

Automatizirano MAG zavarivanje općih konstrukcijskih čelika

Belužić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:672223>

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

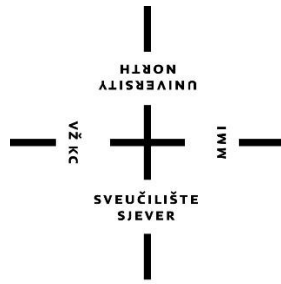
Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





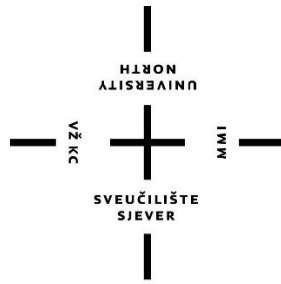
**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 059/STR/2022

**Automatizirano MAG zavarivanje
općih konstrukcijskih čelika**

Ivan Belužić, 3071/336D

Varaždin, svibanj 2022. godine



**Sveučilište
Sjever**

Odjel za Strojtarstvo

Diplomski rad br. 059/STR/2022

**Automatizirano MAG zavarivanje
općih konstrukcijskih čelika**

Student

Ivan Belužić, 3071/336D

Mentor

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl. ing. stroj.

Varaždin, svibanj 2022. godine

Predgovor

Zahvaljujem se mentoru doc.dr.sc. Matiji Bušiću na pruženoj pomoći i savjetima tijekom izrade diplomskog rada. Zahvaljujem se i svim profesorima i kolegama na prenesenom znanju.

Također zahvaljujem se i obitelji na pruženoj podršci, savjetima i strpljenju tijekom studiranja.

Sažetak

Cilj ovog diplomskog rada je utvrditi kako promjena parametra zavarivanja utječe na geometriju zavara kod automatiziranog MAG postupka zavarivanja općih konstrukcijskih čelika. Zavarivanje uzoraka od općeg konstrukcijskog čelika provedeno je u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu gdje je provedena i njihova analiza.

U teoretskom dijelu rada navedene su neke od karakteristika općih konstrukcijskih čelika. Prikazana je podjela postupaka zavarivanja. Detaljno je opisan MIG/MAG postupak zavarivanja s pripadajućim parametrima zavarivanja, dodatnim materijalima, zaštitnim plinovima i načinima prijenosa metala u električnom luku. Također obrađena je i automatizacija MAG postupka zavarivanja gdje su opisani neki od automata koji se mogu pronaći na tržištu.

Ključne riječi: opći konstrukcijski čelik, zavarivanje, MIG, MAG, automati za zavarivanje

Summary

The target of this graduate thesis is to determine how the changes of welding parameters influent on weld geometry of construction steels in the automated MAG welding process. Construction steel samples were welded in the laboratory of the University North in Varaždin, where the analyses were performed to.

In the theoretical part of the thesis are listed some of construction steels characteristics. It is presented division of welding processes. The MIG/MAG welding process is described in detail with the corresponding welding parameters, additional materials, shielding gases and methods of metal transfer in the electric arc. In this graduate thesis is described the automation of the MAG welding process. There are described some of automated welding machines, which can be founded on the market.

Keywords: construction steel, welding, MIG, MAG, automated welding machine

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Strojarstvo

PRISTUPNIK Ivan Belužić

MATIČNI BROJ 3071/336D

DATUM 10.05.2022.

KOLEGIJ Suvremene proizvodne tehnologije

NASLOV RADA Automatizirano MAG zavarivanje općih konstrukcijskih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Automated MAG welding of construction steels

MENTOR dr.sc. Matija Bušić

ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, predsjednik povjerenstva
2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva
3. izv. prof. dr. sc. Sanja Šolić, član povjerenstva
4. doc. dr. sc. Zlatko Botak, zamjenski član povjerenstva
- 5.

Zadatak diplomskog rada

BROJ 059/STR/2022

OPIS

U teoretskom dijelu diplomskog rada na temelju literaturnih podataka potrebno je detaljno analizirati tehnologiju MIG/MAG zavarivanja. Navesti osnovne karakteristike postupka, utjecajne parametre, zaštitne plinove koji se koriste te prednosti i nedostatke ovog postupka. Detaljno obraditi ručno i automatizirano MAG zavarivanje. Navesti uz primjere moguće izvedbe uređaja koji se koriste pri automatiziranom MAG zavarivanju.

U eksperimentalnom dijelu rada na odgovarajućim uzorcima izvesti automatizirano MAG zavarivanje općeg konstrukcijskog čelika u kutnom obliku spoja. Eksperiment izvesti sa više različitih stanja uz varijaciju parametara zavarivanja. Na izvedenim spojevima izmjeriti nastalu geometriju zavara te izraditi uzorke za analizu poprečnog presjeka zavarenog spoja. Na navedenim poprečnim presjecima također izvršiti analizu geometrije. Ovisno o izmjerenim vrijednostima donijeti zaključak o utjecaju varijabilnih parametara. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

12.05.2022.



M. Bušić



IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Ivan Belužić pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor diplomskog rada pod naslovom „Automatizirano MAG zavarivanje općih konstrukcijskih čelika” te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Ivan Belužić
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišne te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Ivan Belužić neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom diplomskog rada pod naslovom „Automatizirano MAG zavarivanje općih konstrukcijskih čelika” čiji sam autor.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Ivan Belužić
(vlastoručni potpis)

Popis korištenih kratica

- MIG** Metal Inert Gas
Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
- MAG** Metal Active Gas
Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina

Popis korištenih oznaka

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
R_e	MPa	granica razvlačenja
R_m	MPa	vlačna čvrstoća
R_{mt}	MPa	tlačna čvrstoća
R_{mu}	MPa	smična čvrstoća
R_{ms}	MPa	savojna čvrstoća
C_e		ugljični ekvivalent
A	%	istezljivost
I	A	jakost struje
U	V	napon
$v_{zavarivanja}$	mm/min	brzina zavarivanja
Q_{zp}	l/min	protok zaštitnog plina
Q	kJ/mm	unos topline u materijal
k	-	koeficijent toplinske iskoristivosti postupka
$v_{\dot{z}}$	m/min	brzina žice

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
1.1.	Konstruktivski čelici	1
1.1.1.	Opći konstruktivski čelici.....	2
1.2.	Primjeri zavarivanja limova uz cijev u praksi	4
1.3.	Zavarivanje	6
2.	MIG/MAG zavarivanje	8
2.1.	Parametri MIG/MAG zavarivanja	10
2.1.1.	Jakost struje	10
2.1.2.	Napon električnog luka	12
2.1.3.	Brzina zavarivanja.....	12
2.1.4.	Vrsta i protok zaštitnog plina	13
2.1.5.	Induktivitet	15
2.1.6.	Slobodni kraj žice.....	15
2.2.	Prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanja.....	16
2.2.1.	Prijenos metala štrcajućim lukom	17
2.2.2.	Prijenos metala pulsirajućim lukom.....	18
2.2.3.	Prijenos metala kratkim spojem	19
2.2.4.	Prijenos metala mješovitim lukom	20
2.3.	Zaštitni plinovi za MIG/MAG zavarivanje	20
2.3.1.	Inertni plinovi	21
2.3.2.	Aktivni plinovi	22
2.3.3.	Mješavine plinova	24
2.4.	Dodatni materijal za MIG/MAG zavarivanje	26
3.	Automatizacija MAG zavarivanja	30
3.1.	Automati za linearno zavarivanje	30
3.2.	Automati za kružno zavarivanje	37
4.	Eksperimentalni dio	39

4.1.	Osnovni materijali korišteni u eksperimentu.....	39
4.2.	Oprema za zavarivanje	39
4.2.1.	Izvor struje.....	39
4.2.2.	Zaštitni plin	40
4.2.3.	Dodatni materijal.....	40
4.2.4.	Automat za zavarivanje	41
4.3.	Postupak provođenja eksperimenta	41
4.4.	Parametri korišteni pri zavarivanju.....	43
4.5.	Kontrola zavara penetrantima.....	44
4.6.	Mjerenje visine zavara.....	46
4.7.	Analiza geometrije zavarenih spojeva.....	47
4.7.1.	Brušenje uzoraka	48
4.7.2.	Nagrivanje uzoraka.....	49
4.7.3.	Slikanje uzoraka	49
4.7.4.	Analiza izmjerene geometrije zavara na uzorcima.....	51
5.	Zaključak.....	54
6.	Literatura.....	56

1. Uvod

U ovom radu nastoji se pokazati kako promjena parametara zavarivanja kod automatiziranog MAG postupka zavarivanja općeg konstrukcijskog čelika utječe na geometriju zavara. Opći konstrukcijski čelici pripadaju skupini konstrukcijskih čelika i najčešće su korišteni čelici u proizvodnji. Zbog sposobnosti da se zavaruju ovi čelici pogodni su za izradu zavarenih konstrukcija. Zavarivanje ovih čelika može se provoditi različitim postupcima zavarivanja, a jedan od tih postupka je i MAG zavarivanje.

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni poluautomatizirani postupak zavarivanja kod kojeg se zavarivanje izvodi u atmosferi aktivnih zaštitnih plinova s automatskim dovođenjem žice na mjesto zavarivanja. Kvaliteta zavarenog spoja kod ovog postupka zavarivanja ovisi o zavarivaču i parametrima zavarivanja. Za postizanje što boljeg zavarenog spoja zavarivač mora poznavati parametre i njihov utjecaj na zavar. Također prije samog procesa zavarivanja na osnovu vrste i debljine materijala koji se zavaruje potrebno je odabrati zaštitni plin i dodatni materijal.

Kako bi se postigla što veća produktivnosti i smanjile greške koje nastaju umorom zavarivača u sam proces zavarivanja uvode se automati pomoću kojih se smanjuje utjecaj zavarivača. Ovisno o svojoj izvedbi automati omogućuju zavarivanje u različitim položajima. Osim povećanja produktivnosti i smanjenja grešaka uvođenjem automata dolazi i do poboljšanja radnih uvjeta zavarivača.

1.1. Konstrukcijski čelici

Konstrukcijski čelici su čelici koji se koriste za izradu konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja koji obavljaju neke od funkcija kao što je prijenos gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremanje i transport tekućina ili plinova, spajanje elemenata konstrukcija i slično. Odnosno koriste se za izradu osovina, vratila, zupčanika, opruga, nosača, vijaka, kućišta itd. Kako bi dijelovi koji su izrađeni od konstrukcijskog čelika obavljali zadaće koje se stavljaju pred njih od konstrukcijskih čelika se traže da posjeduju svojstva kao što su [1]:

- mehanička svojstva - moraju imati visoku granicu razvlačenja povezanu s dovoljnom plastičnom deformabilnošću, dovoljno visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama, dovoljnu žilavost i čvrstoću pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama, otpornost na umor u uvjetima promjenjivog opterećenja
- otpornost na trošenje
- otpornost na koroziju

- tehnološka svojstva - zavarljivost, rezljivost, hladna oblikovljivost

1.1.1. Opći konstrukcijski čelici

Opći konstrukcijski čelici u odnosu na ostale čelike su najzastupljeniji u proizvodnji te se najčešće koriste u proizvodnji nosivih zavarenih konstrukcija velike mase kao što su mostovi, nosači, dijelovi vozila, dizalice i slično. Ovi čelici dijele se na dvije skupine, a to su:

- a) opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije
- b) čelici za strojogradnju. [1]

a) Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije

Od ove skupine općih konstrukcijskih čelika se traži da u svojoj primjeni imaju dovoljnu nosivost i sigurnost. Ti zahtjevi se mogu ostvariti ukoliko čelik ima dovoljno visoku granicu razvlačenja (R_e), vlačnu čvrstoću (R_m), tlačnu čvrstoću (R_{mt}), smičnu čvrstoću (R_{ms}), savojnu čvrstoću (R_{ms}) i udarni rad loma (žilavost) osobito pri nižim temperaturama. Od tehnoloških svojstava za ovu skupinu čelika najvažnija je zavarljivost i hladna oblikovljivost odnosno da su pogodni za savijanja, kovanje, duboko vučenje. Pošto se danas gotovo sve konstrukcije spajaju zavarivanjem jedno od najvažnijih tehnoloških svojstava ovih čelika je dobra zavarljivost. Da bi čelici iz ove skupine bili dobro zavarljivi glavni uvjet je da imaju što manju vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_e . Vrijednost ugljičnog ekvivalenta mora biti manja od 0,4. Ako čelici imaju C_e veći od 0,4 to ne znači da se oni ne mogu zavariti nego je za njihovo zavarivanje potrebno provesti predgrijavanje čime se postiže da se ti čelici sporije hlade nakon zavarivanja. Na vrijednost C_e utječe udio ugljika i udio legiranih elementa pa iz tog razloga te vrijednosti moraju biti manje.[1] Vrijednost ugljičnog ekvivalenta izračunava se prema formuli [1]:

$$C_e = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr+\%Mo+\%V}{5} + \frac{\%Ni+\%Cu}{10} < 0,4 \quad (1)$$

Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije su uglavnom nelegirani i imaju feritno-perlitnu mikrostrukturu. Ako se ovi čelici nakon toplog oblikovanja normaliziraju u mikrostrukturi će prevladati sitno zrna. Prisutnost sitnog zrna u mikrostrukturi također se može poboljšati dodavanjem aluminija koji stvara aluminijev nitrid (AlN) te sprečava rast zrna pri zagrijavanju čelika. Ovi čelici nisu predviđeni za toplinsku obradu jer imaju nezajamčen kemijski sastav i visok udio nečistoća i nehomogenosti u mikrostrukturi. Za samu primjenu ovih čelika odlučujuće su vrijednosti mehaničkih svojstava i zavarljivost. Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije imaju granicu razvlačenja (R_e) od 190 do 370 MPa, vlačnu čvrstoću (R_m) od

330 do 700 MPa i istezanje (A_5) od 10 do 28 %. Vrijednosti granice razvlačenja su veće ukoliko je sadržaj ugljika i udio perlita u mikrostrukturi veći. Povećanje čvrstoće postiže se dodatkom mangana i silicija s tima da udio mangana ne smije preći 1,65% jer povisuje prokaljivost. Udarni rad loma (žilavost) se povećava većim omjer Mn/C. Temperaturno područje u kojima se ovi čelici primjenjuju je od -40 do +50 °C. Kod primjene pri sniženim temperaturama povećava se opasnost od pojave krhkog loma. Ovi čelici isporučuju se u toplovaljanom ili u normaliziranom stanju, a iznimno i u hladnodeformiranom stanju.[1]

Opći konstrukcijski čelici označavaju se prema normama. Jedna od tih normi prema kojoj se označavaju opći konstrukcijski čelici je i europska norma EN 10027-1. Oznaka čelika sastoji se od glavne oznake, dodatne oznake za čelik i dodatne oznake za proizvode od čelika. Glavna oznaka započinje oznakom "S" iza koje slijedi troznamenasti broj koji označava minimalnu granicu razvlačenja za područje najmanjih debljina. U dodatnoj oznaci prva dva znaka predstavljaju udarni rad loma pri određenoj temperaturi ispitivanja. Prema potrebi dodatna oznaka može sadržavati simbole za detaljnije označavanje čelika.[1] Neki od primjera označavanja općih konstrukcijskih čelika prema ovoj normi navedeni su u nastavku:

- S355J2+N - konstrukcijski čelik s minimalnom granicom razvlačenja od 355 MPa, s udarnim radom loma od 27J pri temperaturi ispitivanja od -20 °C isporučen u normaliziranom stanju

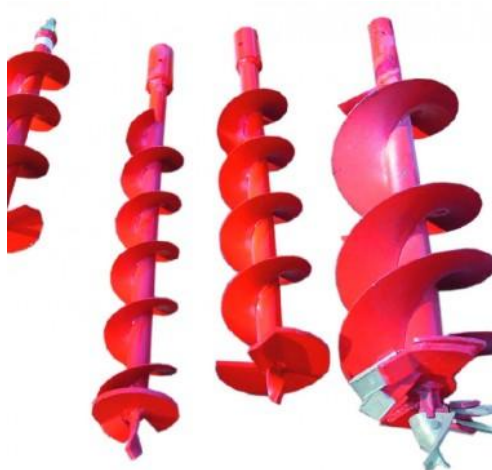
- S355J2H – konstrukcijski čelik s minimalnom granicom razvlačenja od 355 MPa, s udarnim radom loma od 27J pri temperaturi ispitivanja od -20 °C, i koji je u obliku šupljeg profila odnosno cijevi.

1.2. Primjeri zavarivanja limova uz cijev u praksi

Pošto će u eksperimentalnom dijelu ovog rada biti provedeno zavarivanje limova uz cijev u kutnom obliku spoja u ovom poglavlju bit će navedeni neki primjeri iz prakse odnosno proizvodi kod kojih osnovnu konstrukciju čini zavareni spoj lima uz cijev. Primjeri takvih proizvoda mogu se pronaći u različitim djelatnostima kod kojih taj proizvod obavlja određenu funkciju. Neki primjeri proizvoda kod kojih imamo zavarivanje limova uz cijev nalaze se na sljedećim slikama.



Slika 1. 1 Pužni transporter [2]



Slika 1.2 Svrkla za zemlju [3]



Slika 1.3 Membranski zid kotla za spalionicu otpada [4]



Slika 1.4 Ojačanje stupova [5]

1.3. Zavarivanje

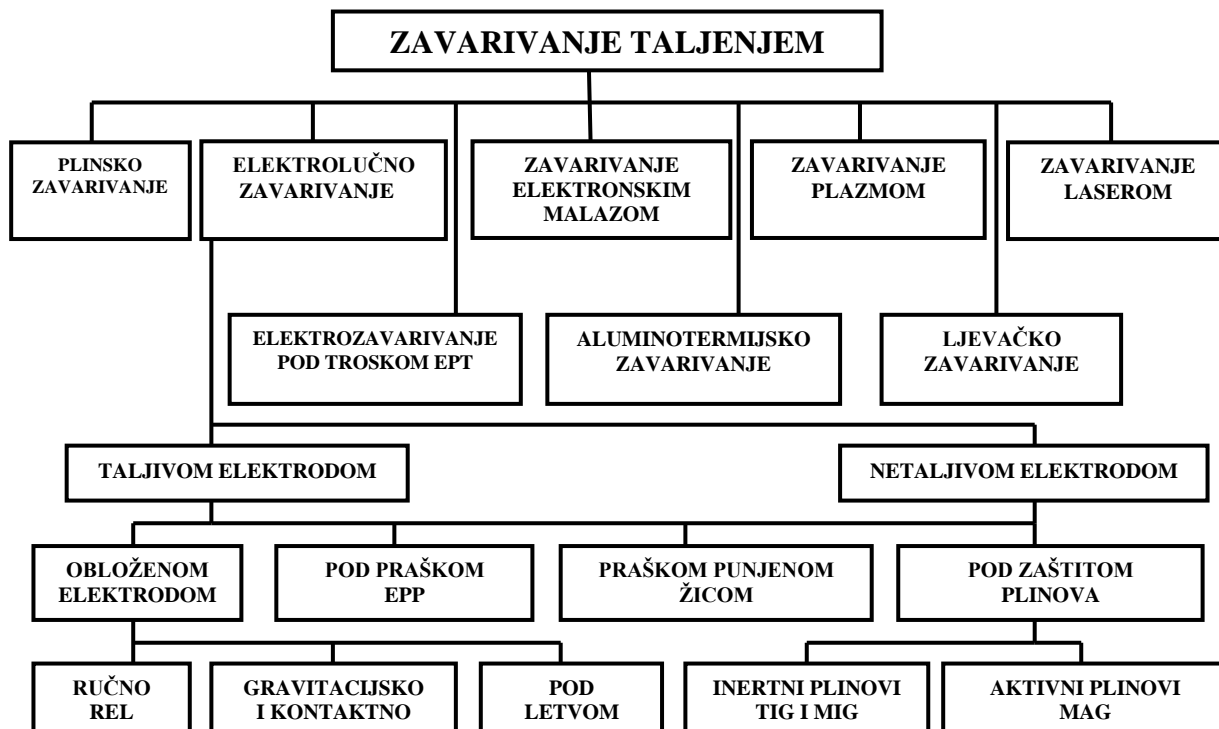
Zavarivanje je jedan od najraširenijih postupaka spajanja metalnih materijala. To je postupak kojim se spajaju dva ili više materijala pritiskom ili taljenjem sa ili bez dodavanja dodatnog materijala čime se dobiva homogen nerastavljivi spoj. Zavarivanjem se mogu spajati metalni i nemetalni materijali.

