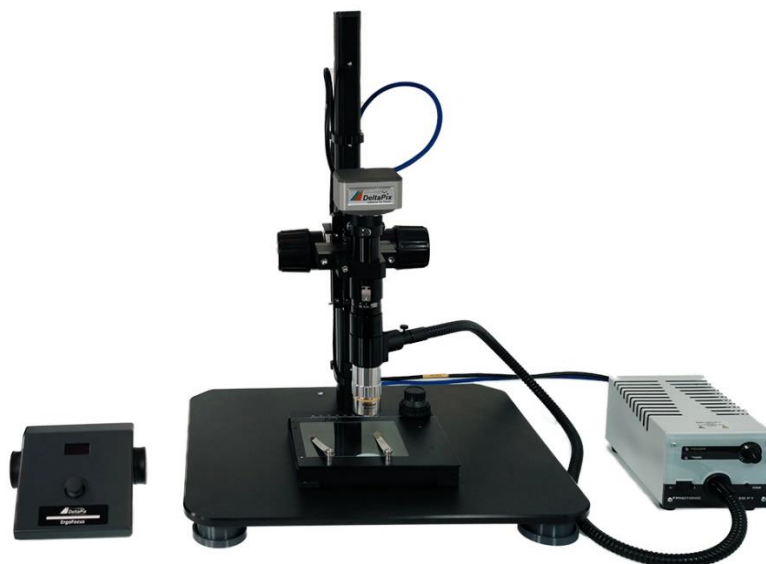
Slika 36. – *Izvijanje*

Izvor: P. Žbirin 2018.

3.3. Makroskopska analiza zavara

„Izrada makroizbruska, uzorka za analizu makrostrukture, jednostavan je zadatak. Poprečni presjek zavarenog spoja brusilicom se fino obradi, a nakon brušenja površina se nastavi brusiti brusnim papirom, najbolje pomoću diska za brušenje pričvršćenog na ručnoj brusilici. Postupno smanjujući veličinu zrna brusnog papira (ne treba ići na gradacije više od 250) i mijenjajući nakon svakog prolaza smjer brušenja za 90°, doći će se brzo do površine pripremljene za nagrizanje. Slijedi postupak nagrizanja, najčešće razblaženom dušičnom kiselinom, natopljenom krpicom ili tamponom vate. Nagrizanje se prekida kada se pojavi jasno izražena struktura, temeljitim ispiranjem pod mlazom tekuće vode. Uzorak je time pripremljen za pregled.

Razblažena dušična kiselina dobiva se ulijevanjem 100 - 250 cm³ koncentrirane dušične kiseline na litru vode. Ne lijevati vodu u kiselinu, nego obrnuto! Često se za nagrizanje (izazivanje strukture) koristi "Adlerov reagens", manje rizičan, sljedećeg sastava: 15g feroklorida, 3g bakar-amonium klorida, 50ml sumporne kiseline i 25ml vode.“ (Juraga, Ljubić, Živčić 1998.)



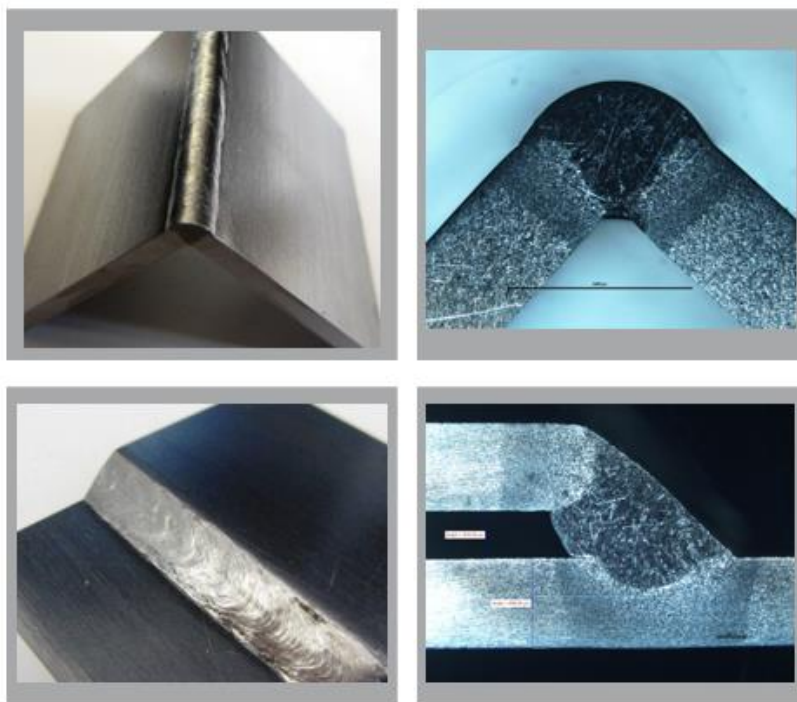
Slika 37. – *Digitalni mikroskop za snimanje makroizbrusaka*

Izvor: <https://www.askania.de/en/products/digital-microscopes/dpx-m6000.html>

(Datum pristupa: 28.7.2024.)

„Broj podataka, koje možemo dobiti pregledom makroizbruska zavarenog spoja, za ista je velik. Navesti ćemo samo neke:

- već prvi pogled dat će nam osnovni podatak je li zavareni spoj izveden uredno s motrišta odnosa širine i visine, popunjenosti presjeka. ispupčenja, nadvišenja lica ili korijena. preklopa, bočnog i međusobnog vezivanja itd.;
- broj, veličinu i raspored slojeva dat će nam podatke o poštivanju tehnološke discipline kao i uvid u veličinu unosa topline i ravnomjernost polaganja slojeva;
- presjek i izgled slojeva ukazat će nam na ispravnost odabranih parametara zavarivanja i korištenu tehniku rada tijekom zavarivanja:
- Jače izražena "igličasta" struktura dat će nam podatak o brzini hlađenja i potrebi zadržavanja među slojne temperature kao i o potrebi predgrijavanja;
- izgled i širina ZUT pruža podatak o potrebi naknadne toplinske obrade zavarenog spoja;
- u slučaju da smo presjekom "pogodili" mjesto unesene pogreške, dobit ćemo podatak o njenom karakteru, veličini, položaju u presjeku, iz čega je moguće izvuci određene zaključke.“ (Juraga, Ljubić, Živčić 1998.)



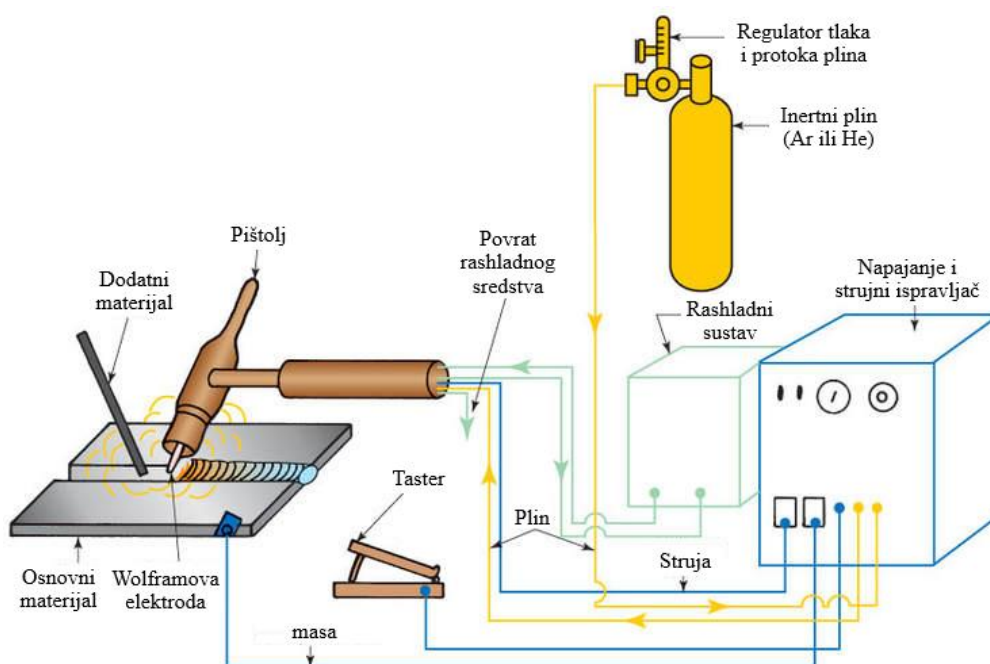
Slika 38. – *Primjeri makroizbrusaka*

Izvor: M. Willinger 2014.

4. TIG postupak zavarivanja

4.1. Značajke postupka TIG zavarivanja

„TIG/WIG zavarivanje (eng. **W**olfram=*Tungsten Inert Gas*) je naziv za elektrolučni postupak zavarivanja gdje se toplinom oslobođenom u električnom luku koji se uspostavlja između elektrode načinjene od wolframa i radnog komada tali osnovni, a po potrebi i dodatni materijal. Mjesto zavarivanja štiti se od štetnog djelovanja okoline atmosfere inertnim plinovima“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)



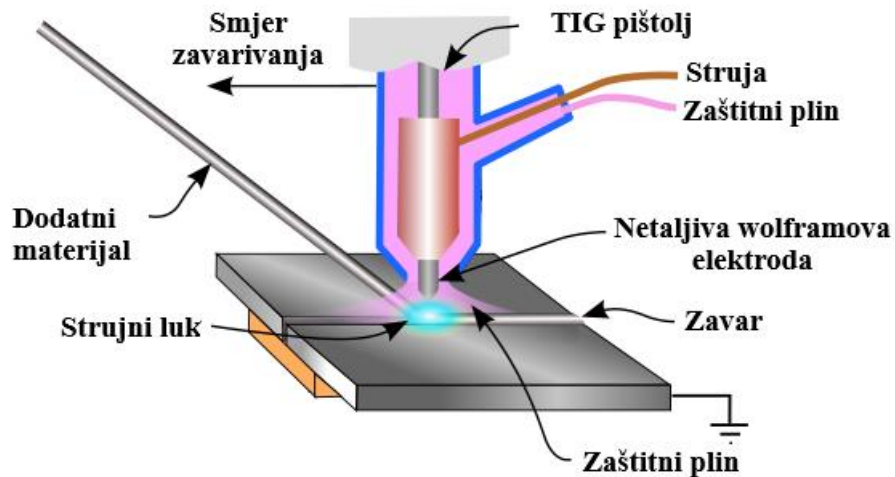
Slika 39. – Shematski prikaz uređaja za TIG zavarivanje

Izvor: <http://www.halversoncts.com/71-the-gas-tungsten-arc-welding-station.html>

(Datum pristupa 29.7.2024.)

„Elektroda kod ovog postupka služi isključivo za uspostavljanje i održavanje električnog luka. Elektrode se izrađuju od čistog wolframa (danas rjeđe) ili wolframa legiranog s malim dodacima (1 do 2%) torijevog ili cirkonijevog oksida ili nekih drugih elemenata. Ovi dodaci olakšavaju uspostavljanje luka, stabiliziraju luk, osobito pri malim strujama, smanjuju eroziju vrha elektrode, te povećavaju dozvoljeno strujno opterećenje. Elektrode se proizvode u promjerima od 0.8 do 9.5 mm, a dužina elektrode je 200 mm. Obično je kraj elektrodnog štapića označen kodnim bojama koje označavaju sastav elektrode. Način označavanja je propisan

normom. Vrh elektrode prije zavarivanja mora biti brušenjem pripremljen na pravilan oblik koji ovisi o vrsti struje, koja će se primijeniti, veličini struje te zahtjevima na zavar. Wolframova elektroda se u radu ne smije taliti, pa se naziva netaljivom, no uslijed erozije vrha, te njegovom prljanju u slučaju nehotečnog kontakta s radnim komadom, što se brušenjem mora ukloniti, ona se ipak postupno troši. Trajnost elektrode duljine 170 mm prosječno je 30 sati rada.“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)



Slika 40. – Shematski prikaz TIG zavarivanja

Izvor: <https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:GTAW.svg>

(Datum pristupa 29.7.2024.)

4.2. Električni luk i izvori struje za TIG zavarivanje

„Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje, to jest ispravljači, motor generatori i transformatori. Izvor vrste izvora struje ovisi uglavnom o tome što će se zavarivati. Izvori struje za ručno zavarivanje trebaju imati strmo padajuću statičku karakteristiku da se osigura približno konstantna struja zavarivanja neovisno o promjenama dužine luka uslijed pomicanja ruke zavarivača.“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)

Tablica 3. – Vrste struja pri TIG zavarivanju

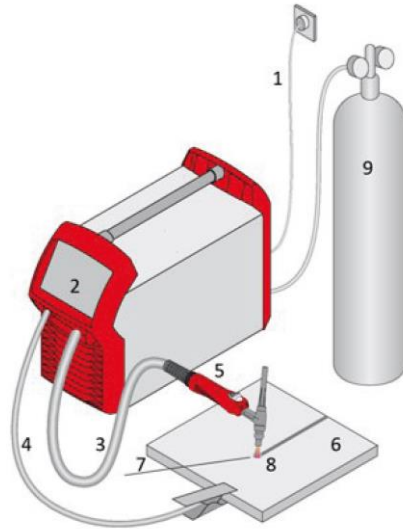
VRSTA STRUJE	ZAVARIVANI MATERIJALI	NAPOMENA
Istosmjerna elektroda (-) pol	Svi materijali osim Al i Mg i njihovih legura	Mogućnost najvećeg opterećenja elektrode
Izmjenična ili impulsna	Al i Mg i njihove legure	Moguće uklanjanje oksida s površine osnovnog materijala
Istosmjerna elektroda (+) pol	Posebni slučajevi	Vrlo malo dozvoljeno opterećenje elektrode

Izvor: Kralj, Kožuh, Andrić, 2015.

