MIG/MAG zavarivanje nehrđajućih čelika praškom punjenom žicom

Zadravec, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:301403

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-19**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište
Sjever

Završni rad br. 337/PS/2020

MAG zavarivanje nehrđajućih čelika praškom punjenom žicom

Karlo Zadravec, 2076/336

Varaždin, rujan 2020. godine

Sveučilište Sjever

Odjel za strojarstvo

Završni rad br. 337/PS/2020

MAG zavarivanje nehrđajućih čelika praškom punjenom žicom

Student

Karlo Zadravec, 2076/336

Mentor

Doc. dr. sc. Matija Bušić dipl. ing. stroj

Varaždin, rujan 2020. godine

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR-42000 Varaždin

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Karlo Zadravec | MATIČNI BROJ 0336020640

DATUM 22.09.2020. | KOLEGIJ Tehnologija III

NASLOV RADA MIG/MAG zavarivanje nehrđajućih čelika praškom punjenom žicom

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Flux cored arc welding of stainless steels

MENTOR dr.sc. Matija Bušić | ZVANJE docent

ČLANOVI POVJERENSTVA

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

Zadatak završnog rada

BROJ 337/PS/2020

OPIS

U završnom radu pristupnik treba na temelju literaturnih podataka proučiti tehnologiju MIG/MAG zavarivanja. Potrebno je navesti sve prednosti i nedostatke ove tehnologije. Opisati načine prijenosa rastaljenog metala pri MIG/MAG zavarivanju. Opisati namjenu i vrste inertnih i aktivnih zaštitnih plinova. Opisati postupak MIG/MAG zavarivanja praškom punjenom žicom sa i bez zaštitnog plina. Opisati vrste punjenih žica za zavarivanje. Posebno obraditi svojstva i primjenu praškom punjenih žica Opisati vrste i svojstva nehrđajućih čelika te definirati njihovu prikladnost za zavarivanje. Dati primjere primjene zavarivanja nehrđajućih čelika praškom punjenom žicom.

ZADATAK URUČEN 07.10.2020. | POTPIS MENTORA M. Bušić

REPUBLIKA HRVATSKA SVEUČILIŠTE SJEVER

Zahvala

Želim zahvaliti mentoru dr.sc Matiji Bušiću koji je pratio postupak izrade završnog rada i svojim savjetima uvelike pomogao u pripremi završnog rada. Također bih htio zahvaliti svim profesorima koji su tijekom studija doprinijeli razvoju mog znanja, ali i mojem osobnom razvoju kao osobe.

Zahvaljujem roditeljima i prijateljima na najvećoj podršci i razumijevanju tokom studija i posvećujem im ovaj rad.

Sažetak

MIG/MAG zavarivanje je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom uz zaštitu aktivnih ili inertnih plina. Ovaj se postupak može primijeniti na širokom spektru materijala različitih vrsta i debljina. Postoji nekoliko metoda prijenosa metala. Prijenos metala s kratkim spojem primjenjuje se kod korijena zavara kod debljih pozicija ili kod zavarivanja tanjih limova. Prijenos metala štrcajućim lukom je primjenjiv gotovo na svim materijalima. Kod prijenosa mješovitim lukom javljaju se prijenos metala štrcajućim lukom i kratkim spojem u intervalima. Impulsni prijenos luka prikladan je za širi raspon debljina materijala i u svim položajima. Za svaki od navedenih prijenosa potrebni su određeni parametri. Zaštitni plinovi koji se javljaju u ovome postupku zavarivanja također su od iznimne važnosti jer štite mjesto zavarivanja, ali i kapljice rastaljenog materijala za vrijeme prolaska kroz električni luk. Primjenom načina prijenosa metala, određenog plina, debljini i vrsti materijala, tako se primjenjuju i dodatni materijali. Dodatni materijal može biti puni, punjen praškom ili punjen metalom. Svi ti parametri utječu na sami zavar. Stoga je važno odrediti točne parametre kako bi se izbjegle neželjene pogreške u samome zavarivanju te greške u zavaru koje se mogu manifestirati kao: pukotine, penetracija, poroznost, naljepljivanje i štrcanju. Navedeni su i podjeljeni nehrđajući čelici prema mikrostrukturi i prema kemijskom sastavu, opisani su prema mikrostrukturi i opisana je njihova zavarljivost.

Ključne riječi: MAG, zavarivanje, plinovi, dodatni materijal, parametri, prah, žica, nehrđajući čelik, mikrostruktura

Summary

MIG/MAG welding is flux electrode welding with the protection of active or inert gases. This procedure can be applied to a wide range of materials of different types and thicknesses. There are several methods of transferring metals. Short – circuit metal transfer is applied to the root of welds at thicker materials or to welding thinner sheets. The conveyance of metals by globular arc is applicable almost to all materials. Mixeed arc transfers of metals by globular and short – circuit occur in intervals. Pusled curve transmission is suitable for a wider range of material thickness and in all positions. For each of these transffers, certain parameters are required. The protective gases arising from this welding process are also of paramount importance since they protect the weld, but also the droplets of molten metal when passing through an electric arc. By using means of transmission of metals, specific gas, thickness and type of material, additional materials are thus applied. The Additional material may be filled, powder – filled or filled with metal. All these parameteres affect the weld itself. Is is therefore important to define the exact parameters in order to avoid undesired welding errors and errors in the weld that can be: cracks, penetration, porosity, glare and spraying. The stainless steels are specified and dividided according to microstrutures and chemical composition, they are described according to their mictrostructures and their weldability has been described.

Key words: MAG, welding, gas, additional material, parameters, flux, wire, stainless steel, microstructure.

Popis korištenih oznaka

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
$v_ž$	Brzina zavarivanja	mm/min
Q	Protok	l/min
L	Induktivitet	H
I	Jakost struje	A
U	Napon električnog luka	V
$l_{SKŽ}$	Slobodni kraj žice	mm
α	Nagib	°
F	Sila relativnog djelovanja	N
F_e	Sile eksplozije kapljicama metala	N
F_{pl}	Sila strujanja i pritiska plazme	N
F_{pm}	Sila površinske napetosti	N
F_g	Sila gravitacije	N
F_{em}	Elektromagnetska sila	N
F_{emr}	Radijalna komponenta elektrmagnetske sile	N
F_{ema}	Aksijalna komponenta elektrmagnetske sile	N
F_r	Sila relativnog djelovanja	N
$D_ž$	Promjer žice	mm
d_k	Promjer kapljice	mm
d_s	Promjer spoja	mm
d_p	Promjer odvajanja	mm
K_p	Stupanj punjenja	-
m_p	Masa punjenja	kg
m_t	Masa obloge	kg
η_z	Koeficijent iskorištenja	-
m_n	Masa zavara	kg
m_{pz}	Masa pretaljene žice	kg
R_e	Granica tečenja	MPa
R_m	Vlačna čvrstoća	MPa
A_5	Istezanje	%

Popis korištenih kratica

MAG eng. Metal Active Gas
Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina.

MIG eng. Metal inert Gas
Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina.

FCAW eng. Flux Core Arc Welding
Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom u žaštiti inertnog plina.

GMAW eng. Gas Metal Arc Welding
Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti neutralnog plina.

REL Ručno elektrolučno zavarivanje

TIG eng. Tungsten inert Gas
Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina.

STT eng. Surface Tension Tranfer

ELA eng. Extra Low Additions
Čelici sa vrlo niskim udjelom dodataka

PH eng. Precipitation Hardened
Precipitacijski očvrsnuti

Sadržaj

1. Uvod 1
2. MIG/MAG postupak zavarivanja 3
   2.1. Prednosti i nedostaci 5
3. FCAW postupak zavarivanja 7
   3.1. Izvor struje za FCAW zavarivanje 8
   3.2. Vrste FCAW postupka 8
      3.2.1. FCAW – S postupak 8
      3.2.2. FCAW – G postpak zavarivanja 9
4. Komponente zavarivanja 10
5. Način prijenosa metala 12
   5.1. Prijenos metala kratkim spojem 13
   5.2. Prijenos metala mješovitim lukom 15
   5.3. Prijenos metala štrcajućim lukom 17
   5.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom 20
   5.5. Prijenos metala strujama visoke gustoće 22
6. Zaštitni plinovi 24
   6.1. Inertni plinovi 27
      6.1.1. Argon (Ar) 27
      6.1.2. Helij (He) 28
   6.2. Aktivni plinovi 29
      6.2.1. Ugljični dioksid (CO_2) 29
      6.2.2. Kisik (O_2) 30
      6.2.3. Vodik (H_2) 30
   6.3. Smjese plinova 31
      6.3.1. Argon/Helij 31
      6.3.2. Argon/Ugljikov dioksid 32
      6.3.3. Argon/Kisik 33
      6.3.4. Trokomponentne smjese 34
7. Praškom punjena žica 36
   7.1. Općenito o praškom punjenim žicama 37
      7.1.1. Opća podjela punjenih žica 39
   7.2. Podjela prema sastavu punjenja 40
      7.2.1. Žice punjene rutilnim mineralnim praškom 40
      7.2.2. Žice punjene bazičnim mineralnim praškom 41
      7.2.3. Žice punjene metalnim praškom 43
   7.3. Praškom punjene žice za MAG zavarivanje nehrđajućih čelika 44
   7.4. Standardizacija praškom punjenih žica 46
8. Tehnologija zavarivanja i utjecaj parametara 50
   8.1. Jakost struje 53
   8.2. Napon električnog luka 54
   8.3. Induktivitet 55

8.4. Duljina slobodnoga kraja dodatnog materijala (žice) 55
8.5. Brzina zavarivanja 57
8.6. Zaštitni plinovi i dodatni materijal 57
8.7. Tehnika zavarivanja (položaj) 58

9. Oprema 59

9.1. Izvor struje 60
9.2. Pištolj za MIG/MAG zavarivanje 61
9.3. Sustav za dobavu žice 62
9.4. Ostala oprema 63

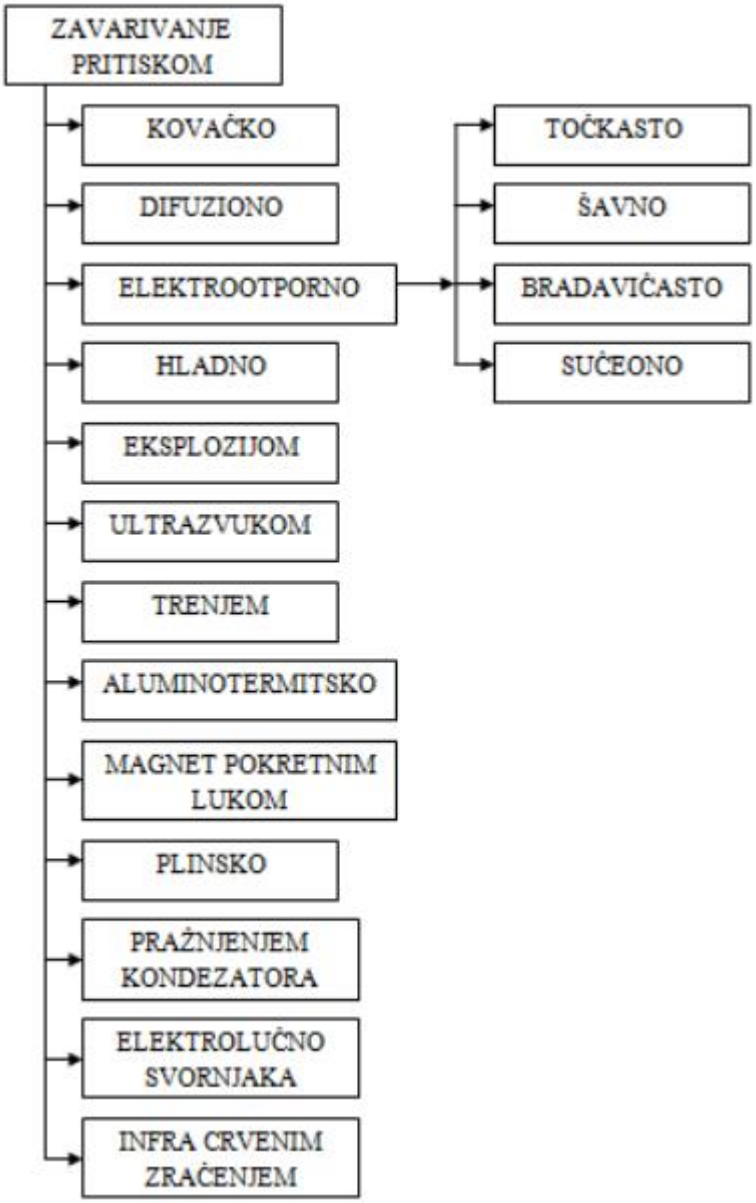
10. Nehrđajući čelici 64

10.1. Feritni nehrđajući čelici 65
10.2. Austenitni nehrđajući čelici 67
10.3. Austenitno – feritni nehrđajući čelici 69
10.4. Martenzitni nehrđajući čelici 70
10.4.1. Mekomartenzitni nehrđajući čelici 71

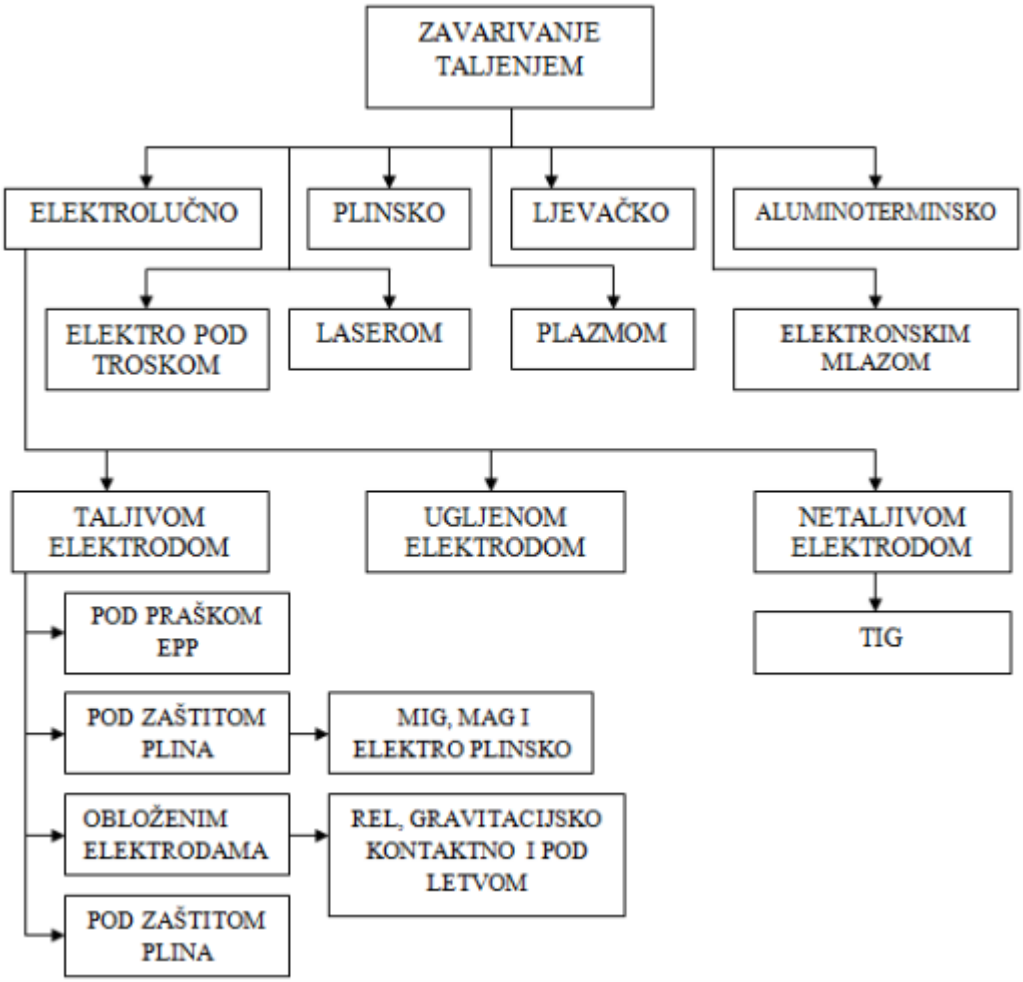
11. Zavarljivost nehrđajućih čelika 72
12. Pasivizacija 74
13. Primjeri zavarivanja nehrđajućih čelika sa PPŽ 75
14. Zaključak 77
15. Literatura 79

1. Uvod

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više istorodnih ili raznorodnih materijala primjenom topline tj. taljenjem ili pritiska s ili bez dodatnog materijala na način da spoj ima kontinuitet i što jednoličnija svojstva. Sama zavarljivost je sposobnost pojedinog materijala da se pri određenim uvjetima zavarivanja ostvari kontinuirani spoj. Slika 1.1 prikazuje podjelu postupaka zavarivanja pritiskom, a slika 1.2 prikazuje podjelu postupaka zavarivanja taljenjem.



Slika 1.1 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom

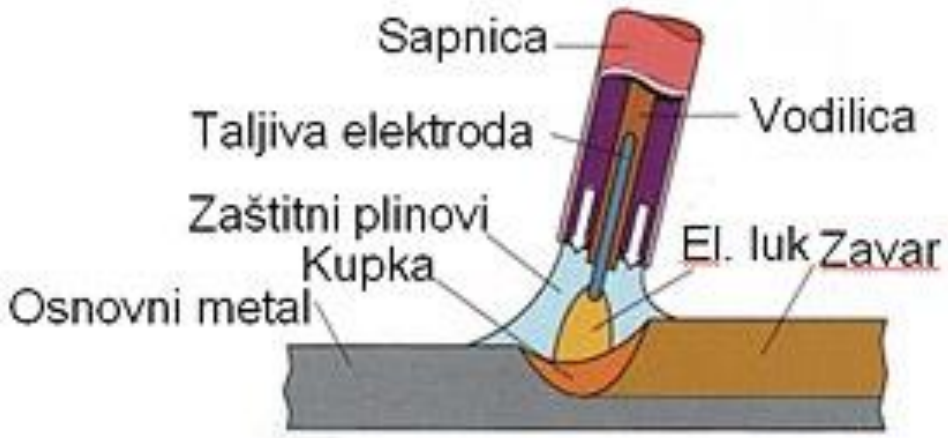


Slika 1.2 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem

2. MIG/MAG postupak zavarivanja

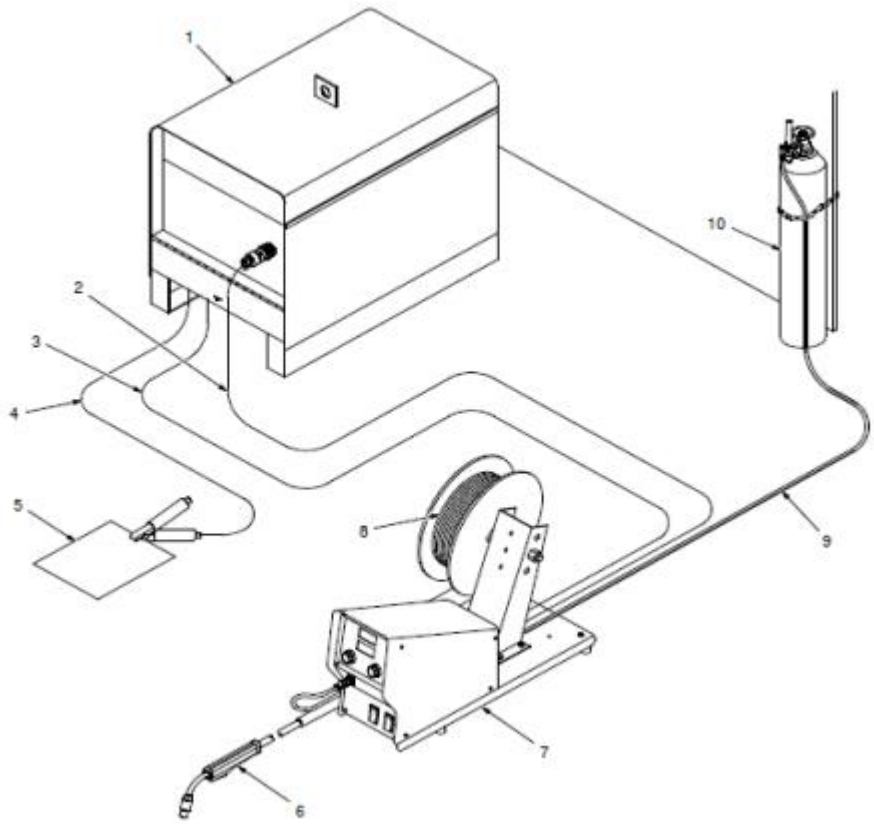
MIG/MAG (Metal inert Gas/Metal Active Gas) ili GMAW (Gas Metal Arc Welding), je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. To je postupak spajanja metala taljenjem i očvršćivanjem dijela osnovnog metala i dodatnog metala pri čemu se za zaštitu rastaljenog metala koristi inertni, aktivni plinovi ili mješavine plinova [1]. Kod ovog postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu spojena na plus pol istosmjernog izvora struje. Taj proces odvija se u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju zaštitni plinovi npr. Ar ili He kao inertni ili CO_2 kao aktivni ili mješavine tih plinova [2].

Pogonski sustav dodaje žicu kontinuirano uz konstantnu brzinu kroz cijevi paketa i pištolja do mjesta zavarivanja gdje se uspostavlja električni luk. Žica je ujedno i elektroda i dodatni materijal. Samim njenim taljenjem popunjava se pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski ili automatski [2]. Slika 2.1 prikazuje shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja.