Sam postupak zavarivanja razvijao se je usporedno kako su se upotrebljavali pojedini metali. U samim počecima metali su se spajali postupcima lijevanja i kovanja. Upotrebom električne energije za dobivanje topline kod spajanja metala dolazi do naglog razvoja postupaka zavarivanja. Električni luk uspostavljao se je između vrhova dvije ugljene elektrode, ali kako je vrijeme prolazilo dolazilo je do novih otkrića, ugljena elektroda zamijenjena je s volframovom te metalnom elektrodom koja se talila i istovremeno služila kao dodatni materijal. Izumom novih izvora toplinske energije (elektronski snop i laser) ubrzao se je razvoj novih postupaka zavarivanja te je omogućeno zavarivanje materijala koji su do tada bili nezavarljivi ili teško zavarljivi. Razvojem uređaja, opreme i dodatnog materijala za zavarivanje omogućen je viši stupanj automatizacije i robotizacije zavarivanja.[6]

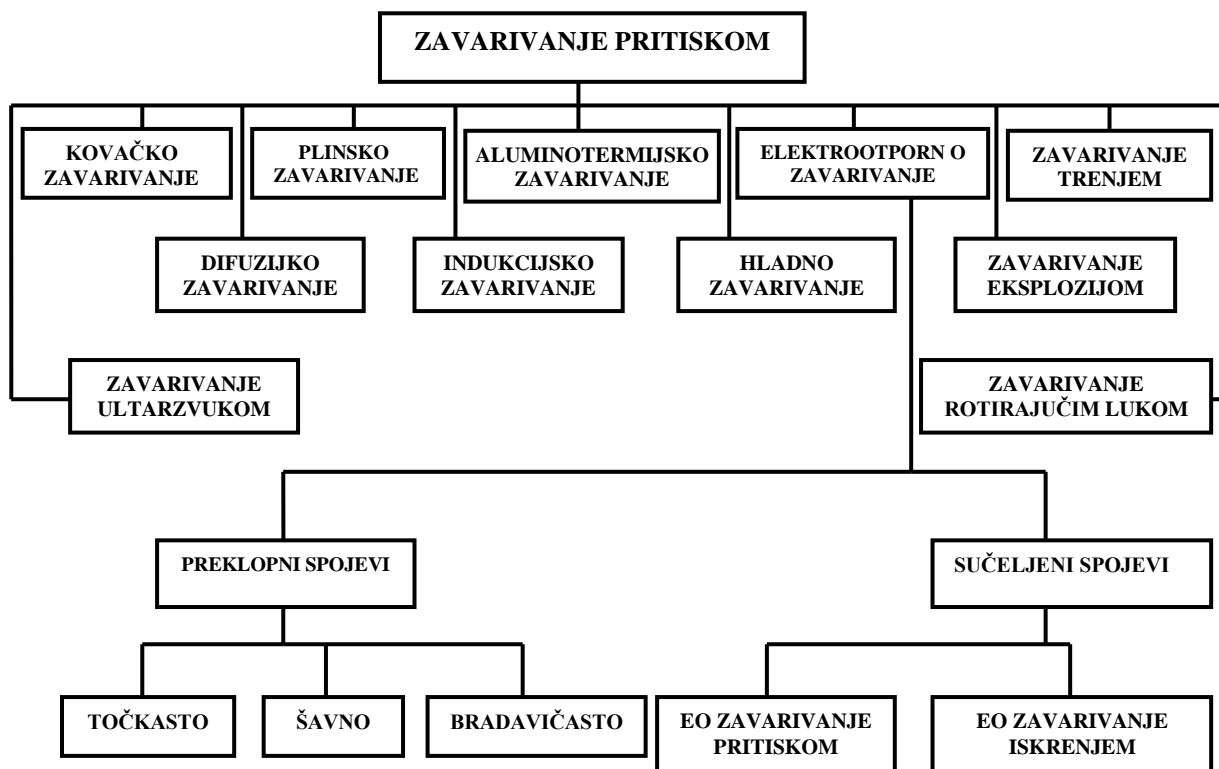
Primjena zavarivanja u praksi je izuzetno velika, pa je postupke zavarivanja moguće različito podijeliti. Međutim najčešća podjela postupaka zavarivanja je prema načinu ostvarivanja zavarenog spoja i to na postupke zavarivanja taljenjem i postupke zavarivanja pritiskom.

Zavarivanje taljenjem je postupak zavarivanja materijala u rastaljenom stanju na mjestu spoja sa ili bez dodavanja dodatnog materijala. Dok je zavarivanje pritiskom postupak zavarivanja materijala pod djelovanjem pritiska bez ili uz lokalno ograničeno zagrijavanje, najčešće bez dodavanja dodatnog materijala.[6]

Podjela postupaka zavarivanja taljenjem i pritiskom prikazana je na slici 1.5 i slici 1.6.



Slika 1.5 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem [7]

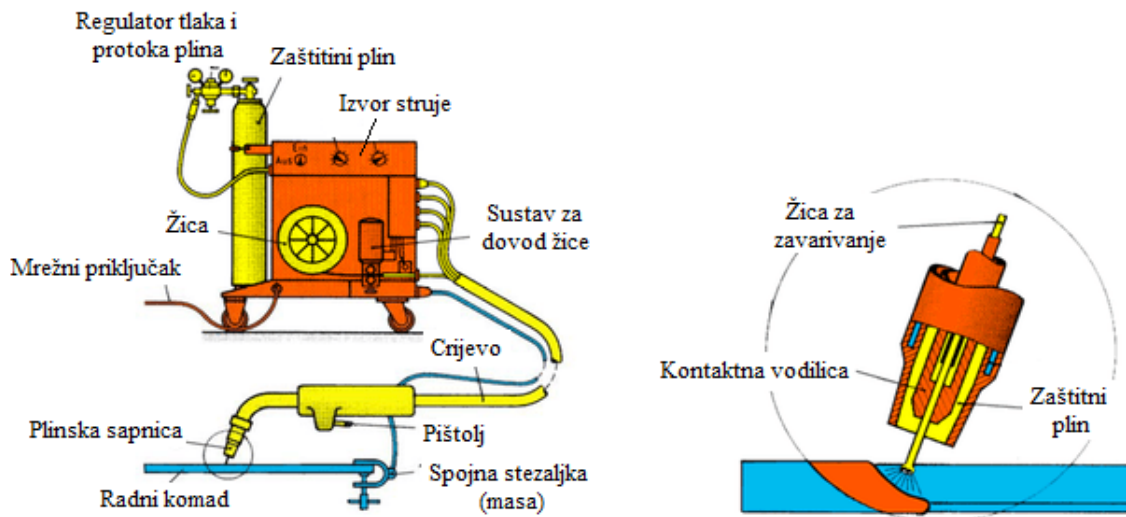


Slika 1.6 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom [7]

2. MIG/MAG zavarivanje

MIG/MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u atmosferi zaštitnih plinova koji spada u skupinu postupaka zavarivanja taljenjem. Zavarivanje se ostvaruje uspostavom električnog luka između vrha taljive elektrode odnosno žice i radnog komada. Električni luk stvara potrebnu toplinu koja je potrebna za taljenje dodatnog materijala odnosno žice i rubova radnog komada koji se spajaju, a koji se nalazi u atmosferi inertnih i aktivnih zaštitnih plinova. Ovisno o vrsti zaštitnog plina koji se koriste pri zavarivanju ovi postupci su dobili ime. Tako se kod MIG (Metal Inert Gas) postupka zavarivanja kao zaštitni plinovi koriste inertni plinovi, a dok se kod MAG (Metal Active Gas) postupka zavarivanja koriste aktivni plinovi kao zaštita električnog luka i rastaljenog materijala od utjecaja plinova iz okolne atmosfere. MIG/MAG postupak zavarivanja najčešće se koristi u praksi kao poluautomatiziran postupak zavarivanja kod kojeg je dodavanje žice u električni luk mehanizirano, a držanje i vođenje pištolja je ručno.

Shema MIG/MAG uređaja za zavarivanje prikazana je slici 2.1. Uređaj za MIG/MAG zavarivanje je isti za oba postupka samo je razlika u vrsti upotrebljavanog zaštitnog plina. Prije samog početka zavarivanja potrebno je uključiti izvor struje te podesiti parametre zavarivanja i količinu protoka zaštitnog plina. Struja zavarivanja se dovodi iz izvora struje pomoću vodiča, od kojih je jedan spojen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. Pritiskom na prekidač koji se nalazi na pištolju za zavarivanje započinje proces zavarivanja. Prvo se uključuje elektro ventil koji propušta zaštitni plin iz čelične boce, a zatim elektromotor za dovod žice koja se nalazi na kolutu. Zaštitni plin dovodi se iz čelične boce pomoću gumenog crijeva na pištolj gdje se kroz sapnicu upuhuje u atmosferu električnog luka. Žica za zavarivanje odmeta se s koluta pomoću valjaka koji ju dovode kroz bužir do pištolja gdje prolazi kroz kontaktnu vodilicu koja je spojena na izvor struje. Prilikom kontakta žice sa radnim komadom dolazi do uspostave električnog luka. Zavarivač pomicanjem pištolja za zavarivanje određenom brzinom vrši zavarivanje. Prekidanje postupka zavarivanja vrši se otpuštanjem prekidača na pištolju čime se prekida dovod žice i zaštitnog plina.[7]



Slika 2.1 Shema uređaja za MIG/MAG zavarivanje [8]

Da bi se zadovoljili svi zahtjevi i postigla što bolja kvaliteta zavarenog spoja pomoću MIG/MAG postupka zavarivanja potrebno je poznavati njegove prednosti ali i nedostatke.

Neke od prednosti MIG/MAG postupka zavarivanja su [6,9]:

- velika brzina zavarivanja
- zbog velike brzine zavarivanja smanjena iskrivljenost konstrukcija
- čista površina zavara (bez troske)
- mogućnost zavarivanja svih vrsta materijala
- povećana proizvodnost i učinkovitost
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- širok spektar dodatnog materijala za zavarivanje
- dobra mehanička svojstva i kvaliteta zavarenog spoja
- jednostavna obuka zavarivača
- pogodan za automatizaciju i robotizaciju
- mogućnost zavarivanja u radionici i na terenu
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- velika mogućnost izbora različitih parametara i načina prijenosa materijala.

Nedostaci MIG/MAG postupka zavarivanja su [10,11]:

- mogućost pojave grešaka na samom početku zavarivanja
- opasnost od grešaka pri sporom zavarivanju zbog mogućnosti istjecanja rastaljenog metala ispred električnog luka
- komplicirana obuka zavarivača za zavarivanje visokolegiranih čelika i obojenih metala
- otežano zavarivanje na otvorenom zbog strujanja vjetra
- pojava jakog bljeskanja pri zavarivanju
- oslobađanje velike količine plinova prilikom zavarivanja.

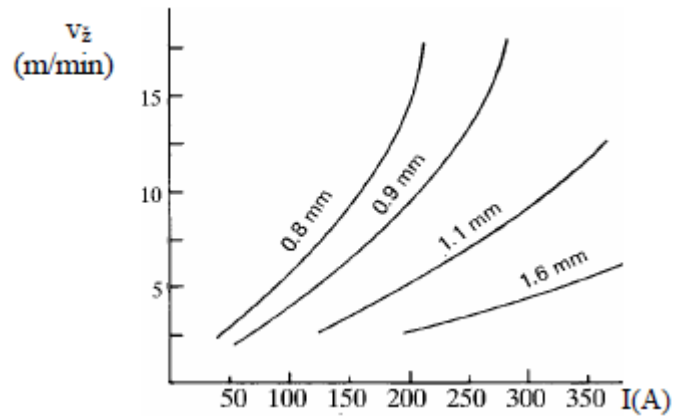
2.1. Parametri MIG/MAG zavarivanja

Kako bi se neki metalni dio ili konstrukcija kvalitetno zavarili potrebno je pravilno podesiti parametre zavarivanja. Da bi zavarivač dobro podesio parametre potrebno je da razumije kako pojedini parametri i njihova promjena utječu na postupak zavarivanja i kvalitetu zavarenog spoja. Kod MIG/MAG postupka zavarivanja postoji nekoliko parametara koji utječu na kvalitetu zavara i o kojima je potrebno voditi računa prilikom zavarivanja. Ti parametri su [9]:

- jakost struje I , A
- napon električnog luka U , V
- brzina zavarivanja v , mm/min
- vrsta i protok zaštitnog plina Q_{zp} , l/min
- induktivitet (uspon struje)
- slobodni kraj žice.

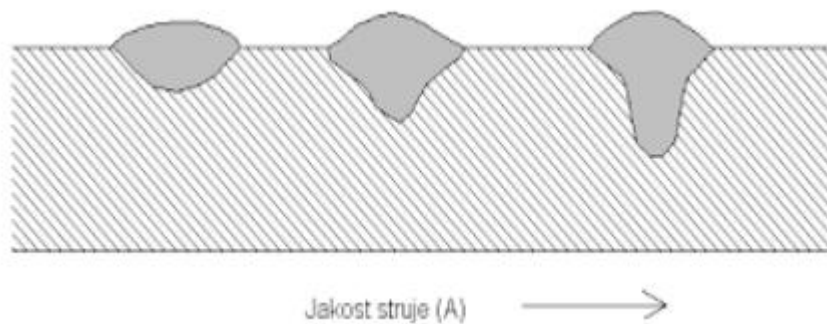
2.1.1. Jakost struje

Jakost struje zavarivanja ovisi o vrsti i debljini materijala koji se zavaruje, položaju u kojem se vrši zavarivanje, obliku spoja i promjeru žice kojom će se vršiti zavarivanje. Jakost struje zavarivanja podešava se brzinom dovođenja žice. Povećavanjem brzine dovođenja žice povećava se i jakost struje zavarivanja i obratno. Također za veći promjer žice potrebna je veća jakost struje zavarivanja.[7] Ovisnost jakosti struje zavarivanja o brzini dovođenja žice i debljini žice prikazana je na slici 2.2.



Slika 2.2 Ovisnost jakosti struje i brzine dovođenja žice [10]

Povećanjem jakosti struje dolazi do povećanja penetracije, nadvišenja zavara i taljenja materijala što se može vidjeti na slici 2.3.



Slika 2.3 Utjecaj jakosti struje na oblik zavara [12]

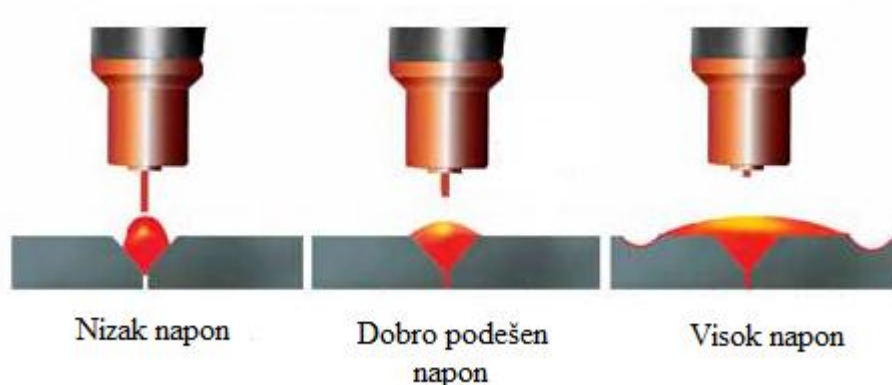
Kod prejake struje zavarivanja kada su ostali parametri nepromijenjeni dolazi do [13]:

- veće penetracije
- lošijeg izgleda lica zavara
- većeg rasprskavanja materijala
- većeg nadvišenja zavara.

Kod premale jakosti struje zavarivanja kod nepromijenjenih ostalih parametara zavarivanja dolazi do nedovoljnog uvarivanja i nejednake širine površine zavara.[13]

2.1.2. Napon električnog luka

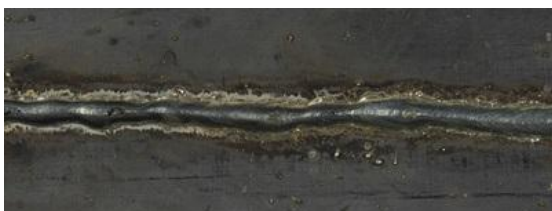
Uz jakost struje zavarivanja napon električnog luka je najznačajnija promjenjiva veličina koja bitno utječe na kvalitetu zavarenog spoja. Napon električnog luka podešava se na izvoru struje i ovisi o duljini električnog luka. Povećanjem duljine električnog luka povećava se i napon. Pri prekomjernom povećanju duljine električnog luka smanjuje se zaštita rastaljenog metala što uzrokuje pogoršavanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Promjenom napona električnog luka utječe se na način prijenosa dodatnog materijala, dubinu protaljivanja i na dimenzije zavara. Kod niskog napona električnog luka zavar je uzak i ispupčan s većom dubinom protaljivanja, a kod visokog napona zavar je širok i nizak s manjom dubinom protaljivanja te prilikom zavarivanja dolazi do povećanog rasprskavanja i slabijih mehaničkih svojstava zavarenog spoja.[7,10,14] Na slici 2.4 prikazan je utjecaj napona električnog luka na izgled zavara.



