

Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja

Klobučar, Matej

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:516028>

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

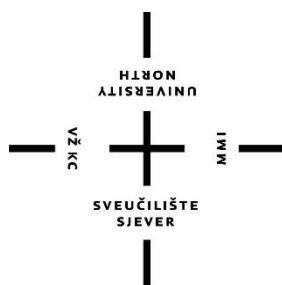
Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





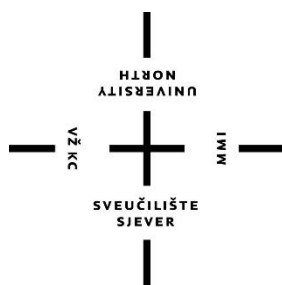
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 178/PS/2016.

**Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka
zavarivanja**

Matej Klobučar, 4150/601

Varaždin, srpanj 2016. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 178/PS/2016.

Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja

Student

Matej Klobučar, 4150/601

Mentor

Marko Horvat, dipl.ing.

Varaždin, srpanj 2016. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za proizvodno strojarstvo		
PRISTUPNIK	Matej Klobučar	MATIČNI BROJ	4150/601
DATUM	07.06.2016.	KOLEGIJ	Tehnologija III
NASLOV RADA	Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja		

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Some theoretical and practical basis of GMAW welding process

MENTOR	Marko Horvat, dipl.ing.	ZVANJE	predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Damir Mađerić, dipl. ing., viši predavač		
	2. Marko Horvat, dipl.ing., predavač		
	3. Veljko Kondić, mag. ing. mech., predavač		
	4. _____		
	5. _____		

Zadatak završnog rada

BROJ	178/PS/2016
OPIS	MIG/MAG je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog/inertnog plina ili mješavina plinova. Ovaj postupak se može primijeniti na široki spektar materijala različitih debljina i vrsta te je jedan od najčešće primjenjenih postupaka zavarivanja.
	U Završnom radu je potrebno obraditi slijedeća područja:
	• povijest i razvoj MIG/MAG postupka zavarivanja • prijenosi metala i pojave u električnom luku kod MIG/MAG zavarivanja • dodatni materijali kod MIG/MAG zavarivanja, zaštitni plinovi i smjese • tehnologija zavarivanja, utjecajni parametri, oprema • modificirani postupci MIG/MAG zavarivanja, automatizacija • u zaključku dati osvrt na temu Završnog rada

ZADATAK URUČEN

13.06.2016



Sažetak

MIG/MAG je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog ili inertnog plina. Ovaj postupak može se primijeniti na široki spektar materijala različitih debljina i vrsta. Postupak ima više načina prijenosa samoga metala. Prijenos metala kratkim spojem primjenjuje se kod zavara tanjih limova, pogodan je još i za zavarivanje korijena zavara kod debljih komada. Prijenos metala štrcajućim lukom primjenjiv je na gotovo sve materijale. Kod prijenosa metala mješovitim lukom javljaju se prijenos metala štrcajućim lukom i kratkim spojem u određenim intervalima. Prijenos metala pulsirajućim lukom primjenjiv je u svim položajima, ali i na širi raspon debljine određenog materijala. Za svaki od ovih prijenosa metala potrebni su određeni parametri. Zaštitni plinovi koji se javljaju ovome postupku zavarivanja bitni su jer štite mjesto zavarivanja, ali i kapljice rastaljenog metala za vrijeme prolaska kroz električni luk. Primjenom pojedinog plina, ali i načina prijenosa metala i vrsti i debljini materijala, ali i ostalih parametara, tako se primjenjuju i dodatni materijali koji su u rasponima debljine od 0.6 do 2.4 mm. Dodatni materijal može biti puni ili praškom punjeni. Ostali parametri kao i ta dva utječu na sami zavar. Stoga je bitno u samoj primjeni odredi točne parametre, kako bi se izbjegle neželjene greške u samome zavarivanju, ali i samom zavaru koji mogu biti: poroznost, naljepljivanje, štrcanje, pukotine i penetracija. U primjeni su i suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja koji se primjenjuju za pojedina zavarivanja gdje su najučinkovitiji i gdje ne pojavljuju greške kao kod klasičnih MIG/MAG postupaka. Tandem zavarivanje, zavarivanje s dvjema žicama koje je brže od ostalih konvencijalnih MIG/MAG postupaka. Primjenom robota u postupcima zavarivanja postiže se sve veća učinkovitost MIG/MAG postupaka zavarivanja.

Ključne riječi: MIG, MAG, zavarivanje, plinovi, dodatni materijali, parametri

Summary

MIG/MAG is an arc welding with consumable electrode and protected with active or inert gas. This procedure can be applied on the wide specter of various thickness and types. Procedure has several ways of metal melting. Metal melting using short circuit is applied at welding thin sheet metal and is also usable in welding initial joints in thicker pieces. Metal melting using sproutin arc is appliable on almost all materials. When using combined arc, sprouting arc and short circuit both appear in short intervals. Metal melting with pulsating arc is appliable in all positions, but also on a wider scale of thickness of a particular material. For each of these meltings certain parameters are required. Shielding gases that appear during this procedure are important because they shield the welding place, but also the drops of melted metal during their

passing through the electric arc. By using a certain gas, but also a method of melting and depending on the kind and thickness of the material and other parameters as well, that is how additional materials are applied with thickness varying for 0.6 to 2.4 mm. Additional material can be composite or powder-filled. Other parameters as well as these two affect the weld itself. Therefore it is important in application itself to determine exact parameters, so to avoid unwanted errors in the welding itself, but also on the welding place, which can be: porosity, sticking, splashing, cracks and penetration. In appliance are modern procedures of MIG/MAG welding which are used for certain weldings in which they are most effective and in which no errors appear as with classic MIG/MAG procedures. Tandem welding, welding with two wires is faster than other conventional MIG/MAG procedures. By using robots in the welding processes greater efficiency of MIG/MAG welding procedure is achieved.

Key word: MIG, MAG, welding, gases, additional materials, parameters

Popis korištenih kratica

MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. Metal Insert Gas)
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina (engl. Metal Active Gas)
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom
Sigma	engl. Shielded Inert Gas Metal Arc
GMAW	engl. Gas Metal Arc Welding
STT	engl. Surface Tension Transfer
CMT	engl. Cold Metal Transfer
RMT	engl. Rapid MIG/MAG Tehnology
AC MIG	engl. Alternating Current MIG

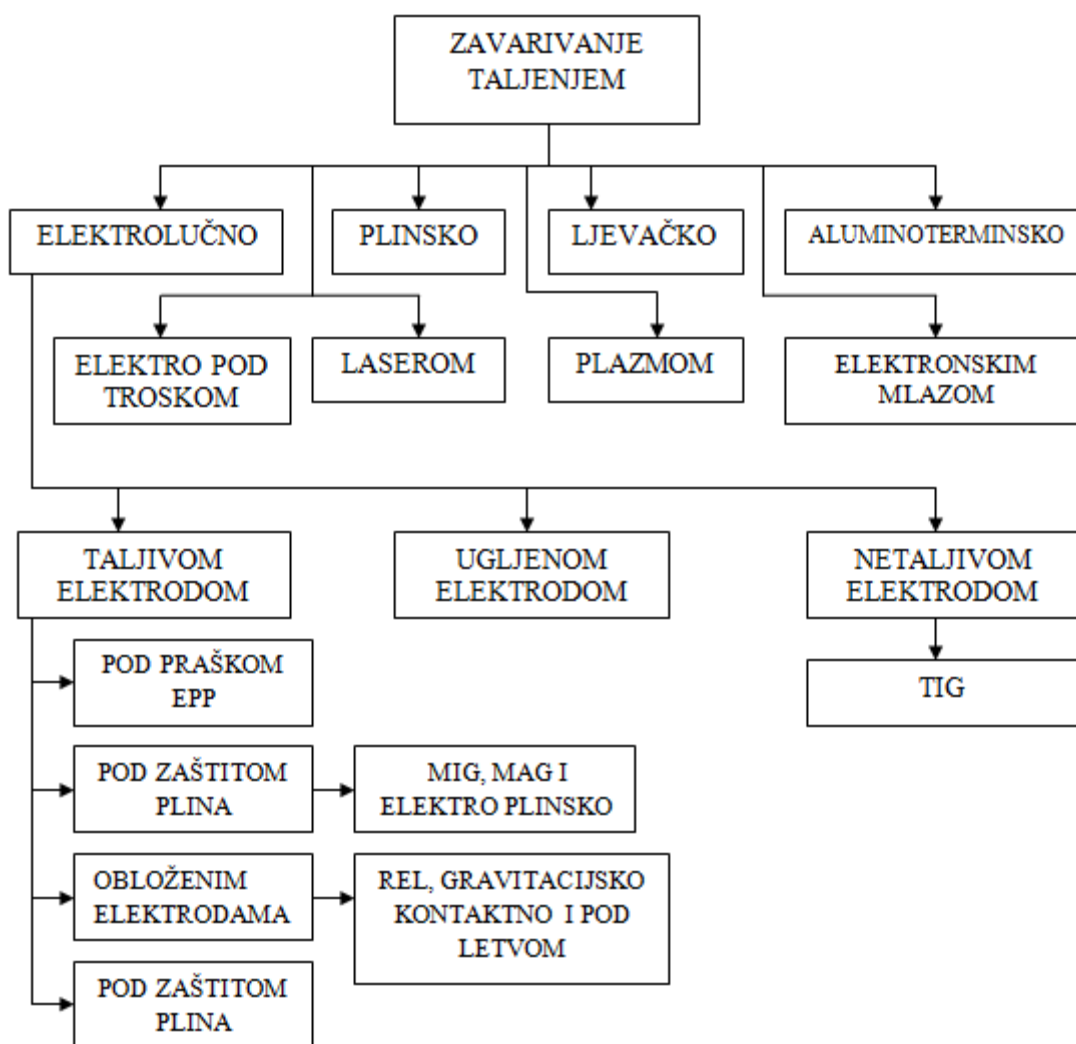
Sadržaj

1.	Uvod.....	6
2.	Povijest zavarivanja	8
2.1.	Sami počeci zavarivanja.....	8
2.2.	Razvoj današnjih postupaka zavarivanja kroz godine.....	8
2.3.	Razvoj zavarivanja u Hrvatskoj	9
2.4.	Povijest MIG/MAG zavarivanja	10
3.	MIG/MAG postupak zavarivanja	11
3.1.	Prednosti i nedostaci.....	13
4.	Komponente zavarivanja	15
5.	Način prijenosa metala.....	17
5.1.	Prijenos metala kratkim spojem	18
5.2.	Prijenos metala štrcajućim lukom	19
5.3.	Prijenos metala mješovitim lukom	21
5.4.	Prijenos metala pulsirajućim lukom.....	23
5.5.	Prijenos metala strujama visoke gustoće.....	25
6.	Zaštitni plinovi.....	27
6.1.	Inertni plinovi.....	29
6.1.1.	Argon (Ar)	29
6.1.2.	Helij (He)	30
6.2.	Aktivni plinovi	30
6.2.1.	Ugljični dioksid (CO ₂)	30
6.2.2.	Kisik (O ₂).....	31
6.2.3.	Vodik (H ₂).....	31
6.3.	Smjese plinova	32
7.	Dodatni materijal	35
8.	Tehnologija zavarivanja, utjecaj parametara	38
8.1.	Jakost struje	41
8.2.	Uticaj napona.....	41
8.3.	Induktivitet	42
8.4.	Duljina slobodnoga kraja žice (dodatnog materijala)	42
8.5.	Brzina zavarivanja.....	44
8.6.	Zaštitni plinovi i dodatni materijal (žica).....	44
8.7.	Tehnika zavarivanja (položaj zavarivanja)	45
9.	Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja	47
9.1.	STT postupak	47
9.1.1.	Parametri kod STT postupka zavarivanja	49
9.2.	FastROOT postupak.....	51
9.2.1.	Parametri kod FastROOT postupka	52
9.3.	CMT postupak.....	53
9.4.	RMT postupak.....	54
9.5.	AC MIG postupak	55

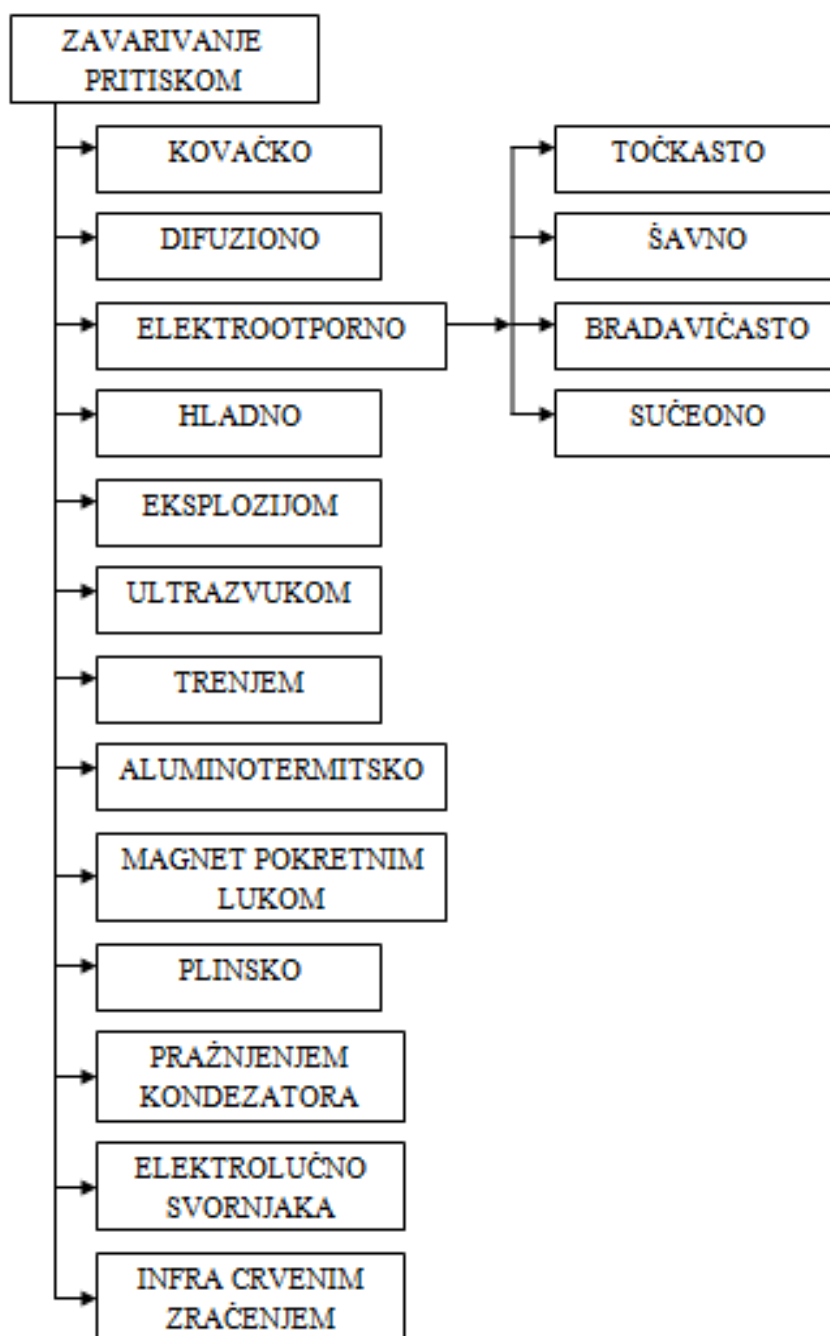
9.6. ForceArc postupak	56
10. Tandem zavarivanje	57
10.1. Proces i način prijenosa metala	58
10.2. Pištolj za tandem zavarivanje	59
11. Oprema.....	61
11.1. Izvori struje	62
11.2. Pištolj za MIG/MAG zavarivanje	62
11.3. Sustav za dobavu žice	65
11.4. Ostala oprema.....	68
12. Roboti u MIG/MAG zavarivanju	70
12.1.1. Povijest robota.....	70
12.1.2. Općenito o robotima.....	71
12.1.3. MIG/MAG zavarivanje robotima.....	72
13. Zaključak.....	75
POPIS SLIKA	76
POPIS TABLICA.....	78
Literatura.....	79

1. Uvod

Definicija samoga zavarivanja glasi: zavarivanje je spajanje dvaju ili više istorodnih ili raznorodnih materijala primjenom topline (taljenjem) ili pritiska s ili bez dodavanja dodatnog materijala na način da spoj ima kontinuitet (bez greške) i što jednoličnija svojstva. Pod samim zavarenim spojem smatra se cjelina koja se ostvaruje zavarivanjem. Sama zavarljivost je sposobnost pojedinog materijala da se pri određenim povoljnim uvjetima zavarivanja ostvari kontinuirani zavareni spoj [1]. Slika 1.1 prikazuje podjelu postupaka zavarivanja taljenjem, dok slika 1.2 prikazuje podjelu postupaka zavarivanja pritiskom.



Slika 1.1 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem



Slika 1.2 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom

2. Povijest zavarivanja

2.1. Sami počeci zavarivanja

Većina postupaka koji se danas koriste u zavarivačkoj praksi otkriveni su u 20. i 21. stoljeću. Postupci kao što su zavarivanje kovanjem, zavarivanje lijevanjem te postupak spajanja lemljenjem bili su poznati već u starom vijeku. Sami početak zavarivanja metala usko je vezan za njegovo samo dobivanje. Korištenje metala nije bilo šire moguće, dok čovjek nije naučio izdvajati metale iz ruda taljenjem. Prvo korištenje elementarnog bakra započelo je prije 10000 godina, dok je 5000 g. pr. Kr. u Afganistanu i Perziji započelo izdvajanje bakra iz rude taljenjem u vatri. Oko 1200 godina poslije nego što je započelo izdvajanje bakra, otkrivena je na srednjem istoku bronca. Bronca je mnogo tvrđa od bakra, pa je bila i korisnija za upotrebu. Zavarivanje se razvijalo kao sastavni dio vještina ljevača, kovača i zlatara pri izradi raznih stvari koji su im bili potrebni (oruđa za rad, posuda, nakita, građevina i sl.) [1].

Željezo se u početku našlo na površini zemlje od meteorita. Meteorit je meteor koji stigne do zemlje, te su ga Sumerani zvali „nebeski metal“. Prvi tragovi izdvajanja željeza iz ruda datiraju oko 2500 g. pr. Kr., dok do neke šire primjene dolazi nešto kasnije. Željezni predmeti počinju se nalaziti oko 1500 g. pr. Kr., a prvi zapisi o kovačkom zavarivanju željeza u staroj Grčkoj govore da je zavarivanje korišteno u 6 st. pr. Kr., dok samo dobivanje čelika počinje oko 1000 g. pr. Kr. u Indiji [1].

Kako se je zavarivanje razvijalo kao sastavni dio vještina tako se je razvijalo i ljevačko zavarivanje usporedno s vještinom lijevanja. Lijevanjem su se spajali razni držači, oslonci i figure na već ranije odliveno osnovno tijelo vaze ili nekog drugog predmeta. U srednjem vijeku razvijena je tehnika kovanja te se uz nju veže i kovačko zavarivanje. Najviše se koristilo kod izrade oružja (mačeva, koplja, vrhovi strijela i sl.). Tako su najbolji mačevi u srednjem vijeku bili izrađeni od niskougličnog čelika, a na njihove rubove se zavaruju kovački zavarivanjem (udarcima čekićima u toplom stanju) oštrice od visokougličnog čelika (1.0-2.1 %C), koje su uz određenu toplinsku obradu davale tvrde, čvrste i oštre bridove. Oružje gdje se primjenjivalo kovačko zavarivanje, bilo je poznato u Grčkoj, Kini, Japanu, Indoneziji i Siriji. Postupak lemljenja nalazi se kroz povijest na nakitima i figurama od početka primjene metala [2].

2.2. Razvoj današnjih postupaka zavarivanja kroz godine

Današnji postupci počeli su je javljati 1856. godina kada je Joule prvi primijenio sučelno elektrootporno zavarivanje žica. 1882. godine Bernardos iz Rusije prvi koristi električni luk

između ugljene elektrode i metala kao izvora energije za zavarivanje uz dodavanje žice u metalnu kupku, dok je 1888. godine Slavjanov također iz Rusije predložio postupak elektrolučnog zavarivanja metalnom elektrodom. Sottrand prvi zavaruje plinskim plamenom (O_2+H_2) 1894. godine, dok se je kasnije razvilo plinsko zavarivanje kisik-acetilenskim plamenom, koje je od 1916. godine uspješno i široko primjenjivo u industriji. 1895. godine počeci su korištenja aluminotermijsko zavarivanja tračnica. 1907. godine u Švedskoj, Kjelberg prvi patentira i primjenjuje obloženu elektrodu. 1925. godine dolazi do otkrića postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi vodika. 1936. godine počinje primjena zavarivanja u zaštitnoj atmosferi (TIG (Tungsten Insert Gas) postupak) [1,2].

Postupci zavarivanja u kojima se zavaruje u zaštitnim plinovima počinju se razvijati i primjenjivati nekoliko godina prije, ali posebice poslije Drugog svjetskog rata. MIG/MAG zavarivanje razvijeno je nakon Drugog svjetskog rata. Hladno zavarivanje pod pritiskom primjenjuje se od 1948. godine. Novi postupci zavarivanja javljaju se iza 1950. godine. Neki od tih postupaka su: zavarivanje pod troskom (1951.), trenjem (1956.), snopom elektrona (1957.), ultrazvukom i laserom (1960.), plazmom (1961.) [2].

Prvo zavarivanje i toplinsko rezanje u svemiru izvedeno je 16.10.1969. godine u sovjetskom svemirskom brodu „Sojuz 6“. Zavarivanje se provodi i pod vodom, gdje se primjenjuju različite tehnike. Daljnjim razvojem zavarivačke industrije razvijale su se i druge grane kao što je robotizacija. Spajanjem te dvije grane (zavarivanje i robotizacija) razvijeno je robotizirano zavarivanje koje je za razliku od ručnog puno produktivnije [1,2].

2.3. Razvoj zavarivanja u Hrvatskoj

Prije Drugog svjetskog rata u Hrvatskoj se primjenjivalo plinsko zavarivanje i ručno elektrolučno zavarivanje elektrodama. Kotlovski bubnjevi, veliki cilindrični rezervoari, nosive čelične konstrukcije, mostovi, vagoni i drugi proizvodi izvedeni su u zakovanoj izvedbi. Značajniji razvoj postignut je uoči Drugog svjetskog rata kada je realizirano nekoliko većih objekata. Među njima je i veliki zavareni cestovni most preko rijeke Save u Zagrebu. To je jedan od prvih većih uspješno zavarenih mostova u svijetu, koji se i danas koristi. U periodu od 1950. do 1960. godine brzo se napuštaju zakovane konstrukcije, a pored REL (ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom) postupka postupno se uvode ostali postupci zavarivanja koji se i danas koriste (poluautomatski i automatski postupci) [2].

2.4. Povijest MIG/MAG zavarivanja

MIG (Metal Insert Gas) postupak zavarivanja razvijen je na „ Battelle Memorial Institute“ 1948. godine u SAD-u kao Sigma postupak (Shielded Intert Gas Metal Arc) [3]. Iako se smatra da su sami počeci bili 1920. godine kada je P.O. Nobel proveo zavarivanje golom žicom u procesu gdje je brzina dodavanja žice bila regulirana naponom električnoga luka. 1926. godine proveden je sličan postupak, ali nije bio primjenjiv u praksi. U ovim postupcima nije bio korišten nikakav plin u svrhu zaštite zavarenog spoja. Proces zavarivanja, koji se razvio 1948. godine, bio je proces zavarivanja uz konstantno dodavanje aluminijske žice u zaštitnoj atmosferi inertnog plina argona (100 %). Bio je to prvi prijenos metala u aksijalnom štrcajućem luku. Proces je bio ograničen zbog primjene skupih inertnih plinova [4].

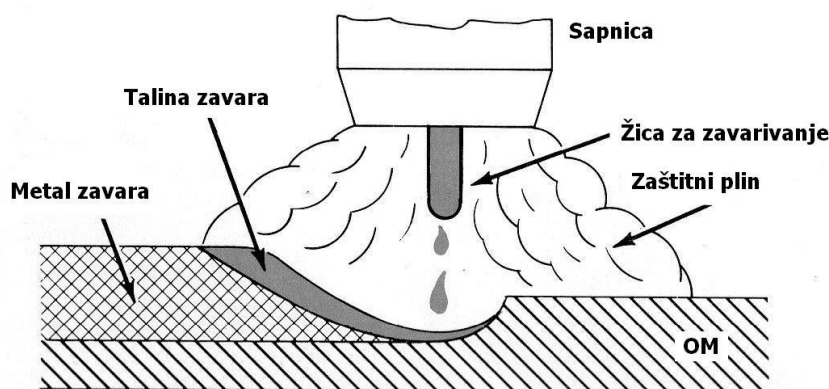
Godine 1953. razvija se zavarivanje čelika istom opremom, kao i kod MIG zavarivanja, koji se temelji na primjeni čeličnih elektroda kao dodatnog materijala te reaktivnog plina (CO_2) kao zaštitnu atmosferu mjesta zavarivanja. Taj proces razvio se u bivšem SSSR-u, a razvili su ga Novoshilov i Lyubavski [3]. Do kraja desetljeća uz razvoj prijenosa metala kratkim spojevima koji omogućuje procesu primjenu i na tanjim osnovnim materijalima u svim položajima zavarivanja te uz prethodno spomenutu primjenu znatno jeftinih zaštitnih plinova. Taj proces postaje najvažniji proces nerastavljivog spajanja čeličnih konstrukcija [4].

60-te godine 20. stoljeća donose daljnji razvoj prijenosa metala u štrcajućem luku, ali isto tako i primjenu prijenosa metala impulsnim strujama. Zbog niza prednosti, a ponajprije ekonomičnosti procesa, te jednostavnoj automatizaciji procesa. MIG/MAG postupak zavarivanja razvija se i danas više od bilo kojeg drugog konvencionalnog postupka zavarivanja [4].