Slika 2.1 Shema postupka MIG/MAG zavarivanja

Ako se zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od pet metara od izvora struje obično se primjenjuje sustav „push-pull“, dodatni pogon za dodavanje žice koji je smješten u samom pištolju. Sustav se primjenjuje i na manjim udaljenostima ako se radi s mekanijim dodatnim materijalom ili tanjim. Plinovi se dovode kroz posebnu sapnicu [2]. Slika 2.2 Prikazuje shemu cijelog uređaja za ovaj postupak zavarivanja.



Slika 2.2 Shema uređaja za zavarivanje

Opis sheme:

1) Izvor struje
2) Kabel za napajanje kontrolnog uređaja
3) Kabel uređaja za ulaganje
4) Kabel za uzemljenje
5) Radni komad
6) Pištolj za zavarivanje
7) Uređaj za dodavanje žice
8) Kolut sa dodatnim materijalom (žicom)
9) Paket crijeva za plin
10) Boca sa zaštitnim plinom

Parametri kod MIG/MAG zavarivanja [3]:

— Brzina zavarivanja $v_ž$ [mm/min]
— Protok plina Q [l/min]
— Vrsta plina
— induktivitet L [H]
— Jakost struje I [A]
— Napon električnog luka U [V]
— Slobodni kraj žice $l_{SKŽ}$ [mm]
— Promjer žice $d_ž$ [mm]
— Nagib pištolja α [°]

2.1. Prednosti i nedostaci

Kao i svaki tehnički postupak tako i postupak MIG/MAG zavarivanja ima svoje prednosti, ali i svoje nedostatke[3,4].

Prednosti su:

- Mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih vrsta i debljina
- Jednostavna i lako dostupna oprema za zavarivanje
- Mogućnost zavarivanja u svim položajima
- Visoka iskoristivost dodatnog materijala
- Visoka učinkovitost postupka zavarivanja u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- Estetski prihvatljivi izgled zavarenih spojeva
- Relativno jednostavna obuka zavarivača
- Manji utjecaj zavarivača na proces zavarivanja
- Manji unos topline u usporedbi s drugim zavarivačkim postupcima
- Stvaranje manje količine zavarivačkih plinova u usporedbi s REL postupkom
- Lako i brzo čišćenje zavarenih spojeva
- Minimalno štrcanje
- Nizak unos vodika u metal zavara (< 5mL/100g metala zavara)
- Manja deformacija osnovnih materijala u slučajevima primjene suvremenih MIG/MAG postupaka
- Jednostavna automatizacija
- Niža cijena dodatnih materijala i zavara po jedinici dužine u usporedbi s ostalim elektrolučnim procesima
- Mogućnost primjene različitih plinskih mješavina i praškom punjene žice

Nedostaci su:

- Manji toplinski input kod prijenosa metala kratkim spojevima
- Veći toplinski input kod prijenosa metala štrcajućim lukom
- Nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom
- Mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima kod terenskih radova zbog vanjskih utjecaja
- Problemi kod dovođenja materijala kod zavarivanja aluminija i njegovih legura
- Veći broj pogrešaka kod neodgovarajuće tehnike ili parametara zavarivanja
- Složenost uređaja i opreme za zavarivanje

3. FCAW postupak zavarivanja

FCAW postupak se koristi za zavarivanja koja zahtjevaju veliku količinu depozita. FCAW postupak daje stabilniji i lakše upravljiv luk u odnosu na MAG zavarivanje kod većih struja. Postupak ima bolju preglednost taline, površina ostaje prekrivena troskom koja se naknadno treba ukloniti. Izraženije je štrcanje i nastajanje dima. Praškom punjene žice imaju veću količinu depozita i veću penetraciju u odnosu na MAG zavarivanje. Tako se deblji materijali mogu lakše i brže zavariti koristeći deblju praškom punjenu žice. Ovim postupkom se ostvaruju visokokvalitetni zavari, uz veću brzinu zavarivanja, a zavarivanje samožaštitnim praškom punjenim žicama moguće je i kad atmosferski uvjeti nisu idealni.

FCAW je visokoučinski postupak za zavarivanje različitih ugljičnih, niskolegirnih, visokolegirnih te nehrđajućih čelika. FCAW je varijanta MAG zavarivanja te dijele neke sličnosti, ali i neke znatne razlike. FCAW postupak nudi veću fleksibilnost sastava legirnog dodatnog materijala, omogućuje veće količine depozita i veću stabilnost luka. Druga razlika je u načinu zaštite taline od reakcije atomsferom.

Prednosti:

- Smanjeni troškovi i veća količina depoozita
- Legirni elementi se nalaze u punjenju pa nije potrebno naknadno dodavanje
- Idealno za spojeve na kojima nema zahtjeva za naknadnu obradu lica zavara
- Manja je opasnost od poroznosti i ostvaruje veću penetraciju
- Pogodan za zavarivanje na vjetrovitim i prljavim mjestima
- Troska pomaže zadržanju taline

Nedostaci:

- Potrebno uklanjanje troske nakon svakog prolaza
- Stvara se veća količina dimnih plinova
- Izraženije rasprskavanje
- Cijena praškom punjene žice je veća od običnih punih žica
- Viša osjetljivost na točnost parametara

3.1. Izvor struje za FCAW zavarivanje

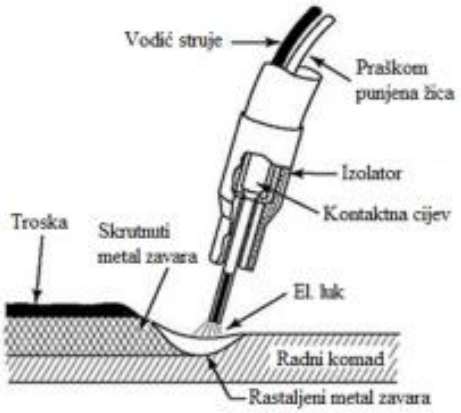
Koriste se izvori struje koji imaju konstantnu voltažu. Ti izvori drže napon približno jednakim, neki konstantnim. Većina izvora struje ima radni ciklus 100% i omogućuje neprekidno zavarivanje. FCAW postupak u većini slučajeva koristi veće struje zavarivanja što zahtjeva i veće izvore struje za zavarivanje.

3.2. Vrste FCAW postupka

Razlika je u sastavu praška kojim su punjene elektrode, što pruža različite prednosti. Samozaštitne praškom punjene žice dobre su za rad na otvorenom pošto prah unutar žice stvara sigurnu žaštitu. Nije potreban zaštitni plin iz vanjskog izvora, pa je instalacija i prijenos opreme jednostavniji, lakši i brži. Osnovna podijela vrsta FCAW postupka su FCAW – S postupak i FCAW – G postupak.

3.2.1. FCAW – S postupak

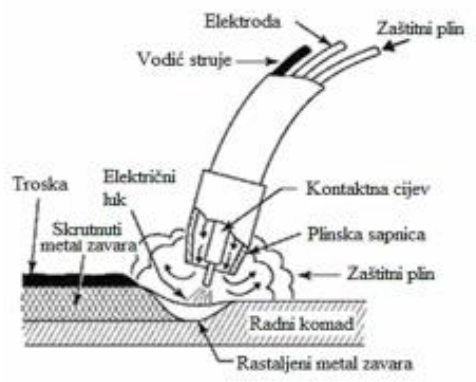
FCAW – S postupak ili kako se još naziva samozaštitna praškom punjena žica koristi se uglavnom kod zavarivanja na terenu, jer nema opasnosti od slabljenja zaštite zavara zbog vjetra. Sastav praška FCAW – S žica je takav da od atmosfere štiti i rastaljeni metal zavara i kapljicu tijekom prijenosa s vrha žice kroz električni luk u talinu zavara. Slika 3.1 shematski prikazuje FCAW – S postupak zavarivanja.



Slika 3.1 FCAW – S postupak zavarivanja

3.2.2. FCAW – G postpak zavarivanja

FCAW – G postupak zavarivanja osigurava bolju zaštitu od FCAW – S postupka, zbog sekundarne zaštite plinom iz vanjskog izvora. Također pomaže zadržavanje taline unutar žlijeba kod prisilnih položaja zavarivanja, povećava učinkovitost i omogućuje dublju penetraciju. Slikom 3.2 je prikazan FCAW – G postupak zavarivanja.



Slika 3.2 FCAW – G postupak zavarivanja

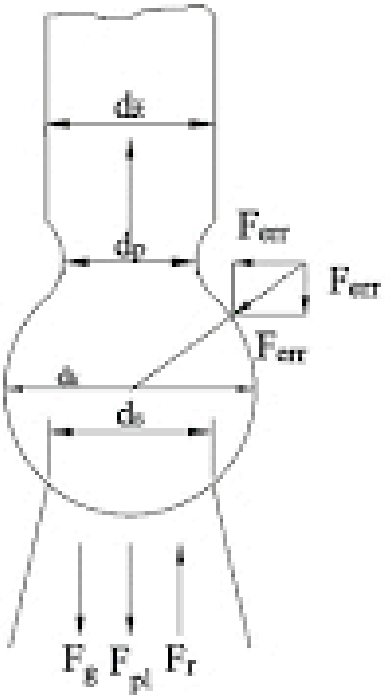
4. Komponente zavarivanja

Komponente koje utječu na prijenos metala sastoje se od sila i kemijskih reakcija koje se događaju u području prijenosa metala. Te komponente djeluju na sam električni luk te on djeluje na sami prijenos metala i samu kvalitetu gotovog zavara [5]. Kvaliteta luka određena je karakteristikama:

- Vrsti i promjeru dodatnog materijala (elektrode, žice)
- Osnovnom materijalu (kvaliteti pripreme)
- Zaštitnom plinu
- Parametrima zavarivanja (napon i jakost struje)
- Djelovanju sila

Slika 3.1 prikazuje sile kako djeluju na kapljicu metala u električnom luku. Iz sheme se vidi da neke sile pomažu u prijenosu metala, dok se druge opiru prijelazu kapljice u kupku taline. Sile koje se nalaze su:

- Sila relativnog djelovanja [F]
- Sila eksplozije kapljicama metala [F_e]
- Sila strujanja i pritiska plazme [F_{pl}]
- Sila površinske napetosti [F_{pm}]
- Sila gravitacije [F_g]
- Elektromagnetska sila [F_{em}]



Slika 4.1 Shema sila na kapljicu taline

Kratice:

$D_ž$ – promjer žice (elektrode)

d_k – promjer kapljice

d_s – promjer spoja

d_p – promjer odvajanja kapljice od žice

F_e – elektromagnetska sila

F_{emr} – radijalna komponenta elektromagnetske sile

F_{ema} – aksijalna komponenta elektromagnetske sile

F_g – gravitacijska sila

F_{pl} – sila strujanja i pritiska plazme

F_r – sila relativnog djelovanja

Od svih sila najveći utjecaj u električnom luku ima elektromagnetska sila. Omjerom radijalne i aksijalne komponente elektromagnetske sile stvaraju se uvjeti za tzv. „pinch efekt“ [1]. Sama veličina kapljice koja se prenese ovisi o toj sili, struji zavarivanja i zaštitnom plinu. Na slici 4.1 prikazano je još shematski kako elektromagnetska sila djeluje na kapljicu.

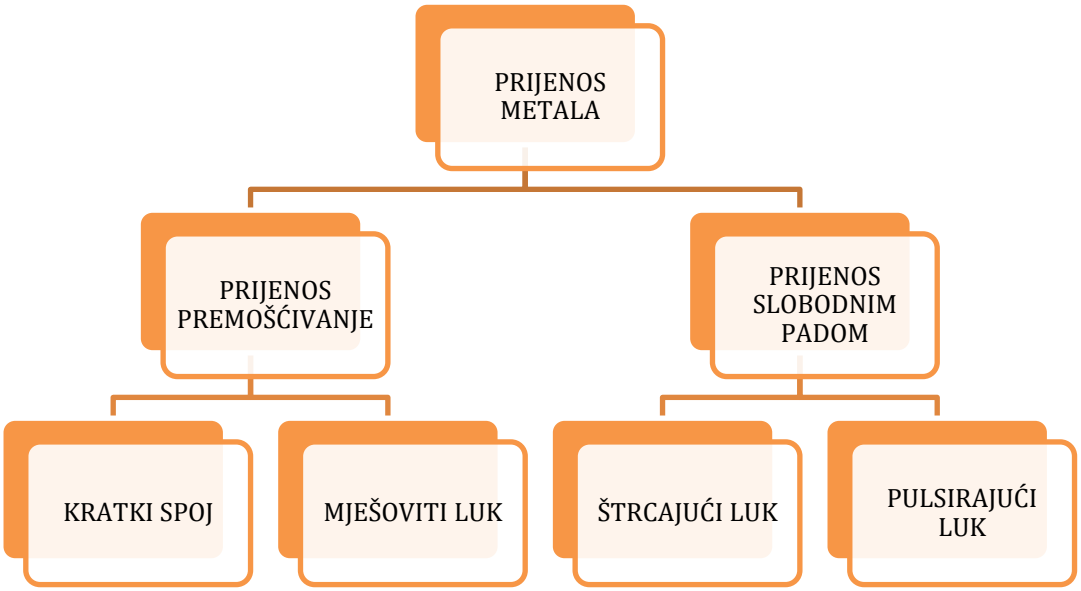
Sile površinske napetosti djeluju na površinu rastaljene kapljice, na unutarnju i vanjsku stjenku kapljice, te održavaju sami oblik kapljice [3]. Gravitacijska sila pomaže prijenosu kapljice u talinu. Sila strujanja i pritiska plazme djeluje na gibanje i usmjeravanje same kapljice metala prema talini. Sila reaktivnog djelovanja je sila koja se odupire odvajanju kapljice.

5. Način prijenosa metala

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja prijenos metala s žice (elektrode) u talinu na radnom komadu se obavlja metalnim kapljicama ili diskretnim komadićima metala [6]. Prijenos metala može se realizirati tako da se rastaljene kapljice s vrha žice (dodatni materijal) prenesu slobodnim letom kroz električni luk na osnovni materijal ili na način da metalna kapljica s vrha žice dođe u fizički kontakt s osnovnim materijalom prilikom čega nastaje kratki spoj [7]. Prijenos se može ostvariti i tako da se dio metala prenese na jedan način, a dio metala na drugi način. Same metode prijenosa metala ovise o više čimbenika, kao što su:

- Jakost struje
- Vrsti zaštitnog plina
- Vrsti dodanog materijala
- Naponu električnog luka
- Promjeru žice (dodatnog materijala)

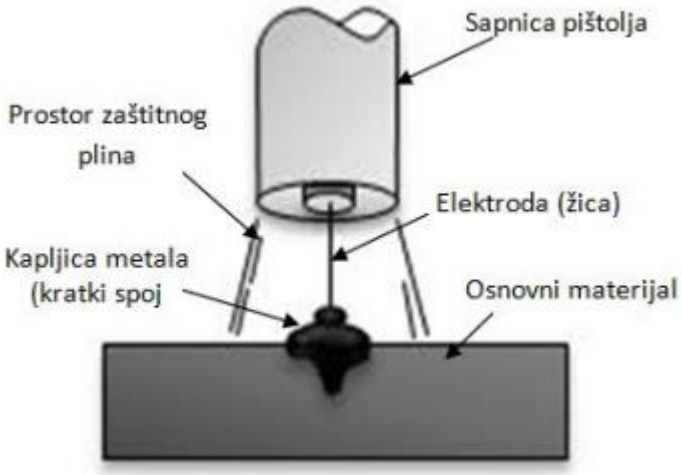
Prema karakteristika luka razlikujemo četiri karakteristična načina prijenosa. Slika 5.1 prikazuje mehanizme prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja.



Slika 5.1 Mehanizmi prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja

5.1. Prijenos metala kratkim spojem

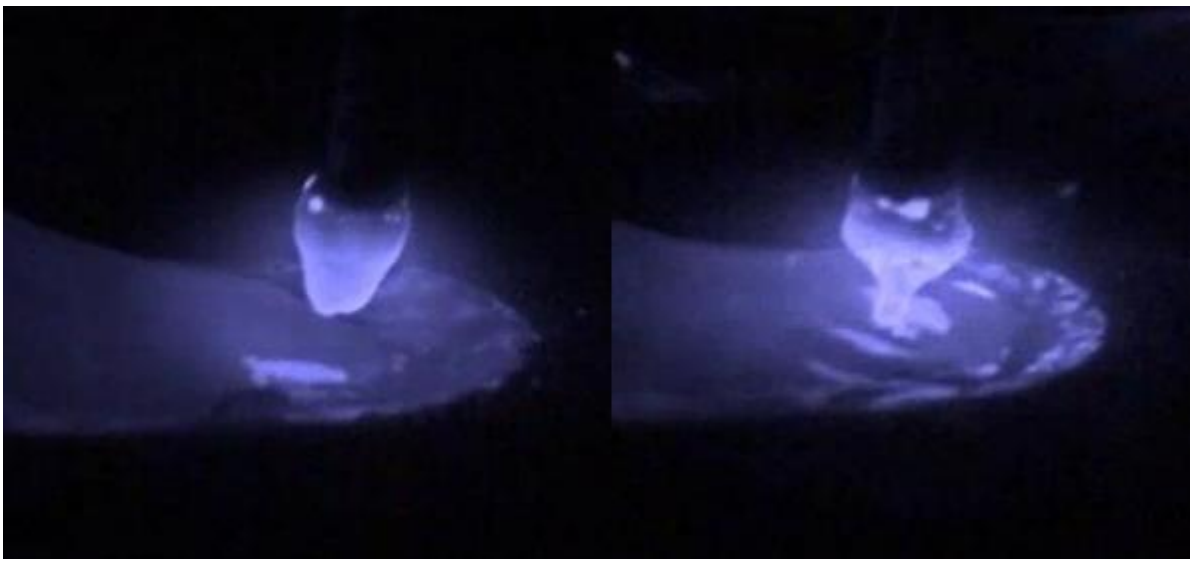
Prijenos metala kratkim spojem postiže se korištenjem najnižih jačina struja i najtanjih žica (elektroda ili dodatnog materijala). Ovaj prijenos metala je postupak kod kojeg se kontinuirano dovođena, puna ili praškom punjena, žica stvara metal zavara uslijed uspostave kontinuiranih kratkih spojeva. Slika 5.2 shematski prikazuje prijenos metala kratkim spojem. Proces se događa između 20 i 30 puta u sekundi [2,7].



Slika 5.2 Shema prijenosa metala kratkim spojem

Glavne značajke ovoga postupka su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog materijala vrši pri fizičkim kontaktu dodatnog i osnovnog materijala tj. taline. Period pri kojem se odvaja kapljica metala dijeli se na fazu električnog luka i fazu kratkog spoja. Do samog odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi gdje se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu sa samim rastopljenim metalom pri čemu raste jakost struje. Samim tim dolazi do povećanja magnetske sile, koja se javlja na kraju elektrode, zbog djelovanja elektromagnetskog polja i steže kapljicu taline s vrška žice. Ta se pojava još zove „pinch effect“ [3,7]. Slika 5.3 prikazuje prijenos metala kratkim spojem u realnom stanju.

Kod ovakvog prijenosa metala dobivaju se zavari malog presjeka, koji se brzo hlade što je pogodno za spajanje tankih limova. Pogodan je za spajanje korijena zavara kod debljih komada, za spojeve kod kojih se zahtijeva što manje deformacije jer se unosi mala količine topline. Napon kod kojeg se koristi ovaj postupak iznosi 13 – 21 V, dok je jakost struje u području 50 – 170 A [3,6].



Slika 5.3 realni prikaz prijenosa metala kratkim spojem

Prednosti:

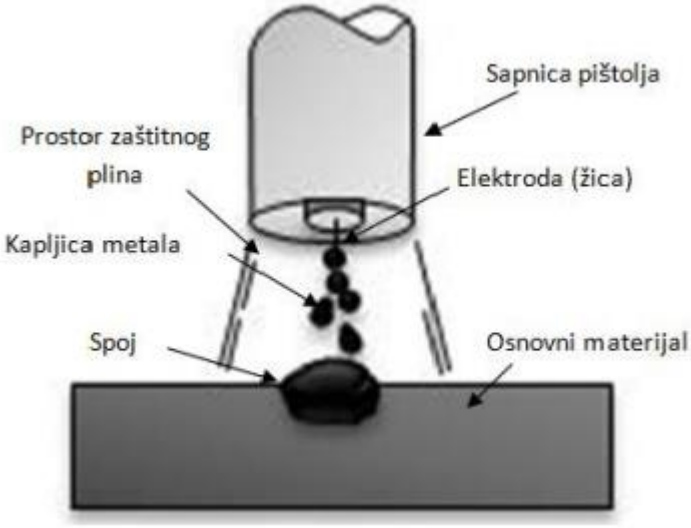
- Primjena u svim zavarivačkim položajima
- Primjena na cijevnim pozicijama
- Manje deformacije uslijed manjeg unosa topline
- Jednostavno rukovanje
- Iskoristivost elektrode je 90% i više

Nedostaci:

- Ograničenje primjene postupka radi debljine materijala
- Ograničenje primjene postupka radi pripreme spoja
- Lošija mogućnost kontrole procesa
- Povećana mogućnost gubitka zaštitnog plina (rad na otvorenom)

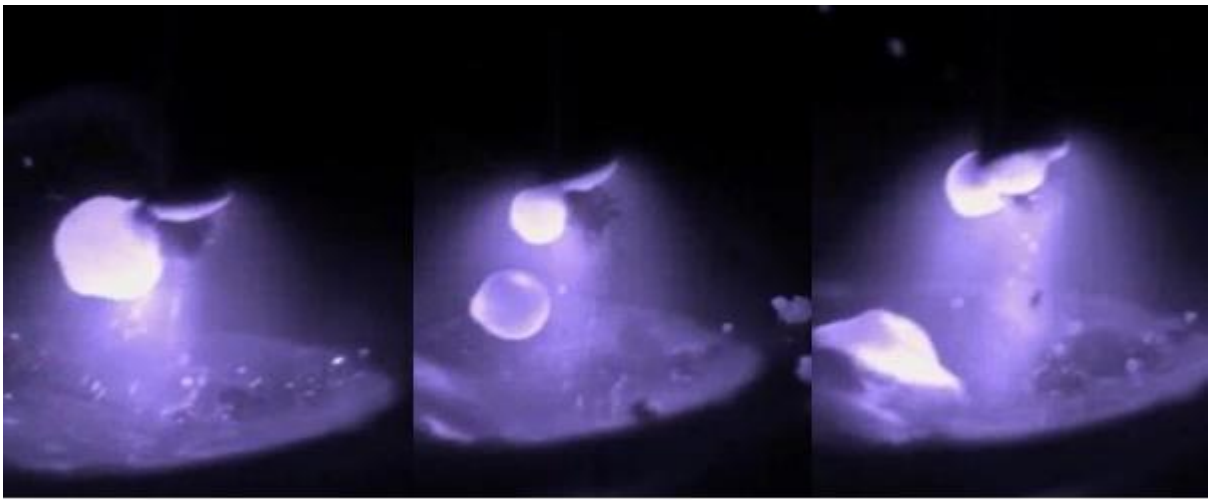
5.2. Prijenos metala mješovitim lukom

Kod ovakvog prijenosa metala, prijenos se odvija tako što se stvaraju krupne kapljice metala na vrhu elektrode (žice) koja se pod djelovanjem sila, koje su najčešće gravitacijske, u električnom luku odvaja i pada u talinu. Javlja se prijenos kratkim spojem i štrcajućim lukom, a sama izmjena i redoslijed mehanizma prijenosa je slučajna pojava [7]. Slika 5.4 prikazuje shematski prijenos metala mješovitim spojem.