Slika 2.4 Utjecaj napona električnog luka na izgled zavara[13]

2.1.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je brzina kojom se električni luk giba po liniji zavarivanja. Određuje se ovisno o jakosti struje i položaju u kojem se zavaruje. Kod nepovoljnih položaja zavarivanja brzina zavarivanja je manja, ali s uvjetom da se smanji i jakost struje zavarivanja. Brzina zavarivanja utječe na dubinu protaljivanja, širinu i nadvišenje zavara i na količinu unesene topline u osnovni materijal. Tako da s povećanjem brzine zavarivanja dubina protaljivanja se smanjuje kao i količina unesene topline u materijal, a zavar je uži s većim nadvišenjem čela zavara što se može vidjeti na slici 2.5. Kod smanjenja brzine zavarivanja dolazi do obrnutog procesa kod kojeg se dubina protaljivanja i količina unesene topline u materijal povećava, a oblik zavara je širi i s manjim nadvišenjem čela zavara što se može vidjeti na slici 2.6.[10,14]



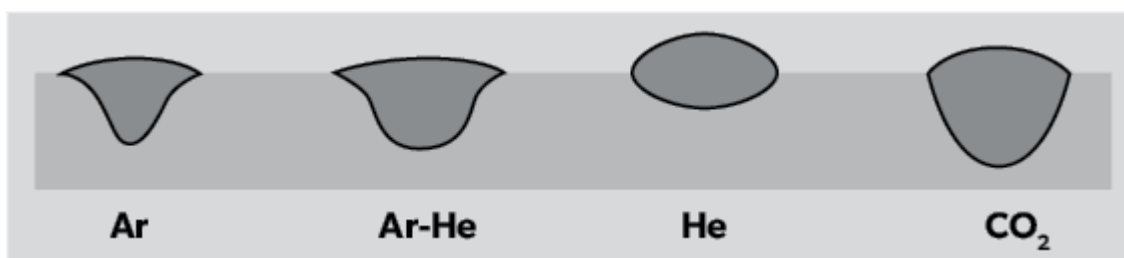
Slika 2.5 Prevelika brzina zavarivanja[15]



Slika 2.6 Premala brzina zavarivanja [15]

2.1.4. Vrsta i protok zaštitnog plina

Uloga zaštitnih plinova kod MIG/MAG postupka zavarivanja je da štiti područje zavarivanja od utjecaja plinova iz okolne atmosfere kako ne bi došlo do njihove reakcije s rastaljenim materijalom zavara. Reakcija plinova iz okolne atmosfere s rastaljenim materijalom zavara može uzrokovati greške u zavarenom spoju i smanjiti njegova mehanička svojstva. Osim same zaštite zavara od utjecaja plinova iz atmosfere, zaštitni plinovi utječu i na oblik zavara, na njegovu širinu i penetraciju što je prikazano na slici 2.7, brzinu zavarivanja i na stabilnost električnog luka.[14,16]



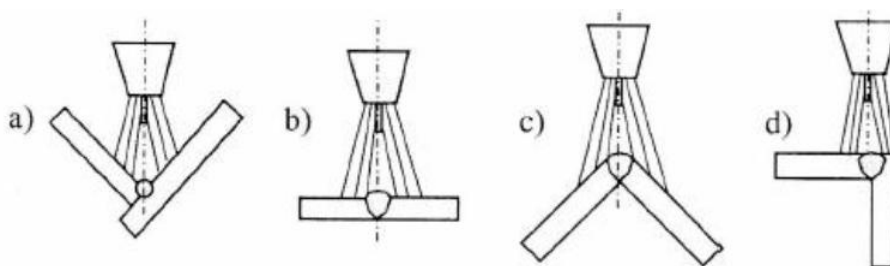
Slika 2.7 Utjecaj vrste zaštitnog plina na oblik zavara [17]

Osim odabira vrste zaštitnog plina na proces zavarivanja veliki utjecaj ima i njegov protok kroz crijevo od spremnika do mjesta zavarivanja. Utjecaj protoka zaštitnog plina ovisi o jačini struje, naponu električnog luka, promjeru žice, vrsti spoja, položaju i brzini zavarivanja, obliku i dimenzijama žlijeba.[10] U tablici 1 prikazana je ovisnost potrošnje zaštitnog plina o promjeru žice.

Tablica 1 Potrošnja zaštitnog plina ovisno o promjeru žice [7]

Promjer žice, mm	Potrošnja plina, l/min
0.8	od 6 do 8
1.0	od 8 do 10
1.2	od 10 do 12
1.6	od 14 do 16

Da bi se izbjegle greške u zavarenom spoju potrebno je pravilno odabrati vrstu zaštitnog plina i njegov protok. Pri određivanju protoka zaštitnih plinova treba voditi računa da količina zaštitnog plina nije premali ili prevelika. U slučaju premale količine protoka zaštitnih plinova dolazi do proboja plinova iz okolne atmosfere u zavar koja može izazvati poroznost u zavaru, a u slučaju prevelikog protoka zaštitnih plinova dolazi do većeg miješanja plinova i slabije zaštite zavara koja također može izazvati poroznost.[7] Potrošnja zaštitnih plinova značajno se povećava prilikom zavarivanja u otvorenim prostorima. Na slici 2.8 prikazan je utjecaj potrošnje plina ovisno o vrsti spoja. Potrošnja plina je manja kod zavarivanja kutnih spojeva u žlijebu (slika 2.8 a) nego kod sučeljenog spoja (slika 2.8 b) i kutnih spojeva (slika 2.8 c,d), dok je najveća potrošnja plina kod zavarivanja kutnog spoja s vanjske strane (slika 2.8. c).



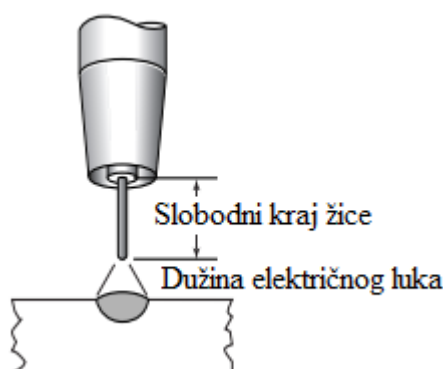
Slika 2.8 Utjecaj vrste spoja na potrošnju zaštitnog plina [7]

2.1.5. Induktivitet

Induktivitet kontrolira brzinu porasta struje nakon kratkog spoja. Njegovo podešavanje olakšava dodavanje ili smanjenje energije stanju kratkog spoja. Induktivitet ima utjecaj samo kod načina prijenosa materijala kratkim spojem. On ima ulogu u učestalom prijenosu kapljica pa se tako s povećanjem induktiviteta smanjuje učestalost prijenosa metala kratkim spojem i obratno. Primjena kontrole induktiviteta značajna je za većinu novih MIG/MAG izvora struje. Obično izvori struje mogu imati fiksno podešen induktivitet ili se on može mijenjati ovisno o izvedbi izvora struje. Izvori struje s fiksno podešenim induktivitetom imaju ugrađenu razinu induktiviteta koja je optimalno podešena, a izvori struje s promjenjivim induktivitetom kod njih se količina induktiviteta koja je primijenjena na električni luk može podesiti.[18]

2.1.6. Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice je dužina žice od izlaza iz kontaktne vodilice pa do početka električnog luka koja je prikazana na slici 2.9.



Slika 2.9 Dužina slobodnog kraja žice[18]

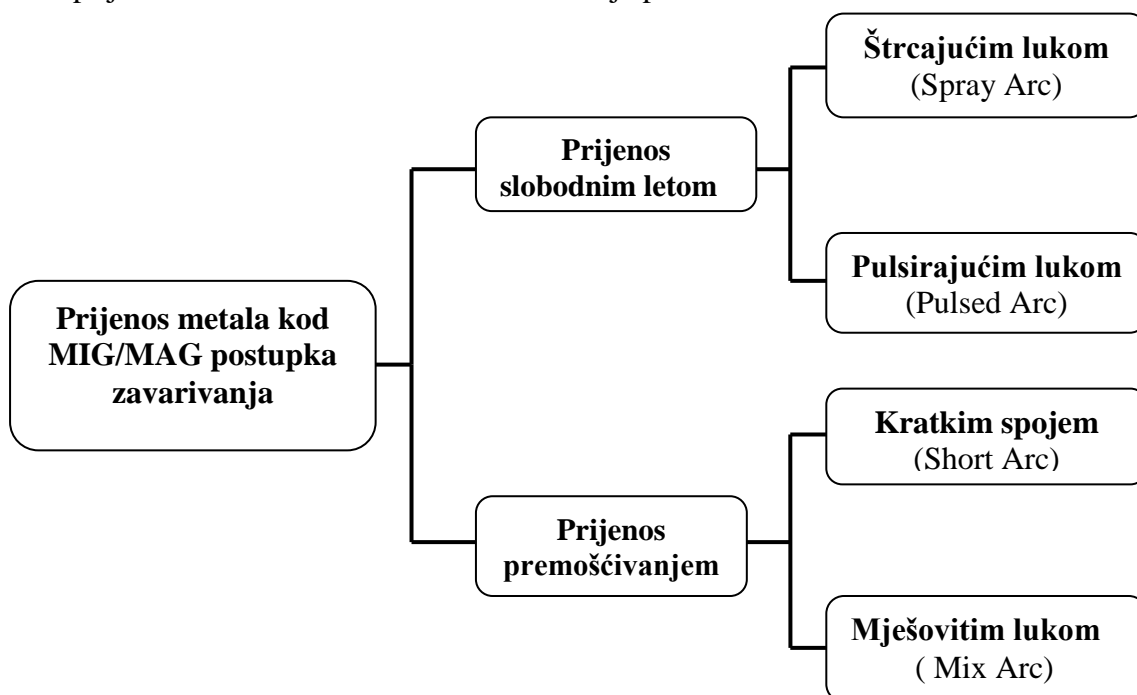
Slobodni kraj žice mora iznositi 13 puta promjer žice, a ne smije biti veći od 20 milimetara. Značajnija odstupanja od tih vrijednosti uzrokuju promjenu u odnosu napona električnog luka i struje zavarivanja. Ako je slobodni kraj žice veći dolazi do povećanja električnog otpora i povećanog zagrijavanja žice. Osim slobodnog kraja žice na kvalitetu zavarenog spoja utječe i udaljenost plinske sapnice od osnovnog materijala. Kako bi zaštita zavara bila što efikasnija od utjecaja vanjskih plinova udaljenost plinske sapnice mora biti što manja. Iz tog razloga potrebno je voditi računa da ta udaljenost nije premala jer u tom slučaju dolazi do onečišćenja plinske sapnice i mogućnosti pojave vrtloženja zaštitnog plina koje može dovesti do ulaska zraka.[7,10] U tablici 2 prikazane su vrijednosti udaljenosti slobodnog kraja žice i plinske sapnice.

Tablica 2 Duljina slobodnog kraja žice i razmak plinske sapnice od mjesta zavarivanja[7]

Jakost struje, A	Duljina slobodnog kraja žice, mm	Udaljenost plinske sapnice, mm
50	5	10
100	6	10
150	8	10
200	10	10
250	12	12
300	14	12
350	17	12
400	20	12

2.2. Prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanja

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja prijenos metala ostvaruje se na način da se rastaljene kapljice s vrha dodatnog materijala odnosno žice kroz električni luk prenose do radnog komada odnosno zavarenog spoja. Prijenos metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja može se odvijati slobodnim letom kapljica ili premošćivanjem na način da rastaljene kapljice materijala dođu u fizički kontakt s osnovnim materijalom pri čemu nastaje kratki spoj.[19] Načini na koje se može ostvariti prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanja prikazani su na slici 2.10.

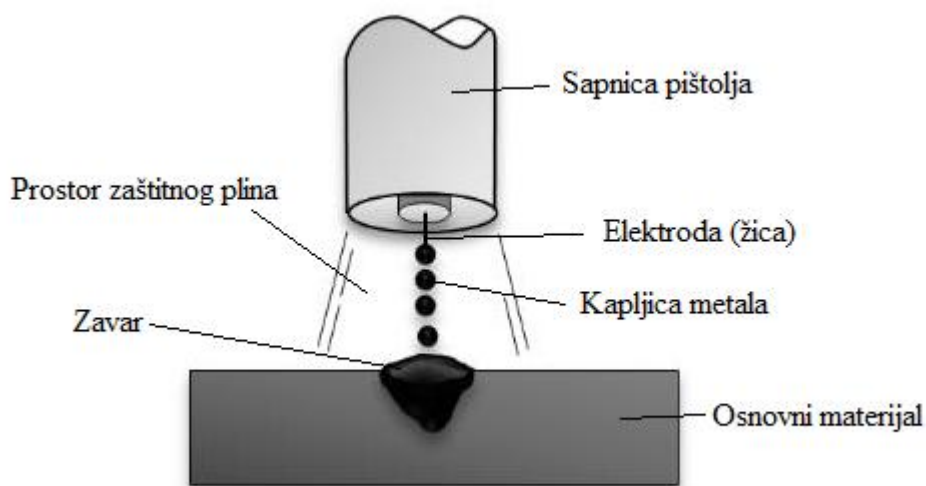


Slika 2.10 Mehanizmi prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja[19]

Na način prijenosa dodatnog materijala kod MIG/MAG zavarivanja utječu parametri jakost struje, napon, vrsta zaštitnog plina, dodatni materijal i polaritet.

2.2.1. Prijenos metala štrcajućim lukom

Kod prijenosa metala štrcajućim lukom prijenos metala ostvaruje se uz prisutnost jake struje zavarivanja i visokog napona električnog luka. Kod ovog načina, prijenos metala ostvaruje se slobodnim letom malih kapljica rastaljenog metala s vrha elektrode kroz atmosferu električnog luka, s tim da elektroda ni u jednom trenutku tijekom trajanja električnog luka ne dolazi u kontakt s osnovnim materijalom. Sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapljice rastaljenog metala i usmjeravaju ih prema radnom komadu. Kako bi se ostvario ovaj način prijenosa metala potrebna je velika količina energije koju je potrebno unijeti u proces zavarivanja. Povećanje energije ostvaruje se povećanjem jakosti struje koja daje veće zagrijavanje i povećanje "pinch efekta" te time smanjuje sile površinske napetosti, reaktivne sile koje nepovoljno utječu na odvajanje kapljice i njen prijenos. Na slici 2.11 prikazan je prijenos metala štrcajućim lukom. [7,19,20]



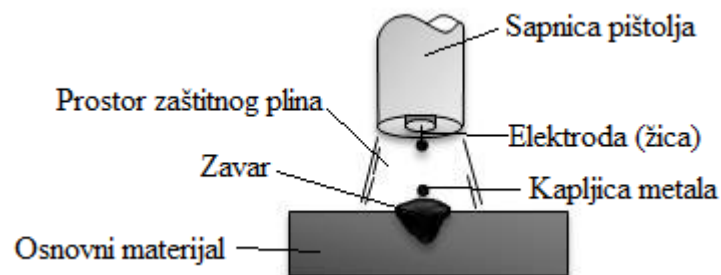
Slika 2.11 Prijenos metala štrcajućim lukom[19]

Prijenos metala štrcajućim lukom odvija se u plinskim mješavinama s maksimalnim udjelom aktivnih plinova do 18%. Također često se koriste i plinske mješavine s manjim postotkom drugih plinova primjerice kisikom kako bi se utjecalo na geometriju zavarenog spoja. Upotrebom kisika utječe se na dubinu penetracije. Penetracija je uža i dublja, dok je kod CO₂ penetracija blaža i zaobljena. Zbog velike toplinske energije oslobođene u štrcajućem električnom luku uzrokovane velikom strujom zavarivanja postiže se velika količina rastaljenog metala. Iz tog

razloga ovaj postupak pogodan za zavarivanje debljih materijala u položenom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnom položaju zbog opasnosti od cijedenja rastaljenog materijala, i zavarivanje tanjih materijala zbog opasnost od prokapljivanja.[19,20]

2.2.2. Prijenos metala pulsirajućim lukom

Prijenos metala pulsirajućim lukom je oblik prijenosa metala štrcajućim lukom s time da je kod ovog načina prijenosa metala prosječna vrijednost struje zavarivanja manja od minimalne vrijednosti struje kod prijenosa metala štrcajućim lukom. To se postiže na način da struja zavarivanja varira između neke minimalne i maksimalne vrijednosti. Minimalna vrijednost naziva se osnovna struja, a maksimalna vrijednost strujom impulsa. Pri tome osnovna struja ima ulogu da održava električni luk, dok struja impulsa ima ulogu da osigura prijenos metala bez uspostave kratkog spoja te da rastali dodatni materijal i osigura odvajanje po jedne kapi po svakom impulsu.[19,20] Na slici 2.12 prikazan je prijenos metala pulsirajućim lukom.

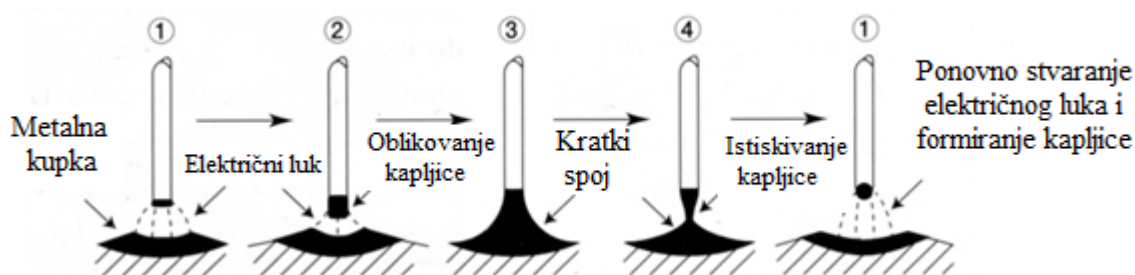


Slika 2.12 Prijenos metala pulsirajućim lukom [19]

Impulsi ovisno o načinu proizvodnje mogu biti sinusnog, trokutnog i četvrtastog oblika. Zbog povoljnijeg upravljanja procesom prijenosa metala koriste se impulsi četvrtastog oblika. Kod pulsirajućeg prijenosa metala podešavanje parametara je prilično složeno iz razloga jer je potrebno uskladiti veličinu osnovne struje, veličinu impulsne struje, trajanje impulsne struje, trajanje osnovne struje i dodavanje žice. Taj problem je riješen razvojem sinergijskih izvora koji za jednu izabranu veličinu biraju optimalnu kombinaciju ostalih parametara. U odnosu na prijenos metala štrcajućim lukom zbog manjeg unosa topline ovaj način pogodan je za zavarivanje tanjih materijala. Također moguća je primjena za zavarivanje u svim položajima, istim promjerom žice neovisno o njenoj debljini moguće je zavarivati različite debljine materijala. Tanje materijale moguće je zavarivati debljim žicama jer je moguće podesiti male prosječne struje koje su potrebne za njihovo zavarivanje. [20]

2.2.3. Prijenos metala kratkim spojem

Prijenos metala kratkim spojem odvija se uz male struje zavarivanja i niske napone električnog luka. Struja zavarivanja kreće se od 50 A do 170 A, a napon od 13 V do 21 V. Prijenos metala ostvaruje se kontinuiranim dovodenjem dodatnog materijala (pune ili praškom punjene žice) kroz pištolj, uz uvjet da dodatni materijal ostvari fizički kontakt s radnim komadom ili metalom zavara pri čemu nastaje kratki spoj. Prilikom uspostave kratkog spoja dolazi do eksponencijalnog porasta struje i pada napona na minimalnu vrijednost. Porast struje osigurava dovoljnu količinu energije za formiranje rastaljene kapljice na vrhu elektrode koja se prenosi na mjesto zavara. [7, 22] Sam proces prijenosa metala kratkim spojem prikazan je na slici 2.13.

