

Primjena sustava za demagnetizaciju u zavarivanju

Vrbanc, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:775387>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Martin Vrbanc

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Martin Vrbanc

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se svojoj obitelji na pruženoj podršci i razumijevanju tijekom studija, te mentorima Prof. dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. i Dr. sc. Maji Jurici, mag. ing na pruženoj pomoći i savjetima za pisanje ovog rada, dodatno se zahvaljujem osoblju u Laboratoriju za zavarene konstrukcije na ukazanoj pomoći s eksperimentalnim dijelom rada.

Martin Vrbanc



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARTIN VRBANC** Mat. br.: **0035198146**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena sustava za demagnetizaciju u zavarivanju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of demagnetization systems in welding**

Opis zadatka:

Proučiti osnovne fizikalne pojave i mehanizme koji mogu dovesti do magnetskog puhanja pri zavarivanju te analizirati utjecaj magnetskog puhanja na proces i kvalitetu zavarenog spoja. Opisati opcije demagnetizacije radnog komada pri zavarivanju za primjere različitih oblika konstrukcija i osnovnih materijala. Dodatno, navesti i analizirati osnovne tipove i značajke opreme koja se primjenjuje za demagnetizaciju radnog komada i smanjenje utjecaja puhanja luka pri zavarivanju te posebno rezanju plazmom.

U eksperimentalnom dijelu na odgovarajućem radnom komadu provesti postupak magnetizacije te odrediti kritične vrijednosti jakosti magnetskog polja za različite postupke zavarivanja. Uz primjenu odgovarajuće opreme provesti demagnetizaciju radnog komada te izmjeriti jakost zaostalog magnetskog polja, odrediti učinkovitost sustava i dati preporuke za primjenu u realnim uvjetima i konstrukcijama.

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

Zadatak zadan:
14. studenog 2019.

Rok predaje rada:
16. siječnja 2020.

Predviđeni datum obrane:
20. siječnja do 24. siječnja 2020.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. Električni luk kao izvor energije za zavarivanje.....	2
2.1. Sile u električnom luku	3
3. Osnove magnetskog puhanja električnog luka	5
3.1. Uzroci magnetskog puhanja luka	5
3.1.1. Početak i kraj procesa zavarivanja	5
3.1.2. Geometrija i priprema zavarenog spoja	6
3.1.3. Inducirani magnetni tok u radnom komadu	7
3.1.4. Zavarivanje s više elektroda.....	9
3.1.5. Učvršćivači radnog komada.....	10
3.2. Načini sprječavanja puhanja luka	10
4. Puhanje luka uzrokovano zaostalim magnetizmom u materijalu	12
4.1. Feromagnetizam i ferimagnetizam.....	12
4.2. Uzorci zaostalom magnetizmu	14
4.3. Mjerenje zaostalog magnetizma.....	16
4.4. Uklanjanje zaostalog magnetizma iz materijala.....	17
4.4.1. Metoda suprotnog polja	17
4.4.2. Knockdown metoda	18
4.4.3. Metoda demagnetizacije	20
4.4.3.1. Demagnetizacija promjenama polja istosmjerne struje (DC)	21
4.4.3.2. Demagnetizacija pomoću sinusnog pulsa visokog inteziteta.....	21
4.5. Oprema i primjeri metoda uklanjanja zaostalog magnetizma.....	23
4.6. Utjecaj iznosa gustoće magnetskog polja na pojedine postupke zavarivanja	25
4.7. Magnetsko puhanje električnog luka kod plazma rezanja	26
4.7.1. Utjecaj zaštitne feromagnetične kape na puhanje luka kod plazma rezanja	27
5. Utjecaj magnetskih sila na kapljicu metala u električnom luku	30
5.1. Utjecaj magnetskih sila kod MAG postupka zavarivanja.....	30
6. TIG postupak zavarivanja.....	32
6.1. Osnove TIG postupka zavarivanja	32
6.2. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja.....	33
6.3. Vrsta struje i polaritet elektrode kod TIG postupka zavarivanja	35
6.4. Zaštitni plinovi za TIG postupak zavarivanja	37
6.5. Netaljive elektrode za TIG postupak zavarivanja	38
6.6. Oprema za TIG postupak zavarivanja.....	39

7. Eksperimentalni dio rada	41
7.1. Magnetizacija radnog komada	41
7.2. Navarivanje radnog komada	46
7.3. Demagnetizacija radnog komada	51
7.3.1. Demagnetizacija radnog komada prije ponovnog navarivanja	52
7.3.2. Demagnetizacija za vrijeme navarivanja „activegauss“	56
8. Zaključak	59
Literatura	61

POPIS SLIKA

Slika 1.	Smjer djelovanja magnetog polja na ravan vodič kojim teče struja [3]	4
Slika 2.	Povećana koncentracija silnica u blizini električnog luka [5]	5
Slika 3.	Geometrija spoja kod kojeg će se vjerojatno pojaviti puhanje luka [5]	6
Slika 4.	Geometrija spoja kod kojeg će se vjerojatno pojaviti puhanje luka [5]	6
Slika 5.	Puhanje električnog luka uslijed različith debljina radnih komada koji se zavaruju [4]	7
Slika 6.	Promjena kuta elektrode kako bi se kompenziralo puhanje električnog luka [4] ...	7
Slika 7.	Inducirani magnetski tok u radnom komadu i puhanje luka kao posljedica [6].....	8
Slika 8.	Dva načina postavljanja priključka struje na radni komad [5]	8
Slika 9.	Reakcije magnetskih polja kada su električni lukovi jedan do drugoga [5].....	9
Slika 10.	Stanje feromagneta prije izlaganja magnetskom polju (lijevo) i nakon izlaganja magnetskom polju (desno) [7].....	13
Slika 11.	Krivulja magnetiziranja feromagnetskog materijala [9]	13
Slika 12.	Mjerenje zaostalog magnetizma prije zavarivanja cjevovoda na terenu [10]	16
Slika 13.	Djelovanje suprotnog magnetskog polja na početno magnetsko polje radnog komada [9].....	17
Slika 14.	Promjena magnetskog polja u materijalu koji je izložen “knockdown” metodi [9]	19
Slika 15.	Stanje magnetskog polja materijala prilikom demagnetizacije promjenom polova DC struje [8].....	21
Slika 16.	Stanje magnetskog polja materijala prilikom demagnetizacije pomoću sinusnog pulsa visokog inteziteta. [9].....	22
Slika 17.	Obodno namatanje kabela oko radnog komada [9].....	23
Slika 18.	Obodno namatanje kabela oko ploče [9].....	24
Slika 19.	Kabeli položeni u namotajima na površinu radnog komada [9]	24
Slika 20.	Kabeli položeni u namotajima na kraj cijevi [9]	25
Slika 21.	Shema plazma rezanja [14]	26
Slika 22.	Shema nastanka dvostrukog luka [13].....	27
Slika 23.	Ovisnost gustoće magnetskog polja o poziciji rezanja [13]	28
Slika 24.	Poprečni presjek ploče prilikom 4 uvjeta rezanja [13].....	28
Slika 25.	Mehanizam zaštite feromagnetskom kapom kod plazma rezanja od utjecaja magnetskog polja [13]	29
Slika 26.	Odvajanje kapljice metala kod MAG postupka zavarivanja [14]	30
Slika 27.	Mehanizam odvajanja metalne kapljice prilikom MAG zavarivanja [14]	31
Slika 28.	Magnetni jaram Tiede	42
Slika 29.	Provođenje magnetizacije magnetnim jarmom	43
Slika 30.	Gauss metar „Fieldmeter H1-4“	44
Slika 31.	Shema postupka kalibracije uređaja „Fieldmeter H1-4“ [19]	44
Slika 32.	Mjerenje gustoće zaostalog magnetskog polja pomoću Gaussmetra	45
Slika 33.	Permamentni magneti postavljeni na radni komad i označene vrijednosti gustoće magnetskog polja uzduž radnog komada	46
Slika 34.	Navarivanje TIG postupkom	47
Slika 35.	Otklon električnog luka za poziciju 1 (kut $\alpha=65^\circ$).....	48
Slika 36.	Otklon električnog luka za poziciju 2 (kut $\beta=60^\circ$).....	48
Slika 37.	Otklon električnog luka za poziciju 3 (kut $\gamma=50^\circ$)	49

Slika 38.	Otklon električnog luka za poziciju 4 (kut $\delta=43^\circ$)	49
Slika 39.	Otklon električnog luka za poziciju 5 (kut $\varepsilon=30^\circ$)	50
Slika 40.	Uređaj za demagnetizaciju „Degauss 600“	51
Slika 41.	Mjerenje gustoće magnetskog polja za vrijeme demagnetizacije	52
Slika 42.	Ovisnost gustoće zastalog magnetskog polja o jakosti struje demagnetizacije.....	53
Slika 43.	Izgled električnog luka na početku navarivanja poslije provedene demagnetizacije	54
Slika 44.	Izgled električnog luka za vrijeme navarivanja nakon provedene demagnetizacije	55
Slika 45.	Izgled električnog luka na kraju procesa navarivanja nakon provedene demagnetizacije	55
Slika 46.	Radni komad s postavljenim permanentnim magnetima i omotanom zavojnicom	56
Slika 47.	Mjerenje gustoće magnetskog polja na rubu radnog komada u blizini permanentnih magneta	57
Slika 48.	Mjerenje gustoće magnetskog polja na kraju pozicije drugog permanentnog magneta	57
Slika 49.	Puhanje luka od ruba radnog komada do kraja pozicije drugog magneta kada je isključen uređaj za demagnetizaciju	58
Slika 50.	Izgled električnog luka od ruba radnog komada do kraja pozicije drugog magneta kada je uključen uređaj za demagnetizaciju	58

POPIS TABLICA

Tablica 1. Relativna permeabilnost željeza i nikla [6]	14
Tablica 2. Osnovne fizikalne veličine i mjerne jedinice u magnetizmu [6].....	15
Tablica 3. Iznos inteziteta magnetskog polja ovisno o uzroku magnetiziranja [7]	15
Tablica 4. Prikladni izvori energije za određene metode uklanjanja zaostalog magnetizma iz materijala [8]	23
Tablica 5. Ponašanje električnog luka ovisno o iznosu gustoće magnetskog polja za pojedine postupke zavarivanja [10].....	25
Tablica 6. Parametri procesa plazma rezanja [11]	27
Tablica 7. Dimenzije radnog komada.....	41
Tablica 8. Kemijski sastav čelika hardox 400 [13]	41
Tablica 9. Mehanička svojstva čelika hardox 400 [13].....	41
Tablica 10. Karakteristike uređaja „Field meter H1-4“ [15].....	43
Tablica 11. Parametri TIG navarivanja	47
Tablica 12. Vrijednosti gustoće magnetskog polja za pojedinu poziciju na radnom komadu .	48
Tablica 13. Izmjerene vrijednosti kuteva otklona luka pri svakoj poziciji	50
Tablica 14. Specifikacije uređaja „Degauss 600“ [16].....	51
Tablica 15. Ovisnost gustoće zaostalog magnetskog polja o jakosti struje demagnetizacije...	53

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>B</i>	T	Gustoća magnetskog polja
<i>l</i>	m	Duljina
<i>F</i>	N	Sila
<i>f</i>	Hz	Frekvencija
<i>H</i>	A/m	Intezitet magnetskog polja
<i>I</i>	A	Jakost struje
<i>KV</i>	J	Udarni rad loma po Charpyu
<i>m</i>	kg	Masa
<i>q</i>	m ³ /s	Protok
<i>Re</i>	N/m ²	Granica razvlačenja
<i>Rm</i>	N/m ²	Vlačna čvrstoća
<i>t</i>	s	Vrijeme
<i>U</i>	V	Napon
<i>v</i>	m/s	Brzina
<i>θ</i>	°C	Temperatura
<i>Φ</i>	Wb	Magnetski tok

SAŽETAK

Diplomski rad podijeljen je u dva dijela, teorijski i eksperimentalni.

Tema je analiza specifične pojave koja nastaje prilikom zavarivanja i plazma rezanja feromagnetnih materijala – magnetskog puhanja električnog luka.

U teorijskom dijelu opisane su karakteristike električnog luka te sile koje u njemu nastaju, potom je analizirana fizikalna pozadina magnetskog puhanja električnog luka, te potom načini njegovog sprječavanja te uklanjanja.

U eksperimentalnom dijelu rada proveden je postupak magnetizacije radnog komada, u svrhu promatranja utjecaja magnetskog polja na puhanje luka prilikom navarivanja. Potom je obavljena demagnetizacija radnog komada na dva načina prvo prije navarivanja, a potom i za vrijeme samog procesa navarivanja te su zabilježeni i analizirani rezultati.

Ključne riječi: električni luk, magnetsko puhanje, zavarivanje, magnetsko polje, demagnetizacija

SUMMARY

This diploma thesis is divided into two parts, theoretical and experimental. The topic is the analysis of the specific phenomenon that occurs during welding and plasma cutting of ferromagnetic materials - magnetic blowing of electric arc. The theoretical part describes the characteristics of the electric arc and the forces that arise in it, the physical background of the magnetic blowing of the electric arc is analyzed, and the ways of its prevention and removal. In the experimental part of the work, a workpiece magnetization procedure was performed to observe the influence of the magnetic field on the arc blowing during welding. The workpiece was demagnetized in two ways, first before welding and during the welding process itself, and the results were recorded and analyzed.

Keywords: electric arc, magnetic blowing, welding, magnetic field, demagnetization

1. UVOD

Prilikom procesa zavarivanja i navarivanja dolazi do mnogih problema i izazova koji mogu utjecati na kvalitetu procesa. Jedan od tih problema je pojava puhanje električnog luka izazvanog utjecajem magnetskog polja. Ta specifična pojava može dovesti do ozbiljnih grešaka u procesu i izazvati mnoge poteškoće kao što su: nedovoljna penetracija, pojava pora, nepotpun provar, nedovoljna mješanje osnovnog i dodatnog materijala. U praksi se najčešće taj problem rješava promjenom kuta elektrode ili omotavanjem kablova koji predstavljaju zavojnicu oko radnog komada, sa ciljem kompenzacije puhanja luka.

Na terenskom radu ovaj problem postaje još zahtjevniji za otklanjanje zbog uvjeta okoliša (vjetar, temperatura), nepristupačnost i velike dimenzije radnog komada (naftovodi, plinovodi i slično).

Električni luk prilikom zavarivanja se ponaša kao ravan vodič kojim teče struja, te se oko njega stvara magnetsko polje, kada dođe do poremećaja magnetskog polja, elektromagnetske sile djeluju na luk i uzrokuju njegovo skretanje - puhanje. U nastavku su detaljnije obrađeni razlozi i načini kako dolazi do puhanja električnog luka prilikom zavarivanja.

2. Električni luk kao izvor energije za zavarivanje

Električni luk je izvor topline kod elektrolučnih postupaka zavarivanja, 89 % – 96 % energije se u električnom luku pretvori u toplinsko zračenje. Stoga je vrlo važno poznavati raspodjelu topline električnog luka, kako bi se ta energija što učinkovitije raspodijelila. [1]

Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja taljivom elektrodom, materijal elektrode tj. dodatni materijal, oblikuje zavareni spoj na način da se prenosi u obliku rastaljenih kapljica. Vrsta prijenosa metala kroz električni luk ovisi o polaritetu elektrode, jakosti struje zavarivanja, naponu zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, sastavu žice te o karakteristikama izvora struje zavarivanja. Ako je žica priključena na minus pol, prijenos metala se vrši krupnijim kapljicama nego kada je žica priključena na plus pol. Povećanjem napona, ako su ostali parametri konstantni raste duljina el. luka i prijenos metala se vrši krupnijim kapima. Sam prijenos metala u električnom luku omogućen je pojavom i djelovanjem sila. [2]

Karakteristike električnog luka: [2]

- dobro provodi električnu struju koja kroz njega protiče,
- ima određenu dužinu, napon i električni otpor
- oko električnog luka se stvara magnetsko polje (kao oko vodiča),
- toplinski je provodljiv,
- zrači elektromagnetska zračenja: vidljivog dijela spektra, ultraljubičasto i infracrveno zračenje,
- temperatura luka kreće se prosječno 6000 °C - 8000 °C,
- strujanje vrućih plinova je usmjereno prema gore, a tlak električnog luka na površinu taline,
- dolazi do prijelaza kapljica metala kroz električni luk, te do reakcije kapljica s atmosferom luka, ako nije inertna.

Nakon što je uspostavljen električni luk, struja koja teče kroz kontaktnu površinu, uslijed otpora koji joj se ovdje pruža, zagrije kontaktno mjesto (vrh elektrode i dodirnu točku radnog komada) na visoku temperaturu do točke isparavanja. Razviju se metalne pare koje ioniziraju prostor između elektrode i radnog komada i time pospješuju daljnji proces prijelaza električne struje.