Slika 5.4 Shema prijenosa metala mješovitim lukom

Glavni nedostatak ovoga prijenosa je njegova slučajnost samih prijenosa (štrcajući i kratki spoj), koje se odlikuje većim razlikama u samim promjerima odvojenih kapljica koje na kraju definiraju geometriju zavarenog spoja. Prijenos kapljica nije aksijalan, a samo štrcanje je povećano [7,8]. Slika 5.5 prikazuje realni prijenos metala mješovitim lukom.



Slika 5.5 realni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom

Ovaj postupak prijenosa metala bio je zastupljen 60 – ih i 70 – ih godina prošloga stoljeća u izradi čeličnih konstrukcija, ali danas je u svim ozbiljnim industrijskim pogonima zamijenjen nekim od naprednih postupaka prijenosa metala [5].

Prednosti:

- Mogućnost korištenja jeftinih zaštitnih plinova, mješavine sa visokim udjelima CO_2
- Sposobnost zavarivanja visokim brzinama
- Niska cijena izvora struje za zavarivanje
- Niska cijena dodatnog materijala

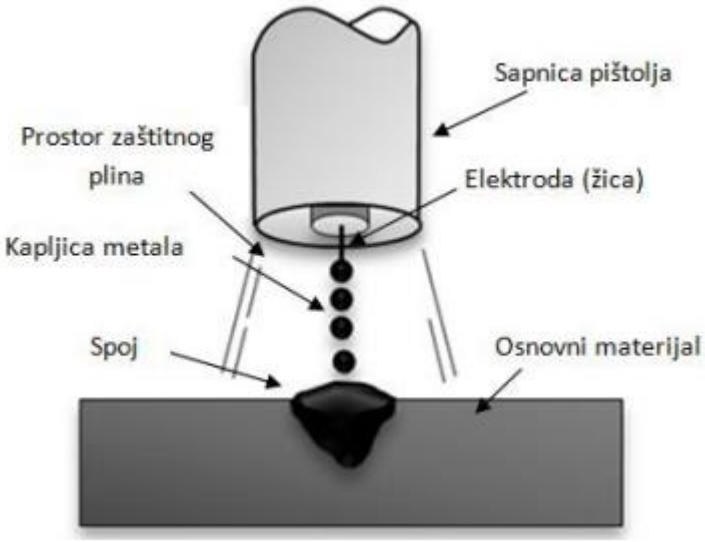
Nedostaci:

- Povećana vjerojatnost nastajanja nepotpune fuzije u zavarenom spoju
- Značajno povećanje prskanja
- Niska iskoristivost elektrode (87 – 93%)
- Razlika u promjeru odvojenih kapljica

5.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

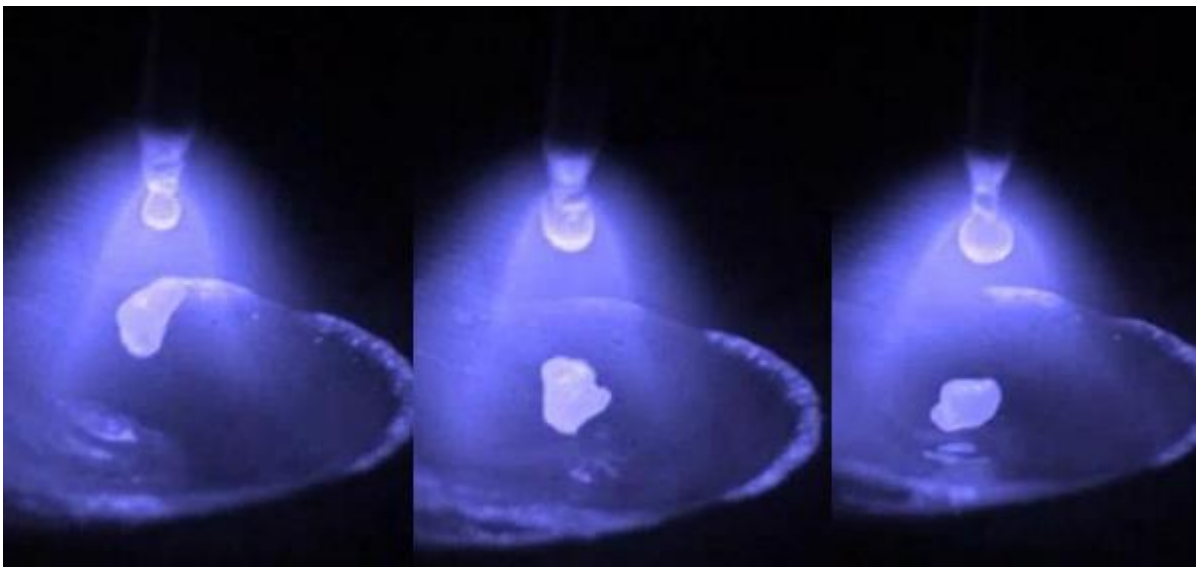
Prijenos metala ovakvim postupkom ostvaruje se uz jaku struju i velike napone električnog luka. Karakteristika ovog načina prijenosa je da prijenos metala, rastaljene kapljice, s vrha elektrode ide slobodnim letom kroz atmosferu luka. Stvaraju se male kapi taline koje se gibaju aksijalno s obzirom na elektrodu, a sama elektroda nema ni u kojem trenutku fizički kontakt s osnovnim materijalom. Sile koje se javljaju u električnom luku otkidaju kapi te ih usmjeravaju prema radnom komadu [7,8]. Slika 5.6 prikazuje shemu prijenosa metala ovakvim postupkom.

Ovakav prijenos metala omogućit će veća količina energije koju je potrebno unijeti u sami proces. Samim tim će se povećati struja, koja će u konačnici dati veće zagrijavanje i povećanje „pinch effecta“ te će se smanjiti sile koje nepovoljno djeluju na odvajanje kapljice. Promjer kapljice je manje od promjera žice [7].



Slika 5.6 Shema prijenosa metala štrcajućim lukom

Jedan od glavnih uvjeta je taj da se moraju primijeniti plinske mješavine kod kojih je maksimalna koncentracija aktivnih plinova 18%. Često se upotrebljavaju i mješavine sa malim postotkom kisika. Sam kisik utječe na dubinu penetracije. Kod kisika je penetracija uža i dublja, dok se kod upotrebe CO_2 dobiva blaža i zaobljena penetracija [7]. Slika 5.7 prikazuje realni prijenos metala štrcajućim lukom.



Slika 5.7 Realni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom

Postupak prijenosa metala štrcajućim lukom primjenjiv je na gotovo sve vrste materijala. Neki od njih su nehrđajući čelik, magnezij, bakar, aluminij i legure na bazi magnezija, nikla te aluminija. Moguće je primjena žice koje su punjene praškom. Tabela 5.1 prikazuje izbor struje kod prijenosa metala štrcajućim lukom.

Tabela 5.1 Izbor jačine struje kod prijenosa metala

OSNOVNI MATERIJAL	**Promjer elektrode, žice (DM) [mm]**	**Vrsta zaštitnog plina**	**Jakost struje zavarivanja [A]**
Ugljični i niskolegirani čelici	0,8	90% Ar 10% CO_2	155 – 165
	0.9		175 – 185
	1,2		215 – 225
	1,3		265 – 275
	0,9	98% Ar 2% CO_2	130 – 140
	1,2		205 – 215
Nehrđajući čelici	0,8	98% Ar 2% CO_2	120 – 130
	0.9		140 – 150
	1,2		185 – 195
	1,6		250 – 260
	0,8		130 – 140
	0,9		200 – 210
	1,2		145 – 155
	1,6		255 – 265

Postupak prijenosa metala štrcajućim lukom koristi se kod zavarivanja debljih pozicija u horizontalnim položajima. Velika energija koja se unosi u proces zavarivanja daje veliku količinu rastaljenog materijala što je vrlo teško primijeniti u prisilnim položajima zavarivanja [2].

Prednosti:

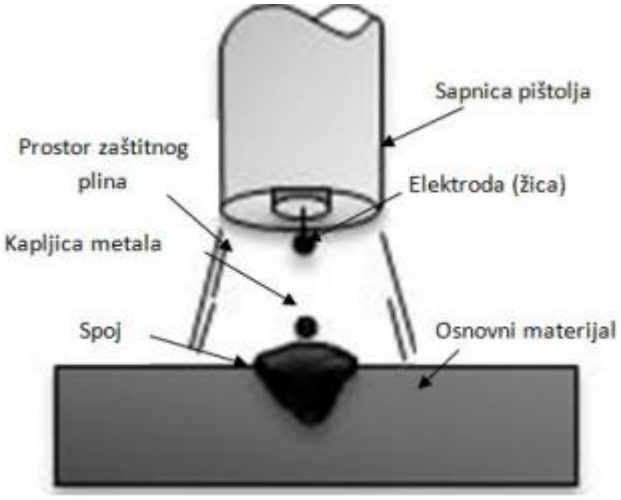
- Velika količina rastaljenog materijala
- Velika iskoristivost dodatnog materijala (<98%)
- Moguće primijeniti širok spektar dodatnog materijala
- Jednostavno izvođenje zavarivanja
- Malo okolno štrcanje i manji troškovi naknadnog čišćenja

Nedostaci:

- Mogućnost primjene u horizontalnom položaju
- Povećana koncentracija plinova nastalih u procesu zavarivanja
- Povećana mogućnost gubitaka zaštitnog plina uslijed vanjskih utjecaja
- Povećano zračenje što iziskuje bolju zaštitu zavarivača i okoline
- Obavezna upotreba skupljih plinskih mješavina

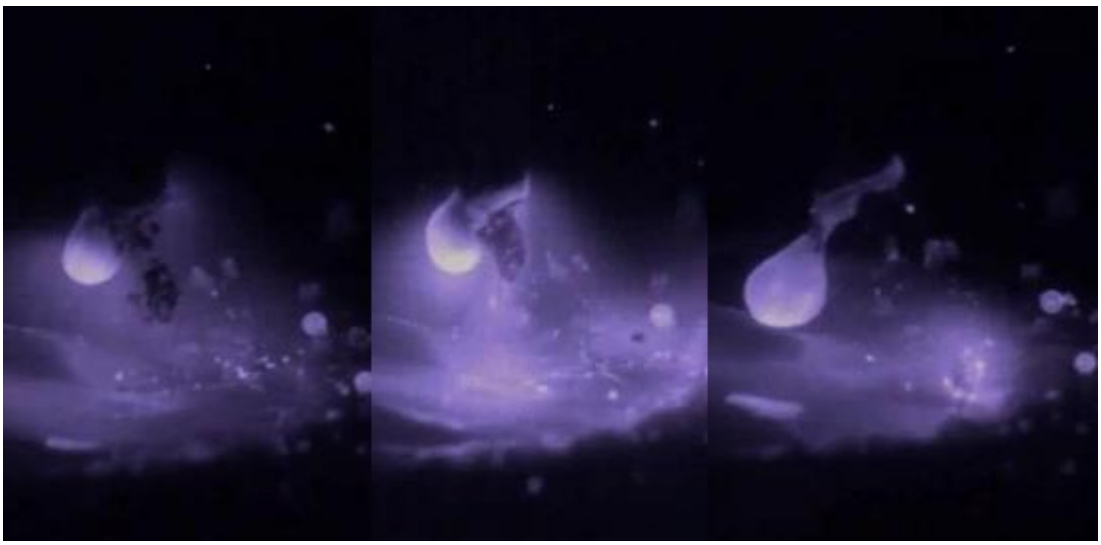
5.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom

Prijenos metala pulsirajućim lukom (impulsnim strujama) je oblik prijenosa metala štrcajućim lukom. Kod ovog postupka iznos prosječne struje zavarivanja manji je od minimalne vrijednosti struje, nego kod prijenosa metala štrcajućim lukom. To je omogućeno tako što struja varira između bazne tj. osnovne vrijednosti i vršne vrijednosti. Pri tome osnovna struja zavarivanja je minimalna vrijednost koja je potrebna za održavanje električnog luka, dok je vršna struja, struja impulsa vrijednost koja omogućuje prijenos metala bez uspostave kratkog spoja. Vršna struja omogućuje da se dodatni materijal rastali te da se osigura odvajanje po jedne kapi po svakom impulsu [5,7]. Slika 5.8 prikazuje shemu prijenosa metala pulsirajućim lukom. Ovisno o načinu proizvodnje impulsa oni mogu biti sinusoidnog, trokutastog ili četvrtastog oblika.



Slika 5.8 Shema prijenosa metala pulsirajućim lukom

Sam način omogućuje prosječno manju struju nego što je to kod prijenosa metala štrcajućim lukom što se pozitivno izražava kod toplinskog unosa u proces. Zavarivanje kod tanjih metala, ali i primjena žice većeg promjera. Taj proces se razvio kako bi eliminirao nedostatke kod prijenosa metala mješovitim lukom. Postupak je moguće primijeniti u svim položajima, ali i jednim promjerom žice moguće je zavariti širi raspon debljina materijala, jer se mogu namjestiti male prosječne struje potrebne kod zavarivanja tanjih dijelova [5,8]. Slika 5.9 prikazuje realni prijenos metala pulsirajućim lukom.



Slika 5.9 Realni prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom

Prednosti:

- Vrlo malo prskanja
- Odličan izgled zavara
- Mala količina nastalih zavarivačkih plinova
- Manje deformacije koje su posljedica unosa topline
- Niska koncentracija otopljenog vodika u zavarenom spoju
- Pogodan za automatizirane i robotizirane procese
- Pogodan za Tandem GMAW postupke
- Velika brzina zavarivanja
- Širok raspon debljina materijala koje se zavaruju

Nedostaci:

- Veća cijena uređaja i opreme za zavarivanje
- Složeniji postupak zavarivanja (parametri)
- Otežana primjena na otvorenim gradilištima
- Potreba za korištenjem skupih plinskih mješavina

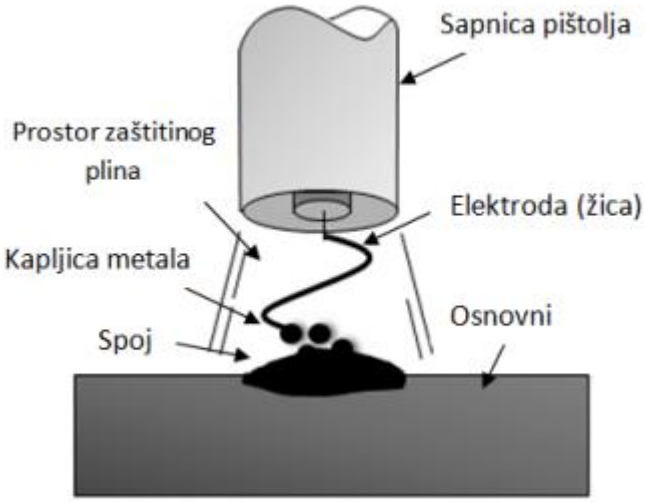
Postupak se prvobitno koristio u brodogradnji gdje je pokazao veću učinkovitost od praškom punjenih žica te niži dio otopljenog vodika u zavarenom spoju. Danas se koristi uz upotrebu plinskih mješavina sa manjim udjelima aktivnih plinova (maksimalna koncentracija CO_2 iznosi 18%) [5].

5.5. Prijenos metala strujama visoke gustoće

Prijenos metala strujama visoke gustoće zajednički je naziv za MIG/MAG postupke zavarivanja koje karakterizira velika količina rastaljenog metala. Ovi postupci temelje se na specifičnim karakteristikama koje se posljedica više parametara kao što su:

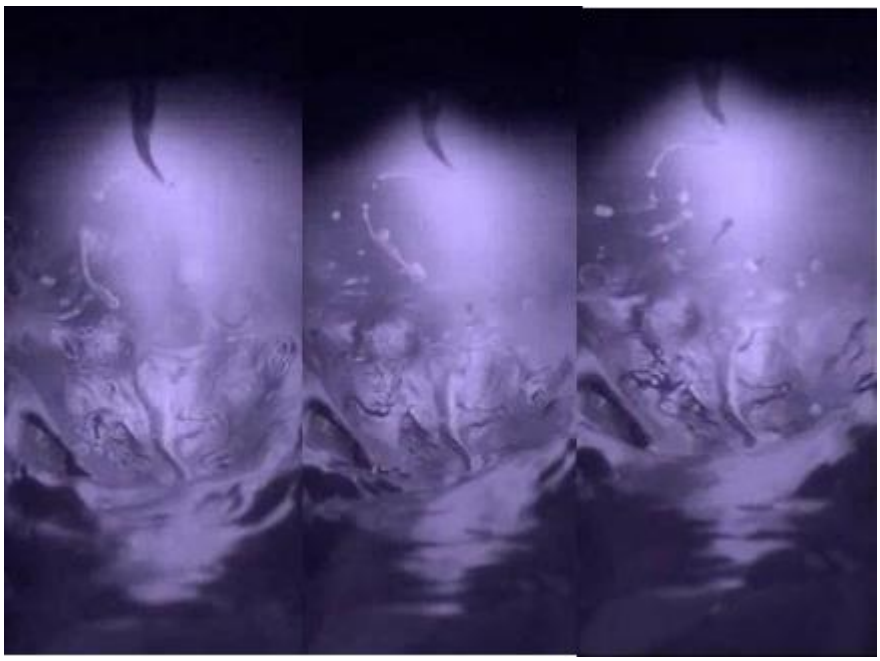
- Brzina dodavanja žice
- Smjesa zaštitnih plinova
- Duljina slobodnog kraja žice
- Jakost struje
- Napon električnog luka

Prijenos metala strujama visoke gustoće dijelimo na prijenos metala rotirajućim i nerotirajućim lukom. Količina rastaljenog dodatnog materijala kreće se do 25 kg/h, dok se u usporedbi sa štrcajućim lukom količina rastaljenog dodatnog materijala kreće od 4 do 6 kg/h. Kod prijenosa metala rotirajućim lukom kao na slici 5.10 uslijed povećanih parametara kao što su jakost struje preko 450 A i napona iznad 35 V, gdje se počinje događati da luk počne rotirati [5].



Slika 5.10 Shema prijenosa metala rotirajućim lukom

Radijalna komponenta elektromagnetske sile generiranim strujnim tokovima u samoj žici uzrokuje spiralnu putanju, odnosno rotaciju rastaljenog kraja žice. Kod takvog prijenosa metala se koriste smjese zaštitnih plinova argona i ugljičnog dioksida ili argona i kisika, a uloga smjese plinova je utjecaj na površinsku napetost rastaljenog metala na način da sprječava odvajanje više sitnih kapljica metala. Kod ovakvog prijenosa metala električni luk je stabilan te daje manju penetraciju, ali široki i plosnati zavareni spoj [5]. Slika 5.11 prikazuje realni prijenos metala rotirajućim lukom.



Slika 5.11 Realni prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom

Kod prijenosa metala nerotirajućim lukom, kao što i naziv veli, nema rotacije rastaljenog kraja žice nego je sam prijenos aksijalan. Posljedica toga je veća toplinska vodljivost smjese zaštitnih plinova i još veće površinske napetosti rastaljenog kraja žice koja se dobiva većim koncentracijama ugljičnog dioksida i helija. Količina rastaljenog materijala kreće se od 5 do 15 kg/h. Električni luk je koncentriraniji te izgledom nalikuje na prijenos metala običnim štrcajućim lukom. Posljedica toga je veća penetracija u odnosu na rotirajući luk pri istim vrijednostima struje zavarivanja [5].

6. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi koji se koriste u ovome postupku zavarivanja bitni su jer štite mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala za vrijeme prolaska kroz električni luk od djelovanja okolne atmosfere. Poznavanje utjecaja pojedinog zaštitnog plina je neophodna kako bi se moglo ocijeniti njihovo djelovanje. Plinovi utječu na održavanje električno – fizikalnih svojstava električnog luka, a time i na sam prijenos metala s elektrode na radni komad, metalurške procese u talini i tehnološke parametre. izbor ispravnog plina za određenu primjenu je vrlo bitan [2,5]. Neki od kriterija za izbor zaštitnog plina uključuje, ali nije ograničeno na sljedeće parametre [5]:

- Cijena plina
- Legirane žičane elektrode
- Željezni profil penetracije
- Mehanička svojstva taložnog metala zavara
- Položaj zavarivanja
- Debljina materijala i izgled zavara
- Način zavarivanja – prijenos metala

Plinovi mogu biti aktivni ili inertni. Kada se primjenjuju inertni plinovi tada nema reakcije rastaljenog metala s plinom i oni se koriste više kod zavarivanja osjetljivih materijala, dok se kod primjene aktivnih plinova u ovoj atmosferi dolazi do reakcije između plina i rastaljenog metala. Kod povećanja topline u električnom luku, zaštitni plinovi reagiraju na različite načine. Neki plinovi šire jezgru luka dok drugi skupljaju što opet ovisi o toplinskoj vodljivosti plina. Postoje tri osnovna svojstva kod razumijevanja svojstva zaštitnoga plina [5], a to su:

1) Ionizacija
2) Toplinska vodljivost
3) Kemijska reakcija plina i osnovnog materijala

Plinovi koji se najčešće koriste prema normi EN 439 dani su u tabeli 6.1 u kojoj su prikazana primjena, ponašanje i karakteristika električnog luka. Kod primjene aktivnih plinova zahtijeva se posebna pažnja zbog pojave oksidacije. Sama ova pojava koja se inače javlja karakteristična je kod konvencionalnih postupaka zavarivanja, a posebno izražena kad je CO_2 zaštitni plin [1]. Tabela 6.2 prikazuje utjecaj plinova na tehnološke karakteristike zavarivanja.

Tabela 6.1 Primjena, ponašanje i karakteristika električnog luka

Plin	**Ponašanje**	**Primjena**	**Karakteristika luka**
Ar + CO_2 (2,5%)	Praktički inertno	Visokolegirani Cr – Ni čelici	Prijenos u štrcajućem luku
Ar + H_2 (6,667%)	Redukcijsko	Visokolegirani čelici, Ni	Velika dubina uvarivanja
CO_2 (99,9%)	Oksidirajuće	Ugljični i niskolegirani čelici	Moguće rasprskavanje
Ar + CO_2 (65%)	Oksidirajuće	Ugljični i niskolegirani čelici	Moguće rasprskavanje

Tabela 6.2 Utjecaj plinova na tehnološke karakteristike

Karakteristika	**CO_2**	**Ar/O_2**	**Ar/CO_2**
Prijenos materijala kroz luk	Kratki luk, dugi luk	Kratki, srednji, rotirajući i impulsni luk	Kratki, srednji, impulsni (pri CO_2 <20%), rotirajući luk
Mogućnost popune zazora u korijenu	Manja nego kod mješavina	Dobra	Raste sa smanjenjem postotka CO_2
Mehaničke i tehnološke karakteristike	Velika, mala brzina hlađenja	Dobre, srednje pri 12 < %O_2	Dobre, srednje pri CO_2 > 30%
Poroznost	Mala	Velika	Otpada sa većim postotkom CO_2
Rasprskavanje	Najveće	Nema	Raste s većim postotkom CO_2
Termičko opterećenje pištolja	Mala, zbog dobre termičke provodnosti	Veliko	Sanjuje se sa povećanjem postotka CO_2
Brzina oksidacija	Velika	Velika, posebno pri 8% O_2	Raste povećanjem postotka CO_2
Dubina uvarivanja	Dobra	Dobra, može postati kritična	Dobra, sigurnija povećanjem postotka CO_2
Uvedena toplina	Velika, mala brzina hlađenja	Najveća, vellika brzina hlađenja	Rade s povećanjem CO_2, manjom brzinom hlađenja

Količina zaštitnog plina ovisna je o uvjetima zavarivanja, obliku i mjestu spoja, jakosti struje zavarivanja i promjeru žice. Tako se na otvorenim prostorima znatno povećava potrošnja plina. Okvirne količina plina prikazane su u tabeli 6.3. Iako u praksi mogu varirati vrijednosti zbog prije navedenih parametara [9].

- Za velike jačine struja kao kod štrcajućeg luka potrošnja može biti do 20 l/min
- Za srednje jačine zavarivanja, potrošnja može biti do 15 l/min
- Za male jačine struja kao kod kratkog luka, potrošnja može biti do 12 l/min

Tabela 6.3 Okvirna količina potrošenog plina

Promjer žice [mm]	Potrošnja plina [l/min]
0,8	6 – 8
1,0	8 – 10
1,2	10 – 12
1,6	14 – 16

6.1. Inertni plinovi

6.1.1. Argon (Ar)

Argon (Ar) je plemeniti plin bez okusa, mirisa i boje te nije otrovan. Najčešće se koristi u zaštiti inertnim plinom. Plin nema kemijske reakcije sa osnovnim materijalom pri zavarivanju. Plin ima nisku toplinsku vodljivost, dok je njegova potrebna toplinska energija, tj. energija ionizacije niska pa lako ionizira. Ima veću gustoću od zraka, omogućava prijenos metala manjim kapljicama, osigurava ravan zavar te smanjuje štrcanje osnovnog metala. Može se koristiti sasvim metalima.

Argon je standardiziran gdje je propisana kvaliteta, upotreba plina, metoda ispitivanja te ga se može proizvesti u četiri kvalitete, a to su:

- 4.8 – 99,998% Ar
- 5.0 – 99,999% Ar
- 6.0 – 99,9999% Ar
- 7.0 – 99.99999% Ar

Argon se može koristiti sam, ali se koristi i u smjesi inertnih ili aktivnih plinova. Slika 6.1 prikazuje geometriju zavara kod korištenja argona kao zaštitni plin [5,10].

Slika 6.1 Utjecaj argona na geometriju zavara

6.1.2. Helij (He)

Helij (He) je inertni plin kao i argon, nema boju, miris niti okus. Količina helija u zraku iznosi 0,0005% što ukazuje da se komercijalna proizvodnja temelji na izvorima prirodnog plina s visokim sadržajem helija (više od 0,4%). Sam proizvodnja i nedostatak govori o skupoći primjene plina. Koristi se uglavnom kao dodatni plin u smjesi. Upotreba helija može se vršiti na svim metalima. Za razliku od argona helij se teško ionizira. Njegova toplinska vodljivost je puno veća što rezultira širokim i dubljim profilima penetracije. He/Ar mješavine najčešće se koriste za zavarivanje aluminija debljina iznad 25 mm. Slika 6.2 prikazuje geometriju zavara kod korištenja helija kao zaštitni plin [5, 10].

Slika 6.2 Utjecaj helija na geometriju zavara

6.2. Aktivni plinovi

6.2.1. Ugljični dioksid (CO_2)

Ugljični dioksid (CO_2) je jedan od aktivnih plinova, on je plin bez boje i mirisa, kiselkastog okusa. Ugljični dioksid se u zavarivanju kao zaštitni plin koristi sam ili kao komponenta u smjesama. Ugljični dioksid se dobiva kao nusproizvod u određenim kemijskim procesima. Kada se pročisti tek se onda koristi u zavarivanju. To je plin koji je lako dostupan pa samim time i relativno jeftin što govori o širokoj primjeni u zavarivanju.

Ugljični dioksid je inertni plin na temperaturama ispod 1600 °C , iznad te granice disocira se u ugljični monoksid (CO), koji je plin bez boje i mirisa i vrlo je otrovan, i slobodni kisik (O_2) koji reagira s rastaljenim metalom. Može se dogoditi da dođe do ponovnog spajanja u molekulu CO_2 gdje se oslobađa toplina, a posljedica je veće provarivanje, štetno stvaranje oksida moguće je riješiti tako da se legira sa dodatni materijal, žica sa dezoksidansima (silicij, mangan). Slika 6.3 prikazuje geometriju zavara kod korištenja ugljičnog dioksida kao zaštitni plin [5,10].

Slika 6.3 Utjecaj ugljikovog dioksida na geometriju zavara

6.2.2. Kisik (O_2)

Kisik (O_2) je još jedan od aktivnih plinova. Dobiva se tako što se rastavlja iz zraka, ali za razliku od helija, kisika je 21% u zraku. Kisik se može još dobivati i od elektrolize vode gdje se dobije vrlo čist i kvalitetan kisik. U postupku zavarivanja koristi se samo kao manja komponenta u plinskim mješavinama. Kisik je oksidans koji formira okside sa rastopljenim osnovnim metalom. U malim dodacima oko 1 – 5% s argonom daje stabilnost električnog luka. Sama ionizacija je teška. Oksidi na metalima više se javljaju na višim temperaturama što pak nije poželjno u zavarivanju, ali neki se potrebni kod stabilizacije MAG zavarivanja. Kod zavarivanja sa zaštitnim plinom kisikom potrebna je upotreba punjenih elektroda kako bi se poboljšao učinak kisika. Najčešće su to elektrode punjene silicijem i manganom. Sam plin dobar je jer poboljšava penetraciju, smanjuje površinsku napetost i štrcanje, omogućuje širi prijenos kapljica metala [5,10].

6.2.3. Vodik (H_2)

Vodik (H_2) se koristi u manjim komponentama u smjesi plinova najviše za nehrđajuće čelike, nikal i njegove legure. Proizvodnja vodika je najčešće elektrolizom vode, a nakon toga se komprimira u plinske boce. Vodik je eksplozivan plin, zbog toga se smjese koje sadrže vodike moraju zadržavati samo do 5% vodika. Kod nehrđajućih čelika veća količina vodika dovodi do poroznosti materijala. Vodik se koristi u smjesi s helijem i argonom, ali u smjesu se dodaje još i mali dio CO_2, koji daje stabilizaciju električnog luka. Vodik kemijski djeluje na smanjenje oksida i daje vrlo čvrstu površinu zavara [5,10].

6.3. Smjese plinova

Smjese plinova se dijele prema broju komponenata pa prema tome postoje dvokomponentne i trokomponentne smjese zaštitnih plinova. Plinovi koji se koriste u smjesama imaju svoja pojedinačna svojstva, ali u kombinaciji sa drugim plinovima daju smjesu određene prednosti, koje su potrebne pri određenom režimu zavarivanja.

Dvokomponentne smjese plinova su:

- Ar/He
- Ar/O_2
- Ar/CO_2

Trokomponentne smjese plinova su:

- $Ar/He/O_2$
- $Ar/CO_2/O_2$

6.3.1. Argon/Helij

Dvokomponentna smjesa plinova, koja se koristi češće, koristi se kod zavarivanja aluminija, nikla i legura na bazi nikla te nekih drugih materijala. Način prijenosa može biti štrcajućim lukom i pulsirajućim prijenosom metala [5]. U tabeli 6.4 prikazane su dvije smjese argona i helija te njihove karakteristike.

Tabela 6.4 Karakteristike smjesa argona i helija

Udjeli plinova	**Karakteristike smjese**
Argon (75%) / Helij (25%)	Poboljšavanje prodiranje spoja kod aluminija, nikla i bakra
	Više fluidnosti u kupci taline nego kod 100% argona
Argon (25%) / Helij (75%)	Više toplinske vodljivosti i fluidnosti u kupci taline
	Širok profil penetracije

6.3.2. Argon/Ugljikov dioksid

Kod ove smjese se mogu primijeniti sva četiri načina prijenosa metala. Najčešća je korištena dvokomponentna smjesa zaštitnih plinova u zavarivanju. U tabeli 6.5 prikazane su smjese sa različitim udjelom argona i ugljikovog dioksida te njihove karakteristike.

Tabela 6.5 Karakteristike smjesa argona i ugljikovog dioksida

Udjeli plinova	**Karakteristika smjese**
Argon (75%) / Ugljikov dioksid (25%)	Kratki spoj
	Smanjuje štrcanje
	Poboljšava zavarljivost kuglica rastopljenog metala
Argon (80%) / Ugljikov dioksid (20%)	Smanjuje štrcanje
	Poboljšava zavarljivost kuglica rastopljenog metala
Argon (98%) / Ugljikov dioksid (2%)	Štrcajući luk ili pulsirajući način prijenosa metala
	Viša fluidnost taline
	Veća brzina zavarivanja
Argon (95%) / Ugljikov dioksid (5%)	Pulsirajući način prijenosa metala
	Viša fluidnost taline
Argon (90%) / Ugljikov dioksid (10%)	Šira penetracija
	Smanjuje dubinu prodiranja
Argon (82%) / Ugljikov dioksid (18%)	Široki raspon debljina zavarivanja
	Široki luk – poboljšanje profila penetracije duž vara
	Dobar u primjeni kod kratkog spoja ili STT postupka

6.3.3. Argon/Kisik

Mješavina plinova argona i kisika postižu aksijalni prijenos raspršivanjem pri nižim jakostima struje u usporedbi sa mješavinom argona i ugljikovog dioksida. Veličine kapljica metala su manje, a talina je fluidnija. Uporaba ove smjese je česta kod tankih materijala. Nehrđajući i ugljični čelik imaju prednosti kod uporabe ove smjese. Tabela 6.6 prikazuje smjese argona i kisika sa različitim omjerima i njihove karakteristike.

Tabela 6.6 Karakteristike smjesa argona i kisika

Udjeli plinova	**Karakteristike smjese**
Argon (99%) / Kisik (1%)	Koristi se za nehrđajuće čelike
	Stabilan luk, prijenos finije kapljice rastaljenog dodatnog materijala
	Pojava sivog sloja na zavaru radi oksidacije
Argon (98%) / Kisik (2%)	Upotreba kod brzog zavarivanja nehrđajućih čelika
	Upotreba gdje je potrebna niska udio elektroda (ugljični čelici)
	Štrcajući luk ili pulsirajući način prijenosa metala
Argon (95%) / Kisik (5%)	Štrcajući luk kod težih dijelova zavarivanja
	Osnovni materijal treba biti s malo kamenca

6.3.4. Trokomponentne smjese

Trokomponentne smjese zaštitnih plinova česte su kod zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika i rjeđe se koristi kod legura na bazi nikla. Kod zavarivanja kratkim lukom se ostvaruje širi profil penetracije dodavanjem do 40% helija u smjesu argona i ugljikovog dioksida. Kod nehrđajućih čelika se su trokomponentne učestale. Smjese helija (55 – 90%) argona i kisika (2,5%) su česte zbog smanjenog prskanja, više fluidnosti taline i dobivanja šireg zavara. Tabela 6.7 prikazuje trokomponentne smjese plinova i njihove karakteristike.

Tabela 6.7 Karakteristike trokomponentnih smjesa

Udjeli plinova	**Karakteristika smjese**
Helij (90%) / Argon (7,5%) / Ugljikov dioksid (2,5%)	Kratki spoj kod prijenosa metala na nehrđajućim čelicima
	Visoka toplinska vodljivost
	Veće brzine zavarivanja kod nehrđajućih čelika
Helij (55%) / Argon (42,5%) / Ugljikov dioksid (2,5%)	Hladniji luk kod pulsirajućeg načina prijenosa metala
	Nehrđajući čelici i legure nikla – kratki spoj
Helij (38%) / Argon (65%) / Ugljikov dioksid (7%)	Kod crijevnog zavarivanja za zavarivanje korijena
	Toplinska vodljivost proširuje profil penetracije
	Kratki spoj
Argon (90%) / ugljikov dioksid (8%) / Kisik (2%)	Smanjuje štrcanje
	Pulsirajući ili kratki spoj način prijenosa metala

Tabela 6.8 prikazuje plinove ili smjese zaštitnih plinova te njihove postotke grupirane prema osnovnom materijalu koji se zavaruje.

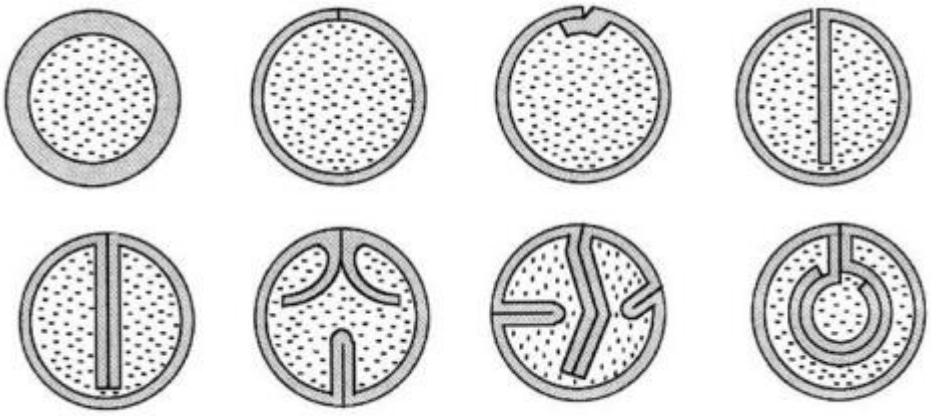
Tabela 6.8 Zaštitni plin prema osnovnom materijalu

Osnovi materijal	**Zaštitni plin ili smjesa plinova**
Čelik	CO_2 (100%) Ar(75 – 90%) + CO_2 (10 – 25%) Ar(82 – 98%) + CO_2 (2 – 18%) Ar(95 – 98%) + O_2 (2 – 5%) Ar(90%) + CO_2 (7,5%) + O_2 (2,5%)
Legure čelika	CO_2 (100%) Ar (75 – 80%) + CO_2 (20 – 25%) Ar (95%) + CO_2 (5%) Ar (95 – 98%) + O_2 (2 – 5%)
Nehrđajući čelik	Ar (98 – 99%) + O_2 (1 – 2%) Ar (98%) + CO_2 (2%) Ar (97%) + H_2 (3%) He (90%) + Ar (7,5%) + CO_2 (2,5%) He (55%) + Ar (42,5%) + CO_2 (2,5%)

7. Praškom punjena žica

Žica, odnosno dodatni materijal utječe sa svojim sastavom na metalurške i zavarivačke procese i time osigurava odgovarajuću kvalitetu zavarenog spoja ili navara. Dodatni materijal je standardiziran međunarodnim ili nacionalnim normama, koje odgovarajućim oznakama označavaju njihova svojstva. U procesu zavarivanja tali se dodatni materijal te zajedno sa osnovnim materijalom, tj. njegovom kupkom čini zavareni spoj. Kod MIG/MAG zavarivanja koriste se žice promjera; 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6 te 2.4 mm, koje su namotane na kolute standardiziranih oblika i dimenzija koje mogu biti od 1 do 100 kg [1,11].

Žice tj. dodatni materijal, koje su napravljene od čeličnih materijala prevučene su bakrom radi boljeg električnog kontakta i zaštite samih žica od korozije. Sloj bakra izražen je u mikronima. Osim punih žica postoje i punjene žice. Takve se žice dobivaju od metalnih traka, debljine oko 0.5 mm, koja se savija i puni praškom određenog kemijskog sastava. Stupanj punjenja može biti: nizak (manje od 15%), srednji (15 – 25%) i visok (više od 25%) [9]. Punjene žice imaju razne poprečne presjeke prikazano na slici 7.1.



Slika 7.1 Presjeci praškom punjenih žica

Kod žica koje su punjene praškom, zavarivanje se može odvijati sa zaštitnim plinom ili bez zaštitnog plina, to ovisi o samom prašku koji se nalazi u žicama. U slučaju kada ne postoji zaštitni plin žice stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre [2].

7.1. Općenito o praškom punjenim žicama

Punjene se žice sastoje od omotača i punjenja. Omotač daje žici stabilnost forme i prilikom zavarivanja služi za prijenos struje tj. stvaranje električnog luka. Punjenje u obliku praška može biti od mineralnih ili metalnih komponenata. Punjene žice utječu na svojstva zavarivanja, količinu rashladnog materijala, tehnološka i mehanička svojstva te na zavarljivost u određenom položaju. Kod samozaštitnih punjenih žica zaštita je ostvarena plinova u procesu zavarivanja iz punjenja.

Općenito se svrstaju u dvije osnovne skupine, a to su: praškom punjene žice u obliku zatvorene cjevčice i praškom punjene žice u obliku profiliranjem formirane cjevčice koja nije potpuno zatvorena. Prateći postojanje praškom punjene žice čiji presjek tvori pravilnu kružnicu, one mogu biti i u obliku vrpca koje prvobitno služe za navarivanje. Ovisno o tehnologiji, žice se izrađuju iz čeličnih traka ili bešavnih cijevi, te se u procesu proizvodnje, nakon punjenja, valjanja i provlačenja dovode na krajnji poprečni presjek. Nakon provlačenja se u svrhu smanjenja žilavosti i čvrstoće, provodi se toplinska obrada, najčešće žarenje, jer je nakon hladnog vučenja žica očvrsnula. Prije namatanja na kolut standardnog promjera, žica se najčešće prevlači bakrom u svrhu dolegiranja materijala zavara u procesu zavarivanja i sprječavanje pojave korozije na površini žice. Pored pobakrenih praškom punjenih žica, primjenjuje se i praškom punjenje žice koje nisu pobakrene, čija površina je nakon provlačenja sjajna. Kemijski sastav metala od kojeg se izrađuje košuljica punjene žice uglavnom je isti kao i materijali za čije zavarivanje je žica namijenjena. Prašak u jezgri žice može biti mineralnog rutilnog tipa, mineralnog bazičnog tipa ili metalnog [12].

$$K_P = \frac{m_p}{m_p + m_t} \times 100, \%$$

Gdje je:

K_p – stupanj punjenja

m_p – masa punjenja, kg

m_t – masa obloge, kg

Praškom punjene žice izrađuju se najčešće u promjerima od 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 2.0, 2.4 i 3.2 mm, a rjeđe se izrađuju u promjerima od 4 i 5 mm. Žica je namotana na standardne kolute mase 15 kg. Praškom punjene žice se primjenjuju za zavarivanje limova od 1,5 do 200 mm. Limove debljine 1,5 do 13 mm je moguće zavarivati u jednom prolazu, bez ranijeg pripremanja žlijeba za zavarivanje [12].

