

MAG postupak zavarivanja

Atlija, Nataša

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences / Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:186:424804>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-08**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Humanities and Social Sciences - FHSSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI
FILOZOFSKI FAKULTET
ODSJEK ZA POLITEHNIKU**

DIPLOMSKI RAD

Nataša Atlija

Rijeka, 2016.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
FILOZOFSKI FAKULTET
ODSJEK ZA POLITEHNIKU

Studijski program: Sveučilišni dvopredmetni diplomski studij politehnike i informatike
Studentica: Nataša Atlija

Tema diplomskog rada: **MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA**

Mentor:
Prof. dr. sc. Marko Dunder

Rijeka, rujan 2016.

Sveučilište u Rijeci
Filozofski fakultet
ODSJEK ZA POLITEHNIKU
Sveučilišna avenija 4.
R I J E K A
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite

U Rijeci, .6.2016.

ZADATAK DIPLOMSKOG RADA

Pristupnik: Nataša Atlija
Zadatak: MAG postupak zavarivanja

Rješenjem zadatka potrebno je obuhvatiti sljedeće:

1. Uvod - podjela postupaka zavarivanja
2. Specifičnosti primjene MAG postupka zavarivanja
3. Glavni parametri MAG postupka zavarivanja, te nadzor parametara zavarivanja
4. Analiza MAG postupka zavarivanja sa stajališta troškova dodatnog materijala i zaštitnog plina
5. Metodički dio:
 - analizirati nastavni program srednje strukovne škole u sadržaju teme diplomskog rada
 - napisati pripremu za izvođenje nastave za pripadnu razinu kvalifikacije u skladu s HKO (Hrvatski klasifikacijski okvir).
6. Zaključci

U diplomskom se radu obvezno treba pridržavati **Uputa o završnom i diplomskom radu.**

Zadatak uručen pristupniku: .6.2016.
Rok predaje diplomskog rada: .9.2016.
Datum predaje diplomskog rada: _____

**PREDSJEDNIK POVJERENSTVA
ZA DIPLOMSKE ISPITE:**
Doc.dr.sc. Tomislav Senčić

ZADATAK ZADAO:
Prof.dr.sc. Marko Dunder, dipl.ing.

IZJAVA

Izjavljujem pod punom moralnom odgovornošću da sam diplomski rad izradila samostalno, znanjem stečenim na Filozofskom fakultetu u Rijeci na odsjeku za Politehniku, služeći se navedenim izvorima podataka i uz stručno vodstvo mentora prof.dr.sc. Marka Dundera, kome se srdačno zahvaljujem.

Hvala gospođi Fedori koja je vodila brigu o nama studentima i uvijek nam bila spremna pomoći.

Zahvaljujem svojoj obitelji na podršci koju su mi pružili, posebno za vrijeme ispita i izrade diplomskog rada.

Nataša Atlija

Rijeka, rujan 2016.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
1.1 Općenito o zavarivanju	1
1.2 Postupci zavarivanja	2
1.3 Kratak pregled povijesnog razvoja zavarivanja.....	3
1.4 Prednosti i nedostaci zavarenih spojeva	4
1.5 Oblici zavara.....	5
1.6 Oblici zavarenih spojeva	6
1.7 Položaji zavarivanja.....	7
2. ZAVARIVANJE MAG POSTUPKOM.....	8
2.1 MAG postupak zavarivanja	8
2.2 Povijesni razvoj MAG zavarivanja.....	10
2.3 Koncepti MAG zavarivanja.....	11
2.3.1 Izvor struje	12
2.3.2 Dodavač žice	15
2.3.3 Sustav za zaštitni plin.....	17
2.3.4 Pištolj za zavarivanje (gorionik)	17
2.3.5 Komandni ormarić (kućište uređaja).....	18
2.4 Parametri MAG zavarivanja	19
2.4.1 Napon.....	19
2.4.2 Jakost struje.....	20
2.4.3 Brzina dovođenja žice.....	21
2.4.4 Slobodan kraj žice.....	21
2.4.5 Zaštitni plin	24
2.5 Režimi rada MAG zavarivanja	26
2.5.1 Zavarivanje u kratkom spoju	31
2.5.2 Zavarivanje u spreju ili zavarivanje štrcajućim lukom	33
2.5.3 Zavarivanje krupnokapljičastim/globularnim transferom (prijelazni transfer).....	37
2.5.4 Zavarivanje pulsним transferom	40
2.5.5 Zavarivanje rotirajućim lukom	43

2.5.6 Transferi na visokim parametrima rada	44
2.5.7 Ostali transferi.....	45
2.6 Dodatni parametri za podešavanje uređaja za zavarivanje	46
2.7 Zaštitni plinovi za MAG zavarivanje	48
2.7.1 Ugljikov dioksid, CO ₂	48
2.7.2 Argon, Ar	53
2.7.3 Mješavine argona i ugljikovog dioksida	54
2.7.4 Mješavina argona i kisika	55
2.8 Žice za MAG zavarivanje.....	56
3. ANALIZA MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA SA STAJALIŠTA TROŠKOVA DODATNOG MATERIJALA I ZAŠTITNOG PLINA	65
3.1 Glavni troškovi MAG postupka zavarivanja	65
4. METODIČKI DIO	69
4.1 Područja strukovnog obrazovanja vezana uz temu diplomskog rada.....	69
4.2 Ustroj strukovnog obrazovanja u Republici Hrvatskoj	69
4.3 Opis programa zanimanja zavarivač.....	70
4.4 Nastavni plan predmeta Tehnologija zavarivanja.....	72
4.5 Priprema za izvođenje nastave za pripadnu razinu kvalifikacije u skladu s HKO sadržajno vezana uz temu rada	77
5. ZAKLJUČAK	103
LITERATURA.....	104

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Oblici zavara s obzirom na međusobni položaj [1].....	5
Slika 1.2. Dijelovi zavara [7]	5
Slika 1.3. Položaji zavarivanja [1]	7
Slika 2.1. Zavarivanje MAG postupkom [8].....	8
Slika 2.2. Shema MAG zavarivanja, a) uvećani prikaz pištolja, b) shema sustava	11
Slika 2.3. Statička karakteristika izvora struje (nagib) [14].....	12
Slika 2.4. Usporedba statičke karakteristike uređaja za MAG/MIG zavarivanje i uređaja za REL/TIG zavarivanje [9].....	13
Slika 2.5. Utjecaj indukcije (prigušnice) na jakost struje [14]	14
Slika 2.6. Uređaj za MAG zavarivanje [9].....	15
Slika 2.7. Kabinski sustav za dovođenje žice [14].....	15
Slika 2.8. Univerzalni sustav za dovođenje žice [14]	16
Slika 2.9. Tandemski sustav za dovođenje žice [14].....	16
Slika 2.10. „Push – pull“ sustav za dovođenje žice [14].....	17
Slika 2.11. Pištolj/gorionik za zavarivanje s polikablom [18]	17
Slika 2.12. Shema poprečnog presjeka pištolja za zavarivanje [19]	18
Slika 2.13. Utjecaj napona na izgled zavara, njegovu širinu i duljinu te na penetraciju dodatnog materijala [17]	19
Slika 2.14. Prikaz ovisnosti jakosti struje i brzine dovođenja žice [12].....	20
Slika 2.15. Ovisnost broja prenesenih kapljica žice o jakosti struje [2].....	21
Slika 2.16. Prikaz izgleda vrha pištolja – slobodan kraj žice i duljina električnog luka [12].	22
Slika 2.17. Ovisnost izgleda zavara o korištenom plinu [15].....	24
Slika 2.18. Utjecaj jakosti struje (I) i slobodnog kraja žice (δ) na način prijenosa kapljice [14]	26
Slika 2.19. Utjecaj sila na kapljicu žice [2].....	30
Slika 2.20. Djelovanje elektromagnetske sile na kapljicu [2]	30
Slika 2.21. Shematski prikaz MAG zavarivanja u kratkom spoju [9].....	31
Slika 2.22. Oscilogram zavarivanja kratkim spojem [2]	32
Slika 2.23. Zaštitna oprema za zavarivanje [9]	33
Slika 2.24. a) Princip rada spreja, b) Pinch efekt [9].....	34
Slika 2.25. Prikaz spreja, a) shema, b) fotografija [9].....	34
Slika 2.26. Oscilogram napona i jakosti struje pri zavarivanju sprejom [2]	35
Slika 2.27. Prikaz aksijalnog i kvazi-spreja [9].....	35
Slika 2.28. Količina dima u ovisnosti o sastavu zaštitnog plina, [9].....	37
Slika 2.29. Raspored režima rada s obzirom na napon i jakost struje [9]	38
Slika 2.30. Prikaz krupnokapljicaškog režima rada, a) shema, b) fotografija [9, 15].....	38
Slika 2.31. Karakteristika zavarivanja u krupnokapljicaškom režimu [10].....	39
Slika 2.32. Zavar izveden globularnim režimom rada [9].....	39
Slika 2.33. Čahura začepljena zbog prskanja kapljica [9].....	40
Slika 2.34. Zavarivanje pulsним režimom, a) shema, b) fotografija [15]	41
Slika 2.35. Prikaz pulsnoг režima rada [9]	42
Slika 2.36. Prikaz rotirajućeg luka, a) shema, b) fotografija [9].....	43
Slika 2.37. Grafički prikaz režima zavarivanja [9]	44
Slika 2.38. Prikaz postotka gubitka materijala u ovisnosti o količini CO ₂ plina na eksperimentalnoj ploči od čelika debljine 8 mm [9].....	49

Slika 2.39. Izgled zavara s CO ₂ kao zaštitnim plinom [15]	50
Slika 2.40. Koncentracije plinova CO ₂ , CO i O ₂ pri MAG zavarivanju [14]	51
Slika 2.41. Izgled zavara u ovisnosti o sadržaju CO ₂ [9]	52
Slika 2.42. Izgled zavara s argonom kao zaštitnim plinom [15]	53
Slika 2.43. Shema praškom punjene žice i pune žice (d1-promjer žice, d2-unutarnji promjer cjevčice punjene žice) [11].....	56
Slika 2.44. Shema različitih načina spajanja šavnih punjenih žica [15]	58

POPIS TABLICA

Tablica 1.1. Podjela postupaka zavarivanja [3].....	2
Tablica 1.2. Oblici spojeva zavarenih taljenjem (prema EN 22553) [1].....	6
Tablica 1.3. Oblici spojeva zavarenih pritiskom (prema EN 22553) [1]	6
Tablica 2.1. Karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice za određene promjere žice i jakosti struje [12].....	23
Tablica 2.2. Zaštitni plinovi koji se upotrebljavaju u MAG zavarivanju [14, 15]	25
Tablica 2.3. Udjeli plinova u mješavinama [12]	55
Tablica 2.4. Prikaz zastupljenosti nekih postupaka zavarivanja u razvijenim zemljama svijeta [9]	56
Tablica 2.5. Prikaz promjera žica s obzirom na vrstu žice [15]	57
Tablica 2.6. Sastav žica za zavarivanje za udarne energije do 47J [25].....	60
Tablica 2.7. Sastav žica za zavarivanje za udarne energije do 27J [25].....	61
Tablica 2.8. Žice za zavarivanje i navarivanje tvrtke Elektroda Zagreb d.d. [26]	63
Tablica 4.1. Prikaz nastavnog plana za prvi razred	72
Tablica 4.2. Prikaz nastavnog plana za drugi razred.....	75

POPIS KRATICA

Kratika	Opis kratice
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
EN	Standardi po europskim normama
Ar	Argon
CO ₂	Ugljikov dioksid
O ₂	Kisik
STT	Prijenos metala djelovanjem površinske napetosti
RMT	Brzi postupci MIG/MAG zavarivanja
CV	Konstantan napon
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
Cr	Krom
Ni	Nikal
N ₂	Dušik
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti praška
CO	Ugljikov monoksid
ISO	Međunarodni standardi
He	Helij
H ₂	Vodik

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
U	V	Napon
R	Ω	Otpor
I	A	Jakost struje
r	$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$	Specifična otpornost materijala
L	mm	Duljina slobodnog kraja žice
S	mm^2	Poprečni presjek žice
d	mm	Promjer tijela okruglog poprečnog presjeka
F_g	N	Sila gravitacije
r	mm	Radijus kapljice
ρ_s	A/mm^2	Gustoća struje
g	m/s^2	Ubrzanje sile teže
δ	mm	Slobodan kraj žice
F_{pn}	N	Sila površinske napetosti
R	mm	Radijus žice
γ	N/m	Površinska napetost rastaljenog materijala
F_{em}	N	Elektromagnetska sila
F_{emr}	N	Radijalna komponenta elektromagnetske sile
F_{ema}	N	Aksijalna komponenta elektromagnetske sile
μ_0	-	Permeabilnost vakuuma
r_s	mm	Radijus stupa električnog luka
r_v	mm	Radijus vrata kapljice
F_r	N	Sila reaktivnog djelovanja
m	kg/s	Masa isparenog metala
v_r	m/s	Brzina strujanja pare
F_{pl}	N	Sila strujanja plazme
C_d	-	Koeficijent strujanja plazme
ρ_f	kg/m^3	Gustoća taline (fluida)
v_f	m/s	Brzina taline (fluida)
F	N	Ukupna sila koja djeluje na kapljicu
P	kW	Snaga električne energije
η_s	-	Stupanj korisnog djelovanja stroja
ε	-	Intermitencija
P_0	kW	Snaga stroja u praznom hodu
E_{kg}	kW/kg	Električna energija za 1 kg depozita
k_t	kg/h	Koeficijent taljenja elektrode
$T_{el. energije}$	kn/kg	Troškovi električne energije
$C_{el.en.1}$	kn/kWh	Jedinična cijena električne energije
ρ	kg/m^3	Gustoća
A_{DM}	m^2	Površina depozita
v	m/h	Brzina zavarivanja
$T_{žice}$	kn/kg	Troškovi žice
$C_{žice1}$	kn/kg	Cijena žice
k'_t	kg žice/kg depozita	Koeficijent taljenja žice
T_{ODI}	kn/kg	Troškovi osobnog dohotka radnika

ODI	kn/h	Bruto iznos osobnog dohotka radnika
K_g	l/kg	Potrošnja plina
f_g	l/min	Protok plina
T_p	kn/kg	Troškovi plina
C_{pl}	kn/l	Cijena plina
T_{sl}	kn/h	Jedinični troškovi stroja
C_N	kn	Nabavna cijena stroja
K_{am}	-	Godišnja stopa amortizacije
K_{os}	-	Godišnja premija osiguranja
K_{od}	-	Godišnji iznos za održavanje
T_{uk}	kn	Ukupno glavni troškovi

SAŽETAK

U radu je opisan postupak MAG zavarivanja. U Uvodu se opisuju opći pojmovi o zavarivanju, navodi se podjela postupaka zavarivanja, povijesni razvoj zavarivanja, prednosti i nedostaci postupka, oblici zavara, vrste zavarenih spojeva te položaji zavarivanja.

U slijedećem poglavlju se obrađuje MAG postupak zavarivanja kroz opis postupka i kratak pregled razvoja MAG zavarivanja kroz povijest. Razrađeni su koncepti, parametri i režimi rada MAG postupka, vrste i karakteristike zaštitnih plinova te vrste i karakteristike dodatnog materijala.

U Metodičkom dijelu se analizira nastavni program strukovne škole vezan uz temu rada. Metodički dio sadrži i pripremu za izvođenje nastave za pripadnu razinu kvalifikacije u skladu s Hrvatskim kvalifikacijskim okvirom.

Na kraju rada je Zaključak, koji je osvrt na MAG postupak zavarivanja.

Ključne riječi: MAG postupak zavarivanja, parametri MAG zavarivanja, aktivni zaštitni plinovi, inertni zaštitni plinovi, režimi rada pri MAG zavarivanju

SUMMARY

This master's thesis describes MAG welding. In Prelude there is a description of welding, division by methods, development throughout history, advantages and disadvantages of process, shapes of welding joint, types of welding joints and welding positions.

In the next chapter, there is an elaboration of MAG welding through its description and its historical development. There is also elaboration of concepts, parameters and transfers of MAG welding, types and characteristics of shielding gases and types and characteristics of additional materials.

In Methodology section there is an analysis of a technical high school curriculum that is related to the theme of the thesis. Methodology section contains a lesson plan for the certain level of qualification in accordance with the Croatian Qualification Framework.

At the end there is Conclusion, which is retrospection of MAG welding.

Key words: MAG welding, parameters of MAG welding, active shielding gases, inert shielding gases, transfers of MAG welding

1. UVOD

1.1 Općenito o zavarivanju

Zavarivanje je postupak spajanja metalnih ili nemetalnih dijelova taljenjem ili omekšavanjem materijala na mjestu spoja s ili bez dodatnog materijala (dodatni materijal se dodaje u obliku žice koja se tali) uz upotrebu toplinske ili mehaničke energije. Spoj koji nastaje je homogen, a naziva se zavar. Zavar čine osnovni materijal (materijal obradka) i materijal zavara ili šava (dodatni materijal, odnosno žica, elektroda, prašak, traka). Zavar može nastati taljenjem osnovnog i dodatnog materijala ili pritiskom omekšanog osnovnog materijala (jednog ili više njih). Zavarivati se mogu različiti materijali: metali, kovine, polimeri, drvo, staklo. Uglavnom se zavaruju srodni materijali (materijali sličnih svojstava i iste vrste; npr. metal i metal, polimer i polimer ...) koji imaju približno jednaku temperaturu taljenja, no mogu se zavarivati i različiti (nesrodni) materijali. [1, 2]

Zavarivanjem nastaje nerastavljivi spoj, a to znači da je za rastavljanje dijelova koji su zavareni potrebno njihovo prisilno razdvajanje uz razaranje spoja.

Zavarivanje se primjenjuje za spajanje nosivih strojnih dijelova i raznih konstrukcija, posebno za pojedinačne izvedbe. Zbog napretka tehnologije, zavarivanje se sve više primjenjuje u mnogim proizvodnim procesima, a zahvaljujući istraživanjima i poboljšanjima svojstava materijala, moguće je postići visoka mehanička svojstva zavara. Ponekad su ta svojstva čak i bolja od svojstava osnovnog materijala obradka. [1]

Materijali pogodni za zavarivanje su čelik, čelični lijev, sivi lijev, bakar, nikal, titan, bakrene legure, legure nikla, legure titana, aluminij, aluminijske legure, umjetni materijali (polimeri, plastomeri) i dr.. [1]

Zavarivanje se može izvoditi na različitim lokacijama, od radionice do svemira¹, pa čak i pod vodom². Kao izvor energije može se koristiti mlaz vrućeg plina, električni luk, mlaz elektrona ili iona u vakuumu, laser, električna struja, trenje, ultrazvuk. [1]

¹ Prvo zavarivanje i toplinsko rezanje u svemiru je izvedeno u sovjetskom svemirskom brodu Sojuz 6 1969. godine.

² Prvo zavarivanje pod vodom je izveo 1932. Konstantin Khrenov u Rusiji postupkom elektrolučnog zavarivanja.

1.2 Postupci zavarivanja

Postoji više načina podjela postupaka zavarivanja. Jedna od njih je podjela prema izvoru energije, a detaljno je prikazana u Tablici 1.1.

Tablica 1.1. Podjela postupaka zavarivanja [3]

POSTUPCI ZAVARIVANJA			
Zavarivanje pritiskom	Kovačko zavarivanje		
	Plameno zavarivanje pritiskom		
	Aluminotermijsko zavarivanje pritiskom		
	Čeono zavarivanje električnim otporom	Zavarivanje pritiskom	
		Zavarivanje iskrenjem	
		Točkasto zavarivanje	
	Preklopno zavarivanje električnim otporom	Kolutno zavarivanje	
		Bradavičasto zavarivanje	
	Indukcijsko zavarivanje		
	Zavarivanje trenjem		
	Hladno zavarivanje		
	Zavarivanje ultrazvukom		
Zavarivanje difuzijom			
Zavarivanje eksplozijom			
Zavarivanje taljenjem	Ljevačko zavarivanje		
	Aluminotermijsko zavarivanje taljenjem		
	Zavarivanje plamenom		
	Lučno zavarivanje kovinskom elektrodom	Lučno zavarivanje u slobodnoj atmosferi	
		Lučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi	
	Lučno zavarivanje ugljikovom elektrodom		
	Zavarivanje pod troskom		
	Posebni postupci	Zavarivanje elektronskim snopom	
		Zavarivanje plazmom	
Zavarivanje laserom			

1.3 Kratak pregled povijesnog razvoja zavarivanja

Zavarivanje se počelo razvijati još u srednjem vijeku. Prvi oblik, odnosno postupak, zavarivanja je bilo kovačko zavarivanje za proizvodnju mačeva, strijela, koplja, noževa, posuda, nakita i dr. daljnji razvoj se događa 1802., kada ruski znanstvenik Vasilij Petrov istražujući električni luk, predlaže njegovu upotrebu u zavarivanju. Potom je 1882. ruski znanstvenik Nikolaj Benardos prvi upotrijebio električni luk između ugljikove elektrode i metala i pritom dodavao žicu u metalnu kupku. To je bilo prvo zavarivanje kakvoga ga danas poznajemo. Slijedeća novost u zavarivanju je bila uvođenje metalne elektrode 1888. po preporuci ruskog znanstvenika Nikolaja Slavljanova. Godine 1895. se počinju primjenjivati postupci aluminotermijskog zavarivanja i zavarivanja plinskim plamenom. Od 1907. se počinju primjenjivati obložene elektrode. Od 1925. se primjenjuju zaštitni plinovi. U početku se koristio vodik, a kasnije počinje upotreba helija i argona. U SAD-u se u brodogradnji 1930. počinje primjenjivati postupak automatskog zavarivanja pod praškom. Tijekom i nakon Drugog svjetskog rata se razvijaju postupci TIG, MIG i MAG zavarivanja. Od 1948. se počinje primjenjivati hladno zavarivanje pod pritiskom. Nakon 1950. se razvijaju zavarivanje pod troskom, zavarivanje trenjem, zavarivanje elektronskim snopom, zavarivanje ultrazvukom, zavarivanje laserom, zavarivanje plazmom i dr. [4]

1.4 Prednosti i nedostaci zavarenih spojeva

Prednosti zavarenih spojeva: [1, 5, 6]

- Velika nosivost; nosivost je približno jednaka nosivosti osnovnog materijala (ponekad može biti i veća)
- Tanje stjenke zavarenih konstrukcija u odnosu na lijevane, kovane ili zakovične spojeve (konstrukcije)
- Masa zavarenih konstrukcija je i do 50% manja u odnosu na lijevane, kovane i zakovične spojeve konstrukcija, a zadržavaju dobra mehanička svojstva
- Jednostavnije oblikovanje konstrukcija u odnosu na one dobivene kovanjem i lijevanjem
- Nisu potrebni modeli ili kalupi
- Ekonomičnost, posebno za mali broj proizvoda

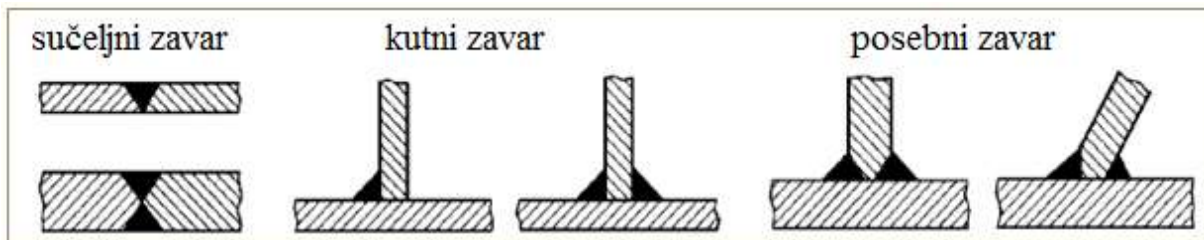
Nedostaci zavarenih spojeva: [1, 6]

- Materijali pogodni za zavarivanje su oni koji imaju jednaka ili približno jednaka svojstva i kvalitetu
- Moguća su zaostala naprezanja na mjestu spoja zbog lokalnog zagrijavanja i neravnomjernog rastezanja i skupljanja materijala, a da bi se otklonila, obradak treba podvrgnuti postupku žarenja
- Potrebne su pripreme obradka za postupak zavarivanja (oblikovanje žlijeba, čišćenje materijala)
- Zavarene konstrukcije su podložnije koroziji te je potrebna dodatna zaštita od korozije
- Manja je sposobnost prigušenja vibracija
- Nije pogodno za složene oblike konstrukcija
- Nije pogodno za velike serije
- Kvaliteta spoja ovisi o iskustvu i sposobnostima zavarivača
- Na terenu (npr. gradilištu) je često lakše izvođenje vijčanog ili zakovičnog spajanja, nego zavarivanja

1.5 Oblici zavora

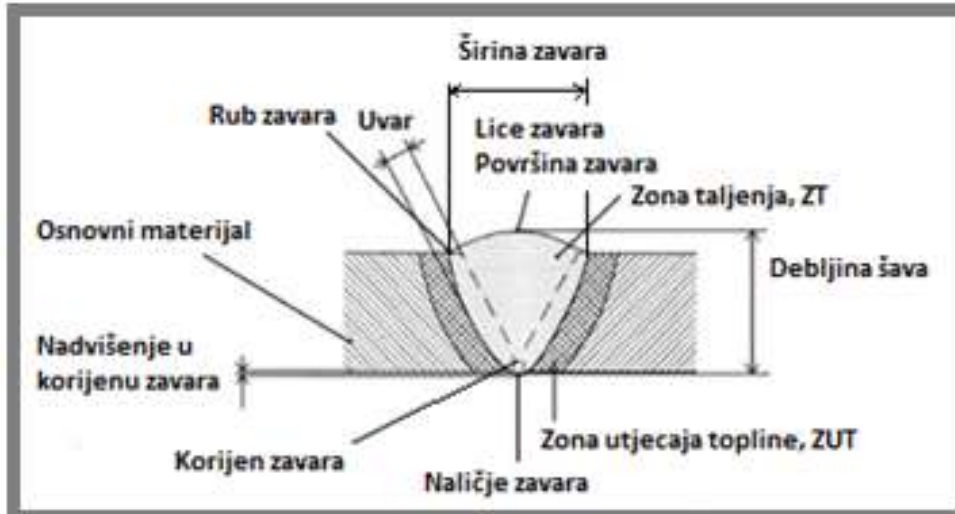
Oblici zavora se s obzirom na međusobni položaj dijelova koji se zavaruju dijele u tri skupine (Slika 1.1.):

- Sučeljeni
- Kutni
- Posebni.



Slika 1.1. Oblici zavora s obzirom na međusobni položaj [1]

Na Slici 1.2. su prikazani dijelovi zavora.



Slika 1.2. Dijelovi zavora [7]

1.6 Oblici zavarenih spojeva

Oblici spojeva zavarenih taljenjem prikazani su u Tablici 1.2.

Tablica 1.2. Oblici spojeva zavarenih taljenjem (prema EN 22553) [1]

Naziv zavara	Oznaka	Priprema	Izvedba	Naziv zavara	Oznaka	Priprema	Izvedba
Sučeonni spojevi							
Zavar s ivicom				Polovični Y zavar			
I zavar				Dvostruki Y zavar			
V zavar				K zavar			
Polovični V zavar				U zavar			
Široki V zavar				Dvostruki U zavar			
X zavar				J zavar			
Y zavar				Dvostruki J zavar			
Kutni spojevi							
Kutni zavar				Ugaoni zavar			
Dvostruki kutni zavar							
Rubni spojevi							
Rubni plosnati zavar				Rubni V zavar			

Oblici spojeva zavarenih pritiskom prikazani su u Tablici 1.3.