„Budući da se za uspostavljanje električnog luka kratkim spojem kod TIG postupka izbjegava, izvori su dodatno opremljeni posebnim visokonaponskim visokofrekventnim generatorima. Kratak spoj wolframove elektrode i radnog komada, s jedne strane oštećuje vrh elektrode pa je stabilnost luka smanjena, a s druge strane dolazi do uključivanja wolframa u metal zavara s nepovoljnim posljedicama po mehanička svojstva spoja. Za ispostavu električnog luka bez kontakta između vrha elektrode i radnog komada mora postojati vrlo visoki napon koji će omogućiti početnu ionizaciju. Međutim, taj visoki napon visoke frekvencije od nekoliko MHz, zbog *skin* efekta manje je opasan za zavarivača ali je ipak nužan oprez u radu. Takav poseban izvor visokofrekventnog napona, neposredno smješten u sam izvor struje zavarivanja, paralelno je spojen u krug struje zavarivanja osiguravajući uspostavljanje električnog luka.“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)

4.3. Oprema kod TIG zavarivanja

Na slici 40. imamo prikazanu osnovnu opremu za TIG zavarivanje, gdje je: 1- Priključak na glavni vod, 2- Izvor struje, 3- električni kabel, 4- masa, 5- gorionik, 6- osnovni materijal, 7- dodatni materijal, 8- strujni luk, 9- spremnik zaštitnog plina.



Slika 41. – Osnovna oprema za TIG zavarivanje

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 29.7.2024.)

- **Gorionik**

Jezgra TIG gorionika je netaljiva Wolframova elektroda, Oko elektrode nalazi se sapnica kroz koju dopremamo zaštitni plin do mjesta zavarivanja. Svi gorionici za TIG zavarivanje moraju biti hlađeni, razlikujemo gorionike hlađene vodom i gorionike hlađene plinom.

Noviji moderniji gorionici opremljeni su zaslonom pomoću kojeg zavarivač može u hodu podešavati parametre zavarivanja.



Slika 42. – Gorionik za TIG zavarivanje

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 29.7.2024.)

- **Rashladni sustav**

Za dijelove gorionika koji se jako zagrijavaju koristi se rashladna voda iz sustava za hlađenje vode. Taj sustav obično se postavlja ispod izvora struje.



Slika 43. – *Rashladni sustav*

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 29.7.2024.)

- **Nožna pedala**

Nožno upravljana daljinska pedala omogućuje precizan rad, jer zavarivač može koristiti obje ruke za vođenje gorionika i dodavanje dodatnog materijala.



Slika 44. – *Nožna pedala*

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 29.7.2024.)

4.4. Dodatni materijal kod TIG zavarivanja

U praksi za TIG zavarivanje koriste se promjeri žice od 1.6 mm, 2.0 mm, 2.4mm, 3.2mm, 4.0 mm.

Dodatni materijal je u pravilu uvijek više legiran nego osnovni metal. Ta visoka legiranost dodatnog materijala sprečava izgaranje legiranih elemenata uzrokovanog električnim lukom i tako osigurava kvalitetu zavarenog spoja. Relevantna oznaka otisnuta je na kraj šipke dodatnog materijala.



Slika 45. – *Žica za TIG zavarivanje s oznakom*

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 29.7.2024.)

4.5. Zaštitni plinovi kod TIG zavarivanja

„Zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu, koja se daje što lakše ionizirati, te štiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. U tu svrhu koriste se inertni plinovi, najčešće argon (Ar), a zatim helij (He).“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)



Slika 46. – Argon u boci

Izvor: <https://promoalati.hr/hr/products/details/boca-argon-8-1-308540>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

4.6. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja

Tablica 4. – Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja

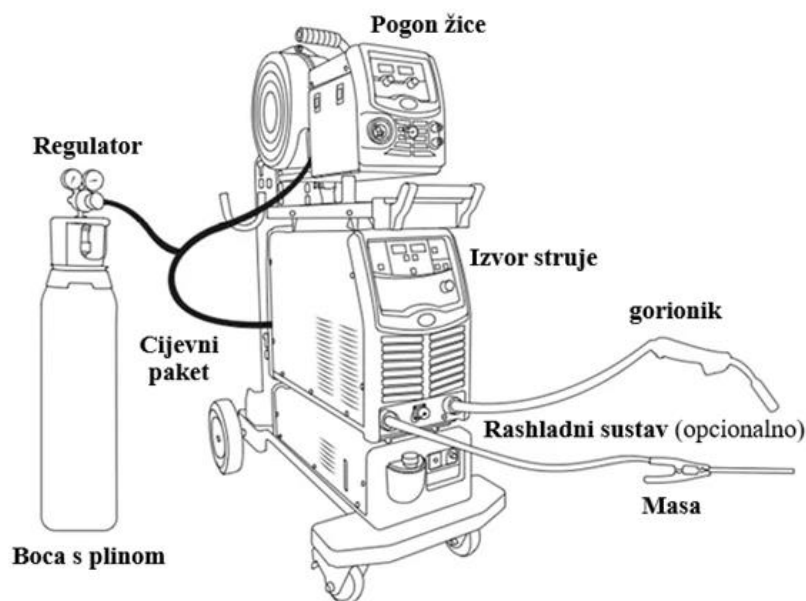
Prednosti TIG zavarivanja	Nedostaci TIG zavarivanja
Postupak osigurava visoku kvalitetu zavarenog spoja.	Za izvođenje kvalitetnih spojeva potrebna je visoka stručnost zavarivača.
Zavareni spojevi su vizualno lijepi.	Mjesto zavarenog spoja potrebno je temeljito očistiti prije zavarivanja, hrđa je nedopustiva.
Postupak ne stvara prskotine i nema troske.	Postupak nije primjeren za zavarivanje debljih materijala.
Zavarivanje je moguće u svim položajima zavarivanja	Postupak ne dozvoljava velike brzine zavarivanja.

Izvor: Izradio autor

5. MIG/MAG postupak zavarivanja

5.1. Značajke postupka MIG/MAG zavarivanja

„Kod ovog postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice, u pravilu spojene na plus pol istosmjernog izvora struje. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju inertni plinovi (Ar ili He) ili aktivni plinovi (CO₂ i mješavine). Ovisno o vrsti upotrijebljenog plina postupak nosi oznaku MIG (Zaštita inertnim plinom) ili MAG (zaštita aktivnim plinom). Uređaji su u oba slučaja principijelno isti, iako ima razlika u nekim detaljima.“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)

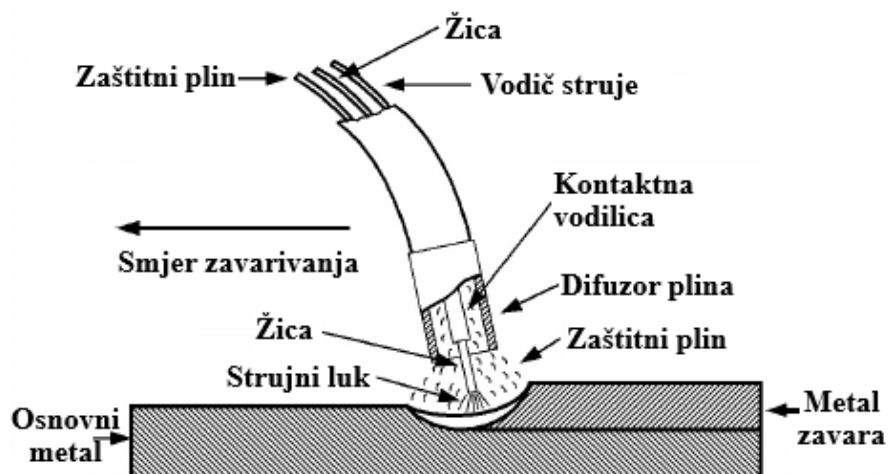


Slika 47. – Osnovni sustav za MIG/MAG zavarivanje

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-showing-the-MIG-MAG-equipment-2_fig1_332057517 (Datum pristupa 31.7.2024.)

„Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Žica je istovremenom i elektroda i dodatni materijal, to jest njenim taljenjem se popunjava pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski (dodavanje žice mehanizirano a vođenje pištolja ručno) ili automatski potpuno mehaniziran.

Kada se zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od 5 m od izvora struje obično se primjenjuje dodatni pogon za dodavanje žice smješten u samom pištolju. Uobičajeni naziv za takav sistem je „push-pull“. Njegova primjena je nužna i na manjim udaljenostima kada se radi s tanjim žicama ili žicama mekših materijala.“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)



Slika 48. – Shema postupka MIG/MAG zavarivanja

Izvor: https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-MAG-welding-process_fig1_263161624 (Datum pristupa 31.7.2024.)

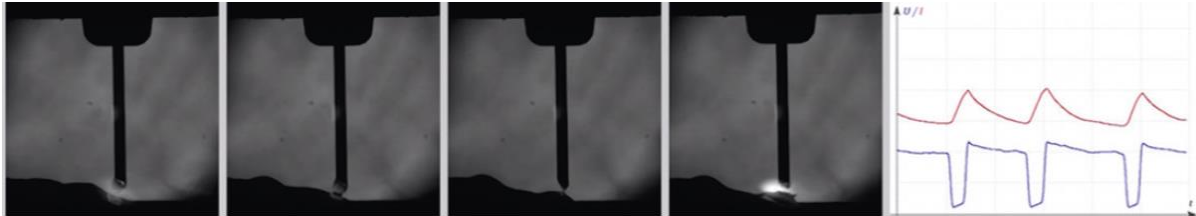
5.2. Električni luk i izvori struje za MIG/MAG zavarivanje

Zavarivanje MIG/MAG postupkom zahtijeva visoku amperažu i nizak električni napon. To znači da je potreban izvor struje za zavarivanje. Izvori struje za zavarivanje pretvaraju struju dostupnu iz mreže, visokog napona i niske amperaže, u struju pogodnu za zavarivanje. Osim toga, izvori energije za zavarivanje odgovorni su za ispravljanje izmjeničnog napona koji dolazi s kraja mreže regulirajući struju zavarivanja. Moderni izvori struje za zavarivanje su digitalno kontrolirani i imaju beskonačno promjenjive postavke jakosti struje zavarivanja. Ovo je važno kako bi se mogle zavarivati različite debljine lima.

Tijekom MIG/MAG zavarivanja materijal se dinamički prenosi s potrošne žice na radni predmet tijekom faze luka. To se može dogoditi sa ili bez kratkog spoja. Vrsta luka koja se koristi tijekom prijenosa materijala ovisi o naponu zavarivanja i amperaži zavarivanja.

5.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima se događa u nižem rasponu snage s MIG/MAG postupkom. Luk pali kroz kratki kontakt između žičane elektrode i osnovnog materijala. To proizvodi visoku, brzo rastuću struju kratkog spoja. Toplina uzrokuje da se žica rastali i kapljica zavara se sama odvajaju. Jednom kada se most kratkog spoja prekine, luk se ponovno pali.



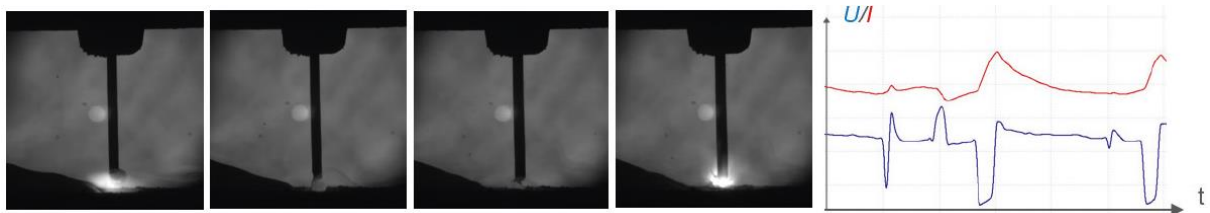
Slika 49. – Prijenos metala kratkim spojevima

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

5.2.2. Prijenos metala mješovitim lukom

Kod prijenosa metala mješovitim lukom, naizmjenice se događa prijenos metala kratkim spojem i štrcajućim lukom. Kod mješovitog luka, prebacivanje između kratkih spojeva i prijenosa prskanja događa se u nepravilnim intervalima. Nadalje, dolazi do povećanog prskanja jer relativno visoka struja ima snažan učinak na kapljice zavarivanja. Zbog toga je učinkovita uporaba prijelaznog luka praktički nemoguća i stoga ga treba izbjegavati u svakom trenutku.



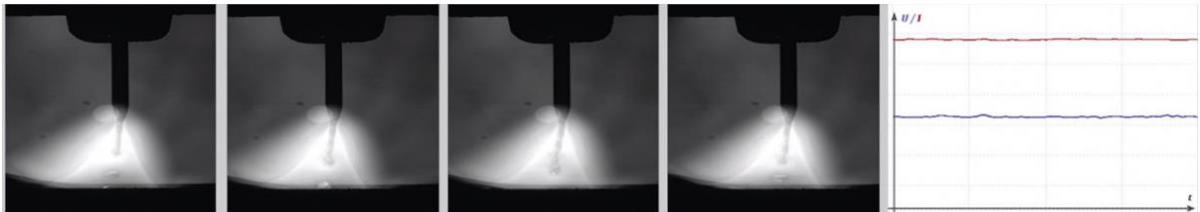
Slika 50. – Prijenos metala mješovitim lukom

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

5.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Štrcajući luk gori neprekidno bez prekida kratkog spoja. Dodatni materijal se stoga prenosi velikom brzinom i u finim kapljicama u bazen taline. Visoka toplinska energija luka raspršivanja stvara veću zonu utjecaja topline od prijenosa kratkim spojevima. Zbog toga je deformacija izratka također veća kod štrcajućeg luka. Karakteristike štrcajućeg luka uključuju visoku stopu taloženja materijala i duboku penetraciju, stoga je idealan za zavarivanje debljih metala.



Slika 51. – *Prijenos metala štrcajućim lukom*

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

5.2.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom

Kod pulsirajućeg luka prijenos metala precizno se kontrolira impulsima. U fazi osnovne struje, unos energije je smanjen do te mjere da luk jedva stalno gori i površina radnog komada se predgrijava. U fazi pulsirajuće struje, precizno vremenski usklađen puls struje osigurava precizno odvajanje kapljice zavara. Pulsirajući luk gotovo potpuno eliminira neželjene kratke spojeve i istovremene eksplozije kapljica. Kao rezultat toga, praktički nema nekontroliranog prskanja kod pulsirajućeg luka.