Energija se prenosi na predmet direktno udarom elektrona (pretvorbom kinetičke energije u toplinsku), konvekcijom i zračenjem topline iz električnog luka, te prijenosom topline kapljicama materijala. [2]

2.1. Sile u električnom luku

Kod elektrolučnih postupaka zavarivanja taljivom elektrodom, materijal elektrode tj. dodatni materijal, oblikuje zavareni spoj na način da se prenosi u obliku kapljica. Vrsta prijenosa metala kroz električni luk ovisi o polaritetu elektrode, jakosti struje zavarivanja, naponu zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, sastavu žice te o karakteristikama izvora struje zavarivanja. Ako je žica priključena na minus pol, prijenos metala se vrši krupnijim kapljicama nego kada je žica priključena na plus pol. Povećanjem napona, ako su ostali parametri konstantni raste duljina el. luka i prijenos metala se vrši krupnijim kapima. Sam prijenos metala u električnom luku omogućen je pojavom i djelovanjem sila. Pojedine sile djeluju pozitivno na prijenos metala, dok neke djeluju negativno tj. otežavaju proces.[2]

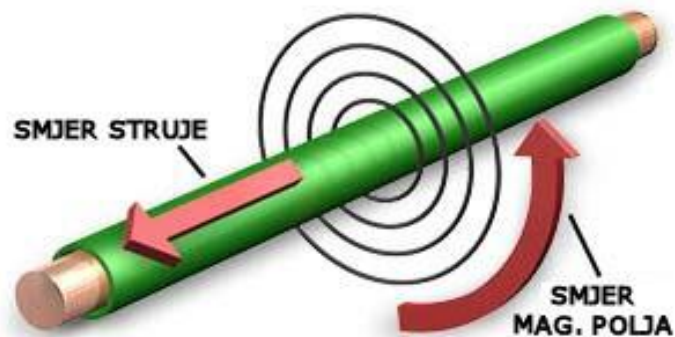
Prilikom prijenosa metala u električnom luku pojavljuju se: [2]

- gravitacijske sile
- elektromagnetske sile
- sile površinske napetosti
- puhanje luka
- sile zbog djelovanja plinova
- sile strujanja i pritiska plazme luka

Elektromagnetske sile su najvažnije za prijenos metala u električnom luku.

Poznato je da se oko vodiča kojim protječe struja stvara magnetsko polje, čije su silnice raspoređene koncentrično oko vodiča. Silnice su zamišljene linije koje pokazuju smjer djelovanja magnetskog polja. Lorentzova-elektromagnetska sila nastaje kada se električni nabijena čestica giba u magnetskom polju. [2] Struja koja prolazi kroz elektrodu stvara magnetsko polje oko elektrode, koje djeluje na sam električni luk. [1] Stoga elektrodu možemo smatrati ravnim vodičem. Lorentzova sila djeluje okomito na smjer silnica, tj. okomito na vodič (električni luk) te uzrokuje pinch efekt, suženje presjeka metalne kapljice. Smjer Lorentzove sile može se odrediti pomoću pravila desne ruke; ispruženi prsti pokazuju smjer struje, dok tada palac pokazuje smjer sile. [2]

Na slici 1. je prikazan smjer djelovanja magnetskog polja na ravan vodič kojim teče struja. [3]



Slika 1. Smjer djelovanja magnetog polja na ravan vodič kojim teče struja [3]

3. Osnove magnetskog puhanja električnog luka

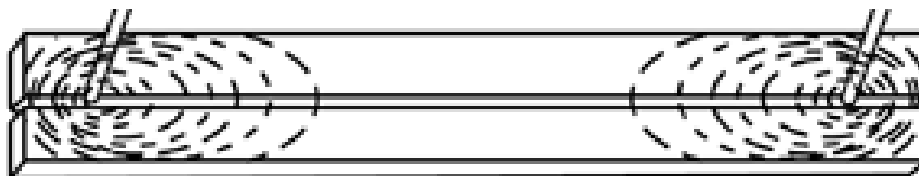
Prilikom zavarivanja električnim lukom stvara se magnetsko polje oko elektrode, intenzitet silnica magnetskog polja smanjuje se što su one udaljenije od elektrode. Ukoliko dođe do poremećaja magnetskog polja uslijed djelovanja nekog vanjskog izvora, može uslijediti specifična pojava koja se naziva magnetsko puhanje luka. Ovaj fenomen može uzrokovati mnoge pogreške u zavarenom spoju kao što su; nedovoljna penetracija, pojava pora, nepotpun provar, nedovoljna mješanje osnovnog i dodatnog materijala. Magnetsko puhanje se uglavnom događa prilikom zavarivanja istosmjernom strujom. U nekim slučajevima može se dogoditi da je nemoguće u potpunosti eliminirati puhanje luka, ali se mogu poduzeti koraci kako bi se reduciralo njegovo negativno djelovanje na kvalitetu zavarenog spoja. [4]

3.1. Uzroci magnetskog puhanja luka

Mnogo je razloga zbog kojih može doći do magnetskog puhanja luka prilikom zavarivanja, u nastavku će biti navedeni neki od njih, te načini kako se puhanje luka može smanjiti ili izbjeći.

3.1.1. Početak i kraj procesa zavarivanja

Silnice magnetskog toka ostaju kružne kada se nalaze u jednom mediju, no kada se medij promijeni na primjer iz čelične ploče u zrak, dolazi do stiskanja silnica te se one nastoje koncentrirati u čeliku gdje nailaze na mnogo manji otpor nego u zraku. Dolazi do deformacije elektromagnetskih sila u električnom luku. Stiskanje silnica uzrokuje njihovu povećanu koncentraciju ispred ili iza električnog luka, što za posljedicu ima njegovo puhanje. Zbog toga što se luk nastoji kretati u smjeru koji će olakšati stiskanje silnica i vratiti ravnotežu magnetskog polja. Na slici 2. prikazana je povećana koncentracija silnica pri prijelazu električnog luka iz jednog medija u drugi. [5]

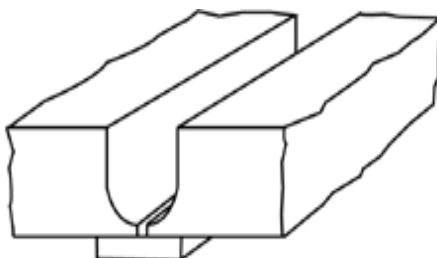


Slika 2. Povećana koncentracija silnica u blizini električnog luka [5]

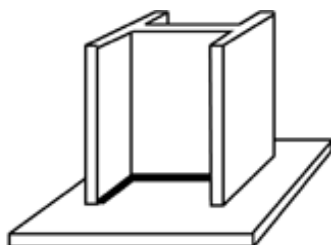
Na početku izvođenja zavarenog spoja silnice su koncentrirane iza elektrode, električni luk nastoji kompenzirati ovu neravnotežu tako što se pomiče prema naprijed, stvara se prednje puhanje luka. Kako se elektroda približava kraju spoja, koncentracija silnica je ispred elektrode, električni luk reagira tako što se pomiče prema nazad, nastaje stražnje puhanje luka. Na sredini spoja ako su komponente iste debljine magnetsko polje je simetrično i ne dolazi do puhanja, ako bi jedna komponenta bila deblja, moglo bi doći do bočnog puhanja luka. [5]

3.1.2. Geometrija i priprema zavarenog spoja

Pojava puhanja luka je česta i kod sučeljenih spojeva te kod debljih spojeva gdje je problem sama priprema spoja. Uzrok puhanja je isti kao i u prethodnom primjeru, silnice se koncentriraju ispred ili iza elektrode, što uzrokuje pomicanje luka. Na slikama 3. i 4. prikazane su situacije gdje će se vjerojatno pojaviti puhanje luka, ako se zavaruje istosmjernom strujom. [5] Na slici 5. prikazano je puhanje luka uslijed različitih debljina radnih komada koji se zavaruju. [5]



Slika 3. Geometrija spoja kod kojeg će se vjerojatno pojaviti puhanje luka [5]



Slika 4. Geometrija spoja kod kojeg će se vjerojatno pojaviti puhanje luka [5]

U ovom primjeru rješenje za otklanjanje puhanja luka može biti prelazak na izmjeničnu struju. [5]



Slika 5. Puhanje električnog luka uslijed različitih debljina radnih komada koji se zavaruju [4]

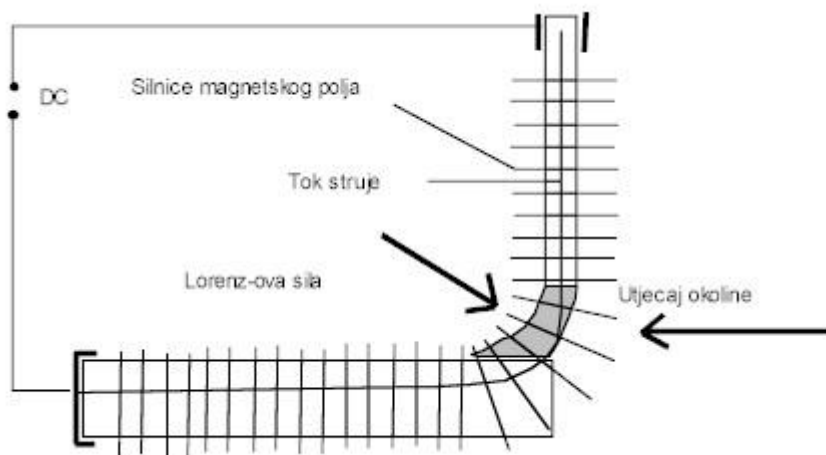
U ovom slučaju najbolje je promijeniti kut elektrode kako bi se kompenziralo puhanje luka, kao što je to prikazano na slici 6. [4]



Slika 6. Promjena kuta elektrode kako bi se kompenziralo puhanje električnog luka [4]

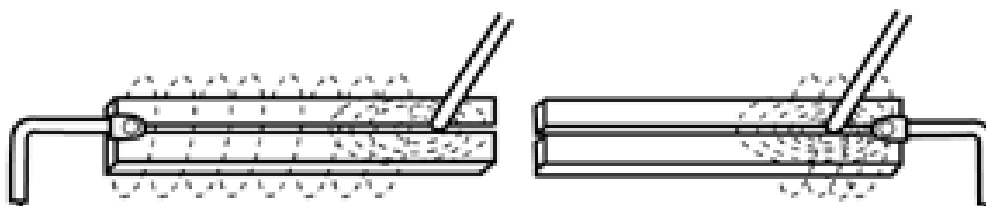
3.1.3. Inducirani magnetni tok u radnom komadu

Drugi fenomen koncentracije silnica magnetskog polja uzrokovan je induciranim magnetskim poljem unutar radnog komada. Naime struja koja prolazi radnim komadom inducira magnetsko polje, na mjestu gdje tok električne struje dolazi u blizinu radnog komada dolazi do povećane koncentracije silnica, jer su na istom mjestu prisutne silnice magnetskog polja elektrode i radnog komada. [5] Na slici 7 je prikazano inducirano magnetsko polje u radnom komadu i puhanje luka kao njegova posljedica. [6]



Slika 7. Inducirani magnetski tok u radnom komadu i puhanje luka kao posljedica [6]

Silnice magnetskog polja u radnom komadu mogu pospješiti ili reducirati puhanje luka, tako da je upravljanje strujom koja prolazi kroz radni komad jedan od načina kontrole puhanja luka. Na slici 8. prikazana su dva načina postavljanja priključka struje na radni komad. [5]



Slika 8. Dva načina postavljanja priključka struje na radni komad [5]

Na slici 8. lijevo, priključak struje je spojen na početak radnog komada, te inducirano magnetsko polje u radnom komadu zajedno s magnetskim poljem elektrode uzrokuje puhanje luka prema naprijed. Međutim uzimajući u obzir puhanje luka koje bi se dogodilo na kraju spoja i koje bi bilo prema nazad, magnetsko puhanje uzrokovano induciranim poljem u radnom komadu djelovalo bi pozitivno, ublažilo bi puhanje luka na kraju spoja. [5]

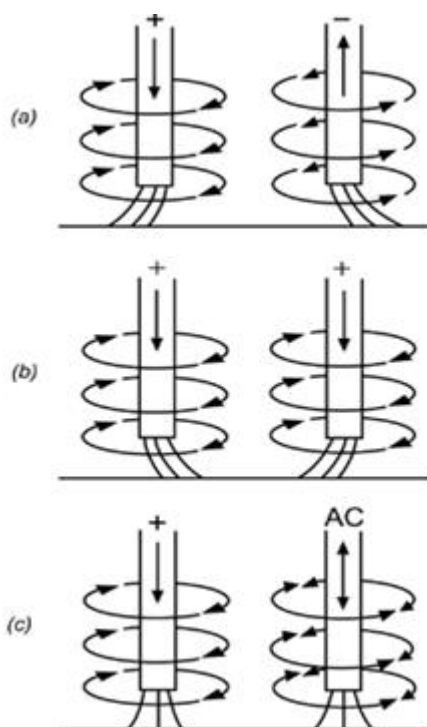
Na slici 8. desno, priključak struje je spojen na kraj radnog komada, te inducirano magnetsko polje u radnom komadu zajedno s magnetskim poljem elektrode uzrokuje puhanje luka prema nazad. Takvo puhanje luka bi pospješilo puhanje luka na kraju spoja koje je također prema nazad, u ovom primjeru bi magnetsko puhanje luka uzrokovano induciranim magnetskim poljem u radnom komadu djelovalo negativno. No može se dogoditi da zavarivač namjerno

tako postavi priključak struje na radni komad kako bi se ublažilo puhanje luka prema naprijed koje se događa na početku spoja. [5]

Uzimajući u obzir da je puhanje luka uzrokovano induciranim magnetskim poljem slabije nego ono uzrokovano magnetskim poljem elektrode, upravljanje strujom koja prolazi kroz radni komad nije dostatan način kontrole puhanja luka, potrebno je poduzeti i druge mjere. [5]

3.1.4. Zavarivanje s više elektroda

Korištenje više elektroda u procesu zavarivanja povećava brzinu zavarivanja i poboljšava produktivnost samog procesa. No upravo ovakav način zavarivanja može uzrokovati puhanje luka, naročito ako su dva električna luka blizu jedan drugome, njihova magnetska polja međusobno reagiraju i uzrokuju puhanje u oba luka. Na slici 9. a) i b) prikazane su situacije u kojima će se dogoditi puhanje luka, dok je na slici 9. c) prikazano kako izbjeći puhanje luka prilikom zavarivanja s više elektroda. [5]



Slika 9. Reakcije magnetskih polja kada su električni lukovi jedan do drugoga [5]

Na slici 9. a) zavarivanje se vrši istosmjernom strujom, jedna elektroda je na – polu, dok je druga na + polu, što uzrokuje puhanje luka na način da se oni odbijaju.

Na slici 9. b) zavarivanje se vrši istosmjernom strujom, te su obje elektrode istog polariteta (+), dva magnetska polja se suprotstavljaju jedan drugom, što uzrokuje slabije polje između njih i naposljetku njihovo privlačenje. [5]

U pravilu, kada se koristi više elektroda, predlaže se da jedna bude na istosmjernoj struji (DC), a druga na izmjeničnoj (AC) kako je prikazano na slici 9. c). U tom slučaju magnetsko polje izmjenične struje se u potpunosti mijenja u vremenu i nema gotovo nikakvog utjecaja na magnetsko polje istosmjerne struje, kao rezultat toga nema puhanja električnih lukova. [5]

Drugo rješenje koje se često koristi kako bi se eliminiralo puhanje luka kod zavarivanja s više elektroda je to da obje elektrode budu na izmjeničnoj struji. Puhanje luka zbog intereferencije dvaju magnetskih polja izmjenične struje se izbjegne tako da se struja jednog luka pomakne u fazi za 80-90 stupnjeva od drugog luka. Pomoću faznog pomaka strujno i magnetsko polje jednog luka doseže maksimum kada je strujno i magnetsko polje drugog luka na minimumu ili blizu njega. Kao rezultat toga, postoji vrlo malo puhanje luka. [5]

3.1.5. Učvršćivači radnog komada

U pripremi procesa zavarivanja treba paziti na učvršćivače radnog komada, naime čelična oprema za držanje većih radnih komada mogu utjecati na magnetsko polje luka i na luk, te se mogu magnetizirati tijekom vremena. U pravilu to nije problem pri zavarivanju sa strujama do 250 A, no za veće struje zavarivanja i pri mehaniziranom zavarivanju treba obratiti pozornost na konstrukciju učvršćivača kako ne bi došlo do situacije pri kojoj je puhanje luka izgledno. [5]

3.2. Načini sprječavanja puhanja luka

Moguće je poduzeti mjere kako bi se spriječilo puhanje luka, ponekad se ono neće moći u potpunosti eliminirati, ali će se ublažiti njegovo negativno djelovanje na proces zavarivanja.