Tablica 1.3. Oblici spojeva zavarenih pritiskom (prema EN 22553) [1]

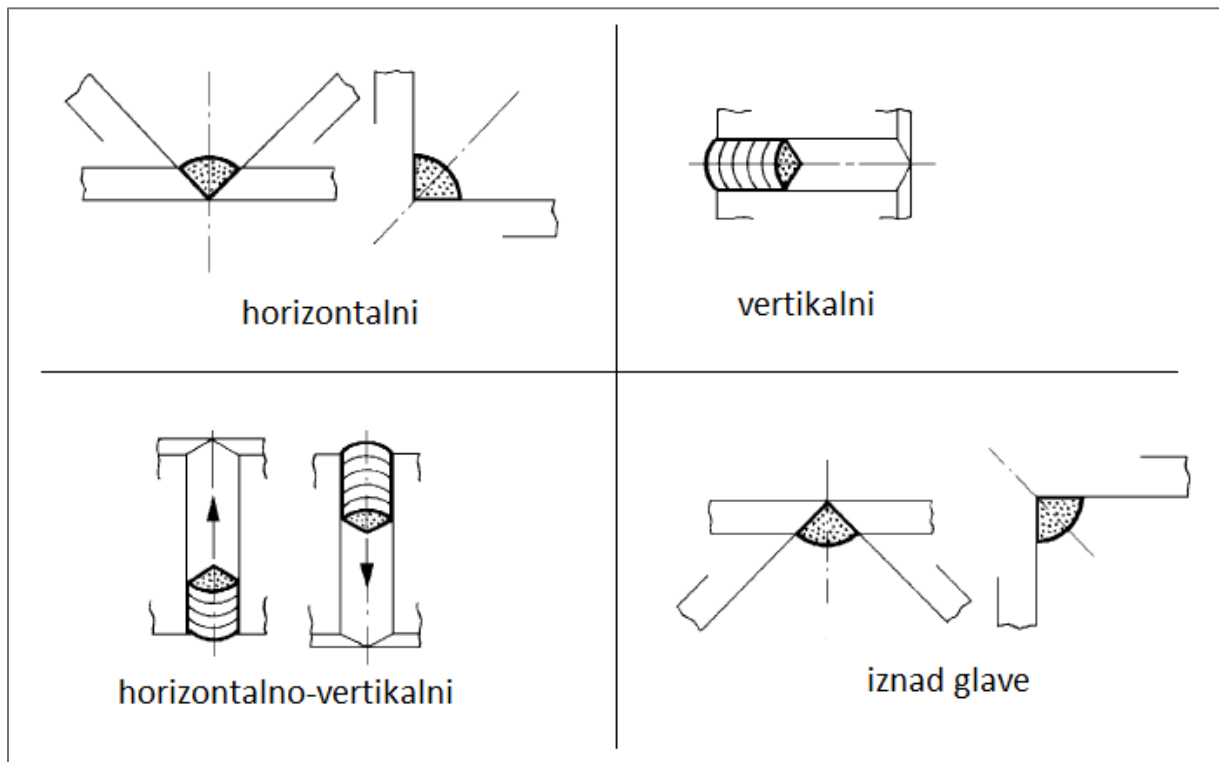
Naziv	Oznaka	Priprema	Izvedba	Naziv	Oznaka	Priprema	Izvedba
Čeonni spojevi							
Zavar s zadebljanjem				Gnječeni zavar			
Zavar sa srhom							
Preklopni spojevi							
Jednoredni točkasti zavar				Bradavičasti zavar			
Dvoredni točkasti zavar				Šavni zavar			

1.7 Položaji zavarivanja

Položaji zavarivanja (Slika 1.3.) se dijele s obzirom na položaj u kojemu se zavarivanje izvodi na:

- Horizontalni
- Vertikalni
- Horizontalno-vertikalni
- Položaj nad glavom (nadglavni). [5]

Najlakše i najkvalitetnije se izvodi zavarivanje u horizontalnom položaju. Najteže je raditi u položaju nad glavom. [5]



Slika 1.3. Položaji zavarivanja [1]

2. ZAVARIVANJE MAG POSTUPKOM

2.1 MAG postupak zavarivanja

MAG (engl. *Metal Active Gas*) zavarivanje (Slika 2.1.) je postupak elektrolučnog zavarivanja pri kojem se materijal obradka tali u aktivnom zaštitnom plinu ili smjesi plinova taljivom elektrodom, koja je u obliku žice.



Slika 2.1. Zavarivanje MAG postupkom [8]

Različiti aktivni zaštitni plinovi ($\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$) su se počeli upotrebljavati relativno nedavno, no prije se koristio samo CO_2 . Zato se u žargonu ovaj postupak još naziva i CO_2 zavarivanje. [9]

Električni luk se uspostavlja između taljive elektrode (kontinuirana žica) i obradka, koji je obično spojen na pozitivan pol istosmjernog izvora struje. Materijal se prenosi tako da se na obradak (osnovni materijal) prenosi kapljica rastaljene elektrode (žice) slobodnim padom kroz električni luk (zavarivanje sprejom, plazmom) ili dodiranjem kapljice i obradka (zavarivanje kratkim spojem). [10]

MAG zavarivanje je poluautomatski proces zavarivanja, a može se i automatizirati i robotizirati. Roboti za MAG zavarivanje se vrlo često upotrebljavaju na proizvodnim linijama u autoindustriji. Zavarivač ručno održava konstantan slobodan kraj žice, vodi pištolj (prema naprijed ili nazad i niže ga), a automatski se reguliraju brzina žice, održavanje dužine luka, nagib napona i jakosti struje, jakost struje, napon. Navedene parametre na uređaju za zavarivanje namješta odgovorna osoba (to može biti i sam zavarivač, ako ima potrebna znanja), a uređaj ih automatski održava (detaljnije objašnjeno u poglavlju 2.4 Parametri MAG zavarivanja). [9]

Namještanje parametara zavarivanja ovisi o materijalu obradka, debljini obradka, materijalu žice, promjeru žice, vrsti žice, zaštitnom plinu, položaju zavarivanja, željenoj kvaliteti i svojstvima zavara i zavarenog spoja, kvaliteti uređaja za zavarivanje (ne mogu svi postići visoke jakosti struje), režimu rada, a sve to ovisi i o raspoloživim sredstvima za trošak i iskustvu zavarivača. Iskusniji zavarivači mogu raditi s parametrima u rubnim zonama između različitih režima rada, dok je za manje iskusne zavarivače preporučljivo raditi u sigurnim zonama i stabilnim režimima rada da bi se smanjila mogućnost nekontroliranog rada i pojave grešaka u zavaru. [9]

MAG zavarivanje je slično MIG postupku (engl. *Metal Inert Gas*) zavarivanja, uz razlike u režimima rada, zaštitnom plinu (kod MIG postupka se primjenjuje inertni plin, primjerice argon, a kod MAG aktivni plin, CO₂ ili mješavina CO₂ i argona ili kisika) i vrsti elektrode (žice). [11]

2.2 Povijesni razvoj MAG zavarivanja

Smatra se da su postupak osmislili i razvili u bivšem SSSR-u Lyubavshkii i Novoshilov 1953. godine. Primijenili su ga za zavarivanje čelika istim postupkom i opremom kao za MIG zavarivanje, koje je razvijeno i postalo komercijalno 1948. godine u SAD-u³, ali u zaštiti plina CO₂. Idući veći razvoj MAG zavarivanje je doživjelo 1959. godine, kada se počinje upotrebljavati zavarivanje u kratkom spoju, zbog upotrebe žica manjih promjera i boljih izvora struje. Zavarivanje u kratkom spoju se vrlo brzo prihvatilo od tvornica do malih radionica i samoukih bravara i limara, posebno zato jer se više nije moralo samo horizontalno zavarivati, već se moglo raditi i vertikalno ili u kosom položaju. U početku su se primjenjivale pune žice, a 1954. godine se počinju upotrebljavati punjene rutilne žice, 1959. samozaštitna punjena žica, a 1975. metalom punjene žice. Impulsno zavarivanje se razvilo 1965. godine na britanskom Institutu za zavarivanje, a u komercijalnu upotrebu je uvedeno 1990. godine. Razvojem tiristora i invertera 70-ih godina prošlog stoljeća se poboljšavaju svojstva izvora struje tako da su manja odstupanja tijekom rada, brže su reakcije uređaja na promjene uvjeta u radu, omogućeno je bolje kontroliranje električnog luka zahvaljujući razvoju algoritma koji pokazuje linearnu ovisnost frekvencije impulsnog luka o brzini dovođenja žice u pištolj. Daljnji razvoj MAG zavarivanja se pokazuje u poboljšanju svojstava uređaja, materijala tehnologije postupka te se postiže veća produktivnost, manji utrošak energije, veća brzina rada itd. Razvijeni su u današnje vrijeme i drugi postupci zavarivanja, koji se temelje na MAG postupku, a to su STT postupak (*Surface Tension Transfer*), RMT postupak (*Rapid MIG/MAG Technology*), MAG postupak s dvije žice. [9, 12]

Primjena MAG zavarivanja:

- Proizvodno zavarivanje, navarivanje, reparaturno zavarivanje većine metalnih materijala
- Zavarivanje tankih limova i cijevi (1-20 mm), iako može i za obradke većih debljina, ako je ekonomski ili tehnološki opravdana primjena MAG postupka zavarivanja⁴. [13]

³ Koncept MIG zavarivanja su osmislili 1926. god. Hobart i Devers, a postao je komercijalan 1948. god. Primjenjivao se za zavarivanje aluminija i drugih obojenih metala uz inertne zaštitne plinove, poput helija i argona. To je bio vrlo značajan izum jer su se izbjegavali aluminijevi oksidi, koji izlaze u obliku troske i koji su izazivali koroziju te su se morali naknadno odstranjivati.

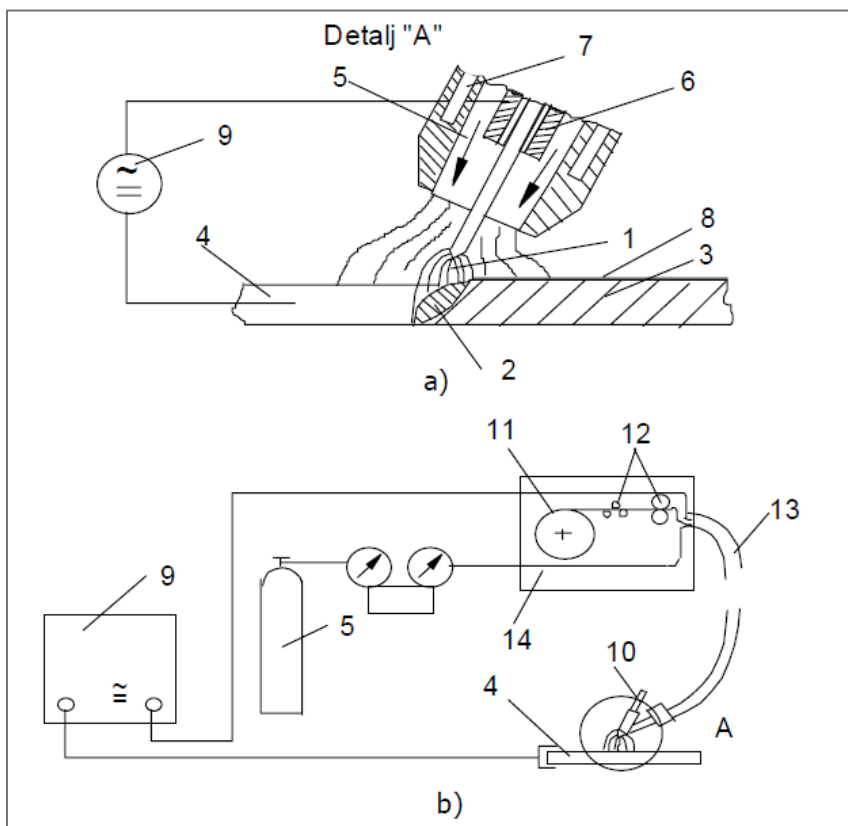
⁴ Nije pogodno za zavarivanje obradaka velikih debljina zbog nedovoljne penetracije materijala.

2.3 Koncepti MAG zavarivanja

Koncepti (komponente) MAG zavarivanja su:

- Izvor struje (CV, *Constant Voltage*)
- Dodavač žice
- Sustav za zaštitni plin (boca s plinom/plinovima, redukcijski ventil, crijevo od ventila do uređaja za zavarivanje)
- Pištolj za zavarivanje s polikablom
- Komandni ormarić

Shema MAG zavarivanja prikazana je na Slici 2.2.



Slika 2.2. Shema MAG zavarivanja, a) uvećani prikaz pištolja, b) shema sustava

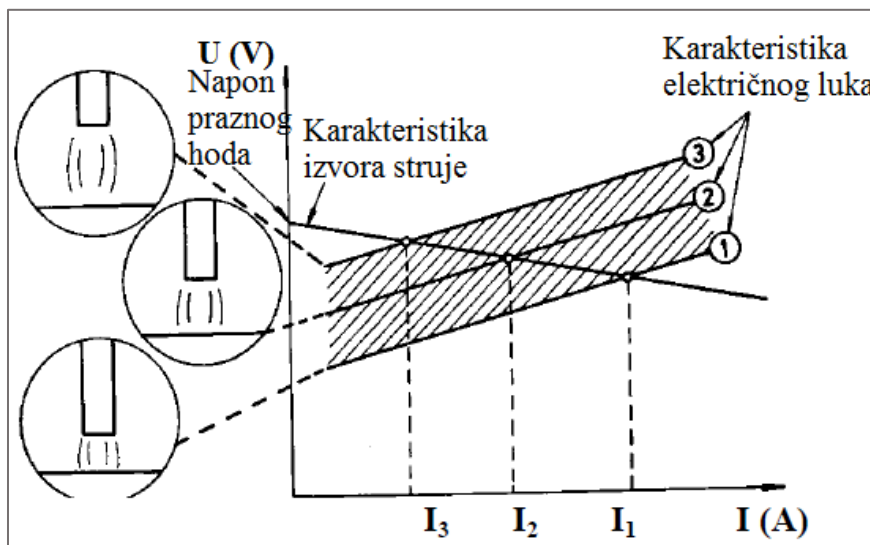
(1 – električni luk, 2 – rastaljeni materijal, 3 – skrućeni zavar, 4 – osnovni materijal, 5 – zaštitni plin, 6 – kontaktna vodilica, 7 – hlađenje vodom, 8 – troska, 9 – izvor struje, 10 – pištolj, 11 – kolut žice, 12 – valjci za dodavanje žice, 13 – dodavač/provodnik, 14 – komandni ormarić) [11]

2.3.1 Izvor struje

Kao izvor struje se kod MAG zavarivanja koristi istosmjerna struja jer omogućuje stabilan električni luk, ravnomjeran prijenos žice (dodatnog materijala), dobre karakteristike spoja u širokom opsegu jakosti struje, male gubitke zbog prštanja. [9, 14]

Uređaji, koji se mogu koristiti kao izvori struje, su transformatori (daju izmjeničnu struju s karakteristikama pogodnim za zavarivanje), ispravljači (daju istosmjernu struju), rotacijski pretvarači (daju pogodnu izmjeničnu struju – stabiliziraju je, a može se dodati i ispravljač da se dobije istosmjerna struja), agregati (daju struju pogodnu za zavarivanje, samostalni, pokretani dizel ili benzinskim motorom) ili inverteri (daju istosmjernu struju ili visokofrekventnu pulsirajuću struju koja se transformira na struju pogodnu za zavarivanje). [15]

Statička karakteristika izvora struje (nagib – ovisnost napona i jakosti struje) je ravna ili blago padajuća, što omogućuje samoregulaciju električnog luka. [14]



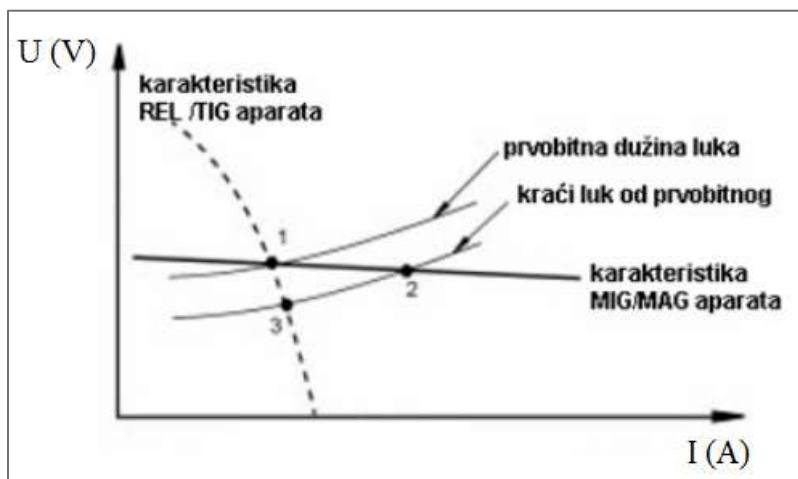
Slika 2.3. Statička karakteristika izvora struje (nagib) [14]

Na Slici 2.3. je prikazana statička karakteristika izvora struje, na kojoj se može uočiti tzv. efekt samoregulacije luka. Duljina luka se određuje podešavanjem napona na uređaju za zavarivanje. Kada se podesi napon na neki iznos, zavarivač ne može promijeniti duljinu luka primicanjem ili odmicanjem pištolja od obradka kojega zavaruje. Napon ostaje isti cijelo vrijeme, dok ga se na uređaju ne promijeni, a tako i duljina luka ostaje ista. Kada zavarivač primiče pištolj obradku i tako pokuša smanjiti luk (karakteristika luka 3 – 1 na Slici 2.3.),

raste jakost struje (jakost od I_3 do I_1 na Slici 2.3.) i tali višak žice sve dok se ne odmakne pištolj i dobije se ona duljina luka, na koju je uređaj podešen na početku rada vrijednošću napona. U suprotnom slučaju, ako se pištolj odmiče od obradka (karakteristika luka 1 – 3 na Slici 2.3.) i time povećava duljina luka, jakost struje će se smanjivati (jakost I_1 do I_3 na Slici 2.3.) i tako će se žica sporije taliti sve dok se pištolj ponovno ne primakne obradku, a duljina luka bude jednaka prvobitno namještenoj vrijednosti prema podešenom naponu. [9, 14]

Dakle, zavarivač na uređaju podešava vrijednost napona, a jakost struje se automatski podešava prema vrsti materijala žice, promjeru žice, brzini dovođenja žice u pištolj te slobodnom kraju žice (slobodan kraj žice koji viri iz dizne tijekom zavarivanja). [9]

Da bi se lakše uočilo svojstvo nagiba uređaja, na Slici 2.4. su usporedno prikazane karakteristike MAG/MIG uređaja i REL/TIG uređaja.



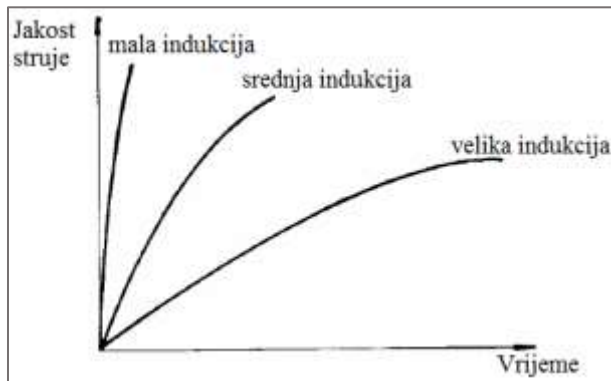
Slika 2.4. Usporedba statičke karakteristike uređaja za MAG/MIG zavarivanje i uređaja za REL/TIG zavarivanje [9]

Osim statičke karakteristike uređaja, treba se kontrolirati i dinamička karakteristika, a to je indukcija.

Elektromagnetska indukcija je pojava da se u zavoju vodljive žice stvara električni napon kada se mijenja magnetski tok kojega obuhvaća zavoj vodljive žice. [16]

Indukcija u zavarivanju se još naziva i prigušenje jer omogućuje kontrolu rasta i pada jakosti struje (Slika 2.5.), a najčešće se kontrolira pad jakosti struje. Posebno se ovo koristi kod zavarivanja kratkim spojem jer u trenutku kada rastaljena kapljica žice padne u kupku i napravi kratki spoj, napon pada na nulu. Jakost struje bi u tom trenutku rasla vrlo brzo da uređaj za zavarivanje odmah reagira na pad napona. Zbog velike jakosti struje kapljica žice bi se raspršila i ne bi se dogodilo penetriranje u materijal, već samo naljepljivanje i prskanje od eksplozije kapljice. Kontrola indukcije se ostvaruje dodavanjem dodatnog kalema i otpornika u strujni krug. Dodatni kalem i otpornik omogućuju smanjenje jakosti struje zato jer se u njima stvara elektromagnetsko polje koje stvara struju suprotnu struji zavarivanja i tako daje

otpor povećanju jakosti struje. Osim što se usporava rast jakosti struje, ovakvim dodavanjem indukcije se još i smanjuje broj kratkih spojeva te je i dulje vrijeme gorenja luka. Zbog duljeg vremena gorenja luka, veća je toplina koju stvara luk pa je materijal žice fluidniji i bolje se razlijeva po površini materijala koji se zavaruju, a penetracija je dublja. [9]



Slika 2.5. Utjecaj indukcije (prigušnice) na jakost struje [14]

Povećanje indukcije za kontrolu rasta jakosti struje je vrlo korisno pri radu sa žicama promjera 1,0 i 1,2 mm te materijala žice koji u rastaljenom stanju imaju velik površinski napon pa im treba više topline za razlijevanje po materijalu koji se zavaruje (na uređaju priključak s oznakom tri vala za indukciju na Slici 2.6.).

Kod žica promjera 0,6 i 0,8 mm se postupak povećanja indukcije ne primjenjuje jer te žice same imaju dovoljno velik otpor i same prigušuju jakost struje, odnosno njezin porast (na uređaju priključak s oznakom jednog vala za indukciju na Slici 2.6.).

Da bi se moglo optimalno raditi ovim postupkom, potrebno je dobro i precizno podesiti parametre rada na uređaju. Ako bi se parametri namjestili tako da je indukcija premala, događati će se prštanje kapljica žice. Ako bi indukcija bila prevelika, jakost struje ne bi dovoljno brzo rasla i ne bi se materijal žice dovoljno zagrijavao i talio, već bi se žica nabijala u materijal.

Kod zavarivanja u spreju, kontrola indukcije se ne primjenjuje kao kod zavarivanja kratkim spojem jer se pri zavarivanju sprejom ne događa kratki spoj za samo zavarivanje, već samo pri paljenju luka. Indukcija se koristi samo u tom slučaju za bolje paljenje luka i to tako da bude što manja (na uređaju priključak s oznakom jednog vala za indukciju za čelik, a priključak s oznakom dva vala za aluminij na Slici 2.6.). Izuzetak je kod zavarivanja aluminijskom žicom, kada je dobro povećati indukciju zbog boljeg „starta“ pri zavarivanju, odnosno, zbog boljeg paljenja luka. [9]

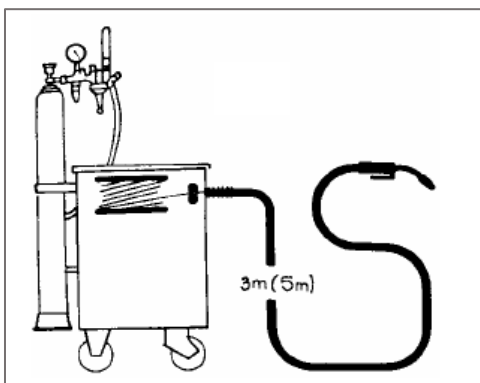


Slika 2.6. Uređaj za MAG zavarivanje [9]

2.3.2 Dodavač žice

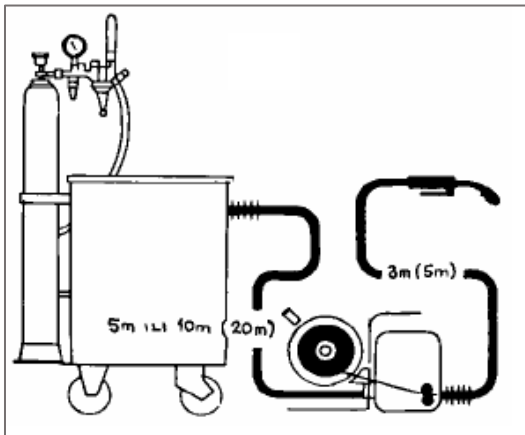
Dodavač žice je uređaj koji dovodi žicu od uređaja do pištolja, a postoji nekoliko izvedbi uređaja i sustava za dovod žice do pištolja.

Kabinski sustav (Slika 2.7.) se primjenjuje kada se radi na jednom radnom mjestu, koje je nepokretno. Na kabelu je naznačeno za koje su radne udaljenosti predviđeni pojedini sustavi za dovodnje žice. Kolut žice i pogonski mehanizam su smješteni u kućištu uređaja. [14]



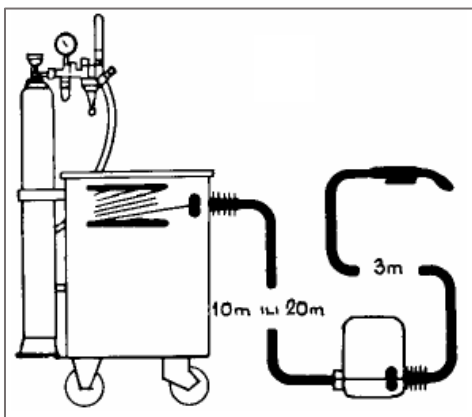
Slika 2.7. Kabinski sustav za dovodnje žice [14]

Univerzalni sustav (Slika 2.8.), kako i sam naziv ukazuje, se primjenjuje na različitim radnim mjestima i za velike radne komade. Mehanizam za dovod žice i kolut žice su smješteni izvan kućišta uređaja. [14]



Slika 2.8. Univerzalni sustav za dovođenje žice [14]

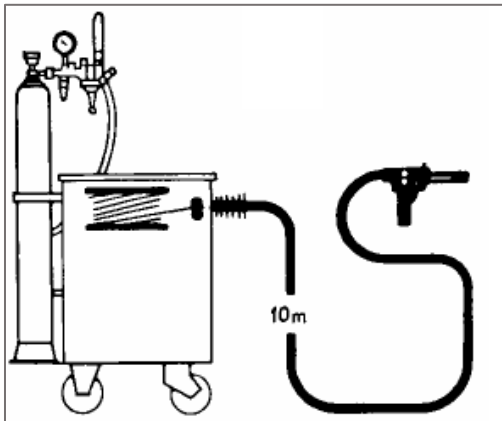
Tandemski uređaj (Slika 2.9.) ima dva pogonska mehanizma. Jedan mehanizam je u kućištu uređaja uz kolut žice, a drugi je između uređaja i pištolja u blizini radnog mjesta. Ovaj uređaj se primjenjuje za rad na različitim radnim mjestima, velikim radnim komadima i nepristupačnim radnim komadima. [14]



Slika 2.9. Tandemski sustav za dovođenje žice [14]

„Push – pull“ sustav (Slika 2.10.) ima dva mehanizma za dodavanje žice, kao i tandemski. Jedan mehanizam je u kućištu uređaja, a drugi je u pištolju (taj mehanizam vuče žicu, a ne

gura je). „Push – pull“ sustav se primjenjuje za rad na nepristupačnim radnim mjestima (jer kolot žice ne smeta). [14]



Slika 2.10. „Push – pull“ sustav za dovođenje žice [14]

2.3.3 Sustav za zaštitni plin

Sustav za zaštitni plin se sastoji od boce s plinom, redukcijuskog ventila, elektromagnetskog ventila i crijeva za dovod plina. Redukcijski ventil na sebi ima regulator i mjerac protoka plina, na kojemu se podešava, odnosno prati, količina plina koja će se dovoditi do pištolja. Elektromagnetskim ventilom se otvara i zatvara protok plina, a smješten je u blizini sustava za dovođenje žice. [17]

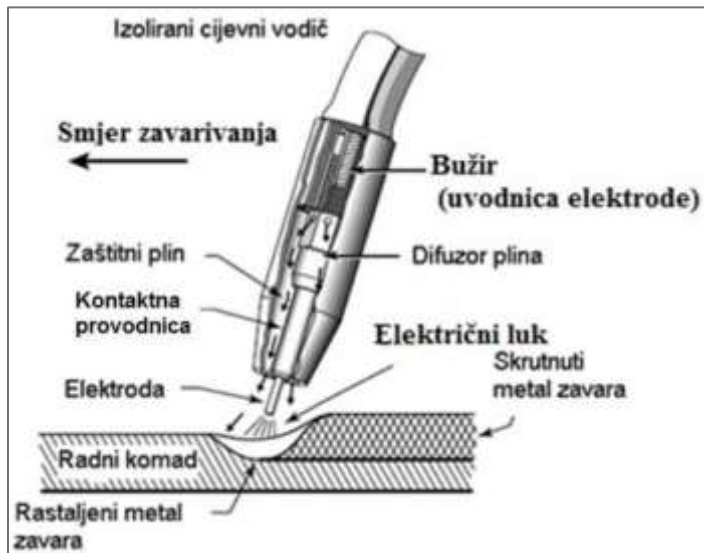
Za protok plina se obično uzima da je deset puta veći od promjera žice. Dakle, ako se koristi žica promjera 0.6 mm, protok plina će se postaviti na 6 l/min. Ako se koristi žica promjera 1.2 mm, protok plina će se postaviti na 12 l/min. [9]

2.3.4 Pištolj za zavarivanje (gorionik)



Slika 2.11. Pištolj/gorionik za zavarivanje s polikablom [18]

Pištolj za zavarivanje (Slika 2.11.) služi za dovod struje, upravljačkih signala, zaštitnog plina, žice za zavarivanje te rashladne tekućine. Postoji više različitih izvedbi pištolja, a izbor ovisi o vrsti zavarivanja, korištenom zaštitnom plinu, jakosti struje koja će se primjenjivati te o tome ima li potrebe za hlađenjem pištolja. [17]



Slika 2.12. Shema poprečnog presjeka pištolja za zavarivanje [19]

2.3.5 Komandni ormarić (kućište uređaja)

U kućištu uređaja se nalazi upravljački sustav koji upravlja radom uređaja, može biti kolut sa žicom, crijevo za dovod zaštitnog plina. Upravljački sustav kontrolira način uključivanja izvora struje zbog uspostavljanja i prekidanja električnog luka, dodavanje žice, protok zaštitnog plina, održavanje parametara zavarivanja konstantnima. Može imati i dodatne funkcije poput povećanja jakosti struje na početku rada zbog boljeg paljenja luka, postupno smanjenje jakosti struje na kraju rada, za bolje završavanje zavarivanja, kombinacija ovih dviju funkcija i dr. [17]