3. MIG/MAG postupak zavarivanja

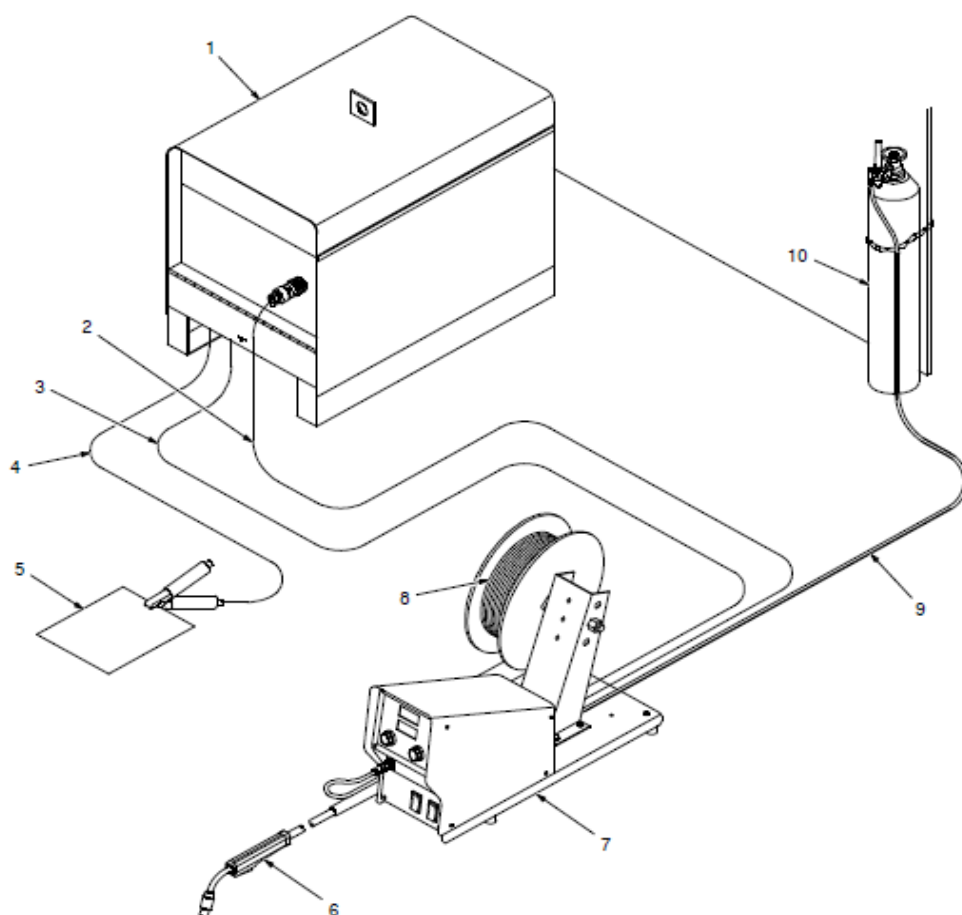
MIG/MAG (Metal Inert Gas/Metal Active Gas) ili GMAW (Gas Metal Arc Welding), je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. To je postupak spajanja metala taljenjem i očvršćivanjem dijela osnovnog metala i dodatnog metala pri čemu se za zaštitu rastopljenog metala koriste inertni, aktivni plinovi ili njihove mješavine [5]. Kod ovoga postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu koja je spojena na plus pol istosmjernog izvora struje. Taj proces odvija se u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju zaštitni plinovi, inertni (Ar ili He) ili aktivni (CO₂ ili mješavine) [6].

Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevi paketa i pištolja do mjesta zavarivanja gdje se uspostavlja električni luk. Sama žica ujedno je i elektroda i dodatni materijal. Samim njenim taljenjem popunjava se pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski (dodavanje žice mehanizirano, a vođenje pištolja ručno) ili automatski [6]. Slika 3.1 prikazuje shematski prikaz postupka zavarivanja MIG/MAG.



Slika 3.1 Shema prikaza postupka zavarivanja MIG/MAG [7]

Ako se samo zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od 5 metara od izvora struje obično se primjenjuje dodatni pogon za dodavanje žice koji je smješten u samom pištolju. Naziv za takav sustav je „push-pull“. Njegova primjena uobičajena je i na manjim udaljenostima ako se radi s mekanijim dodatnim materijalom ili tanjim. Plinovi se dovode na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju [6]. Slika 3.2 prikazuje shemu cijeloga uređaja za ovaj postupak zavarivanja.



Slika 3.2 Shema uređaja za zavarivanje MIG/MAG[8]

Opis:

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 konstantnu brzinu dobave žice
8. Kolut za žicom (dodatnim materijalom)
9. Crijeva za plin
10. Boca s zaštitnim plinom

Parametri kod MIG/MAG zavarivanja [9]:

- brzina zavarivanja v_z (mm/min)
- jakost struje I (A) – razmjerna s brzinom dobave žice v_z (m/min)
- napon električnog luka U (V) – razmjernan s visinom električnog luka

- slobodni kraj žice $l_{SKŽ}$ (mm)
- promjer žice d_z (mm)
- nagib pištolja α (°)
- induktivitet L (H)
- protok plina Q (l/min) i vrsti plina.

3.1. Prednosti i nedostaci

Kao i svaki postupak zavarivanja tako i postupak zavarivanja MIG/MAG ima svoje prednosti, ali i nedostatke [5,9,10,11].

PREDNOSTI:

- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina, ali i vrsta
- jednostavna i laka dostupna oprema za zavarivanje
- zavarivanje u svim položajima
- visoka iskoristivost dodatnog materijala
- visoka učinkovitost postupka zavarivanja u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- odličan izgled zavarenih spojeva
- relativno jednostavna obuka zavarivača
- manji utjecaj operatera (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 prskanje
- nizak unos vodika u metal zavara (uglavnom manje od 5 ml/100 g metala zavara)
- manja deformacija osnovnih materijala u slučajevima primjene suvremenih MIG/MAG postupaka
- jednostavna automatizacija procesa
- niža cijena dodatnih materijala i općenito niža cijena zavara po jedinici dužine u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- mogućnost primjene različitih plinski mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- mogućnost primjene i za lemljenje.

NEDOSTACI:

- manji toplinski input kod prijenosa metala kratkim spojevima - zavarivanje samo tanjih materijala
- veći toplinski input kod prijenosa metala štrcajućim lukom - zavarivanje samo debljih materijala
- nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom
- potreba za primjenom skupljih zaštitnih plinova kod prijenosa metala štrcajućim lukom (mješavine zaštitnih plinova na bazi Ar, osjetno su skuplje od čistog CO₂)
- mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima kod terenskih radova zbog vanjskih utjecaja
- problemi kod dovođenja dodatnog materijala (žice) kod zavarivanja aluminija i aluminijskih legura
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- prskanje kod prijenosa metala kratkim spojevima, gubitak istog i potreba za dodatnim čišćenjem
- opasnost od grešaka u početku zavarivanja
- složenost uređaja i opreme za zavarivanje.

4. Komponente zavarivanja

Komponente u području zavarivanja tj. komponente koje utječu na prijenos metala sastoje se od sila i kemijskih reakcija koje se događaju u području prijenosa metala, zavarivanja. Te komponente djeluju na sam električni luk koji se stvara te on djeluje na sami prijenos metala i samu kvalitetu gotovog zavora [4]. Sama kvaliteta luka određena je karakteristikama:

- vrsti i promjeru dodatnog materijala (elektrode, žice),
- osnovnom materijalu (kvaliteti pripreme),
- zaštitnom plinu,
- parametrima zavarivanja (naponu i jakosti struje),
- djelovanju sila.

Slika 4.1 shematski prikazuje sile kako djeluju na samu kapljicu metala u električnom luku. Iz sheme sa slike 4.1 vidi se da neke sile pomažu u prijenosu metala, dok se neke opiru prijelazu kapljice u kupku taline. Same sile su:

- elektromagnetska sila [F_{em}]
- sila gravitacije [F_g]
- sila površinske napetosti [F_{pn}]
- sila strujanja i pritiska plazme [F_{pl}]
- sila eksplozije u kapljicama metala [F_e]
- sila reaktivnog djelovanja [F_r].

OPIS:

d_z - promjer žice (elektrode)

d_k - promjer kapljice

d_s - promjer spoja

d_p - promjer odvajanja kapljice od žice

F_e - elektromagnetska sila

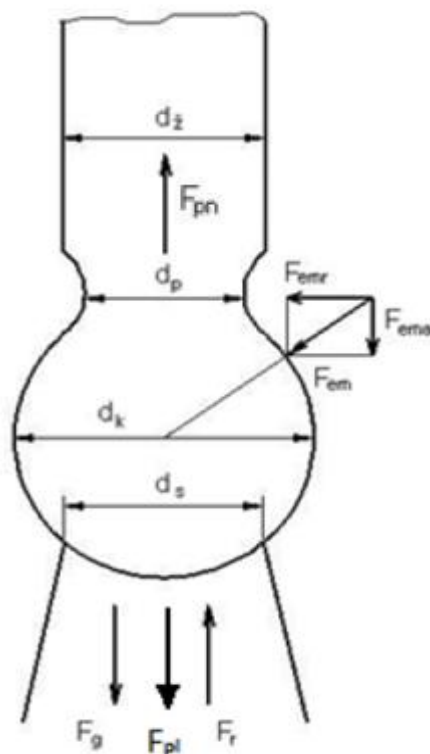
F_{emr} - radijalna komponenta elektromagnetske sile

F_{ema} - aksijalna komponenta elektromagnetske sile

F_g - sila gravitacije

F_{pl} - sila strujanja i pritiska plazme

F_r - sila reaktivnog djelovanja



Slika 4.1 Shema sila [9]

Najveći utjecaj od sila u električnom luku ima elektromagnetska sila. Samim omjerom radijalne i aksijalne komponente elektromagnetske sile stvaraju se uvjeti za tzv. „*pinch efekt*“ [9]. 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.

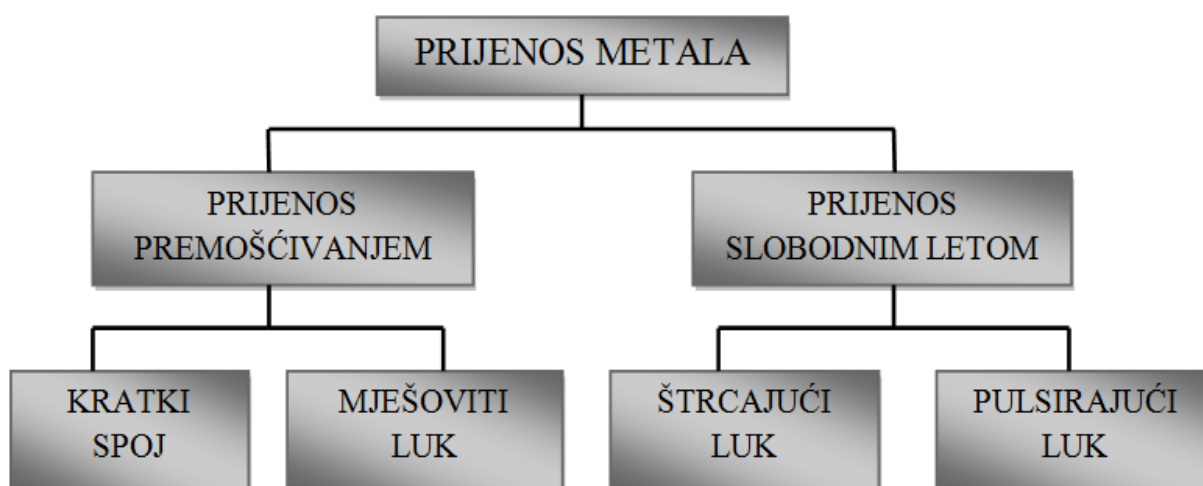
Sile površinske napetosti djeluju na površinu rastaljene kapljice, na unutarnju i vanjsku stjenku kapljice, te održavaju sami oblik kapljice [4]. Sila gravitacije pomaže prijenosu kapljice u talinu. Sila strujanja i pritiska plazme djeluju na gibanje i usmjeravanje same kapljice metala prema talini. Sila reaktivnog djelovanja je sila koja se odupire odvajanju kapljice.

5. Način prijenosa metala

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja prijenos metala s elektrode (žice) u talinu na radnom komadu obavlja se diskretnim komadićima metala ili metalnim kapljicama [11]. Prijenos metala može se realizirati tako da se rastaljene kapljice s vrha žice (elektroda ili dodatnog materijala) prenesu slobodnim letom kroz električni luk na osnovni materijal ili na način da metalne kapljice s vrha žice dođu u fizički kontakt s osnovnim materijalom prilikom čega nastaje kratki spoj [12]. 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:

- jakosti struje
- naponu električnog luka
- vrsti dodatnog materijala
- promjeru žice (elektrode ili dodatnog materijala)
- vrsti zaštitnog plina ili plinske mješavine.

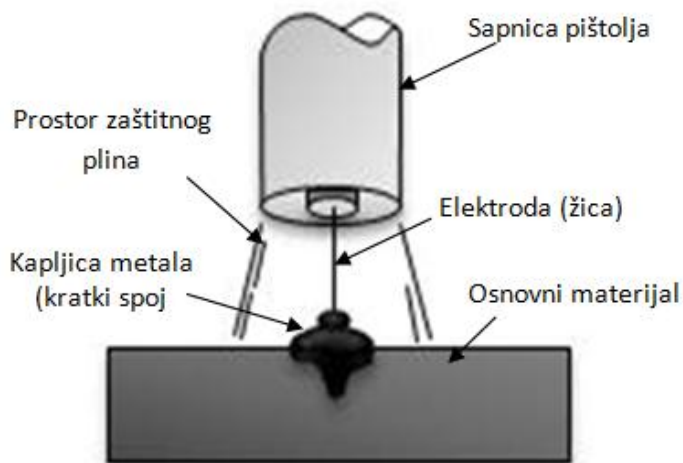
Prema karakteristikama luka razlikujemo četiri karakteristična načina prijenosa. Slika 5.1 prikazuje mehanizme prijenosa metala kod MIG/MAG postupka zavarivanja.



Slika 5.1 Shema mehanizma za prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanje [12]

5.1. Prijenos metala kratkim spojem

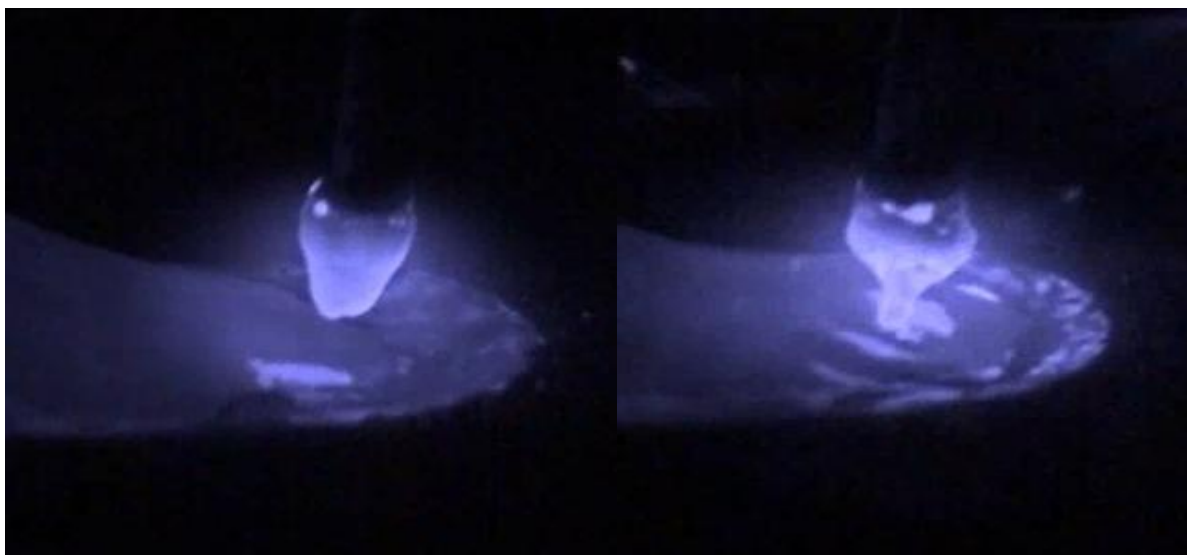
Prijenos metala kratkim spojem postiže se uporabom najmanjih jačina struja i najmanjih debljina žica (elektroda ili dodatnog materijala). Ovaj prijenos metala je postupak kod kojeg se kontinuirano dovodena, puna ili praškom punjena, žica stvara metal zavara uslijed uspostave kontinuiranih kratkih spojeva. Slika 5.2. shematski prikazuje prijenos metala kratkim spojem. Proces se događa između dvadeset i dvjesto puta u sekundi [6,12].



Slika 5.2 Shema prijenosa metala kratkim spojem [12]

Glavne značajke ovoga postupka su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog materijala vrši pri fizikalnom kontaktu elektrode i osnovnog materijala, odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na dvije faze, 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 pojava se još naziva kao „*pinch effect*“ [9,12]. Slika 5.3 prikazuje realni prikaz prijenosa metala kratkim spojem.

Kod ovog 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 količina topline. Napon kod kojeg se koristi ovaj postupak je 13-21 V, dok je jakost struje između 50-170 A. U tablici 5.1 prikazani su prednosti i nedostaci ovog načina prijenosa metala [9,11].



Slika 5.3 Realni prikaz prijenosa metala kratkim spojem [13]

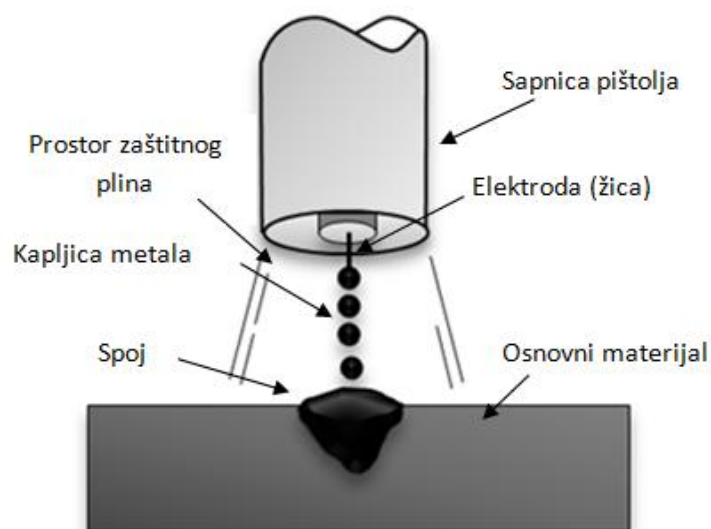
PREDNOSTI	NEDOSTACI
Primjena u svim zavarivačkim položajima	Ograničenje primjene postupka radi debljine materijala
Primjena na cijevnim pozicijama	Ograničenje primjene postupka radi pripreme spoja
Manje deformacije uslijed manjeg unosa topline	Lošija mogućnost kontrole procesa
Jednostavno rukovanje	Povećana mogućnost gubitka zaštitnog plina vanjski utjecaji (rad na otvorenom)
Iskoristivost elektrode 90% i više	

Tablica 5.1 Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala kratkim spojem [4]

5.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

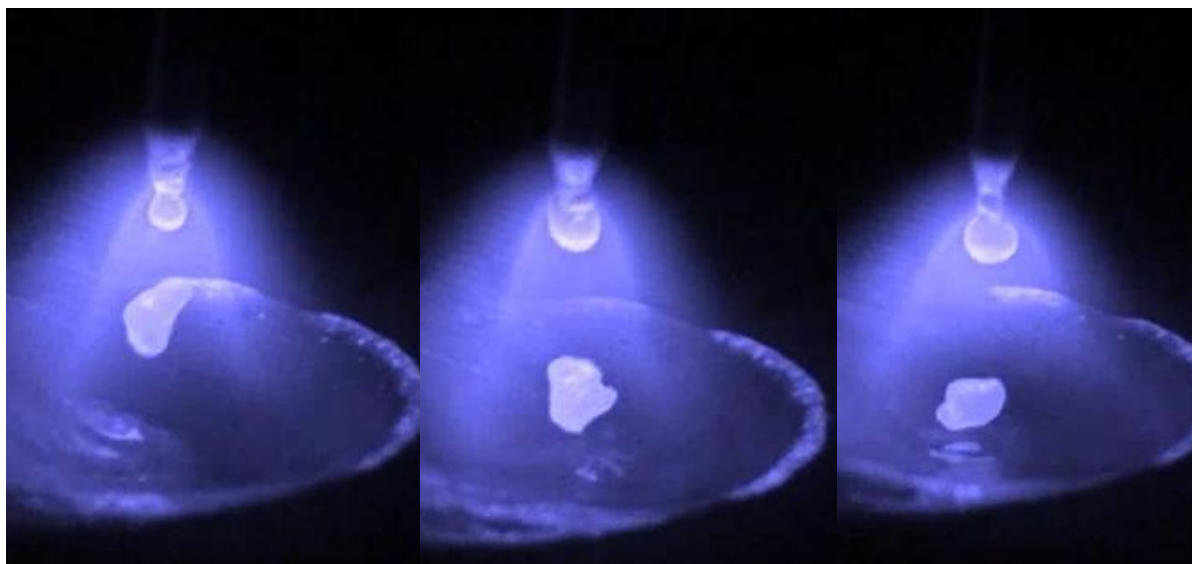
Prijenos metala ovim postupkom ostvaruje se uz jaku struju i velike napone električnog luka. Karakteristika ovoga načina prijenosa je da prijenos metala (rastaljene kapljice) s vrha elektrode ide slobodnim letom kroz atmosferu luka. Stvaraju se male kapi taline koje se gibaju aksijalno s obzirom na elektrodu, a sama elektroda nema ni u kojem trenutku fizički, direktni kontakt s osnovnim materijalom. Sile koje se javljaju u električnom luku otkidaju kapi te ih usmjeravaju prema radnom komadu [12,14]. Slika 5.4 prikazuje shemu prijenosa metala ovim 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 efekta“ te će se smanjiti sile koje nepovoljno djeluju na odvajanje rastopljene kapljice. Sami promjer kapljice je manji od promjera žice (elektrode) kojom se zavaruje [12].



Slika 5.4 Shema prijenosa metala štrcajućim lukom [12]

Jedan od glavnih uvjeta kod ovog postupka je taj da se moraju primjenjivati plinske mješavine kod kojih je maksimalna koncentracija aktivnih plinova 18 %. Često se upotrebljavaju tj. primjenjuju 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 dobivaju blaže i zaobljene penetracije [12]. Slika 5.5 prikazuje realni prikaz metala štrcajućim lukom.



Slika 5.5 Realni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [13]

Postupak prijenosa metala štrcajućim lukom primjenjiv je na gotovo sve vrste materijala. Neki od njih: nehrđajući čelikci, magnezij i legure na bazi magnezija, bakra, legure na bazi nikla, aluminijska i legure na bazi aluminijska. Moguće je primijeniti žice (elektrode) koje su punjenje praškom. Tablica 5.2 prikazuje primjer izbora struje kod prijenosa metala štrcajućim lukom.

OSNOVNI MATERIJAL	Promjer elektrode, žice (dodatnog materijala) [mm]	Vrsta zaštitnog plina	Struja zavarivanja [A]
Ugljični i niskolegirani čelici	0,8	90% Ar; 10% CO ₂	155-165
	0,9	90% Ar; 10% CO ₂	175-185
	1,2	90% Ar; 10% CO ₂	215-225
	1,3	90% Ar; 10% CO ₂	265-275
	1,6	90% Ar; 10% CO ₂	280-290
	0,9	98% Ar; 2 % CO ₂	130-140
	1,2	98% Ar; 2 % CO ₂	205-215
	1,6	98% Ar; 2 % CO ₂	265-275
Nehrđajući čelici	0,8	98% Ar; 2 % O ₂	120-130
	0,9	98% Ar; 2 % O ₂	140-150
	1,2	98% Ar; 2 % O ₂	185-195
	1,6	98% Ar; 2 % O ₂	250-260
	0,8	98% Ar; 2 % CO ₂	130-140
	0,9	98% Ar; 2 % CO ₂	200-210
	1,2	98% Ar; 2 % CO ₂	145-155
	1,6	98% Ar; 2 % CO ₂	255-265

Tablica 5.2 Primjer izbora struje kod prijenosa metala štrcajućim lukom [4]

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 [6]. Tablica 5.3 prikazuje prednosti i nedostatke prijenosa metala štrcajućim lukom.