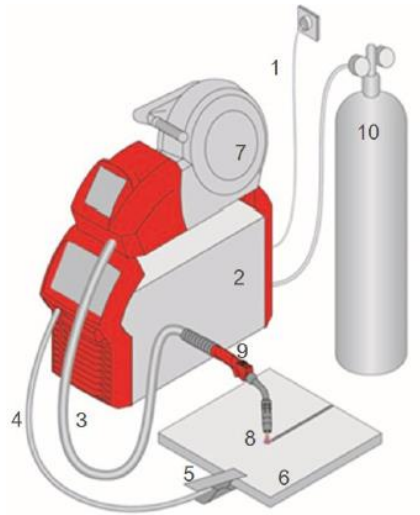
Slika 52. – *Prijenos metala pulsirajućim lukom*

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

5.3. Oprema kod MIG/MAG zavarivanja

Na slici 52. imamo prikazanu osnovnu opremu za MIG/MAG zavarivanje, gdje je: 1- priključak na glavni vod, 2- izvor struje, 3- cijevni paket, 4,5 – masa, 6- radni komad, 7- pogon žice, 8- strujni luk, 9- gorionik, 10- spremnik zaštitnog plina.



Slika 53. – Osnovna oprema za MIG/MAG zavarivanje

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

- **Gorionik**

Gorionik za MIG/MAG zavarivanje mora biti odabran prema sustavu zavarivanja, razlikujemo gorionike za ručno, automatizirano i robotizirano zavarivanje.



Slika 54. – Gorionik za ručno MIG/MAG zavarivanje

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/product-information/mig-mag-torches> (Datum pristupa 31.7.2024.)

Potrošni dijelovi u gorioniku su prikazani na slici 54., a to su: 1- Izolacijski prsten, 2- držač dizne, 3- zaštita od prskanja, 4- kontaktna provodnica, 5- plinska sapnica.



Slika 55. – *Potrošni dijelovi gorionika*

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

- **Rashladni sustav**

Kao i kod TIG zavarivanja, gorionik se uslijed dugih vremena zavarivanja i zavarivanja s visokom amperažom može pregrijati, pa se stoga koriste rashladni sustavi za gorionik.



Slika 56. – *Rashladni sustav za gorionik*

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

- **Daljinski upravljač**

Daljinski upravljač se koristi kako bi zavarivač mogao podešavati parametre zavarivanja direktno na lokaciji kojoj zavaruje, tj. da ne mora odlaziti do uređaja za zavarivanje kako bi promijenio parametre zavarivanja.



Slika 57. – *Daljinski upravljač na gorioniku*

Izvor: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

5.4. Dodatni materijal kod MIG/MAG zavarivanja

„Kod MIG/MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera d 0,6 do 2,4 mm. Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Površina žice mora biti glatka, dimenzija vrlo točna i treba biti uredno namotana na kolutove koji se postavljaju u uređaj za dodavanje.“



Slika 58. – *Žica za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika*

Izvor: <https://ezg.hr/proizvodi/zice/>

(Datum pristupa 31.7.2024.)

5.5. Zaštitni plinovi kod MIG/MAG zavarivanja

„Zaštitni plinovi koji se koriste kod ovog postupka štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a dovode se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice, Ionizacijom plina osigurava se prostor za održavanje električnog luka

U slučaju primjene inertnog zaštitnog plina (Ar, He ili njihove mješavine) nema reakcije rastaljenog metala s plinom pa se takvi plinovi koriste kod zavarivanja osjetljivih materijala na utjecaj plinova iz atmosfere (Al, Cu i njihove legure, CrNi čelici, Ti i slično).

Ako se zavaruju nelegirani konstrukcijski čelici moguća je primjena aktivnih plinova (čistog CO₂ ili mješavina Ar/CO₂/O₂). Kod zavarivanja u ovakvoj atmosferi dolazi do reakcije između CO₂ i rastaljenog metala. CO₂ je inertan plin pri nižim temperaturama ali se iznad 1600°C disocira u ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik koji tada reagira s rastaljenim metalom. Može doći i do ponovnog vezivanja u molekulu CO₂ čime se oslobađa toplina a posljedica je veće provarivanje.“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)

5.6. Prednosti i nedostaci MIG/MAG zavarivanja

Tablica 5. – Prednosti i nedostaci MIG/MAG zavarivanja

Prednosti MIG/MAG zavarivanja	Nedostaci MIG/MAG zavarivanja
Mogućnost velikog depozita materijala, uz velike brzine zavarivanja, a da se pritom održi adekvatna kvaliteta zavara	Kvaliteta zavarenog spoja može biti nešto niža nego kod TIG postupka.
Širok raspon materijala za zavarivanje	Ne porozni zavari mogu biti ostvareni samo s nešto višim udjelom CO ₂ u zaštitnom plinu, što povećava rizik od prskotina.
Nema nastajanja šljake	MIG/MAG postupci su nešto više osjetljivi na poroznosti i neprotaljivanje od drugih postupaka.
Jednostavno uspostavljanje električnog luka	MAG je osjetljiv na vlagu i hrđu.
Mogućnost zavarivanja bez pretjerano velike pripreme i čišćenja spoja	Zavarivanje na otvorenom ili u hali s propuhom je nemoguće bez dodatne opreme koja će osigurati plinsku zaštitu.
Relativno nizak trošak dodatnih materijala	
Prikladno za automatizaciju	

Izvor: Izradio autor

6. Praktični dio

6.1. Uvod u praktični dio

Cilj praktičnog dijela ovog rada je usporediti dva široko korištena postupka zavarivanja, MIG/MAG i TIG, s posebnim naglaskom na njihove performanse pri zavarivanju nehrđajućeg čelika. Odabir ova dva postupka temelji se na njihovoj rasprostranjenosti primjeni u industriji i raznolikim mogućnostima koje pružaju u smislu kvalitete zavara.

Za potrebe ove studije provest će se po dvije probe zavarivanja koristeći oba postupka, ukupno četiri. Svi zavareni spojevi će biti kutni spojevi, što je uobičajen tip spoja u mnogim industrijskim primjenama, te se na njemu najlakše i najljepše vide svojstva zavara. Osnovni materijal koji ćemo koristiti je nehrđajući čelik debljine 3 mm i 6 mm, ovaj materijal je odabran zbog svoje otpornosti na koroziju i široke primjene u transportnoj industriji.

Analiza izvedenih zavara uključivat će usporedbu vizualnih i geometrijskih svojstava zavara. Vizualna inspekcija će se fokusirati na površinske karakteristike zavara, kao što su izgled, uniformnost, prisutnost površinskih nedostataka i opća estetika zavara. Geometrijska svojstva će obuhvaćati mjerenje dimenzija zavara, kao što su visina, dubina penetracije, kao i eventualne deformacije osnovnog materijala pomoću makroizbruska zavara.

Ova usporedba će omogućiti dublje razumijevanje prednosti i nedostataka svakog postupka u kontekstu zavarivanja nehrđajućeg čelika, te pružiti korisne uvide za buduće primjene i odabir optimalnog postupka zavarivanja u industrijskoj praksi.

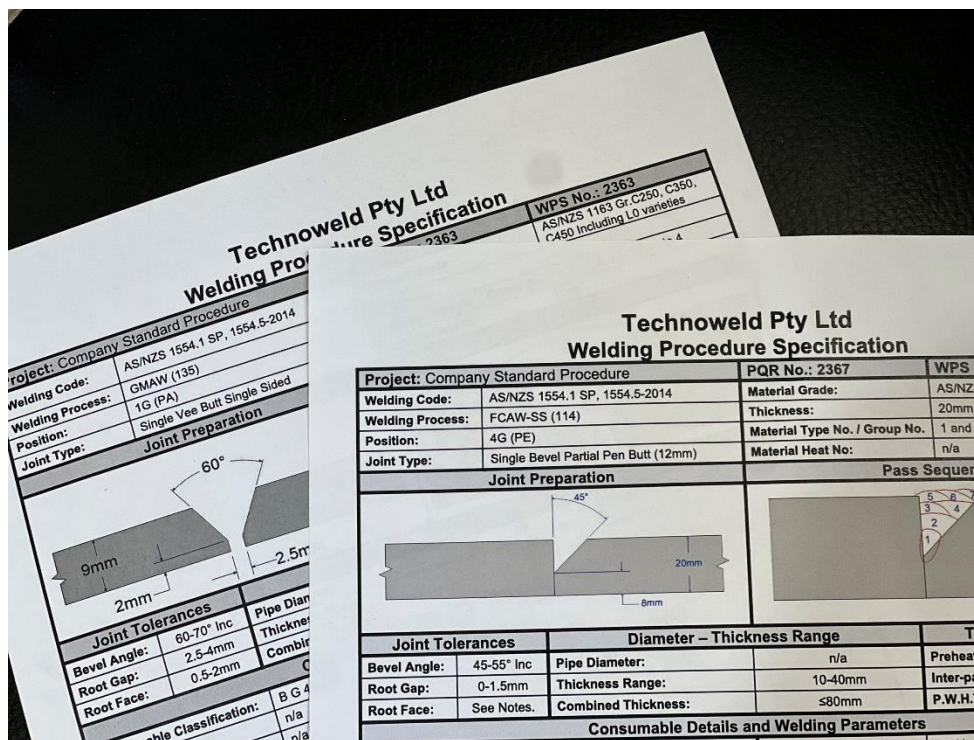


Slika 59. – Zavarivanje TIG postupkom

Izvor: fotografirao autor

6.2. Zavarivačka dokumentacija

WPS (eng. Welding Procedure Specification), ili SPZ (specifikacija postupka zavarivanja), je dokument koji precizno definira postupke, parametre i zahtjeve za izvođenje zavarivanja kako bi se osigurala kvaliteta i konzistentnost zavarenih spojeva. WPS se koristi kao vodič za zavarivače i inženjere, osiguravajući da se zavarivanje provodi prema standardima i specifikacijama potrebnim za određenu primjenu. WPS osigurava da se svi zavari izvode prema utvrđenim standardima, što minimizira rizik od grešaka i osigurava dosljednu kvalitetu. Pravilno dokumentirani i provjereni WPS omogućava identifikaciju i rješavanje potencijalnih problema prije početka zavarivanja, te osigurava da zavari zadovoljavaju sve relevantne tehničke i sigurnosne zahtjeve.



Slika 60. – Primjer WPS-a iz proizvodnje

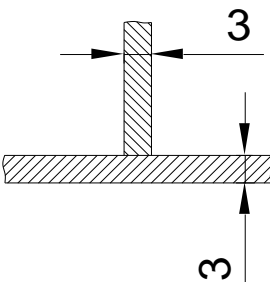
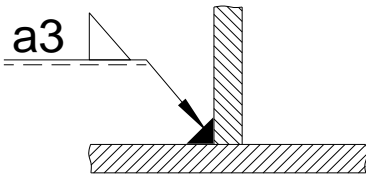
Izvor: <https://technoweld.com.au/services/welding-procedures/>

(Datum pristupa 2.8.2024.)

6.2.1. Specifikacija postupka zavarivanja: Proba 1 – TIG – 3mm

Tablica 6. – Specifikacija postupka zavarivanja – Proba 1

Uputa za zavarivanje: Proba 1	Tip pripreme i čišćenja: odmastiti/početkati/pobrusiti Naprava za zavarivanje: N/A
Kvalificirani postupak zavarivanja WPQR: 141 – TIG zavarivanje punom žicom ili šipkom	Osnovni materijali: Poz.1= X5CrNi18-10 / Poz. 2= X5CrNi18-10 Grupa materijala prema CR ISO 15608: Poz.1=8.1 / Poz.2=8.1
Vrsta prijenosa kapljica:	Debljina materijala: Poz.1= 3 mm / Poz.2 = 3 mm
Tip spoja i zava: FW a3	Vanjski promjer: Poz.1= N/A / Poz.2 = N/A
Posebosti pripreme spoja: Skica	Položaj zavarivanja: PB

Dizajn spoja	Redoslijed zavarivanja: 1
	

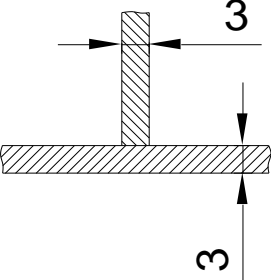
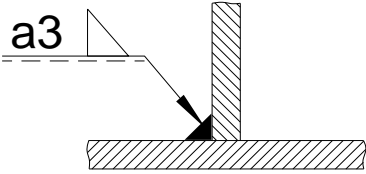
Broj prolaza	Postupak zavarivanja	Dimenzije dodatnog materijala	Jakost struje [A]	Jakost napona [V]	Tip struje/polaritet	Dovod žice	Brzina povlačenja	Meduprolazna temperatura T[°C]
1	141	Ø2,0 mm	120	10	DC -			70°C
2	141	Ø2,0 mm	120	9.5	DC-			

Oznaka dodatnog materijala: EN ISO 14343-A W 19 12 3 LSi (316) (1.4430) Zaštitni plin: EN 14175 / II Argon 5.0 Plinska zaštita korijena: - Količina protoka plina: 12 l/min Tip volfram elektrode/promjer: WLa 15 Ø2,4mm Vađenje korijena: N/A Zaštitna korijenska podloga: N/A	Temp. Predgrijavanja: RT / sobna temp. (min. 5°C) Meduprolazna temp.: ≤100°C
--	--

6.2.2. Specifikacija postupka zavarivanja: Proba 2 – MAG – 3mm

Tablica 7. – Specifikacija postupka zavarivanja – Proba 2

Uputa za zavarivanje: Proba_2	Tip pripreme i čišćenja: odmastiti/početkati/pobrusiti Naprava za zavarivanje: N/A
Kvalificirani postupak zavarivanja WPQR: 135 – MAG zavarivanje punom žicom	Osnovni materijali: Poz.1= X5CrNi18-10 / Poz. 2= X5CrNi18-10 Grupa materijala prema CR ISO 15608: Poz.1=8.1 / Poz.2=8.1
Vrsta prijenosa kapljica:	Debljina materijala: Poz.1= 3 mm / Poz.2 = 3 mm
Tip spoja i zavara: FW a3	Vanjski promjer: Poz.1= N/A / Poz.2 = N/A
Posebnosti pripreme spoja: Skica	Položaj zavarivanja: PB