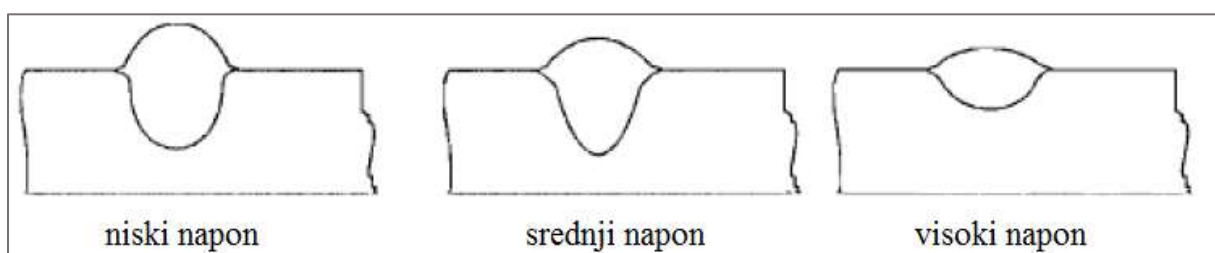
2.4 Parametri MAG zavarivanja

O parametrima zavarivanja ovisi kakve će kvalitete biti zavareni spoj i konstrukcija, koja je zavarena. Postoji više parametara koji se podešavaju prema željenom postupku zavarivanja (točnije režimu rada) i željenoj kvaliteti zavarenog spoja, a najvažniji su:

- Napon
- Jakost struje
- Brzina dovođenja žice
- Slobodan kraj žice
- Zaštitni plin
- Indukcija. [9, 12]

2.4.1 Napon

Napon utječe tako da o njemu ovise duljina i širina električnog luka. Ovisnost duljine i širine električnog luka o naponu je proporcionalna. Dakle, ako se povećava napon, povećavaju se i duljina i širina električnog luka, odnosno, ako se smanji napon, smanjuju se i duljina i širina električnog luka. Veći napon daje dulji i širi električni luk, ali penetracija materijala je pritom manja i iako zavar možda ljepše izgleda, ima slabija mehanička svojstva. Utjecaj napona na izgled zavara je prikazan na Slici 2.13. Podešavanje napona ovisi o podešenoj jakosti struje, čime se postiže određeni nagib rada uređaja, a treba biti ravan ili blago padajući. Ova karakteristika je objašnjena u poglavlju 2.3.1 Izvor struje, a zorno predloženo Slikom 2.4. [12, 20]



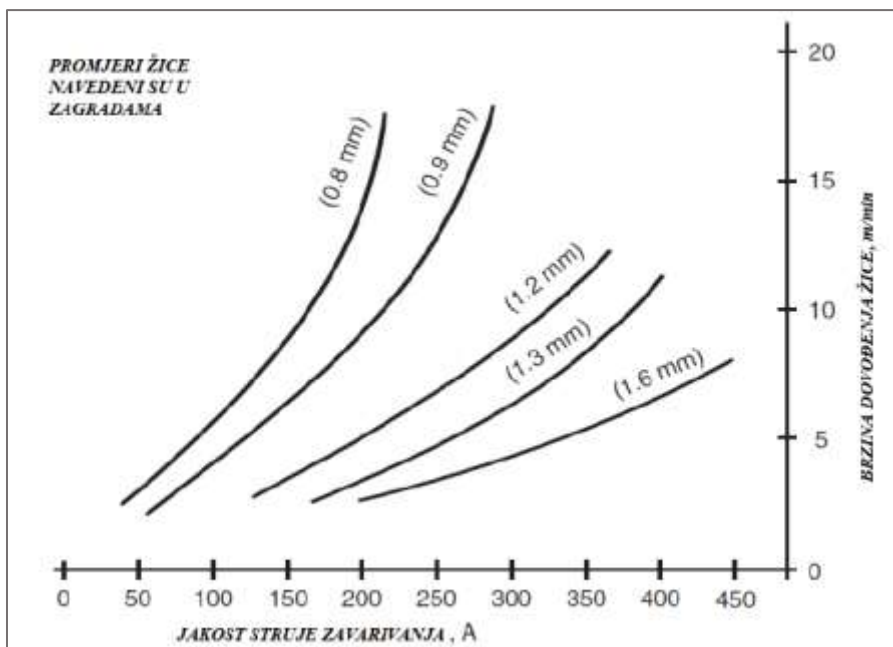
Slika 2.13. Utjecaj napona na izgled zavara, njegovu širinu i duljinu te na penetraciju dodatnog materijala [17]

Nagib je vrlo važna funkcija/parametar pri zavarivanju kratkim spojem i sprejom. Kod zavarivanja kratkim spojem o nagibu napona i jakosti struje ovisi do koje će vrijednosti rasti jakost struje. To je važno zbog „glatkog“ odvajanja kapljice žice iz luka i njenog dobrog razlijevanja po materijalu, umjesto da kapljica samo padne/“bućne“ u metalnu kupku ili se rasprši, jer bi se tada dogodilo neželjeno prštanje. Nagib se podešava u ovisnosti o materijalu i promjeru žice, brzini žice te o korištenom zaštitnom plinu. Posebno se treba obratiti pažnja

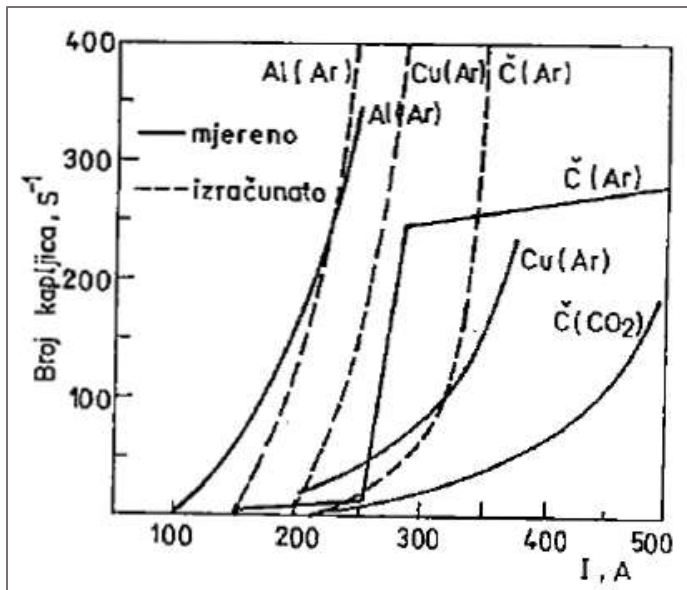
ako se za plin koristi čisti CO₂, jer je tada potreban stabilniji transfer da ne bi došlo do prštanja. Kod zavarivanja sprejom nagib treba biti malen da bi se ostvario sprej sa sitnim kapljicama, koje se jednoliko odvajaju od žice. [9]

2.4.2 Jakost struje

O jakosti struje ovisi kako će se rastaljena žica prenositi na obradak, stabilnost električnog luka, penetracija materijala, nadvišenje zavara, koeficijent taljenja (količina rastaljenog materijala) te brzina zavarivanja. Uz uvjet da je napon konstantan, jakost struje ovisi o brzini žice, promjeru žice, duljini slobodnog kraja žice i materijalu (Slika 2.14.). [12, 15, 17, 20]



Slika 2.14. Prikaz ovisnosti jakosti struje i brzine dovođenja žice [12]



Slika 2.15. Ovisnost broja prenesenih kapljica žice o jakosti struje [2]

2.4.3 Brzina dovođenja žice

Da bi se objasnio utjecaj brzine dovođenja žice, slobodnog kraja žice i promjera žice, objasniti će se utjecaj jednog po jednog na jakost struje.

U Europi se brzina dovođenja žice iskazuje u metrima po minuti (m/min). Brzina dovođenja žice je proporcionalna jakosti struje, odnosno, ako se poveća brzina dovođenja žice, povećati će se i jakost struje. Vrijedi i obrnuto, ako se smanji brzina dovođenja žice, smanjiti će se i jakost struje. Ova proporcionalna ovisnost jakosti struje i brzine dovođenja žice ovisi o vrsti (odnosno proizvođaču) uređaja, ali većinom je ta ovisnost u jednom dijelu linearna. [9, 12]

2.4.4 Slobodan kraj žice

Slobodan kraj žice (Slika 2.16.) je obrnuto proporcionalan jakosti struje. Dakle, ako je veći slobodan kraj žice, manja je jakost struje i obrnuto, ako je manji slobodan kraj žice, veća je jakost struje. [9, 20] To se može jednostavno dokazati pomoću jednadžbe Ohmovog zakona, prema kojemu vrijedi:

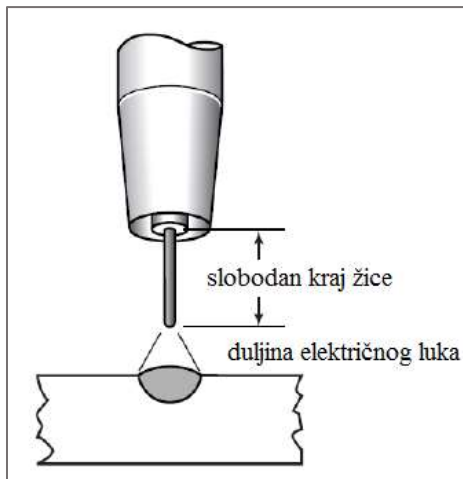
$$U = R \cdot I , \quad \dots (2.1)$$

gdje je:

U – napon

R – otpor

I – jakost struje. [9]



Slika 2.16. Prikaz izgleda vrha pištolja – slobodan kraj žice i duljina električnog luka [12]

S obzirom na to da je napon konstantan (tako je podešen na uređaju), može se iz prethodne jednadžbe izvesti slijedeća:

$$I = \frac{\text{const.}}{R}, \quad \dots (2.2)$$

gdje je:

I – jakost struje

R – otpor.

Prema jednadžbi za otpor

$$R = r \cdot \frac{L}{S}, \quad \dots (2.3)$$

gdje je:

R – otpor

r – specifična otpornost materijala

L – duljina slobodnog kraja žice

S – poprečni presjek žice (računa se po formuli: $S = \frac{d^2 \cdot \pi}{4}$, gdje je d promjer žice),

može se izvesti da je:

$$I = \frac{\text{const.} \cdot S}{r \cdot L}. \quad \dots (2.4)$$

Ako se analizira utjecaj ova dva parametra na jakost struje, može se zaključiti da se ona ne mijenja, ako se oba parametra povećavaju. Rečeno je da se povećanjem brzine dovođenja žice povećava jakost struje, a povećanjem slobodnog kraja žice se jakost smanjuje. Dakle, jakost struje ostaje ista. No, važno je da slobodan kraj žice bude konstantan da bi penetracija materijala bila nepromijenjena. U Tablici 2.1. su prikazane neke karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice. [9, 12]

Tablica 2.1. Karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice za određene promjere žice i jakosti struje [12]

PROMJER ŽICE (mm)	JAKOST STRUJE (A)	SLOBODAN KRAJ ŽICE (mm)
(0.6 , 0.8) mm	≤100 A	≤10 mm
(0.9 , 1.2) mm	100-200 A	10-15 mm
(1.2 , 1.4) mm	200-350 A	15-20 mm
(1.6 , 2.0) mm	≥350 A	20-25 mm

Promjer žice je obrnuto proporcionalan otporu žice, što se može zaključiti iz formule (2.3). Da bi se to potkrijepilo, izvesti će se formula (2.3):

$$R = \frac{r \cdot 4 \cdot L}{d^2 \cdot \pi}, \quad \dots (2.5)$$

gdje je:

R – otpor

r – specifična otpornost materijala

L – duljina slobodnog kraja žice

d – promjer žice.

Kada se formula (2.5) uvrsti u formulu (2.2), dobije se da je:

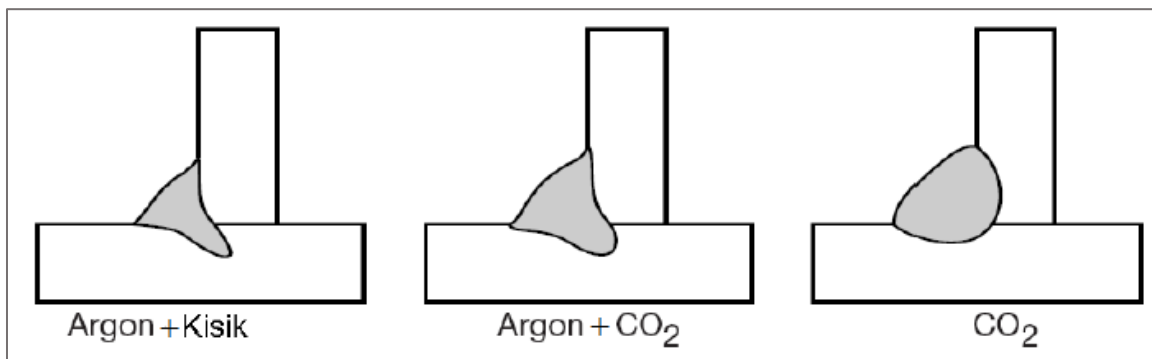
$$I = \frac{const. \cdot d^2 \cdot \pi}{r \cdot 4 \cdot L}. \quad \dots (2.6)$$

Iz toga se može zaključiti da će jakost struje biti veća, ako je promjer žice veći i obrnuto, ako je promjer žice manji i jakost struje će biti manja. To vrijedi uz uvjet da je brzina dovođenja žice nepromijenjena. [9]

2.4.5 Zaštitni plin

Zaštitni plinovi se koriste zbog nekoliko razloga:

- zaštita materijala (zavara) od atmosferskih utjecaja (posebice kisika), odnosno oksidacije i poroznosti jer se smanjuju mehanička svojstva zavara
- stvaranje plazme (plin provodi električnu struju, zagrijava se i toplinu predaje žici i materijalu koji se zavaruje te ih tako tali i zavaruje; problem je što zrak između žice i materijala koji se zavaruje ne provodi električnu struju pa se zbog toga uvode drugi plinovi)
- omogućuju potrebnu geometriju profila zavara (utječu na širinu zavara i penetraciju materijala) (Slika 2.17.)
- njima se kontroliraju transferi/režimi rada
- utječu na stabilnost električnog luka
- utječu na brzinu zavarivanja. [9, 12, 14, 20]



Slika 2.17. Ovisnost izgleda zavara o korištenom plinu [15]

Izbor zaštitnog plina ovisi o postupku zavarivanja, odnosno režimu rada, materijalu, željenoj dubini penetracije materijala, dimenzijama i geometriji zavara, brzini zavarivanja, raspoloživoj opremi, troškovima. Za MAG zavarivanje se koriste aktivni zaštitni plinovi jer lakše stupaju u reakcije i tako štite zavar od grešaka. Uglavnom se koristi CO_2 ili mješavina $\text{Ar} + \text{CO}_2$, mješavina $\text{Ar} + \text{O}_2$, mješavina $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$. [9, 20]

U Tablici 2.2. su prikazani zaštitni plinovi i materijali za koje se ti plinovi koriste.

Tablica 2.2. Zaštitni plinovi koji se upotrebljavaju u MAG zavarivanju [14, 15]

Zaštitni plin	Materijali za koje se primjenjuje
CO ₂	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + CO ₂ (20-50%)	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + 2.5% CO ₂	Visokolegirani CrNi čelici
Ar + O ₂ (do 2%)	Aluminij, aluminijeve legure, visokolegirani CrNi čelici
Ar + CO ₂ + O ₂	Nelegirani i niskolegirani čelici
N ₂	Bakar i bakrene legure
CO ₂ + O ₂	Nelegirani čelici

Karakteristike pojedinog plina su opisane u poglavlju 2.7 Zaštitni plinovi za MAG zavarivanje.

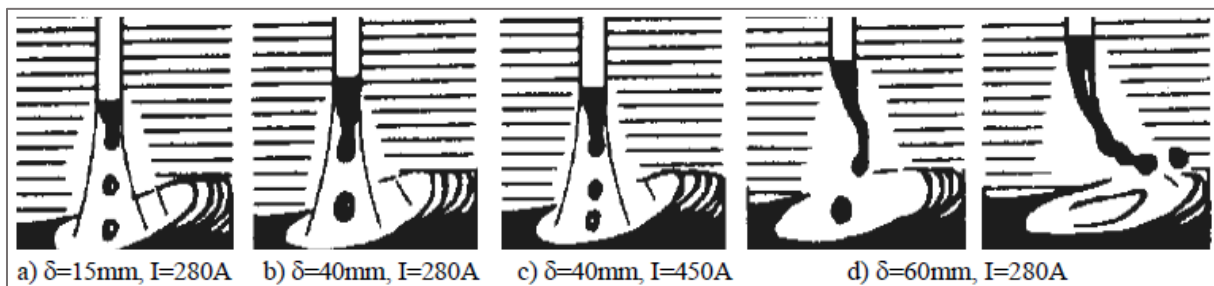
2.5 Režimi rada MAG zavarivanja

Zavarivanje MAG postupkom ima nekoliko različitih režima rada, a koristi se i izraz transfer zavarivanja. Režimi rada ovise o načinu prijenosa kapljice sa žice u metalnu kupku. To su [9, 12]:

- Zavarivanje u stabilnom režimu kratkog spoja
- Zavarivanje u stabilnom režimu spreja
- Zavarivanje u stabilnom režimu pulsa
- Zavarivanje u stabilnom režimu rotacijskog luka
- Zavarivanje u nestabilnom krupnokapljicačastom režimu.

Transfer ili režim rada je način kako se rastaljene kapljice sa žice ulijevaju u metalnu kupku na osnovnom materijalu. Kapljice žice se mogu ulijevati na mjesto gdje je predviđeno i potrebno da se ulijevaju, što je dobar režim rada. To znači da su parametri na uređaju dobro podešeni. Drugi način, koji je nepoželjan, je da se kapljice žice malo ulijevaju na potrebno mjesto zavarivanja, a puno pršte okolo. To znači da parametri na uređaju nisu dobro podešeni i zavarivanje neće biti kvalitetno izvršeno. [9]

Način prijenosa materijala ovisi o jakosti struje, naponu, materijalu i promjeru žice te o zaštitnom plinu (Slika 2.18.). [12, 14, 19]



Slika 2.18. Utjecaj jakosti struje (I) i slobodnog kraja žice (δ) na način prijenosa kapljice [14]

Pojedini režim rada će biti objašnjen u nastavku, no prije će se objasniti neke karakteristike električnog luka.

Električni luk je trajno pražnjenje elektriciteta u ionizirajućem plinu između slobodnog kraja žice i obradka uz vrlo visoke temperature (do oko 6000°C) i gustoću struje, a oslobađa se puno topline i svjetlosti. [2, 15, 17, 21]

S obzirom na vrstu struje zavarivanja električni luk može biti [21]:

- Luk istosmjernje struje (vrši se odabir polariteta za žicu i za obradak i ostaje nepromjenjiv za vrijeme zavarivanja)⁵
- Luk izmjenične struje (polaritet se mijenja ovisno o frekvenciji korištene električne struje)⁶
- Pulsirajući električni luk (sustavno se mijenja jakost struje).

Karakteristike električnog luka su [2, 17]:

- Sadrži plinove i metalne pare
- Dobar je provodnik električne struje i topline
- Oko električnog luka se stvara magnetsko polje
- Emitira elektromagnetska zračenja (vidljivi spektar, ultraljubičasto, infracrveno)
- Ima visoku temperaturu (do 6000°C)
- Prenosi kapljice rastaljene žice od pištolja do metalne kupke
- Plinovi struje prema gore (prema pištolju), a tlak električnog luka prema dolje (prema metalnoj kupki).

Uspostavljanje električnog luka se može izvesti [2]:

- Dodirom žice i obradka (kratki spoj)
- Visokofrekventnim generatorom kojim se uz visoku frekvenciju, visoki napon i malu jakost struje izaziva iskrenje u području ispod žice, zbog proboja izolacije zraka između žice i obradka. Iskra izaziva ionizaciju zraka i dolazi do prijenosa električne struje i uspostave električnog luka
- Trećom elektrodom (žicom) kojom će se povezati žica i obradak da bi došlo do kratkog spoja i uspostavljanja električnog luka
- Umetanjem kuglice od strugotine metalne vune koja isparava prolaskom jake struje i ionizira zrak te se uspostavlja električni luk.

⁵ Izvor struje je ispravljač.

⁶ Izvor struje je transformator.

Kapljice se sa žice u metalnu kupku prenose slobodnim padom ili kratkim spojem. Pritom na kapljicu djeluju sile [2, 12]:

- Sila gravitacije, F_g , koja može djelovati u smjeru prijenosa ili smjeru suprotnom prijenosu kapljice, ovisno o položaju zavarivanja. Sila gravitacije se računa po formuli:

$$F_g = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho \cdot g, \quad \dots (2.7)$$

gdje je:

r – radijus kapljice ($r = \frac{d}{2}$)

ρ_s – gustoća struje

g – ubrzanje sile teže.

- Sila površinske napetosti, F_{pn} , sprječava otkidanje kapljice i prijenos materijala. Računa se po formuli:

$$F_{pn} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \gamma, \quad \dots (2.8)$$

gdje je:

R – radijus žice

γ – površinska napetost rastaljenog materijala.

- Elektromagnetska sila (Lorentzova sila), F_{em} , nastaje zbog utjecaja magnetskog polja na rastaljenu kapljicu kroz koju prolazi električna struja i na kapljicu djeluje poput škara („pinch“ efekt). Računa se po formulama:

$$F_{emr} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{8 \cdot \pi} \quad \dots (2.9)$$

(radijalna komponenta, djeluje pri formiranju kapljice)

$$F_{ema} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{r_s}{r_v} \quad \dots (2.10)$$

(aksijalna komponenta, djeluje zbog nejednolikog presjeka žice nakon formiranja vrata kapljice),

gdje je:

μ_0 – permeabilnost vakuuma

I – jakost struje

r_s – radijus stupa električnog luka

r_v – radijus vrata kapljice ($r_v = \frac{d_v}{2}$).

- Sila reaktivnog djelovanja, F_r , djeluje u smjeru suprotnom od smjera prijenosa kapljice, a nastaje zbog isparavanja metala na žici. Računa se po formuli:

$$F_r = m \cdot v_r, \quad \dots (2.11)$$

gdje je:

m – masa isparenog metala

v_r – brzina strujanja pare.

- Sila uzrokovana strujanjem plazme, F_{pl} , djeluje kao magnetsko polje električnog luka u smjeru prijenosa metala i uzrokuje strujanje plazme od manjeg prema većem promjeru električnog luka. Računa se po formuli:

$$F_{pl} = C_d \cdot r \cdot \left(\frac{\rho_f \cdot v_f}{2} \right), \quad \dots (2.12)$$

gdje je:

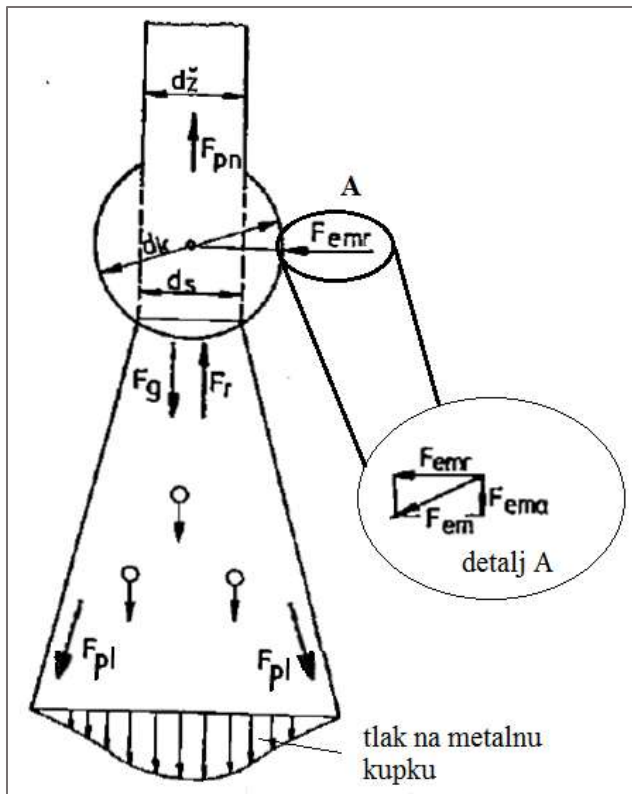
C_d – koeficijent strujanja plazme

r – radijus kapljice

ρ_f – gustoća taline (fluida)

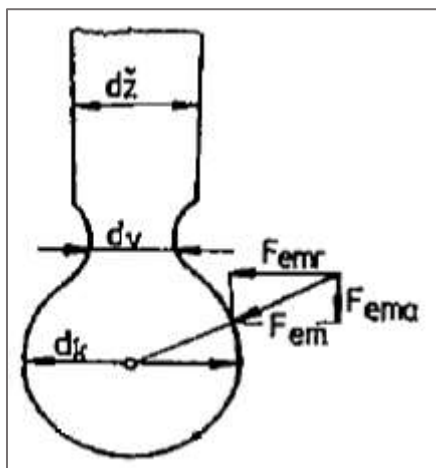
v_f – brzina taline (fluida).

Utjecaj sila na kapljicu je prikazan na Slici 2.19. uz izdvojen detalj A, na kojemu je prikazano na koje se komponente dijeli elektromagnetska sila. Slika 2.20. prikazuje kako izgleda kapljica na koju je djelovala elektromagnetska sila, a može se uočiti smanjen promjer vrata kapljice.



Slika 2.19. Utjecaj sila na kapljicu žice [2]

(d_z – promjer žice, F_{pn} – sila površinske napetosti, d_k – promjer kapljice, F_g – gravitacijska sila, F_r – sila reaktivnog djelovanja, F_{pl} – sila uzrokovana strujanjem plazme, F_{em} – elektromagnetska sila: F_{emr} – radijalna komponenta, F_{ema} – aksijalna komponenta)



Slika 2.20. Djelovanje elektromagnetske sile na kapljicu [2]

(d_z – promjer žice, d_v – promjer vrata kapljice, d_k – promjer kapljice, F_{em} – elektromagnetska sila: F_{emr} – radijalna komponenta, F_{ema} – aksijalna komponenta)

Ukupna sila koja djeluje na kapljicu je jednaka zbroju svih sila koje djeluju na kapljicu, a može se izračunati po formuli [2]:

$$F = F_g + F_{pn} + F_r + F_{pl} + F_{em} . \quad \dots (2.13)$$

Najmanji unos energije u zavareni spoj daje zavarivanje kratkim električnim lukom. Ovakav postupak se najčešće primjenjuje za zavarivanje tankih limova (jer nije potrebna duboka penetracija u materijal).

2.5.1 Zavarivanje u kratkom spoju

Zavarivanje u kratkom spoju se vrlo često primjenjuje, a pogodno je za zavarivanje tankih limova jer se primjenjuju žice manjih promjera i radi se s manjom jakosti struje. [9, 14, 22]

Najveća prednost zavarivanja kratkim spojem je malen unos topline, zbog čega su i manje deformacije materijala i manje je grešaka i zaostalih naprezanja u materijalu. [12, 22]

Nedostatci ovog režima rada su što je potrebna zaštita područja zavarivanja kada se radi na otvorenom prostoru, moguće je prskanje, ako svi parametri nisu dobro podešeni, nije pogodan za zavarivanje debljih radnih komada.

Shematski prikaz postupka zavarivanja u kratkom spoju je prikazan na Slici 2.21., uz objašnjenja pojedine faze ispod slike.



Slika 2.21. Shematski prikaz MAG zavarivanja u kratkom spoju [9]

Faza 1: formiran je dugačak luk, koji topi materijal i žicu. Na materijalu se formira metalna kupka, a na vrhu žice se formira rastaljena kapljica.

Faza 2: luk se skraćuje, rastaljena kapljica na vrhu žice se povećava i približava se materijalu obradka, odnosno metalnoj kupki.

Faza 3: luk nestaje (gasi se), kapljica se spaja s metalnom kupkom, a napon pada na nulu. Ovaj trenutak spajanja kapljice na žici s metalnom kupkom na osnovnom materijalu se naziva kratki spoj.

Faza 4: jakost struje naglo raste, a površinski napon metalne kupke na materijalu privlači kapljicu sa žice.

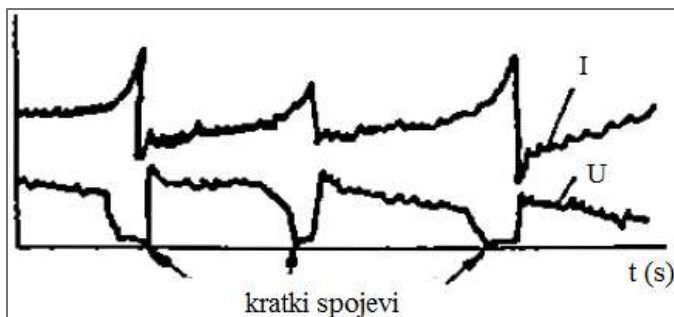
Nakon faze 4 se cijeli proces ponavlja, dakle, kapljica se odvojila, formira se nova kapljica na vrhu žice, luk je dugačak, a na materijalu se formira metalna kupka.