S gledišta kvalitete, prednost imaju punjene žice u obliku zatvorene cjevčice. iz takvih se žica punjenje nije u stanju izaći van i potpuno je zaštićeno od vlage bez obzira na uvjete skladištenja, pa nema potrebe za naknadnim sušenjem prije zavarivanja. U tabeli 7.1 prikazani je sadržaj vodika u zavarenom spoju u ovisnosti o primijenjenoj praškom punjenoj žici i uvjetima skladištenja. Treba napomenuti da su takve žice skuplje za otprilike 30% od otvorenih žica oblikovanih profiliranjem, koje u potpunosti zadovoljavaju zahtjeve kvalitete kod zavarivanja nelegiranih i konstrukcijskih čelika [12].

Tabela 7.1 Sadržaj vodika u zavarenom spoju

Praškom punjena žica	**Mjerenje udjela vodika u zavarenom spoju**	
	Suha žica (mL/100g zavara)	Žica izložena atmosferi vlage 80% (mL/100g zavara)
Metalnim praškom punjena žica	1.8	3.6
Rutilnim praškom punjena žica koja nije zatvorena	5.5	9.0
Potpuno zatvorena rutilnim praškom punjena žica	4.5	4.5
Bazičnim praškom punjena žica koja nije zatvorena	2.1	5.0
Potpuno zatvorena bazičnim praškom punjena žica	1.1	1.1

7.1.1. Opća podjela punjenih žica

Punjene se žice mogu dijeliti po različitim kriterijima. Na tržištu je moguće naći cijeli niz različitih žica koje se izrađuju razni proizvođači. Postoje više raznih sustava podjele praškom punjenih žica koje su izradile zavarivačke udruge različitih država. Neke od mogućih podjela praškom punjenih žica su [12]:

a) Način izrade
    a. Žice izrađene u obliku potpuno zatvorene cjevčice
    b. Žice izrađene u obliku profilirane cjevčice koja nije potpuno zatvorena
b) Vanjskoj zaštiti u procesu zavarivanja
    a. Punjene žice kod kojih se koristi dodatna vanjska zaštita
    b. Samozaštitne punjene žice
c) Sastavu punjenja
    a. Punjenje sastavljeno isključivo ili pretežito od mineralnih tvari
        i. Rutilnim praškom punjene žice
        ii. Bazičnim praškom punjene žice
    b. Punjenje sastavljeno isključivo ili pretežito od metalnog praška
d) Namjeni
    a. Za zavarivanje nelegiranih čelika
    b. Za zavarivanje niskolegiranih čelika
    c. Za zavarivanje čelika postojanih pri radu na povišenim temperaturama
    d. Za zavarivanje čelika postojanih pri radu na nižim temperaturama
    e. Za zavarivanje nehrđajućih čelika
    f. Za zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika
e) Položaju zavarivanja
    a. Za zavarivanje sučeonih i kutnih spojeva u vodoravnom položaju
    b. Za zavarivanje u svim drugim položajima
f) Obliku
    a. Žice od 0.8 do 5 mm
    b. Punjene trake za navarivanje

7.2. Podjela prema sastavu punjenja

Podjela praškom punjenih žica prema sastavu punjenja se svodi na tri tipa, a to su [12]:

7.2.1. Žice punjene rutilnim mineralnim praškom

Komponente punjene rutilnim mineralnim praškom koji tvori trosku sačinjene su od rutila (TiO_2), aluminijevog silikata, kalcijevog oksida (CaO) i flourida (F), ruda i potrebnih dezoksidanata kao što su feromangan (FeMn), aluminij (Al) i titanija (Ti). Jezgra rutilnih punjenih žica sadrži više od 50% rutila, koji je vrlo dobar ionizator i stabilizator električnog luka. Kod rutilnih punjenih žica koje se primjenjuju za zavarivanje u vodoravnom položaju, sadržaj TiO_2 doseže i do 65%. Mehanička svojstva zavarenih spojeva izvedenih žicom punjenom rutilnim mineralnim praškom vrlo je dobra. Ugljik – mangan čelici zavareni takvom žicom imaju zadovoljavajuću žilavost i pri temperaturi od – 20 °C. Kod zavarivanja legiranih čelika nužno je uporabiti žicu punjenu rutilnim mineralnim prahom sa 2,5% nikla, da bi zavar imao zadovoljavajuću žilavost i pri temperaturi od – 50 °C.

Osnovne karakteristike pri zavarivanju su:

- Lako namještanje parametara zavarivanja
- Blago njišući, stabilan i miran luk
- Kvalitetno provlačenje korijena bez primjene podloge
- Brzo skrućivanje šljaka koja se lako skida te je prikladna za zavarivanje u prinudnim položaju – prijenos metala s finim do srednjim kapljicama kao kod štrcajućeg luka uz minimalno štrcanje – lijepa i glatka površina zavara
- Stabilan i miran električni luk

Žice punjene rutilnim mineralnim praškom najčešće su promjera od 1,2 do 2,4 mm i njihovom uporabom se postiže učinak od 10 do 12 kg/h. Primjenjuju se za čelike sa vlačnom čvrstoćom do 650 N/mm^2 i zadovoljavaju žilavost do – 50 °C. Viši nivo čvrstoće može se postići na račun smanjenja žilavosti te uz povećanje vjerojatnosti pojave hladnih pukotina. Zaštitni plin koji se koristi pri zavarivanju žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom je najčešće ugljikov dioksid ili mješavina ugljikovog dioksida i argona, najčešće u omjeru 95% Ar + 5% CO_2 [12].

7.2.2. Žice punjene bazičnim mineralnim praškom

Komponente jezgre žice punjene bazičnim mineralnim praškom su najčešće TiO_2, CaO, CaF_2. Troska koja nastaje zavarivanjem žicama punjenim bazičnim mineralnim praškom je iz sustava:

$CaO – CaF_2 – TiO_2$

$CaO – CaF_2 – SiO_2$

$CaO – CaF_2 – Al_2O_3$

$MgO – CaF_2 – SiO_2$

Pri zavarivanju žicama punjenim bazičnim mineralnim praškom postiže se bolja kvaliteta zavarenog spoja nego pri zavarivanju žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom. Najveći doprinos kvaliteti daje bazična troska koja nastaje u postupku zavarivanja i iz rastaljenog materijala odstranjuje nečistoće i komponente koje tvore dovoljnu količinu plinova koji štite kupku zavara od utjecaja atmosfere, te na taj način sprječavaju nastanak poroznosti [12].
Osnovne karakteristike pri zavarivanju žicama punjenim bazičnim mineralnim praškom su [12]:

- Potreba za točnim namještanjem parametara zavarivanja (usko područje odabira)
- Vrlo dobra mehanička svojstva
- Mala vjerojatnost pojave pukotina i poroznosti
- Primjenjivost pri zavarivanju tanjih materijala
- Stabilan električni luk u procesu zavarivanja
- Prijenos metala u obliku krupnih kapljica

Metal se u električnom luku pri zavarivanju žicama punjenim bazičnim mineralnim praškom prenosi krupnim kapljicama, što uzrokuje rasprskavanje metala koje je veće nego kod zavarivanja žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom. Rasprskavanje materijala najveće je kod zavarivanja uz zaštitu ugljikovog dioksida, ali je puno manje uz zaštitu mješavine argona i ugljikovog dioksida, najčešće u omjeru 82% Ar i 12% CO_2 [12].

Punjene žice koje ne trebaju dodatnu vanjsku zaštitu

Posebno poglavlje predstavljaju žice koje ne trebaju dodatnu vanjsku zaštitu u procesu zavarivanja. Većina samozaštitnih punjenih žica ima jezgru bazičnog tipa, što znači da su glavni sastojci kalcijev karbonat i fluorid. Tehnologija izrade i sastav jezgre samozaštitnih punjenih žica posebno se složen problem koji dobro poznaju samo pojedini proizvođači. Jezgra samozaštitnih punjenih žica mora vršiti neke određene funkcije kao što su [12]:

- Ionizacija i stabilizacija električnog luka
- Zaštitu rastaljenih metalnih kapi i kupke zavara od utjecaja atmosfere
- Stvaranje troske za dezoksidaciju i zaštitu kapi metala
- Legiranje kupke u procesu zavarivanja, kao i obloga elektrode kod REL postupka zavarivanja

Jezgra samozaštitnih praškom punjenih žica sadrži mineralne komponente (TiO_2, CaO, CaF_2 itd.) i neke elementarne tvari (Al, Li itd.). Najvažnija komponenta koja proizvodi plin i trosku je kalcijev karbonat ($CaCO_3$), koji se tijekom zavarivanja raspada prema sljedećoj jednadžbi:

$$CaCO_3 \Rightarrow CaO + CO_2$$

Nastali ugljikov dioksid, štiti električni luk i rastaljeni metal zavara od nepovoljnog utjecaja atmosfere. Troska, u ovom slučaju CaO, veže nečistoće iz rastaljenog metala zavara, što vrlo povoljno utječe na mehanička svojstva zavara. Koeficijent iskorištenja samozaštitnih punjenih žica niže je nego kod svih drugih punjenih žica i kreće se od 75% – 85%, izračunava se prema formuli

$$\eta_z = \frac{m_n}{m_{pz}} \times 100, \%$$

Gdje je:

η_z – koeficijent iskorištenja

m_n – masa zavara

m_{pz} – masa pretaljene žice

7.2.3. Žice punjene metalnim praškom

Pri izradi žica punjenih metalnim praškom moguće je djelovati na njihov kemijski sastav, koji je uglavnom isti kao kod osnovnog materijala za čije se zavarivanje i primjenjuju. Te se žice pretežno uporabljuju za zavarivanje visokolegiranih čelika koji na niskim temperaturama imaju visoku čvrstoću i žilavost. Osnovne karakteristike pri zavarivanju žicama punjenim metalnim praškom su [12]:

- Mogućnost ekonomičnog utjecaja na sastav jezgre pomoću udjela komponenata punjenja
- Mala količina troske koju nije potrebno odstranjivati nakon svakog prolaza
- Približno 20% veći učinak taljenja nego pri zavarivanju ostalim punjenim žicama
- Veća dubina provarivanja zbog veće jakosti struje
- Visoki koeficijent iskorištenja 85% – 95%
- Širok i stabilan električni luk
- Prijenos metala finim kapljicama (štrcajući luk) je moguć i kod nižih struja
- Podjednaka geometrija zavara
- Primjenjivost pri automatskim postupcima zavarivanja
- Mogućnost zavarivanja u prisilnim položajima
- Dobro premošćivanje razmaka u zazoru žlijeba

7.3. Praškom punjene žice za MAG zavarivanje nehrđajućih čelika

Tabela 7.2 Neke praškom punjene žice za MAG zavarivanje nehrđajućih čelika

Proizvođač	Oznaka	Kemijski sastav (%)	Opis
Tysweld	T08M	C < 0.03 Si 0.8 Mn 1.6 Cr 20 Ni 10	Austenitna žica niskog sadržaja ugljika. Pogodna za spremnike u prehrambenoj i kemijskoj industriji.
	T16M	C < 0.03 Si 0.8 Mn 1.9 Cr 19 Ni 12 Mo 2.7	Austenitna žica niskog sadržaja ugljika . Za zavare koji su u kontaktu sa kiselinama i kloridima. Također se koristi u kemijskoj i prehrambenoj industriji.
ESAB	STOODY 309L T-1 AP	C < 0.03 Si 0.9 Mn 0.8 Cr 24.3 Ni 12.5	Za zavarivanje u austenitnih nehrđajućih čelika u svim položajima. Lako uklanjanje troske.
Elektroda Zagreb d.d.	K – 308 LT	C 0.03 Si 0.6 Mn 1.15 Cr 20.3 Ni 10.5	Za austenitne čelike niskog sadržaja ugljika. Zavar otporan na pojavu pukotina i lako skidanje troske.
	K – 309 LT	C 0.03 Si 0.6 Mn 1.12 Cr 23.7 Ni 13.2	Za istovrsne i raznovrsne nehrđajuće čelike. Može se koristiti i za tzv. platiranje.
	K – 316 LT	C 0.03 Si 0.6 Mn 1.16 Cr 19.5 Ni 12.7 Mo 2.4	Praškom punjena žica za Cr–Ni–Mo nehrđajuće čelike. Zavar posjeduje dobru otpornost na nastanak pukotina pri povišenim temperaturama.Troska se samostalno odvaja od zavara.
	K – 329 T	C 0.03 Si 0.52 Mn 0.8 Cr 23.2 Ni 9.6 Mo 3.26	Za zavarivanje nehrđajućih dupleks čelika u kemijskim i nuklearnim postrojenjima te u brodogradnji. Zavar je otporan na nastanak rupičaste korozije. Troska se lako otklanja.

Proizvođač	Oznaka	Kemijski sastav (%)	Opis
Bohler Welding	FOXcore 13/4 – T1	C 0.03 Si 0.7 Mn 0.9 Cr 12 Ni 5	Rutilna praškom punjena žica za martenzitne čelike, za zavarivanje turbina. Brzo skručivanje zavara i mogučnost zavarivanja u svim položajima.
	FOXcore 13/4 - MC	C 0.023 Si 0.7 Mn 0.9 Cr 12 Ni 4.6	Metalom punjena žica za martenzitne čelike za zavarivane turbina. Malo štrcanje. Niski udio vodika u zavaru.(< 4mL/100g zavara).
	FOXcore 317L – T0	C 0.03 Si 0.7 Mn 1.3 Cr 18.8 Ni 13.1 Mo 3.4	Rutilna praškom punjena žica za zavarivanje austenitnih čelika sa većim udijelom Mo. Za spremnike u kemijskoj industriji.
Midalloy	E308T1 – 1/4	C 0.058 Si 0.58 Mn 1.31 Cr 19.8 Ni 9.8	Za zavarivanje nehrđajućih čelika u svim položajima. Nudi zaštitu od poroznosti i odličnu zavarljivost.

7.4. Standardizacija praškom punjenih žica

Punjene žice standardizirane su nacionalnim i međunarodnim normama koje odgovarajućim oznakama pokazuju njihova svojstva. Oznake punjenih žica prema tim standardima prikazane su u katalozima proizvođača. Klasifikacija oznaka je brojčano – slovna. Oznaka norme je HRN EN ISO 17632:2016,naslova „Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Žice punjene praškom za elektrolučno zavarivanje sa zaštitnim i bez zaštitnog plina za nelegirane i sitnozrnate čelike -- Razredba (ISO 17632:2015; EN ISO 17632:2015)“. Sastoji se od sljedećih simbola [12]:

TXX (1) X (2) XX (3) X (4) X (5) X (6) XX (7), gdje je:

T – oznaka za žicu u obliku cijevi

(1) – oznaka za mehanička svojstva zavara

(2) – oznaka za žilavost

(3) – oznaka za kemijski sastav zavara

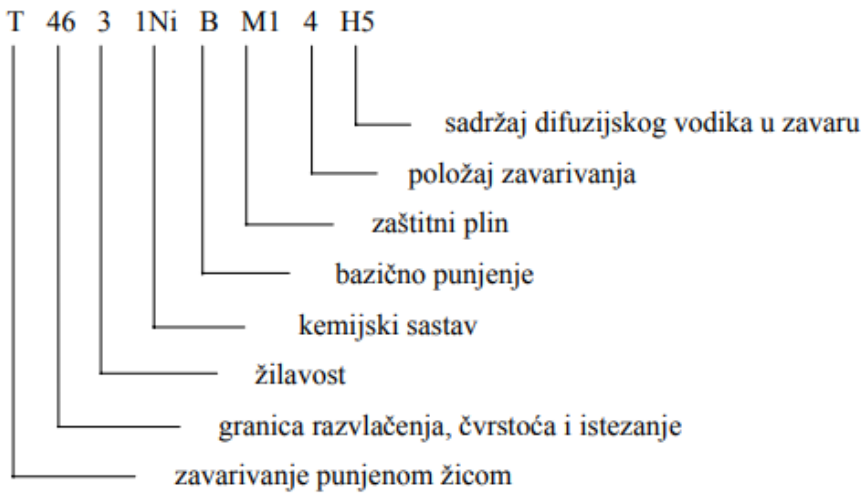
(4) – oznaka za svojstva punjene žice

(5) – oznaka za zaštitni plin

(6) – oznaka položaja zavarivanja

(7) – oznaka za sadržaj difuzijskog zavarivanja

Primjer oznake je



Slika 7.2 Prijemer označavanja žice

Objašnjena oznaka prikazano je tabelama 7.3 do 7.9

(1) – oznaka za mehanička svojstva zavara

Tabela 7.3 Mehanička svojstva zavara

Oznaka	R_e, **MPa**	R_m, **MPa**	A_5, **%**
35	355	440 – 570	22
38	380	470 – 600	20
42	420	500 – 640	20
46	460	530 – 680	20
50	500	560 – 720	18

(2) – oznaka za žilavost

Tabela 7.4 Žilavost zavara

Oznaka	**Minimalna udarna radnja loma, 47 J/°C**
Z	Bez zahtjeva
A	20 °C
0	0 °C
2	-20 °C
3	-30 °C
4	-40 °C
5	-50 °C
6	-60 °C

(3) – oznaka za kemijski sastav zavara

Tabela 7.5 Kemijki sastav zavara

Oznaka vrste legiranja	**Kemijski sastav, %**		
	Mangan (Mn)	Molibden (Mo)	Nikal (Ni)
Bez oznake	2.0	–	–
Mo	1.4	0.3 – 0.6	–
MnMo	1.4 – 2.0	0.3 – 0.6	–
1Ni	1.4	–	0.6 – 1.2
2Ni	1.4	–	1.6 – 2.6
3Ni	1.4	–	2.6 – 3.8
Mn1Ni	1.4 – 2.0	–	0.6 – 1.2
1NiMo	1.4	0.3 – 0.6	0.6 – 1.2
Mogući su: Mo < 0.2%, Ni < 0.5%, Cr < 0.2%, V < 0.8%, Nb < 0.05%, Cu <0.3%, Al < 0.2% (žice bez zaštitnog plina)			

(4) – oznaka za svojstva punjene žice

Tabela 7.6 Svojstva punjene žice

Oznaka	**Svojstvo troske**	**Slojnost**	**Zaštitni plin**
R	Rutilno – bazična	S i M	C i M
P	Rutilno – bazična	S i M	C i M
B	Bazična	S i M	C i M
M	Metalni prašak	S i M	C i M
V	Rutil ili bazični fluorid	S	Bez
W	Bazični fluorid	S i M	Bez
Y	Bazični fluorid	S i M	Bez
S	Ostali tipovi	–	–

(5) – oznaka za zaštitni plin

Tabela 7.7 Oznaka zaštitnog plina

Oznaka		**Udio plina, %**			
Grupa	Broj	CO_2	O_2	Ar	H_2
M1	1	0 – 5	–	90 – 100	0 – 5
	2	0 – 5	–	95 – 100	–
	3	–	0 – 3	97 – 100	–
	4	0 – 5	0 – 3	92 – 100	–
M2	1	0 – 5	–	95 – 100	–
	2	–	3 – 10	90 – 97	–
	3	0 – 5	0 – 8	87 – 100	–
M3	1	25 – 50	–	50 – 75	–
	2	–	10 – 15	85 – 90	–
	3	0 – 5	8 – 15	80 – 92	–
C	1	100	–	–	–
	2	70 – 100	0 – 30	–	–

(6) – oznaka položaja zavarivanja

Tabela 7.8 Položaj zavarivanja

Oznaka	**Položaj zavarivanja**
1	Svi položaji
2	Svi položaji osim odozgo – dolje
3	Sučeoni i kutni spoj, položaj u korito, horizontalni i vertikalni
4	Sučeoni i kutni spoj, položaj u korito
5	Kao kod 3, preporuka za položaj odozgo – dolje

(7) – oznaka za sadržaj difuzijskog zavarivanja

Tabela 7.9 Sadržaj difuznog vodika

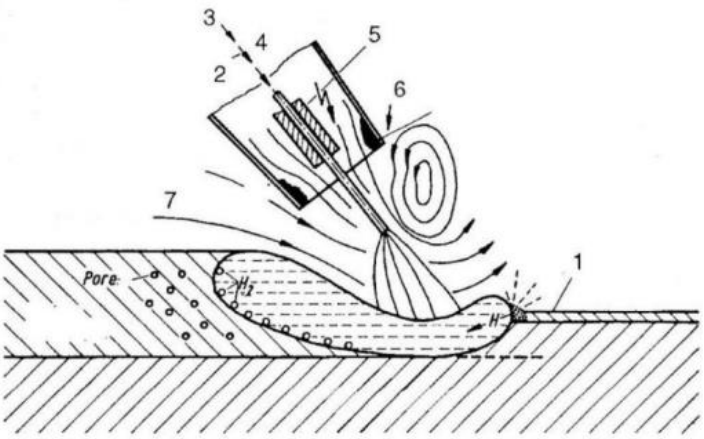
Oznaka	**Sadržaj vodika (H) , mL /100 g**
H5	5
H10	10
H15	15

8. Tehnologija zavarivanja i utjecaj parametara

Osnovni parametri kod MIG/MAG zavarivanja su: jakost struje, napon električne žice, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice, tehnika zavarivanja (nagib), promjer žice, induktivitet, protok zaštitnog plina. Biti će razrađeni kako utječu na zavarivanje i koje se greške pojavljuju zbog pojedinih parametara kod zavarivanja. Greške koje se mogu pojaviti zbog ovih parametara su [13]:

- Poroznost
- Naljepljivanje
- Štrcanje
- Pretjerana ili nedovoljna penetracija
- Pukotine

Na slici 8.1 prikazani su uzroci poroznosti koja je jedna od dviju najčešćih grešaka u zavarenom spoju [9].