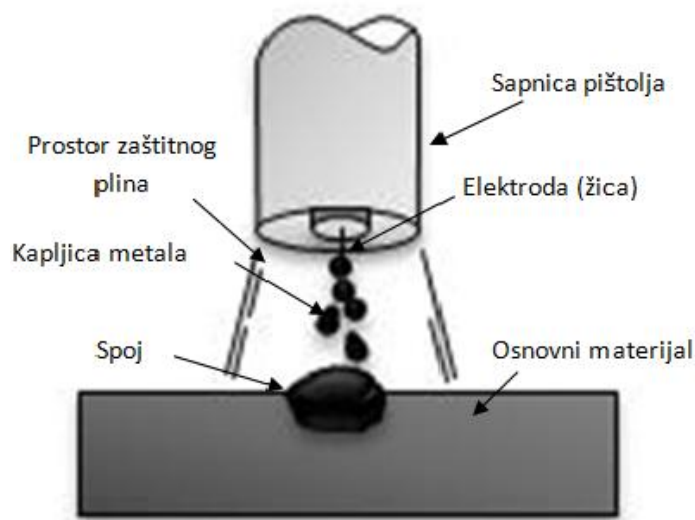
PREDNOSTI	NEDOSTACI
Velika količina rastaljenog materijala	Mogućnost primjene u horizontalnom položaju
Velika iskoristivost dodatnog materijala (<98%)	Povećana koncentracija plinova nastalih u procesu zavarivanja
Moguće primijeniti širok spektra dodatnog materijala	Povećana mogućnost gubitaka zaštitnog plina uslijed vanjskih utjecaja
Jednostavno izvođenje zavarivanja	Povećano zračenje što iziskuje bolju zaštitu zavarivača i okoline
Malo okolno štrcanje i manji troškovi naknadnog čišćenja	Obavezna upotreba skupljih plinskih mješavina

Tablica 5.3 Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala štrcajućim lukom [4]

5.3. Prijenos metala mješovitim lukom

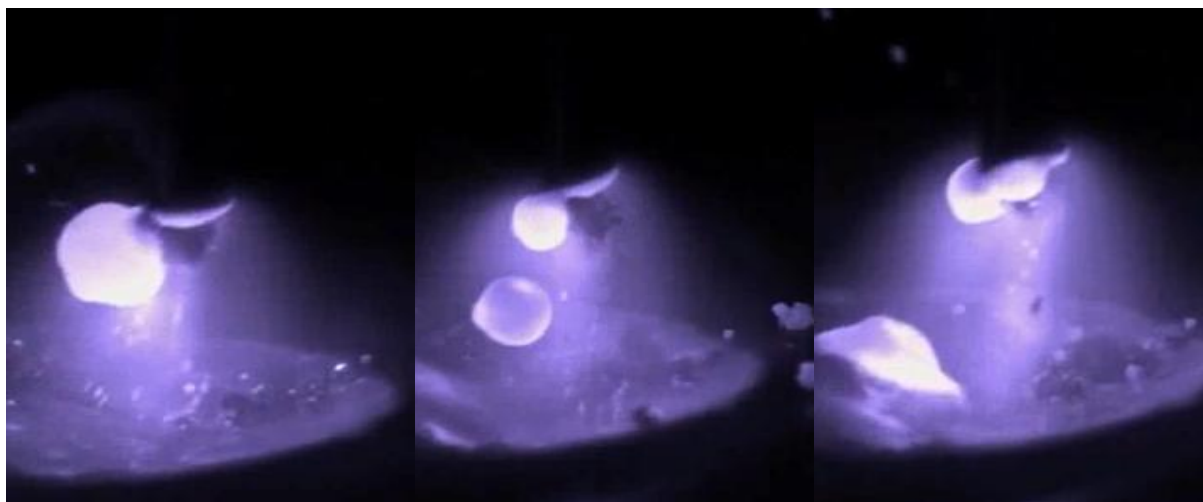
Kod ovoga prijenosa metala, prienos se odvija tako što se stvaraju krupne kapljice metala na vrhu elektrode (žice) koja se pod djelovanjem sila, koje su najčešće gravitacijske, u električnom

luku odvaja i pada u talinu. Javlja se prijenos kratkim spojem i štrcajućim lukom, a sama izmjena i redoslijed mehanizma prijenosa je slučajna pojava [12]. Slika 5.6 prikazuje shematski prijenos metala mješovitim spojem.



Slika 5.6 Shema prijenosa metala mješovitim spojem [12]

Glavni nedostatak ovoga prijenosa je njegova neregularnost samih pojedinih prijenosa (štrcajući luk 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 prskanje je povećano [12,14]. Slika 5.7 prikazuje realni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom.



Slika 5.7 Realni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom [13]

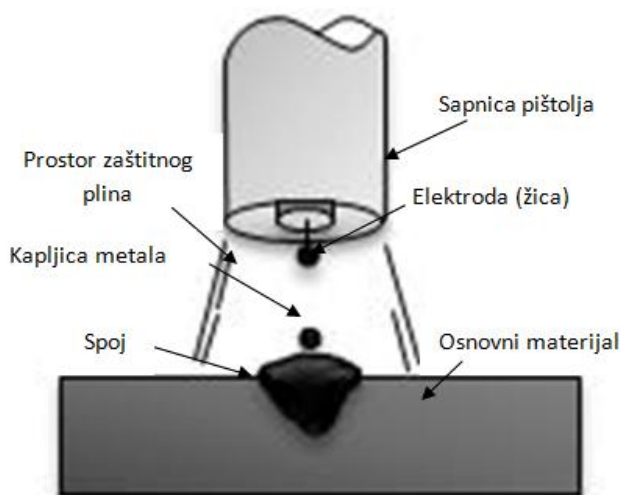
Ovaj postupak prijenosa metala bio je zastupljen 60-tih i 70-tih godina prošloga stoljeća u izradi čeličnih konstrukcija, ali danas je u svim ozbiljnim industrijskim pogonima zamijenjen nekim od naprednih postupaka prijenosa metala. Tablica 5.4 prikazuje prednosti i nedostatke ovoga postupka [4].

PREDNOSTI	NEDOSTACI
Mogućnost korištenja jeftinih zaštitnih plinova, mješavine sa visokim udjelima CO ₂	Povećana vjerojatnost nastajanja nepotpune fuzije u zavarenom spoju
Sposobnost zavarivanja visokim brzinama	Značajno povećanje prskanja
Niska cijena izvora struje za zavarivanje	Niska iskoristivost elektrode (87-93 %)
Niska cijena dodatnog materijala	Razlika u promjeru odvojenih kapljica (neregularnost)

Tablica 5.4 Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala mješovitim lukom [4]

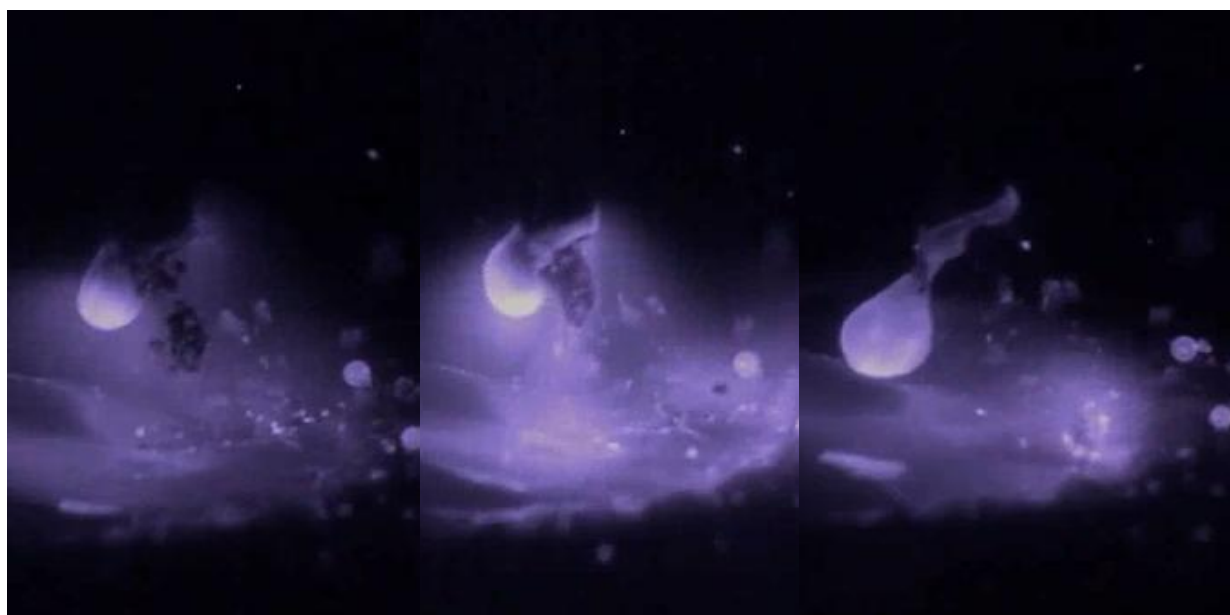
5.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom

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 neke minimalne vrijednosti (bazne ili osnovne struje) i maksimalne vrijednosti struje (vršne). Pri tome osnovna struja zavarivanja je minimalna vrijednost koja je potrebna za održavanje električnog luka, dok vršna, maksimalna struja ili struja impulsa je vrijednost koja omogućuje prijenos metala bez uspostave kratkog spoja. Vršna struja omogućuje da se dodatni materijal (žica) rastali te da se osigura odvajanje po jedne kapi po svakom impulsu [4,12]. Slika 5.8 prikazuje shemu prijenosa metala pulsirajućim lukom. Ovisno o načinu proizvodnje impulsa oni mogu biti sinusoidalnog, trokutastog ili četvrtastog oblika.



Slika 5.8 Shema prijenosa metala pulsirajućim lukom [12]

Sam način omogućuje prosječno manju struju nego što je to kod prijenosa metala štrcajućim lukom što se pozitivno odražava na toplinski unos u proces. Zavarivanje kod tanjih materijala, ali i primjena žice većeg promjera. Taj se proces razvio kako bi eliminirao nedostatke kod prijenosa metala mješovitim lukom. Postupak je moguće primijeniti u svim položajima, ali i jednim promjerom žice (elektrode) moguće je zavariti širi raspon debljina materijala, jer se mogu namjestiti male prosječne struje potrebne kod zavarivanja tanjih dijelova (limova) [4,14]. Slika 5.9 prikazuje realni prijenos metala pulsirajućim lukom. Tablica 5.5 prikazuje prednosti i nedostatke ovoga postupka.



Slika 5.9 Realni prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom [13]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
vrlo malo prskanje	veća cijena uređaja i opreme za zavarivanje
odličan izgled zavora	složeniji postupak zavarivanja (parametri)
mala količina nastalih zavarivačkih plinova	otežana primjena na otvorenim gradilištima
manje deformacije koje su posljedica unosa topline	potreba za korištenjem skupih plinskih mješavina
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	

Tablica 5.5 Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala pulsirajućim lukom [4]

Postupak se prvotno koristio u brodogradnji (zavarivanje niskolegiranih čelika povišene čvrstoće) gdje je pokazao veću učinkovitost od praškom punjenih žica te niži udio otopljenog

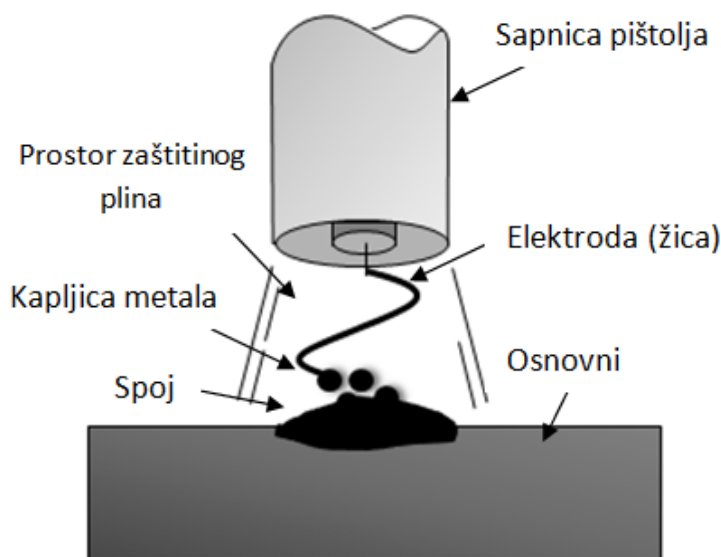
vodika u zavarenom spoju. Danas se koristi uz upotrebu plinskih mješavina sa manjim udjelima aktivnih plinova (maksimalna koncentracija CO₂ je 18%) [4].

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 su posljedica više parametara:

- brzina dodavanja žice
- smjesa zaštitnih plinova
- duljina slobodnog kraja žice
- jakost struje i napon električnog luka.

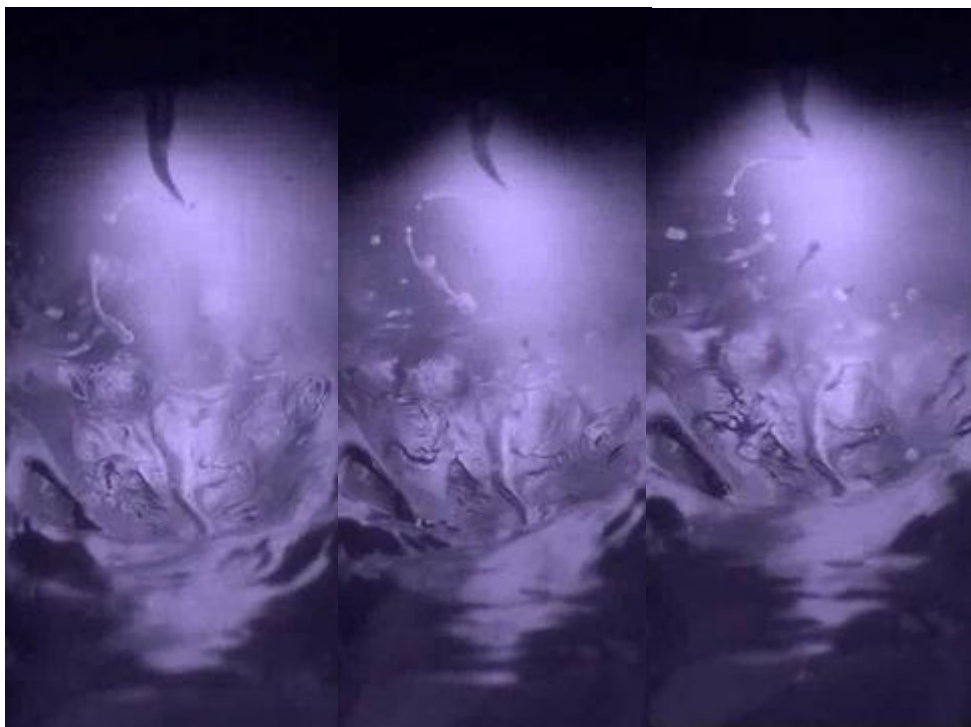
Prijenos metala strujama visoke gustoće dijelimo na prijenos metala rotirajućim lukom i ne-rotirajućim lukom. Količina rastaljenog dodatnog materijala kreće se do 25 kg/h, dok u usporedbi sa štrcajućim lukom količina rastaljenog dodatnog materijala iznosi 4 - 6 kg/h. Kod prijenosa metala rotirajućim lukom (slika 5.10 shematski prikaz) uslijed povećanih parametara i to jakosti struje (preko 450 A) i napona (iznad 35 V) gdje se počinje događati da luk počne rotirati [4].



Slika 5.10 Shema prijenosa metala rotirajućim lukom [12]

Elektromagnetska sila (radijalna komponenta) generiranim strujnim tokovima u samoj žici uzrokuje spiralnu putanju, odnosno rotaciju rastaljenog kraja žice. Kod ovog prijenosa metala koriste se smjese zaštitnih plinova argona i ugljičnog dioksida ili argona i kisika, a sama uloga

smjese plinova je utjecaj na površinsku napetost rastaljenog metala na način da sprječava odvajanje više sitnih kapljica metala. Kod ovog prijenosa metala električni luk je stabilan te daje manju penetraciju, ali i široki i plosnati zavareni spoj [4]. Slika 5.11 prikazuje realnu sliku prijenosa metala rotirajućim lukom.



Slika 5.11 Realni prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom [13]

Kod prijenosa metala nerotirajućim lukom, kao što i ime kaže, 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 između 5 i 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 [4].

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 zaštitnog plina za danu primjenu je bitan [4,6]. Kriterij za izbor plina uključuje, ali nije ograničen na sljedeće parametre [4]:

- legirane žičane elektrode
- mehanička svojstva taložnog metala zavara
- uvjete materijala-prisutnost okujine, korozija itd.
- debljina materijala i izgled zavara
- način samog zavarivanja- prijenos metala
- položaj zavarivanja
- željeni profil penetracije – probijanja
- cijena samog plina.

Plinovi mogu biti inertni ili aktivni. Kada se primjenjuju inertni plinovi nema reakcije rastaljenog metala s plinom i oni se koriste više kod zavarivanja osjetljivih materijala, dok 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 skupljaju što pak opet ovisi o toplinskoj vodljivosti plina. Postoje tri osnovna svojstva kod razumijevanja svojstva zaštitnog plina [4]:

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

Plinovi koji se najčešće koriste prema EN 439 dani su u tablici 6.1 u kojoj su još prikazana primjena, ponašanje te karakteristika luka. Kod primjene aktivnih plinova zahtijeva se posebna pažnja zbog pojave oksidacije. Sama ova pojava koja se javlja inače je karakteristična kod konvencijalnih postupaka zavarivanja, a posebno je izražena kad je CO₂ kao zaštitni plin [5]. Tablica 6.2 prikazuje utjecaj nekih plinova na tehnološke karakteristike postupka.

PLIN	PONAŠANJE	PRIMJENA	KARAKTERISTIKA LUKA
Ar (99.998%)	inertno	svi metali, osim čelika	najveća stabilnost
Hr (99.99%)	inertno	Al, Mg, Cu	povećana toplinska moć
Ar+He (33.33%)	inertno	Al, Mg, Cu	između čistog Ar i He
N ₂ (99.9%)	aktivno	Cu	povećana toplinska moć
Ar+ N ₂ (83.33%)	inertno	Al, Mg, Cu	povećana toplinska moć
Ar+ CO ₂ (2.5%)	praktični inertno	visokolegirani Cr-Ni čelici	prijenos u štrcajućem luku
Ar+O ₂ (33.33%)	praktični inertno	visokolegirani Cr-Ni čelici	prijenos u štrcajućem luku
Ar+O ₂ (50%)	oksidirajuće	ugljični i niskolegirani 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
Ar+CO ₂ (46%)+O ₂ (40%)	oksidirajuće	ugljični i niskolegirani čelici	malo rasprskavanje
CO ₂ +O ₂ (20%)	oksidirajuće	ugljični čelici	moguće rasprskavanje

Tablica 6.1 Zaštitni plinovi i smjese- primjena, ponašanje i karakteristika luka [5]

Karakteristika	CO ₂	Ar/O ₂	Ar/CO ₂
dubina uvarivanja položaj	dobra	dobra, može da postane kritična	dobra, sigurnija zaštiti povećanjem postotka CO ₂
brzina oksidacije	velika	velika (specijalno pri 8 % O ₂)	raste povećanjem postotka CO ₂
termičko opterećenje pištolja	mala (zbog dobre termičke provodnosti)	velika	smanjuje se sa povećanjem postotka CO ₂
rasprskavanje	najveće	bez	raste sa većim postom CO ₂
Poroznost	mala	velika	otpada sa većim postom CO ₂
uvedena toplina	velika, mala brzina hlađenja	najveća, velika brzina hlađenja	raste s povećanjem CO ₂ , manjom brzinom hlađenja
mehaničke i teh. karakteristike	srednje	dobre, srednje pri O ₂ > 12	dobre, srednje pri CO ₂ >30
mogućnosti popune zazora u korijenu	manja nego kod mješavina	dobra	raste sa smanjenjem postotka CO ₂
prijenos materijala kroz luk	kratak luk, dugi luk	kratki, srednji, rotirajući luk, impulsno	kratki, srednji, impulsni (CO ₂ <20%), rotirajući luk

Tablica 6.2 Tehnološke karakteristike plinova [5]

Količina zaštitnog plina ovisi o promjeru žice, jakosti struje zavarivanja, obliku spoja te mjestu i uvjetima zavarivanja. Potrošnja plina znatno se povećava na otvorenom prostoru. Prosječne količine potrebnog plina prikazane su u tablici 6.3. Kao orijentacija, za praksu mogu poslužiti slijedeći podaci o potrošnji plina [7]:

- za male jačine struja zavarivanja (kratki luk), potrošnja do 12 l/min
- za srednje jačine struja zavarivanja, potrošnja do 15 l/min
- za velike jačine struja(štrcajući luk), potrošnja do 20 l/min.

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

Tablica 6.3 Potrošnja plina u ovisnosti na promjer žice[7]

6.1. Inertni plinovi

6.1.1. Argon (Ar)

Argon (Ar) je plin bez boje, mirisa i okusa te nije otrovan. U zaštiti inertnim plinom argon se najčešće koristi. Plin nema kemijske reakcije s osnovnim materijalom kod zavarivanja. Plin ima nisku toplinsku vodljivost, dok je njegova potrebna toplinska energija, tj. energija ionizacije niska pa se lako ionizira. Ima veću gustoću od zraka, omogućuje prijenos metala manjim kapljicama, osigurava ravan zavar te smanjuje štrcanje. Argon se može koristiti u upotrebi sa svim metalima.

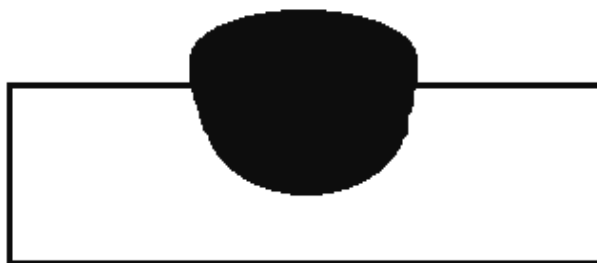
Plin je standardiziran gdje je propisana kvaliteta, upotreba plina, metoda ispitivanja te ga se može proizvesti u četiri kvalitete, a to su: A (najmanje 99.999% Ar), B (99.99% Ar), C (99.96 % Ar) i D (85% Ar). Kod zavarivanja koristi se argon kvalitete C, a za specijalne slučajeve kvaliteta B. Argon se može koristiti sam, ali se koristi i u smjesi plinova bili inertni ili aktivni. Na slici 6.1 prikazana je geometrija zavara kod korištenja zaštitnog plina argona [4,5,15].



Slika 6.1 Utjecaj zaštitnog plina argona na geometriju zavora

6.1.2. Helij (He)

Helij je inertni plin kao i argon. Količina helija u zraku je svega 0.0005 % što kazuje da se komercijalna proizvodnja helija temelji na izvorima prirodnog plina s visokim sadržajem plina, višim od 0.4 %. Sama takva proizvodnja i nedostatak govori o skupoći primjene plina. Koristi se uglavnom kao dodatni plin u smjesi gdje su pak potrebne posebne prednosti kod zavarivanja. Upotreba helija može se vršiti sa svima metalima. Za razliku od argona helij se teško ionizira. Njegova toplinska vodljivost je puno veća što rezultira širokim i dubljim profilima penetracije. Helije/argona mješavine najčešće se koriste za zavarivanje aluminija većih od 25 mm debljine. Na slici 6.2 prikazano je utjecaj zaštitnog plina helija na penetraciju tj. na geometriju zavora [4, 15].



Slika 6.2 Utjecaj zaštitnog plina helija na geometriju zavora

6.2. Aktivni plinovi

6.2.1. Ugljični dioksid (CO_2)

Ugljični dioksid je jedan od aktivnih plinova. 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 na određenu kvalitetu tek se onda koristi u zavarivanju. To je plin koji je lako dostupan pa samim time je relativno i jeftin što pak govori o širokoj primjeni u zavarivanju.

Ugljični dioksid je inertni plin pri nižim temperaturama, ali na temperaturi iznad 1600 °C disocira se u ugljični monoksid (CO) i slobodni kisik (O₂) koji tada reagira s rastaljenim metalom. Može se dogoditi da dođe do ponovnog povezivanja u molekulu CO₂ gdje se oslobađa toplina, a posljedica je veće provarivanje. Ovo štetno stvaranje oksida moguće je riješiti tako da se legira dodatni materijal, žica sa dezoksidandima (silicij, mangan). Na slici 6.3 prikazana je geometrija zavora kod korištenja zaštitnog plina ugljičnog dioksida [4,5,15].



Slika 6.3 Utjecaj zaštitnog plina ugljičnog dioksida na geometriju zavora

6.2.2. Kisik (O₂)

Kisik je još jedan od aktivnih plinova. Kisik se dobiva tako što se rastavlja iz zraka, ali za razliku od helija kojeg je jako malo, 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 reagira sa rastopljenim metalom gdje formira okside. U malim dodacima oko 1-5 % s argonom daje dobru stabilnost električnog luka. Sama ionizacija je teška. Oksidi na metalima više se javljaju na višim temperaturama što pak nije poželjno u zavarivanju, ali neki su 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 punjenje silicijem i manganom. Sam plin dobar je jer poboljšava penetraciju, smanjuje površinsku napetost i štrcanje te omogućuje širi prijenos kapljica metala [4, 15].

6.2.3. Vodik (H₂)

Vodik se koristi u manjim komponentama u smjesi plinova uglavnom za nehrđajuće čelike, nikal te same legure nikla. Proizvodnja vodika je najčešće elektrolizom vode, a nakon toga se komprimira u plinske boce. Vodik je zapaljiv plin; stoga smjese, koje se koriste, a sadrže vodik 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 malo CO₂, koji daje stabilizaciju električnog luka. Vodik kemijski djeluje na smanjenje oksida i daje vrlo čistu površinu [4, 15].

6.3. Smjese plinova

Postoje dvokomponentne i trikomponentne smjese zaštitnih plinova. Plinovi koji se koriste u smjesama pojedinačno imaju svoja svojstva, ali u kombinaciji s drugima daju smjesu određene prednosti, koje su potrebne u nekom danom trenutku zavarivanja, tj. određenom režimu zavarivanja. Dvokomponentne smjese plinova su: argon/helij, argon/ugljični dioksid i argon/kisik. Trikomponentne smjese su: argon/helij/kisik i argon/ugljični dioksid/kisik.

Argona/Helij

Dvokomponentna smjesa plinova, koja se koristi češće, koristi se kod zavarivanja nikla i njegovih legura te aluminijskih, ali i nekih drugih materijala. Način prijenosa može biti štrcajućim lukom i pulsirajućim (impulsnim) prijenosom metala [4]. U tablici 6.4 prikazano je dvije smjese argona/helija s različitim udjelom u smjesi i karakteristika te iste smjese.

UDJELI PLINOVA (%)	KARAKTERISTIKA SMJESE
Argon(75 %)+helij(25%)	-poboljšanje prodiranja spoja kod aluminijskih i nikla, ali i bakra -više fluidnosti u kupci taline nego kod 100% argona
Argon(25 %)+helij(75%)	-više toplinske vodljivosti i fluidnosti u kupcitalini -profil penetracije širok

Tablica 6.4 Udjeli u smjesi i karakteristika smjese argon/helij [4]

Argon/kisik

U tablici 6.4 je prikazana je smjesa od argona/kisika s različitim udjelima u smjesi te karakteristike same smjese.

UDJELI PLINOVA (%)	KARAKTERISTIKA SMJESE
Argona(99%)+ kisik(1%)	-inox materijali -stabilan luk, prijenos finije kapljice rastaljenog dodatnog materijala, bolja fluidnost taline -pojava sivog sloja na zavaru radi oksidacije
Argona(98%)+ kisik(2%)	-upotreba kod brzog zavarivanja nehrđajućih čelika -upotreba gdje je potrebna niski udio elektroda, ugljičnih čelika -štrcajući luk ili pulsirajući način prijenosa metala
Argona(95%)+ kisik(5%)	-štrcajući luk kod težih dijelova zavarivanja -osnovni materijal treba biti s niskom razinom kamenca

Tablica 6.5 Udjeli u smjesi i karakteristika smjese argon/kisik [4]

Argon/ugljični dioksid

Kod ove smjese može se koristiti sva četiri načina prijenosa metala. Najčešće korištena dvokomponentna smjesa zaštitnih plinova u zavarivanju. U tablici 6.4 dane su smjese s

različitim udjelom pojedinog plina i karakteristika same smjese. Na slici 6.4 prikazan je utjecaj pojedinog plina u smjesi na profil penetracije i prodiranje.