Da bi transfer/režim bio stabilan, treba biti 80 do 150 kratkih spojeva u sekundi i zato se uz postupak čuje zujanje, koje izaziva konstantno periodično paljenje i gašenje luka. Velika prednost konstantnog paljenja i gašenja luka je ta što se ne unosi velika količina topline u proces, a to omogućuje zavarivanje tankih limova i zavarivanje u različitim položajima.

Broj kratkih spojeva određuje zavarivač i treba ga podesiti tako da nema prštanja ili da je ono minimalno, razlijevanje materijala najbolje, a plazma luka najjača. Zavarivač parametre namješta na uređaju podešavajući napon, brzinu žice te slobodan kraj žice.

Ovaj postupak nije pogodan za zavarivanje materijala debljina većih od oko 4 mm, posebice ne sa slabijim uređajima, odnosno, manjim naponom. U takvom zavarivanju je problem što se događa naljepljivanje materijala, a ne penetracija u materijal te su spojevi zbog toga znatno manje čvrstoće. [9]

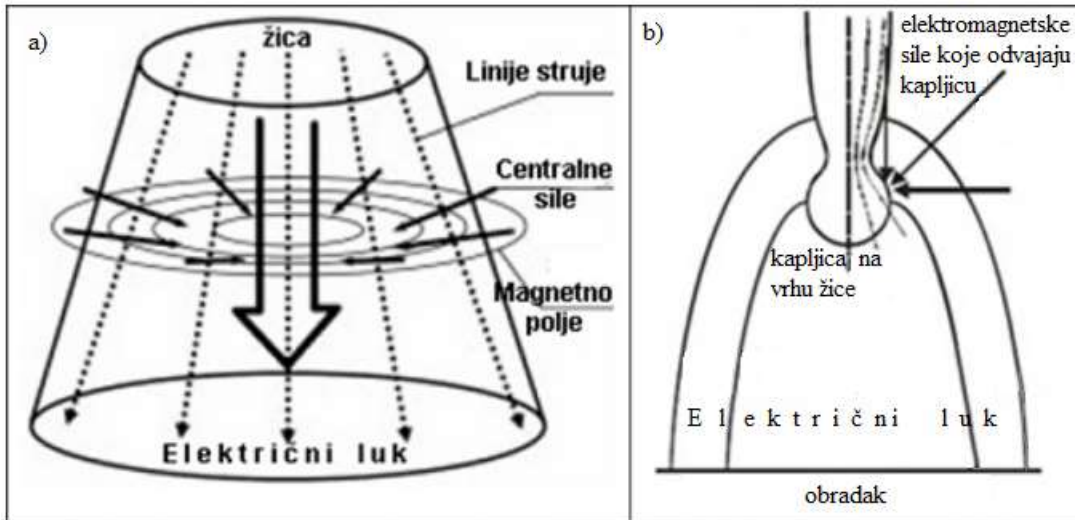
Materijali nepogodni za zavarivanje u kratkom spoju su aluminij i bakar. Razlog tome je što aluminij i bakar imaju veliku specifičnu toplinsku provodljivost.



Slika 2.22. Oscilogram zavarivanja kratkim spojem [2]

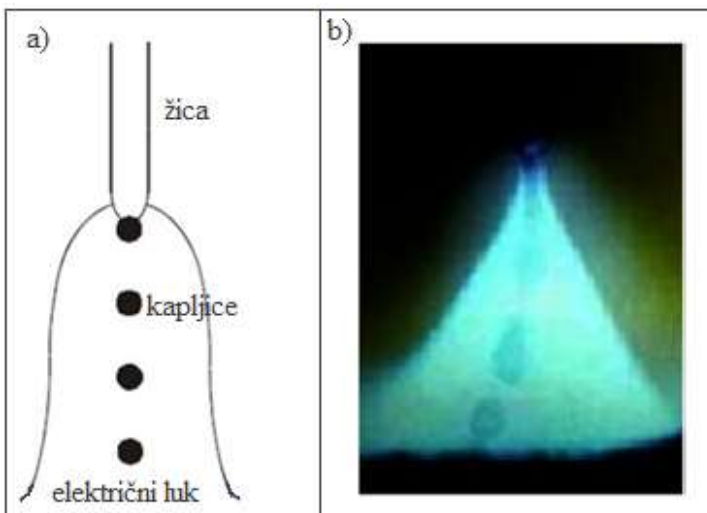
Na Slici 2.22. se mogu uočiti nagli padovi i rast napona i jakosti struje u režimu kratkog spoja. Pritom se kontrolira indukcija.

Na Slici 2.24. je prikazan izgled (Slika 2.24. a)) i princip rada spreja. Pri dovedu struje stvara se elektromagnetno polje, koje stvara Lorentzove centralne sile, koje na žicu djeluju poput škara i kidaju je na mjestu rastaljene kapljice (Slika 2.24. b)).

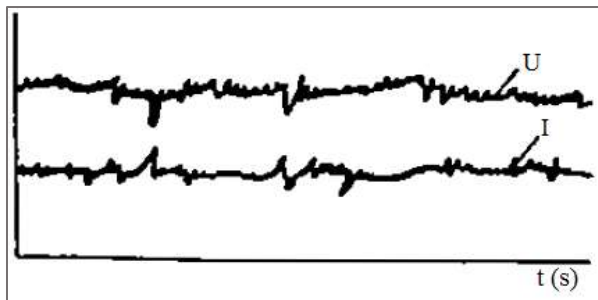


Slika 2.24. a) Princip rada spreja, b) Pinch efekt [9]

Pri ovom režimu rada luk je konstantno otvoren i ne gasi se, što omogućuje da se žica tali u obliku struje malih kapljica, odnosno spreja (otuda i naziv režima). Ovaj princip rada predočuje Slika 2.25.

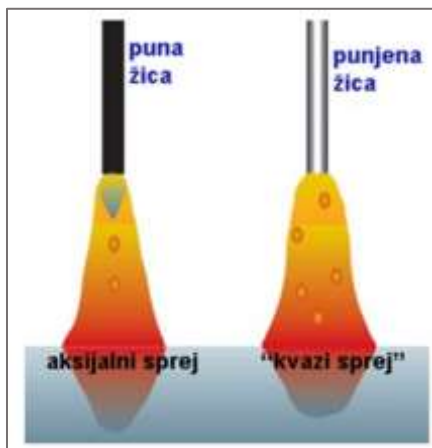


Slika 2.25. Prikaz spreja, a) shema, b) fotografija [9]



Slika 2.26. Oscilogram napona i jakosti struje pri zavarivanju sprejom [2]

Sprej može biti aksijalni, kod kojega su kapljice raspoređene duž osi žice, ili kvazi-sprej, kod kojega su kapljice raspoređene duž cijelog luka (Slika 2.27.). Razlika nastaje zbog različitih žica. Aksijalni sprej nastaje kada se koriste pune žice, a kvazi-sprej nastaje kada se koriste punjene žice. [9]



Slika 2.27. Prikaz aksijalnog i kvazi-spreja [9]

Zavarivanje u spreju nije lako postići i nužno je pritom da zavarivač dobro poznaje stanja prijelaznih zona taljenja žice. Već je rečeno da se znatno treba povećati parametre zavarivanja kada se želi postići režim rada u spreju, ali to nije tako lako postići, kako možda na prvi pogled izgleda. Između zone kratkog spoja i zone spreja je zona krupnokapljičastog nestabilnog transfera, kada kapljice prskaju posvuda i umjesto dobre penetracije u materijal, događa se naljepljivanje. To rezultira neurednim i nekvalitetnim zavarom. Zbog toga je važno da zavarivač dobro poznaje režime rada, točnije tolerancije za jakost struje i napon, materijale žica i karakteristike žica pojedinih promjera. Za svaki promjer i za svaki materijal žice prijelazne zone, odnosno početak spreja, različite su. Za sve promjere žica vrijedi otprilike da se najbolji režimi rada, odnosno najbolji sprej, postiže do oko 350 A jakosti struje. Za sve jakosti veće od 350 A dolazi do povećanja fluidnosti metalne kupke, može doći do zajeda na materijalu, zbog većeg unosa topline zrno u materijalu postaje grublje te se smanjuju mehanička svojstva zavara, površina zagrijanog materijala se povećava te ne može sva biti obuhvaćena zaštitnim plinom, nego reagira s atmosferom i oksidira, a može doći i do pukotina, posebno kod čelika većih čvrstoća. [9]

Optimalni uvjeti za zavarivanje u spreju [9, 15, 22]:

Jakost struje: 200 – 500 A

Napon: 20 – 40 V

Zaštitni plin: mješavina Ar + 18% CO₂ (najviše 18% CO₂)

Mješavina Ar + 1-5% O₂

Promjer žice: 1.0 do 2.4 mm

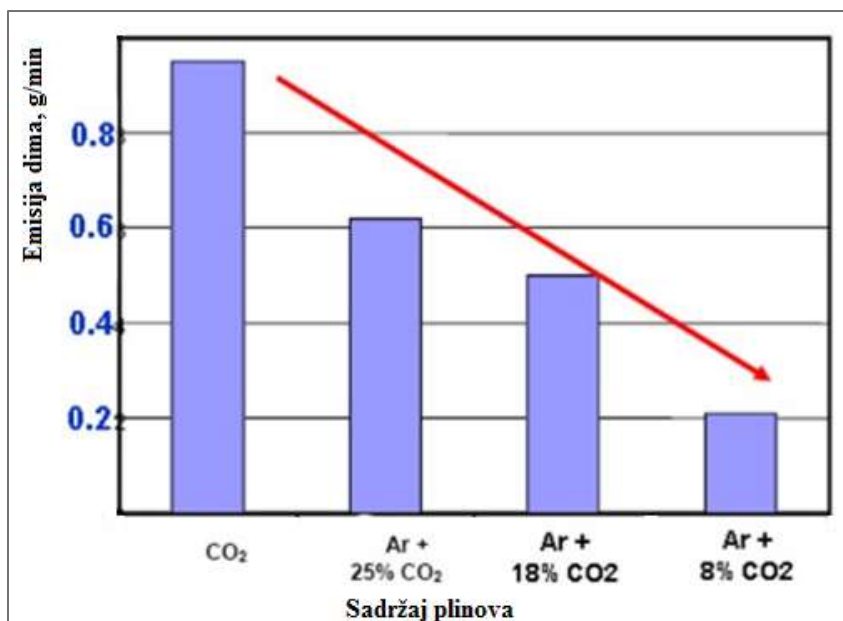
Slobodan kraj žice: 9-25 mm

Dizna: uvučena u čahuru

Ovaj postupak zavarivanja se često primjenjuje kod zavarivanja robotima. To je još jedan razlog zašto se moraju jako dobro poznavati režimi rada i karakteristike materijala i promjera žice za zavarivanje. Kada se određeni parametri zavarivanja programiraju za robota, on nije u stanju promijeniti ih tijekom zavarivanja. Zato zavarivač mora točne parametre rada predvidjeti i unijeti u robotski upravljački mehanizam, da bi njegov rad bio kvalitetan. [9]

Potrebne pripreme i neke karakteristike zavarivanja u spreju [9]:

- Materijal mora biti čist, odmašćen i dobro izbrušen
- Potrebna je kvalitetan i pouzdan uređaj s vodenim hlađenjem
- Potrebna je zaštita zavarivača od topline i isparavanja – maska s pročišćivačem zraka, rukavice, zaštitno odijelo, kožna jakna, pregača
- Potrebna je sustav za odvođenje plinova i dima (Slika 2.28)
- Slobodan kraj žice za rad u spreju je 50-100 % veći nego za rad u kratkom spoju
- Na visokim parametrima uređaj mora imati mali nagib
- Na rubovima može doći do slijeganja rastaljene žice zbog velike topline i fluidnosti metalne kupke, posebno kod žice 1,2 mm promjera
- Zbog visokih parametara rada dizne moraju biti kvalitetne i mijenjaju se nakon svakog koluta žice
- Pištolj se gura, ne njiše ga se
- Treba predvidjeti koliki je depozit žice pri radu
- Protok zaštitnog plina se određuje tako da je 10 puta veći od promjera žice. Za veće promjere žica je potrebno povećati protok zaštitnog plina za oko 40-50% zbog većeg dovoda topline i veće fluidnosti metalne kupke.
- Prednost rada robota je što mogu postići veće brzine rada (vođenje pištolja) pa mogu zavarivati i materijale debljina manjih od 3 mm.
- Zbog velikog unosa topline može doći do deformacija materijala.

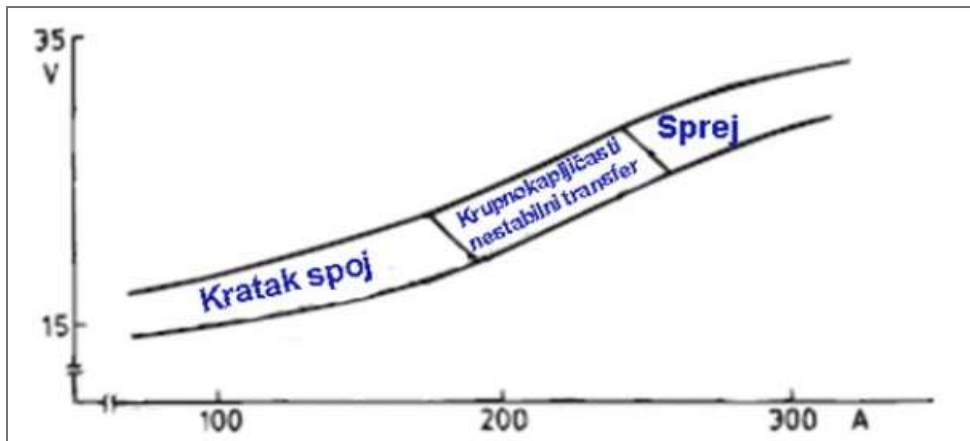


Slika 2.28. Količina dima u ovisnosti o sastavu zaštitnog plina, [9]

(parametri rada: brzina žice 13.5 m/min, jakost struje 285 A, napon 33-39 V, promjer žice 1.2 mm, vrsta žice SG2)

2.5.3 Zavarivanje krupnokapljičastim/globularnim transferom (prijelazni transfer)

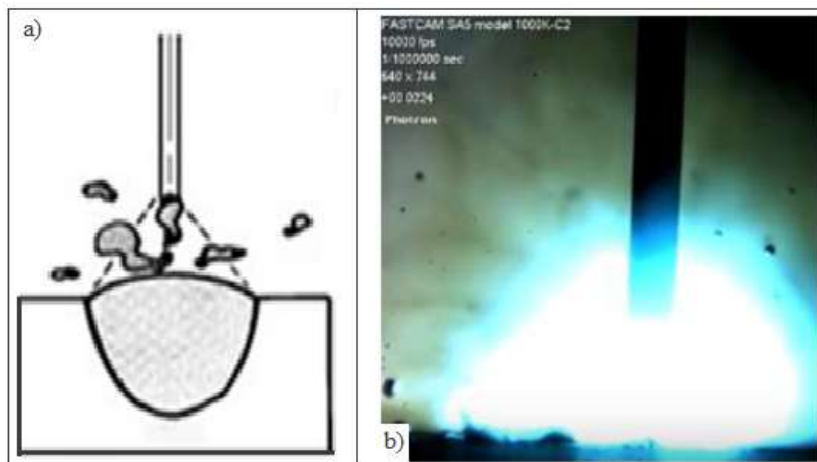
Zavarivanje u krupnokapljičastom režimu je nestabilan režim rada koji dovodi do prskanja kapljica i mnogih grešaka u zavaru i u materijalu. U ovom transferu zavarivači često rade nenamjerno kada pokušavaju podesiti parametre zavarivanja za rad u spreju. Kako je teško namjestiti parametre da bi se radilo u spreju, ako se ne poznaje dobro karakteristike materijala i žice, često zavarivači s nedovoljno znanja i iskustva prilikom podešavanja parametara na uređaju završe u krupnokapljičastom režimu. Na Slici 2.29. je prikazano kako su raspoređeni transferi zavarivanja u ovisnosti o naponu i jakosti struje. [9]



Slika 2.29. Raspored režima rada s obzirom na napon i jakost struje [9]

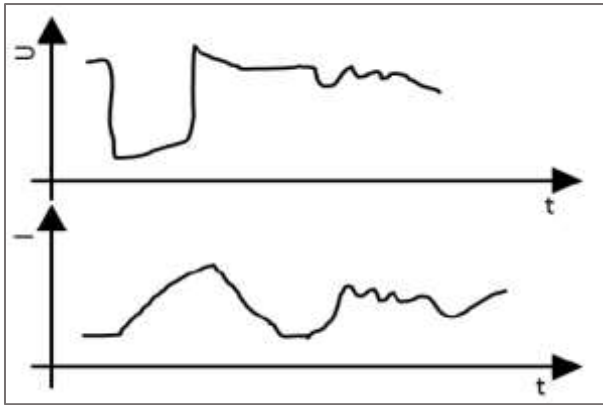
Zavarivanje u krupnokapljičastom režimu se primjenjuje za navarivanje i zavarivanje sa samozaštitnim žicama. Ovaj režim nije pogodan za zavarivanje s punim žicama. [9]

Zavarivati se mogu materijali debljina većih od 5 mm, nije pogodno za zavarivanje u prisilnim položajima, kapljice su različitih promjera te se prema tome oblikuje nepravilan zavar. [10, 22]



Slika 2.30. Prikaz krupnokapljičastog režima rada, a) shema, b) fotografija [9, 15]

Princip rada ovog postupka zavarivanja (Slika 2.30.) je takav da dijelom kapljice rastaljene žice lete na sve strane, dijelom dolazi do kratkog spoja, dijelom zbog porasta struje dolazi do eksplozije rastaljenog materijala koji je uzrokovao kratki spoj, dijelom se odvajaju velike kapljice koje padaju u rastaljenu metalnu kupku i prskaju oko. U osnovi se sastoji od rada u spreju (štrcajućim lukom) i rada u kratkom spoju (Slika 2.31.). Teško je raditi u ovom režimu zbog nestabilnog luka i jer ga je teško kontrolirati. [9, 15]



Slika 2.31. Karakteristika zavarivanja u krupnokapljičastom režimu [10]

Zavar je nepravilan, izbrazdan i grube površine. Izgled zavara je prikazan na Slici 2.32.



Slika 2.32. Zavar izveden globularnim režimom rada [9]

Ovakav izgled materijala nije dozvoljen. S obzirom da se teže podešavaju parametri za rad u spreju, često se radi u krupnokapljičastom režimu pa se radni komadi moraju brusiti da ne bi bilo onečišćenja kapljicama metala na njemu, što zahtjeva dodatno vrijeme i troškove, a to nije poželjno. Još jedan način izbjegavanja onečišćenja kapljicama metala je tzv. anti-splatter sprej, gel ili tekućina. To sredstvo se nanosi na materijal prije zavarivanja i onda se kapljice koje prskaju oko materijala ne zavare za materijal, nego se samo navare i lako se odstrane špahtlom. Problem s tim sredstvima je što nije poznato kakve zdravstvene probleme mogu uzrokovati kemikalije koje sadrži sprej. [9, 12]

Luk tijekom zavarivanja gori, na vrhu žice se formira kapljica (koja je većeg promjera nego žica) i njiše se (kao da „pleše“), potom se odvaja i pada u metalnu kupku ili odleti negdje na stranu ili se rasprši. Problem koji se javlja pri ovakvom zavarivanju je što se nekontrolirane kapljice nanese preko čahure i dizne pa blokiraju protok plina. To se mora stalno čistiti i odstranjivati te se smanjuje produktivnost u radu. [9, 12] Na Slici 2.33. je prikazana začepljena čahura.



Slika 2.33. Čahura začepljena zbog prskanja kapljica [9]

Optimalni uvjeti za zavarivanje u krupnokapljicačastom režimu [12, 22]:

Jakost struje: 170 – 235 A

Napon: 17 – 25 V

Zaštitni plin: čisti CO₂

mješavina Ar + CO₂

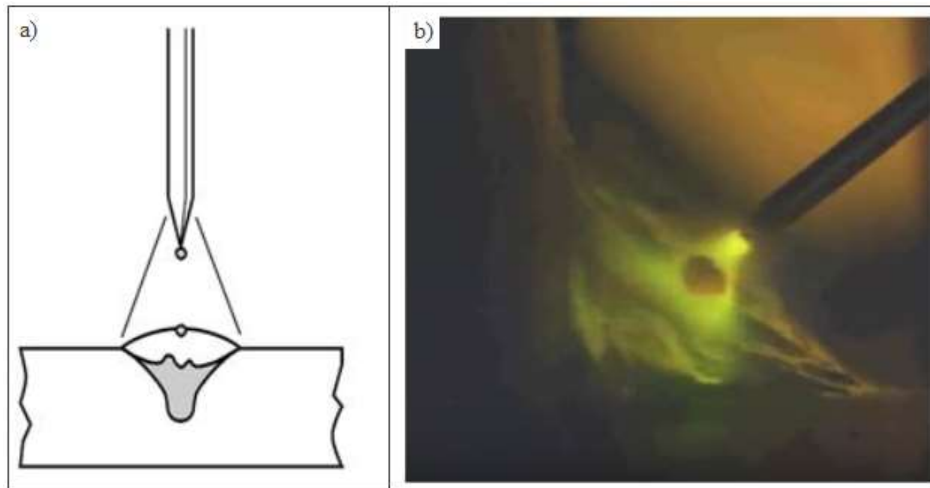
Promjer žice: 0.8 do 1.6 mm

Dizna: uvučena u čahuru

Iskoristivost žice: 87-93%

2.5.4 Zavarivanje pulsним transferom

Pulsni režim rada (Slika 2.34.) je visoko kontrolirano zavarivanje sprejom. Kod ovakvog zavarivanja luk je otvoren, a uređaj kontrolira aksijalno ispuštanje kapljica žice, i to svake kapljice. Za svaku kapljicu se kontrolira brzina, veličina i vrijeme nakon kojega će se ispustiti slijedeća kapljica, a tako se kontrolira i koliko velika će biti kapljica, odnosno kojeg promjera. Da bi ovakav rad bio moguć, potrebno je podesiti mnogo parametara rada. Neki izvori navode da ih je oko 60 ili čak oko 100, što nije praktično unositi ručno. Zbog toga su razvijeni algoritmi, tzv. sinergijske pulsne linije, kojima se podešavaju parametri rada uređaja ovisno o tome koji se plin koristi, koji materijal žice, koliki promjer žice te koja je debljina materijala koji se zavaruje. [9, 12, 14]

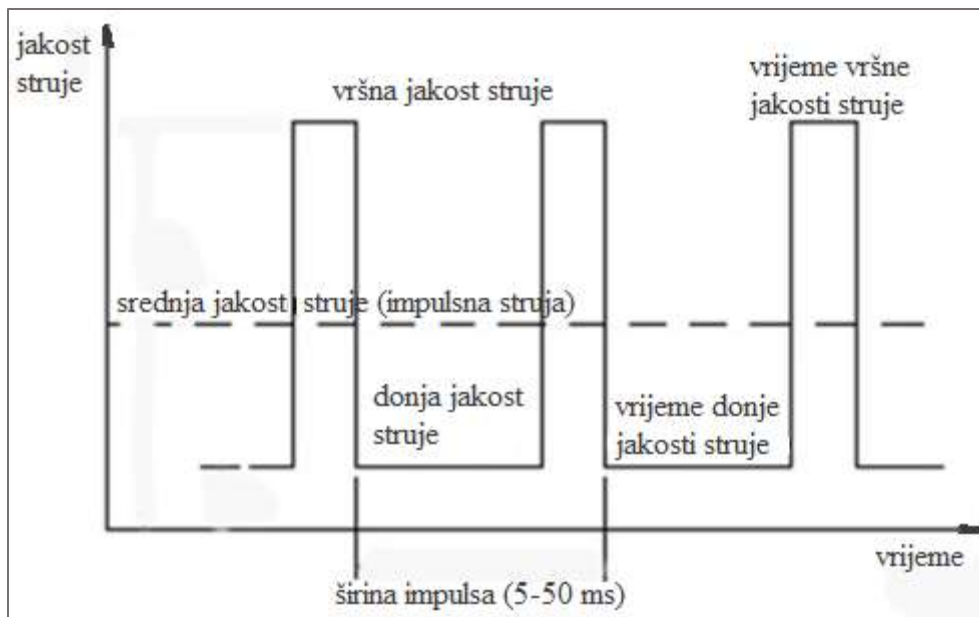


Slika 2.34. Zavarivanje pulsним režimom, a) shema, b) fotografija [15]

Zavarivanjem u pulsnom režimu je unos topline manji zbog manje jakosti struje, prskanja nema ili je ono vrlo malo, nema deformacija materijala i manje je uključaka vanjskih plinova. Postupak se lako automatizira i robotizira, a zavarivati se može u svim položajima uz pravilno podešene parametre. No, postupak je skuplji zbog primjene argona u zaštitnom plinu, oprema je skuplja, a zavarivaču je potrebna povećana zaštita na radu (više opreme). [15, 22]

Pri radu izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji se kreće od vršne vrijednosti do najmanje, koja je dovoljna da se luk održi, ali da se ne ugasi. Prosječna jakost struje zavarivanja je manja od minimalne jakosti struje koja je potrebna za rad u spreju. Pulsiranje jakosti struje se može dogoditi 20 do 500 puta u sekundi, ovisno o parametrima. Frekvencija pulsnoг zavarivanja je proporcionalna brzini žice. [9, 12, 15]

Princip rada pulsnoг režima prikazuje Slika 2.35.