Dizajn spoja	Redoslijed zavarivanja: 1
	

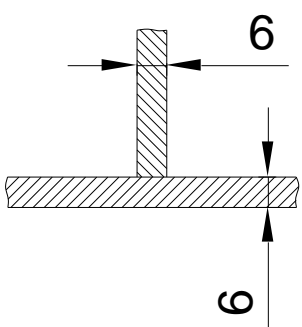
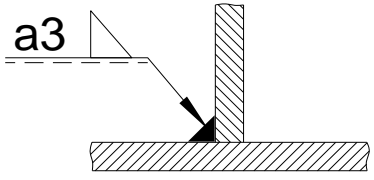
Broj prolaza	Postupak zavarivanja	Dimenzije dodatnog materijala	Jakost struje [A]	Jakost napona [V]	Tip struje/ polaritet	Dovod žice [m/min]	Brzina povlačenja [m/min]	Meduprolazna temperatura T[°C]
1	135	Ø1,0 mm	131	19.8	DC -	5-7	7.2	

Oznaka dodatnog materijala: EN ISO 14343-A W 19 9 LSi (308) (1.4316) Zaštitni plin: EN ISO 14175 / M13 ArCO _{2,5} Plinska zaštita korijena: - Količina protoka plina: 12 l/min Tip volfram elektrode/promjer: N/A Vađenje korijena: N/A Zaštitna korijenska podloga: N/A	Temp. Predgrijavanja: RT / sobna temp. (min. 5°C) Meduprolazna temp.: N/A
--	---

6.2.3. Specifikacija postupka zavarivanja: Proba 3 – TIG – 6mm

Tablica 8. – Specifikacija postupka zavarivanja – Proba 3

Uputa za zavarivanje: Proba_3	Tip pripreme i čišćenja: odmastiti/početkati/pobrusiti Naprava za zavarivanje: N/A
Kvalificirani postupak zavarivanja WPQR: 141 – TIG zavarivanje punom žicom ili šipkom	Osnovni materijali: Poz.1= X5CrNi18-10 / Poz. 2= X5CrNi18-10 Grupa materijala prema CR ISO 15608: Poz.1=8.1 / Poz.2=8.1
Vrsta prijenosa kapljica:	Debljina materijala: Poz.1= 6 mm / Poz.2 = 6 mm
Tip spoja i zava: FW a3	Vanjski promjer: Poz.1= N/A / Poz.2 = N/A
Posebni pripreme spoja: Skica	Položaj zavarivanja: PB

Dizajn spoja	Redosljed zavarivanja: 1
	

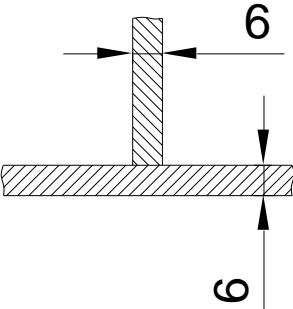
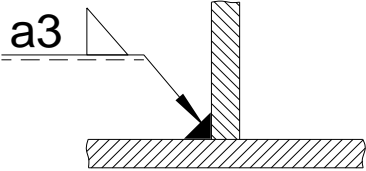
Broj prolaza	Postupak zavarivanja	Dimenzije dodatnog materijala	Jakost struje [A]	Jakost napona [V]	Tip struje/polaritet	Dovod žice	Brzina povlačenja	Meduprolazna temperatura T[°C]
1	141	Ø2,0 mm	170	8.7	DC -			70°C
2	141	Ø2,0 mm	153	9.3	DC-			

Oznaka dodatnog materijala: EN ISO 14343-A W 19 12 3 LSi (316) (1.4430) Zaštitni plin: EN 14175 / I1 Argon 5.0 Plinska zaštita korištena: - Količina protoka plina: 12 l/min Tip volfram elektrode/promjer: WLa 15 Ø2,4mm Vađenje korijena: N/A Zaštitna korijenska podloga: N/A	Temp. Predgrijavanja: RT / sobna temp. (min. 5°C) Meduprolazna temp.: ≤100°C
---	--

6.2.4. Specifikacija postupka zavarivanja: Proba 4 – MAG – 6mm

Tablica 9. – Specifikacija postupka zavarivanja – Proba 4

Uputa za zavarivanje: Proba_2	Tip pripreme i čišćenja: odmastiti/početkati/pobrusiti Naprava za zavarivanje: N/A
Kvalificirani postupak zavarivanja WPQR: 135 – MAG zavarivanje punom žicom	Osnovni materijali: Poz.1= X5CrNi18-10 / Poz. 2= X5CrNi18-10 Grupa materijala prema CR ISO 15608: Poz.1=8.1 / Poz.2=8.1
Vrsta prijenosa kapljica:	Debljina materijala: Poz.1= 6 mm / Poz.2 = 6 mm
Tip spoja i zavara: FW a3	Vanjski promjer: Poz.1= N/A / Poz.2 = N/A
Posebnosti pripreme spoja: Skica	Položaj zavarivanja: PB

Dizajn spoja	Redosljed zavarivanja: 1
	

Broj prolaza	Postupak zavarivanja	Dimenzije dodatnog materijala	Jakost struje [A]	Jakost napona [V]	Tip struje/polaritet	Dovod žice [m/min]	Brzina povlačenja [m/min]	Meduprolazna temperatura T[°C]
1	135	Ø1,0 mm	176	20.9	DC -	5-7	8.8	

Oznaka dodatnog materijala: EN ISO 14343-A W 19 9 LSi (308) (1.4316) Zaštitni plin: EN ISO 14175 / M13 ArCO _{2,5} Plinska zaštita korijena: - Količina protoka plina: 12 l/min Tip volfram elektrode/promjer: N/A Vađenje korijena: N/A Zaštitna korijenska podloga: N/A	Temp. Predgrijavanja: RT / sobna temp. (min. 5°C) Meduprolazna temp.: N/A
---	---

6.3. Uređaji za zavarivanje i dodatni materijali i zaštitni plinovi

6.3.1. Uređaj za TIG zavarivanje

Za TIG postupak zavarivanja korišten je uređaj Fronius iWave 500i AC/DC. To je napredni uređaj za zavarivanje koji koristi najnovije tehnologije za precizno i efikasno zavarivanje. Ovaj uređaj omogućava AC i DC zavarivanje, što ga čini svestranim za različite primjene i materijale. iWave 500i AC/DC je poznat po svojoj visokoj stabilnosti luka, jednostavnom podešavanju parametara i korisničkom sučelju koje olakšava rad.



Slika 61. – Uređaj za TIG zavarivanje Fronius iWave 500i AC/DC

Izvor: fotografirao autor

Najveće prednosti uređaja:

- **Ciljani unos topline**
 - S pomoću funkcije CycleTIG moguća je maksimalna kontrola električnog luka, a time i unosa topline. Zahvaljujući kratkim vremenima zavarivanja, talina se lako i sigurno drži pod kontrolom. Time se omogućava jednostavno zavarivanje čak i najtanjih materijala.

- **Razumljivo upravljanje prilagođeno korisniku**
 - Intuitivan navigacijski izbornik na kojem se pri zavarivanju mogu direktno namjestiti svi parametri zavarivanja.
- **Ponovljiva paljenja**
 - Brza i prije svega ponovljiva paljenja. Bez obzira na kakvoću materijala i u potpunosti bez ručne prilagodbe parametra paljenja. To nudi inteligentna funkcija paljenja *Reversed Polarity Ignition auto*.

Tablica 10. – Karakteristike uređaja Fronius iWave 500i AC/DC

Karakteristike	iWave 500i AC/DC
Struja zavarivanja / radni ciklus [10min/40°C]	500 A / 40%
	430 A / 60%
	360 A / 40%
Radni napon	10,1-30 V
Maksimalna struja zavarivanja	500 A
Minimalna struja zavarivanja	3 A
Napon praznog hoda	96 V
Mrežna frekvencija	50-60 Hz
Mrežni napon	3 x 400 v
Tolerancija mrežnog napona	+/- 15%
Dimenzija – širina	300 mm
Dimenzija – duljina	706 mm
Masa	68,5 kg
Stupanj zaštite	IP23

Izvor: <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/iwave-ac-dc/> (Datum pristupa 3.8.2024.)

Dodatni materijal

Kao dodatni materijal kod TIG zavarivanja u obje probe izvedene TIG postupkom koristila se austenitna nehrđajuća šipka W 19 12 3 LSi (316) (1.4430) za TIG zavarivanje istovrsnih i sličnih 17/12/2 CrNiMo čelika promjera 2 mm. Nizak sadržaj ugljika osigurava postojanost na interkristalnu koroziju, dok povišeni sadržaj silicija poboljšava zavarivačka svojstva.

Zaštitni plin

Korišteni zaštitni plin kod zavarivanja TIG postupkom bio je EN 14175 / I1 Argon 5.0.

6.3.2. Uređaj za MIG/MAG zavarivanje

Za MIG/MAG postupak zavarivanja korišten je uređaj Fronius TPS 500i PULSE. To je visoko učinkovit uređaj za zavarivanje, dizajniran da zadovolji potrebe za preciznim i produktivnim zavarivanjem u industrijskim aplikacijama. TPS 500i pripada seriji TransSteel uređaja, poznatih po svojoj svestranosti i vrhunskoj tehnologiji. TPS 500i je idealan za profesionalne zavarivače i industrijske primjene gdje su potrebne visoke performanse, pouzdanost i prilagodljivost različitim materijalima i tehnikama zavarivanja.



Slika 62. – Uređaj za TIG zavarivanje Fronius iWave 500i AC/DC

Izvor: fotografirao autor

Najveće prednosti uređaja:

- **Visoka kvaliteta zavarenog spoja**
 - Stabilizatori penetracije i duljine luka osiguravaju visokokvalitetan zavareni spoj.

- **Kontrola prskanja LSC** (eng. *Low Spatter Control*)
 - LSC princip mekog ponovnog paljenja predstavlja značajnu razliku u odnosu na standardni luk s prijenosom kapljica kratkim spojevima. Ovdje se kratki spoj rješava na niskoj razini struje, što rezultira sa stabilnim procesom zavarivanja.
- **Kontrola pulsa PMC** (eng. *Pulse Multi Control*)
 - Svojim optimiziranim karakteristikama impulsa, PMC osigurava visokokvalitetne zavare pri velikim brzinama zavarivanja.

Tablica 11. – Karakteristike uređaja Fronius TPS 500i PULSE

Karakteristike	Fronius TPS 500i PULSE
Struja zavarivanja/radni ciklus [10min / 40°C]	500 A / 40%
	430 A / 60%
	360 A / 100%
Radni napon	14,2 – 39,0 V
Maksimalna struja zavarivanja	500 A
Minimalna struja zavarivanja	3 A
Napon praznog hoda	71,0 V
Mrežna frekvencija	50 – 60 Hz
Mrežni napon	3 x 400 V
Mrežni osigurač	35 A
Dimenzija - širina	300,0 mm
Dimenzija – duljina	706,0 mm
Masa	38,0 kg
Stupanj zaštite	IP23

Izvor: <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/tps-500i-pulse/> (Datum pristupa 3.8.2024.)

Dodatni materijal

Kao dodatni materijal kod MAG zavarivanja u obje probe izvedene MAG postupkom koristila se EN ISO 14343-A W 19 9 LSi (308) (1.4316) austenitna nehrđajuća puna žica za zavarivanje istovrsnih i sličnih 18/8 CrNi čelika. Nizak sadržaj ugljika osigurava postojanost na interkristalnu koroziju, dok povišeni sadržaj silicija poboljšava zavarivačka svojstva.

Zaštitni plin

Korišteni zaštitni plin za zavarivanje MAG postupkom bio je EN ISO 14175 / M13 ArCO₂,5.

6.4. Tehnološki postupak zavarivanja i pripreme makroizbruska

Za potrebe proba zavarivanja korištene su pločice iz lima debljine 3 mm, dimenzija 125 x 125 mm, te pločice iz lima debljine 6mm, dimenzija 125 x 200mm. To su standardne dimenzije koje se koriste za atest zavarivača. Materijal pločica je austenitni nehrđajući čelik X5CrNi18-10 (1.4301).

Priprema osnovnog materijala prije procesa zavarivanja uključivala je odmašćivanje, četkanje i brušenje mjesta spoja.



Slika 63. – Točkasto zavarivanje pločica MAG postupkom

Izvor: fotografirao autor

Zavarivanje pločica odradilo se pomoću TIG i MAG postupka zavarivanja. Na način da su se pločice postavile na zavarivačkom stolu tako da je jedna pločica postavljena pod pravim kutom u odnosu na drugu. Poziciju su držale klasične zavarivačke stege. Ploče su privremeno točkasto zavarene na nekoliko mjesta sa stražnje strane, dok su s prve strane zavarene na mjestu kontakta kutnim spojem nominalne visine $a=3$ mm.



Slika 64. – Zavarivanje pločica TIG postupkom

Izvor: fotografirao autor

Kod TIG zavarivanja probe debljine 3 mm zavar a3 postignut je u 2 prolaza. Jakost struje prvog prolaza bila je 120 A pri naponu od 10 V, vrijeme potrebno za 125 mm zavara u prvom prolazu bilo je 83 sekundi. Dok je u drugom prolazu jakost struje iznosila 120 A pri naponu od 9.5V, a za drugi prolaz bile su potrebne 72 sekunde. Temperatura međuprolaza izmjerena je kontaktnim termometrom Testo 925 i iznosila je 69.0°C.



Slika 65. – Mjerenje temperature međuprolaza kontaktnim termometrom

Izvor: fotografirao autor

Kod TIG zavarivanja probe debljine 6 mm zavar a3 postignut je također u 2 prolaza. Jakost struje prvog prolaza bila je 170 A pri naponu od 8.7 V, vrijeme potrebno za 200 mm zavara u prvom prolazu bilo je 79 sekundi. Dok je u drugom prolazu jakost struje iznosila 153 A pri naponu od 9.3V, a za drugi prolaz bilo je potrebno 108 sekundi. Temperatura međuprolaza izmjerena je kontaktim termometrom i iznosila je 57.9°C.