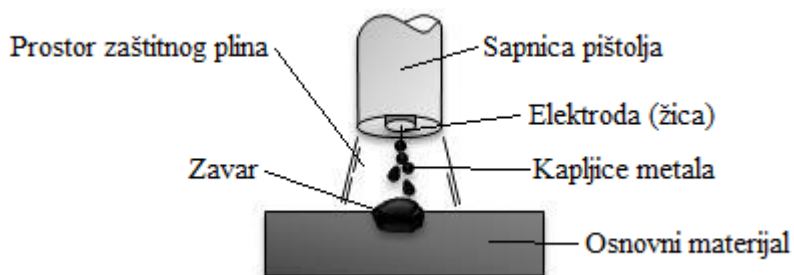


Slika 2.13 Prijenos metala kratkim spojem[21]

Zbog niskih vrijednosti struja zavarivanja ovaj postupak prijenosa metala karakterizira mali unos topline u materijal. Prijenos metala kratkim spojem najviše ovisi o promjeru žice, vrsti zaštitnih plinovima i osnovnim parametrima zavarivanja (struji, naponu, brzini žice). Ovisno o navedenim parametrima broj ciklusa odnosno proces formiranja i odvajanja kapljica kreće se od 20 do 200 puta u sekundi. Zbog malog unosa topline prilikom zavarivanja prijenos metala kratkim spojem pogodan je za zavarivanje tanjih materijala debljine od 0,6 do 5 milimetara. Kao dodatni materijal za zavarivanje mogu se koristiti žice promjera od 0,6 do 1,2 milimetara u zaštitnoj atmosferi s 100% CO₂ ili u mješavini 75-80% argona i 25-20% CO₂. [18,22]

2.2.4. Prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom je prijenos kod kojeg se krupne kapljice metala nastale na vrhu elektrode uz pomoć gravitacijske sile u električnom luku odvajaju i padaju u talinu. Kod ovog načina prijenosa prijenos se ostvaruje štrcajućim lukom i kratkim spojem s tim da je izmjena i redosljed mehanizama prijenosa nasumična pojava.[19,22] Na slici 2.14 prikazan je prijenos metala mješovitim lukom.



Slika 2.14 Prijenos metala mješovitim lukom [19]

Ovaj način prijenosa metala odvija se najčešće u zaštitnoj atmosferi CO₂ ili plinskih mješavina s velikim udjelom CO₂. Kao glavni nedostatak ovog prijenosa metala je neregularnost mehanizama prijenosa štrcajućim lukom i kratkim spojem koja dovodi do velike razlike u promjeru odvojenih kapljica i povećanog prskanja čime se dobiva izbrazdana i nepravilna površina zavara.[19]

2.3. Zaštitni plinovi za MIG/MAG zavarivanje

Kao što je rečeno u poglavlju 2.1.4. zaštitni plinovi kod MIG/MAG postupka zavarivanja imaju ulogu da zaštite mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala koje prolaze električnim lukom od utjecaja plinova iz okolne atmosfere. Da bi se postigla odgovarajuća zaštita zavarenog spoja kod MIG/MAG postupaka zavarivanja kao zaštita koriste se aktivni plinovi, inertni plinovi i njihove mješavine. Sam utjecaj zaštitnih plinova odražava se na električno-fizikalna svojstva električnog luka (geometriju električnog luka, oblik jezgre, potrebnu energiju za ionizaciju plinova), metalurške procese u talini zavara (oksidirajuće, reducirajuće, neutralne) i tehnološke parametre (dubina penetracije, širina zavara).[7] Odabir odgovarajućih zaštitnih plinova bitan je za ostvarivanje kvalitetnijeg zavarenog spoja te ovisi o vrsti osnovnog materijala koji se zavaruje, o predviđenom obliku prijenosa rastaljenog metala kroz električni luk, o željenom

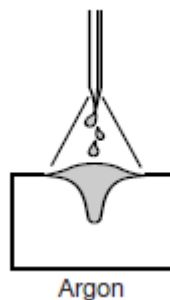
izgledu površine zavara i dr. [6] U sljedećim poglavljima bit će rečeno nešto više o pojedinim vrstama zaštitnih plinova i njihovim mješavinama koje se koriste kod MIG/MAG zavarivanja.

2.3.1. Inertni plinovi

Primjenom inertnih plinova kod zavarivanja ne dolazi do njihove reakcije s rastaljenim metalom. Ovi plinovi koriste se kod MIG postupka zavarivanja za zavarivanje metala koji su osjetljivi na utjecaj plinova iz atmosfere, a to su aluminij, bakar, njihove legure, CrNi čelici, titan i drugi. Najčešće korišteni inertni plinovi su argon, helij i njihove mješavine.

Argon (Ar)

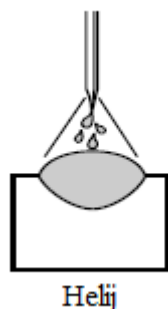
Argon je najčešće korišteni plin koji se koristi kao inertna zaštita kod zavarivanja. To je plin bez okusa, mirisa, boje i nije otrovan. Ima 40% veću gustoću od zraka te istiskuje zrak iz prostora i skuplja se na dnu prostorije te je iz tog razloga potrebno osigurati dobru ventilaciju prostora gdje se zavaruje. Ima nisku toplinsku vodljivost dok je njegova energija ionizacije niska i koja rezultira oblikom zavara u obliku "prsta", slika 2.15. [6,18]



Slika 2.15 Utjecaj argona kao zaštitnog plina na penetraciju zavara [18]

Helij (He)

Isto kao i argon, helij pripada skupini inertnih plinova koji se koriste kao zaštita kod zavarivanja. Obično se dodaje u plinske mješavine za zavarivanje nehrđajućeg čelika i aluminija. Helij ima visoku toplinsku vodljivost koja rezultira širokim profilom zavara uz manju penetraciju, slika 2.16.



Slika 2.16 Utjecaj helija kao zaštitnog plina na penetraciju zavora[18]

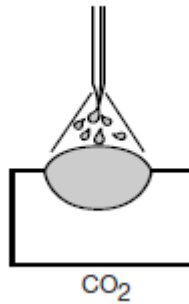
Mješavine helija i argona najčešće se koriste kod zavarivanja aluminija debljine veće od 25 mm.[18]

2.3.2. Aktivni plinovi

Aktivni plinovi su plinovi koji tijekom postupka zavarivanja uzrokuju reakcije s rastaljenim metalom. Neki od tih plinova koji se koriste za zaštitu prilikom zavarivanja su ugljični dioksid (CO_2), kisik (O_2), vodik (H_2).

Ugljični dioksid (CO_2)

Ugljični dioksid je aktivni plin bez boje, nadražujućeg mirisa i nije zapaljiv. Gušći je od zraka pa se zadržava pri dnu prostorije gdje se zavaruje. Iz tog razloga kao i kod zavarivanja s argonom potrebno je provjetravati prostore gdje se zavaruje. Za ostvarivanje kvalitetnog zavora čistoća CO_2 mora biti 99,8%. [6] Pri sobnoj temperaturi ugljični dioksid je inertan plin, ali pri visokim temperaturama iznad $1600\text{ }^\circ\text{C}$ koje su prisutne u električnom luku raspada se na ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik (O) koji reagira s rastaljenim metalom. Također može doći do ponovnog vezivanja elemenata u molekulu CO_2 čime se oslobađa toplina koja uzrokuje veće provarivanje. Štetno stvaranje oksida prilikom zavarivanja može se spriječiti legiranjem dodatnog materijala odnosno žice s dezoksidantima kao što su silicij (Si) i mangan (Mn). [6,7,20] Na slici 2.17 prikazan je utjecaj ugljičnog dioksida kao zaštitnog plina na oblik zavarenog spoja.



Slika 2.17 Utjecaj zaštitnog plina CO₂ na oblik zavora[18]

Kisik (O₂)

Kisik je jedan od aktivnih plinova koji se koristi kod zavarivanja kao manja komponenta u zaštitnim plinskim mješavinama. Kisik reagira s rastaljenim metalom i stvara okside. U malim količinama 1-5% u mješavini s argonom pruža dobru stabilnost luka i dobar izgled zavora. Kisik stvara metalne okside pri visokim temperaturama što nije poželjno kod zavarivanja. Međutim za stabilizaciju električnog luka potrebni su neki oksidirajući elementi.[18,23]

Vodik (H₂)

Vodik se u maloj količini oko 1-5% dodaje u mješavini s argonom kao zaštita pri zavarivanju nehrđajućeg čelika i legura nikla. Zbog veće toplinske vodljivosti vodika postiže se bolje kvašenje i omogućene su veće brzine zavarivanja.[18] Sam vodik je zapaljiv plin pa iz tog razloga njegov sadržaj u plinskim mješavinama koje ga sadrže ne smije biti veći od 5%. Kod austenitnih čelika velike količine vodika uzrokuju poroznost materijala. Često se vodik koristi u plinskim mješavinama s argonom i helijem i malim dodatkom CO₂ koji daje stabilnost električnom luku. Također vodik kemijski djeluje na smanjenje oksida i daje vrlo čistu površinu zavora.[23]

2.3.3. Mješavine plinova

Plinovi koji su navedeni u prethodnom poglavlju međusobnom kombinacijom svojih svojstava tvore plinske mješavine s boljim svojstvima za sam proces zavarivanja. Danas se najčešće koriste dvokomponentne i trokomponentne mješavine. Dvokomponentne mješavine su argon/helij, argon/CO₂ i argon/kisik.

Argon/Ugljični dioksid

Ova mješavina plinova najčešće se koristi kod zavarivanja ugljičnih čelika i može se upotrebljavati kod sva četiri načina prijenosa metala u električnom luku. Dodatak argona CO₂ smanjuje prskanje koje se javlja kod upotrebe čistog CO₂. Štrcajući prijenos metala električnim lukom zahtjeva da je sadržaj CO₂ u mješavini manji od 18%. Porastom sadržaja CO₂ povećava se unos topline i opasnost od izgaranja. Mješavine argona s sadržajem CO₂ do 18% podržavaju impulsni način prijenosa metala. Kod prijenosa metala kratkim spojem kod kojeg je manji unos topline mogu se koristiti mješavine s udjelom CO₂ jednakim ili većim od 20%. [18,24] U tablici 3 prikazane su mješavine argona i ugljičnog dioksida s udjelom pojedinih plinova i njihovim karakteristikama.

Tablica 3 Mješavine plinova argona i ugljičnog dioksida [18]

Plinska mješavina	Karakteristike
98% Ar+2% CO ₂	<ul style="list-style-type: none">- prijenos štrcajućim lukom- zavarivanje tankih limova velikim brzinama- izvrsna fluidnost taline i velike brzine zavarivanja
95% Ar+5% CO ₂	<ul style="list-style-type: none">- impulsni prijenos metala- viša fluidnost taline- pogodan za veće debljine materijala
90% Ar+10% CO ₂	<ul style="list-style-type: none">- kod štrcajućeg ili impulsnog prijenosa metala- šira penetracija i smanjenje dubine prstolikog Profila
82% Ar+18% CO ₂	<ul style="list-style-type: none">- zavarivanje širokog raspona debljina materijala- širok luk - poboljšanje profila penetracije duž zavara- primjena kod zavarivanja kratkim spojem ili STT zavarivanja
80% Ar+20% CO ₂	<ul style="list-style-type: none">- smanjuje prskanje- poboljšava izgled zavarenog spoja- primjena kod prijenosa metala kratkim spojem
75% Ar+25% CO ₂	<ul style="list-style-type: none">- poboljšava izgled zavarenog spoja- smanjuje prskanje- primjena kod prijenosa metala kratkim spojem

Argon/Helij

Mješavine argona i helija koriste se za zavarivanje legura na bazi nikla, aluminijske i bakra. Ovi plinovi korišteni u različitim kombinacijama povećavaju napon i toplinu električnog luka uz zadržavanje dobrih karakteristika argona. Mali postotak helija oko 10% utječe na luk i mehanička svojstva zavara. Povećanjem udjela helija povećava se napon luka, prskanje i penetracija dok se poroznost smanjuje. Udio argona u mješavini s helijem mora biti najmanje 20% kako bi se stvorio i održao stabilan štrcajući luk.[18,24] U tablici 4 prikazane su mješavine plinova argona i helija s udjelom pojedinih komponenti i njihovim karakteristikama.

Tablica 4 Mješavine plinova argon/helij [18,24]

Plinska mješavina	Karakteristike
75%Ar+25%He	-povećanje penetracije kod zavarivanja aluminijske, nikla i bakra - talina u kupci je fluidnija nego kod 100% argona
75%He+25%Ar	-veća toplinska vodljivost i fluidnost kupke -širi profil penetracije -zavarivanje aluminijske debljine veće od 25 mm

Argon/Kisik

Dodavanjem kisika argonu utječe se na stabilizaciju električnog luka, smanjenje prijelazne struje kod prijenosa metala štrcajućim lukom, poboljšanje oblika zavara i povećanje brzine zavarivanja. Ove mješavine pokazale su se dobrim pri zavarivanju velikim brzinama tankih materijala i najčešće se koriste pri zavarivanju nehrđajućih i ugljičnih čelika.[18,24] U tablici 5 prikazane su plinske mješavine argona i kisika s pojedinim udjelom komponenti i njihovim karakteristikama.

Tablica 5 Mješavine plinova argon/kisik [18]

Plinske mješavine	Karakteristike
99%Ar+1%O ₂	-zavarivanje nehrđajućeg čelika -poboljšani prijenos finih kapljica rastaljenog metala -stabilan luk -površina zavara je sive boje zbog oksidacije
98%Ar+2%O ₂	-zavarivanje ugljičnih i nehrđajućih čelika -zavarivanje tankih limova velikom brzinom -upotreba gdje se zahtijevaju dobra mehanička svojstva pri zavarivanju s dodatnim materijalom od niskolegiranih ugljičnih čelika
95%Ar+5%O ₂	-upotreba za opće konstrukcijske čelike -upotreba kod prijenosa metala štrcajućim lukom -povećava fluidnost taline i njezinu kontrolu -osnovni materijal mora imati nizak udio nečistoća

Trokomponentne mješavine zaštitnih plinova koriste se za zavarivanje ugljičnih čelika, nehrđajućih čelika i u ograničenim slučajevima za legure nikla. Kod prijenosa metala kratkim spojem kod zavarivanja ugljičnih čelika dodavanje 40% helija u mješavinu argona i ugljičnog dioksida kao treće komponente osigurava širi profil penetracije. Helij osigurava veću toplinsku vodljivost za prijenos metala kratkim spojem pri zavarivanju nehrđajućeg i ugljičnog čelika. Dodavanjem argonu 55 do 90% helija i 2,5% ugljičnog dioksida koristi se za prijenos metala kratkim spojem. Trokomponentne mješavine utječu na smanjenje prskanja, poboljšavaju fluidnost taline i omogućuju ravni oblik zavara.[18] Neke od trokomponentnih mješavina sa udjelom pojedinih komponenti i njihovim karakteristikama prikazane su u tablici 6.

Tablica 6 Trokomponentne mješavine zaštitnih plinova[18]

Smjesa plinova	Karakteristike
90%He+7,5%Ar+2,5%CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - prijenos metala kratkim spojem kod zavarivanja nehrđajućeg čelika - ravan oblik zavara zbog visoke toplinske vodljivosti helija - primjena za zavarivanje osnovnog materijala od nehrđajućeg čelika ili materijale na bazi nikla debljine od 1,6 mm impulsnim lukom - omogućuje velike brzine zavarivanja kod nehrđajućih čelika
55%He+42,5%Ar+2,5%CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - upotreba pri zavarivanju nehrđajućeg čelik i legura nikla kratkim spojem - niža koncentracija helija omogućava mu primjenu kod štrcajućeg luka
38%He+65%Ar+7%CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> - primjena kod zavarivanja niskolegiranih čelika kratkim spojem - primjena kod zavarivanja korijena zavara cijevi - visoka toplinska vodljivost proširuje profil penetracije
90%Ar+8%CO ₂ +2%O ₂	<ul style="list-style-type: none"> - visok udio argona smanjuje prskanje - primjena kod prijenosa metala kratkim spojem ili štrcajućim lukom kod zavarivanja ugljičnih čelika

2.4. Dodatni materijal za MIG/MAG zavarivanje

Dodatni materijal odnosno žica kod zavarivanja MIG/MAG postupkom se tali i zajedno s talinom osnovnog materijala čini zavareni spoj. Prema izvedbi žice mogu biti punog presjeka ili šuplje punjene praškom. Kod MIG/MAG postupka zavarivanja koriste se žice promjera 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6 i 2,4 mm s vrlo malim odstupanjem do najviše 0,05 mm koje su namotane u kolute. Da bi se dobio kvalitetniji zavareni spoj žice koje se koriste kod zavarivanja moraju zadovoljiti uvjete u pogledu kemijskog sastava, kvalitete površine i odmatanja s koluta tijekom zavarivanja.

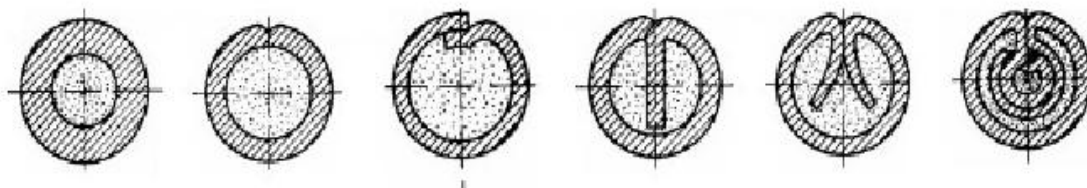
Kemijski sastav žice mora biti sličan kemijskom sastavu osnovnog materijala koji se zavaruje. Radi ostvarivanja boljeg električnog kontakta i zaštite površine žice od korozije, čelične pune žice su pobakrene ili niklirane. Prema kemijskom sastavu i namjeni pune žice za zavarivanje dijele se na one za zavarivanje čelik, aluminijska, bakra, nikla i njihovih legura.[6,7]

Praškom punjene žice izrađuju se od metalnih traka debljine do 0,5 mm koje se savijaju po duljini i pune rutilnim, bazičnim i metalnim praškom određenog sastava. Metalne trake izrađuju se od materijala koji je po kemijskim svojstvima i sastavu u skladu s osnovnim metalom.[6,7]

Prema udjelu punjenja praškom punjene žice se dijele na žice sa [25]:

- niskim udjelom punjenja <15% (nelegirane i niskolegirane žice za zavarivanje i navarivanje)
- srednjim udjelom punjenja 12 do 25% (visokolegirane žice za zavarivanje i navarivanje)
- visokim udjelom punjenja >25% (visokolegirane žice za navarivanje)

Ovisno o načinu proizvodnje praškom punjene žice mogu imati različite poprečne presjeke koji su prikazani na slici 2.18.



Slika 2.18 Oblici poprečnog presjeka praškom punjene žice [26]

Kod zavarivanja s praškom punjenom žicom zavarivanje se može provoditi sa ili bez zaštitnog plina što ovisi o karakteristikama praška kojim je punjena žica. Kod zavarivanja bez zaštitnog plina zaštitna atmosfera nastaje raspadanjem jezgre punjene žice. Žice punjene praškom pogodne su za tvrdo navarivanje jer prašak omogućuje legiranje navara. Također pogodne su za zavarivanje na terenu. U odnosu na žice punog presjeka kojima je moguće zavarivati u svim položajima s punjenim žicama moguće je zavarivati samo u vodoravnom i okomitom položaju.[7]

U tablici 7 prikazane su neke od žica za MIG/MAG zavarivanje proizvođača Elektroda Zagreb d.d. U tablici 7 uz svaku žicu navedena su njezina svojstva, primjena, zaštitni plinovi koji se koriste i kemijski sastav.