Slika 2.35. Prikaz pulsnog režima rada [9]

Ovaj postupak zavarivanja je najpogodniji za zavarivanje obojenih metala i nehrđajućih čelika. Zavarivanje pulsom je najbolji izbor za sve one materijale koji se ne mogu zavarivati kratkim spojem zbog nedovoljne penetracije materijala, a ne mogu se zavarivati niti sprejom zbog prevelikog unosa topline (prevelik unos topline izaziva deformacije materijala, smanjuje mehanička svojstva zavara, a može doći i do naljepljivanja materijala, umjesto penetracije). Debljine obradaka mogu biti različite, limovi od 1 mm do komada debljih od 5 mm. [9, 22]

Veliku primjenu zavarivanje pulsom je našlo u auto industriji. Zbog korozije limarije, počeli su se koristiti pocinčani limovi za proizvodnju automobila. Zavarivanje takvih limova klasičnim postupcima čeličnim žicama je rezultiralo uništavanjem zaštitnog sloja cinka, što opet dovodi do korozije materijala. No, utvrdilo se da brončane žice ne nagrize cinkov zaštitni sloj te su se upravo te žice (najčešće se koriste žice CuSi_3 i CuAl_8) počele koristiti za zavarivanje pocinčanih limova i to pulsnim režimom rada. Veliki nedostatak ovih žica su isparavanja cinka, koja su vrlo otrovna za ljude, pa je ovaj postupak zavarivanja pogodan samo za robotsko zavarivanje. Tim više se parametri zavarivanja moraju jako dobro poznavati i dobro podesiti na uređaju. [9]

Kasnije se počinju koristiti bor-čelici zbog velike čvrstoće i manje mase, ali pošto su to čelici osjetljivi na unos topline, potrebno je zavarivanje pulsom. Za ovakvo zavarivanje se mogu koristiti i čelične i brončane žice. [9]

Optimalni uvjeti za zavarivanje u pulsnom režimu [12, 22]:

Jakost struje: 80 – 500 A

Napon: 13 – 30 V

Zaštitni plin: mješavina Ar + CO₂ (što manji udio CO₂: 8%, 2.5%, osim za ugljične čelike, kada udio CO₂ može biti do 18%)

Ar + O₂

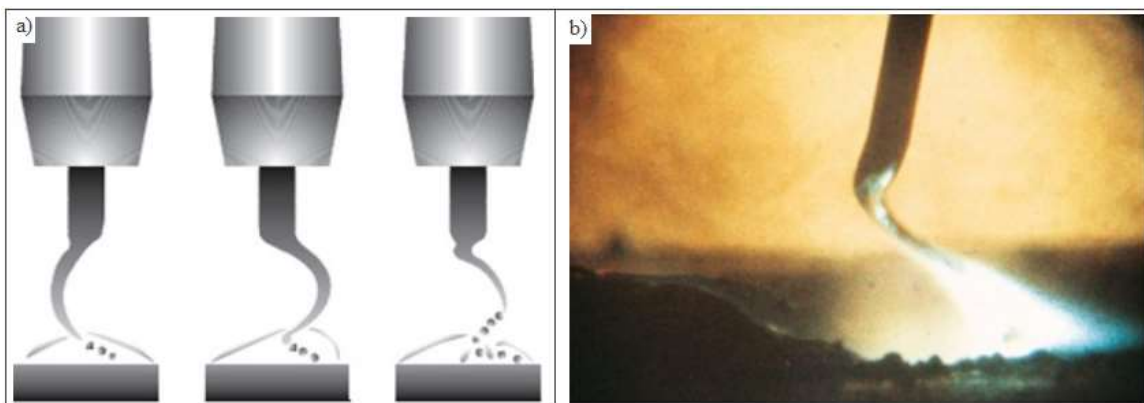
Čisti argon

Promjer žice: 0.8 do 2.4 mm

2.5.5 Zavarivanje rotirajućim lukom

Zavarivanje rotirajućim lukom (Slika 2.36.) je transfer zavarivanja u spreju. Rotiranje luka se događa zbog povećanih parametara zavarivanja, točnije povećane jakosti struje (više od 450 A), velike brzine žice (više od 15 m/min) i povećanog napona (više od 35 V). Pri ovom postupku zavarivanja kapljice padaju niz luk ravnomjerno. Plin, koji se upotrebljava, mješavina je argona i 5% ugljikovog dioksida. [9, 14]

Pri tom postupku se događa to da je veliki slobodan kraj žice izložen velikoj jakosti struje. Zbog velike jakosti struje i velikog otpora prolasku struje stvara se velika toplina, koja tali veći dio slobodnog kraja žice. Jakost struje uzrokuje jake elektromagnetske sile, koje uzrokuju pomicanje luka iz njegove osi i njegovo rotiranje. [9, 23]

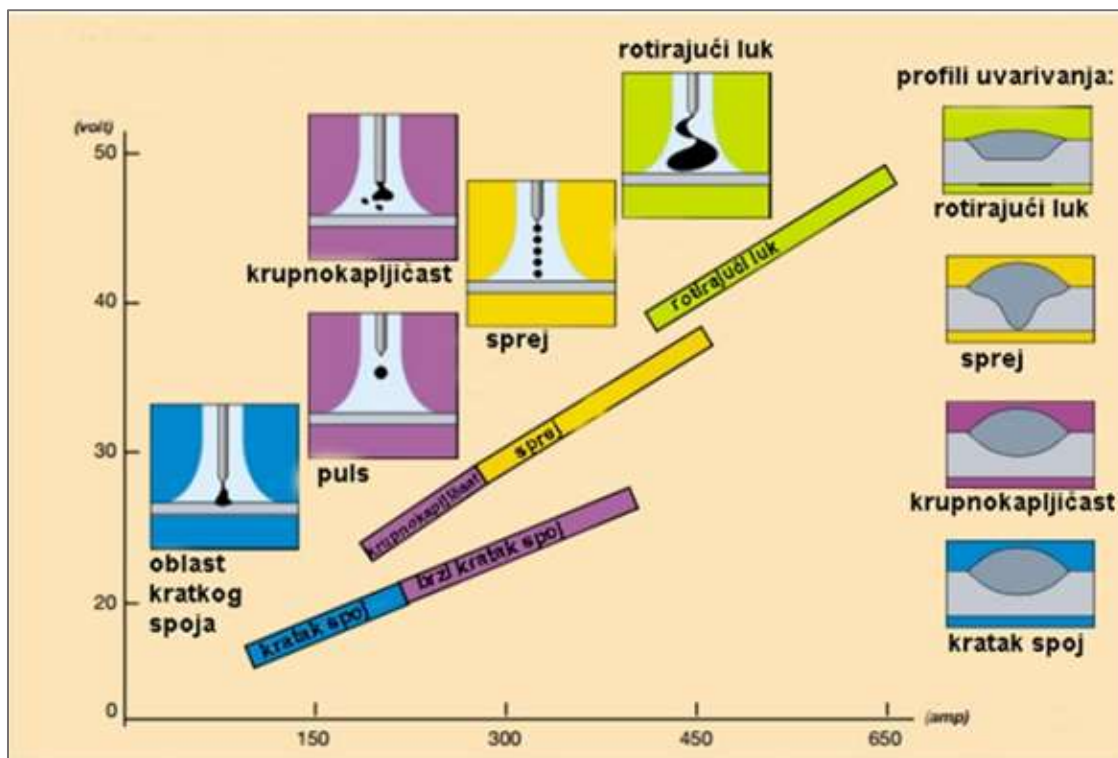


Slika 2.36. Prikaz rotirajućeg luka, a) shema, b) fotografija [9]

U ovom režimu rada može se nanijeti 4.5 – 13 kg depozita po satu rada. Promjeri žica koji se koriste su 1.0, 1.2 i 1.6 mm. Slobodan kraj žice je veći od 20 mm, najčešće od 22 do 38 mm.

Kod režima rada rotirajućim lukom je problem što su visoki parametri rada. Zbog toga oprema ne može dugo izdržati u tom režimu, posebno dodavač žice. Da bi se smanjilo trošenje dodavača, redovito se koriste plosnate žice, jer je dodavačima lakše njih „gurati“, nego okrugle žice. [9]

Na Slici 2.37. su prikazana područja režima rada zavarivanja.



Slika 2.37. Grafički prikaz režima zavarivanja [9]

2.5.6 Transferi na visokim parametrima rada

Ovi transferi se izvode pri visokim jakostima struje, visokim naponima, velikim brzinama žice, a postižu se velike stope depozita. Moguća su dva načina rada, s nerotirajućim lukom (napon 30 – 45 V, brzina žice oko 25 m/min, depozit 10 – 15 kg/h) i s rotirajućim lukom (napon 48 – 55 V, brzina žice 30 – 40 m/min, depozit 25 – 27 kg/h). Za ovakav rad je potrebna posebna mješavina plinova, poput 65 % Ar + 26 % He + 8 % CO₂ + 0,5 % O₂.

Pri ovakvom zavarivanju se pristupa i kombinaciji dviju žica, tzv. tandem zavarivanju. Pritom se ne tale obje žice, nego se samo jedna tali, a druga se samo uvodi u metalnu kupku.

2.5.7 Ostali transferi

Neki moderniji režimi rada koji su se razvili s razvojem zavarivanja i opreme za zavarivanje su [9]:

- Elektronsko upravljanje električnim lukom
- Modificirani kratki spoj
- Dvostruki impuls
- Brzi sprej
- Brzi impuls
- Brzi kratak spoj.

Za ove režime je karakteristično to da se postiže stabilnost luka u svim transferima i u različitim uvjetima rada, odnosno s različitim parametrima. To je moguće zahvaljujući razvoju tehnologije te se dobivaju kvalitetni proizvodi. Moguće je zavarivati i tanke limove i radne komade većih debljina, a širok je spektar materijala koji se mogu zavarivati ovim postupcima. Još jedna velika prednost ovih postupaka je što se može zavarivati u različitim položajima. Ovi postupci su pogodni za automatizaciju i visoko su učinkoviti. [9, 12]

2.6 Dodatni parametri za podešavanje uređaja za zavarivanje [9]

Na jeftinijim uređajima se većina ovih funkcija ne može podešavati i namještati, već su određene tvornički. Međutim, na boljim uređajima je moguće kontrolirati ih i postići bolje zavarivanje.

Neke od njih su:

- Sagorijevanje vrha žice nakon gašenja luka (*burnback* kontrola)

Kada se otpusti prekidač na pištolju i luk se ugasi, na vrhu žice se formira kuglica od rastaljene kapljice, koju je potrebno odsjeći prije ponovnog paljenja luka. Neki uređaji imaju tzv. *burnback* funkciju, koja omogućuje da se, nakon puštanja prekidača na pištolju, jakost struje postupno smanjuje i luk se postupno gasi, a kapljica se u većini slučajeva odvoji od žice. Na taj način se ne formira kuglica i nije ju potrebno rezati, što je vrlo poželjno zbog uštede vremena, a na koncu i materijala.

- Sporiji dovod žice pri paljenju luka (*run-in, creep-start, slope-up*)

Funkcija sporijeg dovoda žice je vrlo korisna kod zavarivanja kratkim spojem pri paljenju luka jer se žica ne dovodi onom brzinom na koju je podešena na uređaju, već sporije da bi početak zavarivanja bio bolji (bolji start). Kada bi žica odmah izlazila iz pištolja onom brzinom na koju je podešena, ne bi se rastalila jer luk još nije upaljen i udarila bi u materijal. Funkcija sporijeg dovoda žice omogućuje da se to ne događa, već se žica sporije dovodi i pri dodiru žice i materijala događa se kratki spoj, potom se pali luk, a žica se počne dovoditi brzinom koja je podešena na uređaju.

- *Hot start*

Funkcija *hot start* je moguća na nekim uređajima, a omogućuje da se jakost struje podesi tako da u nekom vremenu na početku rada bude veća od veličine podešene za kasniji rad uređaja za neki postotak. Ako je, primjerice, jakost struje podešena na 200 A, funkcija *hot start* će omogućiti da se ta jakost na početku rada poveća za npr. 40% u trajanju od dvije sekunde. Korisnost ove funkcije se ističe u tome što se na početku rada događa naljepljivanje materijala umjesto penetracije jer se žica još nije dovoljno rastalila. Pri podešavanju ove funkcije zavarivač određuje u kolikom postotku će jakost struje biti veća od one podešene brzinom žice i slobodnim krajem žice te koliko će trajati ta funkcija (obično je to jedna ili dvije sekunde). Nakon tog vremena se jakost struje spušta na onu koja je podešena na uređaju i dalje se radi u namještenom režimu rada.

- Popunjavanje kratera

Funkcijom popunjavanja kratera se na kraju zavarivanja luk postupno gasi postupnim smanjivanjem jakosti struje, ali ne zbog sprječavanja nastanka kuglice na vrhu žice kao kod *burnback* funkcije, već zbog sprječavanja nastanka pukotina i kratera na kraju zavara. Ova funkcija omogućuje da se taj krater popuni materijalom.

- Funkcija 4T

Ova funkcija se primjenjuje kod dugačkih zavara, a obuhvaća funkcije *hot start* i popunjavanje kratera. Omogućuje, dakle, da se na početku zavarivanja žica sporije dovodi da bi se zavar što bolje započeo, a na kraju zavarivanja se, nakon puštanja prekidača pištolja, luk postupno gasi i ne ostavlja krater i pukotine.

2.7 Zaštitni plinovi za MAG zavarivanje

Već je rečeno kako se zaštitni plinovi primjenjuju za zaštitu zavara od atmosferskih utjecaja. U rastaljenom stanju metali i kovine reagiraju s kisikom, dušikom i vodikom iz zraka, zaštitnog plina ili mikrouključaka iz osnovnog ili dodatnog materijala te se stvaraju oksidi koji uzrokuju poroznost i koroziju materijala. Kako bi se to izbjeglo, koriste se zaštitni plinovi. [2, 9]

Izbor zaštitnog plina se provodi na temelju materijala žice i obradka, početnog stanja materijala (kasnije opisano da ponekad materijali mogu biti i djelomično hrđavi i da ne moraju biti prethodno očišćeni), debljine obradka, željenih svojstava zavara, pripreme zavara, položaja zavarivanja, željenog režima rada i dr. [12, 17]

U nastavku slijede kratki opisi pojedinih zaštitnih plinova.

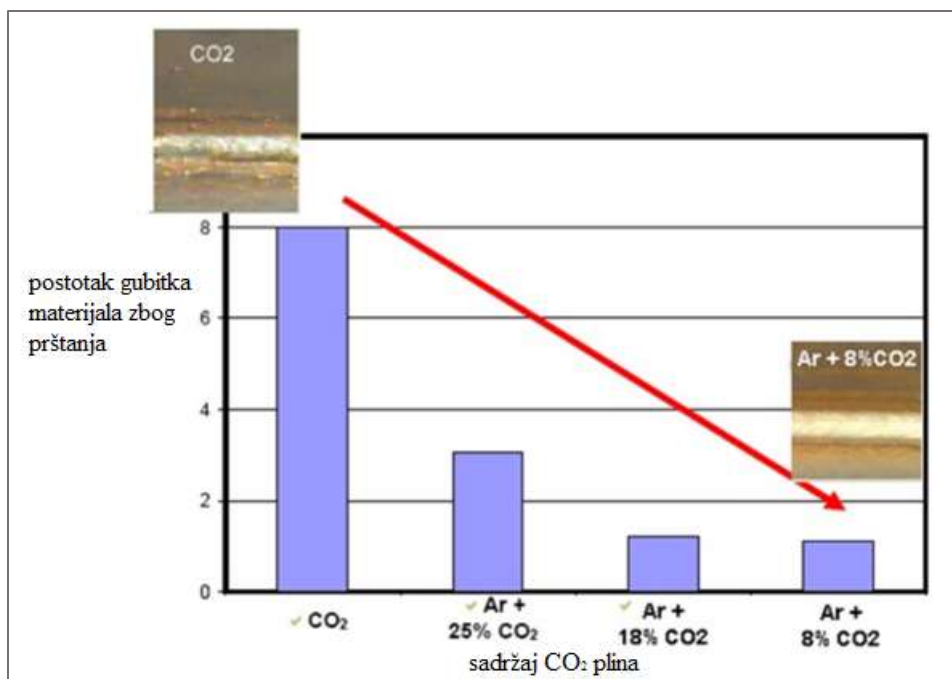
2.7.1 Ugljikov dioksid, CO₂

Plin CO₂ se masovno počeo upotrebljavati u prošlom stoljeću tako da se sam postupak zavarivanja s CO₂ kao zaštitnim plinom nazivao CO₂ zavarivanje, a neki ga još i danas tako zovu. [9]

Karakteristike ovog plina su da je jeftin, proziran, teži je od zraka za oko 1.5 puta, nema miris, pri sobnoj temperaturi je inertan, ali zagrijavanjem u električnom luku postaje vrlo aktivan. Sastav plina čine 72 % O₂ i 28 % CO. [9, 12]

Plin, koji se koristi kao zaštitni plin, dobiva se preradom CO₂ iz bušotina, s ispušnih kolektora u kemijskoj industriji ili procesom vrenja (dobiva se plin velike čistoće).

Upotrebom čistog CO₂ kao zaštitnog plina se ne može postići rad u spreju, već je pogodan za rad u kratkom spoju. Dobrim podešavanjem parametara rada se može postići kvazi-sprej u kojemu su kapljice raspoređene unutar cijelog luka, a ne duž osi žice. Može se raditi i u kontroliranom krupnokapljčastom režimu. Rezultat rada s čistim CO₂ plinom je prskanje kapljica (Slika 2.38.), ali ako se kontrolira rad, to može biti prihvatljivo prštanje i mogu se kapljice lako ukloniti špahtlom ili brušenjem nakon zavarivanja, posebice ako je materijal prethodno tretiran sredstvom protiv uvarivanja kapljica (već spomenuti *anti-spatter* sprejevi, gelovi ili premazi). [9, 12]



Slika 2.38. Prikaz postotka gubitka materijala u ovisnosti o količini CO₂ plina na eksperimentalnoj ploči od čelika debljine 8 mm [9]

Na Slici 2.38. se može vidjeti kako je veći gubitak materijala uz veće količine CO₂ kao zaštitnog plina, a razlog tome je reaktivnost CO₂ plina. U mješavini s argonom izbjegavaju se ti nedostaci i prštanja (pritom i gubitka materijala) gotovo uopće nema.

Plin CO₂ i njegove mješavine se koriste za zavarivanje niskolegiranih čelika sa žicama punog poprečnog presjeka ili punjenim žicama.

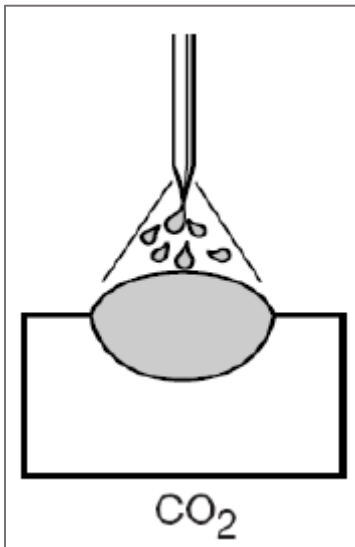
Nedostaci upotrebe CO₂ plina su upravo prštanje, zbog kojeg je potrebno naknadno čišćenje i brušenje radnog komada, što izaziva dodatne troškove. Kapljice pršte i na dizne i u čahuru te se i to mora čistiti i špricati zaštitnim sprejom. Iskoristivost žice je oko 90 %, zavar oksidira i grub je. Zbog oksidacije se gube legirajući elementi s površinskog sloja obradka te se smanjuju mehanička svojstva, što se sprječava upotrebom mješavine Ar + CO₂.

Što se događa pri zavarivanju? Prolaskom struje kroz plin, stvara se otpor i plin se zagrijava. Zbog zagrijavanja, molekule u plinu počinju oscilirati (ubrzavaju svoje kretanje) te se nakon nekog vremena razdvajaju (disociraju). Plin CO₂ se u postupku disocijacije razdvaja na molekule CO i O₂, što se može prikazati formulom:



Disocijacija CO₂ počinje na oko 600°C. Nakon razdvajanja, molekule kisika reagiraju s metalima i stvaraju okside, a molekule CO reagiraju s oksidima metala i „čiste“ ga, odnosno,

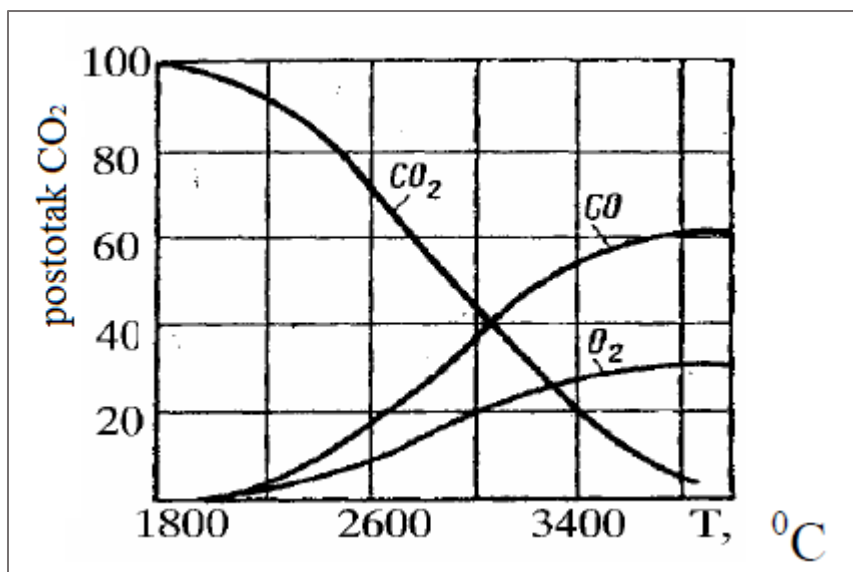
ostavljaju čisti metal. Da bi ova reakcija bila još uspješnija, a materijal koji se zavaruje „sigurniji“ od oksidacije i korozije, u žice se dodaju veće količine silicija i mangana jer silicij brzo reagira s kisikom i na taj način sprječava vezanje kisika za druge metale (radni komad, zavar). Ovakvi spojevi dolaze do rastaljene kupke, ali se hlađenjem materijala dižu na površinu u obliku troske, koja se očisti. U slučaju da se ne izdignu na površinu, ostaju unutar strukture materijala kao uključci, ali ne smanjuju njegova mehanička svojstva. [2, 9, 14]



Slika 2.39. Izgled zavara s CO₂ kao zaštitnim plinom [15]

Treba napomenuti još i to da se i molekula kisika disocira na atome kisika te oni još lakše ulaze u reakcije s metalima. Nastali CO ne disocira dalje na ugljik i kisik jer mu je potrebna vrlo visoka temperatura (oko 6000°C). Zbog toga se u zavar rijetko unosi ugljik kao nečistoća.

Nakon disocijacije slijedi proces ionizacije. To je proces pri kojemu se u atomima odvaja elektron iz posljednje ljuske elektronskog omotača i taj izdvojeni elektron struji plinom. Na taj način slobodni elektroni stvaraju električnu struju u zaštitnom plinu. S obzirom na to da su u različitim područjima električnog luka i temperature različite, biti će u njima i različite koncentracije plinova CO₂, CO, O₂, Ar i drugih (Slika 2.40.). Što je temperatura luka veća, to je veći stupanj disocijacije, ali i ionizacije i topline. [9, 14]

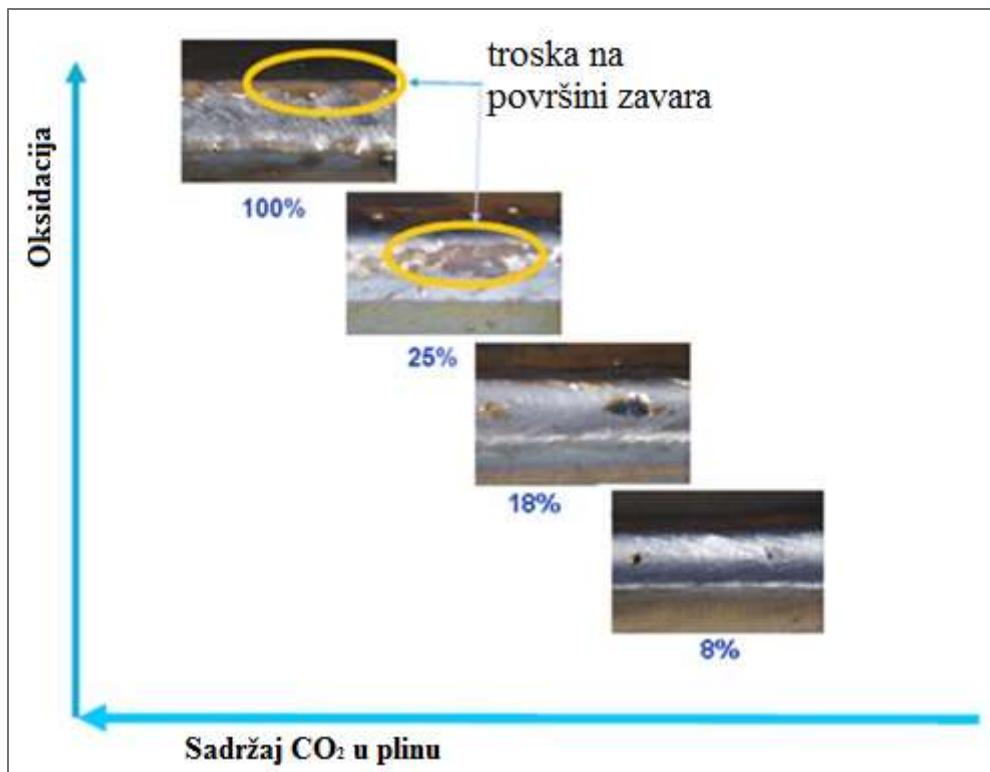


Slika 2.40. Koncentracije plinova CO₂, CO i O₂ pri MAG zavarivanju [14]

Još jedna velika prednost CO₂ plina je proces rekombinacije, odnosno ponovnog spajanja molekula. Naime, nakon disocijacije molekula CO₂ na molekule CO i O₂ na vrhu luka, niz luk se temperatura smanjuje i pri dnu (iznad metalne kupke) ona iznosi oko 1600°C. Tada se molekule CO i O₂ ponovno vežu u CO₂ molekule uz oslobađanje topline. Ta dodatna toplina poboljšava taljenje materijala i bolju penetraciju zavora, a CO₂ štiti materijal od oksidacije. Zbog toga je moguće s CO₂ zaštitnim plinom zavarivati i djelomično hrđave materijale i toplo valjane komade bez prethodnog čišćenja. Luk je eliptičnog presjeka, što omogućuje bolju penetraciju čak i u rubove zavora. [9, 14]

Što se događa da dolazi do prštanja kapljica? Kada se kao zaštitni plin koristi čisti CO₂, on pod utjecajem visoke temperature stvara plazmu ispod žice. Žica se tali i na vrhu žice se formira kapljica. Plazma plina CO₂ djeluje na kapljicu tako da je gura prema gore, a gravitacija i elektromagnetne sile je vuku prema dolje. Sile, koje djeluju na kapljicu nisu jednolike cijelo vrijeme, već im jakosti osciliraju od većih prema manjima pa ponovo veće pa manje i tako u krug. Zbog toga kapljica „pleše“ i uzrokuje pomicanje centra luka u smjeru u kojemu se pomiče kapljica. Kapljica ne pada u metalnu kupku, već se žica i dalje tali i kapljica postaje sve veća dok napokon ne dostigne određenu veličinu i uspije napraviti kratki spoj te pada u metalnu kupku (bučne) i izaziva prštanje. Ako je struja kratkog spoja veća, onda će kapljica se raspršiti i izazvati još jače prštanje, a može se raspršiti i u zraku prilikom odvajanja od žice i opet izazvati prštanje. [9, 14]

Različiti zavari su prikazani na Slici 2.41.



Slika 2.41. Izgled zavara u ovisnosti o sadržaju CO₂ [9]

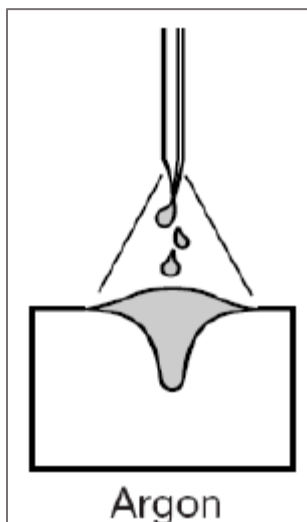
Zbog navedenih problema vrlo je važno poznavati karakteristike materijala koji se zavaruje, materijala žice, karakteristike poprečnog presjeka žice, jakost struje, napon i nagib uređaja kojim se zavaruje, podesiti pravu brzinu žice i slobodan kraj žice da bi se moglo dobro i kvalitetno raditi i to u stabilnom režimu. [9]

Pri zavarivanju CO₂ plinom treba obratiti pažnju na još jednu stvar. To je mogućnost smrzavanja reduksijskog ventila kada se radi sa žicama većih promjera i većim protokom plina. Plin se eksploatira u bocama kao stlačen i u tekućem stanju. Zbog prevođenja u plinovito stanje, smanjuje se temperatura okoline reduksijskog ventila i vlaga iz zraka se kondenzira na njemu te se može kristalizirati u inje ili kristale leda. Da se to ne bi događalo, jer smrzavanje reduksijskog ventila onemogućuje protok plina, reduksijski ventil je potrebno dodatno zagrijavati grijačima ili upaljenom žaruljom (postavlja se iznad njega). [9]

2.7.2 Argon, Ar

Argon je vrlo stabilan, plemeniti plin. Dobiva se kondenzacijom iz zraka. U zraku ga ima tek oko 1 % pa su za izdvajanje argona iz zraka potrebne velike količine zraka koje se hlade do zamrzavanja, odnosno kristalizacije. Za zavarivanje se prema standardima koristi argon čistoće C, odnosno plin s 99.96% argona⁷. Argon je od zraka teži za oko 1.4 puta, nema boje, mirisa, okusa i nije otrovan. Međutim, ako zavarivač radi s argonom bez zaštitne maske, zbog udisanja argona i njegove veće težine od zraka, može doći do problema s disanjem. Argon se pritom zadržava u plućima i ne može kisik doći do pluća te je potrebno osobi pružiti prvu pomoć. [9, 14]

Čisti argon se koristi za zavarivanje obojenih metala poput aluminija, bakra, magnezija, titanija, koji vrlo brzo oksidiraju. Luk pri zavarivanju je stabilan i lako se pali zbog niske energije ionizacije argona. Pri zavarivanju se u luku stvara plazma, koja obavija vrh žice i zbog utjecaja elektromagnetskih sila, koje djeluju na rastaljenu kapljicu, plazma djeluje poput škara i odvaja kapljicu od žice (*pinch* efekt). Za razliku od CO₂ plina, argon slabo provodi toplinu. Zato se toplina ne raspršuje cijelim lukom jednako, već je na sredini ispod žice plazma najtoplija, a sa strana je hladnija. Posljedica toga je da se materijal tali više u dubinu, nego širinu (Slika 2.42.) i nije moguće raditi šire zavare u jednom prolazu. Zavar je povišen na rubovima (oblik naopakog zvona), što nije prihvatljivo. U materijalu se na mjestu djelovanja najveće topline oslobađaju plinovi, ali ne mogu izaći na površinu te se javlja poroznost materijala. Zbog ovih ključnih nedostataka argona kao zaštitnog plina, on se ne koristi za zavarivanje čelika. [9, 12]



Slika 2.42. Izgled zavara s argonom kao zaštitnim plinom [15]

⁷ U rijetkim slučajevima se koristi argon čistoće B, to znači 99.99% argona u plinu.

2.7.3 Mješavine argona i ugljikovog dioksida

Iskustvo je pokazalo da je najbolje koristiti mješavine argona s CO₂ ili O₂ da bi se postigli najbolji rezultati zavarivanja. Već su navedeni nedostaci CO₂ (prštanje, nestabilan luk) i Ar (nedovoljno topline) i njihove prednosti (CO₂ – stvaranje dodatne topline disocijacijom i rekombinacijom, Ar – stabilan luk) te se ti plinovi miješaju da bi se dobila njihova najbolja svojstva za određene režime rada. Ovisno o tome u kojem režimu rada će se raditi, tako će se i miješati različite koncentracije plinova. [9, 12]

Ovakve mješavine plinova manje reagiraju s rastaljenim metalom i zbog toga su količine dima manje za oko 20 – 25 %. Zbog manje kisika u plinu, rastaljeni metal ne oksidira te je i materijal čvršći i kvalitetniji, ima veća mehanička svojstva. [9]

U Tablici 2.3. su prikazani sadržaji mješavina plinova prema normi EN ISO 14175:2008.