Slika 6.4 Profil penetracije i prodiranje kod smjese plinova argon/ugljični dioksid [15]

UDJELI PLINOVA (%)	KARAKTERISTIKA SMJESE
Argon(75%)+ugljični dioksid(25%)	-kratki spoj -smanjuje štrcanje, poboljšana zavarivljivost kuglica rastopljenog metala
Argon(80%)+ugljični dioksid(20%)	-smanjuje štrcanje, poboljšana zavarivljivost kuglica rastopljenog metala
Argon(98%)+ugljični dioksid(2%)	-štrcajući luk ili pulsirajući način prijenosa metala -viša fluidnost taline, veće brzine zavarivanja
Argon(95%)+ugljični dioksid(5%)	-pulsirajući način prijenosa metala -viša fluidnost taline
Argon(90%)+ugljični dioksid(10%)	-penetracija šira -smanjuje dubinu prodiranja
Argon(82%)+ugljični dioksid(18%)	-široki raspon zavarivanja debljina -širok luk-poboljšanje profila penetracije duž vara -dobar u primjeni kod kratkog spoja, il STT postupka

Tablica 6.6 Udjeli u smjesi i karakteristika smjese argon/ugljični dioksid [4]

U tablici 6.7 prikazane su trikomponentne smjese plinova s udjelima pojedinih plinova u postocima (%), te karakteristika smjese

UDJELI PLINOVA (%)	KARAKTERISTIKA SMJESE
Helij(90%)+argon(7.5%)+ugljični dioksid(2.5%)	-kratki spoj kod prijenosa metala za inox -visoka toplinska vodljivost -veće brzine zavarivanja kod inox-a
Helij(55%)+argon(42.5%)+ugljični dioksid(2.5%)	-hladniji luk kod pulsirajućeg načina prijenosa metala -inox i legure nikla-kratki spoj
Helij(38%)+argon(65%)+ugljični dioksid(7%)	-kod crijevnog zavarivanja - zavar korijena -toplinska vodljivost proširuje profil penetracije -kratki spoj
Argon(90%)+ugljični dioksid(8%)+kisik(2%)	-smanjuje prsnuća -pulsirajući ili kratki spoj način prijenosa metala

Tablica 6.7 Udjeli u smjesi i karakteristika smjese u trikomponentnom spoju [4]

U tablici 6.8 prikazani su materijali te postotak (%) pojedinog plina u zaštitnoj smjesi koji se koristi u postupku zavarivanja kod određenog materijala.

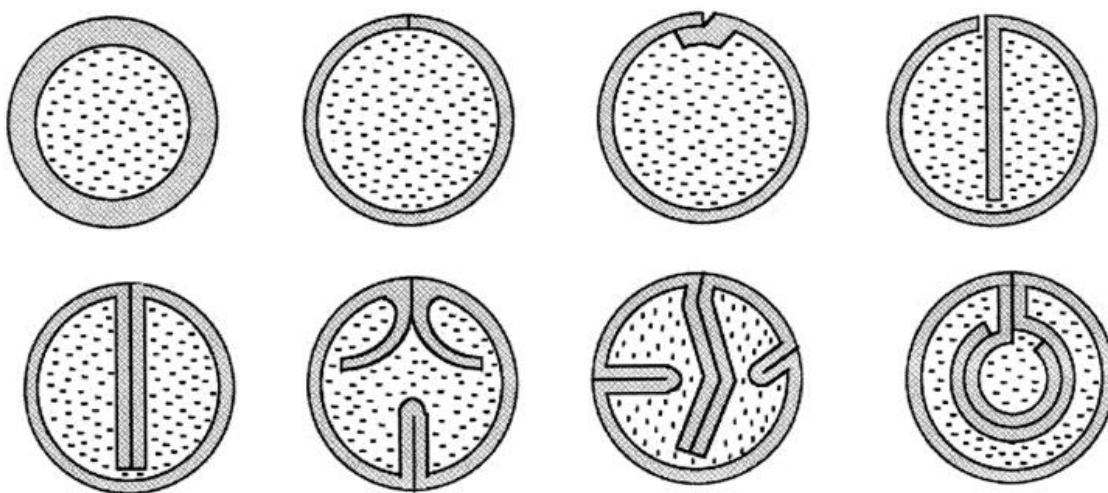
OSNOVNI MATERIJAL	ZAŠTITINI PLIN ILI SMJESA ZAŠTITNOG PLINA
Čelik	CO ₂ (100%) Ar(75-90%)+CO ₂ (10-25%) Ar(82-98%)+CO ₂ (2-18%) Ar(95-98%)+O ₂ (2-5%) Ar(90%)+CO ₂ (7.5%)+O ₂ (2.5%)
Legure čelika	CO ₂ (100%) Ar(75-80%)+CO ₂ (20-25%) Ar(95%)+CO ₂ (5%) Ar(95-98%)+O ₂ (2-5%)
Alumini	Ar (100%) He(75%)+Ar(25) He(25%)+Ar(75) He(100%)
Nehrđajući čelik	Ar(98-99%)+O ₂ (2-1%) 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%)
Nikal, legure nikla	Ar(100%) Ar(75%)+He(25%) Ar(25%)+He(75%) Ar(97-99%)+H ₂ (1-3%) He(90%)+Ar(7.5%)+CO ₂ (2.5%) He(10.5%)+Ar(89%)+CO ₂ (0.5%) He(33%)+Ar(66.1%)+CO ₂ (0.9%)
Legure bakra	Ar(100%) Ar(75%)+He(25%) Ar(25%)+He(75%)
Mjedi, bronca	Ar(100%)

Tablica 6.8 Udio zaštitnih plinova kod zavarivanja određenog materijala [4]

7. Dodatni materijal

Dodatni materijal (žica) svojim sastavom utječe na zavarivačke i metalurške procese i time osigurava odgovarajuću kvalitetu zavarenog spoja ili navara. Dodatni materijali standardizirani su međunarodnim ili nacionalnim normama, koje odgovarajućim oznakama označavaju njihova svojstva. U procesu zavarivanja dodatni materijal se rastaljuje te zajedno sa osnovnim materijalom, tj. talinom osnovnog materijala, čine zavaren spoj. Kod MIG/MAG zavarivanja koriste se žice promjera: 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6 i 2.4 mm, koje se namotane na kolute standardiziranih oblika i dimenzija mogu težiti od 1 do 100 kg [5, 16].

Žice, koje su od čeličnih materijala, su prevučene bakrom radi boljeg električnog kontakta, ali i zaštite samih žica od korozije. Sam taj sloj bakra mjeri se mikronski. Osim punih žica postoje i praškom punjene žice. Takve žice dobivaju se od metalne trake, debljine oko 0.5 mm, koja se savija po duljini i puni bazičnim, metalnim ili rutilnim praškom određenog kemijskog sastava. Stupanj punjena može biti: nizak (manji od 15%), srednji (15-25%) i visoki (veći od 25%) [7]. Žice, koje su punjene, imaju raznovrsne poprečne presjeke što je prikazano na slici 7.1.



Slika 7.1 Oblici praškom punjene žice [7]

Kod žica, koje su punjenje praškom, zavarivanje se može provoditi sa zaštitnim plinom ili bez zaštitnog plina što zavisi o samom prašku koji se puni u žice. U slučaju kada ne postoji zaštitni plin žice stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre [6]. Prednosti zavarivanja praškom punjenje žice u odnosu na ostale postupke su [7]:

- visoka kvaliteta zavara
- odlična penetracija i ljepši izgled zavara

- izvanredan oblik kutnih zavara u zidnom položaju
- veća produktivnost
- nizak sadržaj vodika
- manja opasnost od naljepljivanja i poroznosti
- manje štrcanje
- velika brzina zavarivanja.

Nedostaci praškom punjenje žice u odnosu na ostale postupke:

- veća cijena žice u odnosu na punu
- veća količina plinova
- potreba za skidanje troske.

U tablici 7.1 prikazano je nekoliko žica koje se proizvode u tvrtki Elektroda Zagreb d.d za MIG/MAG zavarivanje. U tablici 7.1 objašnjen je naziv žice, svrha, svojstva, područje primjene, te kemijski sastav pojedine žice.

Naziv žice	Osnovni materijal	Svojstvo žice	Kemijski sastav (%) žice			
			C	Mn	Si	Ostali
EZ-SG2	Nelegirani i niskolegirani čelik do 590 N/mm ²	Pobakrena, zavarivanje, zaštitni plinovi CO ₂ ili mješavine CO ₂ /Ar	0.06-0.13	1.4-1.6	0.7-1.0	Cu (≤0.3)
EZ-SG3	Nelegirani i niskolegirani čelik do 640 N/mm ²	Pobakrena ili pobrončana, zaštitni plinovi CO ₂ ili mješavine CO ₂ /Ar	0.08-0.12	1.6-1.8	0.9-1.1	Cu (≤0.3)
EZ-SG Mo	Nelegirani i niskolegirani čelika do 590 N/mm ² , cijevi visokotlačnih posuda čija tem. ne prelazi 500 °C	Pobakrena ili pobrončana žica legirana molibdenom zaštitne mješavine plinova CO ₂ /Ar	0.06-0.1	1.0-1.15	0.4-0.6	Mo (0.45-0.5)
EZ-SG Ti	Ugljičnih i ugljično-manganskih čelika do 510 N/mm ² , te jednoprolazno zavarivanje pocinčanih, zaštićenih primjerom te oksidiranih limova	Pobakrena ili pobrončana žica legirana titanom, zaštitni plinovi CO ₂ ili mješavine CO ₂ /Ar	0.04-0.06	1.1-1.5	0.5-0.8	Ti (0.1-0.12)
EZ-SG 120	Sitnozrnati čelici čvrstoće do 890 N/mm ²	Pobakrena ili pobrončana, zaštitni plinovi CO ₂ ili mješavine CO ₂ /Ar	0.1	1.8	0.8	Cr (0.35); Ni (2.0); Mo (0.5)

Tablica 7.1 Dodatni materijal (žica)

Nastavak tablice 7.1 Dodatni materijal (žica).

Naziv žice	Osnovni materijal	Svojstvo žice	Kemijski sastav (%) žice			
			C	Mn	Si	Ostali
EZ-MIG 307 Si	Za austenitne nehrđajuće čelike, čelika slabe zavarljivosti, manganski čelika	Austenitna puna žica, zaštitni plinovi Ar+CO ₂ (2.5%) ili Ar+O ₂ (1-3%)	≤0.07	6.9	0.7	Cr (18.5); Ni(8.0)
EZ-MIG 309 LSi	Zavarivanje raznorodnih spojeva, navarivanje nehrđajućeg čelika na obični čelik	Austenitna puna žica, zaštitni plinovi Ar+CO ₂ (2.5%) ili Ar+O ₂ (1-3%)	≤0.02	2.0	0.8	Cr (23.5); Ni (14.0)
EZ-MIG 310	Zavarivanje visoko-temperaturnih nehrđajućih čelika koji su tijekom eksploatacije izloženi temperaturama do 1200 °C	Austenitna puna žica, zaštitni plinovi Ar+CO ₂ (2.5%) ili Ar+O ₂ (1-3%)	≤0.1	1.7	0.4	Cr (25.6); Ni (21.0)
EZ - MIG 318 Si	Zavarivanje korozijski postojanih CrNi(Mo) čelika	Austenitna puna žica, zaštitni plinovi Ar+CO ₂ (2.5%) ili Ar+O ₂ (1-3%)	≤0.04	1.5	0.85	Cr (19.0); Ni (12.0); Mo (2.5) Nb (0.65)
EZ – MIG Al99.7	Zavarivanje aluminija	Aluminijska žica, zaštitni plin Ar	/	/	/	Al (>99.7)
EZ-MIG AlSi5	Zavarivanje Al-Si i Al-Mg-Si legura	Aluminijska žica, zaštitni plin Ar	/	0.01	5.0	Al (balans); Fe (0.15); Zn (0.01);
EZ – MIG AlMg 4.5Mn	Zavarivanje Al-Mg-Mn i AlMg legura	Aluminijska žica, zaštitni plin Ar	/	0.7	0.1	Al (balans); Mg (4.8); Fe (0.2)
EZ – MAG 600 TN	Namjena za navarivanje	Puna žica, zaštitni plin CO ₂ ili Ar+ CO ₂ (18%)	0.45	0.4	3.0	Cr (9.5)

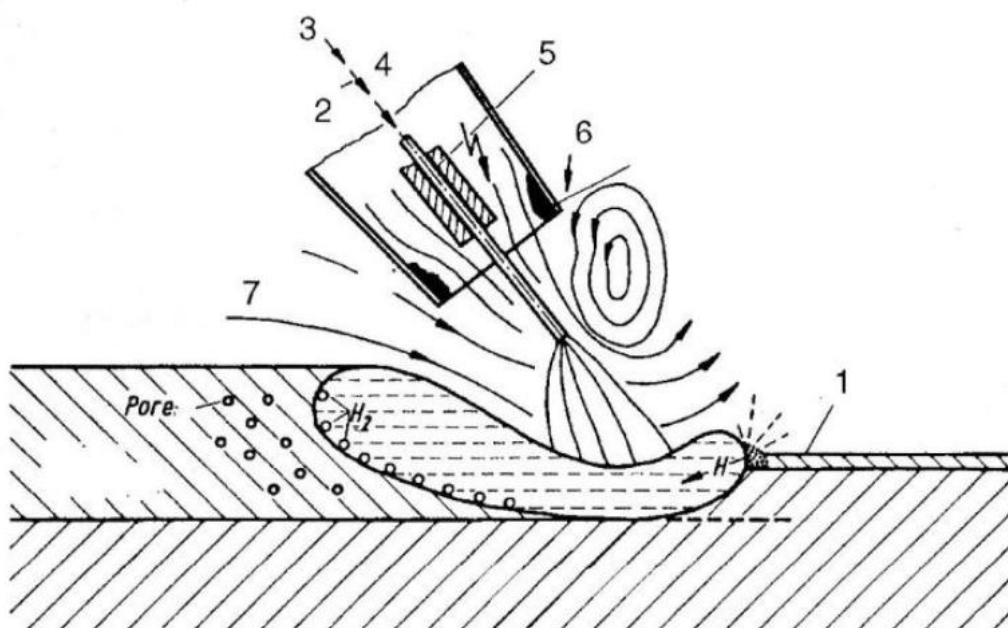
Tablica 7.2 Nastavak tablice „7.1 Dodatni materijal (žica)“ [17]

8. Tehnologija zavarivanja, utjecaj parametara

Osnovni parametri kod MIG/MAG postupka zavarivanja, kao što je rečeno u poglavlju, su: jakost struje, napon električnog luka, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice, nagib (tehnika zavarivanja), promjer žice, induktivitet, zaštitni plin (protok) u ovom poglavlju bit će razrađeni kako utječu na samo zavarivanje te koje se greške zbog ovih parametara javljaju u postupku zavarivanja. Greške, ograničenja koje se javljaju radi ovih parametara kod MIG/MAG postupka zavarivanja mogu biti [18]:

- poroznost
- naljepljivanje
- štrcanje, prskanje
- pukotine
- penetracija.

Na slici 8.1 shematski je prikaz uzroka poroznosti u zavarenom spoju koji je jedan od dviju najčešćih grešaka koje se javljaju u zavarenom spoju. Sami uzroci opisani su ispod slike [7].



Slika 8.1 Shematski prikaz uzroka poroznosti u zavarenom spoju [7]

Opis:

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

Uzroci kod naljepljivanja, koja je druga od najčešćih grešaka, kod MIG/MAG postupka zavarivanja mogu biti [7]:

- premala brzina zavarivanja uz preveliku količinu taline koja bježi ispred luka
- prevelika brzina zavarivanja
- preširoko poprečno gibanje pištolja uzrokuje bježanje taline ispred luka na hladne stranice žlijeba
- slaba spajanja na mjestima nastanka zbog nepravilne tehnike
- oksidirana i neravna površina žlijeba
- premala jakost struje zavarivanja.

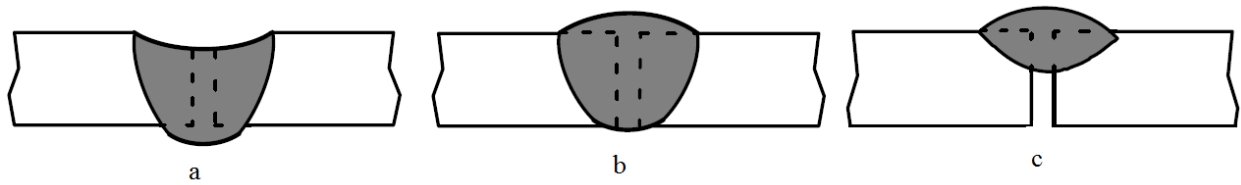
Prskanje ili štrcanje odnosno raspršivanje rastopljene metalne kapljice nakon odvajanja na hladni radni komad u blizini linije zavora [8]. Na slici 8.2 prikazano je kako izgleda prskanje. Uzroci ovoga problema mogu biti:

- velika brzina dobave žice
- veliki napon električnog luka
- slobodni kraj žice – predugačak
- nečistoće na mjestu zavora
- nedovoljna zaštita zavora od strane zaštitnih plinova
- nečistoća same žice.



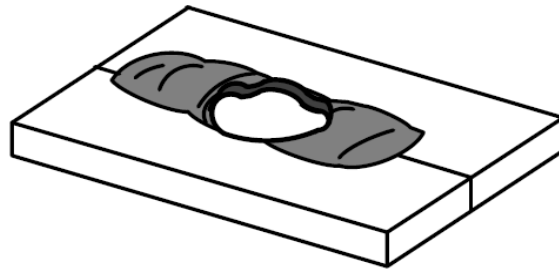
Slika 8.2 Izgled prskanja ili štrcanja kod zavarivanja [3]

Pretjerana penetracija javlja se kod prevelikog unosa topline. Prevelik napon, ali i spor pomak samog pištolja dovodi do te greške u zavarivanju. Greška se javlja i kod nepravilne pripreme radnog komada, nepravilnog odabira prijenosa metala te nedovoljnog unosa topline koja dovodi do nedovoljne penetracije. Na slici 8.3 prikazana je pretjerana penetracija (a), dobra penetracija (b), te nedovoljna penetracija (c) [8].



Slika 8.3 Prikaz: a) pretjerana, b) dobra, c) nedovoljna penetracija [8]

Pukotine, koje se javljaju u postupku zavarivanja, posljedica su prevelikoga unosa topline u sam postupak zavarivanja. Prevelik napon, spora brzina zavarivanja dovodi do unosa topline koja će stvoriti pukotine, tj. propaljivanje materijala koji su prikazani na slici 8.4 [8].

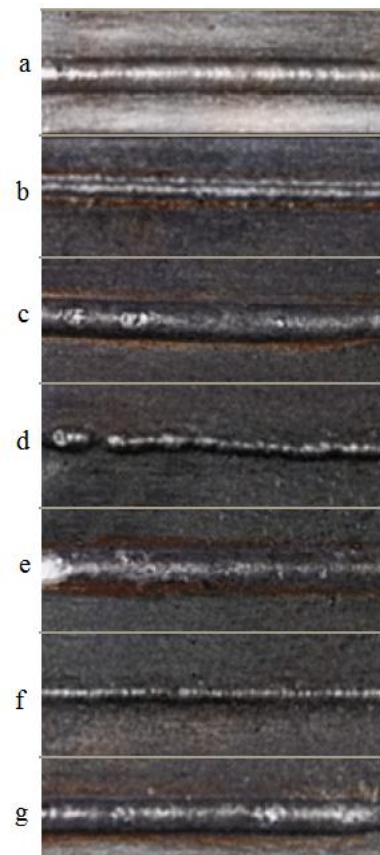


Slika 8.4 Primjer pukotine kod MIG/MAG zavarivanja [8]

Slika 8.5 prikazuje realne prikaze dobrih i loših zavora.

Opis slike 8.5:

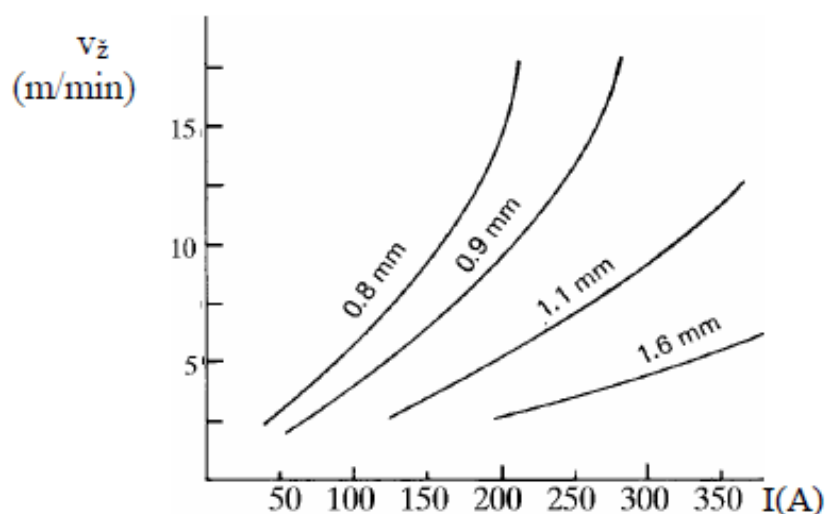
- a) dobar zavar
- b) prebrzo zavarivanje
- c) sporo zavarivanje
- d) slab napon
- e) jak napon
- f) spora dobava žice
- g) brža dobava žice.



Slika 8.5 Realni prikaz zavora [19]

8.1. Jakost struje

Jakost struje ovisi o vrsti materijala (radnog komada), debljini istoga i položaju zavarivanja. Struja ima značajan utjecaj na sam izgled zavora. Kada su ostali parametri konstantni, jačina struje ovisi o brzini dodatnog materijala tj. brzini dobave žice, ali i promjeru same žice. Ako žica ima veću dobavnu brzinu time mora biti i veća jakost struje, ali i ako je veći promjer žice. Samim tim dobit će se širi zavar. Zavisnost brzine dovođenja žice, odnosno topljenja žice i jakosti struje je linearna za manje vrijednosti struje, dok kod većih struja postaje nelinearna [5,18,20]. Slika 8.6 prikazuje zavisnost brzine dovođenja žice i jačine struje.



Slika 8.6 Zavisnost jačine struje i dobave žice [5]

Povećanje jačine struje zavarivanja, odnosno brzina dovođenja dodatnog materijala uz konstantne ostale parametre dovodi do povećanja dubine protaljivanja i nadvišenje zavora i samog izgleda, oblika zavora [18,20], koji su prikazani na slici 8.7. Pod a) mala struja, b) srednja struja i c) visoka struja.



Slika 8.7 Utjecaj jakosti struje na zavar [18]

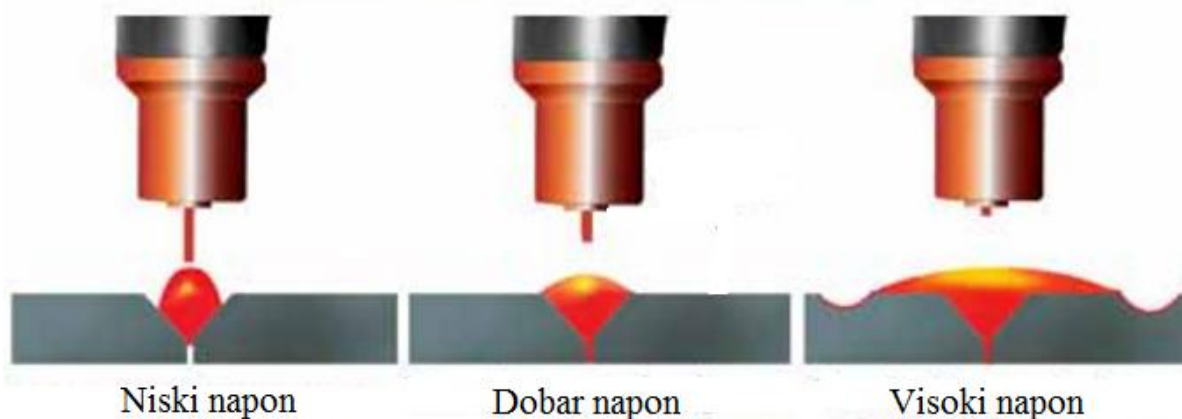
8.2. Utjecaj napona

Kao struja i napon utječe na samu kvalitetu zavarivanja, odnosno na kvalitetu zavarenog spoja. Sam napon tj, napon električnog luka utječe na dubinu protaljivanja, širinu i nadvišenje zavora. Povećanjem napona električnog luka dobiva se širi zavar i manje provarivanje, dok smanjenjem dobivamo užu zavar, veće nadvišenje zavora i veću dubinu protaljivanja [5,7]. U

tablici 8.1 prikazane su tipične vrijednosti napona koje se koriste za zavarivanje različitih metala u zavisnosti od vrste zaštitnog plina za prijenos metala kratkim spojem i promjera žice 0.8 mm te za prijenos metala. Slika 8.8 prikazuje shematski oblike zavora s obzirom na napon.