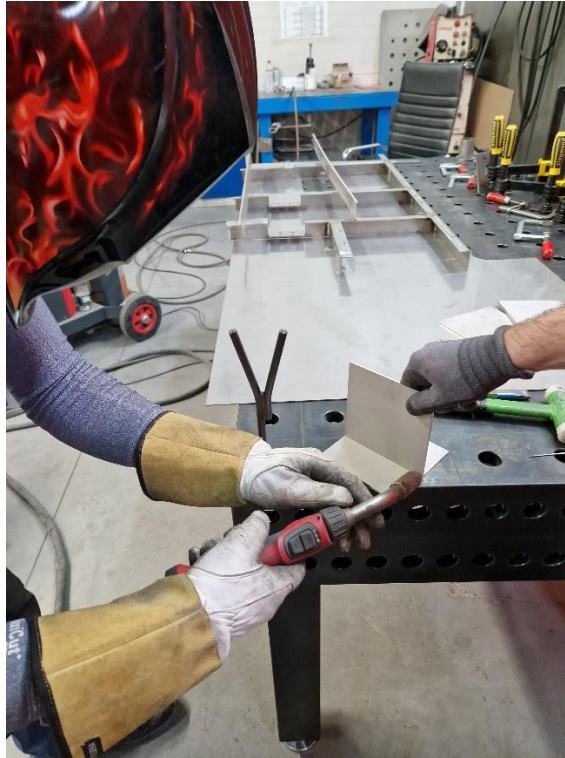


Slika 66. – Proba 6mm zavarena TIG postupkom

Izvor: fotografirao autor

Kod MAG zavarivanja probe debljine 3 mm zavar a3 postignut je u jednom prolazu. Jakost struje bila je 131 A pri naponu od 19.8 V, vrijeme potrebno za 125 mm zavara bilo je 20 sekundi.

Kod MAG zavarivanja probe debljine 6 mm zavar a3 postignut je također u jednom prolazu. Jakost struje bila je 176 A pri naponu od 20.9 V, vrijeme potrebno za 200 mm zavara bilo je 29 sekundi.



Slika 67. – Zavarivanje probe 3mm MAG postupkom

Izvor: fotografirao autor

Nakon zavarivanja zavari su se očetkali žičanom četkom na kutnoj brusilici, kako bi postigli glatku i estetski prihvatljivu površinu.



Slika 68. – Završna obrada zavara

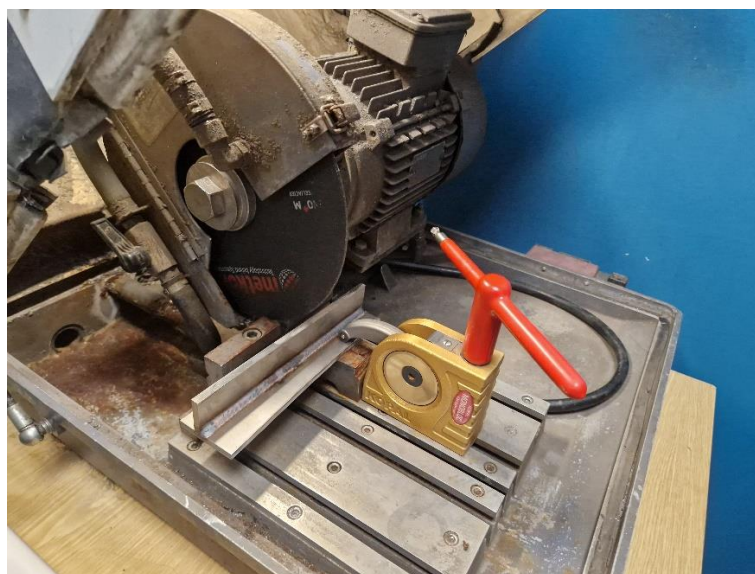
Izvor: fotografirao autor

Nakon zavarivanja sve četiri probe su se kutnom brusilicom odrezale na dimenzije cca. Širine 50mm, visine 40mm i duljine 125, odnosno 200 mm kako bi stale pod mikroskop. Zatim se na ručnom abrazivnom rezaču Delta AbrasiMet proizvođača Beuhler iz proba duljine 125, odnosno 200mm izrezala sredina. To se radi kako bi kako bi za makroizbrusak uzeli onaj dio spoja koji je najhomogeniji i najuniformniji, dok početak i kraj zavara to često nisu. Pila abrazivnog rezača vodeno je hlađena kako bi se eliminirao dodatni unos topline u mjesto zavarenog spoja.



Slika 69. – Abrazivni rezač Beuhler Delta AbrasiMet

Izvor: fotografirao autor



Slika 70. – Odrezivanje sredine zavara

Izvor: fotografirao autor

Dobiveni komadi imali su grubu površinu reza, koja se morala dodatno obraditi brušenjem na Metkon FORCIPOL 102 metalografskoj brusilici i polirci kako bi imali površnu spremnu za nagrivanje kiselinom. Površina presjeka zavara brusila se vodobrusnim papirom gradacija 60, 180, 300, 600, 1200 i 2500. Između svake gradacije smjer brušenja mijenjao se za 90°.



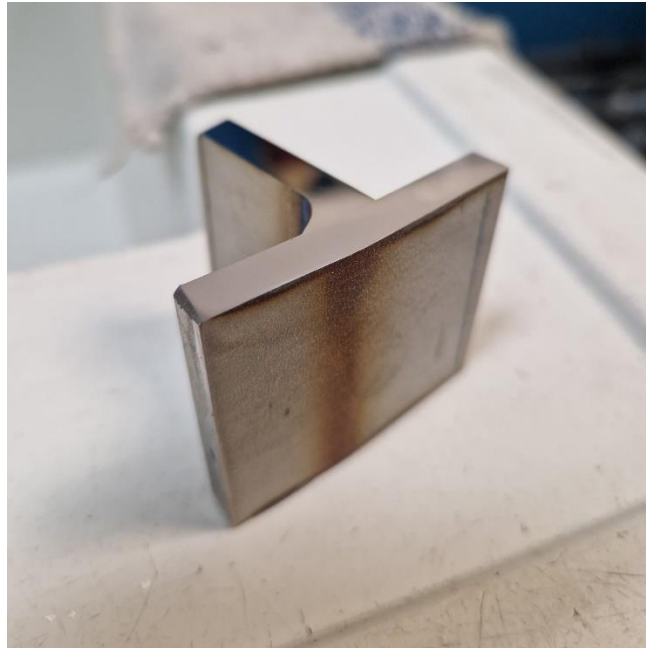
Slika 71. – *Metalografska brusilica i polirka Metkon FORCIPOL 102*

Izvor: fotografirao autor



Slika 72. – *Brušenje makroizbruska*

Izvor: fotografirao autor



Slika 73. – Zrcalno sjajna površina makroizbruska

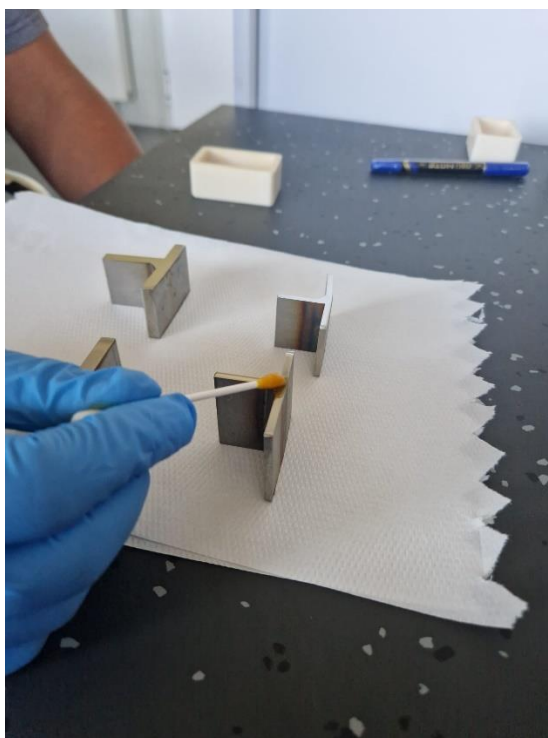
Izvor: fotografirao autor

Prije snimanja makroizbruska zavar se nagriza kiselinom kako bi se istaknuli strukturni detalji i defekti, čineći ih vidljivijima za analizu. Ovaj proces poboljšava kontrast između različitih materijala i uklanja površinske kontaminante. Time se omogućava preciznija procjena kvalitete zavara i usklađenost s tehničkim specifikacijama. Za makroskopsko jetkanje zavara kako bi se lakše vidjele segregacijske zone koristi se 5% dušična alkoholna kiselina (Nital).



Slika 74. – Dušična kiselina za jetkanje zavara

Izvor: fotografirao autor



Slika 75. – *Nagrizanje makroizbruska*

Izvor: fotografirao autor

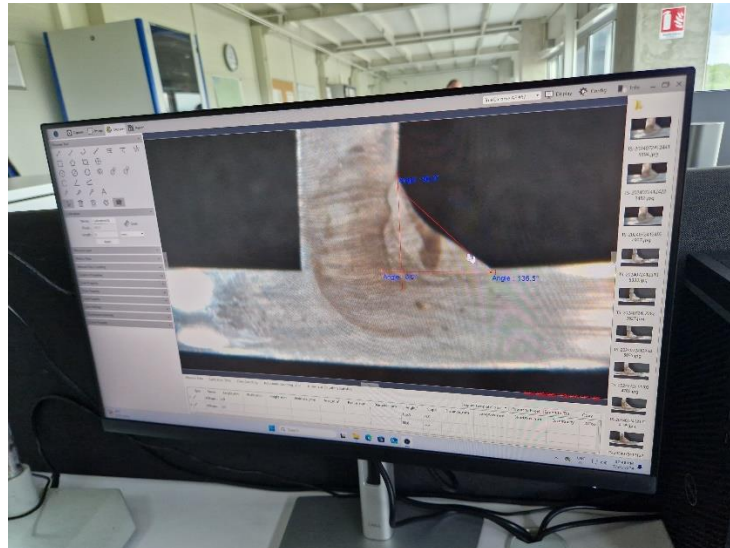
Nakon otprilike dvije minute, probe su spremne za makroskopsko ispitivanje. Slikanje makroizbruska se vrši pomoću digitalnog mikroskopa MZM1 proizvođača Mikroskop Technik Rathenow. To je metalografski mikroskop s povećanjem od 2 do 200 puta.



Slika 76. – *Snimanje makroizbruska*

Izvor: fotografirao autor

Program za obradu slike zove se Mosaic 2.4, a obrada slike vrši se tako da se kalibriraju dužine linija na već poznatoj dimenziji. Na primjer nam je poznata debljina lima 3.0 mm, unesemo tu vrijednost u program, i on sve ostale dužine uspoređuje sa tom referentnom i tako dobivamo sve ostale izmjerene vrijednosti. Pomoću programa Mosaic mogu se dakle izmjeriti sve dimenzije zavaru, penetracije i duljinske u kutne deformacije. Također može se jasnije vidjeti i eventualna greška u zavaru.



Slika 77. – *Obrada podataka na računalu*

Izvor: fotografirao autor

6.5. Proračun unosa topline u zavareni spoj

Teorijski je proračun unosa topline u zavareni spoj obrađen u poglavlju 2.5 ovog završnog rada.

Formula za unos topline u zavareni spoj glasi:

$$Hl = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} [kJ/mm]$$

Gdje je:

Hl – unos topline [kJ/mm]

V – napon izvora [V]

I – jakost struje izvora [A]

v – brzina zavarivanja [mm/min]

6.5.1. Proračun - Proba 1 – TIG – 3mm

1. Prolaz

$$I = 120 \text{ [A]}; V = 10 \text{ [V]}; l_z = 125 \text{ [mm]}; t_z = 83 \text{ [s]} = 1.38 \text{ [min]}$$

$$v = \frac{l_z}{t_z} \text{ [mm/min]}$$

$$v_1 = \frac{125}{1.38} = 90.58 \text{ [mm/min]}$$

$$v_1 = 90.58 \text{ [mm/min]}$$

$$Hl = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_1 = \frac{60 \times 10 \times 120}{1000 \times 90.58} = 0.79 \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_1 = 0.79 \text{ [kJ/mm]}$$

2. Prolaz

$$I = 120 \text{ [A]}; V = 9.5 \text{ [V]}; l_z = 125 \text{ [mm]}; t_z = 72 \text{ [s]} = 1.2 \text{ [min]}$$

$$v = \frac{l_z}{t_z} \text{ [mm/min]}$$

$$v_2 = \frac{125}{1.2} = 104.17 \text{ [mm/min]}$$

$$v_2 = 104.17 \text{ [mm/min]}$$

$$Hl = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_2 = \frac{60 \times 9.5 \times 120}{1000 \times 104.17} = 0.66 \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_2 = 0.66 \text{ [kJ/mm]}$$

$$\text{Ukupno: } Hl_{proba1} = Hl_1 + Hl_2 = 0.79 + 0.66 = 1.45 \text{ [kJ/mm]}$$

6.5.2. Proračun - Proba 2 – MAG – 3mm

$$I = 131 \text{ [A]}; V = 19.8 \text{ [V]}; l_z = 125 \text{ [mm]}; t_z = 20 \text{ [s]} = 0.33 \text{ [min]}$$

$$v = \frac{l_z}{t_z} \text{ [mm/min]}$$

$$v_1 = \frac{125}{0.33} = 378.79 \text{ [mm/min]}$$

$$v_1 = 378.79 \text{ [mm/min]}$$

$$Hl = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl = \frac{60 \times 19.8 \times 131}{1000 \times 378.79} = 0.41 \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_{proba2} = 0.41 \text{ [kJ/mm]}$$

6.5.3. Proračun - Proba 3 – TIG – 6mm

1. Prolaz

$$I = 170 \text{ [A]}; V = 8.7 \text{ [V]}; l_z = 200 \text{ [mm]}; t_z = 79 \text{ [s]} = 1.32 \text{ [min]}$$

$$v = \frac{l_z}{t_z} \text{ [mm/min]}$$

$$v_1 = \frac{200}{1.32} = 151.51 \text{ [mm/min]}$$

$$v_1 = 151.51 \text{ [mm/min]}$$

$$Hl = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_1 = \frac{60 \times 8.7 \times 170}{1000 \times 151.51} = 0.59 \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_1 = 0.59 \text{ [kJ/mm]}$$