Tablica 2.3. Udjeli plinova u mješavinama [12]

Grupa	Podgrupa	udjel komponente u postotcima %				
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂
M1	1	0,5≤CO ₂ ≤5		ostatak*		0,5≤H ₂ ≤5
	2	0,5≤CO ₂ ≤5		ostatak*		
	3		0,5≤O ₂ ≤3	ostatak*		
	4	0,5≤CO ₂ ≤5	0,5≤O ₂ ≤3	ostatak*		
M2	0	5≤CO ₂ ≤15		ostatak*		
	1	15≤CO ₂ ≤25		ostatak*		
	2		3≤O ₂ ≤10	ostatak*		
	3	0,5≤CO ₂ ≤5	3≤O ₂ ≤10	ostatak*		
	4	5≤CO ₂ ≤15	0,5≤O ₂ ≤3	ostatak*		
	5	5≤CO ₂ ≤15	3≤O ₂ ≤10	ostatak*		
	6	15≤CO ₂ ≤25	0,5≤O ₂ ≤3	ostatak*		
M3	1	25≤CO ₂ ≤50		ostatak*		
	2		10≤O ₂ ≤15	ostatak*		
	3	25≤CO ₂ ≤50	2≤O ₂ ≤10	ostatak*		
	4	5≤CO ₂ ≤15	10≤O ₂ ≤15	ostatak*		
	5	25≤CO ₂ ≤50	10≤O ₂ ≤15	ostatak*		
C	1	100				
	2	ostatak	0,5≤O ₂ ≤30			
*-za potrebe klasifikacije;može biti djelomično ili potpuno zamjenjen s He						

2.7.4 Mješavina argona i kisika [9]

Kisik se u malim postotcima dodaje argonu zbog mogućnosti disocijacije molekula kisika. Nedostatak toga je oksidacija metala (žica, rastaljena metalna kupka). Zbog toga je potrebno dodati više legirajućih elemenata u žice, najčešće silicij, mangan, krom.

Prednost upotrebe kisika je što stabilizira luk i lako provodi električnu struju, a prilikom reakcije kisika i silicija se oslobađa toplina. Rastaljena metalna kupka ima manju površinsku napetost zbog prisutnosti kisika te se bolje razlijeva po površini i ne stvaraju se nadvišeni rubovi (kao kod primjene čistog argona).

Prednost se većinom daje mješavini argona s CO₂ nego s O₂ zbog manje oksidacije, a to znači i boljih mehaničkih svojstava, posebno žilavosti na temperaturama ispod 0°C.

2.8 Žice za MAG zavarivanje

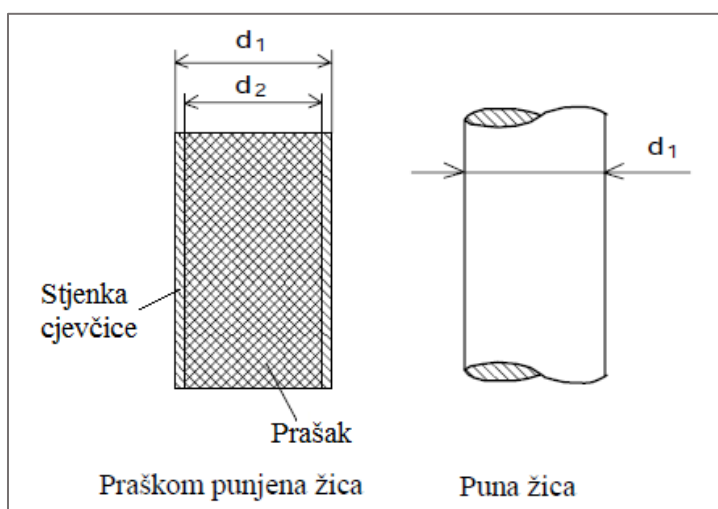
Tablica 2.4. Prikaz zastupljenosti nekih postupaka zavarivanja u razvijenim zemljama svijeta [9]

Regija	MIG/MAG zavarivanje			EPP	REL
	Puna žica	Punjena žica	Ukupno MIG/MAG		
Europa	65	10	75	10	15
USA+Kanada	58	21	79	5	16
Japan	46	30	76	11	13
Južna Koreja	36	39	75	10	15
Tajvan	47	17	64	5	30

Podsjetimo se prednosti MAG zavarivanja: produktivnost, kratka obuka, jeftina radna snaga, relativno niska cijena postupka zavarivanja, relativno visoka kvaliteta zavarivanja.

Izbor žice za zavarivanje ovisi o mnogim parametrima, a glavni su cijena, kvaliteta, produktivnost, zaštitni plin, materijal i debljina radnog komada. Postoje vrlo kvalitetne žice koje se proizvode u strogo kontroliranim uvjetima i nemaju nečistoća, ali su skupe. S druge strane, postoje i jeftinije žice koje se proizvode iz rude ili recikliranjem čelika, ali su slabije kvalitete i produktivnosti. O kupcu ovisi kakve će žice kupiti, s obzirom na cijenu i na željenu (ili traženu) kvalitetu zavara, odnosno konačnog proizvoda. [9, 15]

Žice mogu biti punog poprečnog presjeka ili punjene žice (cjevčica ispunjena prahom) (Slika 2.43.).



Slika 2.43. Shema praškom punjene žice i pune žice (d_1 -promjer žice, d_2 -unutarnji promjer cjevčice punjene žice) [11]

Žice punog poprečnog presjeka općenito su jeftinije. Čelične pune žice uglavnom imaju prevlaku od bakra, čija je uloga ostvarivanje boljeg električnog kontakta i time sprječavanje oksidacije čelične žice te manje trenje prilikom prolaska žice kroz diznu. S obzirom na to da se dizne obično izrađuju od bakra ili bakrene legure, trenje bi bilo veće da se dodiruju čelična žica i bakrena dizna, nego što je kada se dodiruju žica s bakrenom prevlakom i bakrena dizna. Bakrena prevlaka je vrlo tanka, mjeri se u mikrometrima, a nanosi se na žicu galvanizacijom.

Postoji više vrsta punih žica, a izbor ovisi o cijeni i željenim svojstvima zavara. Jeftinije žice imaju tanji sloj bakra te lakše oksidiraju i korodiraju, grub je (hrapav), bakar se ljušti sa žice te dolazi do začepjenja dizne i uvodnice elektrode (bužira). Kod skupljih žica je sloj bakra deblji, preciznije je nanošen te je gladak, gotovo da se ne ljušti i ne korodira (doslovno) preko noći, ako je ostavljen u dodavaču. U bakrenu prevlaku se zbog dobrih ionizirajućih svojstava mogu dodavati i smjese na bazi kalija, koje bolje stabiliziraju luk.

Promjer žice treba pri proizvodnji biti u uskim tolerancijama (Tablica 2.5.) jer se inače žica neće dovesti kako bi trebala. Ako je žica ispod granica tolerancije, proklizavati će između kotačića u dodavaču, a ako je iznad granica tolerancije, ona „štuca“ i zaglavljuje u dizni, što sprječava dobro održavanje luka. Nužno je da žica bude izrađena u tolerancijama jer se inače mora uređaj podešavati prema promjeru žice, što zahtjeva dodatno vrijeme i kontraproduktivno je, a alati za kalibraciju uređaja su skupi. [9]

Tablica 2.5. Prikaz promjera žica s obzirom na vrstu žice [15]

Vrsta žice	Vanjski promjer [mm]								
Puna žica	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4		
Praškom punjena žica		0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2

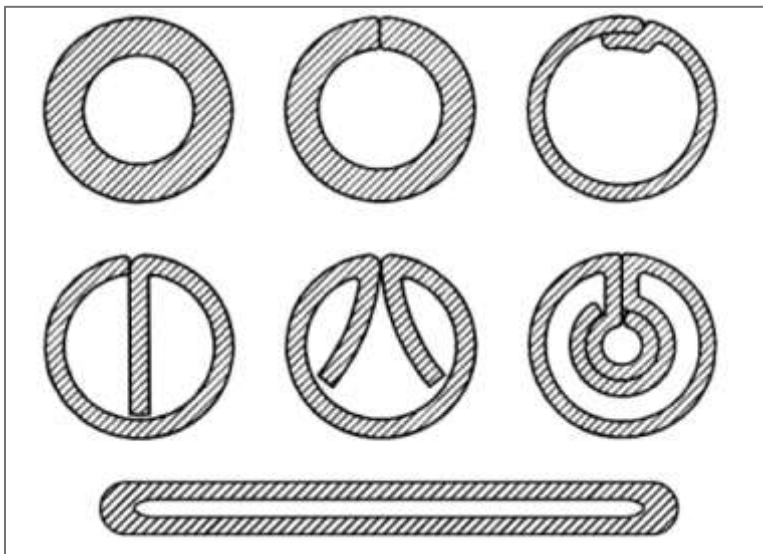
Punjene žice mogu biti za zavarivanje u zaštitnom plinu (čisti CO₂ ili Ar + 18% CO₂), samozaštitne žice za zavarivanje bez zaštitnog plina ili samozaštitne žice za navarivanje, također bez upotrebe zaštitnog plina. Punjene žice imaju prednost jer omogućuju bolju penetraciju u materijal na sredini i na rubovima zavara zbog velike gustoće struje i zato je manja mogućnost navarivanja, moguće je zavarivanje u svim položajima bez mijenjanja parametara, zavar ima bolja mehanička svojstva, manje je prštanja, a zbog predgrijavanja žice (posljedica veće gustoće struje) se tali više žice te je i depozit veći⁸, a zavar izgleda ljepše i urednije. Primjenjuju se za rad u režimu spreja ili kvazi-spreja. Punjenje žica može biti

⁸ Za usporedbu: depozit pune žice promjera 1.2 mm na 300 A je 5 kg/h, depozit punjene rutilne žice je 6 kg/h, a žice punjene metalom je 8 kg/h.

rutilno, metalno ili bazično. Najčešće se koriste rutilne žice jer je s njima moguće zavarivati u različitim položajima (horizontalnom, vertikalnom, nadglavnom). Iskoristivost žice je od 80 do 92%, ovisno kojim postupkom su žice proizvedene. [2, 9, 11]

Vrste punjenih žica prema konstrukciji [9, 15, 24]:

- bešavne, pobakrene – deblja stjenka cijevi, prah se puni vibracijama (najkvalitetnije)
- bešavne, zatvorene laserom – prah se puni nalijevanjem u U traku, traka se potom zatvara u O oblik i zavaruje se, mogu biti pobakrene
- šavne žice – spajaju se na različite načine (Slika 2.44.)



Slika 2.44. Shema različitih načina spajanja šavnih punjenih žica [15]

Prednosti punjenih bešavnih žica su što zahvaljujući debeloj stjenki žice omogućuju dobro zavarivanje i na malim i na velikim jakostima struje i dovoljna su dva kotačića u dodavaču, ne korodiraju lako zbog bakrene prevlake, nema opasnosti od vlage (jer su bešavne), koluti se proizvode i za manje uređaje, moguće je dugo vremena ostati u stabilnom režimu rada, nema prštanja, duboka je penetracija materijala, vrlo su dobra mehanička svojstva zavara, velik je depozit, visoka produktivnost i iskoristivost žice.

Princip rada samozaštitnih žica je takav da se zaštita vrši raspadaanjem organskih tvari, koje stvaraju CO_2 i O_2 . Problem kod ovih žica je vezanje aluminija za dušik iz zraka, koji se potom taloži u materijalu kao nečistoća. S ovim žicama se radi u krupnokapljičastom režimu pa je prštanje veliko.

Samozaštitne žice su pogodne za navarivanje koje se izvodi na otvorenom prostoru, jer se dimovi i plinovi koje ispuštaju ne zadržavaju u prostoriji, uvarivanje je veće nego u režimu

hladnog kratkog spoja, prštanje nije problem jer ne utječe na funkcionalnost navara, jeftine su i nije potreban zaštitni plin.

Problemi se mogu javljati zbog namotaja žice. Tijekom namotavanja žice na kolut, ona se deformira. Kada izlazi kroz pištolj, odmotava se i pritom ostaje zakrivljena i uvija se, što se može uočiti ako se na pištolj izbacij jedan namotaj žice (jedan krug). Problem može nastati ako je promjer slobodnog namotaja prevelik jer tada neće biti ostvaren dobar kontakt s diznom i neće se prenositi električna struja. S druge strane, ako je promjer slobodnog namotaja premali, doći će do trenja između dizne i žice, zbog čega se dizna haba i troši, luk će biti nestabilan i stvarati će se mikro luk u dizni između dizne i žice. Kod automatskog zavarivanja i zavarivanja robotima ovi problemi se izbjegavaju ugrađivanjem ispravljača žice. [9]

U Tablicama 2.6. i 2.7. su navedeni sastavi žica prema normi BS EN ISO 14341:2008, a potom je u Tablici 2.8. navedeno kakve žice proizvodi tvrtka Elektroda Zagreb d.d. i njihov okvirni sastav te neke karakteristike.

Tablica 2.6. Sastav žica za zavarivanje za udarne energije do 47J [25]

Žice za zavarivanje prema normi BS EN ISO 14341:2008 za 47 J udarne energije												
Oznaka	Kemijski sastav (%) *											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti+Zr
G0	Bilo koji drugi sastav											
G2Si	0.06-0.14	0.50-0.80	0.90-1.30	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15	0.03	0.35	0.02	0.15
G3Si1	0.06-0.14	0.70-1.00	1.30-1.60	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15	0.03	0.35	0.02	0.15
G3Si2	0.06-0.14	1.00-1.30	1.30-1.60	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15	0.03	0.35	0.02	0.15
G4Si1	0.06-0.14	0.80-1.20	1.60-1.90	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15	0.03	0.35	0.02	0.15
G2Ti	0.04-0.14	0.40-0.80	0.90-1.40	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15	0.03	0.35	0.05-0.20	0.05-0.25
G2Al	0.08-0.14	0.30-0.50	0.90-1.30	0.025	0.025	0.15	0.15	0.15	0.03	0.35	0.35-0.75	0.15
G3Ni1	0.06-0.14	0.50-0.90	1.00-1.60	0.020	0.020	0.80-1.50	0.15	0.15	0.03	0.35	0.02	0.15
G2Ni2	0.06-0.14	0.40-0.80	0.80-1.40	0.020	0.020	2.10-2.70	0.15	0.15	0.03	0.35	0.02	0.15
G2Mo	0.08-0.12	0.30-0.70	0.90-1.30	0.020	0.020	0.15	0.15	0.40-0.60	0.03	0.35	0.02	0.15
G4Mo	0.06-0.14	0.50-0.80	1.70-2.10	0.025	0.025	0.15	0.15	0.40-0.60	0.03	0.35	0.02	0.15

*Vrijednosti koje su jedinstveno navedene znače da je to maksimalna vrijednost udjela, dakle, može biti i manje od navedene vrijednosti.

Tablica 2.7. Sastav žica za zavarivanje za udarne energije do 27J [25]

Žice za zavarivanje prema normi BS EN ISO 14341:2008 za 27 J udarne energije												
Oznaka	Kemijski sastav (%) *, **											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti+Zr
G0	Bilo koji sastav											
G2	0.07	0.40-0.70	0.90-1.40	0.025	0.030	-	-	-	-	0.50	0.05-0.15	Ti: 0.05-0.15 Zr: 0.02-0.12
G3	0.06-0.15	0.45-0.75	0.90-1.40	0.025	0.035	-	-	-	-	0.50	-	-
G4	0.06-0.15	0.65-0.85	1.00-1.50	0.025	0.035	-	-	-	-	0.50	-	-
G6	0.06-0.15	0.80-1.15	1.40-1.85	0.025	0.035	-	-	-	-	0.50	-	-
G7	0.07-0.15	0.50-0.80	1.50-2.00	0.025	0.035	-	-	-	-	0.50	-	-
G11	0.02-0.15	0.55-1.10	1.40-1.90	0.030	0.030	-	-	-	-	0.50	-	0.02-0.30
G12	0.02-0.15	0.55-1.00	1.25-1.90	0.030	0.030	-	-	-	-	0.50	-	-
G13	0.02-0.15	0.55-1.10	1.35-1.90	0.030	0.030	-	-	-	-	0.50	0.10-0.50	0.02-0.30
G14	0.02-0.15	1.00-1.35	1.30-1.60	0.030	0.030	-	-	-	-	0.50	-	-
G15	0.02-0.15	0.40-1.00	1.00-1.60	0.030	0.030	-	-	-	-	0.50	-	0.02-0.15
G16	0.02-0.15	0.40-1.00	0.90-1.60	0.030	0.030	-	-	-	-	0.50	-	-
G17	0.02-0.15	0.20-0.55	1.50-2.10	0.030	0.030	-	-	-	-	0.50	-	0.02-0.30

Žice za zavarivanje prema normi BS EN ISO 14341:2008 za 27 J udarne energije

Oznaka	Kemijski sastav (%) *, **											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Ti+Zr
G18	0.02-0.15	0.50-1.10	1.60-2.40	0.030	0.030	-	-	-	-	0.50	-	0.02-0.30
G1M3	0.12	0.30-0.70	1.30	0.025	0.025	0.20	-	0.40-0.60	-	0.35		
G2M3	0.12	0.30-0.70	0.60-1.40	0.025	0.025	-	-	0.40-0.60	-	0.50	-	-
G2M31	0.12	0.30-0.90	0.80-1.50	0.025	0.025	-	-	0.40-0.60	-	0.50	-	-
G3M3T	0.12	0.40-1.00	1.00-1.80	0.025	0.025	-	-	0.40-0.60	-	0.50	-	Ti: 0.02-0.30
G3M1	0.05-0.15	0.40-1.00	1.40-2.10	0.025	0.025	-	-	0.10-0.45	-	0.50	-	-
G3M1T	0.12	0.40-1.00	1.40-2.10	0.025	0.025	-	-	0.10-0.45	-	0.50	-	Ti: 0.02-0.30
G4M31	0.05-0.15	0.50-0.80	1.60-2.10	0.025	0.025	-	-	0.40-0.65	-	0.40	-	-
G4M3T	0.12	0.50-0.80	1.60-2.20	0.025	0.025	-	-	0.40-0.65	-	0.50	-	Ti: 0.02-0.30

*Vrijednosti koje su jedinstveno navedene znače da je to maksimalna vrijednost udjela, dakle, može biti i manje od navedene vrijednosti.

**Za vrijednosti koje nisu navedene vrijedi: Cr do 0.15, Cu do 0.35, V do 0.03.

Tablica 2.8. Žice za zavarivanje i navarivanje tvrtke Elektroda Zagreb d.d. [26]

ŽICE ZA MAG ZAVARIVANJE													
Oznaka prema BS EN ISO 14341-A (oznaka proizvođača)	Kemijski sastav (%)									Opis	Zaštitni plin	Osnovni materijal (a)	Promjeri žice (mm)
	C	Si	Mn	Cu	Mo	Ti	Ni	Cr	V				
G 42 4 C/M 3Si1 (EZ SG2)	0.06- 0.13	0.7- 1.0	1.4- 1.6	Do 0.3						Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi	C1 ili M21*	Nelegirani i niskolegirani čelici čvrstoće do 590 N/mm ²	0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.6
G 46 4 C/M 4Si1 (EZ SG3)	0.08- 0.12	0.9- 1.1	1.6- 1.8	Do 0.3						Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi	C1 ili M21	Nelegirani i niskolegirani čelici čvrstoće do 640 N/mm ²	0.8, 1.0, 1.2, 1.6
G 46 2 M 2 Mo (EZ SG Mo)	0.06- 0.1	0.4- 0.6	1.0- 1.15		0.4 5- 0.5					Pobakrena ili pobrončana žica legirana molibdenom	M21	Nelegirani i niskolegirani čelici granice razvlačenja do 590 N/mm ²	0.8, 1.0, 1.2
G 42 2 C/M 2Ti (EZ SG Ti)	0.04- 0.06	0.5- 0.8	1.1- 1.5			0.1- 0.1 2				Pobakrena ili pobrončana žica legirana titanom	C1 ili M21	Ugljični i ugljično-manganski čelici čvrstoće do 510 N/mm ²	0.8, 1.0, 1.2
G 42 2 C/M 0 (EZ SG CORTEN)	0.06- 0.10	0.7- 0.9	1.4- 1.5	0.3-0.5			0.5- 0.8			Pobakrena ili pobrončana žica legirana niklom i bakrom	C1 ili M21		1.0, 1.2
G 69 4 M Mn3Ni1CrM o** (EZ SG 100)	0.12	0.4- 0.7	1.3- 1.8	Do 0.3	0.2- 0.3		1.2- 1.6	0.2- 0.4	0.0 5- 0.1 3	Pobakrena ili pobrončana žica legirana manganom, niklom, kromom i molibdenom	C1 ili M21	Sitnozrni čelici čvrstoće do 690 N/mm ²	0.8, 1.0, 1.2

G 89 6 M Mn4Ni2CrM o ** (EZ SG 120)	0.1	0.8	1.8		0.5	2.0	0.3 5		Pobakrena ili pobrončana niskolegirana žica	C1 ili M21	Sitnozrni čelici čvrstoće do 890 N/mm ²	1.0, 1.2
MSG 6-GZ- 60*** (MAG 600 TN)	0.45	3.0	0.4				9.5		Puna žica za tvrdo navarivanje dijelova izloženih udarcima i srednje jakom abrazivnom djelovanju	C1 ili M21		0.8, 1.0, 1.2, 1.6

(a) Ako nije naveden podatak, vrijedi za sve materijale (čelici za strojne dijelove)

* C1: 100% CO₂, M21 (C18): Ar + 18% CO₂

**Oznaka prema normi HRN EN ISO 12534

***Oznaka prema normi DIN8555

3. ANALIZA MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA SA STAJALIŠTA TROŠKOVA DODATNOG MATERIJALA I ZAŠTITNOG PLINA

3.1 Glavni troškovi MAG postupka zavarivanja

S obzirom na stabilnost procesa zavarivanja, analiza glavnih parametara zavarivanja kod MAG procesa navarivanja punom i praškom punjenom žicom pokazala je da se primjenom rutilnim praškom punjenih žica i plina Krysal 18 (82% ar, 18% CO₂) postiže najveća stabilnost električnog luka (prijenos metala štrcajućim lukom). Međutim, važan utjecaj na izbor dodatnog materijala i zaštitnog plina kod MAG procesa zavarivanja imaju i troškovi zavarivanja. Glavni troškovi MAG procesa zavarivanja su:

- a) troškovi električne energije,
- b) troškovi žice,
- c) troškovi rada izvršitelja,
- d) troškovi plina i
- e) troškovi stroja za zavarivanje. [27]

a) Troškovi električne energije

Za MAG/MIG postupak izračunava se snaga prema izrazu [27]:

Snaga električne energije:

$$P = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot \eta_s} \cdot \varepsilon + P_0 \cdot (1 - \varepsilon), \text{ kW} \quad \dots (3.1)$$

Električna energija za 1 kg depozita:

$$E_{\text{kg}} = \left[\frac{U \cdot I}{1000 \cdot \eta_s} \cdot \varepsilon + P_0 \cdot (1 - \varepsilon) \right] \cdot \frac{1}{k_t \cdot \varepsilon}, \frac{\text{kW}}{\text{kg depozita}} \quad \dots (3.2)$$

Izraz za troškove električne energije dobije se, ako se izraz (3.2) pomnoži sa jediničnom cijenom električne energije $C_{\text{el.en.1}}$.

$$T_{\text{el. energije}} = \left[\frac{U \cdot I}{1000 \cdot \eta_s} \cdot \varepsilon + P_0 \cdot (1 - \varepsilon) \right] \cdot \frac{1}{k_t \cdot \varepsilon} \cdot C_{\text{el.en.1}}, \frac{\text{kn}}{\text{kg depozita}}, \quad \dots (3.3)$$

gdje je :

U – napon električnog luka, V

I – jakost struje zavarivanja, A

η_s – stupanj korisnog djelovanja stroja, (za Fronius TPS 4000, $\eta_s = 0,88$)

ε – intermitencija, udio vremena gorenja električnog luka (za zavarivanje automatom, usvojena je vrijednost $\varepsilon = 0,7$)

$$\varepsilon = \frac{\text{vrijeme gorenja luka}}{\text{ukupno radno vrijeme}} \quad \dots (3.4)$$

P_0 – snaga koju stroj koristi u praznom hodu, kada luk ne gori. Snaga se tada troši za rad ventilatora, i zagrijavanje vodiča u stroju. P_0 iznosi približno za inverter 0,5 kW.

k_t – koeficijent taljenja elektrode, kg depozita/h

$C_{el.en.1}$ – jedinična cijena električne energije, kn/kWh. $C_{el.en.1} \cong 0,50$ kn/kWh.

Koeficijent taljenja žice k_t izračunava se prema jednadžbi:

$$k_t = \rho \cdot A_{DM} \cdot v \quad \dots (3.5)$$

gdje je:

ρ – gustoća, $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

A_{DM} – površina depozita, m^2

v – brzina zavarivanja, $\frac{\text{m}}{\text{h}}$

b) Troškovi žice

$$T_{\text{žice}} = C_{\text{žice1}} \cdot k'_t, \text{ kn/kg depozita} \quad \dots (3.6)$$

gdje je:

$C_{\text{žice1}}$ – cijena žice, kn/kg

(Prema podacima od dobavljača: za punu žicu $C_{\text{žice1}} = 18,37$ kn/kg, za rutilnim praškom punjenu žicu $C_{\text{žice1}} = 26,93$ kn/kg, za bazičnim praškom punjenu žicu $C_{\text{žice1}} = 30,00$ kn/kg.)

k'_t – koeficijent taljenja žice, kg žice/kg depozita

(Za MAG zavarivanje punom žicom $k'_t \cong 1,05$ kg žice/kg depozita, za MAG zavarivanje praškom punjenom žicom $k'_t \cong 1,1$ kg žice/kg depozita.)

c) Troškovi rada izvršitelja

Troškovi osobnog dohotka izvršitelja (radnika) izračunavaju se prema izrazu

$$T_{ODI} = \frac{ODI}{k_t \cdot \varepsilon}, \frac{\text{kn}}{\text{kg depozita}} \quad \dots (3.7)$$

gdje je:

ODI – bruto iznos osobnog dohotka radnika, kn/h (može se usvojiti, $ODI \cong 110$ kn/h)

d) Troškovi plina

Potrošnja plina izračunava se prema izrazu

$$K_g = \frac{f_g \cdot 60}{k_t \cdot \varepsilon}, \frac{1}{\text{kg depozita}} \quad \dots (3.8)$$

$$T_p = C_{p1} \cdot K_g, \frac{\text{kn}}{\text{kg depozita}} \quad \dots (3.9)$$

gdje je:

$$T_p - \text{troškovi plina}, \frac{\text{kn}}{\text{kg depozita}}$$

$$K_g - \text{potrošnja plina}, \frac{1}{\text{kg depozita}}$$

$$f_g - \text{protok plina}, \frac{1}{\text{min}}$$

$$C_{p1} - \text{cijena plina}, \frac{\text{kn}}{1}$$

(Prema podacima od dobavljača: za plin CO₂ C_{p1} = 0,006 kn/l, za plin Krysal 18 C_{p1} = 0,043 kn/l.)

e) Troškovi stroja za zavarivanje

Jedinični su troškovi stroja:

$$T_{s1} = \frac{C_N (K_{am} + K_{os} + K_{od})}{\text{broj sati rada godišnje}}, \frac{\text{kn}}{\text{h}} \quad \dots (3.10)$$

$$T_{\text{stroja}} = T_{s1} \cdot \frac{1}{k_t \cdot \varepsilon}, \frac{\text{kn}}{\text{kg depozita}} \quad \dots (3.11)$$

Uvrštavanjem se dobiva:

$$T_{\text{stroja}} = \frac{C_N (K_{am} + K_{os} + K_{od})}{\text{broj sati rada godišnje}}, \frac{1}{k_t \cdot \varepsilon}, \frac{\text{kn}}{\text{kg depozita}} \quad \dots (3.12)$$

gdje je:

C_N – nabavna cijena stroja, kn

K_{am} – godišnja stopa amortizacije, npr. 0,1 (10 % od C_N godišnje - otpis stroja za npr. 10 godina.)

K_{os} – godišnja premija osiguranja, npr. 0,01 (1 % od C_N)

K_{od} – godišnji iznos za održavanje, npr. 0,04 (4 % od C_N)

Broj sati rada godišnje stroja u jednoj ili više smjena ovisi o stvarnom korištenju stroja (usvojeno je broj sati rada godišnje = 2100 h).

Ukupno glavni troškovi:

Ukupno glavni troškovi izračunavaju se prema izrazu:

$$T_{\text{uk}} = \sum_{i=1}^{n=4} T_i, \text{ kn/kg depozita} \quad \dots (3.13)$$

Troškovi zavarivanja, uz stabilnost procesa zavarivanja, predstavljaju važnu stavku kod izbora dodatnog materijala i zaštitnog plina. Analizom troškova MAG zavarivanja određen je utjecaj izbora dodatnog materijala i zaštitnog plina na troškove zavarivanja. S obzirom da se primjenom skupljih dodatnih materijala i zaštitnog plina (npr. rutilnim praškom punjene žice i plinske mješavine Krysal 18) postiže bolja stabilnost električnog luka nego kod primjene pune žice i zaštitnog plina CO₂, za optimalan izbor je potrebno načiniti kompromis između ova dva zahtjeva. Pri tome, naravno, treba voditi računa i o drugim zahtjevima koji se postavljaju na zavareni spoj (npr. mehanička svojstva zavara, otpornost na koroziju, pojava prskotina).