U prošlim poglavljima su navedena neka rješenja, neka će biti navedena u nastavku. [4]

Neki od načina su sljedeći: [4]

- ukoliko se pri korištenju istosmjerne struje pojavljuje puhanje luka, ako tehnologija zavarivanja dozvoljava, treba prijeći na izmjeničnu struju
- držati luk što kraćim, kako bi se sile u luku suprostavile puhanju
- smanjiti struju zavarivanja, ako to dopušta tehnologija zavarivanja
- kompenzirati kut elektrode, kako je to izvedeno na slici 7.
- napraviti pripoje na početku i na kraju radnog komada kako bi se izbjeglo puhanje koje bi se dogodilo na slici 2.
- napraviti veći broj pripoja
- omotati radni kabel oko radnog komada kako bi se kompenziralo inducirano magnetsko polje koje nastaje u random komadu ako je on priključen na struju
- pokušati bolje namjestiti parametre zavarivanja
- promijeniti geometriju pripreme radnog komada kako bi se smanjila koncentracija silnica električnog luka
- rasporediti masu na više mjesta

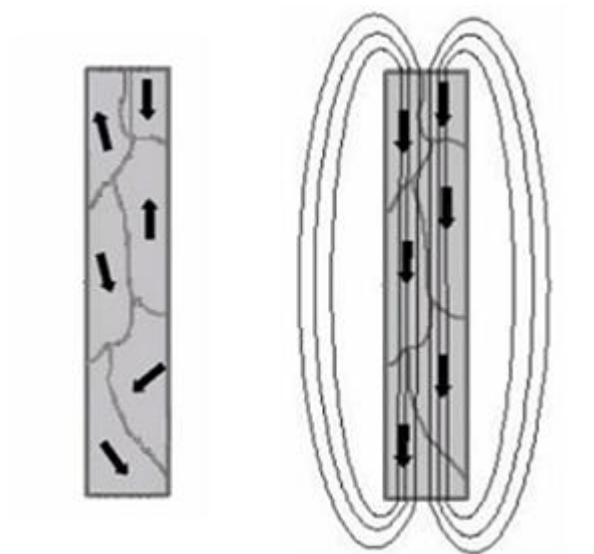
4. Puhanje luka uzrokovano zaostalim magnetizmom u materijalu

Do sada navedeni uzroci puhanja luka ne uključuju pojavu zastalog magnetizma koji se vrlo često javlja u praksi. Mehanizam nastanka puhanja luka isti je kao i u prethodnim primjerima, no razlika je u tome što je sada magnetsko polje već prisutno u materijalu, te ga je potrebno eliminirati, kako bi zavarivanje bilo uspješno.

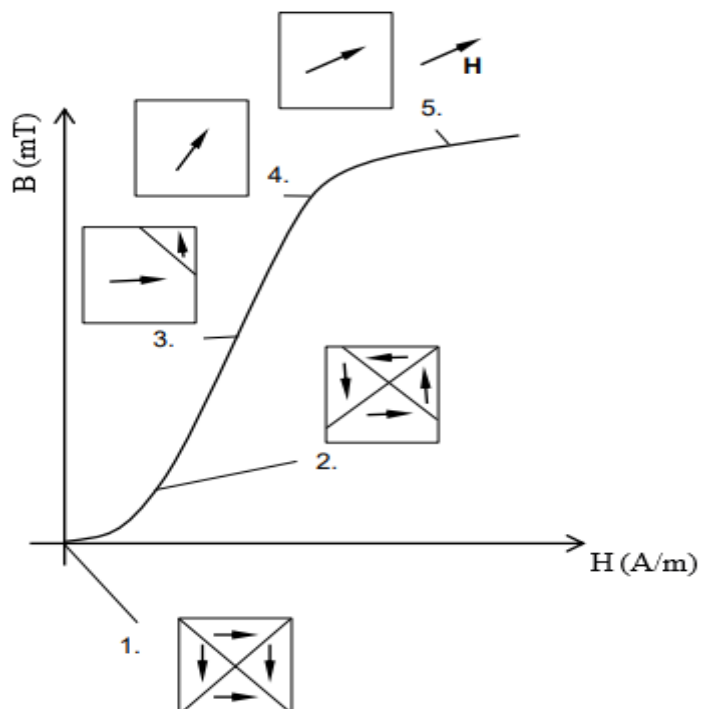
4.1. Feromagnetizam i ferimagnetizam

Feromagnetizam je svojstvo materijala, poput željeza (ferro), da 'zapamti' učinak magnetskog polja kojem je bio izložen. Narinuto magnetsko polje djeluje tako da inducira dipolni moment ili magnetizira materijal, s tim što mijenja kutne brzine elektrona u orbitama. Takvi materijali se sastoje od mnoštva mikroskopskih domena (područja) – skupine atoma promjera cca.

5×10^{-5} m. U pojedinim domenama magnetski momenti mogu biti sinkronizirani ali smjerovi magnetskih sila različitih domena ostaju nasumično raspoređeni kao što je to prikazao na slici 10. lijevo. Razlika između feromagnetizma i ferimagnetizma nastaje iz toga što su molekularni dipoli unutar svake domene nakon magnetiziranja u feromagneticima svi paralelni, kako je to prikazano na slici 10. desno, dok jake međuatomske veze u ferimagnetskim materijalima prisiljavaju neke molekularne dipole u svakoj domeni da budu antiparalelni glavnom smjeru magnetiziranja u domeni. Ako maknemo prineseni magnet, domene će se obično ponovno vratiti u prvobitne položaje a svojstva magneta će nestati. Ukoliko feromagnet stavimo u izuzetno jako magnetsko polje kroz određeno vrijeme, domene će ostati trajno sinkronizirane čime dobivamo permanentni magnet. Ovaj efekt prema kojem je trenutno stanje magnetiziranja materijala ovisno o njegovoj magnetskoj povijesti poznat je kao histereza. [7,8] Na slici 11. je prikazana kivolja magnetiziranja za feromagnetske materijale. [9]



Slika 10. Stanje feromagneta prije izlaganja magnetskom polju (lijevo) i nakon izlaganja magnetskom polju (desno) [7]



Slika 11. Krivulja magnetiziranja feromagnetskog materijala [9]

Magnetske domene u materijalu su ograničene granicama, smjer magnetizacije susjednih domena rotira u granici domene. Kako se pojačava intenzitet jakosti vanjskog magnetskog polja H , tako se smjer magnetizacije svih domena okreće u smjeru vanjskog polja H . Granice između domena nestaju, kako ih je sve više poravnato u istom smjeru. [9]

1. Nemagnetizirano stanje materijala
2. Početak gibanja granica domena
3. Nastavak gibanja granica domena te rotacija domena
4. Završetak pomicanja granica domena
5. Magnetizirano stanje, približavanje području zasićenosti [9]

Feromagneti imaju visoku relativnu magnetsku permeabilnost. Magnetska permeabilnost (μ) je konstanta proporcionalnosti između magnetske indukcije i intenziteta magnetskog polja i za vakuum iznosi $\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m. Magnetska permeabilnost se obično izražava kao relativna vrijednost. Ako μ predstavlja magnetsku permeabilnost tražene tvari, relativna magnetska permeabilnost je dana izrazom $\mu_r = \mu / \mu_0$, reda veličine 500 - 1000000, znači da je utjecaj magnetskog polja na takve materijale jako velik (reda veličine 10000x veći nego na zrak/vakuum). Najpoznatiji materijali s izraženim feromagnetskim svojstvima su željezo, kobalt i nikal. U tablici 1. je prikazana relativna permeabilnost za željezo i nikal. [7]

Tablica 1. Relativna permeabilnost željeza i nikla [7]

Materijal	Relativna permeabilnost (μ_r)
Željezo	5000
Nikal	600

4.2. Uzorci zaostalom magnetizmu

Znanstveno tumačenje je da je magnetizam sila međudjelovanja između električki nabijenih čestica u gibanju; brzine gibanja čestica su bliske brzini svjetlosti. Na atomskom nivou dakle radi se o relativnom gibanju elektrona - negativno nabijenih subatomske čestice. [7] Zaostali magnetizam može nastati samo u feromagnetičnim materijalima. U velikoj mjeri ovisi o prethodnim postupcima proizvodnje i rukovanja materijalom. Prvi magnetski utjecaj materijal susreće već u čeličani. Pod utjecajem magnetskog polja zemlje, valjanje, žarenje i transportni

procesi mogu magnetizirati materijal. U daljnjem životnom vijeku materijal se susreće s jačim ili slabijim magnetskim poljima. Ispitivanje materijala na pukotine magnetima, zavarivanje, plazma rezanje, magnetski podizači tereta, razni alati, naprave za stezanje, elektrostatsko nanošenje boje na materijal i slični postupci mogu izazvati pojavu zaostalog magnetizma u materijalu. [9] U tablici 3. je prikazano koliki intezitet magnetskog polja mogu izazvati pojedini uzroci magnetiziranja materijala. [8]

Konstruktivski čelici visoke čvrstoće skloniji su magnetiziranju nego oni niže čvrstoće, razlog tome je njihov kemijski sastav, sadrže kemijske elemente više relativne permeabilnosti. Nikal kao legirni element uvelike povećava magnetsku osjetljivost materijala. [9]

Lokalne strukturne promjene materijala povećavaju mogućnost magnetiziranja, to znači da lokalne zone ili veći dijelovi površine čelika mogu pokazivati veću sklonost k zaostalom magnetizmu. Zaostali magnetizam nastaje i pri prijelazu iz čelika u zrak, to može biti mjereno kao jakost magnetskog polja na tom mjestu. Uzrok može biti i geometrija obradka kako je i navedeno u prošlim poglavljima, pri suženjima ili izbočenim rubovima nastaje veća koncentracija magnetskih silnica. Također može se odvijati i u zatvorenim magnetskim krugovima u materijalu, kao što je to slučaj u zavarenim cijevima pod vodom.

Zaostali magnetizam negativno utječe na daljnje procese u životnom vijeku materijala. [9]

Najveće probleme stvara u zavarivanju i elektromagnetskom bojanju materijala. [9]

U tablici 2. navedene su osnovne fizikalne veličine i mjerne jedinice u magnetizmu. [7]

Tablica 2. Osnovne fizikalne veličine i mjerne jedinice u magnetizmu [7]

Fizikalna veličina	Simbol	Mjerna jedinica
Magnetski tok	Φ	Weber (Wb)
Intezitet magnetskog polja	H	A/m
Gustoća magnetskog polja	B	T (tesla)

Tablica 3. Iznos inteziteta magnetskog polja ovisno o uzroku magnetiziranja [8]

Intezitet magnetskog polja (A/cm)	Uzrok magnetiziranja
>100	Magnetska metoda ispitivanja materijala na pukotine, korištenje jakih magneta za podizanje, oprema za stezanje
20-50	Zavarivanje, korištenje alata koji su magnetizirani
10-20	Elektrostatsko nanošenje boje, PVD postupak i slično
2-10	Strukturne promjene u materijalu prilikom toplinske obrade
0,4-2	Vibracije i utjecaj Zemljinog magnetskog polja
<0,4	Utjecaj Zemljinog magnetskog polja

4.3. Mjerenje zaostalog magnetizma

Kod svake vrste polja (električno, magnetsko, gravitacijsko), jačinu polja određuje tok. Mjerenje magnetskog toka se često opisuje brojem silnica toka iako nije dokazano da takve silnice kao individualne linije stvarno postoje, one su zamišljene crte koje spajaju Sjeverni i Južni pol magneta. [7] Mjerenje zaostalog magnetizma postaje kriterij kvalitete u modernoj industriji, iako se ponajviše odnosi na zavarivanje i u drugim granama, kao na primjer autoindustriji, proizvodnji elektroničkih komponenti, medicinskih pomagala, minijaturnih komponenti za proizvodnju satova i slično zahtjeva se minimalan mogući zaostali magnetizam u materijalu ili komponentama proizvoda, kako bi se osiguralo ispravno provođenje procesa proizvodnje i u konačnici funkcioniranje proizvoda. [9]

Prije početka zavarivanja treba provjeriti postoji li prisutnost magnetskog polja u materijalu i kojeg je ono iznosa. To se obavlja ručnim mjernim uređajem Teslametrom ili Gaussmetrom, ovisno o mjernoj jedinici gustoće magnetskog polja. Po svojoj prirodi zaostali magnetizam može se mjeriti samo na površini materijala. Dobivena vrijednost ovisi o konstrukciji na kojoj se izvodi mjerenje kao i o konstrukciji i izvedbi mjerne sonde. Iz prakse je utvrđeno da gustoća magnetskog polja iznad 0,002 T može uzrokovati magnetsko puhanje luka. [9] Na slici 12. je prikazano mjerenje zaostalog magnetizma prije zavarivanja cjevovoda na terenu. [10]



Slika 12. Mjerenje zaostalog magnetizma prije zavarivanja cjevovoda na terenu [10]

4.4. Uklanjanje zaostalog magnetizma iz materijala

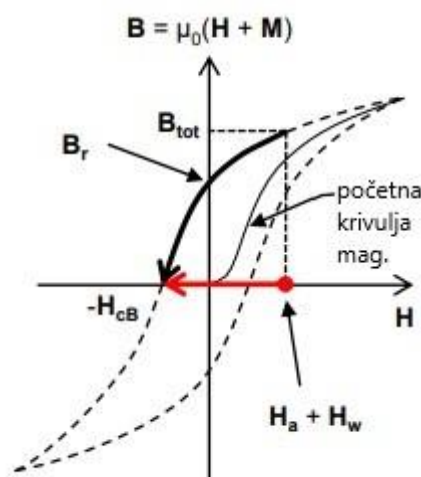
Magnetsko polje radnog komada koji se zavaruje te magnetsko polje električnog luka svojim međudjelovanjem uzrokuju magnetsko puhanje luka. U koliko se puhanje luka nastavlja, a poduzete su sve mjere koje se tiču tehnologije zavarivanja (promjena parametara, geometrije spoja...) tada da bi se eliminiralo magnetsko polje radnog komada samim time i puhanje električnog luka koje za sobom nosi nestabilnost procesa i mnoge pogreške u procesu, koriste se sljedeće metode: [9,11]

- suprotnog polja
- knockdown
- demagnetizacija.

4.4.1. Metoda suprotnog polja

Magnetsko polje u radnom komadu nastoji se neutralizirati suprotnim magnetskim poljem specifične amplitude. Istosmjerna struja se podešava na izvoru napajanja koji generira suprotno polje u zavojnicu, koja je omotana oko radnog komada.

Ovo suprotno polje se suprotavlja magnetskom polju u radnom komadu , te kada se primjenjuje optimalna struja kroz zavojnicu, početno magnetsko polje radnog komada može se uvelike neutralizirati. Na slici 13. prikazana je promjena magnetskog polja u materijalu čije je magnetsko polje bilo izloženo suprotnom magnetskom polju. [9]



Slika 13. Djelovanje suprotnog magnetskog polja na početno magnetsko polje radnog komada [9]

H_a - magnetsko polje radnog komada

B_r - zaostali magnetizam u radnom komadu

H_w - magnetsko polje električnog luka zavarivanja

H_{rev} - suprotno magnetsko polje inducirano sa ciljem neutralizacije magnetskog polja zaostalog magnetizma

B_{tot} - ukupni magnetizam (električnog luka i zaostalog magnetizma)

$$H_{rev} = H_a + H_w + H_cB$$

Uslijed djelovanja suprotnog polja, ukupni magnetizam pada na nulu, kako je i prikazano na slici 13.