Slika 8.1 Shema uzroka poroznosti u zavaru

Uzroci su:

1. Nečistoće na mjestu zavarivanja
2. Nečista površina dodatnog materijala
3. Nejednolik dovod žice
4. Vlaga u zaštitnom plinu
5. Slab prijenos struje
6. Nečista sapnica
7. Prevelik nagib pištolja

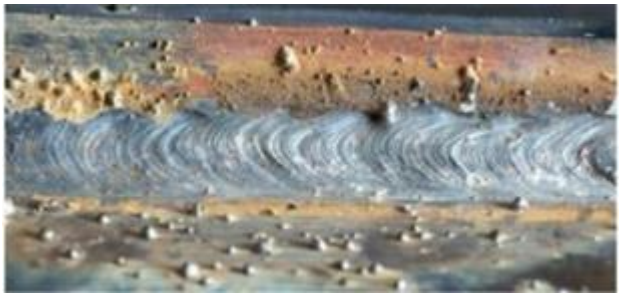
Druga najčešća greška kod MIG/MAG postupka zavarivanja je naljepljivanje, uzroci koji mogu prouzrokovati naljepljivanje su [9]:

- Premala jakost struje zavarivanja
- Oksidirana i neravna površina žlijeba
- Slaba spajanja na mjestima nastanka zbog nepravilne ili loše tehnike
- Preširoko poprečno gibanje pištolja uzrokuje bježanje taline ispred luka na hladne stranice žlijeba
- Prevelika brzina zavarivanja
- Premala brzina zavarivanja uz preveliku količinu taline koja bježi ispred luka

Štrcanje, odnosno raspršivanje rastopljene metalne kapljice na hladni radni komad u blizini linije zavara [14]. Uzroci ovoga mogu biti:

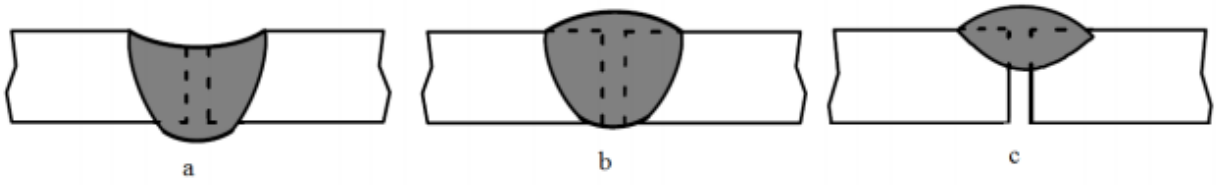
- Nečistoća same žice
- Nedovoljna zaštita zavara od strane zaštitnih plinova
- Nečistoće na mjestu zavara
- Predugačak slobodni kraj žice
- Veliki napon električnog luka
- Velika brzina dobave žice

Slika 8.2 prikazuje izgled prskanja ili štrcanja kod zavarivanja



Slika 8.2 Realni izgled prskanja

Pretjerana penetracija javlja se kad je unos topline preveliki. Preveliki napon, ali i spori pomak pištolja dovodi do te greške. Greška se javlja kod nepravilne pripreme radnog komada, nepravilnog odabira prijenosa metala te nedovoljnog unosa topline koja dovodi do nedovoljne penetracije. Slika 8.3 prikazuje pretjeranu (a), dobru (b) i nedovoljnu (c) penetraciju [14].

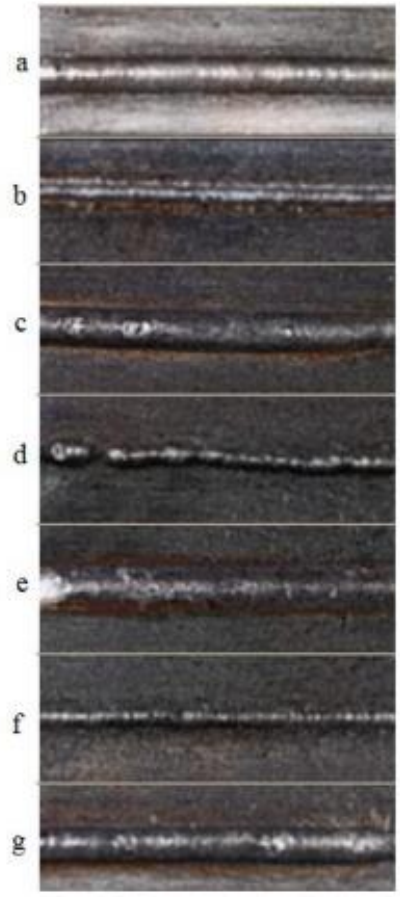


Slika 8.3 Sheme penetracija

Realni prikazi dobrih i loših zavara prikazani su na slici 8.4.

Opis slike 8.5:

a) Dobar zavar
b) Prebrzo zavarivanje
c) Sporo zavarivanje
d) Slab napon
e) Jak napon
f) Sporo dodavanje žice
g) Brzo dodavanje žice

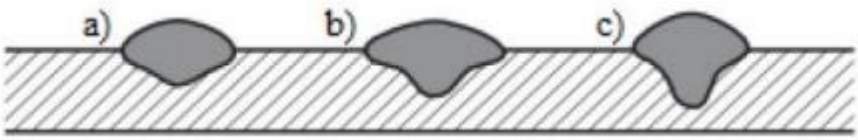


Slika 8.4 Realni prikaz greški zavara i dobrog zavara

8.1. Jakost struje

Jakost struje ovisi o vrsti radnog komada, o njegovoj debljini te položaju zavarivanja. Struja ima značajan utjecaj na izgled zavara. Kada su ostali parametri konstantni, jačina struje ovisi o brzini dodatnog materijala tj. brzini dobave žice i o promjeru same žice. Ako žica ima veću dobavnu brzinu time mora biti i veća jakost struje, isto vrijedi za veći promjer žice. Samim time dobit će se širi zavar. Zavisnost brzine dovođenja žice i jakosti struje je linearna za manje vrijednosti struje, dok kod većih vrijednosti postaje nelinearna [1,14].

Povećanjem jačine struje zavarivanja, tj. brzinu dovođenja dodatnog materijala (žice) uz konstantne preostale parametre dovodi do povećanja dubine protaljivanja i nadvišenje zavara i samog oblika i izgleda zavara [14], na slici 8.5 prikazani su izgled zavara pri maloj (a), srednjoj (b) i visokoj (c) struji.



Slika 8.5 Utjecaj jačine struje na zavar

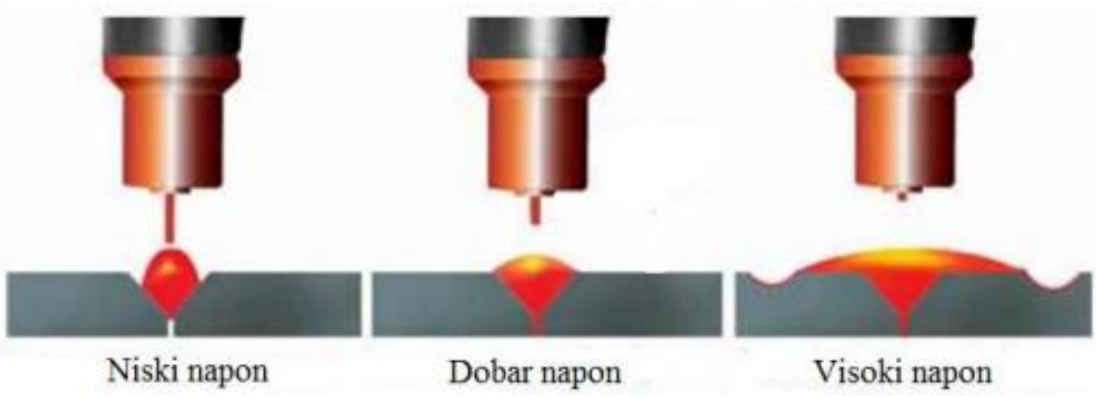
8.2. Napon električnog luka

Kao i ja jačina struje, napon električnog luka utječe na samu kvalitetu zavarivanja, odnosno na kvalitetu zavarenog spoja. Napon električnog luka utječe na nadvišenje i širinu zavara te na dubinu zavarivanja. Povećanje napona električnog luka dobiva se širi zavar i manje provarivanje, dok se smanjivanjem dobiva uži, dublji zavar sa većim nadvišenjem zavara [1,9]. U tabeli 8.1 prikazane su tipične vrijednosti napona za zavarivanje raznih metala podijeljeni prema vrsti zaštitnog plina kod prijenosa metala kratkim spojim i promjer žice iznosi 0.8 mm.

Tabela 8.1 Vrijednost napona za određene materijale

Vrsta početnog materijala	**Napon električnog luka (V)**			
	Prijenos MKS, promjer žice iznosi 0.8 mm			
	Ar	Ar – O_2 (1 – 5%)	Ar – CO_2 (25%)	CO_2
Ugljični čelik	17	18	19	20
Niskolegirani čelik	17	18	19	20
Nehrđajući čelik	18	19	21	–

Slika 8.6 prikazuje izgled zavara s obzirom na napon električnog luka.



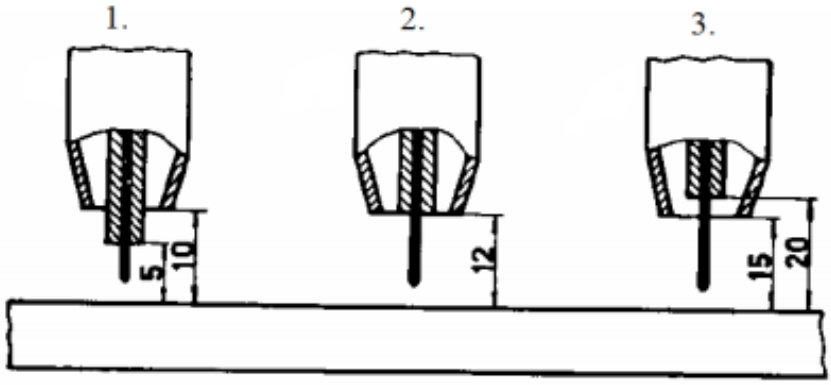
Slika 8.6 Shematski oblik zavara prema naponu električnog luka

8.3. Induktivitet

Induktivitet ima utjecaj samo na neke načine prijenosa metala u električnom luku, osobito kod prijenosa kratkim spojem. Povećanjem induktiviteta smanjuje se frekvencija kapljica u prijenosu kratkim spojevima. induktivitet je parametar kojim se opisuje brzina porasta jakosti struje unutar vremenskog perioda nakon postizanja kratkog spoja. induktivitet je jedan od glavnih parametara koji se direktno podešava na izvoru struje za MIG/MAG postupak. U ostalim načinima prijenosa luka, se osobito ne koristi jer je struja približno kontinuirana. Koristi se zbog finog podešavanja parametara zavarivanja, čime se postiže učinkovitiji prijenos metala u električnom luku i postiže željeni izgled zavara. induktivitet se podešava prema debljini radnog komada, vrsti osnovnog materijala, položaju zavarivanja te o vrsti zavarenog spoja. Suvremeni izvori struje za zavarivanje imaju automatsku regulaciju induktiviteta ovisno o nizu podešenih parametara [15].

8.4. Duljina slobodnoga kraja dodatnog materijala (žice)

Duljina slobodnoga kraja ovisi o struji zavarivanja. Mora biti u određenim granicama. Ako je prevelika dužina stvara se višak dodatnog materijala, ali i nema dovoljno topline za taljenje, a to prouzrokuje plitko uvarivanje i nepovoljan izgled i oblik zavarenog spoja [1]. Ako pak je duljina slobodnog kraja prekratka tada se javlja onečišćenje sapnice pištolja [9]. Na slici 8.7 prikazana je zavisnost položaja duljine kraja žice i sapnice u zavisnosti od jačine struje.



Slika 8.7 Shematska zavisnost položaja duljine kraja žice i sapnice u zavisnosti od jačine struje

Opis slike 8.7:

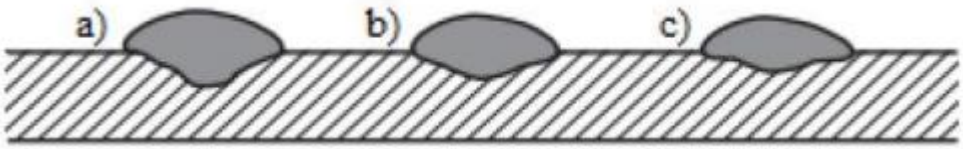
1. Slobodni kraj žice je manji od odstojanja sapnice (50 – 170A)
2. Slobodni kraj žice jednak odstojanju sapnice (170 – 350A)
3. Slobodni kraj žice veći je od odstojanja sapnice (>350A)

U tabeli 8.2 prikazani su brzina dobave žice u zavisnosti od debljine materijala za zavarivanje, za žice od 0.6 i 0.8 mm.

Tabela 8.2 Brzina dobave žice

Debljina početnog materijala (mm)	**Brzina dobave žice (m/min)**	
	0.6 mm	0.8 mm
0.8	2.5	1.6
1.0	3	1.9
1.2	3.6	2.2
1.5	4.3	2.6
2.0	5.6	3.5
3.0	7.9	4.9
4.0	9.8	6.1
5.0	12.5	7.7

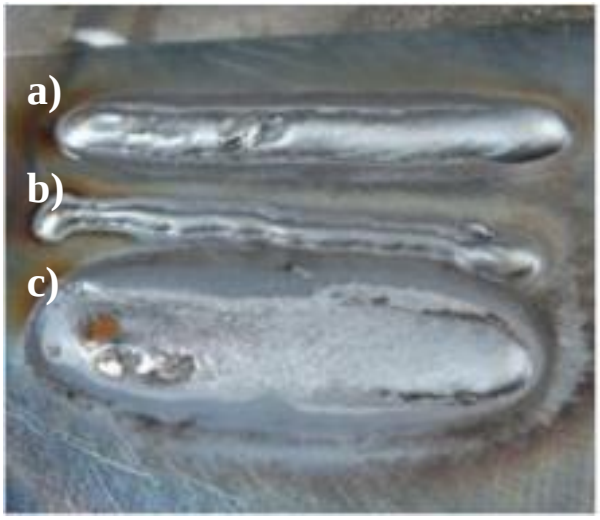
Slika 8.8 prikazuje utjecaj debljine slobodnog kraja žice na protaljivanje, širinu i oblik pri konstantnim ostalim parametrima, osim jakosti struje radi njezinog smanjenja kako se povećava duljina slobodnoga kraja žice [14]. Mala (a), srednja (b) i velika (c) duljina žice.



Slika 8.8 Utjecaj slobodnoga kraja na oblik zavara

8.5. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja utječe na produktivnost i bira se u zavisnosti o jakosti struje i položaja zavarivanja. Brzina zavarivanje je brzina kojom se električni luk prenosi po liniji spajanja zavara materijala [16]. Slika 8.9 prikazuje realni zavar, odnosno prikaz zavara u ovisnosti brzini zavarivanja, brzine su optimalna (a), prebrza (b) i prespora (c).



Slika 8.9 Realni prikaz zavara u ovisnost brzine zavarivanja

Brzinu zavarivanja je potrebno uskladiti s količinom taline odnosno ako je nedovoljna brzina zavarivanja dolazi do naljepljivanja i uključaka troske,a suprotno dolazi do previsokog uzvišenja šava.

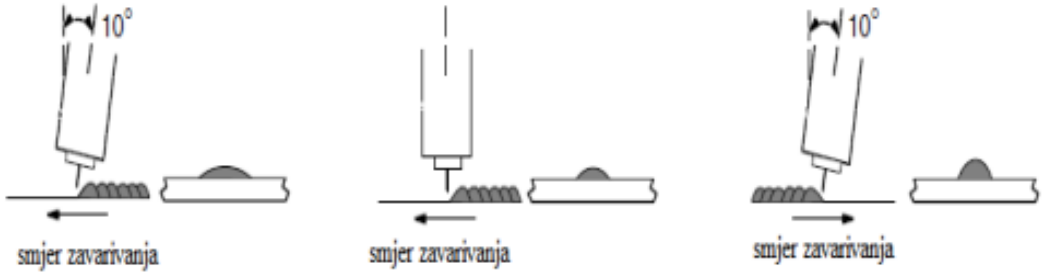
8.6. Zaštitni plinovi i dodatni materijal

Zaštitni plin ima veliki utjecaj na kvalitetu samog zavara pa je bitan pravilan odabir. Osim pravilnog odabira i vrste plina utjecaj ima i protok plina kroz cijev od boce do mjesta zavarivanja [5]. Nepravilnim odabirom plina i protoka istog može doći do grešaka u zavarenom spoju. Više o vrsti i primjeni pojedinih plinova i mješavina istih obrađeno je u poglavlju „Zaštitni plinovi“.

Dodatni materijal (žica) svojim sastavom i promjerom utječe na zavar. Promjer dodatnog materijala (konkretnog sastava) mora imati određeni raspon jačine struje. [16]. Više o vrstama i promjerima te primjenama dodatnog materijala obrađeno je u poglavlju „Dodatni materijal“.

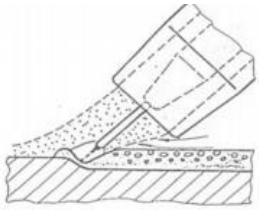
8.7. Tehnika zavarivanja (položaj)

Tehnika zavarivanja tj. nagib pištolja u odnosu na radni komad i smjer zavarivanja imaju utjecaj na oblik i kvalitetu zavara [1]. Kako je rečeno, nagib pištolja utječe na oblik zavara. Slika 8.10 prikazuje utjecaj nagiba pištolja na oblik zavara.



Slika 8.10 Shematski prikaz nagiba pištolja

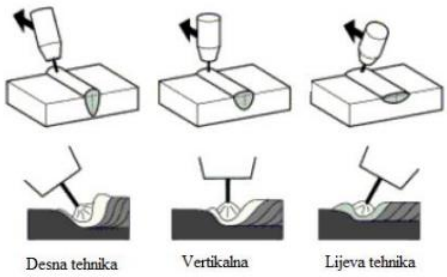
Kod neispravnog položaja pištolja događa se greška poroznosti. Ona nastaje zbog prevelikog kuta između pištolja i radnog komada i velike udaljenosti istih. Slika 8.11 prikazuje shemu nastanka greške poroznosti.



Slika 8.11 Shema nastanka greške

Dok govorimo o samoj tehnici zavarivanja, postoje tri osnovna načina smjera gibanja,prikazana na slici 8.12, to su:

1. Desna tehnika
2. Vertikalna tehnika
3. Lijeva tehnika



Slika 8.12 Vrste zavarivanja

9. Oprema

Oprema za MIG/MAG zavarivanje sastoji se od:

- Izvor napajanja
- Pištolj za zavarivanje
- Sustav za dobavu žice
- Sustav za upravljanje protokom plinova
- Upravljački sustav
- Električni i ostali kablovi
- Boca sa zaštitnim plinom

Sami uređaji za zavarivanje, koji se koriste u MIG/MAG zavarivanju po složenosti, mogu biti od jednostavnih do programibilnih u kojima mogu biti ugrađena računala sa bazom podataka o parametrima zavarivanja. Kod odabira opreme utjecaj imaju primjena, zahtjevi korisnika, ali i sama financijska situacija korisnika [17].

Slika 9.1 prikazuje jedan kompaktni uređaj (a) i jedan modularni uređaj (b) oba uređaja su od istog proizvođača Daihen Varstroj.

Slika 9.1 (a) kompaktni (b) modularni uređaj

9.1. Izvor struje

Izvor struje osigurava potrebnu jačinu struje i napon električnog luka, ali i uspostavljanje luka i njegove stabilnosti u procesu zavarivanja. Kod MIG/MAG zavarivanja najčešće se koriste izvori sa istosmjernom strujom indirektne polarnosti, odnosno plus (+) pol se nalazi na žici što daje stabilni luk i podjednaki prijenos dodatnog materijala. Napon se može regulirati u rasponu 12 – 50 V [1,17,18].

Prema načinu podešavanju napona, izvori se dijele na:

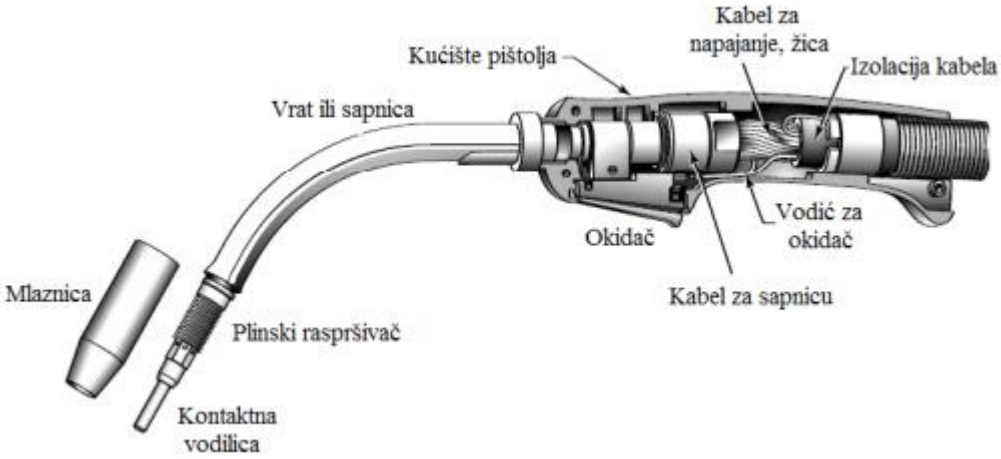
- izvori sa ručnim podešavanjem
- izvori s elektroničkim podešavanjem (inverteri, tiristori)

Tabela 9.1 Izvori za zavarivanje

Podešavanje izvora	**Raspon amperaže (A)**	**Primjena**	**izvedba**
Ručno	100 – 500	Klasični MIG/MAG	Jednostavniji, pouzdaniji, ekonomski prihvatljiviji
Elektroničko	300 – 600	Sve vrste MIG/MAG, a pogodno kod uređaja za impulsno MIG zavarivanje	Složeniji i skuplji

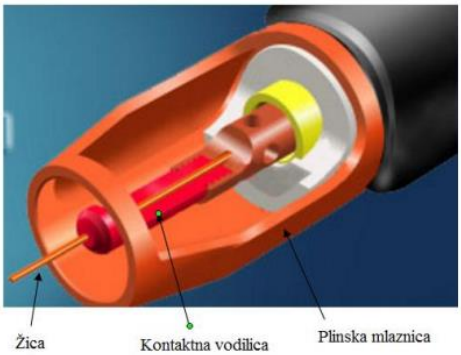
9.2. Pištolj za MIG/MAG zavarivanje

Pištolj za MIG/MAG zavarivanje je osnovni alat zavarivača. Sama izvedba pištolja ovisi o jačini uređaja, vrsti zavarivanja (robotizirano, automatizirano, poluautomatsko) te kako će se dovoditi žica u sami pištolj. Pištolji se izrađuju u dvije osnovne verzije. Za struju u rasponu od 100 do 500 A proizvode se sa zračnim hlađenjem, dok se za struje od 200 do 600 A proizvode vodenim hlađenjem [1,5,17,18]. Pištolj kao cjelinu čine pojedini dijelovi koji su prikazani na slici 9.2.