VRSTA MATERIJALA (metala)	NAPON (V)			
	Prijenos metala kratkim spojem (MKS), promjer žice 0.8 mm			
	Ar	Ar-O ₂ (1-5%)	Ar(75%)-CO ₂ (25%)	CO ₂
Alumini	19	-	-	-
Ugljični čelik	17	18	19	20
Niskolegirani čelik	17	18	19	20
Nehrđajući čelik	18	19	21	-
Nikal	22	-	-	-
Bakar	24	22	-	-

Tablica 8.1 Tipične vrijednosti napona kod prijenosa MKS i promjerom žice od 0.8 mm [5]



Slika 8.8 Shematski oblici zavora s obzirom na napon električnog luka [21]

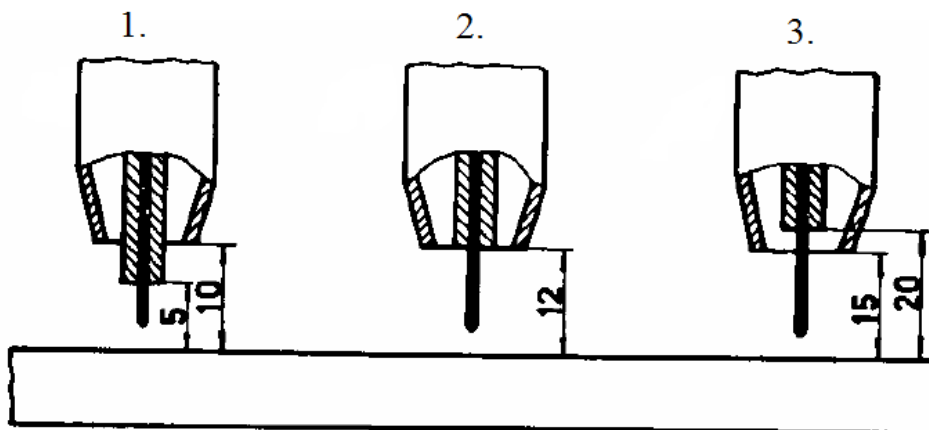
8.3. Induktivitet

Regulacija ovoga parametra regulira se brzinom promjene struje odnosno brzinom porasta struje pri kratkim spojevima. Veća indukcija povećava samo trajanje električnoga luka, smanjuje broj kratkih spojeva, kupka je veća i protočnija. Ako se u strujni krug doda indukcijska zavojnica s otporom sama brzina porasta struje je duža što dovodi do blažeg odvajanja kapljice s vrha žice te se izbjegava, odnosno nema pojave prskanja [3,18].

8.4. Duljina slobodnoga kraja žice (dodatnog materijala)

Ovaj parametar ovisi o struji zavarivanja. Parametar mora biti u određenim granicama. Ako je prevelika dužina stvara se višak dodatnog materijala (žice), ali i nema dovoljno topline za taljenje, a posljedica toga je plitko uvarivanje i nepovoljan izgled, oblik zavora [5]. Suprotno tome, ako je duljina slobodnoga kraja premala, tada se javlja onečišćenje sapnice pištolja [7]. Na

slici 8.9 prikazana je zavisnost položaja duljine slobodnoga kraja žice i sapnice u zavisnosti od jačine struje.



Slika 8.9 Zavisnost položaja duljine slobodnog kraja žice i sapnice u zavisnosti od jačine struje [5]

Opis slike 8.9:

Postoje tri međusobno zavisna položaja:

1. Slobodni kraj žice manji od odstojanja sapnice (struje od 50 do 170 A)
2. Slobodni kraj žice jednak odstojanju sapnice (struje od 170 do 380 A)
3. Slobodni kraj žice veći od odstojanja sapnice (struje iznad 350 A)

U tablici 8.2 prikazano je podešavanje brzine dobave žice u zavisnosti od debljine materijala koji se zavaruje, za žice od 0.6 i 0.8 mm.

Debljina materijala, čelika (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

Tablica 8.2 Podešavanje brzina dobave žice u zavisnosti o debljini materijala zavarivanja[18]

Slika 8.10 prikazuje utjecaj duljine slobodnog kraja žice na oblik, širinu i protaljivanje pri konstantnim ostalim parametrima, izuzevši jakost struje radi njezinog smanjenja kako se poveća duljina slobodnoga kraja žice [18]. Pod: a) mala duljina, b) srednja, c) velika duljina žice.



Slika 8.10 Utjecaj slobodnoga kraja žice na oblik zavora [18]

8.5. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja utječe na produktivnost i bira se u zavisnosti o jakosti struje i položaja zavarivanja. Brzina zavarivanja je brzina kojom se električni luk pomjera po liniji spajanja, zavora materijala [20]. Slika 8.11 prikazuje realni zavar, odnosno prikaz zavora o ovisnosti o brzini zavarivanja pod a) brzina u redu, b) brzina je prebrza, c) brzina je prespora.



Slika 8.11 Realni prikaz izgleda zavora o zavisnosti na brzinu zavarivanja [22]

Ovaj parametar potrebno je uskladiti s količinom taline odnosno ako je nedovoljna brzina zavarivanja dolazi do naljepljivanja i uključaka troske, a prebrzo zavarivanje daje preveliko nadvišenje šava. Slika 8.12 prikazuje utjecaj brzine na oblik, širinu zavora i protaljivanje. Pod a) mala, b) srednja i c) velika.



Slika 8.12 Utjecaj brzine zavarivanja na sami oblik, širinu zavora i protaljivanje [18]

8.6. Zaštitni plinovi i dodatni materijal (žica)

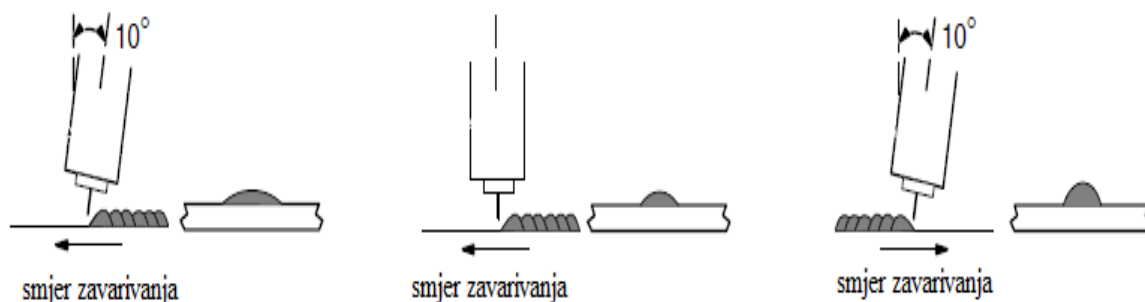
Kao i svi prethodni parametri tako i ova dva imaju utjecaj na sami zavar. Zaštitni plin ima veliki utjecaj na kvalitetu samog zavora pa je bitan pravilan odabir. Osim pravilnog odabira i vrste plina utjecaj ima i sam njihov protok kroz cijevi od boce preko pištolja do mjesta zavora.

Protok samog plina ovisi o vrsti spoja, položaja i brzine zavarivanja, oblika i dimenzija žlijeba, jačine struje, napona električnog luka i promjera žice [5]. Nepravilnim odabirom plina, ali i protokom može doći do grešaka u zavarenom spoju. Više o vrsti te primjeni pojedinoga plina rečeno je u poglavlju šest „Zaštitni plinovi“.

Dodatni materijal (žica) svojim sastavom, ali i promjerom također utječe na zavar. Promjer dodatnog materijala (određenog sastava) mora imati optimalni raspon jačine struje. Pri nedovoljnim strujama može doći do ne topljena dodatnog materijala, a pri velikim do poroznosti, pojave siromašnog topljenja [20]. Više o vrsti i promjerima te primjenama dodatnog materijala rečeno je u poglavlju sedam „Dodatni materijali“.

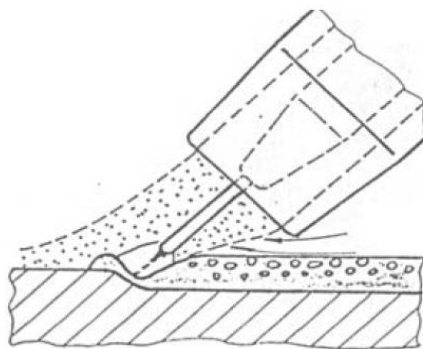
8.7. Tehnika zavarivanja (položaj zavarivanja)

Položaj zavarivanja tj. nagib pištolja u odnosu na radni komad i smjer zavarivanja imaju utjecaj na oblik, ali i kvalitetu samog zavora [5]. Kako je rečeno, nagib pištolja utječe na oblik zavora, a slika 8.14 prikazuje utjecaj nagiba, položaja pištolja na oblik zavora.



Slika 8.13 Nagib pištolja, utjecaj na oblik zavora [8]

Kod pogrešnog položaja pištolja događa se greška poroznosti. Ova greška nastaje zbog velikoga kuta pištolja i velike udaljenosti između sapnice pištolja i radnoga komada. Slika 8.14 prikazuje shematski kako izgleda greška tj. kut pištolja i razmak sapnice od radnog komada.

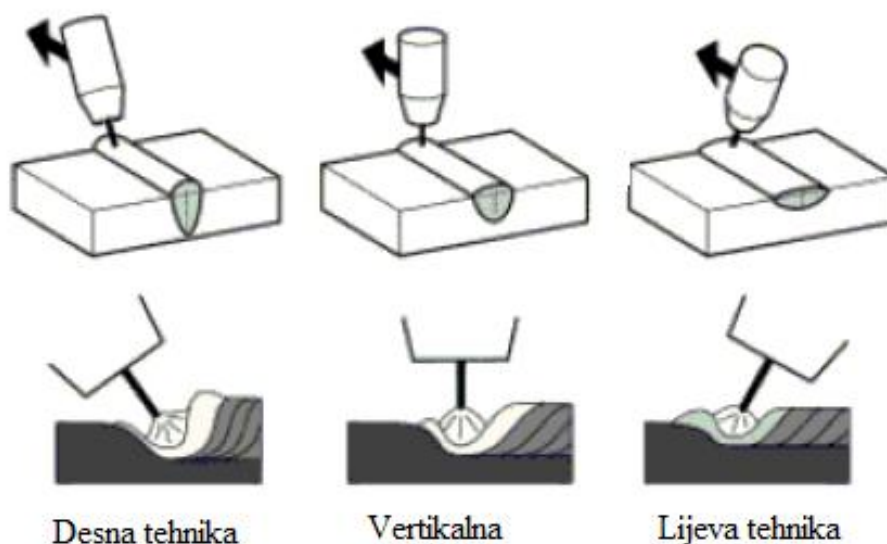


Slika 8.14 Prikaz greške, krivi nagib pištolja [5]

Dok govorimo o samoj tehnici zavarivanja, odnosno o smjeru gibanja postoje tri osnovna načina:

1. Desna tehnika
2. Vertikalna
3. Lijeva tehnika

Kada se koristi desna tehnika zavarivanja postižu se uži zavari i veće penetracije. Ta tehnika pogodna je za deblje materijale te se ona još naziva i tehnikom zavarivanja unazad. Druga tehnika zavarivanja je vertikalna. Ta tehnika zavarivanja daje širi zavar i srednju penetraciju. Dok treća tehnika, lijeva tehnika zavarivanja daje širi zavar i manju penetraciju. Pogodna je za zavarivanje tanjih materijala. Naziv za tu tehniku je i tehnika zavarivanja unaprijed [5,18]. Slika 8.14 prikazuje sve tri vrste tehnika zavarivanja.



Slika 8.15 Vrste tehnika zavarivanja [18]

9. Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja

U proteklih desetak godina kontinuirano se na tržištu, ali i u industrijskoj primjeni pojavljuju suvremeni „novi“ postupci MIG/MAG zavarivanja. Pojava tih „novih“ postupaka temelji se na zahtjevima za povećanje produktivnosti, specifičnim materijalima, specijalnim konstrukcijskim zahtjevima, minimalnim deformacijama, poboljšanje mehaničkih svojstava zavarenog spoja, smanjenje prskanja, bolja korozijska postojanost, kontrolirani unos u sam postupak zavarivanja te povezivanje robotskim stanicama. Suvremeni postupci svoj razvoj temelje na modifikaciji načina prijenosa metala tj. na modifikaciji prijenosa metala štrcajućim lukom, kratkim spojem i na kombinaciji različitih prijenosa metala. Modifikacijom načina prijenosa metala nameće se i modifikacija same opreme za postupke zavarivanja, odnosno mogućnost bolje kontrole samih parametara zavarivanja [23].

Karakteristični suvremeni postupci koji integriraju specifične koncepte prijenosa metala kombinirajući kratki spoj i impulsni, ali i modificirani štrcajući luk su:

- STT
- FastROOT
- CMT
- RMT
- AC MIG
- Force Arc.

Gore navedeni postupci su suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja koji se najviše primjenjuju, ali postoji još niz aplikacija koje se temelje na sličnim principima kao i ovi gore: Cold Arc, Cold Weld, Cold MIG, RMD- Regulated Metal deposition, MicroMIG, Cold Pulse [23].

Modifikacija prijenosa metala postiže se kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje, napona zavarivanja, samom indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu, kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u jednom ciklusu, uvođenje mehaničkog upravljanja odvajanjem same kapljice. Sama kontrola nazire se u svakom trenutku primjenom digitalne tehnologije.

9.1. STT postupak

STT (*Surface Tension Transfer*) je postupak zavarivanja koji se razvio u tvrtci Lincoln Electric. To je postupak koji za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizme površinske

napetosti. Predstavlja suvremeni i učinkovit postupak zavarivanja koji se najčešće koristi za zavarivanja korijena zavara u otvorenom žlijebu. STT postupak zavarivanja omogućuje kvalitetno zavarivanje u uvjetima koji otežavaju rad klasičnim načinima MIG/MAG zavarivanja zbog udruženja invertorske tehnologije visoke frekvencije i naprednim upravljanjem struja i napona [9,24].

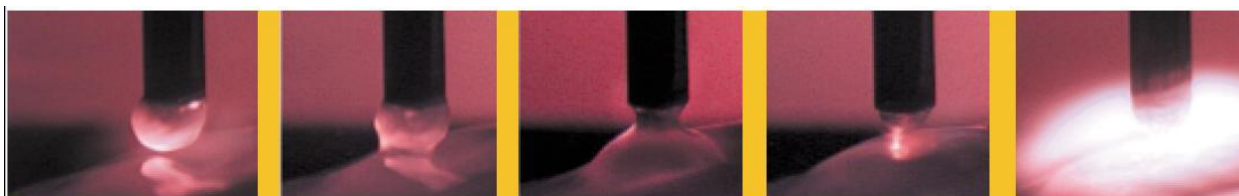
Postupak je pogodan za zavarivanje čelika, visokočvrstih čelika, ali najviše je pogodan kod nehrđajućih čelika. Primjenjuju se najčešće u zavarivanju cijevnih elemenata u automobilske, prehrambene te procesne industriji. Tablica 8.1 prikazuje prednosti i nedostatke ovoga načina zavarivanja [24,25].

PREDNOSTI	NEDOSTACI
odvajanje kapljice bez prskanja, manji unos topline	relativno visoka cijena opreme za MIG/MAG – STT zavarivanje u usporedbi s klasičnim MIG/MAG postupkom
smanjeno odvođenje topline i zračenje zbog manjeg unosa topline u radni komad	ograničena primjena zbog samo jednog načina prijenosa metala
manji broj prekida zavarivanja, a time i manja mogućnost pojave grešaka	nemogućnost zavarivanja aluminija
mogućnost zavarivanja u svim položajima	prednosti ovog postupka dolaze do punog izražaja tek u odgovarajućoj kombinaciji s ostalim visokoučinskim postupcima zavarivanja za popunu žlijeba za zavarivanje
veća brzina zavarivanja u odnosu na konvencionalni MIG/MAG postupak	
laka automatizacija postupka zavarivanja	
mogućnost korištenja mješavina plinova (100 % CO₂, 82 % Ar + 18% CO₂, itd.)	
odlično za izvođenje korijenskih zavara u otvorenom žlijebu (zamjena za izvođenje korijenskih zavara REL postupkom celuloznim elektrodama ili izvođenje korijenskih prolaza TIG postupkom)	
povoljniji uvjeti rada za zavarivača i brže usavršavanje zavarivača	
smanjena emisija dimnih plinova	

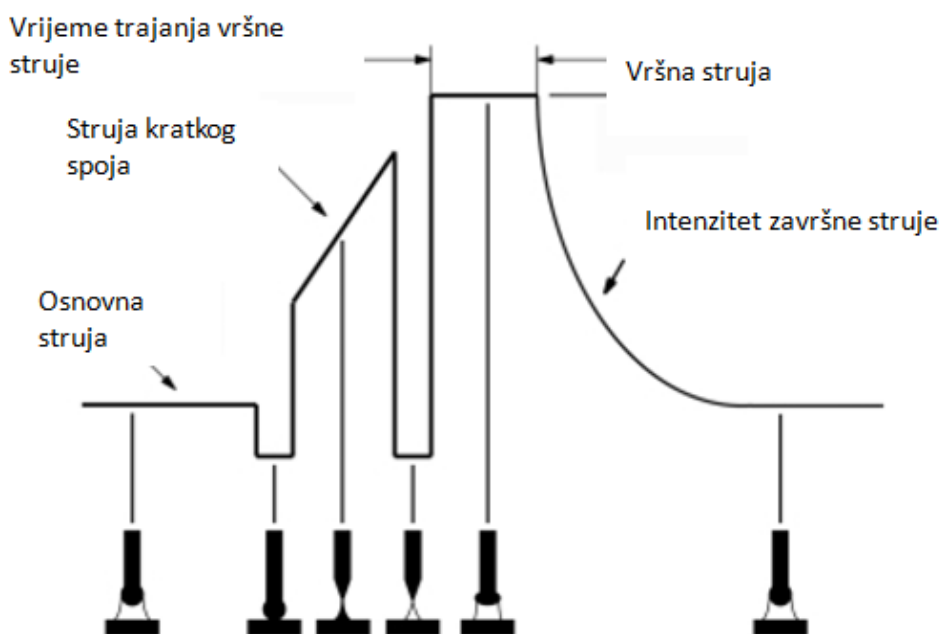
Tablica 9.1 Prednosti i nedostaci STT postupka zavarivanja

Kako je prije rečeno za prijenos kapljice u tom postupku koriste se mehanizmi površinske napetosti. Kad se ostvare uvjeti za prijenos samo djelovanjem površinske napetosti porast struje u kratkom spoju se zaustavljaju te se daljnji prijenos kapljice odvija djelovanjem površinske napetosti. Sprečavanjem porasti struje smanjuje se rasprskavanje kapljice rastaljenog metala te se istovremeno maksimalizira utjecaj površinske napetosti. Kad se kapljica odvoji dolazi do

strujnog impulsa koji priprema žicu za novi proces odvajanja kapljice. Samu završnu struju tog impulsa bitno je kontrolirati zbog njezinog utjecaja na unos topline. Slika 8.1 prikazuje slijed odvajanja kapljice rastaljenog metala kod STT postupka [23]. Slika 8.2 prikazuje dinamičku karakteristiku STT postupka.



Slika 9.1 Slijed odvajanja kapljice kod STT postupka zavarivanja [23]



Slika 9.2 Dinamička karakteristika STT postupka [24]

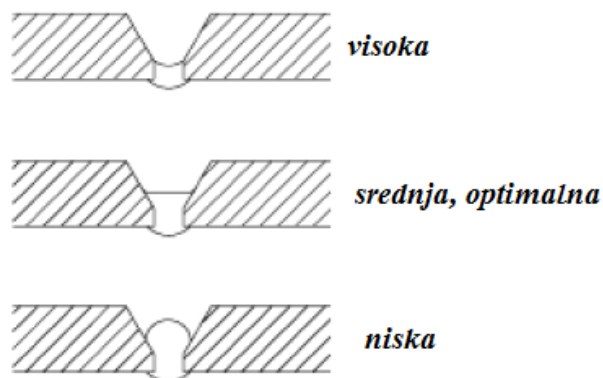
9.1.1. Parametri kod STT postupka zavarivanja

Kod STT postupka moguće je podesiti više parametara koji omogućuju bolje zavarivanje nego kod konvencionalnog MAG postupka. Parametri se uglavnom usklađuju po specifikacijama koje proizvođači isporučuju s dodatnim i osnovnim materijalima. Parametri koji se mogu podesiti su:

1. Vršna struja (*Peak current, I_{pc}*)

Vršna struja koristi se za deformacije duljine luka te poboljšavanje vezivanja i protaljšivanja stijenki osnovnog materijala. Ako je vrijednost vršne struje visoka povećat će se duljina električnog luka, ako je previsoka kapljice će imat okrugiji oblik i prevelik promjer. Kod niže

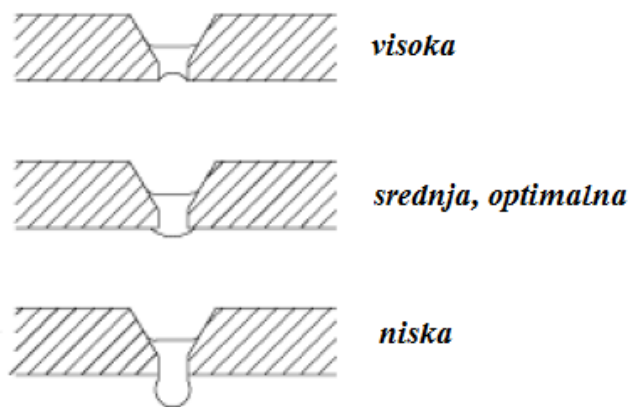
vrijednosti tj. ako je preniska, električni luk je nestabilan. Ta se struja mora prilagoditi tako da se dobije minimalno prskanje, ali i sama mirnoća kupke taline. Slika 8.2 prikazuje utjecaj vršne struje na samu geometriju zavarenog spoja. [9]



Slika 9.3 Utjecaj vršne struje na geometriju zavora [9]

2. Pozadinska struja (*Background current I_{bc}*)

Ova struja regulira sam unos topline u zavareni spoj. Utječe također kao i vršna struja na samu geometriju zavora. Prevelika vrijednost uzrokovat će veći promjer kapljice, ali i povećano prskanje. Kao i kod vršne struje, ako je niža dovodi do nestabilnog luka te je slabije kvašenje na stranicama žlijeba [9]. Slika 8.3 prikazuje utjecaj pozadinske struje na geometriju zavarenog spoja.



Slika 9.4 Utjecaj pozadinske struje na geometriju zavora [9]

3. Gradijan silazne struje (*Tailout*)

- osigurava dodatni unos topline
- kapljice nisu prevelike
- ne dolazi do promjene duljine električnog luka

- povećanjem - bolje kvašenje, veća brzina zavarivanja te se vršna i pozadinska struja smanjuje.

4. Topli-vrući start (*Hot Start*)

- omogućuje lakšu uspostavu električnog luka
- povećava unos topline kod početka zavarivanja, radi hladnog komada (osnovnog).

5. Brzina žice (v_z)

- utjecaj na količinu rastaljenog metala i jakosti struje
- neovisna o vršnoj i pozadinskoj struji.

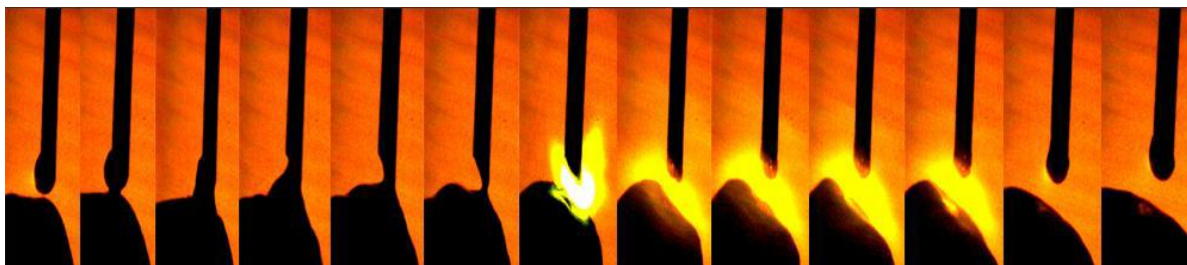
6. Slobodni kraj žice (l_{skz})

- utjecaj na geometriju zavora
- a) veća duljina- lice zavora konkavno i uže te je i veća visina zavora
b) manja duljina- zavar širi, manja visina, tanak, ali i pojavljivanje prskanja.

9.2. *FastROOT* postupak

FastROOT postupak zasniva se na modificiranom prijenosu metala kratkim spojem. Taj postupak razvijen je u tvrtki Kamppi. Postupak se temelji na digitalnom upravljanju osnovnih parametara zavarivanja. Postupak je pogodan za zavarivanje tankih limova koji su najčešće konstrukcijski i nehrđajući čelici te kao zavarivanje korijenskih prolaza uz veću brzinu i produktivnost s obzirom na postupak zavarivanja TIG [23,24].

Kod ovog postupka za zagrijavanje se javljaju struje kratkog spoja i sekundarnog strujnog pulsa. U prvom dijelu procesa dolazi do prijenosa metala u kratkom spoju, u rastaljenu kupku, a nakon toga slijedi naglo povećanje energije koja služi za oblikovanje spoja i zagrijavanje vrha dodatnog materijala za novi ciklus. Nakon ova dva načina procesa održava se osnovna struja koja osigurava stabilno stanje električnog luka i taline do sljedećeg novog ciklusa tj. kratkog spoja. Brzim i preciznim upravljanjem parametrima zavarivanja jačine struje i napona, ali i samom stabilizacijom električnog luka rezultira se prijenos metala bez štrcanja [23,24]. Slika 8.4 prikazuje odvajanje kapljice u električnom luku kod *FastROOT* postupka, dok su u tablici 8.2 prikazane prednosti i nedostaci *FastROOT* postupka zavarivanja.



Slika 9.5 Slijed odvajanja kapljice u električnom luk kod FastROOT postupka [23]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
niski unos energije- zavarivanje tankih limova	složenost korištenja upravljačke ploče
moгуćnost zavarivanja korijenskih prolaza	praćenje parametara preko električnog luka
veća produktivnost (veća brzina zavarivanja)	osjetljivost opreme zbog digitalnog upravljanja
olakšan rad zavarivača	
cijena	

Tablica 9.2 Prednosti i nedostaci kod FastROOT postupka

9.2.1. Parametri kod FastROOT postupka

Kod ovog postupka moguće je, kao i kod STT postupka, podešavati više parametara, nego kod klasičnog MIG/MAG postupka. Parametri se prilagođavaju specifikacijama koje se isporučuju s osnovnim odnosno dodatnim materijalom. Sinergijsko definiranje parametara, struje, napona i brzine žice koji su unaprijed određeni programom uređaja olakšavaju upotrebu FastROOT postupka, ali parametri koji se i dalje mogu mijenjati bez obzira na program su brzina dobavne žice, razina drugog ulaznog stanja i razina osnovne struje [9]. Parametri su:

1. Osnovna struja zavarivanja

- velika, odnosno prevelika osnovna struja rezultirat će nedovoljnim provarivanjem korijena zavara.