Suprotno magnetsko polje ostaje uključeno za vrijeme zavarivanja, jer ako se isključi ukupni magnetizam će opet porasti na vrijednost B_{tot} i uzrokovati puhanje luka. [9]

Prednosti ove metode: [9,11]

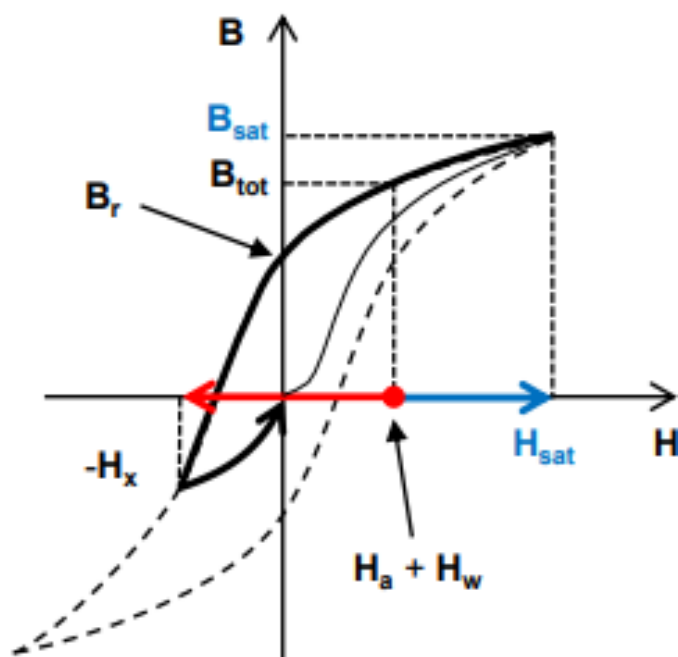
- može se postići konvencionalnom opremom za zavarivanje, potreban je prilagodljivi ispravljač za zavarivanje i kabel dovoljne duljine
- metoda je teoretski u stanju neutralizirati bilo koju vrstu magnetskih polja

Nedostaci ove metode: [9,11]

- potrebno je izmjeriti jačinu magnetskog polja u materijalu, kako bi se odabrala ispravna jačina suprotnog polja, što može dovesti do metoda pokušaja i pogrešaka
- namatanje zavojnice oko ili na radni komad se ponekad ne može izvesti zbog geometrije radnog komada
- moderni aparati za zavarivanje temelje se na invertorskoj tehnologiji, te se ova metoda teško može implementirati u tim sustavima.

4.4.2. *Knockdown metoda*

Prvi korak ove metoda je magnetiziranje radnog komada do magnetskog zasićenja. Drugi korak jest primjena suprotnog polja na način da nakon uklanjanja suprotnog polja, magnetsko polje u radnom komadu padne na nulu. Na slici 14. je prikazana promjena magnetskog polja u materijalu koji je izložen ovoj metodi. [9]



Slika 14. Promjena magnetskog polja u materijalu koji je izložen “knockdown” metodi [9]

H_a - magnetsko polje radnog komada

B_r - zaostali magnetizam u radnom komadu

H_w - magnetsko polje električnog luka zavarivanja

H_{rev} - suprotno magnetsko polje inducirano sa ciljem neutralizacije magnetskog polja zaostalog magnetizma

H_x - magnetsko polje, kada ukupni magnetizam B padne na 0, nakon micanja suprotnog polja H_{rev} .

Materijal je magnetiziran do granice zasićenja (H_{sat} , B_{sat}), potom slijedi podešavanje suprotnog polja $H_{rev} = H_a + H_w^* + H_x$. kako je i prikazano na slici 14.

H_w^* u praksi je magnetsko polje električnog luka zavarivanja često izostavljeno za vrijeme podesivanja suprotnog polja.

Suprotno magnetsko polje se ukloni za vrijeme trajanja zavarivanja.

Ukupni magnetizam B_{tot} , ostaje na 0 i poslije uklanjanja suprotnog polja. [9]

Prednosti ove metode: [9]

- zavojnica se može ukloniti s radnog komada prije kraja zavarivanja
- radni komad se može unaprijed pripremiti za zavarivanje.

Nedostaci ove metode: [9]

- nakon određenog vremena, opet dolazi do magnetiziranja materijala, zbog zaostalog magnetizma koji se polako širi prema “knockdown” zoni (uobičajeno nakon 1-2 sata)
- u slučaju jakog magnetskog polja u materijalu, potrebno je naknadno dodatno provesti metodu suprotnog polja, jer u tom slučaju “knockdown metoda” sama nije dovoljna
- namatanje zavojnice oko ili na radni komad se ponekad ne može izvesti zbog geometrije radnog komada

4.4.3. Metoda demagnetizacije

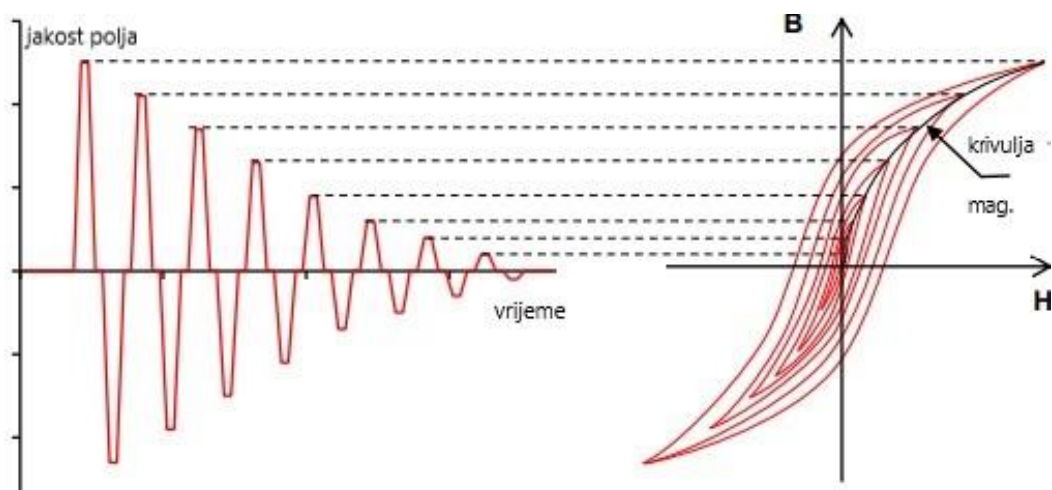
Ova metoda se temelji na izmjenjivom magnetskom polju uzrokovanom zavojnicom koje se s vremenom smanjuje. Izvor napajanja generira obrtanje struje (DC ili AC) sa smanjenom amplitudom. Proces uzrokuje demagnetiziranje materijala uzastopnim smanjivanjem petlje histereze. Materijal je prvo potpuno magnetiziran, nakon toga obrnuti polaritet magnetskih zona i smanjenje amplitude polja dovodi do statističke raspodjele domene magnetizacije. [9,11]

Kvaliteta procesa ovisi o sljedećim parametrima: [9,11]

- maksimalna jakost polja (za magnetsko zasićenje materijala)
- frekvencija obrtanja polova (niža frekvencija za veću dubinu prodiranja)
- proširenje efektivnog magnetskog polja (visoki efektivni raspon za pokrivanje velikih površina)
- homogenost efektivnog raspona (uniformnost polja unutar efektivnog raspona).

4.4.3.1. Demagnetizacija promjenama polja istosmjerne struje (DC)

Na slici 15. je prikazano magnetsko stanje u materijalu prilikom ovog postupka demagnetizacije.



Slika 15. Stanje magnetskog polja materijala prilikom demagnetizacije promjenom polova DC struje [8]

Smanjivanjem frekvencije istosmjerne struje (DC) i promjenom polova, smanjuje se jakost magnetskog polja u vremenu kako je i prikazano na slici 15. lijevo. Ukupni magnetizam u materijalu pada na 0, kako je prikazano na slici 15. desno.

Prednosti ove metode: [9,11]

- nije potrebno upotrebljavati druge metode zajedno s ovom
- nije potrebno prilagođavati izvor napajanja.

Nedostaci ove metode: [9,11]

- relativno dugo vrijeme trajanja demagnetizacije
- dugo vrijeme trajanja uzrokuje zagrijavanje zavojnice, potrebno ju je ohladiti kako bi se moglo postići magnetsko zasićenje u materijalu.

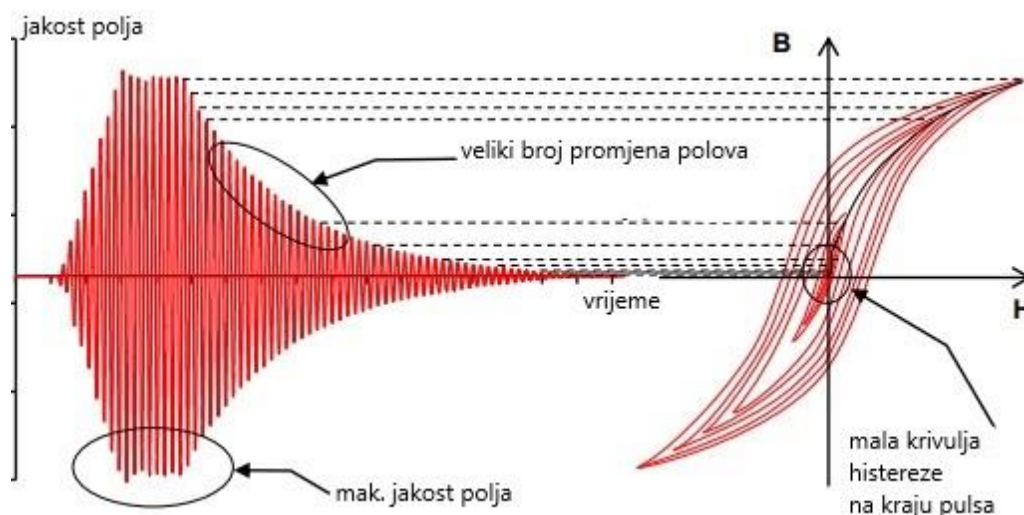
4.4.3.2. Demagnetizacija pomoću sinusnog pulsa visokog inteziteta

Karakteristike ovog procesa su sljedeće: [9]

- koristi se za demagnetizaciju većih površina i debljih materijala (i do 60 mm)
- korištenje magnetskih polja visokih jačina (50-100 kA/m) za uklanjanje zaostalog magnetizma velikog inteziteta te za veće dubine prodiranja

- frekvencija demagnetizacije je 5-20 Hz
- trajanje impulsa 6-20 s, ovisno o frekvenciji
- sinusni val omogućuje raspodjelu i smjer domena magnetizacije unutar materijala.

Na slici 16. Prikazano je stanje magnetskog polja materijala prilikom demagnetizacije pomoću sinusnog pulsa visokog inteziteta. [9]



Slika 16. Stanje magnetskog polja materijala prilikom demagnetizacije pomoću sinusnog pulsa visokog inteziteta. [9]

Jakost magnetskog polja naglo počinje padati uslijed velikog broja promjene polova, te dođe do nule. Krivulja histeroze se smanjuje te je na kraju pulsa minimalna, kako je i prikazano na slici 16. [9]

Prednosti ove metode: [9]

- postupak je jako brz što omogućuje demagnetizaciju radnih komada većih debljina
- materijal je optimalno demagnetiziran, postignuto je stanje 1. sa slike 11.
- ne zahtjeva preinake izvora energije, dovoljno je pritiskanje prekidača za aktiviranje pulsa.

Nedostaci ove metode: [9]

- uređaj zahtjeva električnu mrežu veće snage nego što je uobičajeno, ako se koristi na terenu, potreban je generator s dovoljno vršne struje,
- skuplji izvor energije.

4.5. Oprema i primjeri metoda uklanjanja zaostalog magnetizma

U tablici 4. su prikazani prikladni izvori energije za određene metode uklanjanja zaostalog magnetizma iz materijala. [9]

Tablica 4. Prikladni izvori energije za određene metode uklanjanja zaostalog magnetizma iz materijala [9]

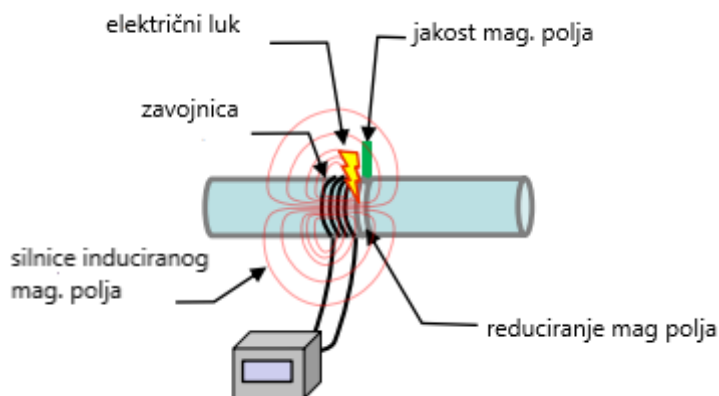
Izvor energije / metoda	Suprotnog polja	Knockdown	Demagnetizacija
Ispravljač ili DC izvor	Da	Da	Ne
Reverzibilni strujni izvor	Da	Da	Da
AC izvor velike snage	Ne	Ne	da

U nastavku je pokazano nekoliko primjera metoda uklanjanja zaostalog magnetizma iz materijala.

1) Kabeli namotani oko radnog komada u blizini izvođenja zavarivanja. [9,11]

- pogodno za sve metode
- efekt ovisi o tome koliko blizu možemo omotati kabele tj. zavojnicu.

Na slici 18. je prikazan shema primjera 1) [9]

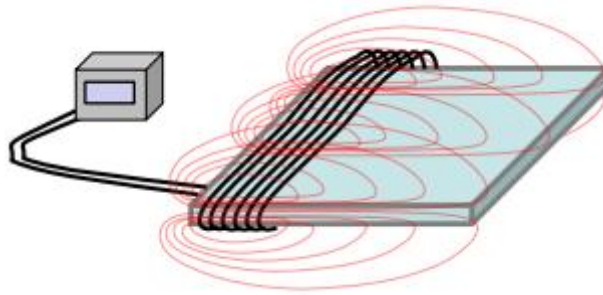


Slika 17. Obodno namatanje kabela oko radnog komada [9]

2) Kabeli namotani obodno oko ploče [9]

- prikladno za knockdown metodu i demagnetizaciju
- moguće samo s fleksibilnim kabelima
- za demagnetizaciju cijele ploče potrebno je pomicati ploči i ponovno namatati kabele.

Na slici 18. prikazana je shema primjera 2) [9]

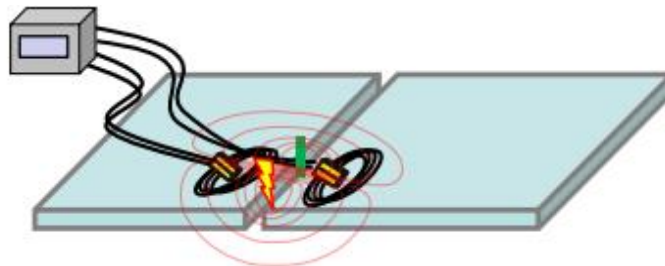


Slika 18. Obodno namatanje kabela oko ploče [9]

3) Kabeli položeni u namotajima na površinu radnog komada [9]

- pogodno za sve metode
- za demagnetizaciju cijele ploče potrebno je pomicati radni komad, ali ne i ponovno namatati kabele.

Na slici 19. prikazana je shema primjera 3) [9]

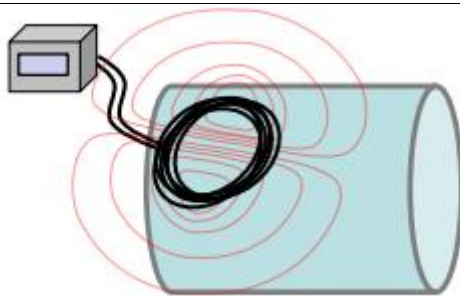


Slika 19. Kabeli položeni u namotajima na površinu radnog komada [9]

4) Kabeli položeni u namotajima na kraj cijevi [9,11]

- prikladno za knockdown metodu i demagnetizaciju
- za demagnetizaciju cijele ploče potrebno je pomicati radni komad, ali ne i ponovno namatati kabele.

Na slici 20. prikazana je shema primjera 4) [9]



Slika 20. Kablei položeni u namotajima na kraj cijevi [9]

4.6. Utjecaj iznosa gustoće magnetskog polja na pojedine postupke zavarivanja

Kako se pojedini konvencionalni postupci zavarivanja razlikuju u svojim parametrima tako je i utjecaj magnetskog polja različit na pojedine konvencionalne postupke zavarivanja.