Slika 9.2 Dijelovi pištolja za zavarivanje

Kontaktna vodilica pištolja nalazi se gotovo u električnom luku što zahtijeva izdržljivost na toplinska i mehanička naprezanja. Temperature dostižu i do 700 °C u blizini kontaktne vodilice. Vodilica je napravljena od bakra. Unutrašnjost kontaktne vodilice je bitna, radi toga što žica mora lako proći kroz nju za postizanje što boljeg električnog luka, ali i stabilnost zbog boljeg zavara. Vrsta i veličina kontaktne vodilice ovise o pištolju, žici i ostalim parametrima [18]. Slika 9.3 prikazuje presjek mlaznice.



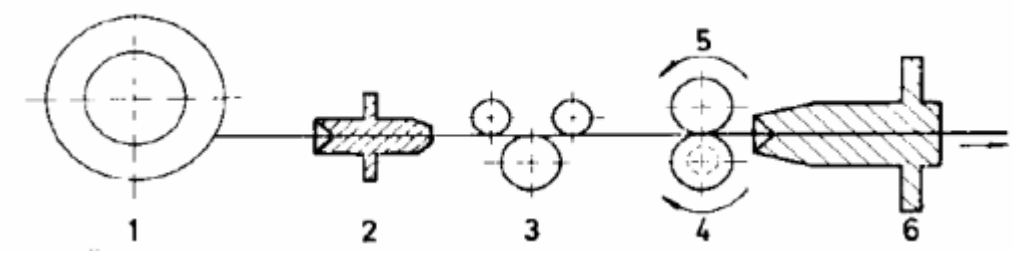
Slika 9.3 Presjek mlaznice

9.3. Sustav za dobavu žice

Za dobavu žice koriste se posebni uređaji koji za vrijeme zavarivanja osiguravaju ravnomjernu dobavu žice na mjesto zavarivanja. Postoje više sustava dobave žice. Sustav mora osigurati fleksibilnost i postizanje različitih brzina dobave žice što ovisi o uvjetima zavarivanja [1]. Moguće izvedbe sustava su:

1. Push–pull
2. Tandem
3. Univerzalni
4. Kabinski

Slika 9.4 prikazuje shemu dovođenja žice.



Slika 9.4 Shema dovođenja žice

Opis slike 9.4:

1. Kolut sa žicom
2. izlazna vodilica
3. Valjci za usmjeravanje žice
4. Pogonski valjak
5. Pogonski valjak
6. Ulazna vodilica

Dodavanje žice se najčešće ostvaruje na dva načina. Prvi način je „push“. Pogonski kotačići kontroliranom brzinom guraju žicu kroz vodilicu. Pogon ostvaruju jedan ili dva para kotačića. Sa takvim načinom dobave može se ostvariti sigurno dodavanje do udaljenosti tri do četiri metra. Omogućuje rad sa žicama debljine 0.6 do 2.4 mm za čelik, 1.0 do 2.4 mm za punjene žice i 1.2 do 2.4 mm za aluminij. Drugi način dobave žice je „push-pull“. Sličan je prvom načinu tako što ima jedan par kotačića smješten u kućištu koji guraju žicu i jedan par kotačića smješten u pištolju koji vuku žicu. Prednost ovog načina je mogućnost zavarivanja na većim udaljenostima, do 15 m, i konstantna zategnutost žice.

9.4. Ostala oprema

Dobava zaštitnog plina do mjesta zavarivanja bitno je za kvalitetu zavarenog spoja. Postoje dvije izvedbe reguliranja zaštitnog plina, to su; redukcijski ventil i elektromagnetski ventil. Redukcijski se ventil priključuje izravno na bocu sa zaštitnim plinom. Protok se mijenja na regulatoru. Elektromagnetski ventil se ne priključuje direktno na bocu nego je smješten oko uređaja za dobavu žice. Potrebni protok se regulira preko upravljačke jedinice koja je usklađena sa dobavljačem žice [17]. Slika 9.5 prikazuje elektromagnetski ventil (a) i redukcijski ventil (b).

Slika 9.5 (a) elektromagnetski ventil (b) redukcijski ventil

Ostala oprema obuhvaća i boce punjene zaštitnim plinom te kolute žica, više o pojedinim temama u cjelinama „zaštitni plinovi“ i „dodatni materijal“ slika 9.6 prikazuje bocu punjenu zaštitnim plinom (a) i namotaj žice (b)

Slika 9.6 (a) boca za zaštitni plin (b) kolut sa žicom

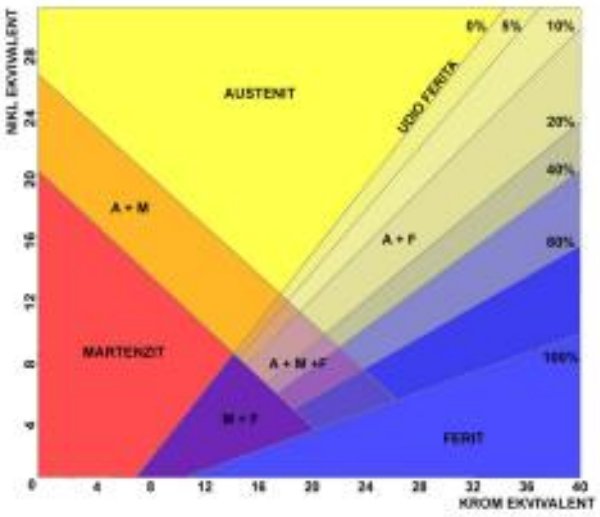
10. Nehrđajući čelici

Nehrđajući čelici ili korozijski postojani čelik poznatiji i pod trgovačkim nazivima inox i prokrom čelici, je legura željeza sa minimalno 12% kroma uz uvjet da krom mora biti potpuno otopljen u metalnoj osnovi, osim kroma postojanost prema koroziji povečava se dodavanjem nikla. Kombinacijom legiranja kromom i nikolom razvijeni su čelici kao što je 18/8 s austenitnom mikrostrukturom koji su otporni na djelovanje kiselina. Dodavanjem molibdena olakšava se pasiviziranje, te poboljšava korozijsku postojanost na jamičastu koroziju. Legiranjem jakim karbidotvorcima kao što su titanij i niobij omogućava se izbjegavanje pojave interkristalne korozije. Skupina nehrđajućih čelika općenitno mora sadržati feritotvorce kao što su krom, silicij, aluminij, molibden i vanadij te austenitotvorce kao što su nikal, mangan, kobalt i bakar.

Vrste korozijski postojanih čelika se mogu podijeliti prema kemijskom sastavu i prema mikrostrukturi. Prema kemijskom sastavu se dijele na: Cr, Cr – Ni, Cr – Ni – Mo i Cr – Mn čelike. Češće se koristi podjela nerđajućih čelika prema njihovoj mikrostrukturi. [19, 20, 21].
Podjela prema mikrostrukturi je:

- Feritni nehrđajući čelici
- Austenitni nehrđajući čelici
- Austenitno – feritni (dupleks) nehrđajući čelici
- Martenzitni nehrđajući čelici

Dobar uvid u mikrostrukturu na osnovi kemijskog sastava daje nam tzv. Schaefflerov dijagram, koji pomaže pri definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja Cr – ekvivalenta i Ni – ekvivalenta. Slika 10.1 prikazuej Schaefflerov dijagram.



Slika 10.1 Schaefflerov dijagram

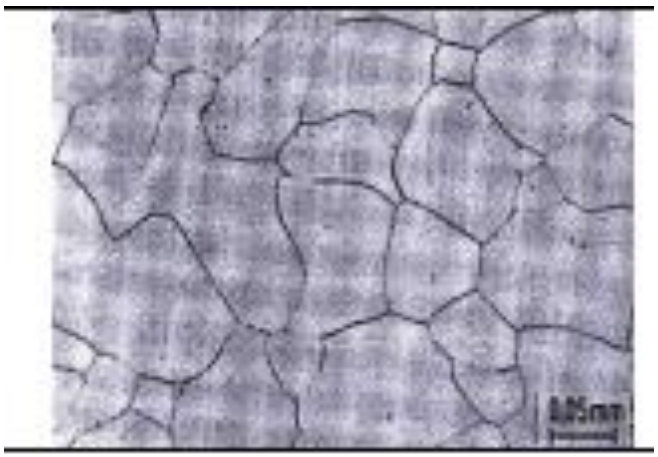
10.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže 12 – 17% kroma i manje od 0,1% ugljika. Imaju feritni mikrostrukturu kao na slici 9.1 bez sposobnosti fazne transformacije i usitnjenja zrna. Usitnjenje zrna bi se moglo postići pomoću hladne deformacije i rekristalizacijskim žarenjem. Ova vrta čelika je visoko korozijski otporna na djelovanje dušične kiseline i njenih vodenih otopina, amonijevoj salitri te smjesi dušične, fosforne i solne kiseline. Nisu otporne na djelovanje rastaljenih metala, amonijevog bifluorida, broma, octene kiseline itd.

Ostala svojstva su:

- Relativno meki
- Skloni lomu pri niskim temperaturama
- Magnetični
- Ekonomski prihvatljiviji od ostalih nehrđajućih čelika
- Slabo zavarljivi zbog sklonosti pogubljenju zrna iznad 900 °C
- Skloni pojavi „krhkosti 475“
- Slaba deformabilnost
- Dobra obradljivost OOČ i slaba deformabilnost

Glavni nedostatak feritnih nehrđajućih čelika kod zavarivanja je izrazita sklonost porastu zrna u zoni utjecaja topline koja je zagrijana iznad 900 °C. Pogrubljenje zrna se ne može ukloniti nijednim postupkom toplinske obrade. Zato je bitno i preporučuje se korištenje postupcima zavarivanja koji unose manje količine topline. Znatna poboljšanja svojstava se postižu porastom čistoće tj. dobivanjem vrlo niskih udjela nečistoća i primjesa pomoću indukcije vakuumske peći, elektronskog mlaza i sl. takvi se još čelici nazivaju ELA čelici [19, 20, 21].



Slika 10.2 Feritna mikrostruktura nehrđajućih čelika

Tabela 10.1 Oznake feritnih nehrđajućih čeika

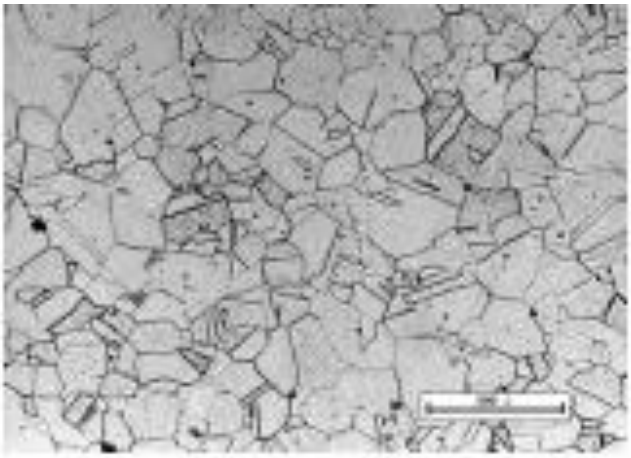
Oznaka čelika prema EN normi (AISI norma1)	**Posebna otpornost i primjeri primjene**
X 6 Cr 17 (430)	Korozijski postojani. pribor. za. jelo. (osim oštrice noža), dijelovi kućanskih. aparata, dijelovi uređaja u. proizvodnji. dušične. kiseline. i. sapuna te. u. petrokemijskoj. industriji.
X 6 Cr Mo 17 (434)	Posebno otporan na slanu vodu i organske kiseline, za auto-dijelove, okvire prozora,prevlake. hladnjaka,. kvake,. okvire. retrovizora.
X 8 Cr Ti 17 (430 Ti)	Kao X 6 Cr 17, otporniji. na rast zrna, za zavarene. dijelove. kućanskih. aparata,. za. sita. i. okvire.
X 8 Cr Nb 17 (439)	Dijelovi uređaja u mljekarama, pivovarama, proizvodnji boja i sapuna (ponajprije za. zavarene dijelove).
X 8 Cr Mo Ti 17	Za jače napregnute zavarene dijelove aparata u proizvodnji jestivog octa, u mljekarama, prešaonicama. voća.. Nije. za. udarni. rad!
X 12 Cr Mo Ti 25	Za otopine s visokim udjelom slobodnog klora.
X 12 Cr Mo S 19	Za. obradu. odvajanjem. čestica. na. automatima:. vijke, zakovice, matice, male zupčanike, male osovine.

10.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici sadrže 0,02 – 0,15% ugljika, 15 – 20% kroma, 7 – 20% nikla uz moguće dodavanje određenih količina molibdena, titanija, niobija, tantala, dušik. Dodavanjem nikla i dušika djeluje se na proširnje područja austenita. Austenitni čelici mogu prijeći u martenzitno stanje „dubokim“ hlađenjem ili hladnom deformacijom. Međutim, mikrostruktura prvenstveno može biti monofazno austenitna ili austenitno – feritna (5 – 10% delta ferita). Delta ferit negativno djeluje na ponašanje čelika pri toploj obradi metala deformiranjem, ali je nužan jer otežava pojavu toplih pukotina koje bi se mogle pojaviti prilikom zavarivanja i unosa topline u zavareni spoj [19, 20, 21].

Zahtjevi za dobivanje austenitne mikrostrukture su:

- Maseni udio ugljika ispod 0,15%, tada je manja opasnost od nastanka karbida $Cr_{23}C_6$ (interkristalna korozija)
- Maseni udio kroma iznad 18%, radi povečanja antikorozivnosti
- Maseni udio nikla iznad 8%, kao gamageni element, za prevladanje alfagenog kroma i doveo do nastanka austenitne mikrstrukture
- Udio dušika 0,2 – 0,4% za povišenje čvrstoće i otpornost na napetosnu i jamičastu koroziju
- Legiranje sa Mo, Ti, Nb i Ta za pospješenje nastanka delta ferita



Slika 10.3 Austenitna mikrostruktura nehrđajućih čelika

Glavna svojstva su:

- Nema mogućnosti usitnjavanja zrna
- Nemagnetični su
- Veće napetosti i deformacije kod zavarivanja nego kod feritnih čelika
- Odlična plastičnost, visoka žilavost, oksidacijska i korozijska postojanost
- Dobra svojstva pri niskim temperaturama

Tabela 10.2 Oznake austenitnih nehrđajućih čeika

Oznaka čelika EN norma	**AISI norma**	**Oznaka čelika EN norma**	**AISI norma**
X 2 Cr Ni 18 – 9	304 L	X 2 Cr Ni Mo N 17 – 12 – 2	–
X 2 Cr Ni Mo 18 – 10	316 L	X 2 Cr Ni Mo N 17 – 13 – 5	–
X 2 Cr Ni Mo 18 – 12	316 LC	X 2 Cr Ni Mo N 25 – 25 – 2	–
X 2 Ni Cr 18 – 16	–	X 3 Cr Ni Mo N 19 – 17	–
X 2 Cr Ni Mo 18 – 16	–	X 3 Cr Ni Mo N 23 – 17	–
X 2 Cr Ni N 18 – 10	–		

10.3. Austenitno – feritni nehrđajući čelici

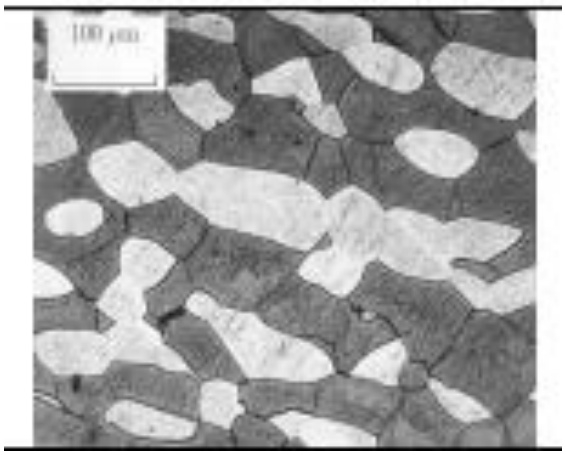
Austenitno – feritni (dupleks) nehrđajući čelici posjeduju dvofaznu mikrostrukturu s 40 – 60% ferita. Sastoji se od 22 – 24% kroma i 6 – 8% nikla. Pri temperaturi 20 °C tj. zagrijan do 1000 °C sastoji se od ferita i austenita. Dodavanjem molibdena, silicija, titanija i niobija proširuje se polje ferita, a dodavanjem mangana, bakra, dušika i ugljika proširuje se polje austenita. Povišenjem temperature iznad 1000 °C raste udio ferita. Jedan od glavnih ciljeva legiranja dupleks čelika je održavanje dovoljno visokog udjela austenita što je posebice važno tijekom zavarivanja. Previsoki udio ferita može uzrokovati sniženje korozijske postojanosti te pojavu krhkosti. Dupleks čelike najčešće je potrebno predgrijati i držati toplinski unos konstantan da nebi došlo do pojava loma i korozije.

Dupleks čelici se najčešće primjenjuju u industriji nafte i plina (crpkama, destilatorima, ventilima, cjevovodima i pumpama), u petrokemijskoj industriji (alati za ekstruziju PVC filma, izmjenjivači topline, separatori) kemijsko – procesnoj industriji (proizvodnja kiselina, rad s otopinama HF, HNO_3 i H_2SO_4) brodogradnji (osovine, kormila, crpke, grijači, ležajevi).

Najčešće korišteni dupleks čelici su:

X4 Cr Ni Mo Nb 25 7 2, X6 Cr Ni Mo Ti 20 6 2, X2 Cr Ni Mo Si 18 5 3, X2 Cr Ni Mo N 22 5 3, X2 Cr N 26 5 4, X3 Cr Ni Mo Cu N 24 5 2 itd.

Pojave koje uzrokuju krhkost dupleks čelika slične su pojavama kod feritnih čelika kao što su sigma faza (600 – 900 °C) i „krhkost 475“ (400 – 500 °C) uklanjanje tih oblika krhkosti može se provesti zagrijavanjem na 1050 – 1100 °C i naknadnim hlađenjem u vodi. Žarenjem na 870 – 950 °C mogu se ukloniti izlučeni karbidi korma. Nakon žarenja je potrebno provesti hlađenje na zraku ili u ulju zbog izbjegavanja nastanka sigma faze i „krhkosti 475“ [19, 20, 21].

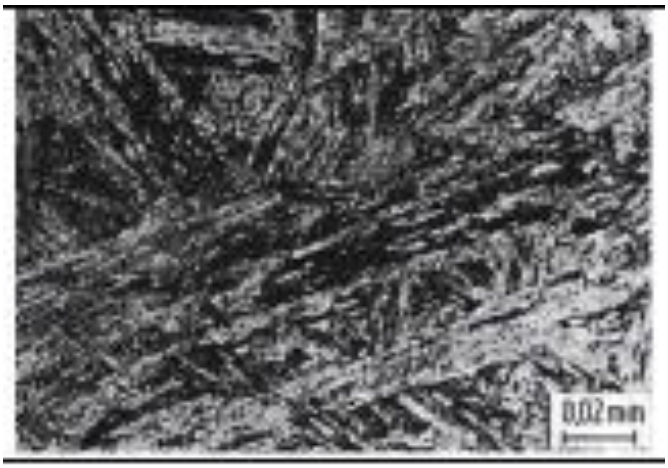


Slika 10.4 Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika

10.4. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici imaju povišeni udio ugljika 0,2 – 1%, 13 – 18% kroma, mogu sadržavati do 1,3% molibdena i 2,5% nikla. Optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost oveskupine čelika postiže se kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim operacijama popuštanja. Ovi nehrđajući čelici se mogu podijeliti u dvije podskupine, to su konstukcijski sa udjelom ugljika do 0,25% i oni se poboljšavaju, te druga skupa alatnih čelika sa više od 0,3% ugljika i oni se kale i nisko popuštaju. Kod konstrukcijskih čelika posebno se pazi na korozijsku postojanost, a kod alatnih postoje dodatni zahjevi na abrazijsko trošenje.