2. Prolaz

$$I = 153 \text{ [A]}; V = 9.3 \text{ [V]}; l_z = 200 \text{ [mm]}; t_z = 108 \text{ [s]} = 1.8 \text{ [min]}$$

$$v = \frac{l_z}{t_z} \text{ [mm/min]}$$

$$v_2 = \frac{200}{1.8} = 111.11 \text{ [mm/min]}$$

$$v_2 = 111.11 \text{ [mm/min]}$$

$$Hl = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_2 = \frac{60 \times 9.3 \times 153}{1000 \times 111.11} = 0.77 \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_2 = 0.77 \text{ [kJ/mm]}$$

$$\text{Ukupno: } Hl_{\text{proba3}} = Hl_1 + Hl_2 = 0.59 + 0.77 = 1.36 \text{ [kJ/mm]}$$

6.5.4. Proračun - Proba 4 – MAG – 6mm

$$I = 176 \text{ [A]}; V = 20.9 \text{ [V]}; l_z = 200 \text{ [mm]}; t_z = 29 \text{ [s]} = 0.48 \text{ [min]}$$

$$v = \frac{l_z}{t_z} \text{ [mm/min]}$$

$$v_1 = \frac{200}{0.48} = 416.67 \text{ [mm/min]}$$

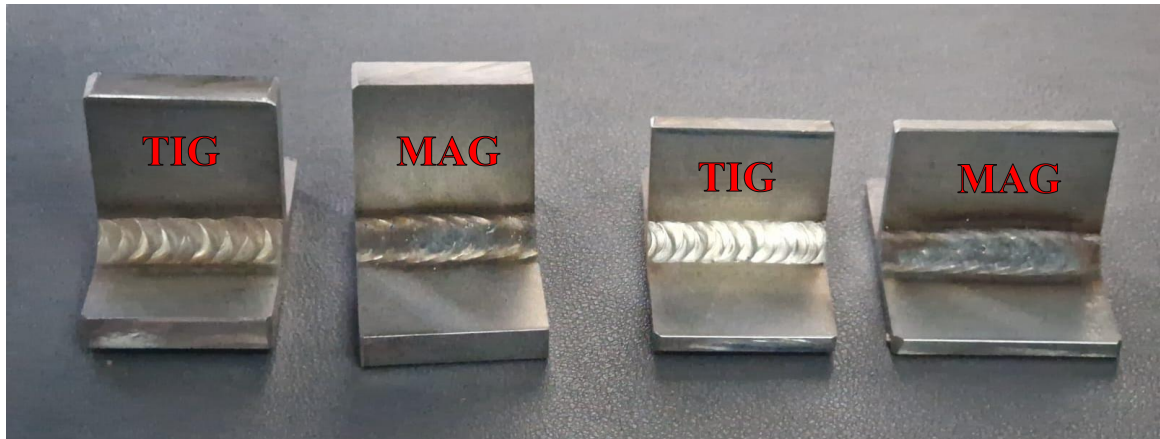
$$v_1 = 416.67 \text{ [mm/min]}$$

$$Hl = \frac{60 \times V \times I}{1000 \times v} \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl = \frac{60 \times 20.9 \times 176}{1000 \times 416.67} = 0.53 \text{ [kJ/mm]}$$

$$Hl_{\text{proba4}} = 0.53 \text{ [kJ/mm]}$$

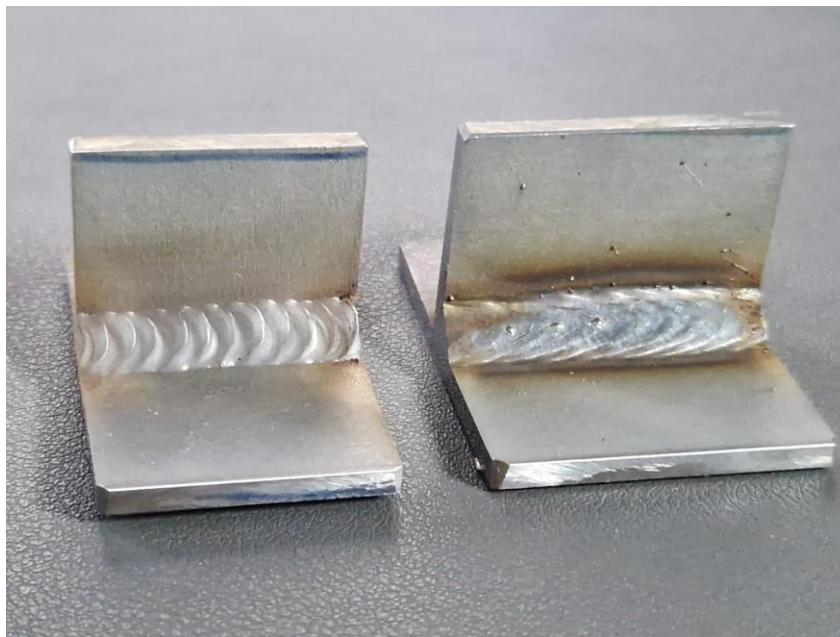
6.6. Vizualna kontrola



Slika 78. – Vizualna usporedba zavara

Izvor: fotografirao autor

TIG zavarivanje nudi visoku preciznost, minimalnu količinu prskanja i glatke, estetski ugodne zavare, što ga čini idealnim za estetski osjetljive primjene. Nasuprot tome, MAG zavarivanje je brže i efikasnije za deblje materijale i konstrukcijske primjene, ali proizvodi robusnije zavare s većom količinom prskanja. Dok TIG zahtijeva manje završne obrade, MAG zavarivanje često zahtijeva dodatno čišćenje i poliranje kako bi se postigao estetski prihvatljiv rezultat.

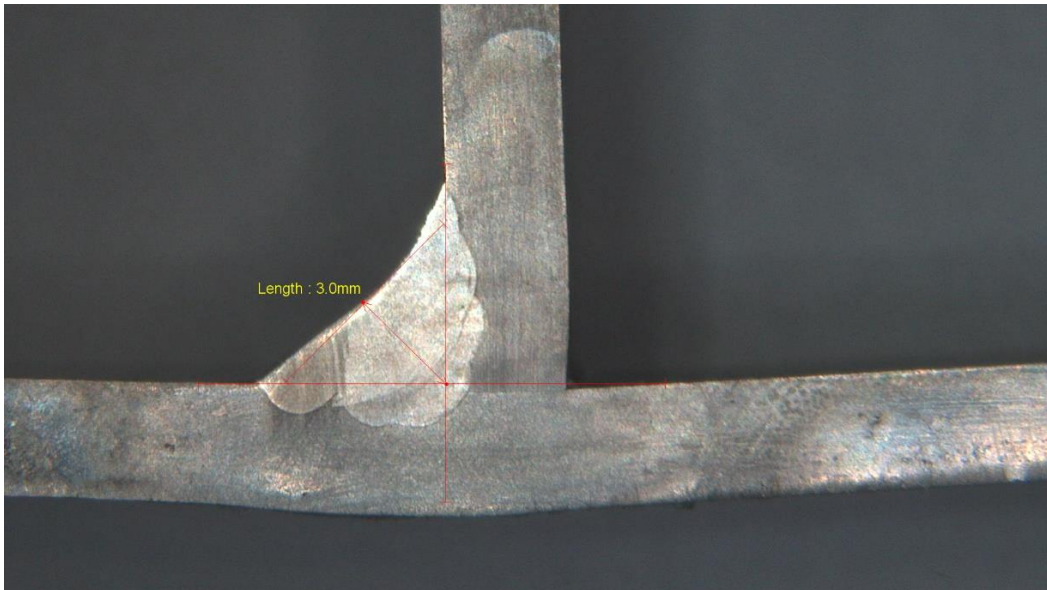


Slika 79. – Usporedba količine prskotina TIG (lijevo) i MAG (desno)

Izvor: fotografirao autor

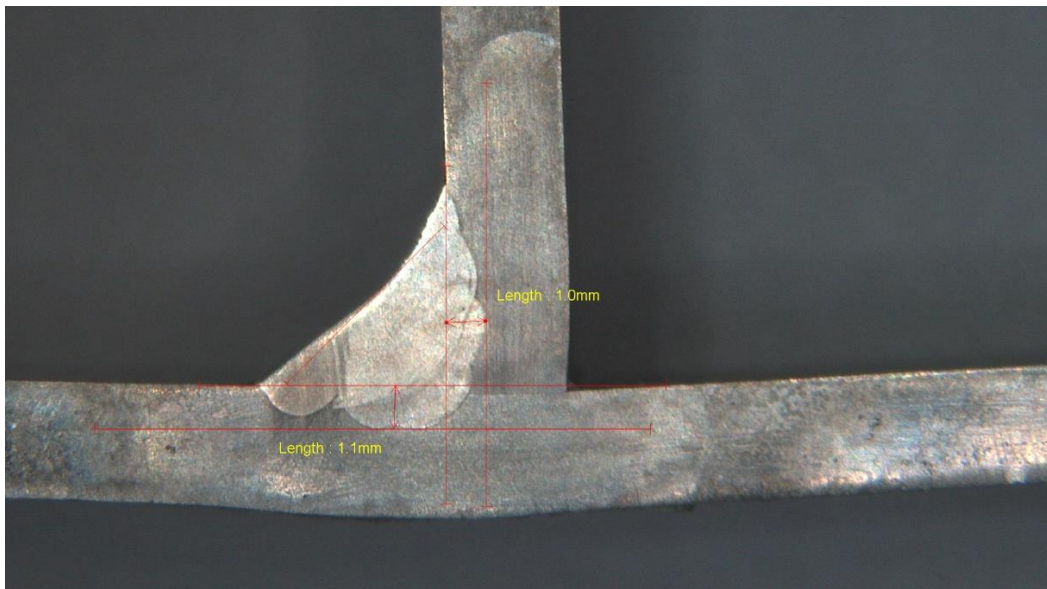
6.7. Mjerenje i rezultati mjerenja

6.7.1. Mjerenje – Proba 1 – TIG – 3mm



Slika 80. – Dimenzija zavara TIG 3mm

Izvor: fotografirao autor



Slika 81. – Dimenzija provara TIG 3mm

Izvor: fotografirao autor

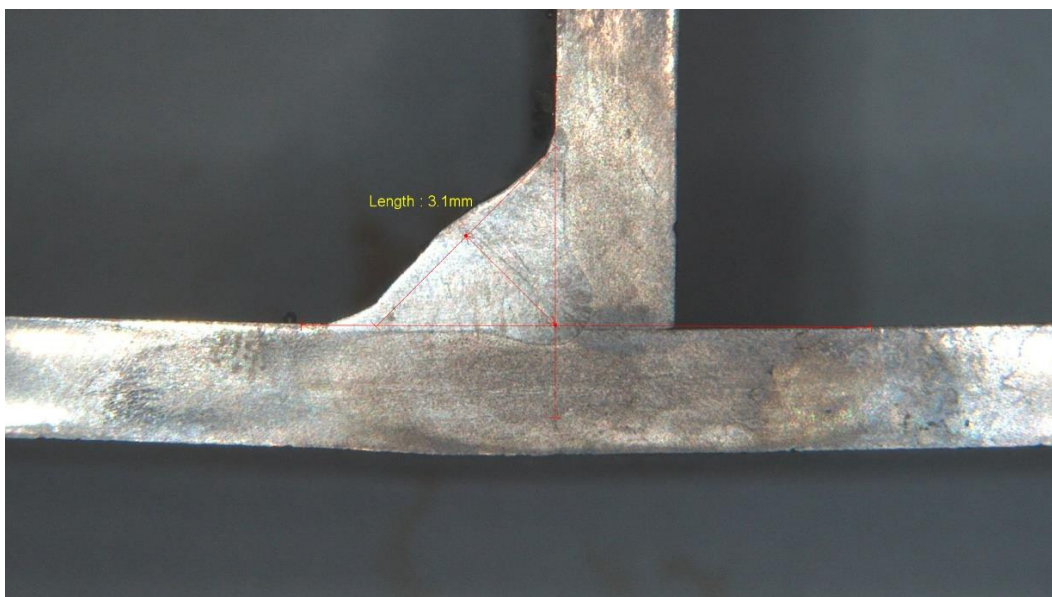


Slika 82. – Kutna deformacija TIG 3mm

Izvor: fotografirao autor

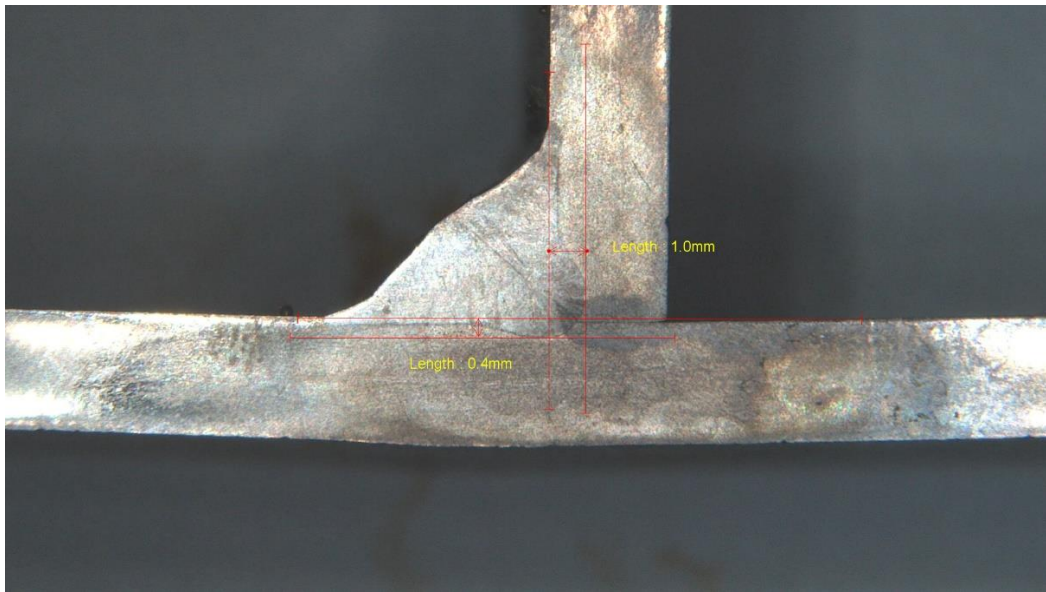
Na temelju priloženih makroizbrusaka može se zaključiti da je specifikacija postupka zavarivanja u potpunosti poštovana, te da je a3 zavar izveden u dva prolaza. U presjeku nisu uočeni defekti. Materijal je kvalitetno provaren, a penetracija je zadovoljavajuća. Ipak, kutna deformacija je znatno izražena.