Ponašanje električnog luka ovisno o iznosu gustoće magnetskog polja za pojedine postupke zavarivanja prikazano je tablici 5. [12]

Tablica 5. Ponašanje električnog luka ovisno o iznosu gustoće magnetskog polja za pojedine postupke zavarivanja [12]

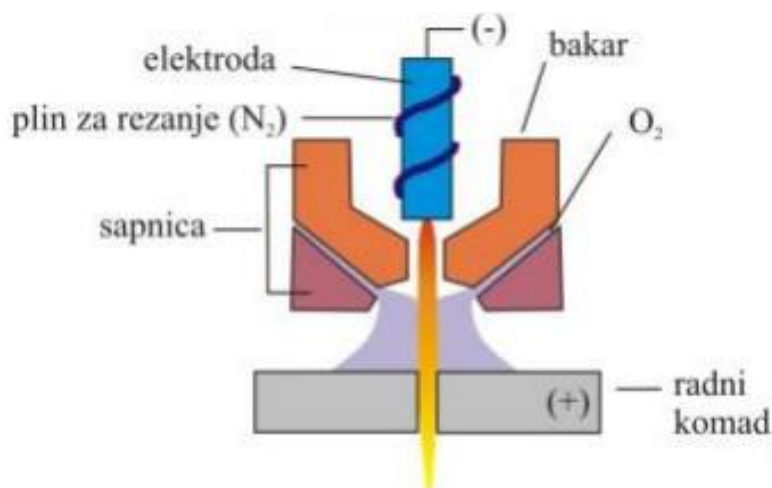
Postupak zavarivanja / iznos gustoće magnetsko polja ($T \times 10^{-4}$)	0-10	10-20	20-40	>40
TIG	Normalno zavarivanje	Počeci nestabilnosti luka	Puhanje luka	Izraženo puhanje luka
REL	Normalno zavarivanje	Normalno zavarivanje	Počeci nestabilnosti luka	Puhanje luka
EPT	Normalno zavarivanje	Normalno zavarivanje	Normalno zavarivanje	Počeci nestabilnosti luka

Iz tablice je vidljivo da je puhanje luka kod TIG postupka počinje pri nižim iznosima gustoće magnetskog polja, što se može pripisati nešto nižim naponima struje zavarivanja kod tog postupka. [12]

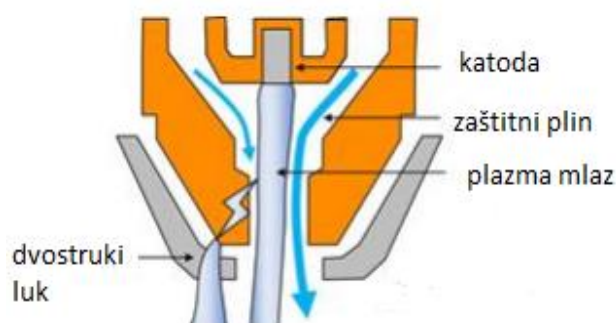
4.7. Magnetsko puhanje električnog luka kod plazma rezanja

Kada se plazma postupkom rezanja reže primjerice magnetizirana čelična ploča, dolazi slično kao kod zavarivanja električnim lukom do magnetskog puhanja luka, koje nepovoljno djeluje na točnost rezanja, te oštećuje mlaznicu zaštitnog plina. Ovdje je problem kod demagnetizacije to što se uobičajeno ovim postupkom režu velike ploče površina i po nekoliko kvadratnih metara [13]. Primjer sheme plazma rezanja prikazan je na slici 21. [14]. Magnetsko puhanje luka uzrokuje još jednu specifičnu pojavu; dvostruki luk.

Naime, kako je plazma mlaz usmjeren ka stijenci mlaznice pod utjecajem Lorentzove sile, te kada dotakne stijenku mlaznice dolazi do spontanog električnog pražnjenja između katode i anode što uzrokuje pojavu dvostrukog luka. Shema nastanka dvostrukog luka prikazana je na slici 22. [13]. Istraživanja su pokazala da do pojave dvostrukog luka dolazi pri gustoći magnetskog polja većoj od 10 mT. Na dalje ustanovljeno je da se granična gustoća magnetskog polja pri kojoj će doći do pojave puhanja luka te potom i dvostrukog luka biti niža što je struja viša te što je protok zaštitnog plina niži. Drugim rječima postupak se treba nastojiti provoditi pri nižoj struji i većem protoku zaštitnog plina. Kako bi se suzbilo puhanje luka bez promjena parametara postupka, može se koristiti zaštitna magnetna kapa, o čemu će više biti rečeno u nastavku [13].



Slika 21. Shema plazma rezanja [14]



Slika 22. Shema nastanka dvostrukog luka [13]

4.7.1. Utjecaj zaštitne feromagnetične kape na puhanje luka kod plazma rezanja

Kako bi provjerili može li magnetna zaštitna kapa od feromagnetskog materijala stvarno pomoći kod suzbijanja puhanja luka, istraživači su napravili eksperiment gdje su prilikom rezanja čelične ploče debljine 16 mm, postavili magnetski jaram tako da je bio učvršćen s obje strane ploče kako bi uzrokovao snažno magnetsko polje u ploči [13]. Parametri korišteni tijekom postupka prikazani su u tablici 6. [13].

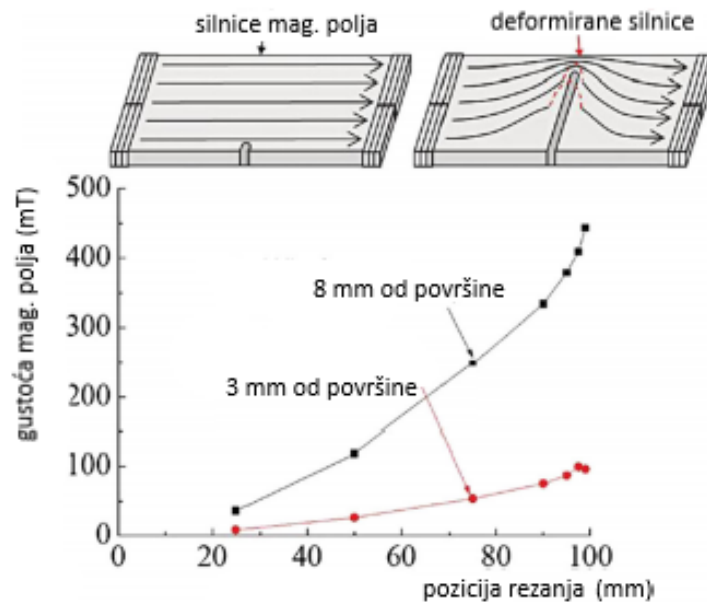
Kako napreduje rezanje tako se gustoća magnetskog toka povećava, kako je prikazano na slici 23. Provedena su 4 ispitivanja to jest 4 različita uvjeta rezanja: [13]

1. bez magneta na ploči i bez zaštitne kape,
2. s magnetima i bez zaštitne kape,
3. s magnetima i sa zaštitnom kapom te
4. s magnetima i zaštitnom kapom s razlikom od 3. u smjeru djelovanju Lorentzove sile, naime u slučaju 3. Lorentzova sila djeluje suprotno od smjera rezanja dok u slučaju 4. djeluje u smjeru rezanja.

Drugim riječima u slučaju 3. Lorentzova sila uzrokuje kašnjenje luka, dok u slučaju 4. djeluje tako da gura luk prema naprijed [13].

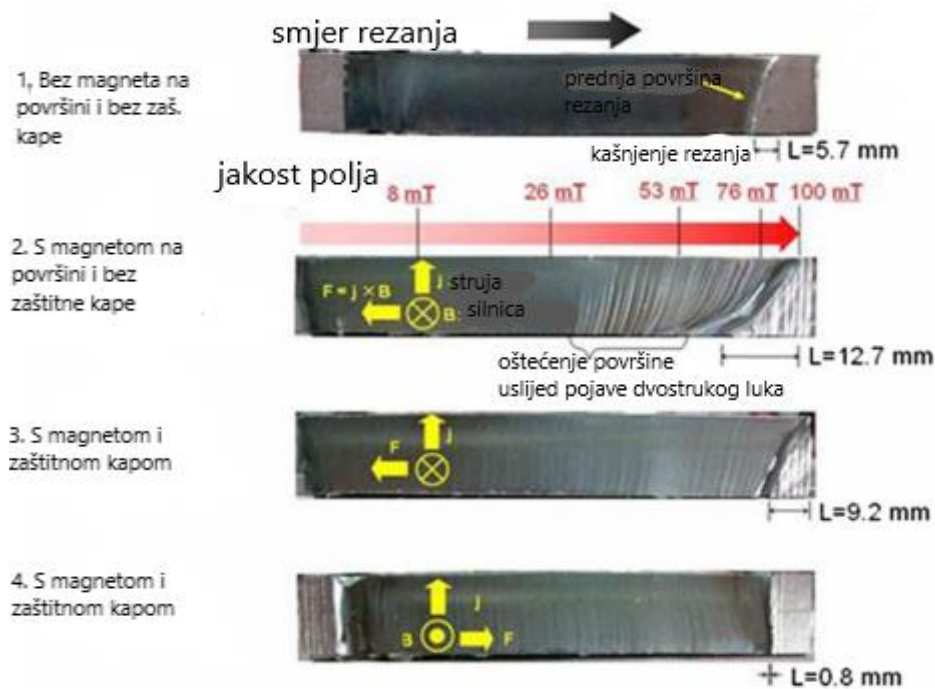
Tablica 6. Parametri procesa plazma rezanja [13]

Jakost struje (A)	150
Promjer mlaznice (mm)	1,6
Zaštitni plin	kisik
Protok zaštitnog plina (L/min)	12
Materijal	
Debljina materijala (mm)	16
Brzina rezanja (mm/min)	2000



Slika 23. Ovisnost gustoće magnetskog polja o poziciji rezanja [13]

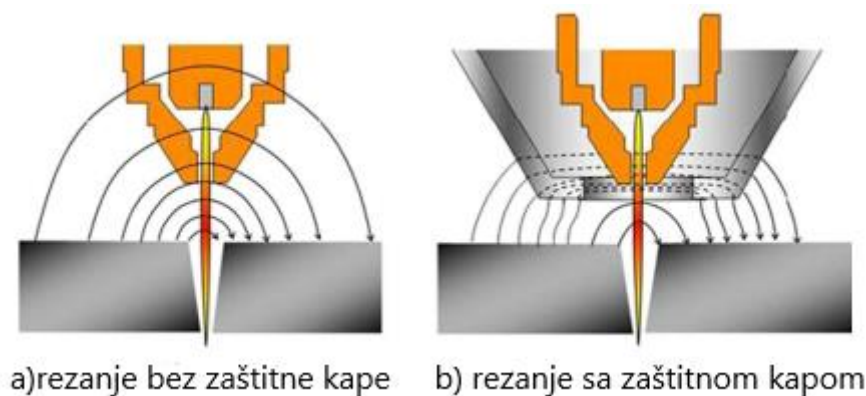
Na slici 24. prikazan je poprečni presjek ploče prilikom 4 uvjeta rezanja koji su navedeni ranije.



Slika 24. Poprečni presjek ploče prilikom 4 uvjeta rezanja [13]

Na slici 24. je vidljivo suprotno djelovanje Lorentzove sile za slučajeve 3 i 4. Kako je ranije navedeno, ovisno o poziciji postavljanja magnetskog jarma, to jest o sjevernom i južnom polu. U slučaju 2. je došlo do jačeg puhanja luka i pojave dvostrukog luka što je i logično uzimajući u obzir to da nije bilo zaštitne kape. U slučaju 3 došlo je do blagog puhanja luka i njegovog kašnjenja uslijed djelovanja Lorentzove sile, no u puno manjoj mjeri nego u slučaju 2. Što je zasluga zaštitne kape, na dalje površina presjeka u slučajevima 3 i 4 je glatka i bez oštećenja, za razliku od slučaja 2 gdje je došlo do oštećenje zbog pojave dvostrukog luka, dodatno se može primjetiti kašnjenje luka u 1. slučaju dok je to otklonjeno u 4. slučaju zbog djelovanja Lorentzove sile prema naprijed [13].

Na slici 25. prikazan je mehanizam zaštite kapom od utjecaja magnetskog polja [13].



Slika 25. Mehanizam zaštite feromagnetskom kapom kod plazma rezanja od utjecaja magnetskog polja [13]

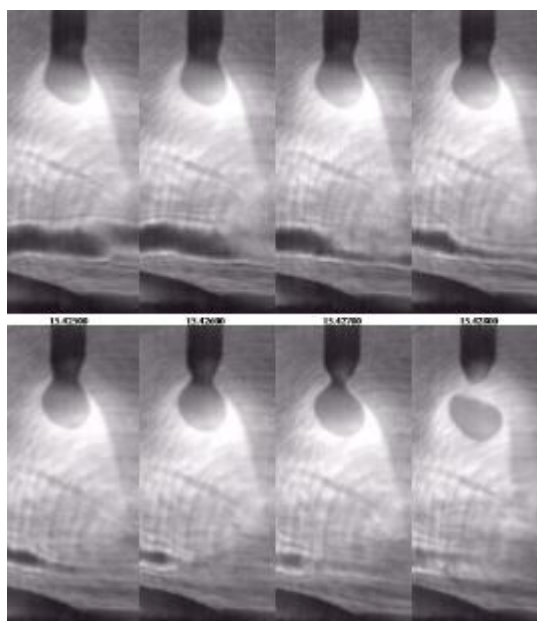
Istraživači su zaključili da zaštitna kapa od feromagnetskog materijala uistinu pomaže otkloniti puhanje luka kod plazma rezanja, a samim time i pojavu dvostrukog luka, kako je i pokazano na prethodnim primjerima [13].

5. Utjecaj magnetskih sila na kapljicu metala u električnom luku

U početnom dijelu rada, navedeno je da se prijenos metala u električnom luku odvija pod djelovanjem različitih sila, od kojih magnetna sila utječe na to da se kapljica metala odvoji od električnog luka. U nastavku će se temeljitije obraditi utjecaj magnetskih sila na kapljicu metala u električnom luku.

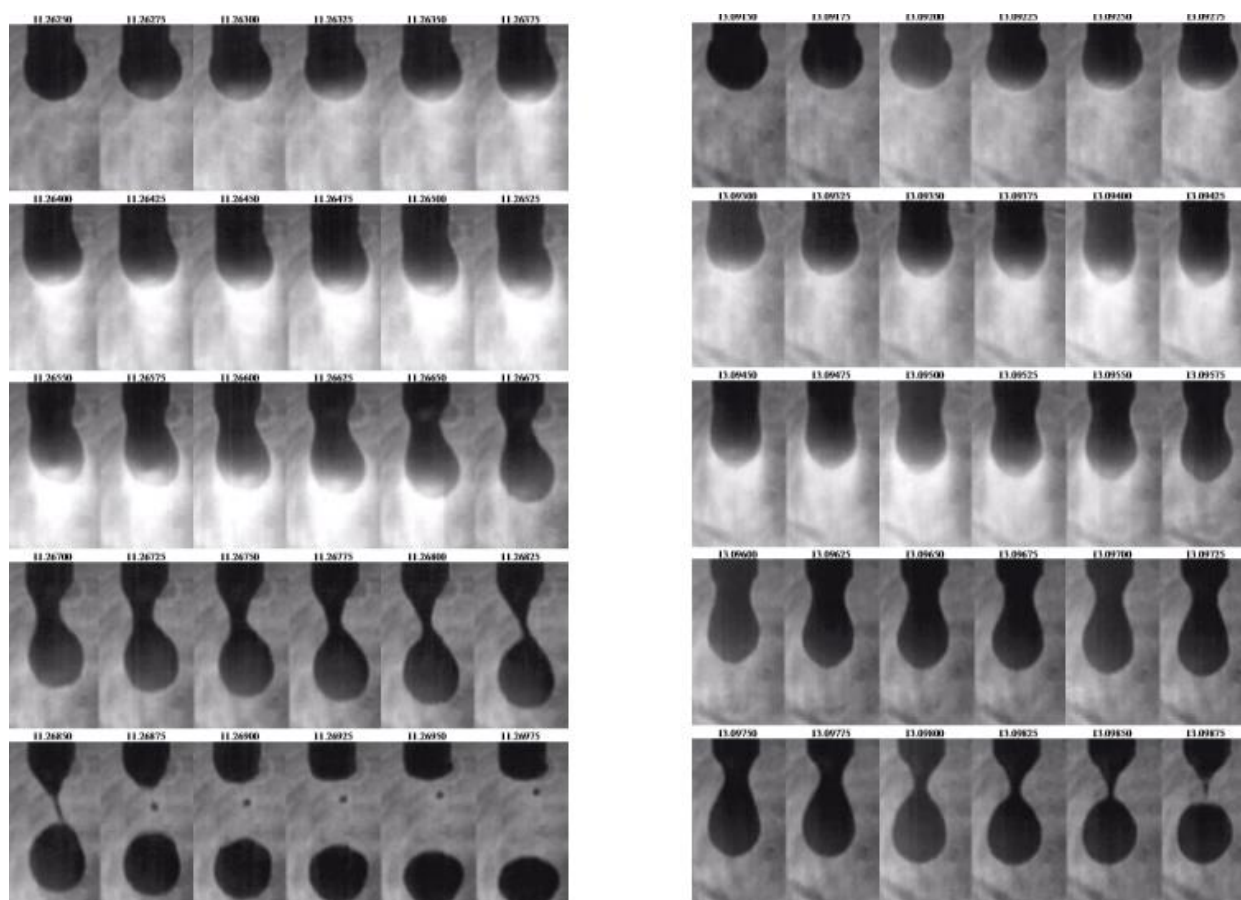
5.1. Utjecaj magnetskih sila kod MAG postupka zavarivanja

Na slici 26. prikazano je odvajanje kapljice metala kod MAG postupka zavarivanja, pri jakosti struje od 260 A, te naponu 29 V, za elektrodu promjera 1,6 mm [14].