Tablica 7 Žice za MIG/MAG zavarivanje [27]

Naziv žice	Oznaka prema normi HRN EN ISO 14341-A	Područje primjene	Svojstva žice	Zaštitni plin	Kemijski sastav žice (%)			
					C	Mn	Si	Ostali
EZ-SG 2	G 42 4C/M 3Si1	nelegirani i niskolegirani čelik čvrstoće do 590 MPa	Pobakrena ili pobrončana žica	CO ₂ ili Ar/CO ₂	0,06-0,13	1,4-1,6	0,7-1,0	Cu ≤0,3
EZ-SG 3	G 46 4 C/M 4Si1	nelegirani i niskolegirani čelici čvrstoće do 640 MPa	Pobakrena ili pobrončana žica	CO ₂ ili Ar/CO ₂	0,08-1,8	1,6-1,8	0,9-1,1	Cu ≤0,3
EZ-SG Mo	G46 2 M 2 Mo	- nelegirani i niskolegirani čelik čija granica razvlačenja ne prelazi 590 MPa - konstrukcije, cijevi visokotlačnih posuda čija radna temperatura ne prelazi 500 °C	Pobakrena ili pobrončana žica legirana molibdenom	Ar/CO ₂	0,06-0,1	1,0-1,15	0,4-0,6	Mo 0,45-0,5
EZ-SG Ti	G42 2 C/M 2Ti	- ugljični i ugljičnomanganski čelici čvrstoće do 510 MPa - jednoprolazno zavarivanje pocinčanih, zaštićenih primerom i oksidiranih limova	Pobakrena ili pobrončana žica legirana Ti	CO ₂ ili Ar/CO ₂	0,04-0,06	1,1-1,5	0,5-0,08	Ti 0,1-0,12
EZ-SG CORTEN	G 42 2 C/M 0	- atmosferski postojani čelici (COR-TEN A, COR-TEN B) -nelegirani i niskolegirani čelici čvrstoće do 590 MPa	Pobakrena ili pobrončana žica legirana niklom i bakrom	CO ₂ ili Ar/CO ₂	0,06-0,10	1,4-1,5	0,7-0,9	Ni 0,5-0,8 Cu 0,3-0,5
EZ-MIG 307 Si	G 18 8 Mn	austenitni nehrđajući čelici, čelici slabe zavarljivosti, manganski čelici	Austenitna nehrđajuća puna žica za MIG/MAG zavarivanje	Ar+2,5%CO ₂ ili Ar+1 do 3% O ₂	≤0,07	6,9	0,7	Cr 18,5 Ni 8,0
EZ-MIG 308 LSi	G 19 9 L Si	stabilizirani i nestabilizirani 18/8 CrNi čelici	Austenitna nehrđajuća puna žica za MIG/MAG zavarivanje	Ar+2,5%CO ₂ ili Ar+1 do 3% O ₂	≤0,02	1,95	0,8	Cr 20,0 Ni 10,0
EZ-MIG 309 LSi	G 23 12 L Si	- zavarivanje raznorodnih spojeva -navarivanje sloja nehrđajućeg čelika na običan čelik	Austenitna nehrđajuća puna žica za MIG/MAG zavarivanje	Ar+2,5%CO ₂ ili Ar+1 do 3% O ₂	≤0,02	2,0	0,8	Cr 23,5 Ni 14,0
EZ-MIG 310	G 25 20	-visoko-temperaturni nehrđajući čelici izloženi tijekom eksploatacije temperaturama do 1200 °C	Austenitna nehrđajuća puna žica za MIG/MAG zavarivanje	Ar+2,5%CO ₂ ili Ar+1 do 3% O ₂	≤0,1	1,7	0,4	Cr 25,8 Ni 21,0

Nastavak tablice 7 Žice za MIG/MAG zavarivanje[27]

Naziv žice	Oznaka prema normi HRN EN ISO 14341-A	Područje primjene	Svojstva žice	Zaštitni plin	Kemijski sastav žice (%)			
					C	Mn	Si	Ostali
EZ-MIG Al 99,7	S Al 1070/Al 99,7	- zavarivanje aluminija sličnog kemijskog sastava	Aluminijska žica za MIG zavarivanje	Ar				Al > 99,7
EZ-MIG AlSi5	S Al 4043/AlSi5	-zavarivanje Al-Si i Al-Mg-Si legura	Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s 5% Si	Ar		0,01	5,0	Al (bal.) Fe 0,15 Zn 0,01
EZ-MIG AlMg3	S Al 5754/AlMg3	Al-Mg legura koje sadrže <3% Mg	Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s 3% Mg	Ar		0,2	0,05	Al (bal.) Mg 3,0 Cr 0,01 Fe 0,12
EZ-MIG AlMg4,5 Mn	S Al 5183/AlMg4,5Mn 0,7(A)	Al-Mg-Mn i AlMg legura	Aluminijska žica za MIG zavarivanje legirana s cca 4,8% Mg i 0,7% Mn	Ar		0,7	0,1	Al (bal.) Mg 4,8 Fe 0,2
EZ-MIG CuSi3	S Cu 6560 (CuSi3Mn1)	- zavarivanje bakra, niskolegiranog bakra, Cu-Zn legura i za njihovo spajanje s čelikom	Silicijem legirana bakrena žica	Ar		0,75-0,95	2,80-2,95	Cu (bal.) Sn ≤0,1
EZ-MIG CuSn6	S Cu 5180 (CuSn6P)	- zavarivanje legura bakra i kositra (bronca) -platiniranje sivog lijeva i čelika	Kositrom legirana bakrena žica	Ar				Cu (bal.) Sn 6,00-6,60 P 0,20-0,25 Ostalo (≤0,5)
EZ-MIG CuSn10	S Cu 5211 (CuSn10MnSi)	- platiniranje sivog lijeva -zavarivanje duboko vučenih limova	Kositrom i manganom legirana bakrena žica	Ar		0,20-0,35	0,20-0,30	Cu (bal.) Sn 9,0-10,0

3. Automatizacija MAG zavarivanja

S ciljem povećanja kvalitete proizvoda, produktivnosti a samim time i konkurentnosti na tržištu sve više proizvodnih firmi nastoji uvoditi nove tehnologije u svoje proizvodne procese. Jedna od tih tehnologija koja pomaže u ostvarivanju tih ciljeva je i automatizacija proizvodnje. Većina poslova u proizvodnji koje je čovjek izvodio ručno, a jedan od tih poslova je i zavarivanje, zamjenjuju se automatima. Prvi automati za zavarivanje bili su za zavarivanje pod praškom tipa Unionmelt i koristili su se u SAD-u oko 1930. godine najviše za zavarivanje brodova. Ti automati sastojali su se od kolica koja su mogla mijenjati brzinu kretanja odnosno zavarivanja i glave za zavarivanje koja je bila montirana na kolica. Žica za zavarivanje dovodila se je pomoću uređaja automatski od glave za zavarivanje do mjesta zavarivanja.[28]

U odnosu na ručne i poluautomatizirane postupke zavarivanja automatizacija zavarivanja omogućuje [29]:

- povećanje proizvodnosti (brzine zavarivanja i količine taljenja dodatnog materijala)
- smanjenje troškova i pojednostavljenje rada
- povećanje kvalitete zavarenog spoja (smanjenje grašaka)
- smanjenje deformacija
- lakše uvjete rada zavarivača.

Razvojem tehnologije automati za zavarivanje opremljeni su računalima, sensorima koji olakšavaju praćenje, bilježenje i upravljanje parametrima zavarivanja te time dolazi do povećanja kvalitete i smanjenja grašaka kod zavarenog spoja.

Vrste automata za MIG/MAG zavarivanje su:

- automati za linearno zavarivanje
- automati za kružno zavarivanje.

3.1. Automati za linearno zavarivanje

Kod ovih automata linearno kretanje odnosno zavarivanje postiže se kretanjem automata po vodilicama ili pomoću sustava za vođenje. Sustav za vođenje koriste automati koji se kreću samostalno pomoću kotača direktno po podlozi. Osim linearnog kretanja pištolja za zavarivanje u smjeru kretanja automata ovi automati imaju mogućnost dodatnog gibanja pištolja (njihanja) koje je omogućeno ugradnjom sustava za osciliranje. Ovisno o izvedbi oscilatora, pištolj za zavarivanje može izvoditi linearno ili radijalno njihanje. Kao izvor energije za napajanje automati mogu koristiti električnu energiju iz električne mreže ili iz baterija što ovisi o samoj izvedbi automata. U daljnjem nastavku ovog poglavlja opisani su neki od automata za linearno zavarivanje koji se danas mogu naći na tržištu.

Rail Runner

Rail Runner (slika 3.1) je automat za pravocrtno zavarivanje. Automat omogućuje zavarivanje u vodoravnom i okomitom položaju gibanjem po vodilici koja se magnetnim nogicama pričvršćuje na radni komad. Pogon automata izveden je pomoću pogonskog zupčanika koji se nalazi na automatu i zubne letve smještene na vodilici. Rail Runner automat dostupan je u dvije verzije:

- standardna verzija s integriranim linearnim oscilatorom
- osnovna verzija bez integriranog linearnog oscilatora.

Rail Runner automat ima automatsko paljenje luka koje je integrirano s prekidačem za pokretanje automata. Na višenamjenskom LED zaslonu koji je smješten na automatu moguće je izvršiti podešavanje svih parametara gibanja automata, a koji uključuju širinu njihanja pištolja, brzinu njihanja i brzinu gibanja automata. U tablici 8 navedene su neke od karakteristika Rail Runner automata za zavarivanje.[30]



Slika 3.1 Rail Runner automat za zavarivanje [30]

Tablica 8 Tehničke karakteristike Rail Runner automata za zavarivanje [30]

Napon		115-230 V / 50-60 Hz
Snaga		100 W
Pozicije zavarivanja	Horizontalno	PA (ravno), PB (horizontalno-vertikalno), PC (horizontalno)
	Vertikalno	PF (vertikalno gore), PG (vertikalno dolje)
Minimalni radijus zaobljenja radnog komada		5 m
Promjer drške pištolja		16-25 mm
Minimalna debljina materijala za zavarivanje		5 mm
Vučna sila	Horizontalnom radu	350 N
	Vertikalnom radu	150 N
Raspon podešavanja pištolja		35 mm, gore-dolje, lijevo-desno
Horizontalna brzina		0-120 cm/min
Vertikalna brzina		0-110 cm/min
Vrsta njihanja		Linearna
Hod ruke oscilatora		0-100 mm
Širina njihanja		0-50 mm
Brzina njihanja		0-1500 mm/min
Zadržka njihanja		0-5 s
Masa		20 kg

Trac Wheel Pro

Trac Wheel Pro je prijenosni i programabilni automat za zavarivanje tvrtke Lorch (slika 3.2). Omogućuje zavarivanje u horizontalnom i vertikalnom položaju. Pogodan je za izvođenje dugačkih zavara kod zavarivanja prikolica, željezničkih vozila, spremnika velikih dimenzija. Kretanje automata ostvaruje se pomoću četiri kotača. Uz pomoć permanentnog magneta koji je ugrađen u automat ostvaruje se bolje prijanjanje kotača na samu podlogu. Linearno kretanje automata ostvaruje se uz pomoć podesive ruke za vođenje koja je ugrađena na automat. Na automatu moguće je programiranje i pohranjivanje do 40 programa zavarivanja. Slobodno se mogu podesiti parametri kao što su ukupna duljina zavara, duljina zavara, udaljenost između zavara i ostali koji omogućuju fleksibilno definiranje redoslijeda zavarivanja.[31] Neke od tehničkih karakteristika Trac Wheel Pro automata navedene su u tablici 9.



Slika 3.2 Trac Wheel Pro automata za zavarivanje [31]

Tablica 9 Tehničke karakteristike Trac Wheel Pro automata za zavarivanje [31]

Napon		230/115 V
Snaga		25 W
Pozicije zavarivanja	Horizontalno	PA, PB, PC
	Vertikalno	PF
Minimalna debljina materijala za zavarivanje		5 mm
Vučna sila	Horizontalnom radu	220 N
	Vertikalnom radu	150 N
Raspon podešavanja pištolja (X/Y)		35 /35 mm
Horizontalna brzina		0-120 cm/min
Vertikalna brzina		0-110 cm/min
Masa		14 kg

ArcRover 22

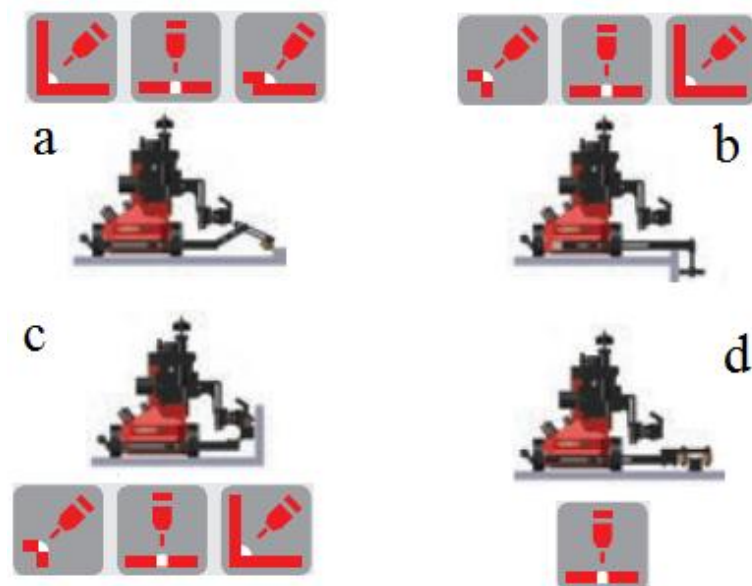
ArcRover 22 je automat za linearno zavarivanje MIG/MAG postupkom proizvođača Fronius (slika 3.3). Automat se kreće pomoću četiri kotača koja ostvaruju optimalno prljanje i vuču pomoću permanentnog magneta koji je ugrađen u automat. ArcRover 22 može se koristiti za zavarivanje u horizontalnom i vertikalnom položaju. Kao izvor struje za pogon automata koriste se zamjenjive Li-Ion baterije. Za zavarivanje koristi se standardni pištolj koji se stavlja u nosač pištolja koji se nalazi na automatu. Kako bi se ostvarilo linearno vođenje automata u smjeru zvara automat koristi različite sustave za vođenje: ruka za vođenje po rubu (slika 3.4 a), ruka za vođenje po boku (slika 3.4b), ruka za vođenje sa magnetom (slika 3.4c), ruka za vođenje sa vodilicom (slika 3.4d).[32] U tablici 10 nalaze se karakteristike ArcRover 22 automata za zavarivanje.



Slika 3.3 ArcRover automat za zavarivanje [32]

Tablica 10 Karakteristike ArcRover 22 automata za zavarivanje [32]

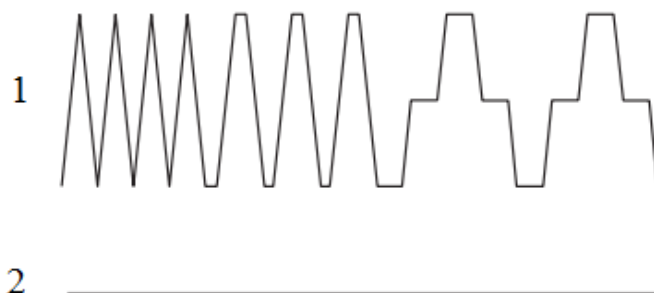
Napon Li-Ion baterije	25,4 V DC	
Potrošnja energije	49 W	
Napon napajanja jedinice za punjenje baterije (50 - 60 Hz)	110-230 V	
Vrijeme punjenja Li-ion baterije	2 h	
Pozicije zavarivanja horizontalno/vertikalno	PA, PB, PC/PF, PG	
Promjer drške pištolja	Max. 28 mm	
Vučna sila	Horizontalnom radu	230 N
	Vertikalnom radu	110 N
Podesivi hod pištolja (horizontalno/vertikalno)	30 mm/ 30 mm	
Horizontalna brzina	5-200 cm/min	
Vertikalna brzina	5-200 cm/min	
Udaljenost od podloge	6 mm	
Minimalno vrijeme trajanja baterije sa normalnom upotrebom i bez oscilatora	4 h	
Minimalno vrijeme trajanja baterije sa normalnom upotrebom i oscilatorom	2 h	
Masa	10,7 kg	
Maksimalna nosivost	22 kg	



Slika 3.4 Sustav za vođenje ArcRover 22 automata za zavarivanje [32]

Rail Bull

Rail Bull je automat za linearno zavarivanje proizvođača Promotech. Ovaj automat može zavarivati ravne i kutne zavare sa ili bez osciliranja koristeći pištolje za MIG/MAG postupak zavarivanja. Upotrebom oscilatora omogućeno je njihanje pištolj za zavarivanje u obliku trokuta ili trapeza što je prikazano na slici 3.5.[33]



Slika 3.5 Izgled zavora obzirom na njihanje pištolja (1-trokutni i trapezni uzorak, 2-bez oscilacija) [33]

Promjeri drške pištolja za zavarivanje koji se mogu pričvrstiti na automat kreću se od 16 do 25 mm. Rail Bull automat za zavarivanje omogućuje zavarivanje u horizontalnom i vertikalnom položaju. Rail Bull automat kreće se duž krute ili polufleksibilne vodilice koja se na ravne ili zakrivljene površine s minimalnim polumjerom zakrivljenosti od 5 m pričvršćuje magnetnim ili vakumskim nogicama. Gibanje automata po vodilici izvedeno je preko zubne letve koja se nalazi na vodilici i zupčanika smještenog na automatu. Ovaj automat pogodan je za primjenu kod

zavarivanja prikolica, kamionskih spremnika, spremnika za naftu, spremnika za vodu, posuda pod pritiskom, brodova, stupova, nosača mostova i svih drugih proizvoda koji zahtijevaju duge kontinuirane zavare.[33] Na slici 3.6 prikazan je Rail Bull automat za zavarivanje sa svojim dijelovima.



Slika 3.6 Rail Bull automat za zavarivanje [33]

U tablici 11 prikazane su tehničke karakteristike Rail Bull automata za zavarivanje.

Tablica 11 Tehničke karakteristike Rail Bull automata za zavarivanje [34]

Napon		115-230 V / 50-60 Hz
Snaga		100 W
Pozicije zavarivanja	Horizontalno	PA (ravno), PB (horizontalno-vertikalno), PC (horizontalno)
	Vertikalno	PF (vertikalno gore), PG (vertikalno dolje)
Minimalni radijus zaobljenja radnog komada		5 m
Tip pištolja		MIG/MAG
Promjer drške pištolja		16-25 mm
Minimalna debljina materijala za zavarivanje		5 mm
Vučna sila	Horizontalnom radu	350 N
	Vertikalnom radu	150 N
Raspon podešavanja pištolja		35 mm, gore-dolje, lijevo-desno
Horizontalna brzina		0-120 cm/min
Vertikalna brzina		0-110 cm/min
Vrsta njihanja		Linearna
Oblik njihanja		Trapez, trokut, ravna linija
Hod ruke oscilatora		0-100 mm
Širina njihanja		0-50 mm
Brzina njihanja		0-1500 mm/min
Zadržka njihanja		0-5 s
Maksimalna sila njihanja		100 N
Najveća dopuštena temperatura okoline		50 °C
Maksimalna dopuštena vlažnost okoline		85 %
Masa		20 kg

WA 1000/WA 1500

WA 1000/ WA 1500 je portalni automat za linearno zavarivanje proizvođača Promotech (slika 3.7). Ovaj automat namijenjen je za zavarivanje dijelova većih dimenzija kao što su profili ili dugačka kućišta (slika 3.8). Automat omogućuje zavarivanje čeonih i kutnih spojeva u jednom ili više prolaza. Također pomoću dvije vertikalne ruke na kojima se nalaze pištolji za zavarivanje, a koje su smještene na glavnu horizontalnu gredu ovim automatom moguće je istovremeno zavarivati sa dvije strane. Linearno gibanje automata izvedeno je vodilicama koje su učvršćene na pod.[35] Ostale tehničke karakteristike WA 1000/WA 1500 automata za zavarivanje nalaze se u tablici 12.