2. Vrući start (*Hot Start*)

- omogućuje lakšu uspostavu električnog luka, zbog hladnog osnovnog materijala.

3. Razina drugog ulaznog stanja (FP_u razina struje)

- bezdimenzijski parametar koji se može podešavati od -9 do +9
- utječe na geometriju zavara
- podešavanjem se postiže stabilnost električnog luka, ali i količina štrcanja
- vrijednost od: -1 do -9 dat će mekši luk i smanjenje štrcanja
+1 do +9 dati će tvrdi luk povećane stabilnosti.

4. Brzina žice (v_z)

- utjecaj na količinu rastaljenog materijala
- ovisna o osnovnoj struji.

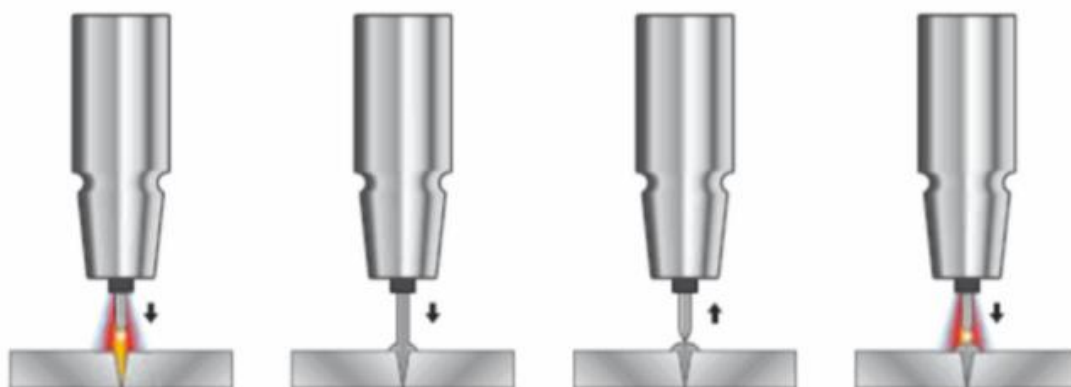
5. Slobodni kraj žice (I_{skz})

- utjecaj na geometriju zavarenog spoja
- vrijednost slobodnog kraja: velika - lice zavora konkavno i uža, veća visina zavora
manja - širi zavar, manja visina, tanak te povećava prskanje.

9.3. CMT postupak

CMT (*Cold Metal Transfer*) postupak je postupak zavarivanja koji koristi modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima gdje se primjenjuje povratno gibanje žice. Postupak se razvio u Austrijskoj kompaniji Fornius International GmbH. Postupak se primjenjuje na premošćivanju velikih zazora između materijala, ali primjena mu je i kod MIG tvrdog lemljenja, zavarivanja tankih limova (aluminija, nelegiranih i nehrđajućih čelika) kao i spajanje aluminija i pocinčanog lima [23,26].

Kod ovog postupka smanjen je unos topline, pomicanje žice direktno je uključeno (digitalno) te se prijenos metala ostvaruje bez prskanja. Slika 8.6 shematski prikazuje gibanje žice u jednom ciklusu. Digitalna tehnologija omogućuje precizno upravljanje žice, a regulacija duljine električnog luka je mehanička. Do trenutka koji je potreban da se uspostavi električni luk žica se giba prema radnom komadu, kada se uspostavi električni luk između žice i osnovnog komada oslobađa se toplinska energija koja tali žicu te se odvaja kapljica. Nakon odvajanja kapljice žica se vraća natrag. Takvo, jedno izmjenjivanje žice gore-dolje je jedan ciklus. Kad se žica vrati gore počinje novi ciklus. Sam broj ciklusa varira i nije određen te ovisi o samom tijeku procesa [26]. Brzina dobavne žice određuje se u samom procesu i nije konstantna. Slika 8.7 prikazuje slijed odvajanja kapljice metala kod CMT postupka zavarivanja. Tablica 8.3 prikazuje prednosti i nedostatke CMT postupka.



Slika 9.6 Prikaz gibanja žice gore-dolje kod CMT postupka [26]



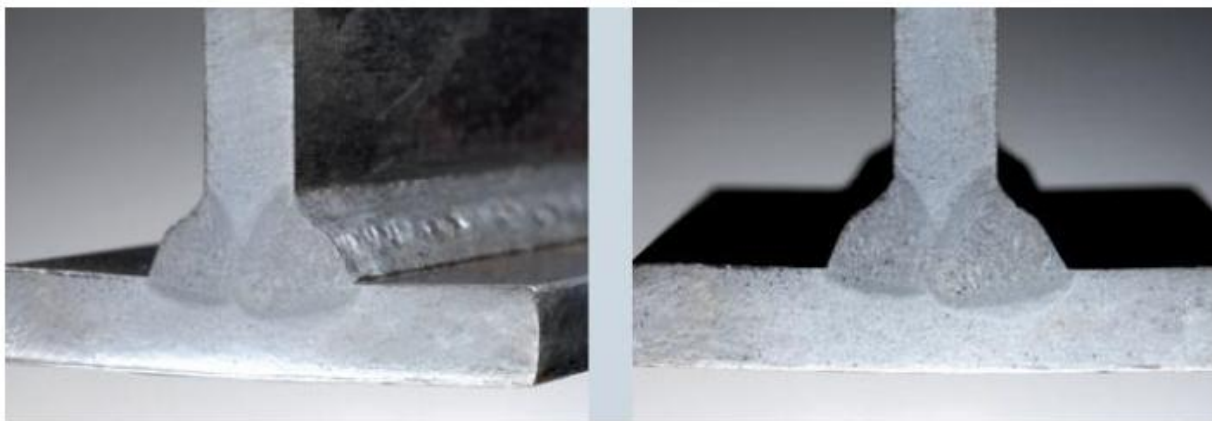
Slika 9.7 Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [23]

PREDNOSTI	NEDOSTACI
manje prskanje nego kod običnih postupaka zbog male struje strujnog kruga	ograničenje na zavarivanje tankih (3 - 4 mm debljine)
smanjenje troškova naknadne obrade zbog malog prskanja	sama veličina ručnog pištolja (ugrađen AC servo motor)
povećanje produktivnosti	
premošćivanje velikog zazora	
zavarivanje aluminija i čelika zajedno	
sučeono zavarivanje tankih limova	

Tablica 9.3 Prednosti i nedostaci kod CMT postupka

9.4. RMT postupak

RMT (*Rapid MIG/MAG Technology*) je suvremeni MIG/MAG postupak koji se razvio u tvrtki ESS Schweisstechnik. To je postupak koji ne spada u niskoenergijsku skupinu MIG/MAG, koji se ne baziraju na kratkom spoju već na štrcajućem luku. Kod običnog načina prijenosa metala štrcajućim lukom koji ovisi o zaštitnom plinu te dodatnom materijalu, RMT postupak teži skraćivanju električnog luka čime se smanjuje napon i povećava unos energije. Kapljice u ovom načinu su jako sitne. Sve to dovodi do znatno intenzivnije penetracije. [23,24] Slika 8.7 prikazuje kutni spoj izvedbom RMT postupka na limu debljine 8 mm, a materijal je ST 37.



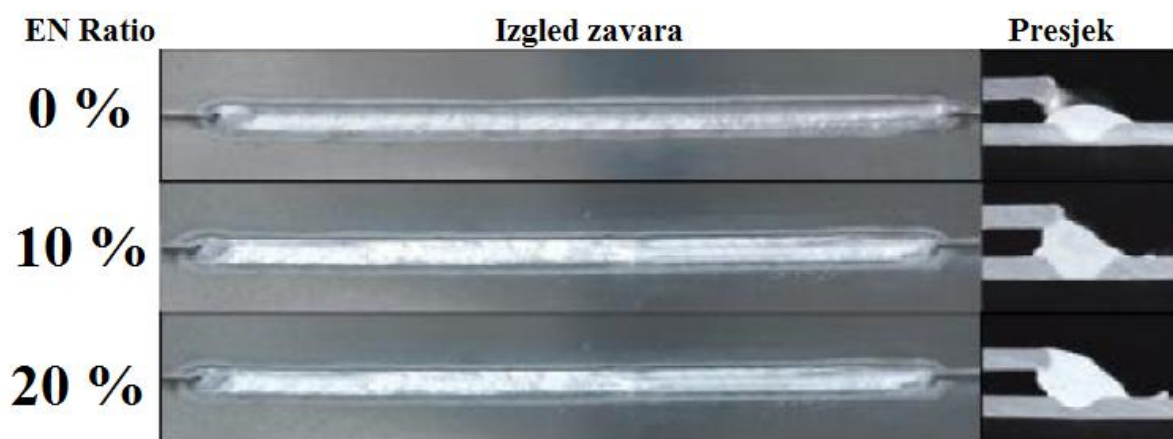
Slika 9.8 Izvedba kutnog spoja sa RMT postupkom na limu debljine 8 mm i materijala ST 37

[24]

I kod ovog postupka smanjuje se unos energije zbog veće penetracije, a i manjih brojeva prijelaza. Rezultat toga je manja deformacija, bolji spoj, veća brzina zavarivanja, ali i znatno manje vrijeme pripreme samog spoja [24].

9.5. AC MIG postupak

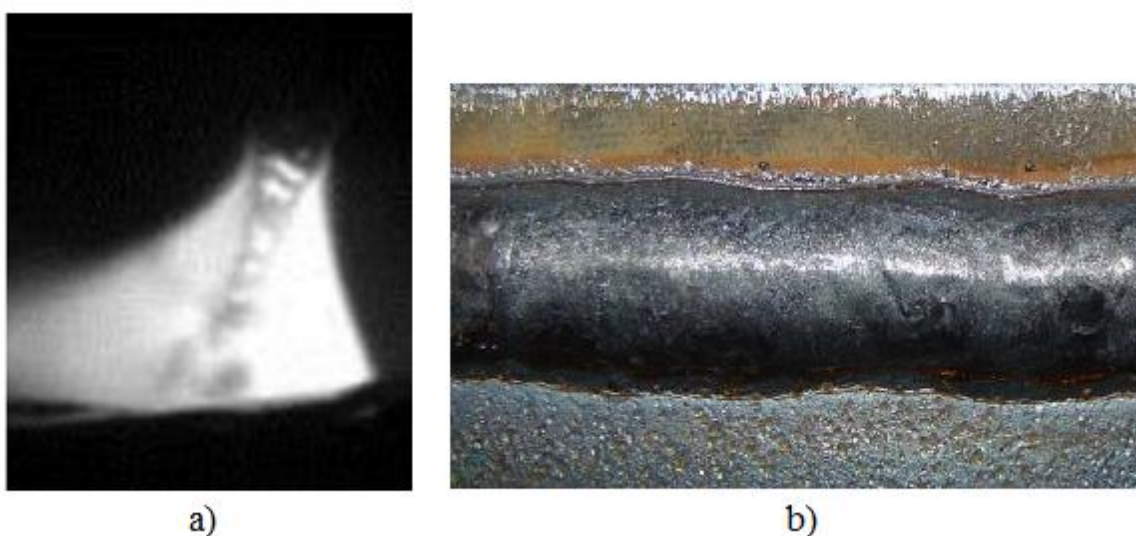
AC MIG (*Alternating Current MIG*) kod ovog postupka primjenjuje se promjenjiv polaritet žice. Izmjenjuju se pozitivni i negativni ciklusi što omogućuje bolju kontrolu procesa. Izmjenom samog polariteta na žici postiže se precizna kontrola distribucija topline u samom električnom luku, odnosno dobiva se ravnoteža između pozitivnog i negativnog pola na elektrodi i radnom komadu. Takvom primjenom mijenjanja polariteta može se premostiti veće zazore kod tanjih materijala, ali ovisi o samoj primjeni negativnog polariteta na žici (*EN ratio*) koji će promijeniti oblik penetracije i mogućnost premošćivanja pri zavarivanju tankih limova. Slika 8.9 prikazuje utjecaj negativnog polariteta pri spajanju aluminijske legure, debljine materijala 1.5 mm. Postupak je moguće primijeniti i za tvrdo lemljenje pri čemu ravnoteža negativnog polariteta na žici znatno utječe na mogućnost premošćivanja između radnih komada [23].



Slika 9.9 Utjecaj negativnog polariteta pri spajanju aluminijske legure (AC MIG) [23]

9.6. ForceArc postupak

Jedan od suvremenih MIG/MAG načina zavarivanja je i ForceArc postupak kod kojeg se način zavarivanja bazira na modifikaciji prijenosa metala štrcajućim lukom. Kod Tog postupka dolazi do skraćivanja električnog luka smanjenjem napona koja je omogućena kroz dinamičku kontrolu od strane izvora struje. Prijenos metala u tom postupku odvija se u obliku sitnih rastaljenih kapljica kraćim štrcajućim lukom. Brzina kapljica povećana je zbog jačeg djelovanja plazme električnog luka. Mora biti dobra kontrola procesa kako bi se izbjegao prijenos metala kratkim spojem da bi se smanjilo prskanje koje izaziva kratki spoj. Slika 8.10 prikazuje ForceArc postupak (prijenosa metala) (a) te izgled zavara tj. navar (b) [12].



Slika 9.10 a) prijenos metala ForceArc, b) izgled zavara (navara) ForceArc [12]

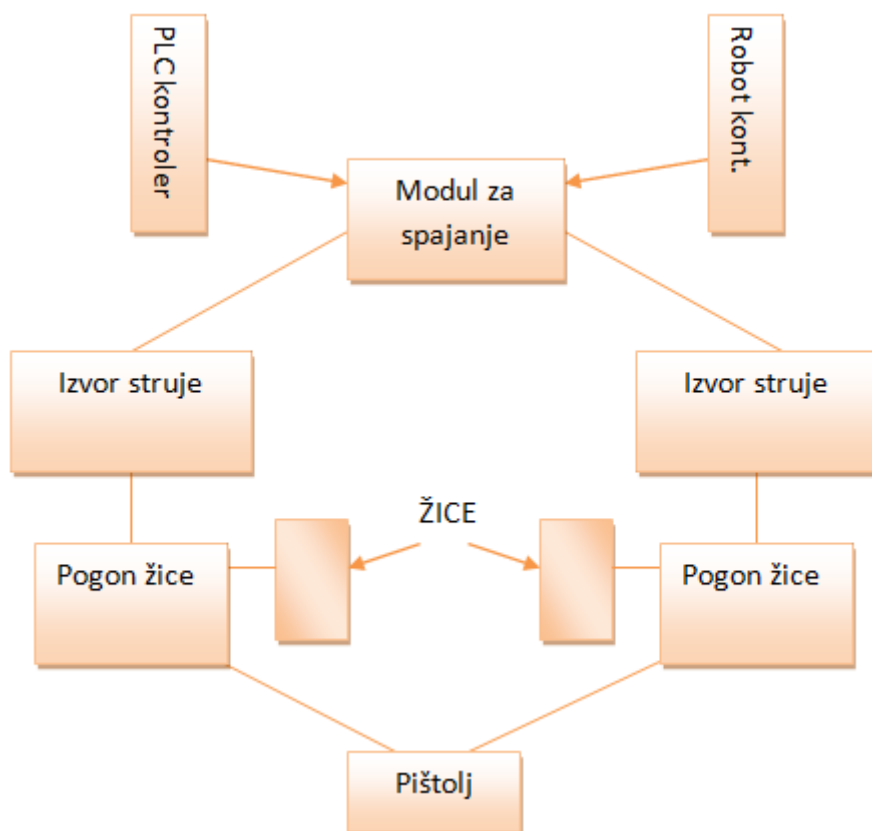
ForceArc postupak prijenosa metala skraćenim štrcajućim lukom ima neke prednosti prvenstveno u vidu kvalitete zavarenog spoja, ali i ekonomičnosti postupka i jednostavnoj primjeni [12]. Prednosti postupka:

- odlična fuzija i značajno povećanje penetracije spoja
- smanjenje zone utjecaja topline
- smanjenje mogućnosti nastanka zajedaja i pora
- stabilnost luka i lako izvođenje neautomatiziranog zavarivanja
- povećana brzina zavarivanja - ekonomska isplativost.

10. Tandem zavarivanje

Tandem zavarivanje počinje se primjenjivati prije dvadesetak godina. Zavarivanje s dvije žice prvi put je primijenjeno sa zaštitom pod praškom, ali ta se metoda primijenila i pod zaštitom sa zaštitnim plinovima, koja se i danas koristi [27].

Kod ovoga načina zavarivanja, zavarivanje se vrši s dvije žice u istoj sapnici, ali odvojenog električnoga luka s istom kupkom taline. U postupku tandem zavarivanja koriste se dva izvora energije, gdje se može regulirati posebno svaka žica, odnosno jačinu struje pojedine žice [4,27]. Na slici 10.1 prikazan je tandem sistem, odnosno shema sistema.

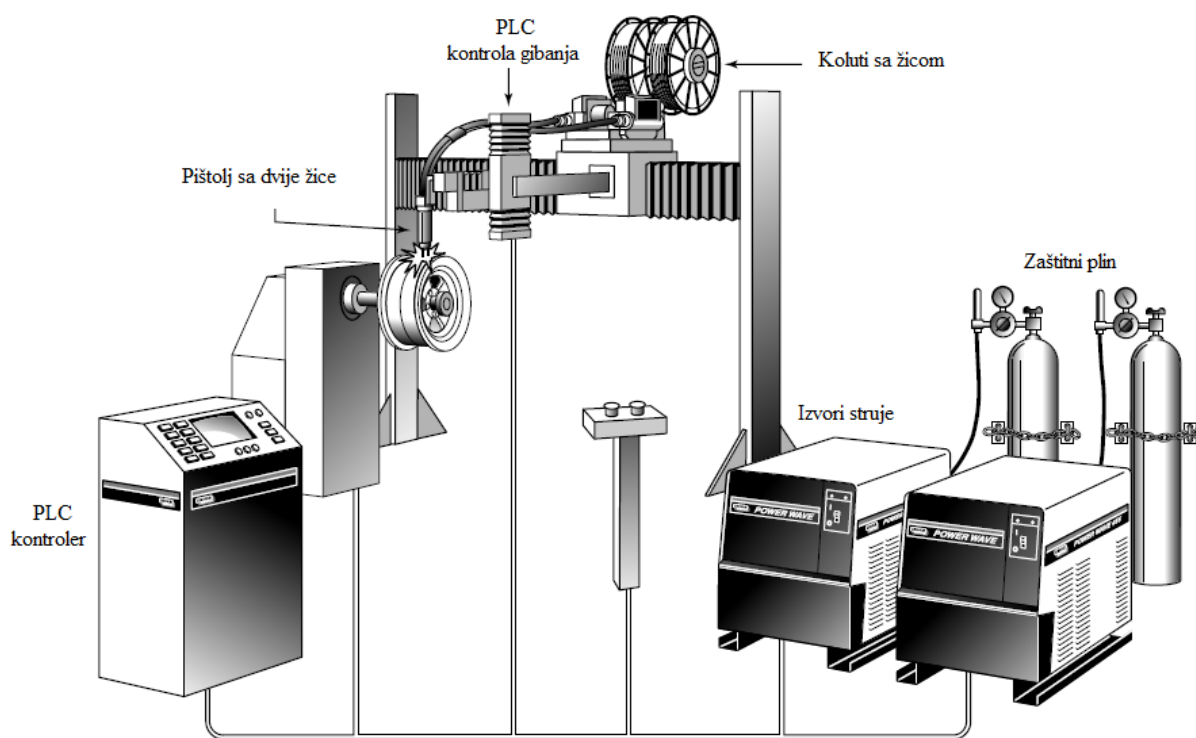


Slika 10.1 Shematski prikaz tandem sistema za zavarivanje [28]

Neke od značajki tandem zavarivanja su [4]:

- brže zavarivanje negoli kod konvencionalnih načina MIG/MAG zavarivanja
- manja razina prskanja u odnosu na druge procese i načine prijenosa metala kod MIG/MAG
- manje taloženja vodika.

Osnovni parametri kod ovog postupka mogu se podešavati pojedinačno za svaku pojedinu žicu. Samim tim rezultat toga daje veliku kontrolu rastopljene taline, donosno kupke zavara, ali i samog izgleda, oblika zavara [27]. Slika 10.2 prikazuje jedan od tandem sistema.



Slika 10.2 Tandem sistem [4]

10.1. Proces i način prijenosa metala

Proces se odvija tako da se obje žice postavljaju jedna poslije druge u istu kupku taline, prikaz na slici 10.3. Prva žica ili vodeće ona daje određenu dubinu penetracije, dok druga ili prateća žica ispunjava kupku taline, tj. popunjava zavar, daje izgled i oblik zavaru. Prva žica je većeg promjera od druge. Druga žica se opterećuje s manjim jačinama struje te se time kontrolira samo topljenje žice [27]. Slika 10.3 prikazuje realni način prijenosa metala kod tandem zavarivanja.



Slika 10.3 Realni prikaza prijenosa metala kod tandem zavarivanja [29]

Načini prijenosa metala kod tandem sistema je kombinacija štrcajućeg prijenosa metala i pulsirajućeg načina prijenosa metala [4]. Kombinacije koje se koriste su:

- a) štrcajući + pulsirajući
- b) pulsirajući + pulsirajući
- c) štrcajući + štrcajući

Primjenom pulsirajuće struje, odnosno prijenosa metala pulsirajućim lukom kada se ono primjenjuje na prvoj žici kontrolira se unos topline. Takva metoda se može primijeniti na relativno tankim elementima, zavarivati u različitim položajima i na materijalima osjetljivim na toplinu [27].

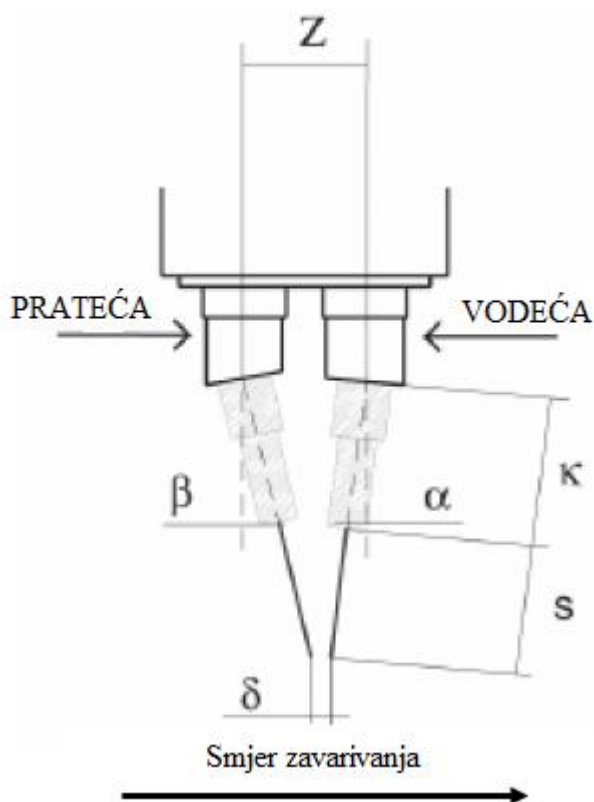
10.2. Pištolj za tandem zavarivanje

Pištolji za tandem zavarivanje mogu biti napravljeni na više načina, ovisno od razmaka žica, kutova vrha žica i slobodnoga kraja žice. Razmak između vrha žica može varirati [30]. Na slici 10.4 definirana je geometrija parametra pištolja za tandem zavarivanje.

OPIS:

Slika 10.4 definirana geometrija parametra pištolja,

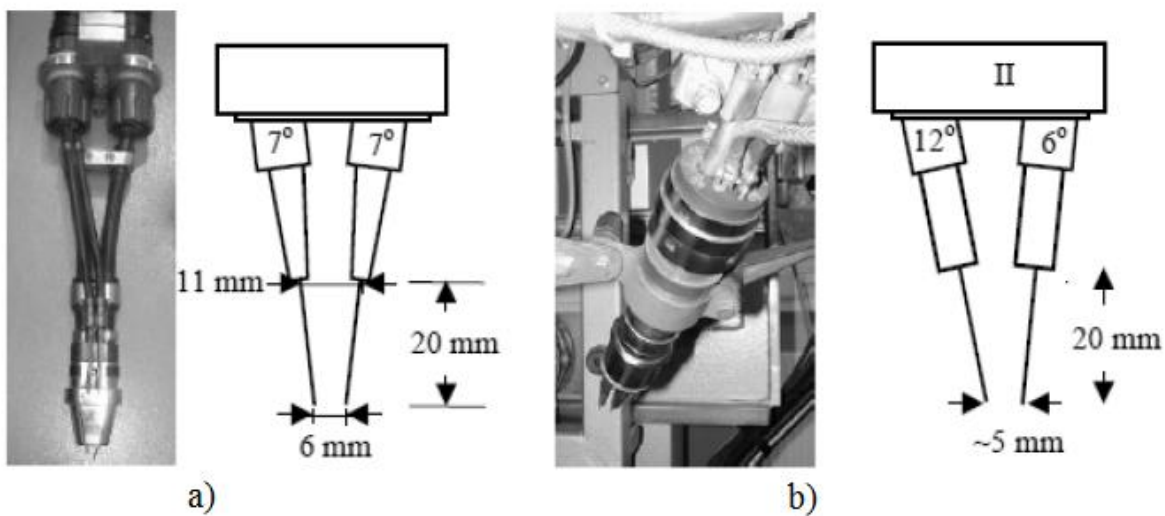
- (Z) – duljina, razmak od središta
- (S) – dužina slobodnog kraja žice
- (k) – dužina vrha žice
- (α) – kut prve žice
- (β) – kut druge žice



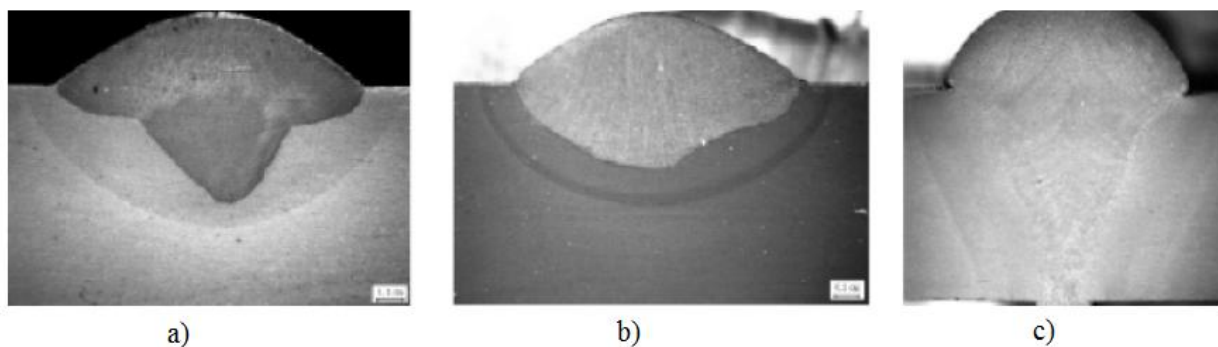
Slika 10.4 Definirana geometrija parametra pištolja [30]

Kod nekih pištolja za tandem zavarivanje postoje fiksno podešene žice, ali ima i pištolja kod kojih se mogu podesiti žice. Slika 10.5 prikazuje shematski prikaz Cloos pištolja za zavarivanje sa fiksno podešenim žicama (a), dok pod (b) ESAB - pištolj s različitim podešenim žicama koje se mogu podešavati. Slika 10.6 prikazuje utjecaj razmaka žica pod (a i b) isti podešeni parametri

zavara, ali s različitim pomacima žica, dok pod (c) prikaz optimalnog podešenja za maksimalno uvarivanje.