Povećani troškovi uslijed primjene skuplje žice za zavarivanje i plinske mješavine mogu se, međutim, umanjiti i primjenom alata i naprava za skraćanje trajanja zavarivanja, tehnološkim projektiranjem i izradom zavarenih proizvoda (npr. izbor optimalnog žlijeba za zavarivanje).

4. METODIČKI DIO

4.1 Područja strukovnog obrazovanja vezana uz temu diplomskog rada

Tema diplomskog rada je MAG postupak zavarivanja. Sadržaje vezane uz tu temu obrađuju prvenstveno učenici koji pohađaju smjer zavarivača u industrijskim i obrtničkim strukovnim školama, ali i učenici u tehničkim i elektrotehničkim školama, kao sastavni dio predmeta Elementi strojeva i Strojarske tehnologije. U nastavku će se analizirati ustroj strukovnih škola u Republici Hrvatskoj, program zanimanja zavarivač te Nastavni plan i program za smjer zavarivača.

4.2 Ustroj strukovnog obrazovanja u Republici Hrvatskoj

Odgojno – obrazovni sustav u Republici Hrvatskoj je ustrojen prema Hrvatskom klasifikacijskom okviru (HKO) i podijeljen na 8 odgojno – obrazovnih razina. Prva razina je osmogodišnja obavezna osnovna škola, a potom slijede neobavezna dodatna osposobljavanja općeg ili stručnog karaktera. Strukovne škole su prema HKO-u na četvrtoj razini, na dvije podrazine, jer postoje trogodišnje i četverogodišnje strukovne škole. U trogodišnjim srednjim strukovnim školama se učenici obrazuju za neko zanimanje, a po završetku polažu završni ispit. U četverogodišnjim strukovnim školama se učenici obrazuju za neko zanimanje, a po završetku polažu državnu maturu i imaju mogućnost nastavka obrazovanja na višim razinama upisivanjem sveučilišnog ili stručnog studija. Da bi učenici trogodišnjih strukovnih škola mogli nastaviti obrazovanje na višim razinama, moraju završiti jednu školsku godinu dokvalifikacije, te nakon toga položiti državnu maturu i upisati neki studij. Najviša razina je poslijediplomski doktorski studij, kojim se stječu najviše kompetencije određenog područja. [28]

4.3 Opis programa zanimanja zavarivač

Zanimanje zavarivač se kategorizira u sektor Strojarnstvo, brodogradnja i metalurgija, obrazovno područje brodogradnja. Obrazovanje traje dvije godine i ne navode se posebni uvjeti za upis.

Kao ciljevi obrazovnog programa se navode:

- Stjecanje i razvoj znanja, vještina i stavova za osobni razvoj i daljnje učenje
- Stjecanje praktičnih i teoretskih znanja i vještina za obavljanje poslova pomoćnog brodograditelja:
 - Stjecanje znanja i vještina za pravilno rukovanje strojevima, uređajima i alatima tijekom rada te njihovo pravilno održavanje
 - Stjecanje znanja o sigurnosti pri radu
 - Razvoj ekološke svijesti i osobne odgovornosti.

Opće kompetencije, koje stječe učenik pohađanjem obrazovnog programa za zavarivača, su:

- Sposobnost sudjelovanja u jednostavnoj pismenoj i usmenoj komunikaciji
- Sposobnost sudjelovanja u grupnoj raspravi
- Sposobnost čitanja i sinteze podataka iz dokumenta o istoj temi
- Usvojena osnovna matematička znanja potrebna za razumijevanje zakonitosti u prirodi i društvu te je osposobljen za primjenu znanja u životu i struci
- Razvoj vještine samostalnog računanja, crtanja i mjerenja prema uputama, kao i preciznost u radu
- Primjena stečenog znanja stranog jezika u svim oblicima komunikacije
- Primjena usvojenih metoda za učenje i usavršavanje novih
- Posjeduje znanje potrebno za korištenje aplikacija za tablični prikaz i izračun
- Posjeduje znanje potrebno za izradu prezentacije
- Preuzima odgovornost za svoj zadatak korištenjem vlastitog plana za ostvarivanje zadanih ciljeva.

Stručne kompetencije, koje stječe učenik pohađanjem obrazovnog programa za zavarivača, su:

- Sposobnost je planiranja, pripremanja, izvođenja rada i izvršavanja provjere kvalitete obavljenog posla
- Racionalno korištenje sredstva za rad, energije, materijala i vremena
- Sposobnost je čitanja tehničkih crteža i tehničko-tehnološke dokumentacije

- Informatička pismenost
- Poduzetničke sposobnosti
- Sposobnost rezanja i obrade dijelova električnim lukom i plinskim postupkom
- Zavarivanje i navarivanje dijelova ručnim elektrolučnim postupkom
- Zavarivanje električnim lukom u zaštiti inertnih plinova i mješavina
- Pravilno rukovanje alatima, priborima i uređajima za zavarivanje
- Sposobnost ispunjavanja potrebne radne dokumentacije i dokumentacije o evidenciji stanja alata, pribora i uređaja
- Sposobnost pripreme elemenata kalkulacije
- Primjena standarda kvalitete
- Komunikacija sa suradnicima i strankama uz poštivanje principa poslovne kulture
- Primjena propisa zaštite na radu i zaštite okoliša.

Nastava je koncipirana tako da ima opće-obrazovni dio, stručno-teorijski dio i praktičnu nastavu. Predviđeno je za prvi razred 17 tjedana teoretske nastave (ukupno 510 sati) i 18 tjedana praktične nastave (ukupno 504 sata), a za drugi razred 14 tjedana teoretske nastave (ukupno 420 sati) i 18 tjedana praktične nastave (ukupno 504 sata).

Predmeti, koje obuhvaća obrazovni program, a kojima se stječu navedene kompetencije su Hrvatski jezik, Računalstvo, Tjelesna i zdravstvena kultura, Vjeronauk/Etika, Strani jezik, Poduzetništvo, Matematika u struci, Tehnologija zavarivanja, Osnove brodogradnje s materijalima, Strojevi i uređaji za zavarivanje te praktična nastava. Za izborni predmet učenici mogu birati između dva ponuđena predmeta: Zavarivanje i rezanje plamenom, TIG zavarivanje. [29]

4.4 Nastavni plan predmeta Tehnologija zavarivanja

Nastavu predmeta Tehnologija zavarivanja učenici pohađaju u prvom i u drugom razredu. U prvom razredu je za predmet predviđen fond sati od 3 sata tjedno, odnosno 102 sata za godinu. U drugom razredu je za ovaj predmet predviđen fond sati od 3 sata tjedno, odnosno 84 sata za godinu.

Za nastavnika su predviđeni slijedeći zadaci:

- Upoznati učenike s postupcima zavarivanja
- Osposobiti učenike za svladavanje vještina elektrolučnog zavarivanja
- Objasniti probleme koji prate tehnologiju zavarivanja da bi poduzimali mjere za sprječavanje nepoželjnih pojava u radu
- Poučiti učenike kako uočiti izvore opasnosti pri radu i kako ih izbjeći korištenjem sredstava zaštite na radu
- Razviti kod učenika želju za napretkom kroz cjeloživotno obrazovanje
- Upoznati učenike s osnovnim pojmovima i zakonitostima
- Upoznati mogućnosti i domet električne energije, a posebno u području zanimanja
- Osposobiti učenike za primjenu stečenih znanja na praktičnoj nastavi i u poslu zanimanja
- Upoznati učenike s mjerama zaštite od električnog napona
- Upoznati učenike sa stručnom literaturom vezanom uz područje, standardima, priručnicima, uputama i sl.
- Razviti kod učenika osjećaj odgovornosti i obaveze primjene zaštite pri radu tijekom izvođenja radnih zadataka. [29]

U Tablici 4.1. je prikazana podjela sadržaja na nastavne cjeline za prvi razred, a u Tablici 4.2. za drugi razred, prema kojima će se ostvarivati predviđeni zadaci. Navedeni su i očekivani ciljevi nastavnih cjelina te sadržaji, kroz koje će se nastavne cjeline obraditi.

Tablica 4.1. Prikaz nastavnog plana za prvi razred

Nastavna cjelina	Ciljevi	Nastavni sadržaji
Uvod u zaštitu na radu	Poznavati mjere, sredstva i postupke zaštite na radu	Funkcija i važnost zaštite pri radu. Ostvarivanje i uređivanje zaštite pri radu. Osposobljavanje radnika za rad na siguran način.
Mjere sigurnosti prilikom primjene električne energije		Električna energija i njeno djelovanje. Opasnosti od električne struje (izravan dodir djelovanjem pod naponom, približavanje dijelovima pod naponom, previsok napon dodira, električni luk). Tehničke mjere zaštite. Pružanje prve pomoći pri povredi električnom strujom.

Nastavna cjelina	Ciljevi	Nastavni sadržaji
Mehanički ručni alat		Osnovne grupe opasnosti pri radu s ručnim mehaničkim alatom. Opasnosti od uređaja za prijenos mehaničkog gibanja. Opasnosti pri izvođenju radnih postupaka. Osnovne vrste zaštitnih naprava i njihova primjena. Nadzor i održavanje alata.
Mjere zaštite pri radu na skelama		Opasnosti pri radu na skelama i mjere zaštite (radni podesti, ljestve, zaštitne ograde). Načini montaže i održavanje skela, prolaza i prilaza na visini.
Opasnost i mjere zaštite od štetnih prašina i plinova		Djelovanje (metalne) prašine na ljudski organizam. Mjere zaštite, štetni plinovi i opasnosti pri radu s njima.
Mjere zaštite od zračenja		Zračenje i djelovanje na organizam. Mjere zaštite od toplinskog infracrvenog, ultraljubičastog, rendgenskog i radioaktivnog zračenja.
Osnovna načela sigurnosti pri radu u uskim i zatvorenim prostorijama		Opasnosti od trovanja i eksplozije. Mjere zaštite.
Osnovna načela sigurnosti u unutarnjem prijevozu		Ručni prijevoz. Noseća i pomoćna sredstva za vezivanje tereta. Vezivanje tereta i signalizacija. Prometnice i ostali putovi. Sredstva unutarnjeg prijevoza.
Osnove gašenja požara		Osnovni uvjeti gorenja. Izvori i uzroci požara. Postupci i sredstva za gašenje požara. Ručni uređaji za gašenje.
Osnove tehničkog crtanja		Znati i umjeti čitati radioničke crteže.
Zavarivanje kao postupak spajanja u	Znati osnove rada strojeva i uređaja za	Povijest zavarivanja. Razvoj zavarivanja u brodogradnji i utjecaj na konstrukciju broda.

Nastavna cjelina	Ciljevi	Nastavni sadržaji
nerastavljivu vezu	zavarivanje	Osnovni pojmovi iz tehnike zavarivanja
Električni luk		Osnovne električne veličine i njihovo djelovanje. Pojam i uspostavljanje električnog luka.
Osnovne značajke izvora električne struje za zavarivanje		Statičke značajke. Radna točka. Područje regulacije. Intermitencija.
Transformatori		Načelo rada transformatora za zavarivanje (s pomičnom kotvom, s promjenom broja zavoja, s prigušnicom i svitkom).
Ispravljači za zavarivanje		Opis, značajke i načelo rada.
Generatori za zavarivanje		Generatori izmjenične i istosmjerne struje (informativno).
Zavareni spojevi	Znati karakteristike i postupke zavarivanja	Podjela i vrste spojeva. Elementi žlijeba (oblici i dimenzije). Priprema žljebova. Elementi i vrste zavara. Oznake na nacrtima i limovima.
Elektrolučno zavarivanje		Električni luk. Karakteristike električnog luka.
Elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom		Karakteristike postupka. Dodatni materijal: funkcije obloge, karakteristike obloge, upute za izbor. Prijelaz rastaljenog materijala u spoj. Redosljed zavarivanja.
Poluautomatsko zavarivanje		Karakteristika postupka. Vrste: gravitacijsko, autokontaktno. MAG postupak zavarivanja. Postupci TIG i MIG. Ekonomska usporedba s ručnim zavarivanjem.
Pogreške		Vrste pogrešaka. Utjecaj tehničko-tehnoloških faktora. Utjecaj kemijskih faktora. Utjecaj ljudskog faktora. Utvrđivanje i otklanjanje pogreške. Načini izbjegavanja pogrešaka.

Tablica 4.2. Prikaz nastavnog plana za drugi razred

Nastavna cjelina	Ciljevi	Nastavni sadržaji
Standardna priprema žljebova za zavarivanje sučelnog V spoja i zidnom i nadglavnom položaju	Znati izabrati i pripremiti materijal za zavarivanje	<p>Brušenje stranica žlijeba. Zračnost u korijenu žlijeba, kod zidnog i nadglavnog sučelnog V spoja: -od 2-3 mm -preko 4 mm. Čišćenje spoja prije zavarivanja: -od korozije -od masnoće -od ostataka rezanja -od drugih nečistoća.</p>
Osnovni i dodatni materijali za zavarivanje		<p>Zavarljivost brodograđevnih čelika međusobno i brodograđevnih čelika s nehrđajućim čelicima. Zavarljivost nehrđajućih čelika međusobno (Duplex i dr.). Vrste elektroda i njihova primjena: Rutilne, bazične, celulozne; Za zavarivanje sivog lijeva; Za zavarivanje obojenih metala; Za navarivanje; Specijalne elektrode za reparaturno zavarivanje i dr.</p>
Parametri koji utječu na kvalitetu zavarivanja	Znati parametre zavarivanja	<p>Položaj u zavarivanju. Vrste el. struje i polariteta u zavarivanju. Jakost el. struje. Duljina električnog luka. Nagib elektrode. Brzina zavarivanja. Tehnika rada (njihanje). Uspostavljanje i prekidanje el. luka. Izvođenje nastavka.</p>
Tehnika izvođenja zavarivanja sučelnog V spoja u zidnom položaju	Znati tehnike izvođenja zavarivanja	Tehnika zavarivanja. Parametri zavarivanja.
Tehnika izvođenja zavarivanja sučelnog V spoja u nadglavnom položaju		Tehnika zavarivanja. Parametri zavarivanja.
Zavarivanje brodograđevnih čelika s nehrđajućim čelicima	Poznavati zavarivanje specijalnim elektrodama	<p>Tehnika zavarivanja kutnog T spoja u vertikalnom položaju odozdo prema gore specijalnim elektrodama za zavarivanje brodograđevnih čelika s nehrđajućim čelicima (mješoviti spoj), specijalnim elektrodama za zavarivanje Duplex čelika. Tehnika zavarivanja kutnog T spoja u nadglavnom položaju, brodograđevni čelik s</p>

Nastavna cjelina	Ciljevi	Nastavni sadržaji
		Duplex čelikom, Duplex čelik međusobno.
Povišena zračnost i njeno uklanjanje	Poznavati deformacije koje se javljaju pri zavarivanju	Povišena zračnost kod sučeljnih spojeva. Način rješavanja povišene zračnosti kod sučeljnih spojeva.
Način sprječavanja deformacija kod sučeljnih spojeva		Poštivanje plana i redoslijeda zavarivanja. Pravilan odabir parametara za zavarivanje. Pravilan odabir postupka zavarivanja. Način postavljanja spojnih komada prije zavarivanja (predeformiranje).
Pogreške kod zavarenih spojeva	Znati pogreške zavarenih spojeva	Vrste pogrešaka: -pukotine -uključci plina-šupljine (poroznost) -uključci u skrućenom stanju -naljepljivanje, nedostatak provara, pogreške oblika i dr. Uzroci, sprječavanje i otklanjanje pogrešaka kod zavarivanja.

4.5 Priprema za izvođenje nastave za pripadnu razinu kvalifikacije u skladu s HKO sadržajno vezana uz temu rada

SVEUČILIŠTE U RIJECI
FILOZOFSKI FAKULTET U RIJECI
ODSJEK ZA POLITEHNIKU

Ime i prezime: Nataša Atlija

PRIPREMA ZA IZVOĐENJE NASTAVE

Škola: Industrijsko-obrtnička škola Slavonski Brod

Mjesto: Slavonski Brod

Razred: 1.M

Zanimanje: Zavarivač

Nastavni predmet: Tehnologija zavarivanja

Kompleks: Poluautomatsko zavarivanje

Nastavna jedinica: MAG postupak zavarivanja

Datum izvođenja: 28. rujna, 2016.

SADRŽAJNI PLAN

Podjela kompleksa na teme

Redni broj	Naziv teme u kompleksu	Broj sati	
		Teorija	Vježbe
1.	Karakteristike postupka. Vrste: gravitacijsko, autokontaktno.	1	0
2.	MAG postupak zavarivanja.	2	0
3.	Postupci TIG i MIG.	2	0
4.	Ekonomska usporedba s ručnim zavarivanjem.	1	0

Karakter teme – metodičke jedinice:

Tema je informativnog karaktera – obrađuje se da bi se učenici upoznali s MAG postupkom zavarivanja, ključnim konceptima i parametrima MAG postupka da bi stečena znanja mogli primijeniti na praktičnoj nastavi i u poslu zanimanja.

Cilj i svrha obrade metodičke jedinice:

Cilj obrade metodičke jedinice je da učenici razumiju koji su parametri važni za MAG postupak zavarivanja te koji su režimi rada i kako ih postići pri radu da bi mogli te spoznaje primijeniti pri radu na praktičnoj nastavi i u poslu zanimanja.

ISHODI UČENJA:

ZNANJE I RAZUMIJEVANJE

Učenici će moći:

- Definirati postupak MAG zavarivanja
- Objasniti koncepte MAG postupka zavarivanja
- Objasniti parametre MAG postupka zavarivanja
- Objasniti ulogu zaštitnih plinova pri MAG postupku zavarivanja
- Razlikovati vrste žica za MAG postupak zavarivanja s obzirom na njihov sastav

VJEŠTINE I UMIJEĆA

Učenici će moći:

- Usporediti različite režime rada MAG postupka zavarivanja
- Odabrati režim rada zavarivanja ovisno o vrsti osnovnog i dodatnog materijala
- Argumentirati odabir zaštitnog plina za zadane uvjete rada
- Odabrati žicu za zavarivanje ovisno o osnovnom materijalu i korištenom zaštitnom plinu

SAMOSTALNOST I ODGOVORNOST

Učenici će moći:

- Aktivno sudjelovati u nastavi
- Samostalno istražiti literaturu za rješavanje zadatka
- Razvijati komunikacijske vještine
- Razvijati tolerantnost i solidarnost u grupnom radu
- Izabrati važnije pojmove i karakteristike iz literature, koje će predstaviti pred razredom

ORGANIZACIJA NASTAVNOG RADA – ARTIKULACIJA METODIČKE JEDINICE:

Dio sata	Faze rada i sadržaj	Metodičko oblikovanje	Vrijeme (min.)
Uvodni dio	<p>Priprema za rad</p> <ul style="list-style-type: none"> - Priprema računala, projektora i prezentacije <p>Ponavljjanje pojmova s prethodnih sati</p> <ul style="list-style-type: none"> - Izvori struje za zavarivanje - Električni luk - Funkcija i karakteristike dodatnog materijala <p>Najava teme</p> <ul style="list-style-type: none"> - Najava teme koja će se obrađivati <p>Motivacija</p> <ul style="list-style-type: none"> - Primjena MAG postupka zavarivanja 	<p>Razgovor – ponavljanje ključnih pojmova vezanih uz temu metodičke jedinice: koji su izvori struje za zavarivanje, što je i kako se uspostavlja električni luk, koja je funkcija i koje su karakteristike dodatnog materijala</p> <p>Usmeno izlaganje – najava teme</p> <p>Razgovor – široka i česta primjena MAG postupka zavarivanja</p>	5
Središnji dio	<p>MAG postupak zavarivanja</p> <ul style="list-style-type: none"> - Koncepti - Parametri - Režimi rada - Zaštitni plinovi - Dodatni materijal 	<p>Usmeno izlaganje – zadavanje zadatka i upute za izvršavanje zadatka</p> <p>Grupni rad – istraživanje literature za izvršavanje zadatka</p> <p>Razgovor – predstavljanje rješenja zadataka grupa</p>	75
Završni dio	<p>Sistematizacija i ponavljanje obrađenog sadržaja</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pitanja nastavnice 	<p>Razgovor – ponavljanje ključnih pojmova</p>	10

POSEBNA NASTAVNA SREDSTVA I POMAGALA:

Računalo, projektor, prezentacija, literatura za grupni rad (kopirane stranice priručnika za zavarivanje).

KORELATIVNE VEZE METODIČKE JEDINICE S OSTALIM PREDMETIMA I PODRUČJIMA:

Strojevi i uređaji za zavarivanje – elektromagnetizam, izmjenična struja, strojevi i uređaji za zavarivanje

Matematika u struci – linearne jednačbe, planimetrija, potencije

METODIČKI OBLICI KOJI ĆE SE PRIMJENJIVATI TIJEKOM RADA:

Uvodni dio: frontalni rad – ponavljanje ključnih pojmova razgovorom

- najava teme
- razgovor o širokoj primjeni MAG postupka zavarivanja

Središnji dio: frontalni rad – podjela i zadavanje zadataka za grupe

Grupni rad – rad učenika na zadacima, predstavljanje rješenja zadataka

Završni dio: frontalni rad – sistematizacija i ponavljanje obrađenog sadržaja

IZVORI ZA PRIPREMANJE NASTAVNICE:

Lukačević, Z., *Zavarivanje*, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.

Kraut, B., *Strojarski priručnik*, deveto hrvatsko ili srpsko izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.

Milotić, M., *Priručnik za zavarivače, 2. Dopunjeno izdanje: Gasno zavarivanje, MIG/MAG, WIG (TIG), Autogeno i plazma rezanje*, Saobraćajni fakultet Doboj i BCD Elektro d.o.o. Doboj, Doboj, 2008.

Garašić, I., Kožuh, Z., *Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

Razni članci i drugi priručnici vezani uz područje

IZVORI ZA PRIPREMANJE UČENIKA:

Odabrana poglavlja iz priručnika za zavarivače:

- Lukačević, Z., *Zavarivanje*, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.
- Milotić, M., *Priručnik za zavarivače, 2. Dopunjeno izdanje: Gasno zavarivanje, MIG/MAG, WIG (TIG), Autogeno i plazma rezanje*, Saobraćajni fakultet Doboj i BCD Elektro d.o.o. Doboj, Doboj, 2008.
- Garašić, I., Kožuh, Z., *Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

Kopirani materijali koje priprema nastavnica

TIJEK NASTAVNOG SATA

UVODNI DIO

Priprema za rad

Pozdraviti će se učenike, provjeriti nedostaje li tko na satu, upisati će se sat u Dnevnik. Pripremiti će se računalo, projektor i pokrenuti prezentacija.

Ponavljanje pojmova s prethodnih sati

Razgovorom će se ponoviti koji se izvori struje primjenjuju za zavarivanje. Očekuje se da će učenici aktivno sudjelovati u razgovoru i odgovarati na pitanja:

- Koje smo izvore struje za zavarivanje spominjali na prethodnim satima? (transformatori, ispravljači, generatori, agregati, inverteri)
- Koju vrstu struje daje pojedini izvor? (transformatori daju izmjeničnu struju s karakteristikama pogodnim za zavarivanje, ispravljači daju istosmjernu struju, daju pogodnu izmjeničnu struju – stabiliziraju je, a može se dodati i ispravljač da se dobije istosmjerna struja, agregati daju struju pogodnu za zavarivanje, samostalni, pokretani dizel ili benzinskim motorom, inverteri daju istosmjernu struju ili visokofrekventnu pulsirajuću struju koja se transformira na struju pogodnu za zavarivanje)

Ponoviti će se što je električni luk pitanjima:

- Što je električni luk? (električni luk je trajno pražnjenje elektriciteta u ionizirajućem plinu između slobodnog kraja žice i obradka uz vrlo visoke temperature i gustoću struje, a oslobađa se puno topline i svjetlosti)
- Koja je funkcija električnog luka? (omogućuje taljenje materijala i prijenos dodatnog materijala na osnovni materijal)

Funkcija i karakteristike dodatnog materijala će se ponoviti pitanjima:

- Kakav se dodatni materijal koristi, u kojem obliku? (u obliku žice)
- Koje su dvije osnovne vrste žica? (pune i punjene)
- Koji parametri su važni za izbor žice? (vrsta, kemijski sastav, promjer)

Najava teme

Najaviti će se tema koja će se obrađivati na satu i na ploču će se napisati naslov *MAG postupak zavarivanja* i datum, a učenici će to napisati u svoje bilježnice.

Motivacija

Da bi učenici bili zainteresirani za temu istaknuti će se široka primjena MAG postupka zavarivanja zbog mogućnosti rada u različitim režimima s različitim parametrima.

SREDIŠNJI DIO

MAG postupak zavarivanja

Učenike će se uputiti neka se podijele u grupe tako da bude jednak broj članova u grupama. Podijeliti će se papiri sa zadacima svakoj grupi i kopirani materijali, iz kojih će učenici izvući podatke tražene u zadatku.

Učenike će se uputiti kako rješavati zadatak, tako da prvo prouče što se traži u zadatku, a potom neka istražuju dobivene materijale. Napomenuti će se učenicima kako trebaju na dobiveni list sa zadatkom napisati tko su članovi grupe i datum. Reći će im se da trebaju svi jednako i zajednički raditi na zadatku te da se mogu obratiti nastavnicima za bilo kakve poteškoće ili nejasnoće. Reći će se kako imaju 20 minuta za rješavanje zadatka, a potom će svaka grupa predstaviti rješenje svog zadatka i na ploču zapisati najvažnije pojmove.

Potom učenici počinju s radom, a nastavnica ih obilazi i provjerava sudjeluju li svi u radu i imaju li kakvih nejasnoća ili poteškoća te pomaže kome je potrebno.

Kada učenici završe proučavanje materijala, predstaviti će svoja rješenja. Na prvom satu će prve dvije grupe predstaviti rješenja, a na drugom satu će preostale četiri grupe predstaviti svoja rješenja. Za vrijeme izlaganja učenika, koristiti će se prezentacija da bi se prikazale slike koncepata MAG zavarivanja, grafovi vezani uz parametre, slike koje prikazuju princip rada pojedinog režima rada, grafove i slike utjecaja zaštitnog plina na zavar te slike i tablice vezane uz dodatni materijal.

Očekuje se da će učenici razraditi slijedeće:

Koncepti

Koncepti MAG zavarivanja su:

- Izvor struje
- Dodavač žice
- Sustav za zaštitni plin
- Pištolj za zavarivanje s polikablom
- Komandni ormarić (kućište)

(To bi trebalo zapisati na ploču, a ako učenici ne postupe tako, uputiti će ih se da tako naprave.)

-Uloga izvora struje je da daje struju potrebnu za zavarivanje, a može se dobiti od transformatora, ispravljača, generatora, agregata ili invertera.

-Dodavač žice je uređaj koji omogućuje dovođenje žice od kućišta uređaja do pištolja prema osnovnom materijalu. Ključni dijelovi dodavača su kotačići (valjci), koji svojim okretanjem guraju žicu od kućišta prema pištolju. Postoji nekoliko izvedbi dodavača: kabinski sustav, univerzalni sustav, tandemski sustav i „push-pull“ sustav.

Kod kabinskog sustava žica se nalazi u kućištu uređaja, namijenjen je za rad na jednom nepokretnom radnom mjestu.

Kod univerzalnog sustava su mehanizam za dovod žice i kolut žice smješteni izvan kućišta uređaja te se primjenjuje na različitim radnim mjestima i može se koristiti za zavarivanje velikih radnih komada.

Tandemski sustav ima dva pogonska mehanizma, od kojih je jedan u kućištu uređaja uz kolut žice, a drugi je između uređaja i pištolja u blizini radnog mjesta. Ovaj sustav se može primijeniti za rad na različitim radnim mjestima, za velike radne komade i na nepristupačnim radnim komadima.

„Push – pull“ sustav, kao i tandemski, ima dva mehanizma za dodavanje žice. Jedan mehanizam je u kućištu uređaja, a drugi je u pištolju (taj mehanizam vuče žicu, a ne gura je). „Push – pull“ sustav se primjenjuje za rad na nepristupačnim radnim mjestima (jer kolut žice ne smeta za rad).

-Sustav za zaštitni plin se sastoji od boce s plinom, cijevi koje dovode plin od boce do pištolja, redukcijskog ventila i elektromagnetskog ventila. Na redukcijskom ventilu se podešava i mjeri protok plina. Elektromagnetskim ventilom se otvara i zatvara protok plina.

Za optimalan rad se za protok plina se uzima da je deset puta veći od promjera žice. Ako se koristi žica promjera 0.6 mm, protok plina će se postaviti na 6 L/min. Ako se koristi žica promjera 1.2 mm, protok plina će se postaviti na 12 L/min.

-Pištolj (gorionik) služi za dovod struje, upravljačkih signala, zaštitnog plina, žice za zavarivanje te rashladne tekućine do osnovnog materijala. Postoji više različitih izvedbi pištolja, a izbor ovisi o vrsti zavarivanja, korištenom zaštitnom plinu, jakosti struje koja će se primjenjivati te o tome ima li potrebe za hlađenjem pištolja.