Slika 3.7 WA 1000 automat za zavarivanje [35]

Tablica 12 Tehničke karakteristike WA 1000/ WA 1500 automata za zavarivanje [35]

Duljina vodilice/ duljina zavarivanja	13 m/ 12 m 16 m/ 15 m 19 m/ 18 m
Maksimalna visina obratka WA 1000/ WA 1500	1 m/ 1,5 m
Maksimalna brzina zavarivanja	1 m/min



Slika 3.8 Primjena WA 1000/ WA 1500 automata za zavarivanje[35]

3.2. Automati za kružno zavarivanje

Ovisno o izvedbi, ovi automati mogu obavljati zavarivanje gibanjem oko radnog komada ili rotacijom radnog komada sa statički postavljenim pištoljem za zavarivanje. Kod automata koji se kreću oko radnog komada kružno gibanje omogućeno je postavljanjem vodilica oko radnog komada ili pričvršćivanjem automata za unutrašnjost radnog komada čeljustima oko kojih automat rotira. Automati kod kojih pištolj za zavarivanje miruje, a radni komad rotira kružno gibanje radnog komada postiže se pomoću okretnih naprava. U nastavku ovog poglavlja opisani su neki od automata za kružno zavarivanje.

FTW PRO

FTW PRO je automat za kružno zavarivanje MIG/MAG postupkom (slika 3.9). Idealan je za primjenu gdje se traži ušteda vremena, optimalna kvaliteta i točna ponovljivost zavara. Jedna od tih primjena je zavarivanje spojeva cijev-ploča kod izmjenjivača topline ili hladnjaka. Automat se pričvršćuje za unutrašnjost cijevi koja se zavaruje pomoću steznih čeljusti u tri točke. Unutarnji promjeri cijevi odnosno rasponi čeljusti za pričvršćivanje automata kreću se od 30 do 120 milimetara. Točno pozicioniranje pištolja za zavarivanje osigurava se pomoću nosača u tri točke koji se nakon pričvršćivanja automata za cijev odmiče kako bi omogućio rotiranje automata. Zavarivanje se vrši rotiranjem pištolja oko radnog komada odnosno cijevi.[36]



Slika 3.9 FTW PRO automat za zavarivanje [36]

Flextrack 45 Pro

Flextrack 45 Pro je automat koji se koristiti za linearno i kružno zavarivanje (slika 3.10). Automat se kreće po fleksibilnim ili krutim vodilicama koje se pričvršćuju na podlogu magnetnim ili vakumskim nogicama. Zbog svojih karakteristika Flextrack 45 Pro pogodan je za zavarivanje u industrijama gdje se geometrija površine razlikuje kao što je u brodogradnji ili izradi kontejnera. Također zbog fleksibilnosti vodilica koje se mogu prilagođavati širokom rasponu promjera cijevi, Flextrack 45 Pro automat omogućuje zavarivanje cijevi s vanjske i unutarnje strane.[37] Neke od važnih karakteristika Flextrack 45 Pro automata za zavarivanje su [37]:

- fleksibilnost za kružno i linearno zavarivanje
- povećana produktivnost
- poboljšana kvaliteta zavara
- manji troškovi zavarivanja.

Upravljanje radom automata i podešavanje potrebnih parametara zavarivanja vrši se pomoću daljinskog kontrolera. Daljinski kontroler omogućuje operateru da s određene udaljenosti prati sam proces zavarivanja i upravlja parametrima zavarivanja što je pogodno u slučajevima kada operater zbog određenih sigurnosnih razloga ne može pristupiti mjestu zavarivanja.[37] Parametri zavarivanja kojima se može upravljati s kontrolerom su:

- način zavarivanja
- smjer zavarivanja
- brzina zavarivanja
- popunjavanje na kraju zavara
- način osciliranja, brzina osciliranja, put osciliranja, vrijeme držanja
- odabir segmentnog kružnog ili linearnog zavarivanja.[37]



Slika 3.10 Flextrack 45 Pro automat za zavarivanje [37]

4. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni dio rada odrađen je u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu. Cilj eksperimentalnog dijela rada je utvrditi kako promjena parametara zavarivanja (jačina struje, brzina zavarivanja, brzina žice) utječe na geometriju zavara kod automatiziranog MAG postupka zavarivanja općeg konstrukcijskog čelika u kutnom obliku spoja.

4.1. Osnovni materijali korišteni u eksperimentu

Osnovni materijali koji su korišteni u eksperimentu su limovi dimenzija 380 x 80 mm i debljine 5 mm od čelika oznake S355J2+N. Ova oznaka čelika označava da se radi o općem konstrukcijskom čeliku minimalne granice razvlačenja 355 MPa, udarnog rada loma od 27 J ispitivanog pri temperaturi od -20 °C i isporučen u normaliziranom stanju.

Osim limova za eksperiment korištena je bešavna toplo valjana cijev promjera 70 mm debljine stjenke 5 mm i dužine 342 mm od općeg konstrukcijskog čelika oznake S355J2H.

4.2. Oprema za zavarivanje

4.2.1. Izvor struje

Kao izvor struje za automatizirano MAG zavarivanje korišten je uređaj Varmig 230 proizvođača Varstroj (slika 4.1). Karakteristike ovog uređaja navedene su u tablici 13. Na samom uređaju tijekom zavarivanja mijenjali su se parametri jakost struje zavarivanja i brzina žice.



Slika 4.1 VARMIG 230 Supermig uređaj proizvođača Varstroj, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 07.04.2022.

Tablica 13 Tehničke karakteristike VARMIG 230 Supermig uređaja [38]

Priključni napon	3~400 V/ 50 Hz
Osigurač (spor)	16 A
Područje zavarivanja	15 – 230 A
Napon zavarivanja	14,8 – 25,5 V
Intermitencija	60% - 170 A
	100% - 135 A
Promjer žice za zavarivanje	0,6 – 1,2 mm
Tip pištolja	PAG 250/3 – K3 G
Masa	65 kg
Dimenzije (mm)	780 x 310 x 600

4.2.2. Zaštitni plin

Zaštitni plin koji je korišten za izvođenje eksperimenta je mješavina 18% CO₂ i 82% Ar i njegov protok tijekom izvođenja eksperimenta iznosio je 10,5 l/min. Trgovački naziv ove mješavine plinova je FERROMIX C 18 proizvođača Messer.

4.2.3. Dodatni materijal

Dodatni materijal koji je korišten u eksperimentu je pobakrena žica punog presjeka promjera 1,2 mm proizvođača "Sij elektrode" trgovačkog naziva VAC 60 i oznake G 3Si1. Oznaka G označava postupak zavarivanja, u ovom slučaju radi se o elektrolučnom zavarivanju u zaštitnoj atmosferi plinova (MIG/MAG). Oznaka 3Si1 označava kemijski sastav žice. U tablici 14 prikazan je kemijski sastav žice za zavarivanje.

Tablica 14 Kemijski sastav dodatnog materijala [39]

Oznaka	Kemijski sastav %				
	C	Si	Mn	P	S
G 3Si1	0,08	0,90	1,50	<0,025	<0,025

4.2.4. Automat za zavarivanje

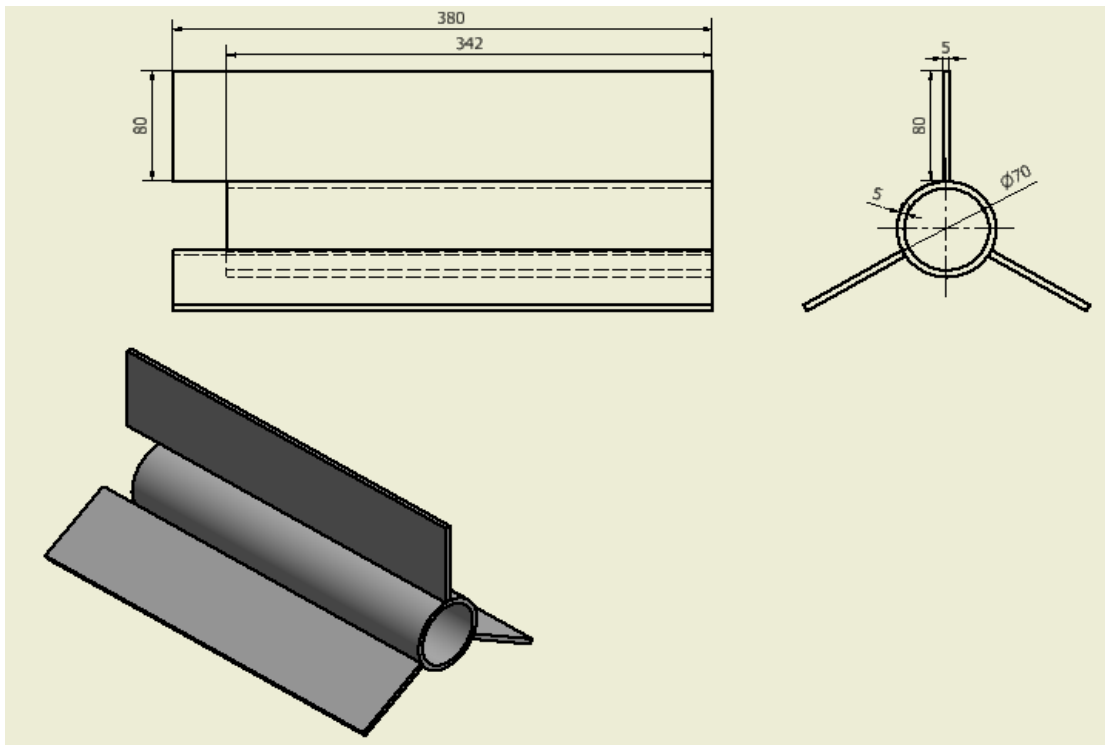
Proces zavarivanja izvodio se je pomoću automata za zavarivanje Rail Bull proizvođača Promotech. Na slici 4.2 prikazan je uređaj i kontrolna ploča na kojoj se je upravljalo radom automata i određivala brzina zavarivanja. Tehničke karakteristike Rail Bull automata nalaze se u poglavlju 3.1. Pomoću ovog automata omogućeno je automatsko vođenje pištolja za zavarivanje konstantnom brzinom zavarivanja te namještanje pištolja u odgovarajući položaj. Pištolj je namješten tako da je udaljenost kontaktne vodilice od radnog komada iznosila 10 mm, a nagib pištolja 10°.



Slika 4.2 Automat za zavarivanje Rail Bull proizvođača Promotech, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 07.04.2022.

4.3. Postupak provođenja eksperimenta

Kako bi se postigla što bolja kvaliteta zavarenog spoja prije samog početka zavarivanja potrebno je bilo pripremiti mjesta na površini metala koja će se zavarivati. Mjesta spoja cijevi i limova brušena su do metalnog sjaja kako bi se zavarivalo na metal a ne na patinu. Zavarivanje limova na cijev provedeno je prema slici 4.3. Kako ne bi došlo do pomicanja limova tijekom zavarivanja limovi su pripojeni uz cijev MAG postupkom (slika 4.4).



Slika 4.3 Skica pripremljenog spoja



Slika 4.4 Pripremljeni spoj za automatizirano MAG zavarivanje, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 07.04.2022.

Nakon završetka pripreme i stezanja cijevi s limovima na stol za zavarivanje krenulo se je sa zavarivanjem. Svaki lim zavarivao se je s dvije strane na način da je sa svake strane izveden jedan zavar po cijeloj dužini spoja. Nakon svakog prolaza radni komad se je ostavio da se hladi na zraku kako bi se zavarivanje svih spojeva izvodilo na temperaturi ispod 50 °C. Za svaki lim mijenjali su se parametri zavarivanja koji su prikazani u tablici 15. Zavarivanje limova na cijev je izvedeno lijevom tehnikom rada u ravnom položaju zavarivanja (PA). Nakon završetka

zavarivanja radni komad je ostavljen da se hladi na zraku. Nakon hlađenja zavareni spojevi su očišćeni i obavljena je kontrola zavara penetrantima, izmjerena je visina zavara i provedena je makroanaliza zavara.

4.4. Parametri korišteni pri zavarivanju

Nepromjenjivi parametri koji su korišteni tijekom izvođenja eksperimenta su:

- vrsta zaštitnog plina – mješavina plinova 18% CO₂ i 82% Ar
- protok zaštitnog plina- 10,5 l/min
- udaljenost kontaktne sapnice od radnog komada – 10 mm
- intermitencija - 135 A
- kut nagiba pištolja - 10°

Promjenjivi parametri koji su se mijenjali tijekom izvođenja eksperimenta su:

- unos topline na mjesto zavara, pri čemu su promjenjivi parametri bili jakost struje i brzina zavarivanja. Unos topline izračunava se prema formuli:

$$Q = \frac{U \times I \times 60 \times k}{v_{zavarivanja} \times 1000} \quad (2)$$

gdje je

Q - unos topline, kJ/mm

U - napon zavarivanja, V

I - jakost struje zavarivanja, A

k - koeficijent toplinske iskoristivosti postupka zavarivanja ($k= 0,8$ za MAG)

$v_{zavarivanja}$ - brzina zavarivanja, mm/min

Kao bi se izračunao unos topline na mjestu zavara potrebno je prethodno izračunati napon zavarivanja koji se za MAG postupak izračunava prema formuli:

$$U = 20 + 0,04 \times I \quad (3)$$

Također parametar koji se je mijenjao tijekom izvođenja eksperimenta je i brzina žice. Parametri koji su korišteni za zavarivanja svakog uzorka te izračun napona zavarivanja i unosa topline za svaki zavar prikazani su u tablici 15.

Tablica 15 Parametri zavarivanja uzoraka

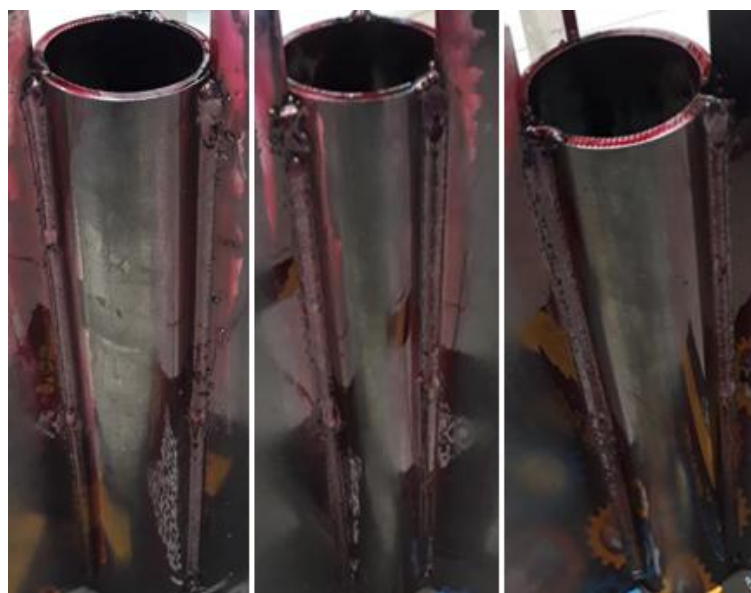
Uzorak	Brzina žice v_z , m/min	Brzina zavarivanja $v_{zavarivanja}$, cm/min	Jakost struje zavarivanja I , A	Napon zavarivanja U , V	Unos topline Q , kJ/mm
1	6,56	38	150	26	0,49
2	3,64	38	150	26	0,49
3	3,64	32	115	24,6	0,42

4.5. Kontrola zavara penetrantima

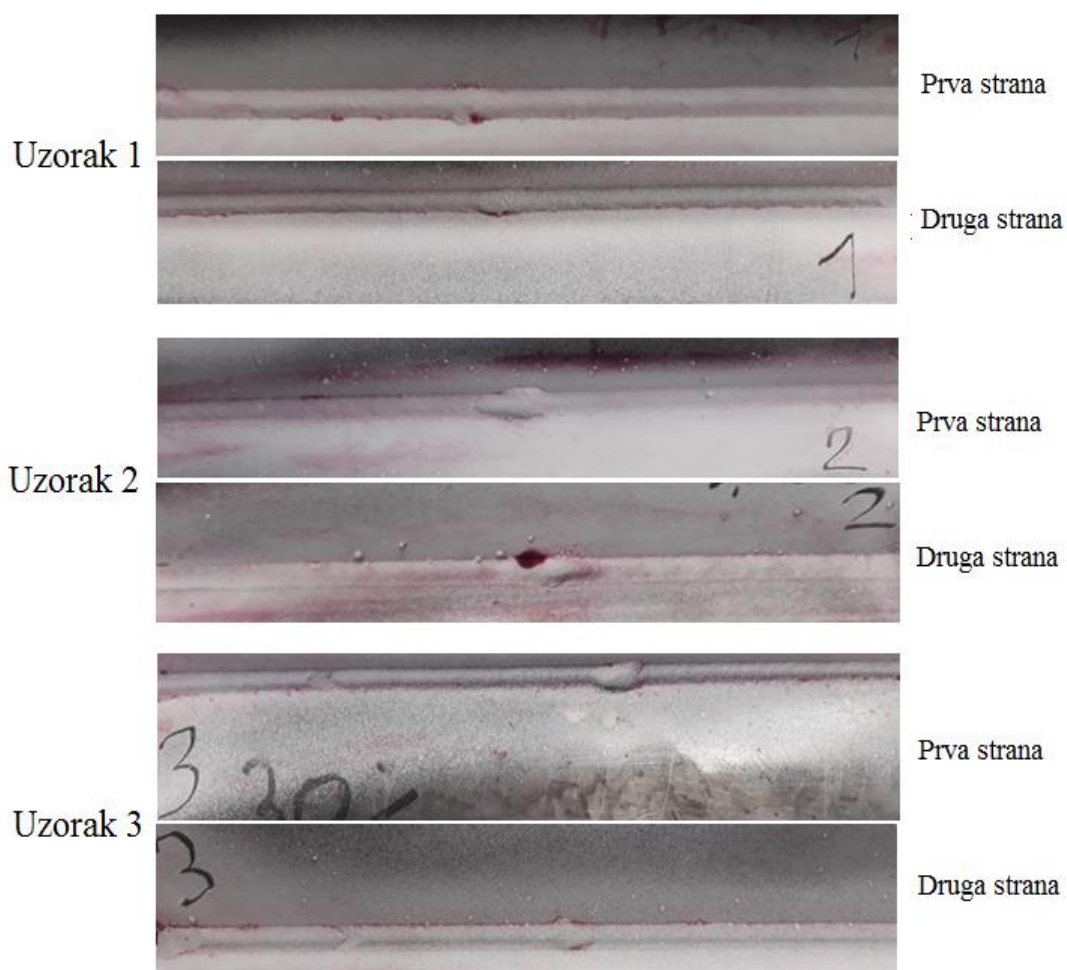
Prije same pripreme uzoraka za makroanalizu provedeno je ispitivanje zavara penetrantima kao bi se utvrdilo da li postoji prisutnost površinskih nepravilnosti. Ova metoda ispitivanja koristi se kao nerazorna metoda ispitivanja zavara. Prije samog nanošenja penetranta na površinu zavara, površina zavara je očetkana i očišćena sredstvom za čišćenje metala "Metaclean" (slika 4.5 a). Nakon čišćenja uslijedilo je nanošenje penetranta "Pentrix" crvene boje na površinu zavara (slika 4.5 b). Penetrant se nanosio na površinu zavara u jednom prolazu i ostavio da se suši 10 minuta. Na slici 4.6 prikazani su zavari na koje je nanesen penetrant. Nakon sušenja penetranta u trajanju od 10 minuta, penetrant je uklonjen sa zavara pomoću vode te je radni komad ostavljen nekoliko minuta da se osuši. Kako bi utvrdili da li postoje površinske nepravilnosti u zavaru na površinu zavara je u jednom prolazu nanesen razvijlač "Rivelex" bijele boje (slika 4.5 c). Ako u zavaru postoje površinske nepravilnosti na tim mjestima razvijlač će poprimiti crvenu boju. Na slici 4.7 prikazani su zavari na koje je nanesen razvijlač.