Slika 10.5 a) Closs pištolj sa fiksnim podešenim žicama, b) ESAB pištolj sa različitim podešenim žicama [30]



Slika 10.6 Utjecaj razmaka žice na zavar: a) i b) isto podešeni parametri zavarivanja, ali različiti razmaci žice, c) optimalno podešeni parametri za maksimalno uvarivanje [30]

11. Oprema

Oprema za MIG/MAG zavarivanje sastoji se od:

- izvora napajanja, struje
- pištolja za zavarivanje
- sustava za dobavu žice
- sustava za upravljanje protokom zaštitnih plinova
- upravljačkim sustavom
- električnih i ostalih kablova
- bocom za zaštitnim plinom.

Sami uređaji, koji se koriste u MIG/MAG zavarivanju po složenosti, mogu biti od jednostavnih pa sve do programibilnih u kojima mogu biti urađena računala sa velikom bazom podataka za parametre zavarivanja. Kod samog odabira opreme za zavarivanje utjecaj ima sama primjena, zahtjevi pojedinog korisnika, ali i o samoj financijskoj situaciji pojedinog korisnika [31].

Prema konstrukciji uređaja, uređaje možemo podijeliti na kompaktne i modularne. Kod kompaktnih uređaja, svi pojedini dijelovi (žica, izvor struje, mehanizam za dobavu žice itd.) smješteni su u samom uređaju, odnosno u jednom kućištu, dok kod modularnih uređaja izvori struje i dobavljač žice smješteni su u odvojenim kućištima. Slika 11.1 a) prikazuje jedan kompaktan uređaj, dok je pod b) prikazan jedan modularni uređaj. Oba su uređaja od istog proizvođača, Lincon Electric.



Slika 11.1 a) kompaktan uređaj, b) modularni uređaj

11.1. Izvori struje

Izvori struje trebaju osigurati 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 indirektna polarnosti, odnosno plus (+) pol se nalazi na žici što daje stabilni luk, ali i podjednaki prijenos dodatnog materijala. Napon se može regulirati od 12 do 50 V [5,31,33].

Prema samom podešavanju napona, izvore struje dijelimo na:

- izvore struje s ručnim podešavanjima
- izvore struje s elektroničkim podešavanjima (tiristori, inverteri).

Podešavanje izvora	Rad u područjima 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

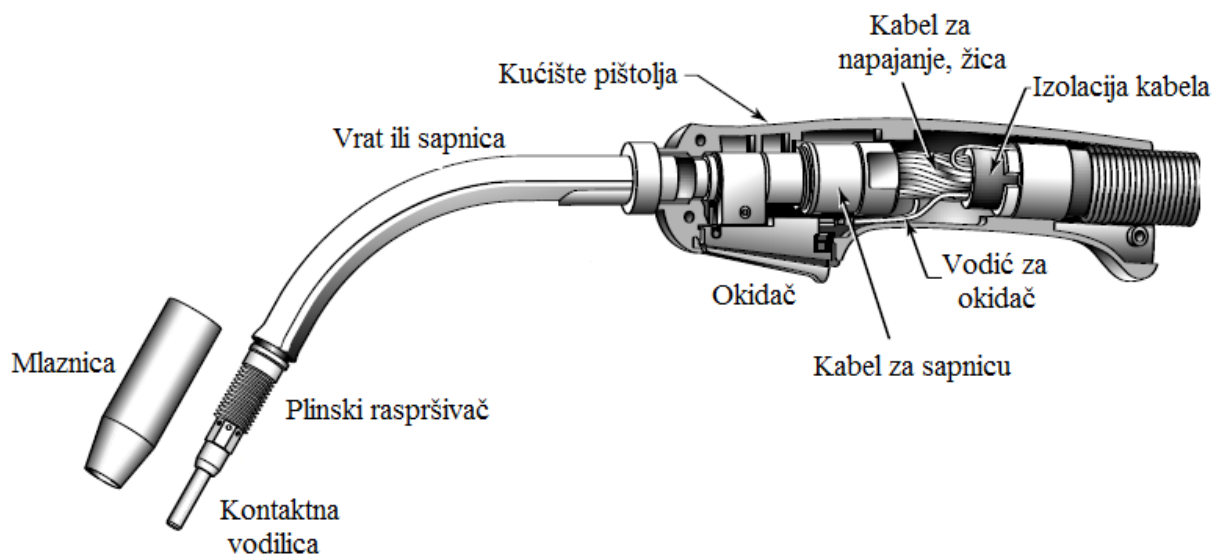
Tablica 11.1 Podjela i opis izvora struje prema naponu [33]

11.2. Pištolj za MIG/MAG zavarivanje

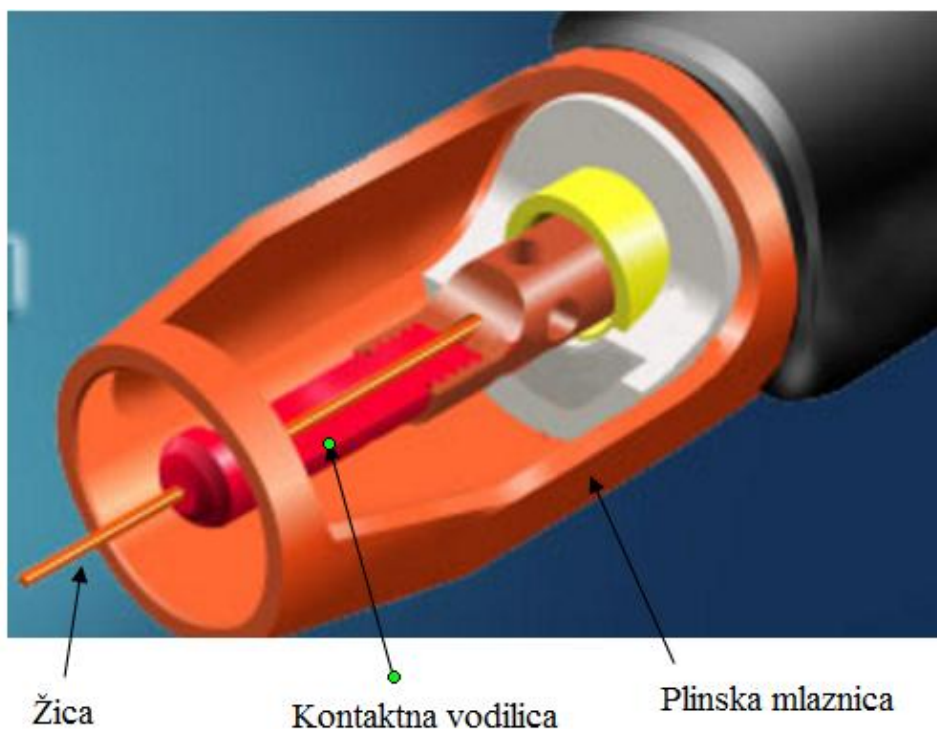
Pištolj za MIG/MAG zavarivanje osnovni je alat zavarivača kod MIG/MAG zavarivanja. Sama konstrukcija pištolja ovisi o jačini uređaja, vrsti zavarivanja (poluautomatsko, automatizirano, robotizirano) te kako će se dovoditi žica u sami pištolj. Pištolji se izrađuju u dvije osnovne varijante. Za struje od 100 do 500 A proizvode se zračnim hlađenjem, dok se za struje od 200 do 600 A proizvode vodenim hlađenjem [4,5,31,33]

Sami pištolji kao jedan od komponenti same opreme za zavarivanje spada u dio komponenti koji su potrošni materijali tj. u pištolju postoje pojedini dijelovi koji su potrošni. Ovisno o uvjetima rada, dijelovi se mijenjaju po potrebi [31]. Pištolj kao cjelinu čine pojedini dijelovi koji su prikazani na slici 11.2. Kontaktna vodilica pištolja nalazi se skoro u električnom luku što zahtijeva izdržljivost na mehanička i toplinska 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 kako bi se postigao što bolji električni luk, ali i

stabilnost radi boljšega zavara. Vrsti i veličine same kontaktne vodilice ovise o samom pištolju, žici itd. [33,34]. Slika 11.3 prikazuje presjek vrha pištolja.

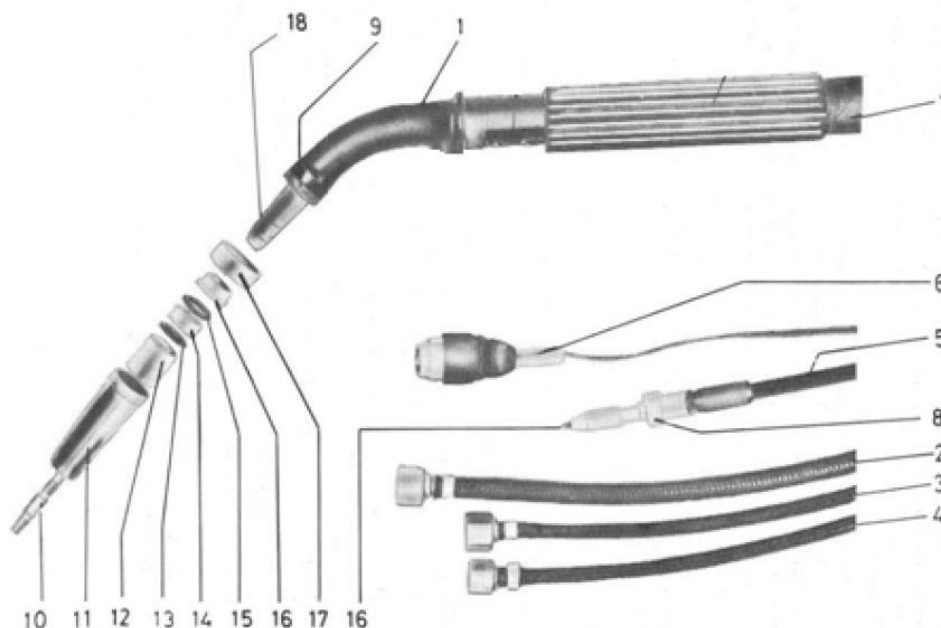


Slika 11.2 Komponente pištolja za zavarivanje zračnim hlađenjem [4]



Slika 11.3 Presjek vrha pištolja [21]

Mlaznica ili plinska sapnica usmjerava plin u zonu zavarivanja. Postoje više vrsta što ovisi isto tako o pištolju, načinu zavarivanja, plinu itd. Kroz sam pištolj prolazi još žica, kabel za napajanje (plus pol), zaštitni plin, upravljački signal, a u nekim pištoljima koji se hlade tekućinama prolazi i voda [33]. Slika 11.4 prikazuje izvedbu te dijelove pištolja hladene vodom.

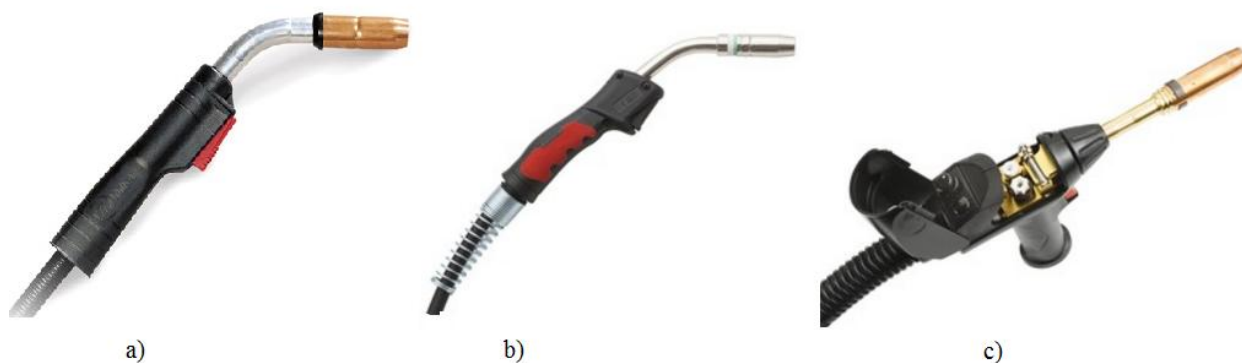


Slika 11.4 Komponente pištolja s vodenim hlađenjem [33]

Opis: „Slike 11.4 Komponente pištolja s vodenim hlađenjem“

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Sapnica ili vrat pištolja | 11. Mlaznica ili sapnica za plin |
| 2. Vodič struje s vodenim hlađenjem | 12. Izolacijski prsten |
| 3. Crijevo za rashladnu vodu | 13. Brtveni prsten |
| 4. Crijevo za dovod plina | 14. Prsten |
| 5. Crijevo za dovodenje žice | 15. Tlačni prsten |
| 6. Kontrolni kabel | 16. Prsten za povezivanje |
| 7. Zaštitno crijevo | 17. Umetak za dovodenje žice za zavarivanje |
| 8. Ulazna vodilica za žicu | aluminija |
| 9. Prsten | 18. Plinska kontaktna vodilica |
| 10. Kontakt na vodilica | |

Pištolji koji su hlađeni zrakom više se preporučuju zbog jednostavnosti. Dok pištolji hlađeni vodom su kompaktniji i obično se koriste za nazivne struje zavarivanja od 600 A. Pištolji mogu imati zakrivljene sapnice (40° do 60°) ili ravne sapnice. Slika 11.5 prikazuje pištolje za MIG/MAG zavarivanje. O pištolju za tandem zavarivanje rečeno je u poglavlju deset.



Slika 11.5 Pištolji za MIG/MAG zavarivanje [35,36]

Pojašnjenje slike 11.4 nalazi se u tablici 11.1.

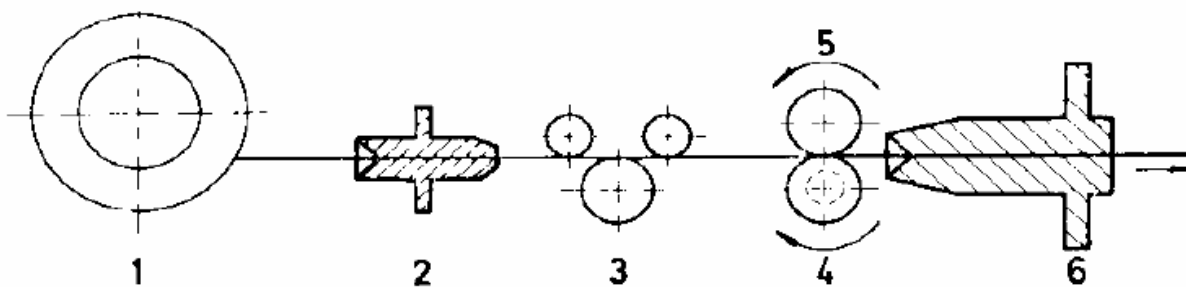
	a)	b)	c)
Ime proizvođača	Miller	Lincon Electric	Lincon Electric
Naziv pištolja	MIGmatic™ M-25	LINC GUN JLS 250 G	LINC GUN LGPP 405-
Hlađenje pištolja	Zrak	Zrak	Voda
Nazivna amperaža (A)	250	200	400

Tablica 11.2 Pojašnjenje slike 11.4

11.3. 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 dovodenja žice. Sustav mora osigurati fleksibilnost i postizanje različitih brzina dobave žice što ovisi o uvjetima zavarivanja [5]. Slika 11.6 prikazuje shemu dovodenja žice, dok sustavi koji se razlikuju su:

- a) kabinski: primjena kod nepokretnog radnog mjesta, kolut žice i pogonski mehanizmi smješteni u kućištu za napajanje
- b) univerzalni: sve se nalazi izvan kućišta, rad sa takvim sustavom na promjenjivim mjestima i veliki komadima
- c) tandem: ima dva pogonska mehanizma, jedan u kućištu dok je drugi neposredno kod mjesta zavarivanja
- d) *push-pull*: dva pogonska mehanizma, jedan u kućištu dok je drugi u pištolju, zavarivanje na nepristupačnim mjestima

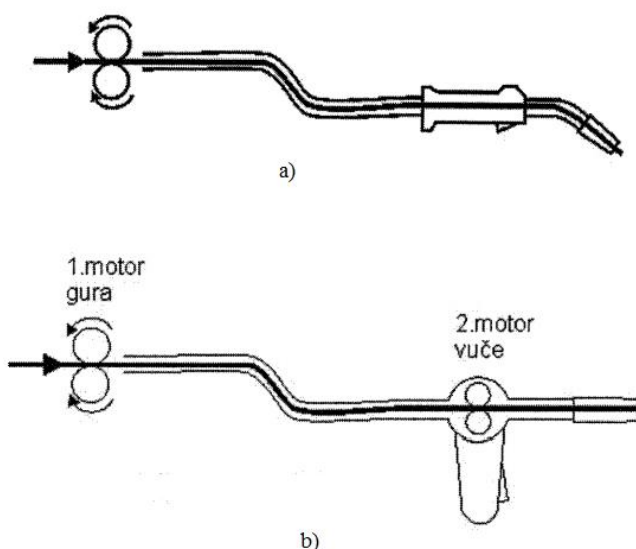


Slika 11.6 Shema dovođenja žice [5]

Opis slike 11.6 : kolut sa žicom (1), izlazna vodilica (2), valjci za usmjeravanje žice (3), pogonski valjci (5), ulazna vodilica (6).

Za dobavu žice najčešće se koriste dva načina. Prvi način je guranje žice „push“. Žica se gura kontroliranom brzinom pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu. Potrebna brzina žice kontrolira se istosmjernim motorima. Pogon osiguravaju 2 ili 4 kotačića (slika 11.8) koji guraju žicu. Ovaj način omogućuje rad sa žicama od 0.6 do 2.4 mm za čelik, 1.2 do 2.4 mm za aluminij i 1.0 do 2.4 mm za žice koje su punjene praškom. S ovim načinom može se sigurno dodavanje izvesti do nekih 3 do 4 m udaljenosti. Slika 11.7 a) prikazuje dobavu žice guranjem.

Drugi način je „push-pull“. Pomoću pogonskih kotačića „push“ žica se gura do pogonskih kotačića „pull“ koji je vuku do mjesta zavora. Kao i kod prvog načina „push“ je smješten u kućištu, dok je „pull“ smješten u pištolju. Prednost sustava je ta da je žica uvijek zategnuta u vodilici što omogućuje dobavu žica i manjih promjera (0.8 mm) na udaljenostima i do 15 m [31]. Slika 11.7 b) prikazuje dobavu žice „push-pull“.



Slika 11.7 Dodavanje žice [31]



Pogon za dodavanje
sa 2 kotačića



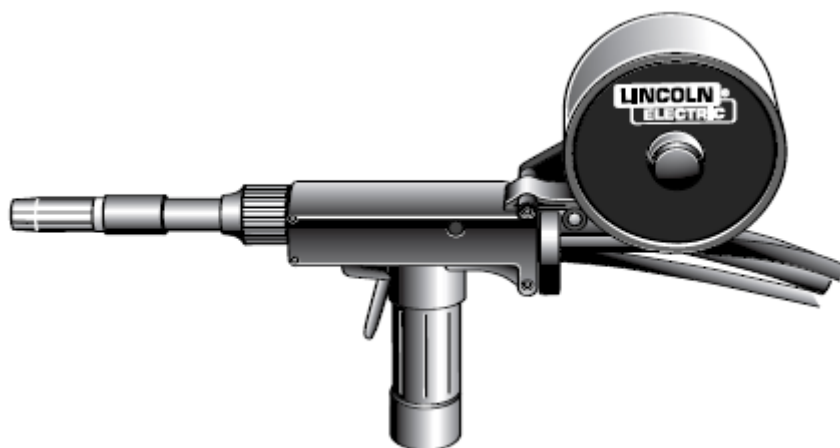
Pogon za dodavanje
sa 4 kotačića

Slika 11.8 Pogoni za dobavu žice (2 i 4 kotačića) [3]

Kod pogona za dobavu žice postoji pogon sa 2 kotačića i 4 kotačića (Slika 11.8). Kod oba pogona pritisak mora biti minimalan, tek toliko da žice ne proklizuju. Podešavanje se vrši na samim pogonima.

Zavarivanje na većoj udaljenosti (od izvora) jedan je od tehnoloških problema u zavarivanju koji su vezani za dobavu žice [31]. Neki od rješenja su:

- odvajanje uređaja za dobavu žice od izvora
- ugradnja „međustanice“ između izvora i pištolja
- korištenje posebnoga pištolja „*spool gun*“ (slika 11.9) gdje je pogon i žica smješteni u pištolju.



Slika 11.9 „Spool gun“ pištolj [4]

11.4. Ostala oprema

Upravljački sustav uređaja za MIG/MAG zavarivanje manje je ili veće složenosti što ovisi o samoj izvedbi uređaja. Uglavnom su elektronički. Ti uređaji neovisno o izvoru kontroliraju način uključivanja izvora struje (električni luk), otvaranje i zatvaranje protoka plina (elektroventil) te sam početak, brzinu i završetak dobave žice [31]. Ovaj uređaj služi još i za mjerenje i upravljanje zadanih parametra te konstantnim održavanjem samih.

Isporuka zaštitnog plina na samo mjesto zavarivanja oko električnog luka je bitno za samu kvalitetu gotovog zavara. Postoje dva sustava reguliranja protoka zaštitnog plina, a to su: reducirani ventil s mjerачem protoka i elektromagnetskog ventila. Reducirani ventil s mjerачem protoka priključuje se na samu bocu sa zaštitnim plinom. Potrebni protok plina podešava se na regulatoru. Elektromagnetski ventil smješten je oko uređaja za dobavu žice. Potrebni protok plina vrši se elektronički, a upravljačka jedinica smještena je na upravljačku jedincu dobavljača brzine s kojom je sinkronizirana [31]. Slika 11.10 prikazuje pod a) reducirani ventil, dok pod b) prikazuje jedan elektromagnetski ventil.



a)



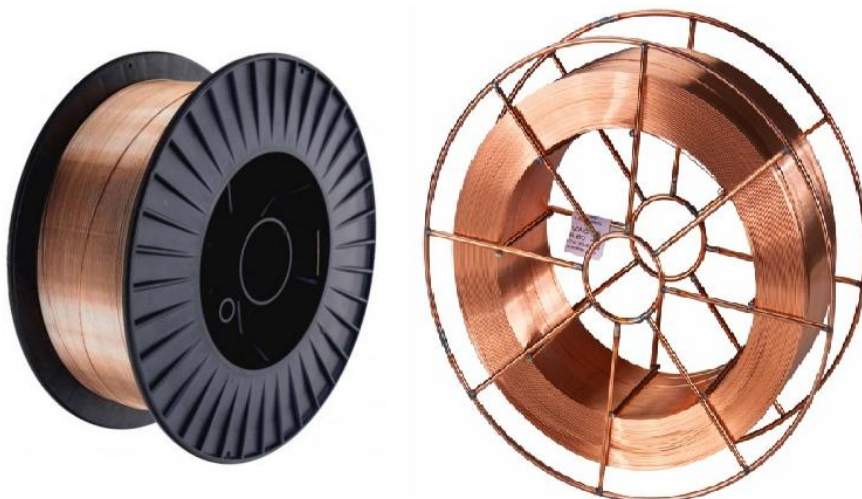
b)

11.10 Redukcijski ventil (a) elektromagnetski ventil (b)

Gubici koji se mogu javiti u kablovima, bili električni ili kablovi (crijeva) za plinove mogu znatno ugroziti samo zavarivanje, ali i sam zavar. Kod prijenosa metal kratkim spojem, zbog pada napona više se osjete gubici na kablovima, nego kod prijenosa metala štrcajućim lukom. Slika 11.11 prikazuje: (a) boce za zaštitni plin, (b) kolutova za žice.



a)



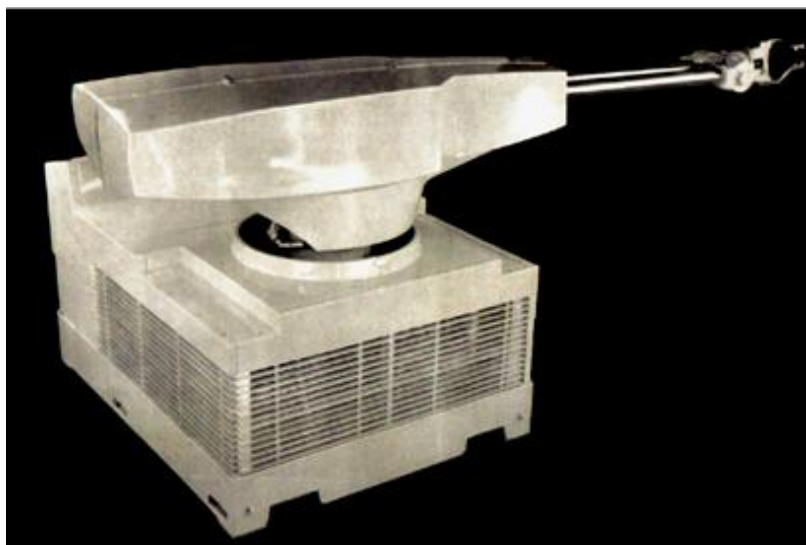
b)

11.11 Boce za zaštitni plin (a) i kolutovi s žicom (b)

12. Roboti u MIG/MAG zavarivanju

12.1.1. Povijest robota

Povijest robota seže u 1961. godinu kada je George Deroe zajedno s Joseph Engebergerom razvio prvi komercijalni hidraulični robot nazvan *Unimate* (slika 12.1). Taj robot korišten je u Fordovoj tvornici za utovar u tiskari. 1964. Godine General Motor naručuje 66 komada za svoju proizvodnju, dok 1969. godine ulaže u robote koje koristi za točkasto zavarivanje [15].