Slika 26. Odvajanje kapljice metala kod MAG postupka zavarivanja [14]

Za razliku od gravitacijske sile koja djeluje cijelo vrijeme uniformno u vertikalnom smjeru, magnetske sile ne djeluju uniformno, te osim toga imaju rotacijsku komponentu, od tuda takav oblik kapljice. Istraživanja su pokazala da je kapljica manje spljoštena što je manja struja zavarivanja [14]. Prije nego što se kapljica odvoji dolazi do formiranja tako zvanog vrata kapljice, kako je i prikazano na slici 26. upravo u tom trenutku je utjecaj magnetskih sila najjači, te one ovise o obliku kapljice u tom trenutku te u gustoći struje. Na slici 27. je detaljnije prikazan mehanizam nastanka i odvajanja kapljice metala u električnom luku [14].



Slika 27. Mehanizam odvajanja metalne kapljice prilikom MAG zavarivanja [14]

Segmenti odvajanja kapljice su snimljeni u intervalima od $250 \mu\text{s}$, promjer elektrode je 1,6 mm, jedina ralika je u tome što je u primjeru lijevo na slici 27. korištena pulsna struja maksimalne jakosti 330 A, dok je u primjeru desno na slici 27. korištena pulsna struja maksimalne jakosti 290 A [14].

6. TIG postupak zavarivanja

Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova (TIG zavarivanje) je postupak zavarivanja kod kojeg se energija potrebna za taljenje osnovnog i po potrebi dodatnog materijala dobiva generiranjem topline kroz električni luk. Električni luk se uspostavlja i održava između netaljive volframove elektrode ili elektrode od volframovih legura i osnovnog materijala. Zona unosa topline, rastaljeni osnovni metal, dodatni materijal-zagrijani i rastaljeni vrh žice te zagrijani vrh netaljive elektrode u procesu zavarivanja štite se od štetnog djelovanja atmosfere na način da se neaktivni (inertni) plinovi upuhuju kroz keramičku sapnicu postavljenu oko netaljive volframove elektrode. Specifičnost za ovaj postupak za razliku od ostalih elektrolučnih postupaka zavarivanja je to da se prijenos kapljice metala ne odvija kroz električni luk već se dodatni materijal (žica ili šipka) dodaje u talinu gdje se potom tali pod električnim lukom i spaja s talinom zavara. [15]

Originlni naziv ovog postupka na engleskom jeziku jest Tungsten Inert Gas, ne rijetko se koristi i kratica GTAW koja u originalnom nazivu na engleskom jeziku znači Gas Tungsten Arc Welding. U njemačkoj tehničkoj literaturi često se koristi WIG što znači Wolfram Inert Gas Schweissen [15].

6.1. Osnove TIG postupka zavarivanja

Razvoj TIG postupka započeo je zahtjevima za zavarivanje spojeva od Al i Mg legura za potrebe avionske industrije. Početkom se smatra 1926.g. kada su H.M. Hobart i P.K. Devers proveli istraživanja i prijavili patent, zavarivanje u komori ispunjenoj inertnim (argon ili helij) plinom. 1941.g. V.H. Pavlecka i Russ Meredith primjetili su potrebu za boljim i učinkovitijim spajanjem lakih metalnih materijala i legura te su u siječnju te godine predali američkom patentnom uredu inovaciju, prvi TIG pištolj za zavarivanje. 1942.g. u firmi Northrop Aircraft u kojoj je radio Russ Meredith patentiran je prvi službeni proces zavarivanja Mg legura u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (helija), pod patentnim imenom Heliarc proces. Tvrtka Northrop Aircraft je svoja patentna prava Heliarc procesa prodala tvrtci Linde Division koja se bavila proizvodnjom i prodajom inertnih i ostalih industrijskih plinova. Ubrzo iz Linde laboratorija dolazi serija novih i patentno zaštićenih Heliarc pištolja; 1946. g. [15].

Prvi TIG pištolj izumio je Frank Pilius iz Linde laboratorija, a 1951.g. Pete Scheller je izumio prvi TIG pištolj s vodenim hlađenjem. Postupak se ubrzo počeo koristiti i za zavarivanje posuda od nehrđajućih čelika, aluminija i bakra, koje svoju primjenu pronalaze u kemijskoj i procesnoj industriji [15].

Vrlo je raširena primjena ovog postupka u zavarivanju aluminija i Al-legura, magnezija i Mg-legura, bakra i Cu-legura, nehrđajućih čelika, titana i Ti-legura, više-manje za zavarivanje svih materijala. Zaštitni plinovi su relativno skupi stoga se TIG postupak primjenjuje najviše u zavarivanju materijala koji se teže zavaruju ostalim konvencionalnim postupcima. Također, koristi se prilikom zavarivanja nelegiranih i niskolegiranih čelika primjerice kod izvođenja korijena zavara na cijevima i sličnog. [15]

U posljednje vrijeme se ide ka što većoj automatizaciji procesa, no TIG je najčešće ručni postupak zavarivanja. Kod ručnog postupka zavarivač pomiče pištolj dok se u talinu dodaje dodatni materijal. Specifičnost ručnog postupka je ta što se većina spojeva izvodi lijevom tehnikom pri kojoj prvo napreduje dodatni materijal, a potom slijedi pištolj kojim se oblikuje talina. Pri toj tehnici postupak je pregledan, jer dodatni materijal prethodi pištolju, puno je manji unos topline u osnovni materijal nego što je to slučaj kod desne tehnike. [15]

Poluautomatizirani TIG postupak zavarivanja veoma je sličan ručnom postupku s razlikom što se ovdje dodatni materijal dodaje uz pomoć elektromotora koji se uključuje na dodir tastera koji je smješten na pištolju za zavarivanje. Taj dodatni materijal u obliku žice za zavarivanje dovodi se određenom brzinom pod električni luk gdje se tali zajedno s osnovnim materijalom. Sustav za dovođenje žice je vrlo sličan sustavima za MIG/MAG zavarivanje. Postupak se naziva poluautomatiziranim jer je dodavanje žice mehanizirano. [15]

6.2. Prednosti i nedostaci TIG postupka zavarivanja

Kod TIG postupka zavarivanja električni luk uspostavlja se između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Zona utjecaja topline, volframova elektroda i rastaljeni osnovni materijal zaštićeni su atmosferom inertnog plina. Proces zavarivanja izvodi se s dodatnim materijalom ili bez njega (pretaljivanje). [16] Netaljiva elektroda služi isključivo za uspostavu električnog luka, a njezino trošenje je rezultat je termičkih opterećenja ili mehaničkih

oštećenja. Također, netaljiva elektroda svojom geometrijom utječe na karakteristiku električnog luka. [16]

Električni luk, uspostavlja se kontaktno (neposredno ili posredno) ili preko visokofrekventnog generatora, sklopa integriranog zajedno s upravljanjem i izvorom struje za zavarivanje. [16]

Električni luk kod ovog postupka zavarivanja sastoji se od tri područja: katodnog, anodnog i područja stupa električnog luka. Anodno područje (područje plus pola) i katodno područje (područje minus pola) malih su dimenzija, a sastoje se od oblaka iona koji udaraju u anodu tj. katodu te oslobađaju određenu količinu energije (topline). Područje stupa električnog luka, tj. njegova duljina ovisi o naponu električnog luka, a najčešće odgovara promjeru netaljive elektrode. Kako je po definiciji prema izvoru električni luk intenzivno izbijanje u smjesi plinova i para, slijedi da je glavni nosilac ionizacije kod ovog postupka zavarivanja upravo zaštitni plin, a o njemu ovisi također i uspostava i stabilnost luka. [16]

Temperature koje se razvijaju kod TIG postupka zavarivanja funkcija su osnovnih parametara zavarivanja, vrsti zaštitnog plina te vrsti osnovnog materijala, a u samoj osi plazme električnog luka mogu dosežati preko 20 000 °C. [16]

Većina grešaka koje se javljaju tijekom zavarivanja TIG postupkom uzrokovane su lošom pripremom ili lošim odabirom parametara zavarivanja (protok inertnog plina, vrsta plina, jačina struje, vrsta struje, promjer elektrode, vrsta elektrode, oblik vrha elektrode, vrsta materijala, debljina materijala, čistoća površine koja se zavaruje, ...) vodljivost materijala λ (npr. Cu i Cu-leg.). Talina ne smije bježati ispred električnog luka na "hladni" i neprotaljeni dio materijala jer može doći do greške u obliku naljepljivanja. [15]

Osnovne prednosti TIG postupka su: [16]

- koncentriranost električnog luka, smanjena ZUT
- nema prskanja, nema troske
- minimalna količina štetnih plinova
- zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala
- mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima
- mogućnost zavarivanja pozicija male debljine
- pogodno za izvođenje reparaturnih radova

- pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom
- odličan izgled zavarenog spoja.

Osnovni nedostaci TIG postupka su: [16]

- mala brzina zavarivanja
- mali depozit dodatnog materijala
- neekonomičnost u zavarivanju debljih pozicija (iznad 6 mm)
- zahtijeva se precizna priprema zavarenog spoja
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova
- zahtjevnost izvođenja ručnog TIG zavarivanja,
- duža izobrazba zavarivača
- otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima
- potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod izvođenja zavarivanja u skućenim prostorima
- pojačana svijetlost i UV zračenje.

6.3. Vrsta struje i polaritet elektrode kod TIG postupka zavarivanja

Transformatori, ispravljači i inverteri mogu biti izvori struje za TIG zavarivanje. Primjerice, obični ispravljač ili inverter se može koristiti kod ručnog TIG zavarivanja čelika i bakra. Na njega se priključi pištolj za TIG zavarivanje i može se zavarivati, s tim da se uspostavljanje električnog luka obavlja dodiranjem vrha volframove elektrode s radnim komadom. [15]

O primijenjenoj vrsti struje zavarivanja te polaritetu elektrode ovisi raspodjela topline u električnom luku (raspodjela topline između netaljive elektrode i radnog komada). Slijedom toga moguća su tri slučaja: [16]

1. Istosmjerna struja – elektroda na "-" polu
2. Istosmjerna struja – elektroda na "+" polu
3. Izmjenična struja (AC)

Zavarivanje TIG postupkom istosmjernom strujom s elektrodom na negativnom polu (istosmjerna struja je vrsta električne struje gdje ne dolazi do promjene smjera toka elektrona u jedinici vremena) je najčešća kombinacija struje/polariteta kod primjene TIG postupka (DCEN – Direct Current Electrode Negative). Elektroni se kreću s negativne elektrode na pozitivni osnovni materijal, ubrzavajući kroz električni luk, a pozitivni elektroni imaju suprotan smjer. Pri tome, količina kinetičke energije elektrona značajno je veća od one iona pa dolazi do većeg zagrijavanja radnog komada, a manje vrha elektrode (približni odnos toplinskog opterećenja: 1/3 na elektrodi, 2/3 na radnom komadu). [16]

Zbog toga ovaj način TIG zavarivanja omogućuje rad s manjim promjerima elektroda tj. rad s velikim strujama, a vrh elektrode može biti zašiljen što daje stabilnost električnom luku. Ovaj način zavarivanja daje dobru penetraciju. [16]

Kod zavarivanja TIG postupkom istosmjernom strujom gdje je elektroda na pozitivnom polu (DCEP - Direct Current Electrode Positive) smjer elektrona je suprotan pa je time i raspodjela topline drugačija – dolazi do velikog toplinskog opterećenja elektrode. Stoga, ovaj način zavarivanja je moguć kod manjih struja zavarivanja uz primjenu netaljivih elektroda većeg promjera. Također, u odnosu na prethodni slučaj, penetracija je manja, a zaobljenost vrha elektrode može rezultirati nestabilnošću električnog luka. Ipak, smjer pozitivnih iona (s elektrode na radni komad) rezultira razaranjem tankih površinskih oksida s površine osnovnog materijala što omogućuje zavarivanje aluminijskih, magnezijevih i njihovih legura. [16]

Zavarivanje TIG postupkom izmjeničnom strujom (AC – alternating current - izmjenična struja je vrsta električne struje gdje dolazi do promjene smjera toka elektrona u jedinici vremena) je način TIG zavarivanja gdje se uz mogućnost dobrog čišćenja oksida s površine osnovnog materijala dobiva i dobra penetracija, a termičko opterećenje je približno podjednako na elektrodi i radnom komadu (iako ovisi o balansu izmjenične struje). Pri tome, dolazi do mijenjanja pravca kretanja čestica (ovisno o frekvenciji struje), a time i do "gašenja i paljenja" luka što dovodi do njegove nestabilnosti (utjecaj ove pojave može se smanjiti dodatnim uređajem na izvoru struje koji proizvodi visokonaponsku i visokofrekventnu struju u trenutku "gašenja" luka). Kod TIG AC zavarivanja promjenom frekvencije izmjenične struje, ali i njezinim balansom (odnosom koliko vremena je elektroda na pozitivnom, a koliko na negativnom polu), može se utjecati na geometriju zavarenog spoja, čišćenje oksida, ali i termičko opterećenje radnog komada i elektrode. Osim navedenih slučajeva (DCEN, DCEP,

AC), postoji i mogućnost TIG zavarivanja impulsnim strujama. Osnovna prednost takvog načina zavarivanja je smanjeni unos topline tj. manje deformacije radnog komada. Pri tome valja obratiti pozornost na slijedeće parametre: vršna vrijednost struje (obično je viša nego kod konvencionalnog TIG zavarivanja), minimalna vrijednost struje (omogućuje održavanje električnog luka), broj impulsa u jedinici vremena postotak uključenog impulsa (vrijeme trajanja vršne struje izraženo postotkom). [16]

6.4. Zaštitni plinovi za TIG postupak zavarivanja

Zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu koja se može što lakše ionizirati te što bolje štiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoline. U tu svrhu koriste se inertni plinovi najčešće: argon (Ar), helij (He) i njihove mješavine. [15]

Iako se u izvornom obliku TIG procesa koristio helij, danas je argon taj koji je dominantan u primjeni. Oba plina su inertna te daju zaštitnu atmosferu u kojoj ne dolazi do kemijskih reakcija između zaštitnog plina i osnovnog materijala. [16]

Osim primarnog cilja zaštitnog plina, a to je zaštita rastaljenog materijala od utjecaja atmosfere, važno je za naglasiti da zaštitni plin direktno utječe i na stabilnost te kvalitetu električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, estetski izgled zavarenog spoja kao i na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja. Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja, ali to nije jedina njegova prednost. Ima niski ionizacijski potencijal (energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion), 15,7 eV, što olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. Također, 1,4 puta je teži od zraka te izlaskom iz sapnice potiskuje zrak i dobro štiti rastaljeni metal, a ista karakteristika doprinosi i potrebi za manjim protokom prilikom zavarivanja. Argon u odnosu na helij ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom čime se dobiva manja penetracija i protaljivanje. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95%, iznimno 99,997%. [16]

Helij je plin s višim ionizacijskim potencijalom (24,5 eV) što otežava uspostavu električnog luka. Male je mase (10 puta manje nego argon), zbog čega protoci helija moraju biti i do tri puta veći nego što je slučaj s argonom. Dobra strana helija kao zaštitnog plina je vrlo dobra toplinska vodljivost te daje širi električni luk. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i unos topline (napon električnog luka sa zaštitnim plinom helijem je značajno veći nego kod argona pri istim strujama). Ova karakteristika posebno

dolazi do izražaja prilikom zavarivanja materijala velike toplinske vodljivosti (npr. bakar) te zavarivanja pozicija većih debljina. Minimalna potrebna čistoća helija kao zaštitnog plina iznosi 99,99%. [16]

Osim čistog inertnog plina argona i helija, česta je upotreba i njihove mješavine u različitim omjerima. Mješavina argona i helija kombinacija je povoljnih svojstava argona odnosno helija. Osim spomenutih kombinacija plinova i mješavina, postoji mogućnost dodavanja manjeg postotka drugih plinova u mješavine pa tako, npr., vodik koji ima vrlo dobru toplinsku vodljivost, povećava penetraciju dok se mješavine s dodatkom dušika upotrebljavaju uglavnom kod zavarivanja materijala s austenitnom strukturom. Osim navedenog, važno je spomenuti da se TIG zavarivanje zbog nekih svojih nedostataka upotrebljava kod zahtjevnijih zavarenih spojeva gdje je česta i nužna zaštita korijenskog dijela zavarenog spoja. U ovom slučaju cilj je "odstraniti" zrak s korijenske strane spoja i upuhati zaštitni plin te ga održavati pod niskim pritiskom. Zaštita je moguća i kod sučeonih i kod cijevnih spojeva. [16]