Slika 4.5 Sredstva za provođenje ispitivanja zavara penetrantom (a- sredstvo za čišćenje metala, b- penetrant crvene boje, c- razvijlač bijele boje), slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 08.04.2022.



Slika 4.6 Slika zavora nakon nanošenja penetranta, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 08.04.2022.



Slika 4.7 Zavari nakon nanošenja razvijaja, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 08.04.2022.

4.6. Mjerenje visine zavora

Mjerenje visine zavora na zavarenim uzorcima provedeno je pomoću mjerila za mjerenje visine zavora (slika 4.8). Mjerenje je provedeno na način da je baza mjerila na kojoj se nalazi skala za mjerenje postavljena okomito na lim i zavar. Baza mjerila udaljena je od zavora tako da vrh pomičnog ticala dodiruje rub zavora na cijevi (slika 4.9). Pomak ticala na skali označava visinu zavora. U tablici 16 nalaze se izmjerene vrijednosti visina zavora na uzorcima.



Slika 4.8 Mjerilo za mjerenje visine zavora, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 14.04.2022.



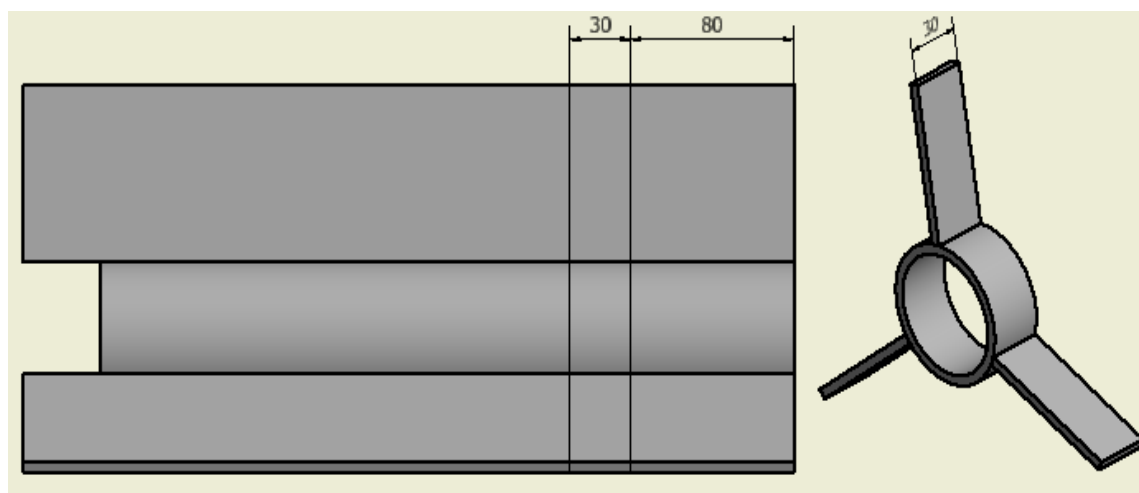
Slika 4.9 Mjerenje visine zavora, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 14.04.2022.

Tablica 16 Izmjerene visine zavora na uzorcima

Uzorak	Visina zavora z , mm
1	4
2	5
3	4

4.7. Analiza geometrije zavarenih spojeva

Kako bi analizirali geometriju zavora makroanalizom iz zavarenog radnog komada na tračnoj pili izrezan je uzorak na udaljenosti 80 mm od početka radnog komada duljine 30 mm. (slika 4.10 i slika 4.11). Uzorak je uzet na tom dijelu radnog komada iz razloga jer na tom dijelu nije izvršeno pripajanje limova uz cijev prije automatiziranog MAG zavarivanja. Taj uzorak izrezan je na manje segmente koji su dalje podvrgnuti daljnjoj obradi.



Slika 4.10 Skica rezanja uzorka za makroanalizu



Slika 4.11 Izrezan uzorak za makroanalizu, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 08.04.2022.

4.7.1. Brušenje uzoraka

Brušenje uzoraka za makroanalizu izvedeno je na uređaju za brušenje i poliranje Forcipol 1V proizvođača Metkon (slika 4.12). Brušenje uzoraka provedeno je uz ispiranje vodom sa brusnim papirima granulacije P120, P240, P320, P800 i P1000. Na slici 4.13 prikazani su uzorci nakon brušenja.



Slika 4.12 Uređaj za brušenje i poliranje Forcipol 1V proizvođača Metkon, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 14.04.2022.



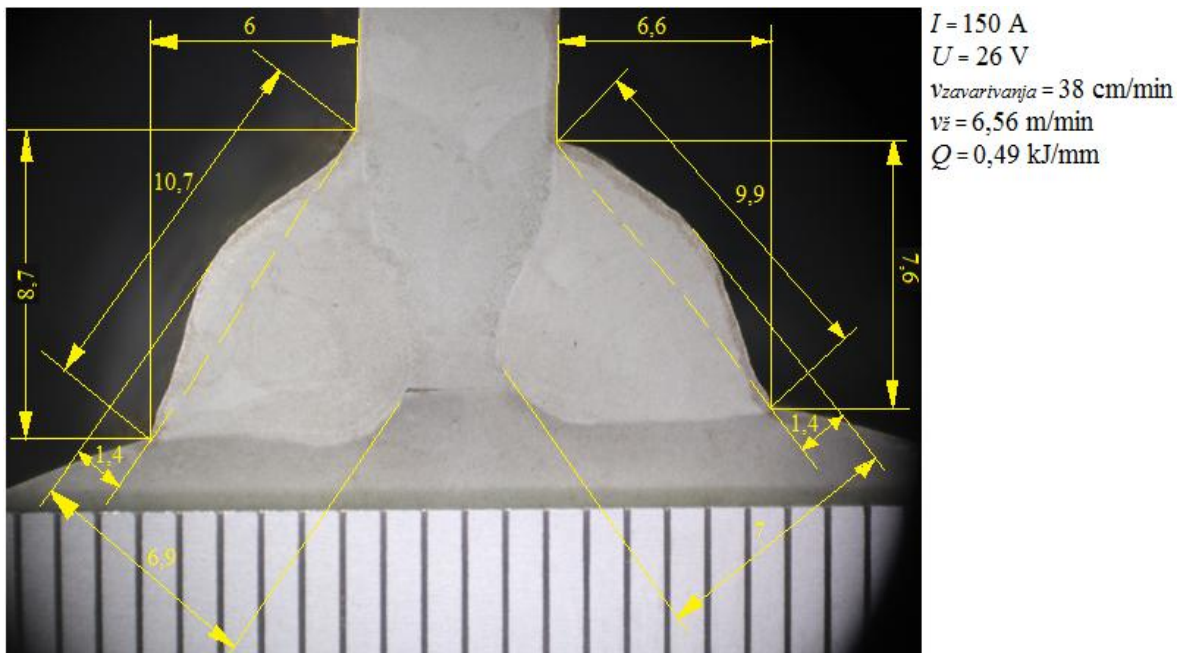
Slika 4.13 Površina uzoraka nakon brušenja, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 14.04.2022.

4.7.2. Nagrizanje uzoraka

Kako bi uzorcima koji su prethodno brušeni mogli analizirati geometriju zavara na mikroskopu uzorke je potrebno nagristi. Nagrizanje uzoraka provedeno je u laboratoriju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorci su nagrizani u Nitalu 15 sekundi. Nital je otopina dušične kiseline i alkohola etanola ili metanola. Koristi se za nagrizanje površina čelika kako bi njihova mikrostruktura bila vidljiva pod mikroskopom. [40] Nakon nagrizanja uzorci su isprani u alkoholu.

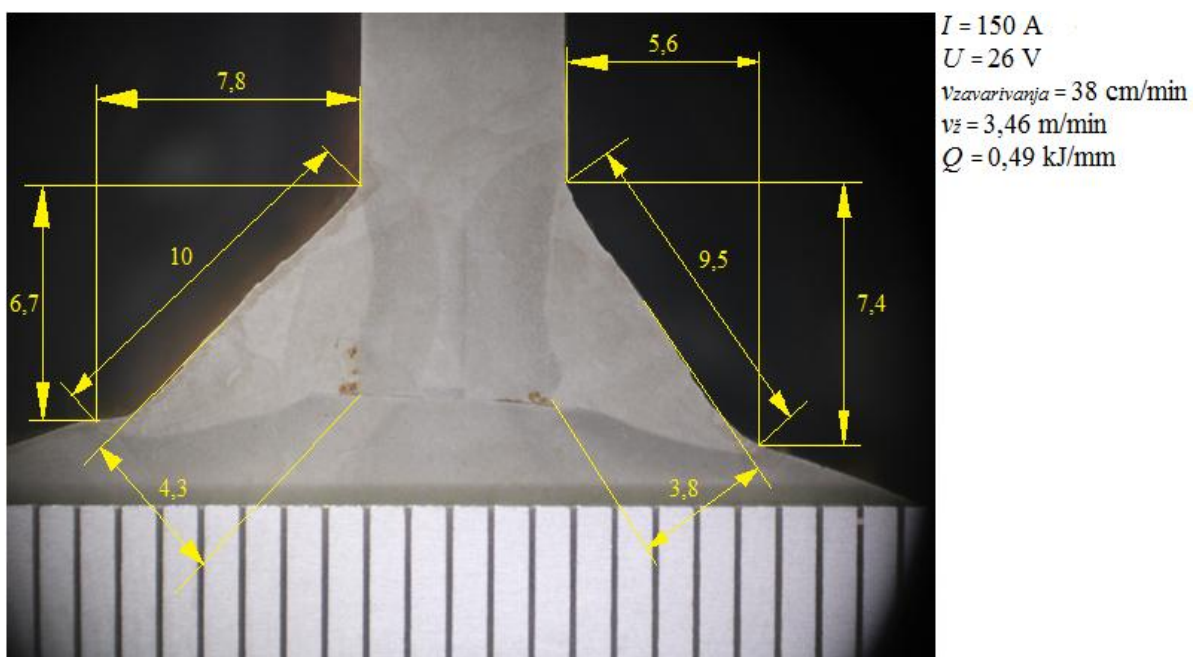
4.7.3. Slikanje uzoraka

Nakon nagrizanja uzorci su slikani na svjetlosnom mikroskopu koji je opremljen s kamerom Canon EOS 2000D. Za ovo slikanje uzoraka korišteno je povećanje materijala od 10x. Dobivene slike uzoraka s mikroskopa obrađene su u programu ImageJ u kojem je na uzorcima izmjerena geometrija zavara. Uzorci s izmjerenom geometrijom zavara i pripadajućim parametrima zavarivanja prikazani su na slikama 4.14; 4.15 i 4.16.



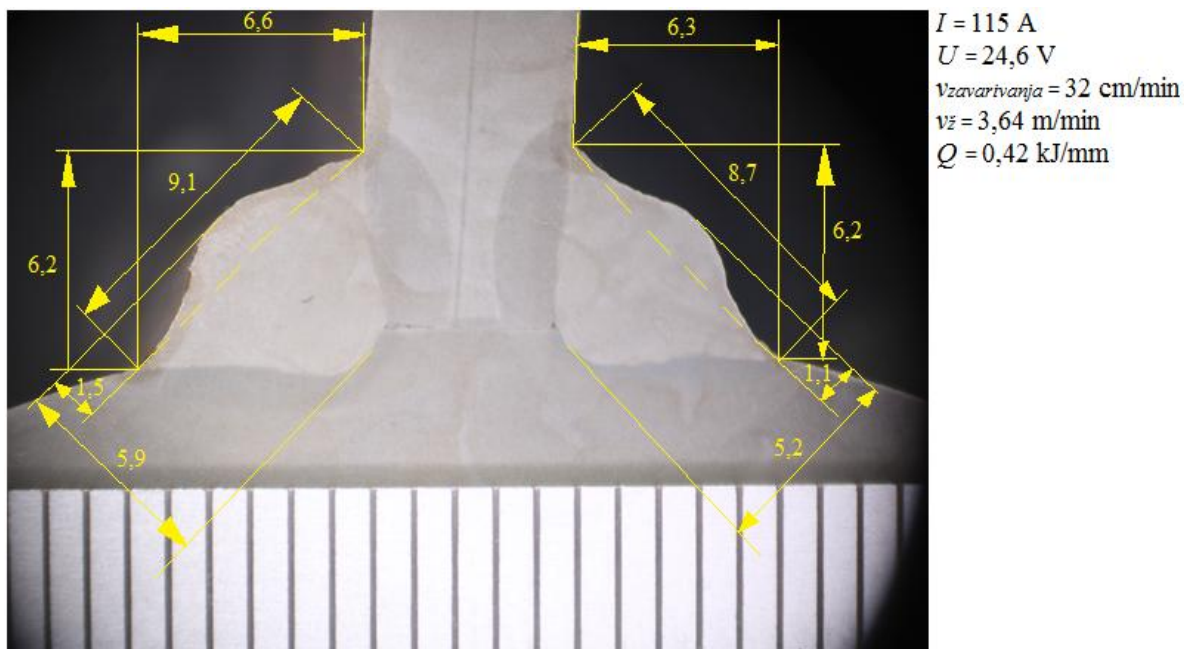
Slika 4.14 Uzorak 1 sa izmjerenom geometrijom zavara, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 21.04.2022.

Na uzorku 1 može se vidjeti kako osnovni materijal nije u potpunosti provaren na mjestu spoja lima i cijevi. Također pri korijenu lijevog zavara vidljiva je pogreška koja je nastala prilikom pripajanja lima uz cijev. Na temelju izmjerenih veličina zavara može se vidjeti kako oba zavara imaju jednaku debljinu i nadvišenje, a visina i širina im se razlikuju.



Slika 4.15 Uzorak 2 sa izmjerenom geometrijom zavara, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 21.04.2022.

Promatrajući uzorak 2 može se vidjeti kako je dubina provarivanja osnovnog materijala vrlo mala. Na lijevom zavaru može se vidjeti kako je došlo do naljepljivanja u korijenu zavara. Također u korijenu zavara mogu se vidjeti pore. Što se tiče geometrije zavara ona je kod oba zavara podjednaka osim visina zavara koje se značajno razlikuju.



Slika 4.16 Uzorak 3 sa izmjerenom geometrijom zavara, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 21.04.2022.

Na uzorku 3 također se može vidjeti kako nije došlo do potpunog provarivanja osnovnog materijala. U lijevom zavaru može se uočiti uključak veličine oko 0,3 mm. Na temelju izmjerenih veličina zavara može se vidjeti kako su oba zavara gotovo jednaka.

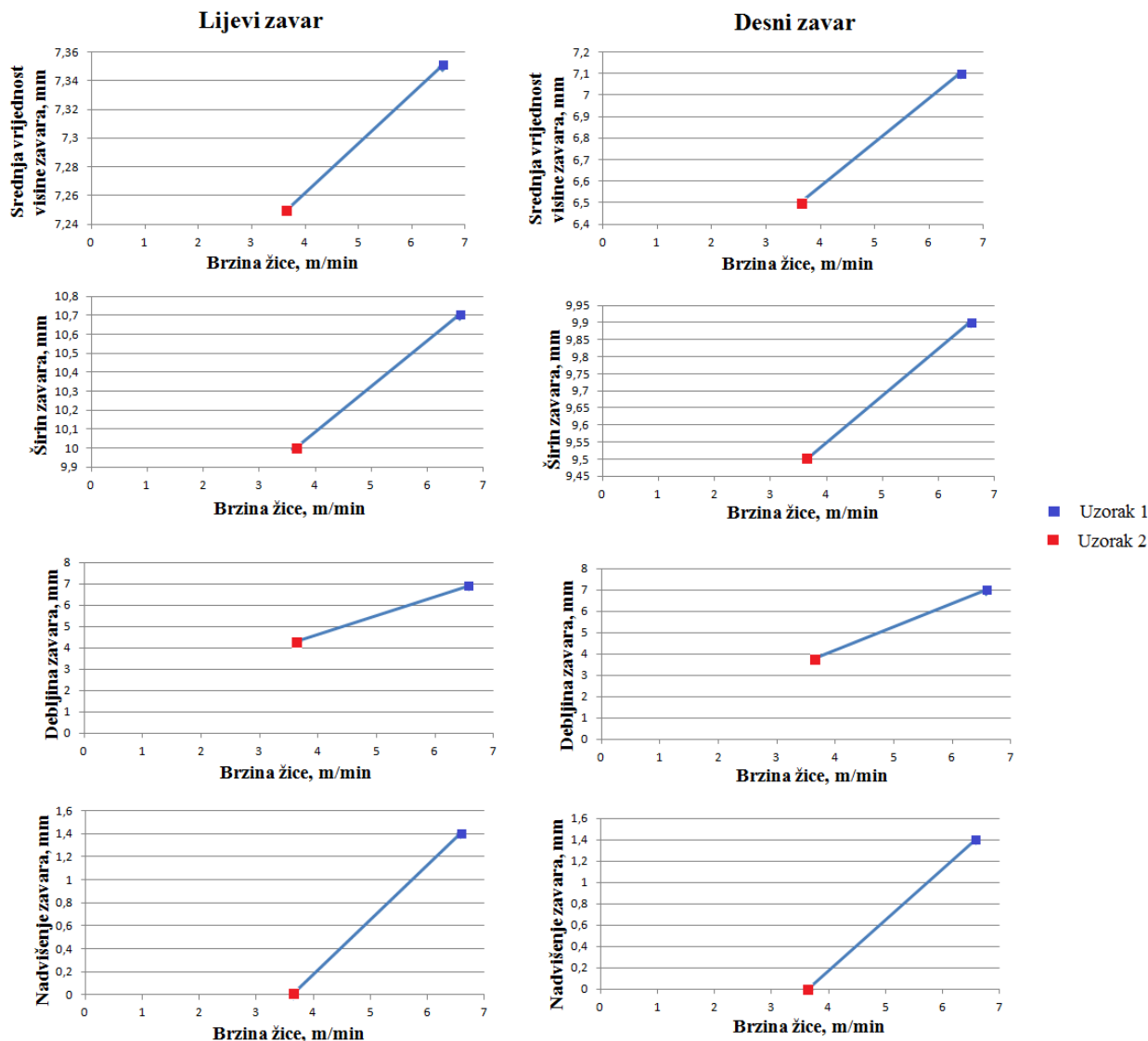
4.7.4. Analiza izmjerene geometrije zavara na uzorcima

Vrijednosti izmjerene geometrije zavara na svakom od uzoraka prikazane su u tablici 17.