6.7.2. Mjerenje – Proba 2 – MAG – 3mm



Slika 83. – Dimenzija zavara MAG 3mm

Izvor: fotografirao autor



Slika 84. – Dimenzija provara MAG 3mm

Izvor: fotografirao autor

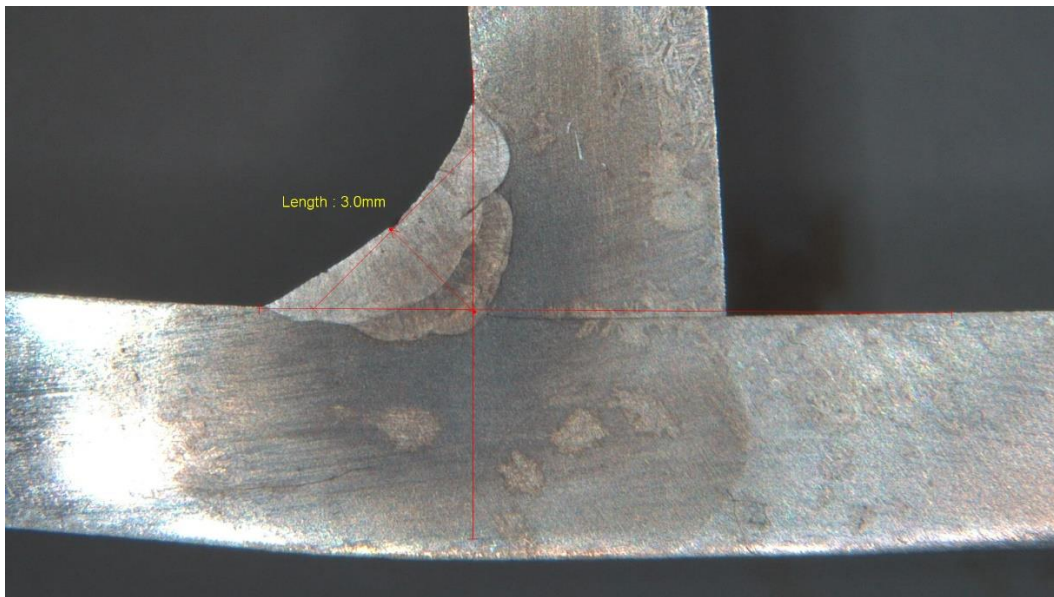


Slika 85. – Kutna deformacija MAG 3mm

Izvor: fotografirao autor

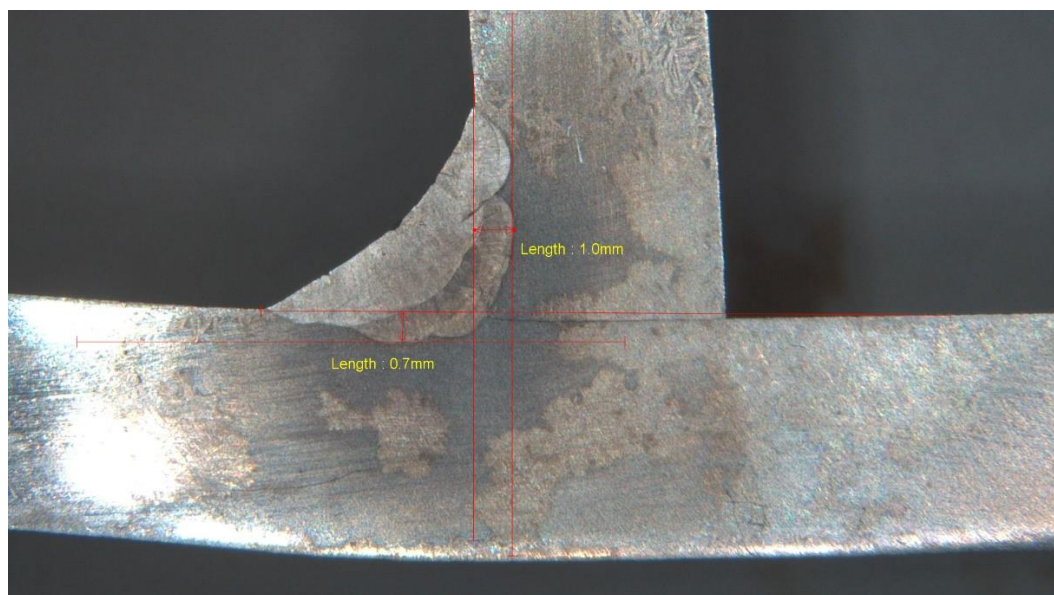
Na temelju priloženih makroizbrusaka može se zaključiti da je specifikacija postupka zavarivanja u potpunosti poštovana, te da je a3 zavar izveden u jednom prolazu. U presjeku možemo vidjeti da zavar nije u potpunosti simetričan, to jest da je položena stranica kutnog zavara duža od okomite (Oznaka greške 512). Materijal je kvalitetno provaren, a penetracija je zadovoljavajuća. Kutna deformacija je prisutna, no nije previše izražena.

6.7.3. Mjerenje – Proba 3 – TIG – 6mm



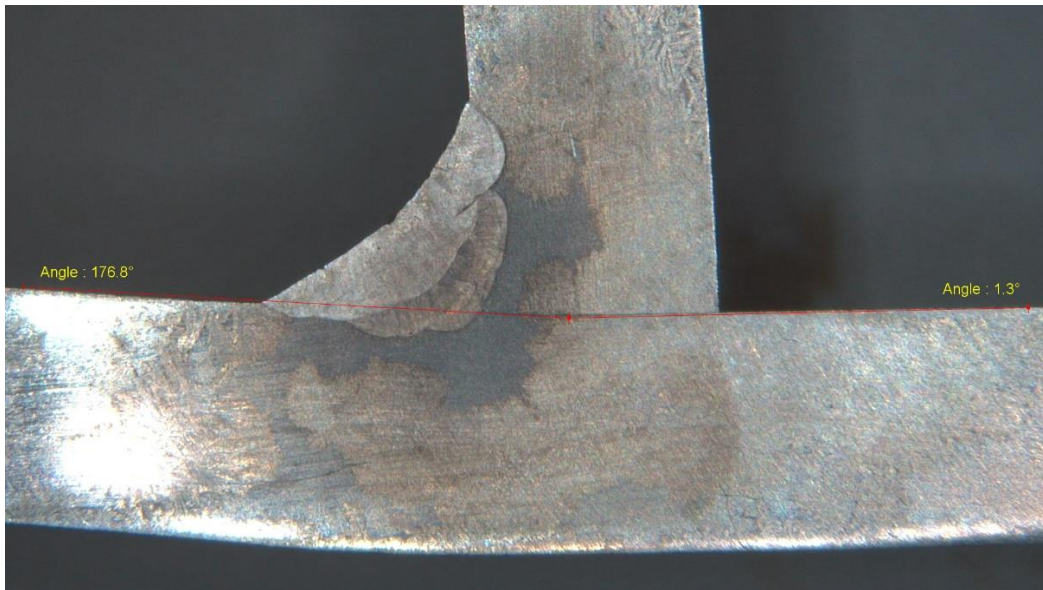
Slika 86. – Dimenzija zavara TIG 6mm

Izvor: fotografirao autor



Slika 87. – Dimenzija provara TIG 6mm

Izvor: fotografirao autor



Slika 88. – Kutna deformacija TIG 6mm

Izvor: fotografirao autor

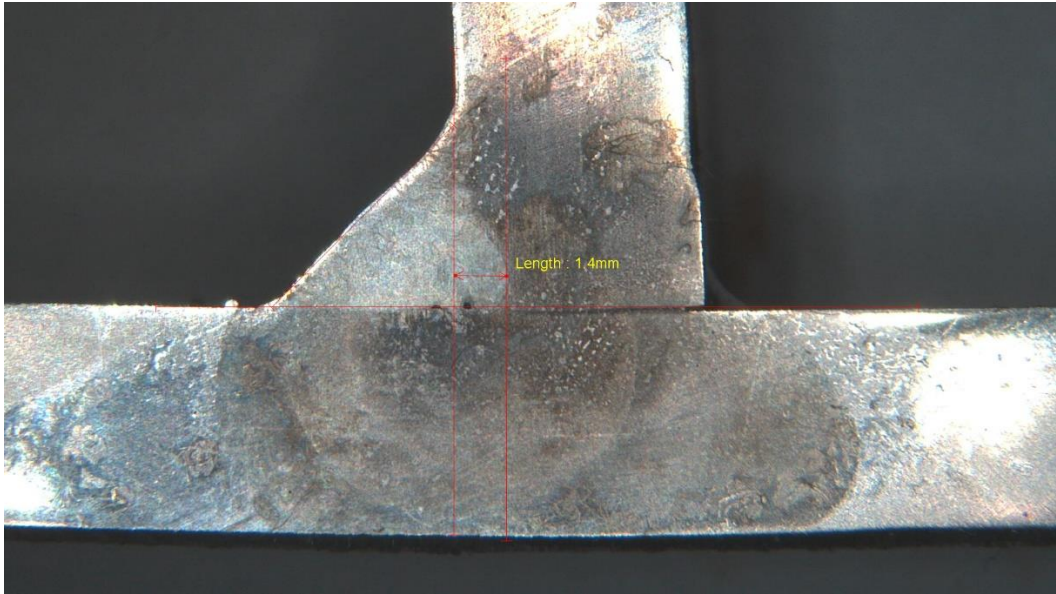
Na temelju priloženih makroizbrusaka može se zaključiti da je specifikacija postupka zavarivanja u potpunosti poštovana, te da je a3 zavar izveden u dva prolaza. U presjeku nisu uočeni defekti. Materijal je kvalitetno provaren, a penetracija je zadovoljavajuća. Iako je lim duplo deblji od lima u probi 1, kutna deformacija je svejedno znatno izražena.

6.7.4. Mjerenje – Proba 4 – MAG – 6mm



Slika 89. – Dimenzija zavara MAG 6mm

Izvor: fotografirao autor



Slika 90. – Dimenzija provara MAG 6mm

Izvor: fotografirao autor



Slika 91. – Kutna deformacija MAG 6mm

Izvor: fotografirao autor



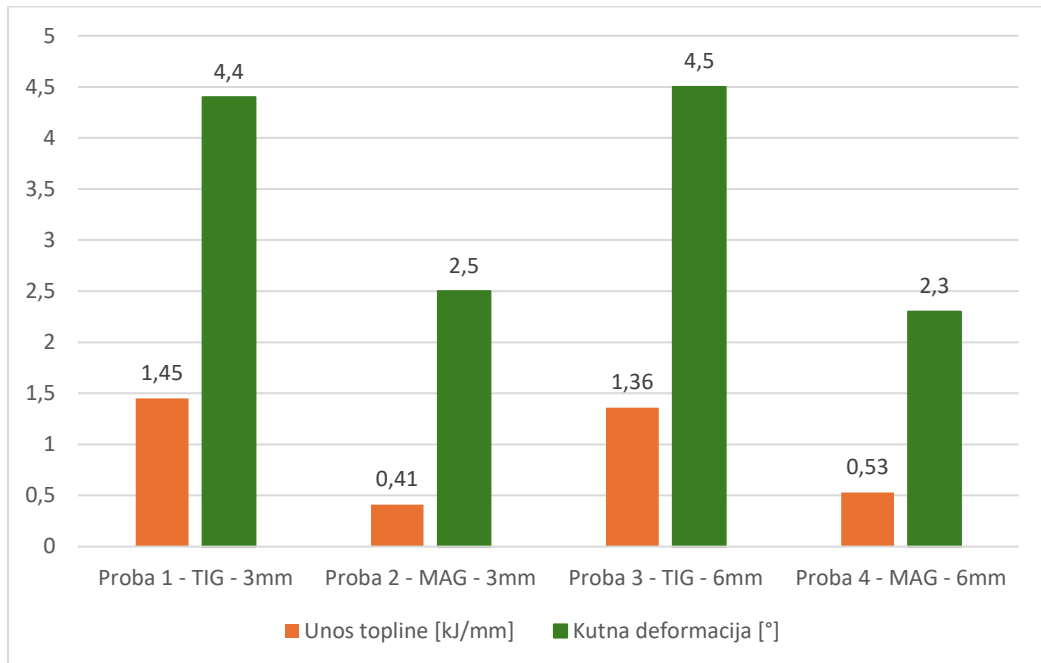
Slika 92. – Plinski mjehurić - pora MAG 6mm

Izvor: fotografirao autor

Na temelju priloženih makroizbrusaka može se zaključiti da je specifikacija postupka zavarivanja poštovana do neke mjere, u jednom prolazu izveden je zavar a3.5, što je 0.5mm veća visina zavora od propisane. U presjeku je vidljivo da je došlo do nastanka plinskih mjehurića – pora, što je greška pod oznakom 2011 (Označeno brojem 1 na slici 89.). Također materijal nije kvalitetno provaren, došlo je do naljepljivanja zavora na horizontalnu stranicu kutnog zavora, što je greška pod oznakom 4011 (Označeno brojem 2 na slici 89.). Kutna deformacija je prisutna, no nije previše izražena.

6.7.5. Usporedba unosa topline i kutne deformacije

Grafikon 1. – Usporedba unosa topline i kutne deformacije



Iz rezultata proračuna unosa topline u zavareni spoj i rezultata mjerenja možemo jasno vidjeti da veći unos topline rezultira većim kutnim deformacijama zbog neravnomjernog zagrijavanja i hlađenja materijala, što uzrokuje unutarnje naprezanje i deformacije. Optimalno upravljanje unosom topline ključno je za smanjenje kutnih deformacija i osiguranja kvalitete zavarene konstrukcije.

7. Zaključak

Na temelju teorijskih i praktičnih spoznaja o TIG i MAG postupcima zavarivanja, može se zaključiti da oba postupka imaju svoje specifične prednosti i izazove, ovisno o situaciji i zahtjevima zavarivanja.