Slika 12.1 Prvi industrijski robot UNIMATE [37]

Početakom 1970-ih švedska tvrtka ASEA (današnja ABB) započinje svoj razvoj robota, dok 1973. godine predstavlja prvi električno upravljani robot. Godinu dana kasnije isporučuje robot koji se koristi za poliranje i brušenje metalnih cijevi. Iste te godine isporučuju robot koji se koristi za MIG/MAG zavarivanje. Taj robot bio je opremljen s pet slobodnih osi maksimalne nosivosti do 6 kg te je bio kontroliran od Intel 8008 CPU procesora koji je imao 8KB ukupnog kapaciteta [15].

Nakon izrade ovoga robota u svijetu počinje intenzivnija proizvodnja robota. Javlja se nove vrste električnih, mikroračunalnih upravljanih robota koje proizvode nove tvrtke na tržištu proizvodnje. Neke od glavnih tvrtki u tome periodu bile su smještene u Japanu (*FANUC & Siemens, Kawasaki, Nachi, itd.*) i Europi (*ASEA, Renault, Volkswagen, Fiat Comau, itd.*) [15].

Potrebe za bržim, manjim i pokretljivijim (više stupanja slobode) dovodi do poticaja za razvojem naprednijih robotskih sustava koji su dostupni i danas. Razvitak robotskih sustava za MIG/MAG zavarivanje jedno je od najzahtjevnijih robotskih sustava. U današnjoj proizvodnji robotskih sustava za zavarivanje (uglavnom za MIG/MAG zavarivanje) postoji pet najvećih proizvođača [15]:

- Yaskawa
- ABB
- OTC
- Panasonic
- Fanuc.

12.1.2. Općenito o robotima

Roboti o kojima se govori u ovome poglavlju su industrijski roboti, a prema definiciji industrijski robot je reprogramljiv, automatski upravljiv, višenamjenski manipulator te programljiv u tri, ili više osi [15]. Naziv za te robote je i robotski manipulator ili robotske ruke. Glavni dijelovi industrijskog robota su:

- pnašanje manipulatora određeno je rukom koja osigurava pokretljivost ručnim zglobovom koji daje okretljivost i vrhom manipulatora, koji izvršava operacije koje se zahtijevaju od robota
- mehanička struktura ili manipulator koji se sastoji od niza krutih segmenata povezanih pomoću zglobova
- Senzori detektiraju status manipulatora i ako je potrebno status okoline
- Sustav upravljanja omogućuje upravljanje i nadzor kretanja manipulacije
- Aktuatori postavljaju manipulator u određeno kretanje pomicanjem zgloba. Najčešće se koriste električni i hidraulički motori [14].

Podjela robota može se izvesti prema vrsti pogona, načinu upravljanja gibanja i geometriji radnog pogona. Prema vrsti pogona robote dijelimo na [33]:

- električni pogon (istosmjerni, izmjenični, koračni motori)
- pneumatski pogon
- hidraulični pogon.

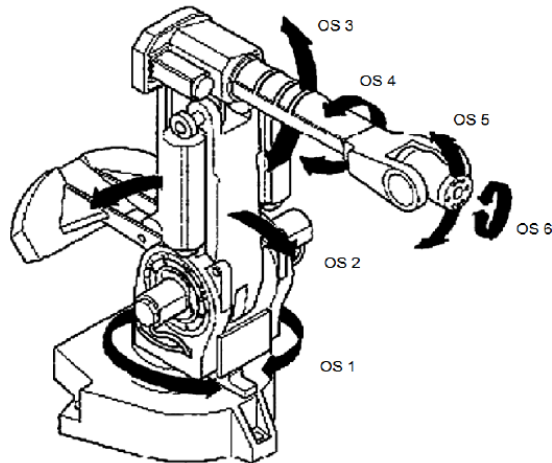
Pogoni kod industrijskog robota služe za pomicanje tijela, ruke i ručnog zgloba, određivanje brzine pomicanja ruke, jakosti i dinamičke performanse same robotske stanice. Robot još dijelimo prema geometriji radnog prostora:

- pravokutnik ili TTT
- rotacijski ili RRR
- cilindrični ili RTT
- sferna ili RRT.

Podjela prema načinu upravljanja gibanja:

- kontinuirano gibanje po putanji
- od točke do točke [33].

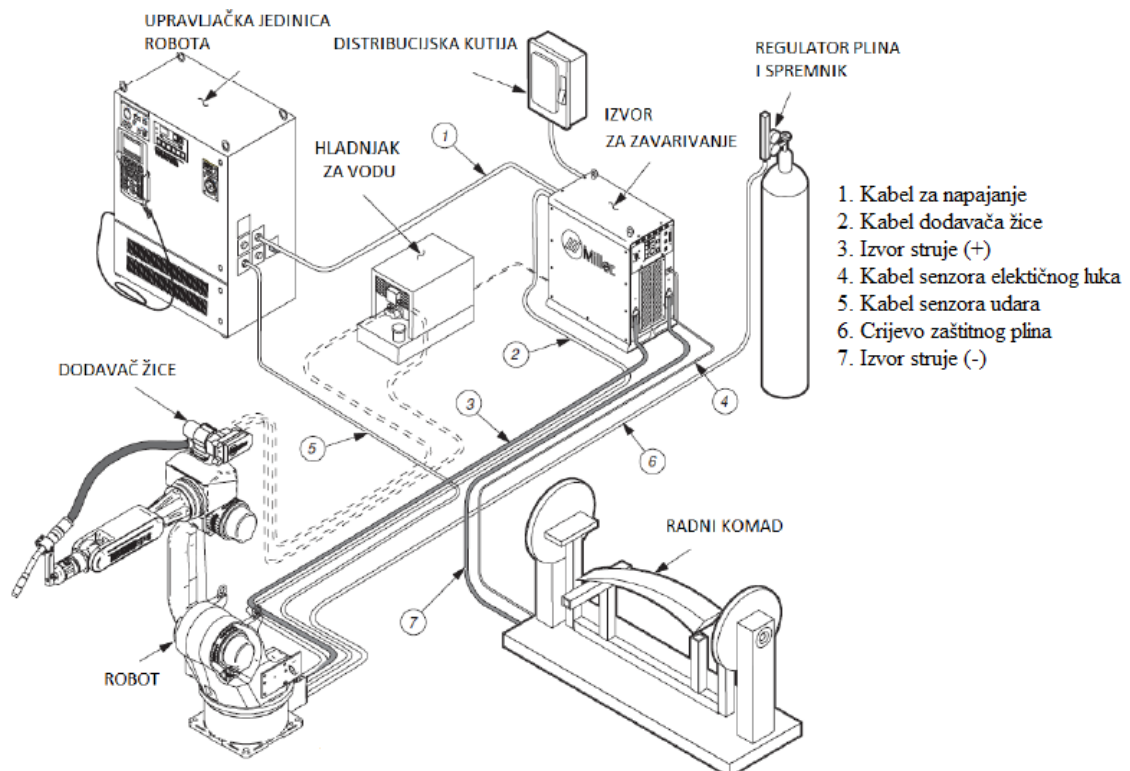
Jedan od važni karakteristika svakog robota je koliko je broj osi za rotacijsko ili translacijsko gibanje. Slika 12.2 prikazuje osi na robotu.



Slika 12.2 Prikaz osi na robotu (6 osi) [14]

12.1.3. MIG/MAG zavarivanje robotima

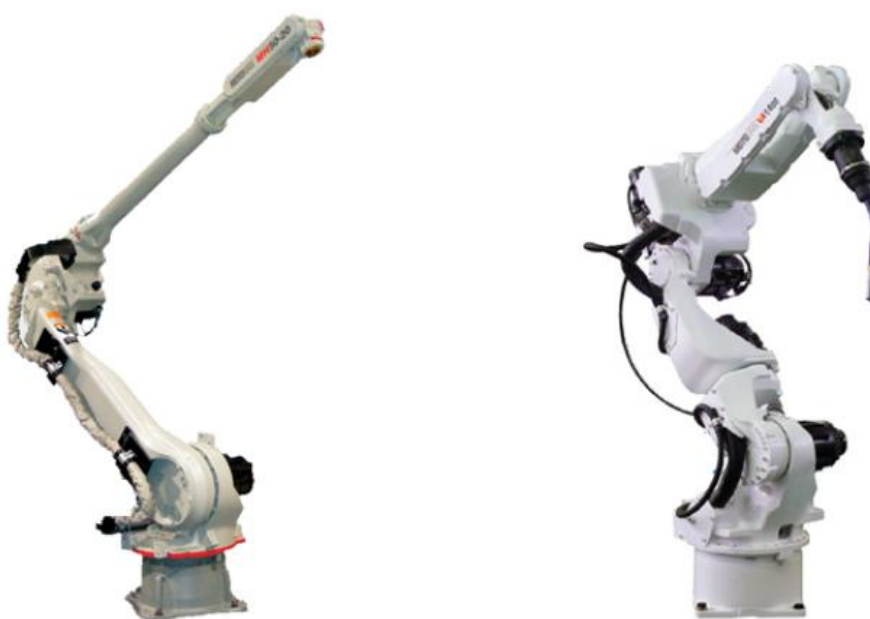
Roboti koji se javljaju u MIG/MAG zavarivanju su robotski manipulatori s više od tri stupnja



Slika 12.3 Robotska stanica [38]

osi koje se može programirati i reprogramirati te se upravljaju računalom [38]. Sustav koji se naziva robotska stanica sastoji se od opreme koja je slična ili ista kao i kod komercijalnih postupaka zavarivanja i robotske ćelije (slika 12.3).

Jezgra robotske ćelije je jedan ili više robotskih ruku s maksimalnom pokretljivošću (s više od tri osi). Na vrhu ruke je pištolj za zavarivanje. Kako bi se povećao radni prostor smještaj robotskih ruku može se postaviti i u nadglavne pozicije, a mogućnost dodatnog prostora još se može postići translacijskim gibanjem robota [23,38]. Slika 12.4 prikazuje neke od robotskih ruku.



Slika 12.4 Robotske ruke [33]

Pozicioniranje radnih komada postiže se pozicionerima (slika 12.5) koji imaju dodatne osi. To su uređaji koji pomažu, odnosno omogućuju lakše pristupanje pištolja spoju kojeg se zavaruje. Kod robotskih ćelija koriste se još višestanični stolovi za povećanje profitabilnosti samog sustava. Ove dodatne osi koje se nalaze u pozicionerima i višestaničnim stolovima upravljaju se pomoću upravljačke jedinice robota [38].

Za bolju kvalitetu kod samog zavarivanja koriste se senzori (geometrijski, elektrolučni i optički). Senzor je uređaj koji na posredan ili neposredan način mjeri određene parametre te ih obrađuje u digitalni oblik i šalje u računalu gdje se mogu namještati drugi parametri [14].



Slika 12.5 Prikaz različitih pozicionera [33]

13. Zaključak

MIG/MAG postupak zavarivanja jedan je od najzastupljenih postupaka u proizvodnji. MIG/MAG postupak zavarivanja može se primjeniti na široki spektar materijala (različitih debljina i vrsta). Jednostavnost i lakoća dostupnosti opreme MIG/MAG postupak svrstava u najzastupljenije u industriji. Postupak je to koji ima podosta prednosti naspram drugih u određenim situacijama. Sve su više javljaju napreci u samim postupcima zavarivanja, tako i kod MIG/MAG postupaka što je posljedica visokih zahtijeva industrije. Pojavljuju se nove metode odnosno modificirane (više ili manje) osnovne metode zavarivanja (prijenos kratkim spojem, štrcajućim lukom, itd.).

Kod osnovnih metoda zavarivanja pojavljuje se: prijenos metala kratkim spojem gdje je glavna značajka ovoga postupka mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog materijala vrši pri fizikalnom kontaktu elektrode i osnovnog materijala, odnosno taline. Ovaj postupak prijenosa metala dobivaju se zavari malog presjek, pogodan je postupak korijena zavora kod debljih komada. Drugi način prijenosa metala je prijenos metala štrcajućim lukom. Ovaj postupak primjenjiv je na gotovo sve vrste materijala. Pogodan je kod zavarivanja debljih pozicija u horizontalnom položaju. Sljedeći način prijenosa metala mješovitim lukom kombinacija je prijenosa kratkim spojem i štrcajućim lukom. Prijenos metala pulsirajućim lukom je jedan od oblika štrcajućim lukom. Sam način omogućuje prosječno manju struju nego što je to kod prijenosa metala štrcajućim lukom što se pozitivno odražava na toplinski unos u proces. Zavarivanje kod tanjih materijala, ali i primjena žice većeg promjera. Prijenos metala strujama visoke gustoće zajednički je naziv za MIG/MAG postupke zavarivanja koje karakterizira velika količina rastaljenog metala.

Određeni zahtjevi koji se javljaju kod zavarivanja, odlučuju o pojedinim metodama zavarivanja, ali i potrebnim dobrim izborom pojedini zaštitnih ili smjesu zaštitnih plinova (inertni ili aktivni), ali i samih dodatnih materijala (žice) koja se kreće u rasponima od ($\varnothing$ 0.6-2.4 mm). MIG/MAG postupak zavarivanja je postupak koji se sve više i više se razvija te stvaraju se nove metode zavarivanja koji su sve više robotizirane.

U Varaždinu, _____ godine.

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Podjela postupaka zavarivanja taljenjem	6
Slika 1.2 Podjela postupaka zavarivanja pritiskom	7
Slika 3.1 Shema prikaza postupka zavarivanja MIG/MAG [7].....	11
Slika 3.2 Shema uređaja za zavarivanje MIG/MAG[8]	12
Slika 4.1 Shema sila [9]	15
Slika 5.1 Shema mehanizma za prijenos metala kod MIG/MAG zavarivanje [12]	17
Slika 5.2 Shema prijenosa metala kratkim spojem [12]	18
Slika 5.3 Realni prikaz prijenosa metala kratkim spojem [13].....	19
Slika 5.5 Realni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [13].....	20
Slika 5.4 Shema prijenosa metala štrcajućim lukom [12]	20
Slika 5.7 Realni prikaz prijenosa metala mješovitim lukom [13]	22
Slika 5.6 Shema prijenosa metala mješovitim spojem [12].....	22
Slika 5.8 Shema prijenosa metala pulsirajućim lukom [12]	23
Slika 5.9 Realni prikaz prijenosa metala pulsirajućim lukom [13]	24
Slika 5.10 Shema prijenosa metala rotirajućim lukom [12]	25
Slika 5.11 Realni prikaz prijenosa metala rotirajućim lukom [13].....	26
Slika 6.1 Utjecaj zaštitnog plina argona na geometriju zavara.....	30
Slika 6.2 Utjecaj zaštitnog plina helija na geometriju zavara.....	30
Slika 6.3 Utjecaj zaštitnog plina ugljičnog dioksida na geometriju zavara.....	31
Slika 6.4 Profil penetracije i prodiranje kod smjese plinova argon/ugljični dioksid [15]	33
Slika 7.1 Oblici praškom punjene žice [7]	35
Slika 8.1 Shematski prikaz uzroka poroznosti u zavarenom spoju [7].....	38
Slika 8.2 Izgled prskanja ili štrcanja kod zavarivanja [3].....	39
Slika 8.3 Prikaz: a) pretjerana, b) dobra, c) nedovoljna penetracija [8]	40
Slika 8.4 Primjer pukotine kod MIG/MAG zavarivanja [8].....	40
Slika 8.5 Realni prikaz zavara [19]	40
Slika 8.6 Zavisnost jačine struje i dobave žice [5]	41
Slika 8.7 Utjecaj jakosti struje na zavar [18].....	41
Slika 8.8 Shematski oblici zavara s obzirom na napon električnog luka [21].....	42
Slika 8.9 Zavisnost položaja duljine slobodnog kraja žice i sapnice u zavisnosti od jačine struje [5].....	43
Slika 8.10 Utjecaj slobodnoga kraja žice na oblik zavara [18].....	44
Slika 8.11 Realni prikaz izgleda zavara o zavisnosti na brzinu zavarivanja [22].....	44

Slika 8.12 Utjecaj brzine zavarivanja na sami oblik, širinu zavora i protaljivanje [18]	44
Slika 8.13 Nagib pištolja, utjecaj na oblik zavora [8]	45
Slika 8.14 Prikaz greške, krivi nagib pištolja [5]	45
Slika 8.15 Vrste tehnika zavarivanja [18]	46
Slika 9.1 Slijed odvajanja kapljice kod STT postupka zavarivanja [23]	49
Slika 9.2 Dinamička karakteristika STT postupka [24]	49
Slika 9.3 Utjecaj vršne struje na geometriju zavora [9]	50
Slika 9.4 Utjecaj pozadinske struje na geometriju zavora [9]	50
Slika 9.5 Slijed odvajanja kapljice u električnom luk kod FastROOT postupka [23]	52
Slika 9.6 Prikaz gibanja žice gore-dolje kod CMT postupka [26]	54
Slika 9.7 Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [23]	54
Slika 9.8 Izvedba kutnog spoja sa RMT postupkom na limu debljine 8 mm i materijala ST 37 [24]	55
Slika 9.9 Utjecaj negativnog polariteta pri spajanju aluminijske legure (AC MIG) [23]	55
Slika 9.10 a) prijenos metala ForceArc, b) izgled zavora (navara) ForceArc [12]	56
Slika 10.1 Shematski prikaz tandem sistema za zavarivanje [28]	57
Slika 10.2 Tandem sistem [4]	58
Slika 10.3 Realni prikaz prijenosa metala kod tandem zavarivanja [29]	58
Slika 10.4 Definirana geometrija parametra pištolja [30]	59
Slika 10.5 a) Closs pištolj sa fiksnim podešenim žicama, b) ESAB pištolj sa različitim podešenim žicama [30]	60
Slika 10.6 Utjecaj razmaka žice na zavar: a) i b) isto podešeni parametri zavora, ali različiti razmaci žice, c) optimalno podešeni parametri za maksimalno uvarivanje [30]	60
Slika 11.1 a) kompaktni uređaj, b) modularni uređaj	61
Slika 11.2 Komponente pištolja za zavarivanje zračnim hlađenjem [4]	63
Slika 11.3 Presjek vrha pištolja [21]	63
Slika 11.4 Komponente pištolja s vodenim hlađenjem [33]	64
Slika 11.5 Pištolji za MIG/MAG zavarivanje [35,36]	65
Slika 11.6 Shema dovodenja žice [5]	66
Slika 11.7 Dodavanje žice [31]	66
Slika 11.8 Pogoni za dobavu žice (2 i 4 točkića) [3]	67
Slika 11.9 „Spool gun“ pištolj [4]	67
11.10 Redukcijski ventil (a) elektromagnetski ventil (b)	68
11.11 Boce za zaštitni plin (a) i kolutovi s žicom (b)	69
Slika 12.1 Prvi industrijski robot UNIMATE [37]	70

Slika 12.2 Prikaz osi na robotu (6 osi) [14]	72
Slika 12.3 Robotska stanica [38]	72
Slika 12.4 Robotske ruke [33]	73
Slika 12.5 Prikaz različitih pozicionera [33]	74

POPIS TABLICA

Tablica 5.1 Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala kratkim spojem [4]	19
Tablica 5.2 Primjer izbora struje kod prijenosa metala štrcajućim lukom [4].....	21
Tablica 5.3 Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala štrcajućim lukom [4]	21
Tablica 5.4 Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala mješovitim lukom [4].....	23
Tablica 5.5 Prednosti i nedostaci kod prijenosa metala pulsirajućim lukom [4].....	24
Tablica 6.1 Zaštitni plinovi i smjese- primjena, ponašanje i karakteristika luka [5].....	28
Tablica 6.2 Tehnološke karakteristike plinova [5]	28
Tablica 6.3 Potrošnja plina u ovisnosti na promjer žice[7]	29
Tablica 6.4 Udjeli u smjesi i karakteristika smjese argon/helij [4]	32
Tablica 6.5 Udjeli u smjesi i karakteristika smjese argon/kisik [4].....	32
Tablica 6.6 Udjeli u smjesi i karakteristika smjese argon/ugljični dioksid [4]	33
Tablica 6.7 Udjeli u smjesi i karakteristika smjese u trikomponentnom spoju [4]	33
Tablica 6.8 Udio zaštitnih plinova kod zavarivanja određenog materijala [4].....	34
Tablica 7.1 Dodatni materijal (žica)	36
Tablica 7.2 Nastavak tablice „7.1 Dodatni materijal (žica)“ [17]	37
Tablica 8.1 Tipične vrijednosti napona kod prijenosa MKS i promjerom žice od 0.8 mm [5]....	42
Tablica 8.2 Podešavanje brzina dobave žice u zavisnosti o debljini materijala zavarivanja[18] ..	43
Tablica 9.1 Prednosti i nedostaci STT postupka zavarivanja	48
Tablica 9.2 Prednosti i nedostaci kod FastROOT postupka	52
Tablica 9.3 Prednosti i nedostaci kod CMT postupka	54
Tablica 11.1 Podjela i opis izvora struje prema naponu [33]	62
Tablica 11.2 Pojašnjenje slike 11.4	65

Literatura

- [1] Z. Lukačević: Zavarivanje, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, SFSB, Slavonski Brod, 1998.
- [2] www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/povijest.html, dostupno 08.01.2016
- [3] <http://svetzavarivanja.rs/znanje-o-zavarivanju/co2-zavarivanje-mig-mag-zavarivanje>, dostupno 09.01.2016
- [4] Lincoln Electric Company: Gas Metal Arc Welding Guidelines, Cleveland, Ohio, 2006.
- [5] Mr Milan Milotić: Priručnik za zavarivače 2. Dopunjeno izdanje, BCD Elektro d.o.o Doboj, Saobraćajni fakultet Doboj, Doboj, 2008.
- [6] S. Kralj, Š. Andrić: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 1992.
- [7] Josip Brezetić: Tehnologija II- Zavarivanje, Veleučilište u Karlovcu, Podloge za učenje
- [8] Miller, Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW), USA, 04.2012.
- [9] G. Brumec: Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima, Završni rad, FSB, 2010.
- [10] <http://moodle.vz.unin.hr/moodle/mod/resource/view.php?id=16727> , TS-002-Tehnike-spajanja_-_Postupci zavarivanja.pdf, dostupno 15.01.2016.
- [11] I. Herak: Primjena i specifičnosti MAG-STT postupka zavarivanja, Završni rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [12] 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
- [13] <https://www.ualberta.ca/~ccwj/videos/pages/Intro%20High%20Speed/index3.html#wires>, dostupno 06.02.2016.
- [14] Đ. Arambašić: Završni rad, Završni rad, FSB, Zagreb, 2013.
- [15] Klas Weman, Gunnar Linden: MIG welding guide, Woodhead Publishing and Maney Publishing, Cambridge, 2006.
- [16] <http://documents.tips/documents/zavarivanje-562074ea59418.html>, dostupno 05.02.2016
- [17] <http://www.elektroda-zagreb.hr/proizvodi/zice.html>, dostupno 06.02.2016
- [18] M. Bajs: Diplomski rad, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [19] http://www.hobartwelders.com/elearning/pdfs/MIG_Welding_Tips.pdf, dostupno 10.02.2016.

- [20] <http://www.quality.unze.ba/zbornici/QUALITY%202005/057-Q05-003.pdf>, dostupno 13.03.2016.
- [21] http://www.vizijadanas.com/mig_zavarivanje.html, dostupno 15.03.2016.
- [22] <http://www.mig-welding.co.uk/learning-mig.htm>, dostupno 15.03.2016.
- [23] I. Garašić, S. Kralj, Z. Kožuh: Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja, Strojevi i oprema za zavarivanje (podloga), FSB, Zagreb, 2013.
- [24] M. Horvat, V. Kondić: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Tehnički glasnik, br. 6, veljača 2012., str. 137-140
- [25] M. Princip: Diplomski rad, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2010.
- [26] D. Volarić: CMT postupak, Seminarski rad iz strojeva i opreme za zavarivanje PI, FSB, Zagreb, 2011. preuzeto: <http://documents.tips/documents/cmt-postupak.html>, dostupno 21.02.2016.
- [27] <http://documents.tips/documents/inovacije-u-migmag-i-tig-postupku-zavarivanja.html>, dostupno 18.03.2016.
- [28] <http://www.thefabricator.com/article/automationrobotics/using-the-tandem-welding-process-to-your-advantage>, dostupno 18.03.2016.
- [29] <https://www.youtube.com/watch?v=oS9xyPtefEE&ebc=ANyPxKrLb47SSJJYJVjR3PwHPNf7wAWWU4UkcoQV4K4XWIUJjKSkuAFlipNh1yvanidEiYHPO1AluHjEYF x5T0LORmjlZYBnlw>, dostupno 18.03.2016.
- [30] <http://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0354-7965/2012/0354-79651201021A.pdf>, dostupno 20.01.2016
- [31] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/2.%20SEMINAR/Brosura%20seminar%202.pdf>, dostupno 20.03.2016.
- [32] <http://masinelektro.com/product-category/lincoln-electric>, dostupno 20.03.2016.
- [33] V. Petrović: Diplomski rad, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2010.
- [34] http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/lincoln_mig_welding_guide.pdf, dostupno 21.03.2016.
- [35] <http://www.lincolnelectric.com>, dostupno 21.03.2016
- [36] www.millerwelds.com, dostupno 21.03.2016.
- [37] https://catphi.files.wordpress.com/2010/09/1unimate_sm.jpg, dostupno 2.04.2016.
- [38] I. Karaga: Diplomski rad, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.



**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, **Matej Klobučar** pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom **Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja** te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

Matej Klobučar

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

Ja, **Matej Klobučar** neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom **Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja** čiji sam autor.

Student/ica:

Matej Klobučar