Tablica 17 Izmjerene vrijednosti geometrije zavara na svakom uzorku

Uzorak	Lijevi zavar					Desni zavar				
	Visina zavara, mm	Srednja vrijednost visine zavara, mm	Širina zavara, mm	Debljina zavara, mm	Nadvišenje zavara, mm	Visina zavara, mm	Srednja vrijednost visine zavara, mm	Širina zavara, mm	Debljina zavara, mm	Nadvišenje zavara, mm
1	6 i 8,7	7,35	10,7	6,9	1,4	6,6 i 7,6	7,1	9,9	7	1,4
2	7,8 i 6,7	7,25	10	4,3	-	5,6 i 7,4	6,5	9,5	3,8	-
3	6,6 i 6,2	6,4	9,1	5,9	1,5	6,3 i 6,2	6,25	8,7	5,2	1,1

Kako bi se analizirao utjecaj promjene parametra zavarivanja na geometriju zavarenog spoja u sljedećim dijagramima prikazano je kako je promjena brzine žice utjecala na geometriju zavarenog spoja kod uzoraka 1 i 2.



Slika 4.17 Dijagrami ovisnosti veličina geometrije zavara o brzini žice kod uzoraka 1 i 2

Uzorak 1 i uzorak 2 zavarivani su s različitim brzinom žice, a dok su ostali parametri zavarivanja (jakost struje zavarivanja, brzina žice i napon zavarivanja) jednaki za oba uzorka. Iz prikazanih dijagrama može se vidjeti kako kod uzorka 1 kod kojeg je brzina žice tijekom zavarivanja bila veća sve izmjerene vrijednosti geometrije zavara su veće nego kod uzorka 2. Dimenzije zavara koje se značajno razlikuju kod ova dva uzorka su debljina i nadvišenje zavara. Uzorak 1 koji je zavarivan s većom brzinom žice ima veću debljinu i nadvišenje zavara, a dok kod uzorka 2 nadvišenja zavara nije ni bilo. Iz toga se može zaključiti kako s povećanjem brzine žice pri nepromijenjenim ostalim parametrima zavarivanja postiže se veća debljina zavara, a samim time i veća dubina penetracije.

Uzorci 2 i 3 zavarivani su s različitom jačinom struje, naponom i brzinom zavarivanja, ali s jednakom brzinom žice. Uspoređujući ova dva uzorka iz tablice 17 može se vidjeti kako je dubina i nadvišenje zavara kod uzorka 3 veće u odnosu na uzorak 2, a da je srednja vrijednost visine zavara i širina zavara malo veća kod uzorka 2 nego kod uzorka 3. Na temelju izmjerenih dimenzija zavara može se zaključiti da za brzinu žice koja je korištena pri zavarivanju uzorka 2 ostali parametri zavarivanja jakost struje, napon zavarivanja i brzina zavarivanja su bili preveliki te da sa manjom vrijednošću tih parametara postiže se bolja geometrija zavara.

Uzorci 1 i 3 zavarivani su s različitim parametrima zavarivanja. Kod uzorka 1 jakost struje zavarivanja, napon zavarivanja, brzina zavarivanja i brzina žice su veći nego kod uzorka 3. Iz izmjerenih dimenzija zavara u tablici 17 može se vidjeti kako su sve izmjerene dimenzije zavara kod uzorka 1 veće u odnosu nego kod uzorka 3. Iz toga se može zaključiti kako s većim parametrima zavarivanja koji su pravilno podešeni dobiva se zavar većih dimenzija.

5. Zaključak

U odnosu na druge postupke zavarivanja MAG postupak zavarivanja jedan je od najzastupljenijih postupaka zavarivanja općih konstrukcijskih čelika. Neki od razloga njegove zastupljenosti u odnosu na druge postupke zavarivanja su jednostavno korištenje opreme za zavarivanje, mogućnost zavarivanja različitih debljina materijala i postizanje većih brzina zavarivanja.

Zbog posjedovanja dobrih mehaničkih svojstava u pogledu nosivosti i sigurnosti opći konstrukcijski čelici pogodni su za izradu konstrukcija. Kako se danas većina konstrukcija spaja zavarivanjem jedno od glavnih svojstava općih konstrukcijskih čelika je i njegova dobra zavarljivost koja ovisi o vrijednosti ugljičnog ekvivalenta. Da bi opći konstrukcijski čelik bio dobro zavarljiv vrijednost ugljičnog ekvivalenta mora biti manja od 0,4 ili ako je njegova vrijednost veća potrebno je provesti predgrijavanje čelika.

Da bi se ostvario kvalitetan zavareni spoj kod MAG postupka zavarivanja potrebno je obratiti pažnju na izbor dodatnog materijala, zaštitnog plina i pravilno podešavanje parametara zavarivanja. Dodatni materijal odabire se na temelju osnovnog materijala koji se zavaruje i prema svojstvima metala zavara koja želimo postići. Dok se zaštitni plin odabire na temelju odabranog dodatnog materijala. Na temelju debljine osnovnog materijala i odabranog dodatnog materijal podešavaju se parametri zavarivanja. Osim odabira dodatnog materijala i parametara zavarivanja kod MAG postupka zavarivanja veliki utjecaj na kvalitetu zavara ima i sam zavarivač. Kod izvođenja dugačkih zavara ili dugotrajnog zavarivanja zavarivača postoji vjerojatnost od pojave grešaka u zavarenom spoju koja nastaju kao posljedica umora zavarivača. Kako bi se te greške uklonile u proizvodni proces uvode se automati koji djelomično zamjenjuju čovjeka. Uvođenjem automata postiže se veća produktivnost, veća kvaliteta zavarenog spoja, smanjuju se troškovi izrade i dolazi do poboljšanja uvjeta rada zavarivača.

U eksperimentalnom dijelu rada izvedeno je automatizirano MAG zavarivanje uzoraka od općeg konstrukcijskog čelika s promjenjivim parametrima zavarivanja. Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je ispitati kako promjena parametara zavarivanja utječe na geometriju zavara. Geometrija zavara određena je mjerenjem visine, širine, debljine i nadvišenja zavara. Nakon provedene analize i mjerenja geometrije zavara može se vidjeti kako ni kod jednog uzorka nije došlo do potpunog provarivanja osnovnog materijala i da geometrija zavara jako ovisi o parametrima zavarivanja u ovom slučaju brzini žice, brzini zavarivanja, jakosti struje i naponu zavarivanja. Iz analize izmjerenih rezultata može se zaključiti kako promjenom jednog od parametra zavarivanja značajno se može utjecati na samu geometriju zavara što je vidljivo na primjeru uzorka 1 i 2. Također na temelju uzoraka 2 i 3 može se vidjeti kako pogrešnim

odabirom više parametara zavarivanja dolazi do značajnog utjecaja na geometriju zavara i na kvalitetu zavarenog spoja kao i u prvom slučaju.

Pa prema tome, unatoč velikim prednostima koje pružaju automati, za postizanje kvalitetnog zavarenog spoja i odgovarajuće geometrije zavara potrebno je poznavati sam postupak zavarivanja, njegove parametre i njihov utjecaj na zavar.

6. Literatura

- [1] T. Filetin, F. Kovačićek, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [2] <https://oprema-vrbovec.hr/puzni-transporteri/>, dostupno: 10.05.2022.
- [3] <https://www.kralj-kocijan.hr/?u=svrdla-za-zemlju/hr/st/901>, dostupno: 10.05.2022.
- [4] <http://www.ddtep.hr/o-nama/povijest/>, dostupno: 10.05.2022.
- [5] <https://www.alamy.com/stock-photo/welding-metal-plates.html>, dostupno: 10.05.2022.
- [6] G. Meden, A. Pavelić, D. Pavletić: Osnove zavarivanja, Tehnički fakultet Sveučilište u Rijeci, 2000.
- [7] Mirko Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
- [8] <https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja>, dostupno 07.10.2021.
- [9] Matija Bušić- Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja- Suvremene proizvodne tehnologije, Sveučilište Sjever, Varaždin, ak. god. 2019./2020. [Predavanje]
- [10] Mr Milan Milotić: Priručnik za zavarivače 2. Dopunjeno izdanje, BCD Elektro d.o.o. Doboj, Saobraćajni fakultet Doboj, Doboj, 2008.
- [11] Ivan Samardžić- Tehnike spajanja, Sveučilište Sjever, Varaždin, ak. god. 2013./2014. [Predavanje]
- [12] I. Golubić: Postupak zavarivanja čelične konstrukcije menze Sveučilišta Zadar, Završni rad, Sveučilište u Karlovcu, Karlovac, 2020.
- [13] Srboљjub Stevanović dipl. maš.inž: Zavarivanje - Parametri zavarivanja i njihov uticaj na kvalitet i vizuelni izgled zavarenog spoja tj. zavara, Alati Stherm d.o.o.
- [14] Bajrush Bytyqi, prof.ord., Hysni Osmani, prof., Ferit Idrizi, ass.:Uticaj parametara zavarivanja na kvalitet zavara izvedenih MAG zavarivanjem, UP, Fakulteti i Inzhinierisē Mekanike, Prishtinë, 09.- 12. studeni 2005.
- [15] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/miggmaw-101-setting-the-correct-parameters>, dostupno 21.10.2021.
- [16] Atlija Nataša: MAG postupak zavarivanja, Diplomski rad, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet odsjek za politehniku, Rijeka, 2016.
- [17] <https://www.quora.com/Why-are-no-shielding-gases-and-fluxes-used-by-gas-welding>, dostupno: 23.10.2021.
- [18] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf, dostupno: 24.10.2021.

- [19] M.Horvat, V.Kondić, D. Brezovački: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, br. 8, ožujak 2014., str. 288-294
- [20] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić: Priručnik - Zavarivački i srodni postupci, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Sveučilište u zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [21] https://www.kobelco-welding.jp/education-center/abc/ABC_1998-03.html, dostupno: 01.11.2021.
- [22] https://dtzsb.unisb.hr/wp-content/uploads/radovi_2015/Horvat-ZAVARIVANJE_CJEVOVODA-MODIFICIRANIM-MIG-MAG-POSTUPCIMA.pdf, dostupno: 07.11.2021.
- [23] Klas Weman, Gunnar Lindén: MIG welding guide, Woodhead Publishing and Maney Publishing, Cambridge, 2006.
- [24] https://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig4_3.htm, dostupno: 05.12.2021.
- [25] I. Lakota, M. Bregant, M. Šolar: Metalne punjene žice, Zavarivanje i zavarene konstrukcije (3/2009), str. 112-118
- [26] <https://slidetodoc.com/tehnologija-zavarivanja-punjena-ica-kombinacija-migmag-i-rel/>, dostupno: 19.12.2021.
- [27] <https://www.ezg.hr/zice.html>, dostupno: 19.12.2021.
- [28] I. Ciglar, Z. Botak: Upravljanje i primjena robota za zavarivanje "REIS ROBOTICS RV6L", Tehnički glasnik, vol. 5, br.1, 2011., str. 98-102
- [29] <https://pdfslide.tips/documents/naprave-i-automatizacija-za-zavarivanje-za-sfsb-i-automatizacija-za-zavarivanje.html>, dostupno: 23.01.2022.
- [30] <https://steelmax.com/product/rail-runner-welding-carriage/>, dostupno: 30.01.2022.
- [31] <https://www.lorch.eu/downloads-public/broschueren-flyer-kataloge/91311741-EN-Lorch-Trac-Brosch%C3%BCre.pdf>, dostupno: 30.01.2022.
- [32] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/automation/systems/longitudinal-seam-systems/arcrover-22/arcrover-22>, dostupno: 06.02.2022.
- [33] https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/Rail-Bull_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator_21.10.pdf, dostupno: 06.02.2022.
- [34] Brošura: Rail Bull Track Welding Carriage with Oscillator
- [35] https://www.promotech.eu/en/products/wa-1000_wa-1500_gantry_welding_system/, dostupno: 13.02.2022.
- [36] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/automation/systems/orbital-systems/ftw-24-120-pro-tubesheet-welder/ftw-24-120-pro-tubesheet-welder>, dostupno: 13.02.2022.

- [37] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/automation/systems/orbital-systems/flextrack-45-pro/flextrack-45-pro>, dostupno: 18.02.2022.
- [38] <https://www.varstroj-s.rs/varmig-230-supermig.php>, dostupno: 09.04.2022.
- [39] <http://karikadoo.com/wp-content/uploads/2018/01/Jesenice-katalog.pdf>, dostupno: 26.04.2022.
- [40] Anthea Rudelić, Ispitivanje čelične legure AISI 4140, Završni rad, Tehnički fakultet u Puli, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli, Pula, 2021.

Popis slika

Slika 1. 1 Pužni transporter [2]	4
Slika 1.2 Svrkla za zemlju [3].....	4
Slika 1.3 Membranski zid kotla za spalionicu otpada [4].....	5
Slika 1.4 Ojačanje stupova [5].....	5
Slika 1.5 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem [7]	7
Slika 1.6 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom [7].....	7
Slika 2.1 Shema uređaja za MIG/MAG zavarivanje [8].....	9
Slika 2.2 Ovisnost jakosti struje i brzine dovodenja žice [10].....	11
Slika 2.3 Utjecaj jakosti struje na oblik zavara [12]	11
Slika 2.4 Utjecaj napona električnog luka na izgled zavara[13].....	12
Slika 2.5 Prevelika brzina zavarivanja[15] Slika 2.6 Premala brzina zavarivanja [15]....	13
Slika 2.7 Utjecaj vrste zaštitnog plina na oblik zavara [17]	13
Slika 2.8 Utjecaj vrste spoja na potrošnju zaštitnog plina [7].....	14
Slika 2.9 Dužina slobodnog kraja žice[18]	15
Slika 2.10 Mehanizmi prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja[19]	16
Slika 2.11 Prijenos metala štrcajućim lukom[19]	17
Slika 2.12 Prijenos metala pulsirajućim lukom [19].....	18
Slika 2.13 Prijenos metala kratkim spojem[21]	19
Slika 2.14 Prijenos metala mješovitim lukom [19].....	20
Slika 2.15 Utjecaj argona kao zaštitnog plina na penetraciju zavara [18]	21
Slika 2.16 Utjecaj helija kao zaštitnog plina na penetraciju zavara[18]	22
Slika 2.17 Utjecaj zaštitnog plina CO ₂ na oblik zavara[18]	23
Slika 2.18 Oblici poprečnog presjeka praškom punjene žice [26].....	27
Slika 3.1 Rail Runner automat za zavarivanje [30]	31
Slika 3.2 Trac Wheel Pro automata za zavarivanje [31].....	32
Slika 3.3 ArcRover automat za zavarivanje [32]	33
Slika 3.4 Sustav za vođenje ArcRover 22 automata za zavarivanje [32]	34

Slika 3.5 Izgled zavara obzirom na njihanje pištolja (1-trokutni i trapezni uzorak, 2-bez oscilacija) [33]	34
Slika 3.6 Rail Bull automat za zavarivanje [33]	35
Slika 3.7 WA 1000 automat za zavarivanje [35]	36
Slika 3.8 Primjena WA 1000/ WA 1500 automata za zavarivanje[35]	36
Slika 3.9 FTW PRO automat za zavarivanje [36].....	37
Slika 3.10 Flextrack 45 Pro automat za zavarivanje [37]	38
Slika 4.1 VARMIG 230 Supermig uređaj proizvođača Varstroj, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 07.04.2022.....	39
Slika 4.2 Automat za zavarivanje Rail Bull proizvođača Promotech, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 07.04.2022.....	41
Slika 4.3 Skica pripremljenog spoja	42
Slika 4.4 Pripremljeni spoj za automatizirano MAG zavarivanje, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 07.04.2022.....	42
Slika 4.5 Sredstva za provođenje ispitivanja zavara penetrantom (a- sredstvo za čišćenje metala, b- penetrant crvene boje, c- razvijlač bijele boje), slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 08.04.2022.....	44
Slika 4.6 Slika zavara nakon nanošenja penetranta, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 08.04.2022.....	45
Slika 4.7 Zavari nakon nanošenja razvijlača, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 08.04.2022.....	45
Slika 4.8 Mjerilo za mjerenje visine zavara, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 14.04.2022.....	46
Slika 4.9 Mjerenje visine zavara, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 14.04.2022.	46
Slika 4.10 Skica rezanja uzorka za makroanalizu.....	47
Slika 4.11 Izrezan uzorak za makroanalizu, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 08.04.2022.....	48
Slika 4.12 Uređaj za brušenje i poliranje Forcipol 1V proizvođača Metkon, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 14.04.2022.	48

Slika 4.13 Površina uzoraka nakon brušenja, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 14.04.2022.....	49
Slika 4.14 Uzorak 1 sa izmjerenom geometrijom zavara, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 21.04.2022.	50
Slika 4.15 Uzorak 2 sa izmjerenom geometrijom zavara, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 21.04.2022.	50
Slika 4.16 Uzorak 3 sa izmjerenom geometrijom zavara, slikano u laboratoriju Sveučilišta Sjever u Varaždinu 21.04.2022.	51
Slika 4.17 Dijagrami ovisnosti veličina geometrije zavara o brzini žice kod uzoraka 1 i 2	52

Popis tablica

Tablica 1 Potrošnja zaštitnog plina ovisno o promjeru žice [7].....	14
Tablica 2 Duljina slobodnog kraja žice i razmak plinske sapnice od mjesta zavarivanja[7] ..	16
Tablica 3 Mješavine plinova argona i ugljičnog dioksida [18].....	24
Tablica 4 Mješavine plinova argon/helij [18,24]	25
Tablica 5 Mješavine plinova argon/kisik [18]	25
Tablica 6 Trokomponentne mješavine zaštitnih plinova[18].....	26
Tablica 7 Žice za MIG/MAG zavarivanje [27].....	28
Tablica 8 Tehničke karakteristike Rail Runner automata za zavarivanje [30]	31
Tablica 9 Tehničke karakteristike Trac Wheel Pro automata za zavarivanje [31]	32
Tablica 10 Karakteristike ArcRover 22 automata za zavarivanje [32].....	33
Tablica 11 Tehničke karakteristike Rail Bull automata za zavarivanje [34]	35
Tablica 12 Tehničke karakteristike WA 1000/ WA 1500 automata za zavarivanje [35]	36
Tablica 13 Tehničke karakteristike VARMIG 230 Supermig uređaja [38].....	40
Tablica 14 Kemijski sastav dodatnog materijala [39].....	40
Tablica 15 Parametri zavarivanja uzoraka	44
Tablica 16 Izmjerene visine zavara na uzorcima	47
Tablica 17 Izmjerene vrijednosti geometrije zavara na svakom uzorku.....	51