Odluka o količini zaštitnog plina ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje, jakosti struje, geometriji radnog komada, pripremi spoja te o samoj vrsti zaštitnog plina. U slučaju prevelike količine zaštitnog plina, osim neisplativosti, loša strana je i prejaki protok koji uzrokuje vrtloženje plina, smanjuje se zaštita talina te dolazi do prisutnosti zraka u procesu. Premala količina zaštitnog plina ne može istjerati sav zrak s mjesta zavarivanja. [15]

6.5. Netaljiva elektrode za TIG postupak zavarivanja

Netaljiva elektroda služi za uspostavu električnog luka između gorionika i radnog komada, tj, kao provodnik električne struje. Ne tali se, njezino trošenje isključivo je povezano s oblikovanjem njezine geometrije brušenjem, ili eventualno oštećenjima zbog nepravilne tehnike rada. Prosječni vijek trajanja netaljive elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Elektrode se izrađuju od volframa, metala velike gustoće (poznat i kao tungsten; švedski: "teški kamen") i tališta 3422 °C. Razvojem TIG zavarivanja i izvora struje za zavarivanje dolazilo je i do većih zahtjeva u pogledu uspostave i stabilnosti električnog luka pa se danas upotrebljavaju elektrode koje nisu od čistog volframa, već se legiraju kako bi se poboljšale njezine radne karakteristike, najčešće se dodaju CeO₂, ThO₂, La₂O₃ i ZrO₂. [16]

Najčešće TIG netaljive elektrode su: [15]

- WT 20, crvena elektroda (W 98 % + ThO₂ 2 %)
- WP, zelena elektroda (W 100%)
- WL 20, plava elektroda (W 98% + La₂O₃ 2 %)
- WC 20, siva elektroda (W 98% + CeO₂ 2%)
- WL 10, crna elektroda (W 99% + La₂O₃ 1%)
- WZ 08, bijela elektroda (W 99,2 % + ZrO₂ 0,8 %)
- WL 15, zlatna elektroda (W 98,5% + La₂O₃ 1,5%)

Elektrode se izrađuju u promjerima 0,5; 1,0; 1,6; 2,4; 3,2; 4,0; 6,4 i 8,0 mm, a duljine najčešće 150 mm (postoje i manje standardne duljine). Osim pravilnog izbora legirane elektrode, jednako je važna i priprema iste. Priprema se sastoji od zaobljenja ili zašiljenja vrha prilikom čega valja imati na umu da geometrija netaljive elektrode direktno utječe na geometriju električnog luka. Zaobljeni vrh elektrode koristi se uglavnom kod zavarivanja Al, Mg i legura. Ostali materijali zahtijevaju šiljatu geometriju vrha elektrode (oblik stošca, visina stošca ovisi o zahtjevima geometrije luka). Prilikom izrade geometrije elektrode pravilnom tehnologijom brušenja izbjegavaju se nestabilnosti luka ili kontaminacija drugim metalima. [16]

6.6. Oprema za TIG postupak zavarivanja

Osnovni dijelovi konvencionalnog uređaja za TIG postupak zavarivanja su: [16]

- Izvor struje za zavarivanje
- Pištolj za zavarivanje
- Gorionik
- Sustav za hlađenje
- Sustav za dovođenje zaštitnog plina.

Iako je TIG postupak zavarivanja elektrodučni postupak s čestom primjenom u praksi, baš kao i kod ostalih postupaka zavarivanja primjetan je konstantan razvoj opreme za zavarivanje te njezino unapređenje u cilju smanjenja nekih nedostataka ovog postupka ili poboljšanja

kvalitete zavarenog spoja. Izvori struje za TIG zavarivanje imaju strmopadajuću karakteristiku pošto se zavarivanje uglavnom izvodi ručno.[16]

Pištolji za ručno TIG zavarivanje različitih su oblika i veličina. Mogu se podijeliti na dvije osnovne grupe; sa i bez hlađenja rashladnom tekućinom (voda ili antifriz). Pištolji, koji se ne hlade rashladnom tekućinom nego samo zrakom, primjenjuju se za manje jakosti struje zavarivanja 150 – 200 [A] i kraća vremenska opterećanja. Oblici pištolja su različiti, ima ih manjih i većih. Za zavarivanje na teško pristupačnim mjestima grade se pištolji posebnih oblika i veličina. [15]

Osnovne karakteristike izvora struje su: vrsta struje zavarivanja (AC/DC, impulsna), mogućnost VF paljenja luka, intermitencija, raspon struje zavarivanja, priključni napon, mogućnosti upravljanja parametrima (početna i završna struja, upravljanje impulsima, frekvencijom, itd.). Zbog specifičnosti potreba zavarivanja poseban naglasak valja staviti na TIG gorionike za zavarivanje.[16] Danas su na tržištu prisutni gorionici različitih konstrukcija (veličina, oblik, dužina kape, fleksibilnost itd.) koje uvelike mogu biti korisne prilikom posebnih zahtjeva konstrukcije. Važan dio gorionika jest i vanjska sapnica. Ona direktno utječe na karakteristike zaštite metala zavara, ali i netaljive elektrode. Konstrukcijski može utjecati i na turbulentnost zaštitnog plina. Vanjske sapnice izrađuju se najčešće od keramičkih materijala koje podnose visoke temperature, ali je i dostupna transparenta sapnica za posebne zahtjeve vidljivosti zavarenog spoja te sapnice za specijalne namjene (zavarivanje titana itd.). Gorionici mogu biti hlađeni zrakom (primjena za manje struje zavarivanja) i vodom u zatvorenom sustavu. [16]

7. Eksperimentalni dio rada

Eksperimentalni dio diplomskog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. U eksperimentalnom dijelu rada odgovarajući radni komad od hardox čelika podvrgnut je postupku magnetizacije, te se potom TIG postupkom provelo navarivanje radnog komada sa svrhom pojave i promatranja puhanja električnog luka na različitim jakostima magnetskog polja. U nastavku eksperimentalnog dijela rada provedena je demagnetizacija radnog komada, uređajem za demagnetizaciju prije nego što se ponovno navarivao radni komad, na dalje provedena je i demagnetizacija radnog komada i za vrijeme navarivanja, metodom suprotnog polja (active gauss).

7.1. Magnetizacija radnog komada

Kako bi se mogao provesti postupak demagnetizacije, prvo je bilo potrebno magnetizirati radni komad. Izabran je radni komad od čelika hardox 400, zbog svoje djelomično martenzitne strukture koja je podložna magnetizaciji. Dimenzije radnog komada prikazane su u tablici 7. U tablici 8. prikazan je kemijski sastav čelika hardox 400, a u tablici 9 njegova mehanička svojstva [17].

Tablica 7. Dimenzije radnog komada

Dužina/širina/debljina (mm)	330x200x10
------------------------------	------------

Tablica 8. Kemijski sastav čelika hardox 400 [17]

C (%) max)	Si (%) max)	Mn (%) max)	P (%) max)	S (%) max)	Cr (%) max)	Ni (%) max)	Mo (%) max)	B (%) max)
0,15	0,7	1,6	0,025	0,01	0,5	0,25	0,25	0,04

Tablica 9. Mehanička svojstva čelika hardox 400 [17]

Granica razvlačenja (N/mm ²)	1000
Vlačna čvrstoća (N/mm ²)	1250
Udarni rad loma za - 45 °C (J)	45
Tvrdoća (HBW)	370 - 430
Istezljivost (%)	10

Magnetizacija radnog komada provedena je magnetnim jarmom proizvođača Tiede,. Magnetni jaram je prikazan na slici 28. dok je na slici 29. prikazan radni komad za vrijeme provođenja magnetizacije.

Minimalni zahtjevi za magnetski jaram su [18] :

- Vrijeme uključivanja $>5s$
- Temperature površine u području magnetiziranja $< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Jakost tangencijalnog polja $> 5\text{ kA/m}$
- Sila dizanja težine $> 44\text{ N}$



Slika 28. Magnetni jaram Tiede



Slika 29. Provođenje magnetizacije magnetnim jarmom

Nakon provedene magnetizacije radnog komada provedeno je mjerenje gustoće zaostalog magnetskog polja uzduž radnog komada. Mjerenje se vršilo Gauss metrom naziva “Field meter H1-4” proizvođača EWM, koji je prikazan na slici 30. U tablici 10. prikazane su karakteristike uređaja “Field meter H1-4” [19].

Tablica 10. Karakteristike uređaja „Field meter H1-4“ [19]

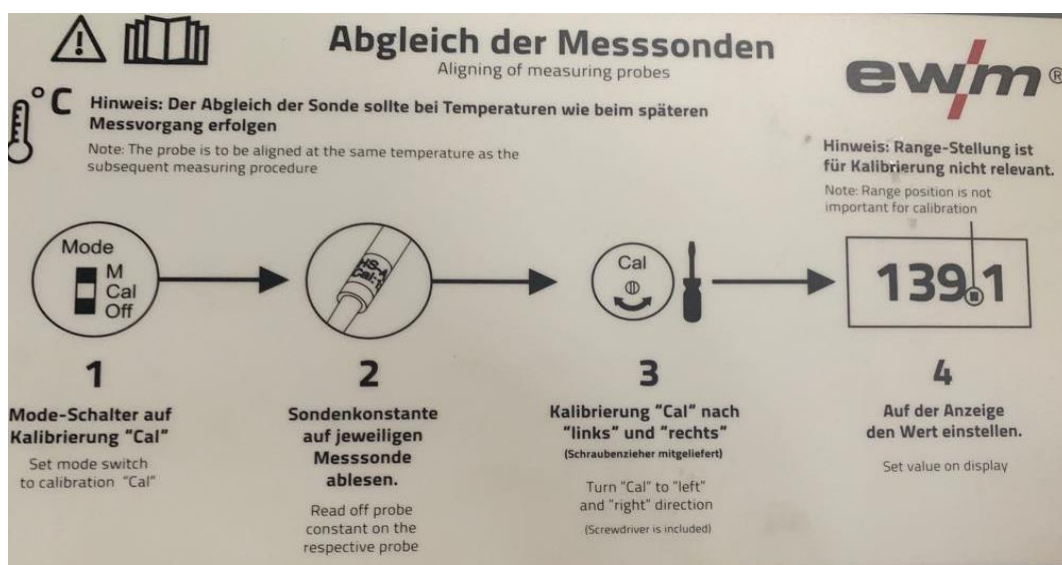
Mjerne skale uređaja (mT)	20,200 i 2000
Vrsta ekrana	LCD
Rezolucija (mT)	0,01
Vrijeme trajanja baterije (h)	~ 100



Slika 30. Gauss metar „Fieldmeter H1-4“

Prije svakog provedenog mjerenja provodila se kalibracija uređaja kako bi bili sigurni da je dobiveni iznos gustoće magnetskog polja ispravan. Postupak kalibracije se provodi na sljedeći način: uređaj se namjesti na način rada “cal” te se potom pomoću odvijača umjerava dok se ne postigne referentni iznos koji je proizvođač naveo te iznosi 139.1 mT.

Na slici 31. prikazana je shema postupka kalibracije uređaja. [19]



Slika 31. Shema postupka kalibracije uređaja „Fieldmeter H1-4“ [19]

Prilikom mjerenja gustoće zaostalog magnetskog polja uzduž radnog komada, najveća izmjerena vrijednost iznosila je 3.64 mT, kako je i prikazano na slici 32.



Slika 32. Mjerenje gustoće zaostalog magnetskog polja pomoću Gaussmetra

Izmjereni iznos od 3,64 mT uzrokovao bi puhanje luka, no problem je što je taj iznos prisutan u uskom lokalnom području radnog komada, a ne uzduž njega. Na ostalim dijelovima radnog komada iznos magnetskog polja ne prelazi 1,2 mT, što ne bi bilo dostatno za izraženo puhanje električnog luka kojem se teži u eksperimentu. Stoga je odlučeno da se prilikom navarivanja pomoću jakih permanentnih magneta održava magnetsko polje konstantnog no različitog iznosa duž radnog komada, koje će uzrokovati izraženije puhanje luka. Na slici 33. prikazani su permanentni magneti postavljeni na radni komad te su označene jakosti magnetskog polja duž njega. Različite vrijednosti gustoće magnetskog polja omogućit će usporedbu utjecaja njegovog iznosa na izraženost puhanja električnog luka.



Slika 33. Permamentni magneti postavljeni na radni komad i označene vrijednosti gustoće magnetskog polja uzduž radnog komada

Sa slike 33. je vidljivo da su izmjerene vrijednosti uzduž radnog komada velikih iznosa koji uzrokuju izrazito puhanje luka, što nam je bio i cilj postići.

7.2. Navarivanje radnog komada

Kako bi puhanje luka bilo još više izraženo, odabran je TIG postupak zavarivanja jer je električni luk kod tog postupka najosjetljiviji na puhanje, više nego primjerice kod MAG ili REL postupka zavarivanja, kako je i navedeno u tablici 5. u teorijskom dijelu rada.

U tablici 11. su prikazani parametri korišteni kod navarivanja, dok je na slici 34. prikazan postupak navarivanja.

Tablica 11. Parametri TIG navarivanja

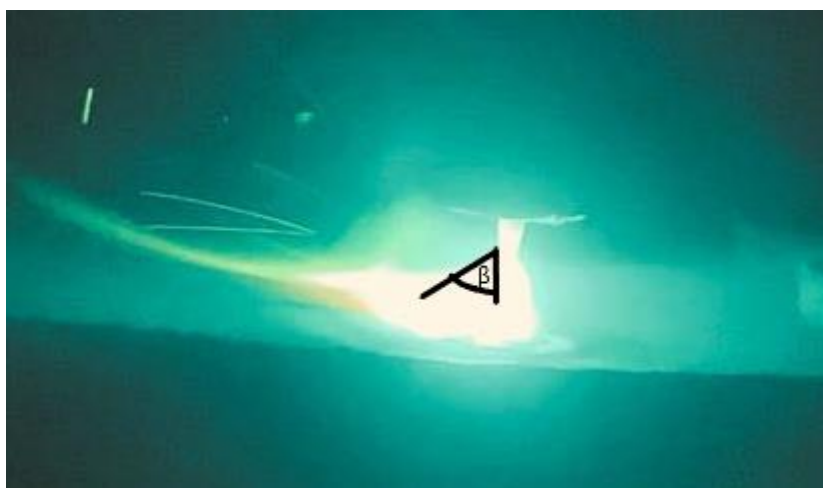
Jakost struje (A)	Brzina navarivanja (cm/min)	Promjer elektrode (mm)	Vrsta elektrode	Vrsta zaštitnog plina	Protok zaštitnog plina (l/min)	Udaljenost elektrode od radnog komada (mm)
100	10	2,4	WT 20	Argon 4.8	6	5

**Slika 34. Navarivanje TIG postupkom**

Za vrijeme navarivanja fotografiran je otklon električnog luka pri različitim vrijednostima gustoće magnetskog polja u 5 pozicija. Vrijednosti gustoće magnetskog polja za pojedinu poziciju prikazan je u tablici 12. dok su pozicije već prije prikazane na slici 33. Programom ImageJ, je izmjeren kut otklona električnog luka za svaku poziciju te su vrijednosti prikazane u tablici 13. Na slikama 35. - 39. je prikazan otklon električnog luka za svaku poziciju i prikazan je kut koji se mjerio.

Tablica 12. Vrijednosti gustoće magnetskog polja za pojedinu poziciju na radnom komadu

Pozicija	1.	2.	3.	4.	5.
Iznos gustoće magnetskog polja (mT)	8	7	6	4	1,25

**Slika 35. Otklon električnog luka za poziciju 1 (kut $\alpha=65^\circ$)****Slika 36. Otklon električnog luka za poziciju 2 (kut $\beta=60^\circ$)**



Slika 37. Otklon električnog luka za poziciju 3 (kut $\gamma=50^\circ$)



Slika 38. Otklon električnog luka za poziciju 4 (kut $\delta=43^\circ$)



Slika 39. Otklon električnog luka za poziciju 5 (kut $\varepsilon=30^\circ$)

Iz prethodnih slika vidljivo je kako je velik utjecaj gustoće magnetskog polja na otklon tj puhanje električnog luka, te kako je otklon sve manji što je gustoća magnetskog polja manja.

Najizraženiji otklon je pri pozicijama 1 i 2, te bi došlo da velikih problema da se takav iznos gustoće magnetskog polja stvarno zadrži u radnom komadu. Pri poziciji 3 i 4 je otklon nešto manji no i dalje vrlo izražen, dok je na poziciji 5 uistinu minimalan, što je i u skladu s vrijednostima navedenim u tablici 5. u teorijskom dijelu rada. U tablici 13. prikazane su izmjerene vrijednosti kuteva otklona luka pri svakoj poziciji.