Čelici s 13% kroma i više od 0,3% ugljika pri 1000 °C u austenitu imaju otopljeno oko 12,5% kroma i 0,3% ugljika što je dovoljno za korozijsku postojanost martenzita, ali nedovoljno za maksimalnu zakaljenost čelika (treba biti više od 0,6% ugljika). Zato se austenitizacija odvija na višim temperaturama. Ako bi bilo manje od 12% kroma, pojavila bi se opasnost od korozijske postojanosti popuštenog martenzita. Nakon žarenja na 820 – 860 °C preporuča se dodatno žarenje na 760 – 790 °C zbog smanjenja naprezanja, prikazano na slici 9.1 [19, 20, 21]. Dodatno žarenje se može provesti nakon grubih operacija odvajanjem čestica.



Slika 10.5 Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika

Tabela 10.3 Oznake martenzitnih nehrđajućih čeika

Oznaka čelika EN norma (AISI norma)	**Otpornost i primjena**
X 20 Cr 13 (420)	Postojani na vodu i vodenu paru, na organske kiseline.octenu, mliječnu i voćnu. Primjenjuje se za kirurške instrumente, osovine,. turbinske. lopatice, ventile
X 20 Cr Mo 13	Povišena. postojanost. u. odnosu. na X20 Cr.13. (posebno. toplinska). Primjena. isto. kao. X20 Cr 13. ali. za. radne. temperature. i. do. 500. °C,. te. za. toplinski. napregnute. opruge.
X 22 Cr Ni 17	Otporni na organske kiseline. koje. se. javljaju. u. industriji. namirnica,. octene kiseline i sapuna, na oksidirajuću. razrijeđenu. HNO_3,. postojan. na.morsku.vodu. Primjena:. osovine,. ventili,. dijelovi. pumpa,. dijelovi. uređaja. u. mljekarama,. u. industriji. papira,. u. proizvodnji. kvasca. i. škroba,. za. dijelove. kompresora
X 30 Cr 13 (420 F)	Otporan. na. vodu. i. paru. (samo. u. kaljenom. stanju).. Primjena:. opruge,. vijci. (za. rad. u. agresivnoj. atmosferi),. škare,. mjerni. alat
X 45 Cr Mo V 15	Otporan do 500 °C. Primjena:. različiti. rezni. alati,. kirurški. skalpeli

10.4.1. Mekomartenzitni nehrđajući čelici

Ako je sadržaj ugljika ispod 0,1% tada nastaju mekomartenzitni nehrđajući čelici, koji spadaju u visokočvrste čelike. Mekomartenzitni čelici s 0,03 – 0,05% ugljika postižu zadovoljavajuća mehanička, fizikalna i kemijska svojstva, austenitizacijom, gašenjem i popuštanjem pri 450 – 700 °C. Preostale tri skupine čelika (PH – martenzitni, maraging i PH – austenitni) pored visokog udjela kroma, nikla i molibdena mogu sadržavati i bakar, niobij, aluminij, titanij, cirkonij koji međusobno ili s drugim elementima stvaraju intermetalne spojeve. Intermetalni spojevi nastaju u prethodno stvorenom martenzitu, pa se očvrsnuće takvih čelika pripisuje precipitacijskom djelovanju. Stoga se takvi čelici označavaju kao PH-čelici i pripadaju skupini ultračvrstih čelika. Mekomartenzitni čelici uglavnom se primjenjuju za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka, izradu lopatica Peltonovih i Kaplanovih turbina, za valjke u proizvodnji papira, izradu dijelova rotori, osovine, lopatice, klizne plohe itd [20, 21].

11. Zavarljivost nehrđajućih čelika

Feritni nehrđajući čelici

Prilikom zavarivanja ne dolazi do očvršćivanja te se lakše zavaruju. Međutim zavarljivost ovih čelika je ograničena zbog sklonosti prema pogrubljenju strukture, što dodatno može dovesti do ubrzanog izlučivanja krhkih intermetalnih faza u području visokotemperaturnog (oko 1000°C) dijela zone utjecaja topline. Kod zavarivanja feritnih čelika preporuča se predgrijavanje. na 200 – 300°C i održavanje navedene međuslojne temperature. Zavarivanje se mora izvoditi na način da osnovni materijal provede što kraće vrijeme na temperaturi iznad 1150°C [22].

Austenitni nehrđajući čelici

Lako se zavaruju, te ih ne treba predgrijavati prije zavarivanja. Najveći problem kod austenitnih nehrđajućih čelika predstavlja mogućnost senzibilizacije tj. pojava precipitacijskih kromovih karbida u temperaturnom rasponu od 425 do 580°C što može dovesti do interkristalne korozije. Zbog visokog koeficijenta toplinske istezljivosti te niskog koeficijenta toplinske vodljivosti, podložni su deformacijama uslijed zavarivanja. Problem deformacija uslijed zavarivanja rješava se pravilnim odabirom dodatnog materijala, tehnologijom zavarivanja odnosno parametrima zavarivanja, te ostalim uvjetima zavarivanja. Skloni su pojavi toplih pukotina u metalu zavara što se javlja kao posljedica nečistoća u materijalu i izražene sklonosti zaostalim naprezanjima [22].

Austenitno – feritni nehrđajući čelici

Za zadržavanje dovoljnog udjela austenitne strukture u području zavarenog spoja koriste se dodatni materijali predviđeni za zavarivanje dupleks čelika a koji su prelegirani s nekoliko postotaka nikla u odnosu na dodatni materijal. Pozitivan utjecaj na zavar ima dodavanje plina dušika prilikom zavarivanja. Feritizacija koja je posljedica zavarivanja, u svakom slučaju djeluje štetno, jer povećani udio ferita dovodi do olakšanog stvaranja krhkih struktura u tom pojasu, do smanjenja korozijske postojanosti. Feritizirani dio strukture je najkritičnije područje zavarenog spoja stoga je nužno da se zavarivanje izvodi u kontroliranim uvjetima u smislu unosa topline – parametara zavarivanja [22].

Martenzitni nehrđajući čelici

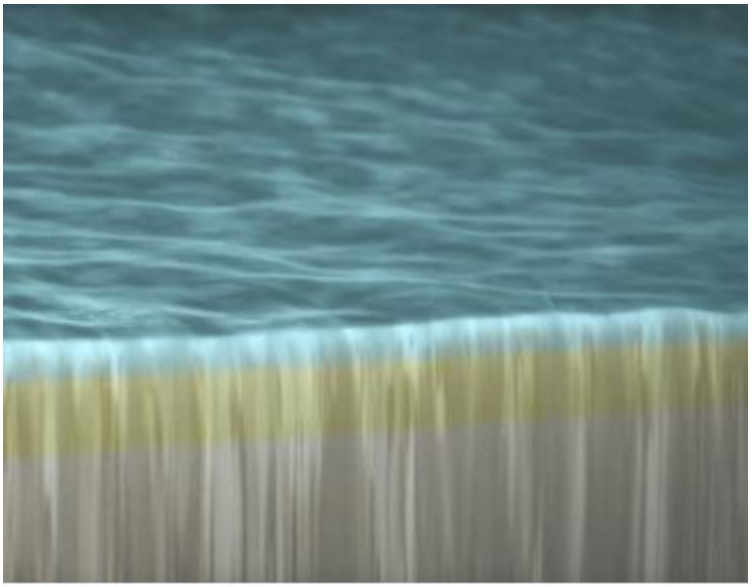
Uglavnom su manje prikladni za zavarivanje, budući da sadrže manje legirajućih elemenata i veći udio ugljika. Zbog većeg udjela ugljika postoji mogućnost pojave zakaljenja prilikom zavarivanja i hlađenja tj. povećanje tvrdoće zavara pri čemu dolazi do mogućih pukotina u samome zavaru. Zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika zahtjeva toplinske postupke prije i poslije zavarivanja u obliku predgrijavanja na 200 – 300 °C i popuštanja na temperaturama 700 –750 °C zbog svojstva zakaljivosti na zraku [22].

12. Pasivizacija

Pasivizacija je često korištena površinska obrada materijala, posebice nehrđajućih čelika za sprječavanje nastanka korozije. Koriste se dušična i limunska kiselina za uklanjanje slobodnih iona sa površine čelika. Kemijski postupak vodi do zaštitnog sloja koji ima manje šanse reagirati sa zrakom i prouzročiti koroziju.

Krom, koji se nalazi u leguri nehrđajućih čelika, reagira sa kisikom u zraku i stvara tanki sloj (1 – 10 nm) Cr_2O_3 oksida koji štiti od korozije. Postupak pasivizacije se koristi za poboljšanje stvaranja zaštitnog oksidnog sloja.

Uranjanjem čelika u kiselinu otapaju se slobodni ioni sa površine, dok su ostali elementi netaknuti. Nakon uranjanja površinski sloj čelika ima više kroma koji se lakše vežu sa kisikom iz zraka i time stvara deblji zaštitni sloj, prikazano na slici 12.1, u naredna 24 do 48 sata.



Slika 12.1 Pasivizirani čelik

Plavom bojom prikazan je sloj Cr_2O_3 oksida koji štiti površinu, žutom bojom je prikazan prijelazni sloj, a sivom osnovni materijal tj nehrđajući čelik.

Prije same pasivizacije potrebno je očistiti površinu odmašćivačem i četkama te brisevima za nehrđajući čelik za bolji rezultat nakon pasivizacije. Osim prisilne pasivizacije postoji i prirodna pasivizacija. Da bi se ona odvijala potrebno je kemijsko čišćenje i odmašćivanje površine te se u razdoblju od 12 do 24 sata spontano nasivira površina čelika.Jedan od postupaka provjere pasivizacije je potapanjem u vodi u trajanju od 24 sata u intervalima po 1 sat u vodi i jedna sat izvan vode te naknadnim pregledavanjem [22].

13. Primjeri zavarivanja nehrđajućih čelika sa PPŽ

Visokotlačni isparivač napravljen iz nehrđajućeg čelika zbog uvjeta antikorozivnosti zavren je praškom punjenom žicom T 19 9 Nb R M 3 (C3) (TETRA V 347H – G) koja ima mogućnosti zavarivanja u svim položajima i vrlo otporna prema koroziji [23].

Slika 13.1 Visokotlačni sparivač

Statička mješalica iz austenitnog nehrđajučeg čelika toplinski otporan do 850 °C i otporan na oksidaciju do 800 °C, korištena je praškom punjena žica T 19 9 H Z M 3 (TETRA S B308H – G) sa dodatkom za stabilizirane austenitne čelike sličnih kompozita [23].

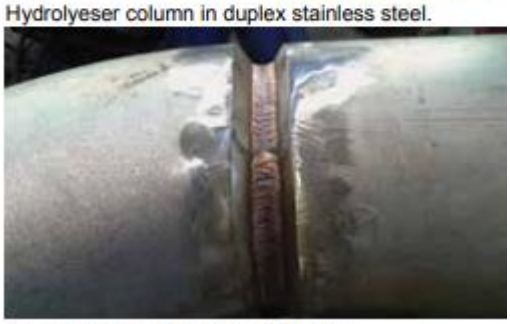
Slika 13.2 Statičai mješalica

Reaktor iz austenitnog nehrđajučeg čelika otporan na oksidaciju do 1150 °C, korištena je praškom punjena žica T 25 20 Z M 3 (TETRA S B 310 – G) otporna na pukotine pri visokim temperatura i za spajanje srodnih nehrđajućih čelika [23].

Slika 13.3 Reaktor

Flange welded with TETRA S 22 9 3L-G.

Hydrolyeser column in duplex stainless steel.



Tube welded with TETRA V 317L-G.

Slika 13.4 Hidrolozijska cijev

Prirubnica zavarena na hidrolizijskoj cijevi napravljena iz dupleks nehrđajućeg čelika zavarena žicom T 22 9 3 N L R M 3 (C3) (TETRA S 22 9 3L – G) koja služi za spajanje dupleks i srodnih nehrđajućih čelika. Cijevi su međusobno zavarene žicom T 19 13 4 N L R M 3 (C3) (TETRA V 317L – G) služi za spajanje niskougljičnih čelika sa sličnim kompozitima za veću korozijsku otpornost. [23].

14. Zaključak

Nehrđajući čelici su vrlo bitni tehnički materijali, zbog antikorozivnosti koriste se u raznim industrijama kao u kemijskoj, naftnoj, tekstilnoj i prehrambenoj industriji, najčešće u postrojenjima gdje je bitna korozijska postojanost i otpornost na visoke temperature. Opisana je njihova podjela prema mikrostrukturi i kemijskom sastavu, primjere nehrđajućih čelika prema mikrostrukturi te njihova zavarljivost. Bitno je naglasiti da nehrđajući čelici moraju zadovoljiti osnovna dva uvijeta, a to su minimalno 12% kroma otopljenog u metalnoj osnovi i posjedovanje monofazne mikrostrukture. Zavarivanje nehrđajućih čelika ovisi o njihovim karakterističnim svojstvima, legirnim elementima koji mogu biti alfageni ili gamageni te o postignutoj mikrostrukturi. Opisan je postupak pasivizacije nehrđajućih čelika. Najčešći postupak spajanja nehrđajućih čelika je zavarivanje.

Opisani je MAG postupak zavarivanja uključujući prednosti i nedostatke MAG zavarivanja, komponente koje utječu na prijenos metala, načine prijenosa metala i opisuje svaki način prijenosa, zaštitne plinove i mješavine istih koji se koriste kod zavarivanja i njihove utjecaje na zavar te je opisana metoda FCAW koji je vrlo sličan MAG postupku zavarivanja i koji se sve više koristi za zavarivanje čelika i njegovih legura. Najveća mu je prednost lakše zavarivanje debljih materijala i fleksibilnost kod pripreme zavarenog spoja.

Praškom punjene žice su izrazito bitne za zavarivanje jer omogućuju veću penetraciju i veći depozit dodatnog materijala u kračem vremenu i kraće vrijeme zavarivanja, no potrebno je naglasiti da treba skidati trosku koja se stvara nakon svakog prolaska. Skuplje su u usporedbi sa punim žicama, ali zbog jednostavnog dodavanja legirnih elemenata u jezgru žice se znatno smanje troškovi u odnosu na pune žice. Praškom punjenim žicama ostvaruju se spojevi izuzetnih mehaničkih svojstva.

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

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

Ja, Karlo Zadravec *(ime i prezime)* pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom MAG zavarivanje nehrđajućih čelika pružnom punjenom žicom *(upisati naslov)* te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

(vlastoručni potpis)

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

Ja, Karlo Zadravec *(ime i prezime)* neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (*obrisati nepotrebno*) rada pod naslovom MAG zavarivanje nehrđajućih čelika pružnom punjenom žicom *(upisati naslov)* čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

(vlastoručni potpis)

15. Literatura

[1] S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 1992

[2] G. Brumec: Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima, Završni rad, FSB, 2010

[3] https://moodle.vz.unin.hr/moodle/mod/resource/view.php?_i_d=34480 Zavarivanje_i_srodni_postupci_2.pdf dostupno 27.7.2020.

[4] Lincoln Electric Company: Gas Metal Arc Welding Guidelines, Cleveland, Ohio, 2006.

[5] I. Herak: Primjena i specifičnosti MAG-STT postupka zavarivanja, Završni rad, FSB, Zagreb, 2008

[6] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, br. 8, ožujak 2014., str. 288-294

[7] Đ. Arambašić: Završni rad, Završni rad, FSB, Zagreb, 2013

[8] Josip Brezetić: Tehnologija II- Zavarivanje, Veleučilište u Karlovcu, Podloge za učenje

[9] Klas Weman, Gunnar Linden: MIG welding guide, Woodhead Publishing and Maney Publishing, Cambridge, 2006.

[10] https://pdfslide.tips/documents/zavarivanje-562074ea59418.html dostupno 27.7.2020

[11] https://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar1/9_1_diplomski_radovi_files/9_1_dipl/mb_dipl1/toc2/2_1.pdf dostupno 27.7.2020

[12] M. Bajs: Diplomski rad, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.

[13] Miller, Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW), USA, 04.2012

[14] D. Kantolič: Završni rad, Završni rad, FSB, Zagreb, 2018.

[15] http://www.quality.unze.ba/zbornici/QUALITY%202005/057-Q05-003.pdf dostupno 27.7.2020.

[16] http://www.dtzi.hr/upload/pdf/2.%20SEMINAR/Brosura%20seminar%202.pdf dostupno 27.7.2020.

[17] V. Petrović: Diplomski rad, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2010

[18] https://www.thefabricator.com/thewelder/article/metalsmaterials/the-wide-world-of-welding-stainless-steel , dostupno 10.9.2020.

[19] "Specijalni čelici", skripta - Sveučilište u Zagrebu, www.simet.unizg.hr, 2011.

[20] https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/weldability-of-materials-stainless-steel-020 , dostupno 10.9.2020.

[21] I.Juraga, I.Stojanović, V.Šimunović: Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost

[22] https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/testingmeasuring/passivation-basics-will-this-stainless-steel-rust- dostupno 29.9.2020.

[23] http://www.morganindustrial.com/wp-content/uploads/2013/02/Joining-Brochure-Jul-10.pdf dostupno 18.9.2020

Popis slika

Slika 1.1 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom 1
Slika 1.2 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem 2
Slika 2.1 Shema postupka MIG/MAG zavarivanja 3
Slika 2.2 Shema uređaja za zavarivanje 4
Slika 3.1 FCAW – S postupak zavarivanja 8
Slika 3.2 FCAW – G postupak zavarivanja 9
Slika 4.1 Shema sila na kapljicu taline 10
Slika 5.1 Mehanizmi prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja 12
Slika 5.2 Shema prijenosa metala kratkim spojem 13
Slika 5.3 realni prikaz prijenosa metala kratkim spojem 14
Slika 5.4 Shema prijenosa metala mješovitim lukom 15
Slika 5.5 realni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom 15
Slika 5.6 Shema prijenosa metala štrcajućim lukom 17
Slika 5.7 Realni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom 18
Slika 5.8 Shema prijenosa metala pulsirajućim lukom 20
Slika 5.9 Realni prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom 21
Slika 5.10 Shema prijenosa metala rotirajućim lukom 22
Slika 5.11 Realni prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom 23
Slika 6.1 Utjecaj argona na geometriju zavara 27
Slika 6.2 Utjecaj helija na geometriju zavara 28
Slika 6.3 Utjecaj ugljikovog dioksida na geometriju zavara 29
Slika 7.1 Presjeci praškom punjenih žica 36
Slika 7.2 Prijemer označavanja žice 46
Slika 8.1 Shema uzroka poroznosti u zavaru 50
Slika 8.2 Realni izgled prskanja 51
Slika 8.3 Sheme penetracija 52
Slika 8.4 Realni prikaz greški zavara i dobrog zavara 52
Slika 8.5 Utjecaj jačine struje na zavar 53
Slika 8.6 Shematski oblik zavara prema naponu električnog luka 54
Slika 8.7 Shematska zavisnost položaja duljine kraja žice i sapnice u zavisnosti od jačine struje 55
Slika 8.8 Utjecaj slobodnoga kraja na oblik zavara 56
Slika 8.9 Realni prikaz zavara u ovisnost brzine zavarivanja 57

Slika 8.10 Shematski prikaz nagiba pištolja 58
Slika 8.11 Shema nastanka greške 58
Slika 8.12 Vrste zavarivanja 58
Slika 9.1 (a) kompaktni (b) modularni uređaj 59
Slika 9.2 Dijelovi pištolja za zavarivanje 61
Slika 9.3 Presjek mlaznice 61
Slika 9.4 Shema dovođenja žice 62
Slika 9.5 (a) elektromagnetski ventil (b) redukcijski ventil 63
Slika 9.6 (a) boca za zaštitni plin (b) kolut sa žicom 63
Slika 10.1 Schaefflerov dijagram 64
Slika 10.2 Feritna mikrostruktura nehrđajućih čelika 65
Slika 10.3 Austenitna mikrostruktura nehrđajućih čelika 67
Slika 10.4 Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika 69
Slika 10.5 Mikrostruktura martenzitnog nehrđajućeg čelika 70
Slika 12.1 Pasivizirani čelik 74
Slika 13.1 Visokotlačni sparivač 75
Slika 13.2 Statičai mješalica 75
Slika 13.3 Reaktor 75
Slika 13.4 Hidrolozijska cijev 76

Popis tabela

Tabela 5.1 Izbor jačine struje kod prijenosa metala 18
Tabela 6.1 Primjena, ponašanje i karakteristika električnog luka 25
Tabela 6.2 Utjecaj plinova na tehnološke karakteristike 26
Tabela 6.3 Okvirna količina potrošenog plina 27
Tabela 6.4 Karakteristike smjesa argona i helija 31
Tabela 6.5 Karakteristike smjesa argona i ugljikovog dioksida 32
Tabela 6.6 Karakteristike smjesa argona i kisika 33
Tabela 6.7 Karakteristike trokomponentnih smjesa 34
Tabela 6.8 Zaštitni plin prema osnovnom materijalu 35
Tabela 7.1 Sadržaj vodika u zavarenom spoju 38
Tabela 7.2 Neke praškom punjene žice za MAG zavarivanje nehrđajućih čelika 44
Tabela 7.3 Mehanička svojstva zavara 47
Tabela 7.4 Žilavost zavara 47
Tabela 7.5 Kemijki sastav zavara 48
Tabela 7.6 Svojstva punjene žice 48
Tabela 7.7 Oznaka zaštitnog plina 49
Tabela 7.8 Položaj zavarivanja 49
Tabela 7.9 Sadržaj difuznog vodika 49
Tabela 8.1 Vrijednost napona za određene materijale 54
Tabela 8.2 Brzina dobave žice 56
Tabela 9.1 Izvori za zavarivanje 60
Tabela 10.1 Oznake feritnih nehrđajućih čeika 66
Tabela 10.2 Oznake austenitnih nehrđajućih čeika 68
Tabela 10.3 Oznake martenzitnih nehrđajućih čeika 71