1. **Krivulja učenja i izobrazba:** TIG postupak je potpuno ručni proces koji zahtijeva visoku razinu vještine zavarivača, budući da sam dodaje dodatni materijal u električni luk kojeg stvara netaljiva wolframova elektroda. Zbog toga je krivulja učenja za TIG postupak strmija, a izobrazba kvalitetnog TIG zavarivača traje dulje u usporedbi s MAG postupkom, koji je poluautomatski i koristi mehanizam za dovod žice, čime se olakšava održavanje električnog luka.
2. **Svestranost i oprema:** TIG uređaji s opcijom izmjenične struje mogu zavarivati širok spektar materijala, uključujući aluminij, magnezij, čelike i nehrđajuće čelike, koristeći isti gorionik i iste zaštitne plinove. Suprotno tome, MIG/MAG postupak zahtijeva različite zaštitne plinove i gorionike za različite materijale, što povećava složenost i zahtijeva dodatnu opremu za zavarivanje različitih materijala.
3. **Brzina i ekonomska isplativost:** MIG/MAG postupak ima veći depozit materijala i brži je zbog svoje polu automatizirane prirode, što ga čini pogodnijim za izradu duljih zavarenih spojeva. Iako se i TIG postupkom mogu izraditi dugački zavari, ekonomska isplativost ovog postupka dolazi u pitanje, osim ako ne postoji dobar razlog za njegovu primjenu.
4. **Estetika zavara:** TIG postupak omogućuje zavarivaču veću kontrolu, što rezultira vizualno atraktivnijim zavarima u usporedbi s MIG/MAG postupkom. Stoga se TIG često koristi kada je estetika zavara važna, osobito kada su zavari vidljivi na konačnom proizvodu.

5. **Radna okolina:** U kontroliranim uvjetima radionice ili proizvodne hale, na opremi kao što su zavarivački stolovi ili manipulatori, nema značajne razlike u lakoći obavljanja zavarivanja između TIG i MIG postupaka. Međutim, u neugodnim pozicijama ili na terenu, MIG/MAG postupak pokazuje prednost zbog svoje prilagodljivosti i lakšeg rukovanja.
6. **Toplinski unos i deformacije:** Praktični dio rada pokazuje da se TIG postupkom unosi više topline u materijal tijekom zavarivanja, što rezultira većim deformacijama zavarenih dijelova. Ova karakteristika može predstavljati izazov pri zavarivanju tanjih materijala ili dijelova koji zahtijevaju minimalne deformacije.
7. **Tehnička ispravnost zavarenih spojeva:** Praktični dio rada kroz pregled makroizbrusaka pokazuje da se sa oba korištena postupka zavarivanja na testnom materijalu i testnim debljima dobiju potpuno tehnički ispravni zavareni kutni spojevi po pitanju provara, slijevanja materijala i izbjegavanja naljepljivanja uz iznimku MAG zavarivanja na debljini 6 mm.
8. **Nesukladnosti i pogreške u zavarenim spojevima:** Praktični dio rada pokazuje da su nesukladnosti odnosno pogreške kod zavarivanja uočene samo u slučaju MAG postupka zavarivanja kutnog spoja debljine lima 6 mm. Uočeni su plinski mjehurić – pora i naljepljivanje na horizontalnu stranicu. S obzirom na specifikaciju procesa zavarivanja, ovi nedostaci se ne ni trebali događati i ovdje su se dogodili zbog ljudskog faktora odnosno pogreške zavarivača tijekom zavarivanja uzoraka.

U izradi zavarenih konstrukcija transportne namjene odabir između TIG i MAG postupka zavarivanja ovisi o specifičnim zahtjevima zavarivanja, uključujući vrstu materijala, duljinu zavara, estetske zahtjeve, te radne uvjete. Pravilno razumijevanje i primjena ovih postupaka ključna je za postizanje optimalnih rezultata u zavarivačkim radovima.

Literatura

1. S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić (2015.): *Priručnik: Zavarivački i srodni postupci*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
2. G. Nikolić, I. Hiti (1998.): *Tehnike spajanja*, Tipex, Zagreb
3. <https://www.pit.ba/vrste-zavarivanja-prednosti-i-nedostaci/> (Datum pristupa 25.7.2024.)
4. I. Samardžić, Š. Klarić, B. Despotović, A. Kožul: *Zavarivanje – Digitalni udžbenik – Tehnologije zavarivanja* <https://sfsb.unisb.hr/portal-merlin/diplomski-studij/d851-zavarivanje/zavarivanje-digitalni-udzbenik/> (Datum pristupa 27.7.2024.)
5. I. Juraga, K. Ljubić, M. Živčić (1998.): *Pogreške u zavarenim spojevima*, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja – Časopis „Zavarivanje“, Zagreb
6. V. Panić, K. Grubić (2001.): *Utjecaj vrste zaštitnog plina kod MAG zavarivanja na gubitak kemijskih elemenata iz žice i tvrdoću zavara*, Hrvatsko društvo za materijala i tribologiju, Zagreb
7. A. Kujundžić-Lujan: Završni rad: *Zavarivanje MAG postpkom*, Sveučilište u Splitu, Split, 2023.
8. F. Peter: Završni rad: *Mogućnosti minimiziranja unosa topline kod MIG zavarivanja aluminijskih legura*, Međimursko veleučilište u Čakovcu, Čakovec, 2020.
9. D. Rose (2019.): *Benefits of the Stabilizers - Praxis example*, Fronius
10. <https://bancrofteng.com/how-to-choose-shielding-gas-types-for-gmaw/> (Datum pristupa: 27.7.2024.)
11. Z. Lukačević (1998.): *Zavarivanje*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, SFSB, Slavonski Brod
12. P. Žbirin: Završni rad: *Zaostala naprezanja i deformacije u zavarenim konstrukcijama*, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2018.
13. <https://www.askania.de/en/products/digital-microscopes/dpx-m6000.html> (Datum pristupa 28.7.2024.)
14. M. Willinger (2014.): *Fundamentals of the LSC Process*, Fronius, Austrija
15. <http://www.halversoncts.com/71-the-gas-tungsten-arc-welding-station.html> (Datum pristupa 29.7.2024.)
16. <https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Datoteka:GTAW.svg> (Datum pristupa 29.7.2024.)
17. <https://www.fronius.com/en/welding-technology/downloads> (Datum pristupa 29.7.2024.)

18. <https://promoalati.hr/hr/products/details/boca-argon-8-1-308540> (Datum pristupa 31.7.2024.)
19. https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-showing-the-MIG-MAG-equipment-2_fig1_332057517 (Datum pristupa 31.7.2024.)
20. <https://ezg.hr/proizvodi/zice/> (Datum pristupa 31.7.2024.)
21. <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/iwave-ac-dc/> (Datum pristupa 3.8.2024.)
22. <https://www.eurotehnika.hr/proizvod/tps-500i-pulse/> (Datum pristupa 3.8.2024.)

Popis slika

Slika 1. – Zavarivanje MIG/MAG postupkom	2
Slika 2. – Podjela postupaka zavarivanja taljenjem.....	3
Slika 3. – Podjela postupaka zavarivanja pritiskom (toplinsko-mehanička i mehanička energija)	3
Slika 4. – Elementi sučeljenog zavara	4
Slika 5. – Geometrijska svojstva sučeljenog zavara	5
Slika 6. – Nominalna i stvarna visina kutnog zavara	5
Slika 7. – Sučeoni spoj	6
Slika 8. – T-spoj	6
Slika 9. – Preklopni spoj	6
Slika 10. – Rubni spoj	7
Slika 11. – Križni spoj	7
Slika 12. – Naliježući spoj	7
Slika 13. – Prirubni spoj	7
Slika 14. – Položaji zavarivanja	8
Slika 15. – ZUT na makroizbrusku kutnog spoja	10
Slika 16. – Shema strujanja zaštitnog plina u MIG/MAG postupku	11
Slika 17. – Ugorine uz zavar	14
Slika 18. – Preveliko nadvišenje lica zavara	15
Slika 19. – Preveliko nadvišenje korijena zavara	15
Slika 20. – Oštar prijelaz zavara	15
Slika 21. – Preklop zavara	16
Slika 22. – Pomak u sučeljavanju	16
Slika 23. – Odstupanje od pravca	16
Slika 24. – Utonulost zavara	16
Slika 25. – Progaranje	17

Slika 26. – <i>Nedovoljno popunjen zavar</i>	17
Slika 27. – <i>Nesimetrični kutni zavar</i>	17
Slika 28. – <i>Nepravilan izgled zavara</i>	17
Slika 29. – <i>Uvučen korijen zavara</i>	18
Slika 30. – <i>Nepravilni nastavak zavara</i>	18
Slika 31. – <i>Uzdužna deformacija</i>	19
Slika 32. – <i>Poprečna deformacija</i>	19
Slika 33. – <i>Rotacijska deformacija</i>	19
Slika 34. – <i>Kutna deformacija</i>	20
Slika 35. – <i>Savijanje</i>	20
Slika 36. – <i>Izvijanje</i>	20
Slika 37. – <i>Digitalni mikroskop za snimanje makroizbrusaka</i>	21
Slika 38. – <i>Primjeri makroizbrusaka</i>	22
Slika 39. – <i>Shematski prikaz uređaja za TIG zavarivanje</i>	23
Slika 40. – <i>Shematski prikaz TIG zavarivanja</i>	24
Slika 41. – <i>Osnovna oprema za TIG zavarivanje</i>	26
Slika 42. – <i>Gorionik za TIG zavarivanje</i>	26
Slika 43. – <i>Rashladni sustav</i>	27
Slika 44. – <i>Nožna pedala</i>	27
Slika 45. – <i>Žica za TIG zavarivanje s oznakom</i>	28
Slika 46. – <i>Argon u boci</i>	29
Slika 47. – <i>Osnovni sustav za MIG/MAG zavarivanje</i>	30
Slika 48. – <i>Shema postupka MIG/MAG zavarivanja</i>	31
Slika 49. – <i>Prijenos metala kratkim spojevima</i>	32
Slika 50. – <i>Prijenos metala mješovitim lukom</i>	32
Slika 51. – <i>Prijenos metala štrcajućim lukom</i>	33
Slika 52. – <i>Prijenos metala pulsirajućim lukom</i>	33

Slika 53. – <i>Osnovna oprema za MIG/MAG zavarivanje</i>	34
Slika 54. – <i>Gorionik za ručno MIG/MAG zavarivanje</i>	34
Slika 55. – <i>Potrošni dijelovi gorionika</i>	35
Slika 56. – <i>Rashladni sustav za gorionik</i>	35
Slika 57. – <i>Daljinski upravljač na gorioniku</i>	36
Slika 58. – <i>Žica za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika</i>	36
Slika 59. – <i>Zavarivanje TIG postupkom</i>	38
Slika 60. – <i>Primjer WPS-a iz proizvodnje</i>	39
Slika 61. – <i>Uređaj za TIG zavarivanje Fronius iWave 500i AC/DC</i>	44
Slika 62. – <i>Uređaj za TIG zavarivanje Fronius iWave 500i AC/DC</i>	46
Slika 63. – <i>Točkasto zavarivanje pločica MAG postupkom</i>	48
Slika 64. – <i>Zavarivanje pločica TIG postupkom</i>	49
Slika 65. – <i>Mjerenje temperature međuprolaza kontaktnim termometrom</i>	49
Slika 66. – <i>Proba 6mm zavarena TIG postupkom</i>	50
Slika 67. – <i>Zavarivanje probe 3mm MAG postupkom</i>	51
Slika 68. – <i>Završna obrada zavara</i>	51
Slika 69. – <i>Abrazivni rezač Beuhler Delta AbrasiMet</i>	52
Slika 70. – <i>Odreživanje sredine zavara</i>	52
Slika 71. – <i>Metalografska brusilica i polirka Metkon FORCIPOL 102</i>	53
Slika 72. – <i>Brušenje makroizbruska</i>	53
Slika 73. – <i>Zrcalno sjajna površina makroizbruska</i>	54
Slika 74. – <i>Dušična kiselina za jetkanje zavara</i>	54
Slika 75. – <i>Nagrivanje makroizbruska</i>	55
Slika 76. – <i>Snimanje makroizbruska</i>	55
Slika 77. – <i>Obrada podataka na računalu</i>	56
Slika 78. – <i>Vizualna usporedba zavara</i>	60
Slika 79. – <i>Usporedba količine prskotina TIG (lijevo) i MAG (desno)</i>	60

Slika 80. – Dimenzija zavara TIG 3mm.....	61
Slika 81. – Dimenzija provara TIG 3mm.....	61
Slika 82. – Kutna deformacija TIG 3mm.....	62
Slika 83. – Dimenzija zavara MAG 3mm.....	62
Slika 84. – Dimenzija provara MAG 3mm.....	63
Slika 85. – Kutna deformacija MAG 3mm.....	63
Slika 86. – Dimenzija zavara TIG 6mm.....	64
Slika 87. – Dimenzija provara TIG 6mm.....	64
Slika 88. – Kutna deformacija TIG 6mm.....	65
Slika 89. – Dimenzija zavara MAG 6mm.....	65
Slika 90. – Dimenzija provara MAG 6mm.....	66
Slika 91. – Kutna deformacija MAG 6mm.....	66
Slika 92. – Plinski mjehurić - pora MAG 6mm.....	67

Popis tablica

Tablica 1. – Usporedba prednosti i nedostatka zavarenih spojeva	9
Tablica 2. – Vrste zaštitnih plinova i njihova svojstva Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.	
Tablica 3. – Vrste struja pri TIG zavarivanju	25
Tablica 4. – Prednosti i nedostaci TIG zavarivanja	29
Tablica 5. – Prednosti i nedostaci MIG/MAG zavarivanja	37
Tablica 6. – Specifikacija postupka zavarivanja – Proba 1	40
Tablica 7. – Specifikacija postupka zavarivanja – Proba 2	41
Tablica 8. – Specifikacija postupka zavarivanja – Proba 3	42
Tablica 9. – Specifikacija postupka zavarivanja – Proba 4	43
Tablica 10. – Karakteristike uređaja Fronius iWave 500i AC/DC	45

Tablica 11. – Karakteristike uređaja Fronius TPS 500i PULSE.....	47
--	----

Popis grafikona

Grafikon 1. – Usporedba unosa topline i kutne deformacije	68
--	----