Tablica 13. Izmjerene vrijednosti kuteva otklona luka pri svakoj poziciji

Pozicija	1(α)	2(β)	3(γ)	4 (δ)	5 (ε)
Izmjerena vrijednost kuta ($^\circ$)	65	60	50	43	30

7.3. Demagnetizacija radnog komada

Nakon izvršenog procesa navarivanja permanentni magneti su uklonjeni s radnog komada. Demagnetizacija se provodila uređajem za demagnetizaciju proizvođača EWM, naziva „Degauss 600“. Specifikacije uređaja su prikazane u tablici 14. [11], dok je na slici 40. prikazan sam uređaj.

Tablica 14. Specifikacije uređaja „Degauss 600“ [11]

Jakost struje demagnetizacije	10 A - 600 A
Jakost struje demagnetizacije prilikom „active Gauss „ metode	10 A - 250 A
Napon u otvorenom krugu	41 V
Frekvencija rada	50/60 Hz
Cos φ	0,9
Temperatura okoliša	-25 °C do 40 °C
Hlađenje uređaja	ventilator
Dimenzije (dužina/širina/visina)	539x210x415 mm
Masa	25 kg



Slika 40. Uređaj za demagnetizaciju „Degauss 600“

Uređaj „Degauss 600“ ima opciju vršenja dvije metode demagnetizacije. Demagnetizaciju radnog komada prije zavarivanja, promjenama polova istosmjerne struje, na način koji je opisan u točki 4.4.3.1. Postoji opcija demagnetizacije radnog komada metodom suprotnog polja za vrijeme zavarivanja (activegauss), na način koji je opisan u točki 4.4.1. U eksperimentalnom dijelu rada provedene su obje metode demagnetizacije, opis i rezultati procesa opisani su u nastavku.

7.3.1. Demagnetizacija radnog komada prije ponovnog navarivanja

Nakon uklanjanja permanentnih magneta ponovno je izmjerena gustoća zaostalog magnetskog polja u radnom komadu, te je najviše iznosila 3,48 mT, to jest iznos koji je vrlo blizu iznosu nakon magnetizacije električnim jarmom. Proces magnetizacije je tekao na sljedeći način: oko radnog komada se omotala zavojnica te se mjerila gustoća prisutnog magnetskog polja tijekom cijelog vremena trajanja procesa, kako je i prikazano na slici 41. Tokom procesa demagnetizacije, uređaj „Degauss 600“ smanjivao je struju demagnetizacije počevši od 600 A, istovremeno smanjujući frekvenciju i obrćući polove istosmjerne struje, stvarajući suprotno magnetsko polje neutralizira zaostalo magnetsko polje u radnom komadu. U tablici 15. navedene su vrijednosti jakosti struje demagnetizacije, koje se smanjuju tokom vremena te vrijednosti gustoće zaostalog magnetskog polja u ovisnosti o toj jakosti struje, dok su na slici 42. ti podaci prikazani grafički.

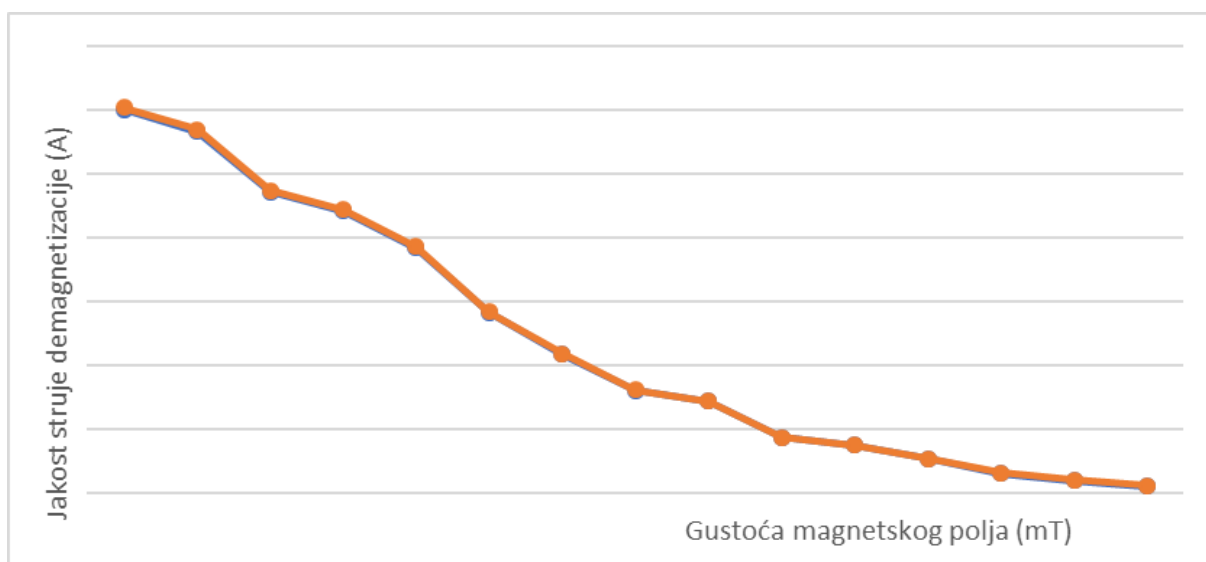


Slika 41. Mjerenje gustoće magnetskog polja za vrijeme demagnetizacije

Broj zavoja omotanih oko radnog komada je 2 za tu gustoću zaostalog magnetskog polja prema [11].

Tablica 15. Ovisnost gustoće zaostalog magnetskog polja o jakosti struje demagnetizacije

Jakost struje demagnetizacije (A)	Iznos gustoće zaostalog magnetskog polja (mT)
600	3,48
566	2,94
471	2,61
441	2,31
384	2,09
282	1,65
217	1,2
160	0,81
143	0,69
86	0,65
74	0,65
53	0,55
30	0,5
19	0,47
10	0,4



Slika 42. Ovisnost gustoće zastalog magnetskog polja o jakosti struje demagnetizacije

Sa slike 42. je vidljivo da se gustoća zaostalog magnetskog polja smanjuje kako se smanjuje jakost struje, no smanjenje je puno veće pri većim jakostima struje, tako je nagib krivulje puno blaži kada jakost struje poprimi vrijednost ispod 100 A. Konačna vrijednost gustoće magnetskog polja od 0,4 mT je prihvatljiva za uvjete zavarivanja i navarivanja TIG postupkom, no za sigurnost eksperimenta ponovno je provedeno navarivanje s istim parametrima procesa, te je izgled električnog luka za vrijeme navarivanja nakon demagnetizacije prikazan na slikama 43, 44 i 45.



Slika 43. Izgled električnog luka na početku navarivanja poslije provedene demagnetizacije



Slika 44. Izgled električnog luka za vrijeme navarivanja nakon provedene demagnetizacije



Slika 45. Izgled električnog luka na kraju procesa navarivanja nakon provedene demagnetizacije

Sa slika 43, 44 i 45 je vidljivo da nema pojave puhanja luka, on je simetričan i stalnog oblika od početka do kraja trajanja procesa navarivanja.

7.3.2. Demagnetizacija za vrijeme navarivanja „activegauss“

Sljedeći korak eksperimenta bio je provjeriti koliko učinkovito suprotno magnetsko polje koje stvara uređaj za demagnetizaciju neutralizira magnetsko polje u radnom komadu za vrijeme navarivanja/zavarivanja. U tu svrhu ponovno su postavljeni permanentni magneti na radni komad, no sada je istovremeno omotana zavojnica, te je pripremljen pištolj za TIG navarivanje kako je i prikazano na slici 46. Parametri TIG zavarivanja su isti kao i u prethodnim primjerima.

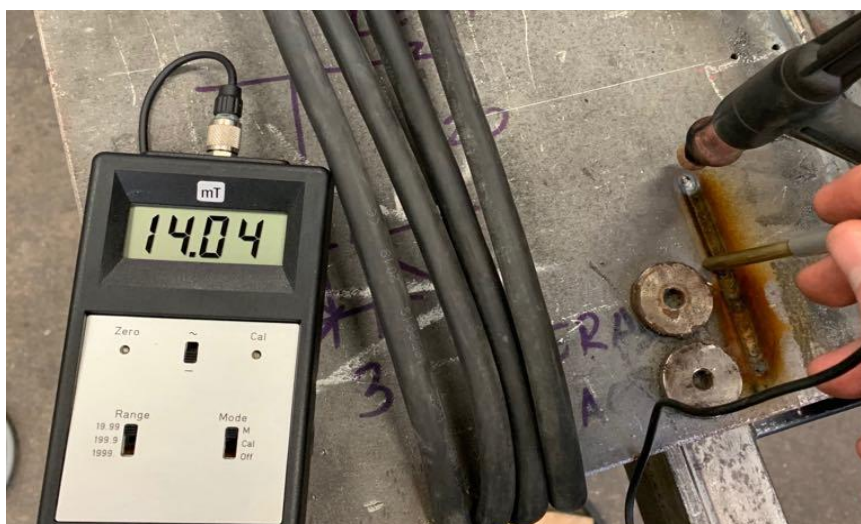


Slika 46. Radni komad s postavljenim permanentnim magnetima i omotanom zavojnicom

Izmjerena gustoća magnetskog polja uzrokovanog permanentnim magnetima povećavala se od ruba radnog komada do kraja drugog magneta u iznosu od 4,49 mT na početku do čak 14,04 mT pri kraju pozicije drugog magneta, kako je prikazano na slikama 47. i 48.



Slika 47. Mjerenje gustoće magnetskog polja na rubu radnog komada u blizini permanentnih magneta



Slika 48. Mjerenje gustoće magnetskog polja na kraju pozicije drugog permanentnog magneta

Izmjerene vrijednosti gustoće magnetskog polja su visoke te bi trebale uzrokovati vrlo izraženo puhanje električnog luka. Postupak demagnetizacije se odvija tako da uređaj „Degauss 600“ za vrijeme trajanja navarivanja stvara suprotno magnetsko polje koje neutralizira postojeće u radnom komadu. Broj zavoja je stalan te je odabran 4 i početna struja demagnetizacije u jakosti od 50 A prema [11]. Sada se za razliku od prethodnog postupka struja demagnetizacije ne mijenja sama nego je operater povećava ako se primijeti da nije dovoljna za suzbijanje puhanja električnog luka. U našem slučaju struja je konstantno povećavana od 50 A do maksimalnih 250 A. Na slici 49. prikazano je puhanje luka od ruba radnog komada do kraja pozicije drugog magneta dok je uređaj za demagnetizaciju isključen.



Slika 49. Puhanje luka od ruba radnog komada do kraja pozicije drugog magneta kada je isključen uređaj za demagnetizaciju

Sa slike 49. vidljivo je vrlo izraženo puhanje luka u prisutnosti jakog magnetskog polja, te je navarivanje vrlo otežano.

Na slici 50. je prikazan električni luk od ruba radnog komada do kraja pozicije drugog magneta dok se provodi demagnetizacija.



Slika 50. Izgled električnog luka od ruba radnog komada do kraja pozicije drugog magneta kada je uključen uređaj za demagnetizaciju

Sa slike 50. je vidljivo da se puhanje luka uvelike smanjilo, ako ne i potpuno neutraliziralo djelovanjem suprotnog magnetskog polja, povećavajući struju demagnetizacije od 50 A do 250 A.

8. Zaključak

Magnetsko puhanje luka predstavlja veliki izazov u tehnologiji zavarivanja, jer uzrokuje pogreške i otežava proces zavarivanja i prije nastanka zavarenog spoja. Nedovoljna penetracija, pojava pora, nepotpun provar, nedovoljno mješanje osnovnog i dodatnog materijala samo su neke od pogrešaka u zavarenom spoju koje magnetsko puhanje može uzrokovati. Treba paziti na mnogo čimbenika koji mogu uzrokovati ovaj fenomen, no najveći uzrok magnetskom puhanju luka jest zastali magnetizam u materijalu koji je uzrokovan prethodnim rukovanjem i procesima kroz koje je materijal prošao. Ukoliko se ustanovi da je zaostali magnetizam prisutan u materijalu u tolikoj mjeri da bi mogao uzrokovati puhanje luka, potrebno ga je ukloniti s nekim od prisutnih metoda; metodom suprotnog polja, knockdown metodom ili metodom demagnetizacije, kako bi se onemogućilo puhanje luka.

Eksperimentalnim dijelom rada ispitano je može li se suzbiti pojava puhanje električnog luka; metodom demagnetizacije prije navarivanja, te metodom suprotnog polja “activegauss” za vrijeme trajanja postupka navarivanja.

Utvrđeno je da dolazi do pojave puhanja električnog luka pri iznosu gustoće magnetskog polja od 1,25 mT, koliko je iznosilo na poziciji 5. na radnom komadu, kako je i prikazano na slici 35. Puhanje električnog luka izraženije je što je veća gustoća magnetskog polja u materijalu, što je i prikazano na slikama 36.-39.

Metodom demagnetizacije prije procesa navarivanja, uređaj za demagnetizaciju promjenom polova istosmjerne struje (DC), te smanjivanjem jakosti struje stvara suprotno magnetsko polje, koje smanjuje iznos gustoće magnetskog polja u materijalu, kako je prikazano u tablici 15, te suzbija puhanje električnog luka, kao što se vidi sa slike 43.

Metodom demagnetizacije za vrijeme procesa navarivanja “activegauss”, uređaj za demagnetizaciju generira suprotno polje u zavojnicu koja je omotana oko radnog komada (slika 44.), a jakost struje se podešava na samom uređaju, Ovo suprotno polje se suprostavlja magnetskom polju u radnom komadu i onemogućuje puhanje električnog luka, što je prikazano na slici 48.

Oba navedena načina demagnetizacije radnog komada, su se pokazala uspješnim, no prvi način to jest demagnetizacija radnog komada prije procesa navarivanja je jednostavniji za

izvedbu, jer ne ovisi o vremenu trajanja navarivanja, te se ne trebaju parametri procesa ručno podešavati, kako je to slučaj prilikom demagnetizacije radnog komada za vrijeme trajanja navarivanja. Na dalje prilikom demagnetizacije prije procesa navarivanja, ako rezultati nisu zadovoljavajući postupak se može ponoviti, dok to nije slučaj kod demagnetizacije prilikom navarivanja, jer se već obavio postupak navarivanja, koji zbog zaostalog magnetizma može biti ispod zahtjeva kvalitete. Stoga bih za daljnje korištenje postupka demagnetizacije preporučio demagnetizaciju prije početka procesa zavarivanja/navarivanja. Posebnu pozornost treba obratiti na izmjerene iznose gustoće zaostalog magnetskog polja.

Literatura

- [1] A. N. Makarov, V. V. Rybakova, M. K. Galicheva; Electromagnetism and the Arc Efficiency of Electric Arc Steel Melting Furnaces; Tver State Technical University, Tver, Russia; 2014.
- [2] Stjepan Šavalj; Stabilnost procesa MAG zavarivanja s trokomponentnim plinskim mješavinama; Završni rad, FSB ,Zagreb, 2017.
- [3] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=38035#poglavlje22623>
pristupljeno 10.05.2019.
- [4] www.ssab.com/magneticarcblow pristupljeno 11.05.2019.
- [5] <https://www.lincolnelectric.com/en-gb/support/welding-how-to/Pages/preventing-arc-blow-detail.aspx> pristupljeno 11.05.2019.
- [6] https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/mag_puh.html pristupljeno 11.05.2019.
- [7] www.artas.hr/magnetizam pristupljeno 14.05.2019.
- [8] Zijad Hazandar, Željko Štih; Elektromagnetizam; Zagreb, 1997.
- [9] Mauer Magnetic; Demagnetisation of larger surface object; Grüningen, Switzerland, 2015.
- [10] Herima Espina Hernandez, Francisco Caleyó; Oil and gas journal; Method provides welder new technique for avoiding arc blow; Jose, 2009.
- [11] EWM ; Operating instructions; Degaussing machine; Degauss 600; Mundertsbach, 2019.
- [12] <https://diverse-technologies.net/arcblow-background/>; pristupljeno 16.10.2019.
- [13] Yoshihiro Yamaguchi & Yusuke Katada & Takeru Itou & Yoshihiko Uesugi & Yasunori Tanaka & Tatsuo Ishijima.; Experimental investigation of magnetic arc blow in plasma arc cutting; Welding in the World, 2014.
- [14] L. A. Jones & T.W. Eagar & J. H. Lang; Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding; MIT, Massachusetts, 1997.
- [15] Luka Čolić; Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom; Diplomski rad FSB, Zagreb, 2015.
- [16] Marko Horvat, Veljko Kondić, Dražen Brezovečki; Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja; Stručni rad; 2014.

[17] <https://www.ssab.com/products/brands/hardox/products/hardox-400>

pristupljeno 19.12.2019.

[18] European Standard, EN ISO-9934-3, Non destructive testing - Magnetic particle testing; 2002; preuzeto 20.12.2019.

[19] https://www.ewm.com/Set_Degauss_600--091-002065-00502.html

pristupljeno 19.12.2019.