Dijelovi pištolja su cijevni vodič, ojačanje vodiča, uvodnica žice, difuzor plina, kontaktna provodnica, dizna, čahura, prekidač za paljenje i gašenje električnog luka.

-Kućište uređaja (komandni ormarić) sadrži upravljački sustav koji upravlja radom uređaja, kolut sa žicom, crijevo za dovod zaštitnog plina. Upravljački sustav kontrolira način uključivanja izvora struje zbog uspostavljanja i prekidanja električnog luka, dodavanje žice, protok zaštitnog plina, održavanje parametara zavarivanja konstantnima. Može imati i neke dodatne funkcije poput kratkog povećanja jakosti struje na početku rada zbog boljeg paljenja luka ili postupno smanjenje jakosti struje na kraju rada, za bolje završavanje zavara.

Parametri

Postoji mnogo parametara za kvalitetno i produktivno zavarivanje, a najvažniji s najviše utjecaja na zavar su:

- Napon
- Jakost struje
- Brzina dovođenja žice
- Slobodan kraj žice
- Promjer žice
- Zaštitni plin
- Indukcija

(To bi trebalo zapisati na ploču, a ako učenici ne postupe tako, uputiti će ih se da tako naprave.)

-Napon utječe tako da o njemu ovise duljina i širina električnog luka. Ovisnost duljine i širine električnog luka o naponu je proporcionalna. Veći napon daje dulji i širi električni luk, ali penetracija materijala je pritom manja te zavar ima slabija mehanička svojstva.

Podešavanje napona ovisi o podešenoj jakosti struje, čime se postiže određeni nagib rada uređaja, a treba biti ravan ili blago padajući.

Nagib je vrlo važna funkcija/parametar pri zavarivanju kratkim spojem i sprejom. Kod zavarivanja kratkim spojem o nagibu napona i jakosti struje ovisi do koje će vrijednosti rasti jakost struje, a to je važno zbog utjecaja na odvajanje kapljice žice iz luka i njenog dobrog razlijevanja po materijalu.

Nagib se podešava u ovisnosti o materijalu i promjeru žice, brzini žice te o korištenom zaštitnom plinu. Posebno se treba obratiti pažnja ako se za plin koristi čisti CO₂, jer tada može doći do prštanja. Kod zavarivanja sprejom nagib treba biti malen da bi se ostvario sprej sa sitnim kapljicama, koje se jednoliko odvajaju od žice.

-Jakost struje utječe na to kako će se rastaljena žica prenositi na obradak, na stabilnost električnog luka, penetraciju materijala, nadvišenje zavara, koeficijent taljenja te brzinu zavarivanja. Uz uvjet da je napon konstantan, jakost struje ovisi o brzini žice, promjeru žice, duljini slobodnog kraja žice i materijalu.

-Brzina dovođenja žice se iskazuje u metrima po minuti (m/min). Brzina dovođenja žice je proporcionalna jakosti struje, a proporcionalnost ovisi o vrsti i proizvođaču uređaja.

-Slobodan kraj žice je obrnuto proporcionalan jakosti struje, a iskazuje se u milimetrima. To je dio žice koji se može vidjeti izvan dizne pištolja. Važno je da slobodan kraj žice bude konstantan da bi penetracija materijala bila nepromijenjena.

-Promjer žice je obrnuto proporcionalan otporu žice. Utjecaj promjera žice na jakost struje je takav da će jakost struje biti veća, ako je promjer žice veći i obrnuto, ako je promjer žice manji i jakost struje će biti manja. To vrijedi uz uvjet da je brzina dovođenja žice nepromijenjena.

-Zaštitni plinovi se koriste zbog slijedećih razloga:

- zaštita zavara od atmosferskih utjecaja, odnosno oksidacije i poroznosti jer se smanjuju mehanička svojstva zavara
- stvaranje plazme (plin provodi električnu struju, zagrijava se i toplinu predaje žici i materijalu koji se zavaruje te ih tako tali i zavaruje)
- omogućuju potrebnu geometriju profila zavara (utječu na širinu zavara i penetraciju materijala)
- njima se kontroliraju transferi/režimi rada
- utječu na stabilnost električnog luka
- utječu na brzinu zavarivanja

Kao zaštitni plinovi se koriste čisti ugljikov dioksid ili mješavina ugljikovog dioksida i argona u određenim omjerima, ovisno o vrsti osnovnog i dodatnog materijala, promjeru žice, kemijskom sastavu žice i željenom režimu rada.

-Indukcija u zavarivanju se još naziva i prigušenje jer omogućuje kontrolu rasta i pada jakosti struje, a najčešće se kontrolira pad jakosti struje. Posebno se ovo koristi kod zavarivanja kratkim spojem jer u trenutku kada rastaljena kapljica žice padne u kupku i napravi kratki spoj, napon pada na nulu. Jakost struje bi u tom trenutku rasla vrlo brzo da uređaj za zavarivanje odmah reagira na pad napona. Zbog velike jakosti struje kapljica žice bi se raspršila i ne bi se dogodilo penetriranje u materijal, već samo naljepljivanje i prskanje od eksplozije kapljice.

Kontrola indukcije se ostvaruje dodavanjem dodatnog kalema i otpornika u strujni krug. Dodatni kalem i otpornik omogućuju smanjenje jakosti struje zato jer se u njima stvara elektromagnetsko polje koje stvara struju suprotnu struji zavarivanja i tako daje otpor povećanju jakosti struje. Indukcijom se smanjuje broj kratkih spojeva te je i dulje vrijeme gorenja luka. Zbog duljeg vremena gorenja luka, veća je toplina koju stvara luk pa je materijal žice fluidniji i bolje se razlijeva po površini materijala koji se zavaruju, a penetracija je dublja.

Povećanje indukcije za kontrolu rasta jakosti struje je vrlo korisno pri radu sa žicama promjera 1,0 i 1,2 mm te materijala žice koji u rastaljenom stanju imaju velik površinski napon pa im treba više topline za razlijevanje po materijalu koji se zavaruje.

Kod žica promjera 0,6 i 0,8 mm se postupak povećanja indukcije ne primjenjuje jer te žice same imaju dovoljno velik otpor i same prigušuju jakost struje, odnosno njezin porast.

Kod zavarivanja u spreju, kontrola indukcije se ne primjenjuje kao kod zavarivanja kratkim spojem jer se pri zavarivanju sprejom ne događa kratki spoj za samo zavarivanje, već samo pri paljenju luka. Indukcija se koristi samo u tom slučaju za bolje paljenje luka i to tako da bude što manja. Izuzetak je kod zavarivanja aluminijskom žicom, kada je dobro povećati indukciju zbog boljeg „starta“ pri zavarivanju, odnosno, zbog boljeg paljenja luka.

Režimi rada

Režim rada ili transfer je način kako se rastaljene kapljice sa žice ulijevaju u metalnu kupku na osnovnom materijalu. Kapljice žice se mogu ulijevati na mjesto pripremljeno za zavar. To znači da su parametri na uređaju dobro podešeni. Drugi način, koji je nepoželjan, je da se kapljice žice malo ulijevaju na potrebno mjesto zavarivanja, a puno pršte okolo. To znači da parametri na uređaju nisu dobro podešeni i zavarivanje neće biti kvalitetno izvršeno. Način prijenosa materijala ovisi o jakosti struje, naponu, materijalu i promjeru žice te o zaštitnom plinu.

Zavarivanje MAG postupkom ima nekoliko različitih režima rada, a ovisno o načinu prijenosa kapljice mogu biti:

- Zavarivanje u stabilnom režimu kratkog spoja
- Zavarivanje u stabilnom režimu spreja
- Zavarivanje u stabilnom režimu pulsa
- Zavarivanje u mješovitom (krupnokapljicastom) režimu
- Zavarivanje u stabilnom režimu rotacijskog luka
- Ostali režimi

(To bi trebalo zapisati na ploču, a ako učenici ne postupe tako, uputiti će ih se da tako naprave.)

-Zavarivanje u kratkom spoju se vrlo često primjenjuje, a pogodno je za zavarivanje tankih limova jer se primjenjuju žice manjih promjera i radi se s manjom jakosti struje. Zbog toga je malen unos topline, a manje su i deformacije materijala i manje je grešaka i zaostalih naprezanja u materijalu.

Nedostatci ovog režima rada su što je potrebna zaštita područja zavarivanja kada se radi na otvorenom prostoru, moguće je prskanje.

Postupak se može podijeliti u četiri osnovne faze:

Faza 1: formira se dugačak luk, koji topi materijal i žicu. Na materijalu se formira metalna kupka, a na vrhu žice se formira rastaljena kapljica.

Faza 2: luk se skraćuje, rastaljena kapljica na vrhu žice se povećava i približava se metalnoj kupki na obradku.

Faza 3: luk se gasi, kapljica se spaja s metalnom kupkom, a napon pada na nulu. Ovaj trenutak spajanja kapljice na žici s metalnom kupkom na osnovnom materijalu se naziva kratki spoj.

Faza 4: jakost struje naglo raste, a površinski napon metalne kupke na materijalu privlači kapljicu sa žice.

Nakon faze 4 se cijeli proces ponavlja: kapljica se odvojila, formira se nova kapljica na vrhu žice, luk je dugačak, a na materijalu se formira metalna kupka.

Za stabilnost režima potrebno je 80 do 150 kratkih spojeva u sekundi i zato se uz postupak čuje zujanje, koje izaziva konstantno periodično paljenje i gašenje luka. Velika prednost konstantnog paljenja i gašenja luka je ta što se ne unosi velika količina topline u proces, a to omogućuje zavarivanje tankih limova i zavarivanje u različitim položajima.

Ovaj postupak nije pogodan za zavarivanje materijala debljina većih od oko 4 mm, posebice ne sa slabijim uređajima, odnosno, manjim naponom. U takvom zavarivanju je problem što se događa naljepljivanje materijala, a ne penetracija (fuzija) u materijal te su spojevi zbog toga znatno manje čvrstoće.

Materijali nepogodni za zavarivanje u kratkom spoju su aluminij i bakar. Razlog tome je što aluminij i bakar imaju veliku specifičnu toplinsku provodljivost.

-Zavarivanje u spreju se primjenjuje za čelike debljina većih od 4 mm, posebno za crne čelike. Karakteristično je po velikom unosu topline te je zavar podložan atmosferskim utjecajima i zbog toga zaštitni plin treba imati velik udio argona. Da bi bilo moguće postići sprej, parametri zavarivanja trebaju biti visoki: napon od najmanje 25 V, velika brzina žice i velike jakosti struje (oko 350 A).

Pri ovom režimu zavarivanja velik je depozit materijala, mogu se koristiti razne žice, nije potrebno puno završne obrade radnog komada (čišćenje, brušenje), ali je veća cijena zaštitnog plina, zbog jačeg zračenja je potrebna posebna zaštitna oprema i pogodno je samo za zavarivanje u horizontalnom položaju.

Princip rada spreja je takav da se pri dovodu struje stvara elektromagnetno polje, koje stvara Lorentzove centralne sile, koje na žicu djeluju poput škara (tzv. Pinch efekt) i kidaju je na mjestu rastaljene kapljice.

Pri ovom režimu rada luk je konstantno otvoren i ne gasi se, što omogućuje da se žica tali u obliku struje malih kapljica, odnosno spreja (otuda i naziv režima).

Sprej može biti aksijalni, kod kojega su kapljice raspoređene duž osi žice, ili kvazi-sprej, kod kojega su kapljice raspoređene duž cijelog luka. Razlika nastaje zbog različitih žica. Aksijalni sprej nastaje kada se koriste pune žice, a kvazi-sprej nastaje kada se koriste punjene žice.

-Pulsni režim rada je visoko kontrolirano zavarivanje sprejom. Kod ovakvog zavarivanja luk je otvoren, a uređaj kontrolira aksijalno ispuštanje svake kapljice žice. Za svaku kapljicu se kontrolira brzina, veličina i vrijeme nakon kojega će se ispustiti slijedeća kapljica, a tako se kontrolira i koliko velika će biti kapljica, odnosno kojeg promjera. Da bi ovakav rad bio moguć, potrebno je podesiti mnogo parametara rada (oko 60 ili čak oko 100), što nije praktično unositi ručno. Zbog toga su razvijene sinergijske pulsne linije, algoritmi kojima se podešavaju parametri rada uređaja ovisno o tome koji se plin koristi, koji materijal žice, koliki promjer žice te koja je debljina materijala koji se zavaruje.

Zavarivanjem u pulsnom režimu je unos topline manji zbog manje jakosti struje, prskanja nema ili je ono vrlo malo, nema deformacija materijala i manje je uključaka vanjskih plinova. Postupak se lako automatizira i robotizira, a zavarivati se može u svim položajima uz pravilno podešene parametre. Nedostatak postupka je što je skuplji zbog primjene argona u zaštitnom plinu, oprema je skuplja, a zavarivaču je potrebna povećana zaštita na radu (više opreme).

Pri radu izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji se kreće od vršne vrijednosti do najmanje, koja je dovoljna da se luk održi, ali da se ne ugasi. Pulsiranje jakosti struje se može dogoditi 20 do 500 puta u sekundi, ovisno o parametrima. Frekvencija pulsnog zavarivanja je proporcionalna brzini žice.

Ovaj postupak zavarivanja je najpogodniji za zavarivanje obojenih metala i nehrđajućih čelika. Zavarivanje pulsom je najbolji izbor za sve one materijale koji se ne mogu zavarivati kratkim spojem zbog nedovoljne penetracije materijala, a ne mogu se zavarivati niti sprejom zbog prevelikog unosa topline. Debljine obradaka mogu biti različite, limovi od 1 mm do komada debljih od 5 mm.

-Zavarivanje u mješovitom (krupnokapljičastom) režimu je nestabilan režim rada koji dovodi do prskanja kapljica i mnogih grešaka u zavaru i u materijalu. U ovom transferu zavarivači često rade nenamjerno kada pokušavaju podesiti parametre zavarivanja za rad u spreju. Kako je teško namjestiti parametre da bi se radilo u spreju, ako se ne poznaje dobro karakteristike materijala i žice, često zavarivači s nedovoljno znanja i iskustva prilikom podešavanja parametara na uređaju završe u krupnokapljičastom režimu.

Zavarivanje u krupnokapljičastom režimu se primjenjuje za navarivanje i zavarivanje sa samozaštitnim žicama. Ovaj režim nije pogodan za zavarivanje s punim žicama.

Zavarivati se mogu materijali debljina većih od 5 mm, nije pogodno za zavarivanje u prisilnim položajima, kapljice su različitih promjera te se prema tome oblikuje nepravilan zavar.

Princip rada ovog postupka zavarivanja je takav da dijelom kapljice rastaljene žice lete na sve strane, dijelom dolazi do kratkog spoja, dijelom zbog porasta struje dolazi do eksplozije rastaljenog materijala koji je uzrokovao kratki spoj, dijelom se odvajaju velike kapljice koje padaju u rastaljenu metalnu kupku i prskaju okolo. U osnovi se sastoji od rada u spreju i rada u kratkom spoju. Teško je raditi u ovom režimu zbog nestabilnog luka i jer ga je teško kontrolirati.

Luk tijekom zavarivanja gori, na vrhu žice se formira kapljica (koja je većeg promjera nego žica) i njiše se, potom se odvaja i pada u metalnu kupku ili odleti negdje na stranu ili se rasprši.

-Zavarivanje rotirajućim lukom je transfer zavarivanja u spreju. Rotiranje luka se događa zbog povećanih parametara zavarivanja: jakost struje (više od 450 A), velika brzina žice (više od 15 m/min), napon (više od 35 V). Pri ovom postupku zavarivanja kapljice padaju niz luk ravnomjerno.

Pri tom postupku se događa to da je veliki slobodan kraj žice (22-38 mm) izložen velikoj jakosti struje. Zbog velike jakosti struje i velikog otpora prolasku struje stvara se velika toplina, koja tali veći dio slobodnog kraja žice. Jakost struje uzrokuje jake elektromagnetske sile, koje uzrokuju pomicanje luka iz njegove osi i njegovo rotiranje.

U ovom režimu rada može se nanijeti 4.5 – 13 kg depozita po satu rada.

-Ostali transferi:

- Elektronsko upravljanje električnim lukom
- Modificirani kratki spoj
- Dvostruki impuls
- Brzi sprej
- Brzi impuls
- Brzi kratak spoj.

Ovi transferi se izvode pri visokim jakostima struje, visokim naponima, velikim brzinama žice, a postižu se velike stope depozita. Moguća su dva načina rada, s nerotirajućim lukom (napon 30 – 45 V, brzina žice oko 25 m/min, depozit 10 – 15 kg/h) i s rotirajućim lukom (napon 48 – 55 V, brzina žice 30 – 40 m/min, depozit 25 – 27 kg/h). Za ovakav rad je potrebna posebna mješavina plinova, poput 65 % Ar + 26 % He + 8 % CO₂ + 0,5 % O₂.

Pri ovakvom zavarivanju se pristupa i kombinaciji dviju žica, tzv. tandem zavarivanju. Pritom se ne tale obje žice, nego se samo jedna tali, a druga se samo uvodi u metalnu kupku.

Za ove režime je karakteristično to da se postiže stabilnost luka u svim transferima i u različitim uvjetima rada, odnosno s različitim parametrima. Moguće je zavarivati i tanke limove i radne komade većih debljina, a širok je spektar materijala koji se mogu zavarivati ovim postupcima. Još jedna velika prednost ovih postupaka je što se može zavarivati u različitim položajima. Ovi postupci su pogodni za automatizaciju i visoko su učinkoviti.

Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi se primjenjuju za zaštitu zavara od atmosferskih utjecaja. Izbor zaštitnog plina se provodi na temelju materijala žice i obradka, početnog stanja materijala (kasnije opisano da ponekad materijali mogu biti i djelomično hrđavi i da ne moraju biti prethodno očišćeni), debljine obradka, željenih svojstava zavara, pripreme zavara, položaja zavarivanja, željenog režima rada i dr. Za MAG postupak zavarivanja se primjenjuju ugljikov dioksid i mješavine argona i ugljikovog dioksida, a može u sastavu mješavine biti i kisik ili helij. (To bi trebalo zapisati na ploču, a ako učenici ne postupe tako, uputiti će ih se da tako naprave.)

-Plin CO₂ se masovno počeo upotrebljavati u prošlom stoljeću tako da se sam postupak zavarivanja s CO₂ kao zaštitnim plinom nazivao CO₂ zavarivanje. Karakteristike ovog plina su da je jeftin, proziran, teži je od zraka za oko 1.5 puta, nema miris, pri sobnoj temperaturi je inertan, ali zagrijavanjem u električnom luku postaje vrlo aktivan. Sastav plina čine 72 % O₂ i 28 % CO. Plin, koji se koristi kao zaštitni plin pri zavarivanju, dobiva se preradom CO₂ iz bušotina, s ispušnih kolektora u kemijskoj industriji ili procesom vrenja (dobiva se plin velike čistoće).

Upotrebom čistog CO₂ kao zaštitnog plina se ne može postići rad u spreju, već je pogodan za rad u kratkom spoju. Dobrim podešavanjem parametara rada se može postići kvazi-sprej. Može se raditi i u kontroliranom krupnokapljičastom režimu. Rezultat rada s čistim CO₂ plinom je prskanje kapljica, ali ako se kontrolira rad, to može biti prihvatljivo prštanje i mogu se kapljice lako ukloniti špahtlom ili brušenjem nakon zavarivanja, posebice ako je materijal prethodno tretiran sredstvom protiv uvarivanja kapljica.

U mješavini s argonom izbjegava se prštanje (pritom i gubitak materijala). Iskoristivost žice je oko 90 %, zavar oksidira i grub je, a zbog oksidacije se gube legirajući elementi s površinskog sloja obradka te se smanjuju mehanička svojstva. Plin CO₂ i njegove mješavine se koriste za zavarivanje niskolegiranih čelika sa žicama punog poprečnog presjeka ili punjenim žicama.

Prolaskom struje kroz plin, stvara se otpor i plin se zagrijava. Zbog zagrijavanja, molekule u plinu počinju oscilirati (ubrzavaju svoje kretanje) te se nakon nekog vremena razdvajaju (disociraju). Plin CO₂ se u postupku disocijacije razdvaja na molekule CO i O₂. Tada molekule kisika reagiraju s metalima i stvaraju okside, a molekule CO reagiraju s oksidima metala i ostavljaju čisti metal. Molekula kisika se disocira na atome kisika te oni još lakše ulaze u reakcije s metalima. Nakon disocijacije slijedi proces ionizacije i slobodni elektroni stvaraju električnu struju u zaštitnom plinu.

Do prštanja kapljica dolazi jer plazma plina CO₂ djeluje na kapljicu tako da je gura prema gore, a gravitacija i elektromagnetne sile je vuku prema dolje. Sile, koje djeluju na kapljicu nisu jednolike cijelo vrijeme, već im jakosti osciliraju od većih prema manjima pa ponovo veće pa manje i tako u krug. Zbog toga kapljica „pleše“ i uzrokuje pomicanje centra luka u smjeru u kojemu se pomiče kapljica. Kapljica ne pada u metalnu kupku, već se žica i dalje tali i kapljica postaje sve veća dok napokon ne dostigne određenu veličinu i uspije napraviti kratki spoj te pada u metalnu kupku (bućne) i izaziva prštanje. Ako je struja kratkog spoja veća, onda će se kapljica raspršiti i izazvati još jače prštanje, a može se raspršiti i u zraku prilikom odvajanja od žice i opet izazvati prštanje.

Pri zavarivanju CO₂ plinom treba obratiti pažnju na mogućnost smrzavanja redukcijuskog ventila kada se radi sa žicama većih promjera i većim protokom plina. Plin se eksploatira u bocama kao stlačen i u tekućem stanju. Zbog prevođenja u plinovito stanje, smanjuje se temperatura okoline redukcijuskog ventila i vlaga iz zraka se kondenzira na njemu te se može kristalizirati u inje ili kristale leda. Da se to ne bi događalo, redukcijuski ventil je potrebno dodatno zagrijavati grijačima ili upaljenom žaruljom.

-Argon je vrlo stabilan, plemeniti plin. Dobiva se kondenzacijom iz zraka. Za zavarivanje se prema standardima koristi argon čistoće C, odnosno plin s 99.96% argona. Argon je od zraka teži za oko 1.4 puta, nema boje, mirisa, okusa i nije otrovan. Ako zavarivač radi s argonom bez zaštitne maske, zbog udisanja argona i njegove veće težine od zraka, može doći do problema s disanjem.

Čisti argon se koristi za zavarivanje obojenih metala poput aluminija, bakra, magnezija, titanija, koji vrlo brzo oksidiraju. Luk pri zavarivanju je stabilan i lako se pali zbog niske

energije ionizacije argona, ali kako argon slabo provodi toplinu, ona se ne raspršuje cijelom lukom jednako, već je na sredini ispod žice plazma najtoplija, a sa strana je hladnija. Posljedica toga je da se materijal tali više u dubinu, nego širinu i nije moguće raditi šire zavare u jednom prolazu. Zavar je povišen na rubovima i ima oblik naopakog zvona. U materijalu se na mjestu djelovanja najveće topline oslobađaju plinovi, ali ne mogu izaći na površinu te se javlja poroznost materijala. Zbog ovih karakteristika argona kao zaštitnog plina, on se ne koristi za zavarivanje čelika.

-Korištenjem mješavine argona s CO₂ ili O₂ se postižu najbolji rezultati zavarivanja. Miješanjem plinova se dobivaju plinovi boljih svojstava. Ovisno o tome u kojem režimu rada će se raditi, tako će se i miješati različite koncentracije plinova.

Mješavine plinova manje reagiraju s rastaljenim metalom i zbog toga su količine dima manje za oko 20 – 25 %. Zbog manje kisika u plinu, rastaljeni metal ne oksidira te je i materijal čvršći i kvalitetniji, ima veća mehanička svojstva.

Kisik se u malim postocima dodaje argonu zbog mogućnosti disocijacije molekula kisika. Nedostatak toga je oksidacija metala (žica, rastaljena metalna kupka) i zato je potrebno dodati više legirajućih elemenata u žice, najčešće silicij, mangan, krom.

Prednost upotrebe kisika je što stabilizira luk i lako provodi električnu struju, a prilikom reakcije kisika i silicija se oslobađa toplina. Rastaljena metalna kupka ima manju površinsku napetost zbog prisutnosti kisika te se bolje razlijeva po površini i ne stvaraju se nadvišeni rubovi.

Prednost se većinom daje mješavini argona s CO₂ nego s O₂ zbog manje oksidacije, a to znači i boljih mehaničkih svojstava, posebno žilavosti na temperaturama ispod 0°C.

Dodatni materijal

Dodatni materijal se isporučuje u obliku žice, koja je namotana na kolut. Kolut se postavlja u kućište uređaja ili izvan njega. Žice mogu biti punog poprečnog presjeka ili punjene žice (cjevčica ispunjena prahom). (To bi trebalo zapisati na ploču, a ako učenici ne postupe tako, uputiti će ih se da tako naprave.)

Izbor žice za zavarivanje ovisi o mnogim parametrima, a glavni su cijena, kvaliteta, produktivnost, zaštitni plin, materijal i debljina radnog komada.

Postoje vrlo kvalitetne žice koje se proizvode u strogo kontroliranim uvjetima i nemaju nečistoća, ali su skupe. S druge strane, postoje i jeftinije žice koje se proizvode iz rude ili recikliranjem čelika, ali su slabije kvalitete i produktivnosti.

Žice punog poprečnog presjeka općenito su jeftinije. Čelične pune žice uglavnom imaju prevlaku od bakra, čija je uloga ostvarivanje boljeg električnog kontakta i time sprječavanje

oksidacije čelične žice te manje trenje prilikom prolaska žice kroz diznu. Bakrena prevlaka je vrlo tanka, mjeri se u mikrometrima, a nanosi se na žicu galvanizacijom. Jeftinije žice imaju tanji sloj bakra te lakše oksidiraju i korodiraju, bakar se ljušti sa žice te dolazi do začepjenja dizne i uvednice elektrode (bužira). Kod skupljih žica je sloj bakra deblji, preciznije je nanošen te je gladak, gotovo da se ne ljušti i ne korodira preko noći, ako je ostavljen u dodavaču. U bakrenu prevlaku se zbog dobrih ionizirajućih svojstava mogu dodavati i smjese na bazi kalija, koje bolje stabiliziraju luk.

Punjene žice mogu biti za zavarivanje u zaštitnom plinu (čisti CO₂ ili Ar + 18% CO₂), samozaštitne žice za zavarivanje bez zaštitnog plina ili samozaštitne žice za navarivanje, također bez upotrebe zaštitnog plina. Punjene žice imaju prednost jer omogućuju bolju penetraciju u materijal na sredini i na rubovima zavara zbog velike gustoće struje i zato je manja mogućnost navarivanja, moguće je zavarivanje u svim položajima bez mijenjanja parametara, zavar ima bolja mehanička svojstva, manje je prštanja, a zbog predgrijavanja žice se tali više žice i depozit je veći, a zavar izgleda ljepše i urednije. Primjenjuju se za rad u režimu spreja ili kvazi spreja. Punjenje žica može biti rutilno, metalno ili bazično. Najčešće se koriste rutilne žice jer je s njima moguće zavarivati u različitim položajima. Iskoristivost žice je od 80 do 92%, ovisno kojim postupkom su žice proizvedene.

Promjer žice treba pri proizvodnji biti u uskim tolerancijama jer se inače žica neće dovesti kako bi trebala. Ako je žica ispod granica tolerancije, proklizavati će između kotačića u dodavaču, a ako je iznad granica tolerancije, zaglaviti će u dizni. Ako žica nije izrađena u tolerancijama, mora se uređaj podešavati prema promjeru žice, što zahtjeva dodatno vrijeme i kontraproduktivno je, a alati za kalibraciju uređaja su skupi.

Vrste punjenih žica prema konstrukciji:

- bešavne, pobakrene – deblja stjenka cijevi, prah se puni vibracijama
- bešavne, zatvorene laserom – prah se puni nalijevanjem u U traku, traka se potom zatvara u O oblik i zavaruje se, mogu biti pobakrene
- šavne žice – spajaju se na različite načine

Prednosti punjenih bešavnih žica su što zahvaljujući debeloj stjenki žice omogućuju dobro zavarivanje i na malim i na velikim jakostima struje i dovoljna su dva kotačića u dodavaču, ne korodiraju lako zbog bakrene prevlake, nema opasnosti od vlage, koluti se proizvode i za manje uređaje, moguće je dugo vremena ostati u stabilnom režimu rada, nema prštanja, duboka je penetracija materijala, vrlo su dobra mehanička svojstva zavara, velik je depozit, visoka je produktivnost i iskoristivost žice.

Princip rada samozaštitnih žica je takav da se zaštita vrši raspadanjem organskih tvari, koje stvaraju CO₂ i O₂. Problem kod ovih žica je vezanje aluminija za dušik iz zraka, koji se potom taloži u materijalu kao nečistoća. S ovim žicama se radi u krupnokapljičastom režimu pa je prštanje veliko. Samozaštitne žice su pogodne za navarivanje koje se izvodi na otvorenom prostoru, jer se dimovi i plinovi koje ispuštaju ne zadržavaju u prostoriji, uvarivanje je veće

nego u režimu hladnog kratkog spoja, prštanje nije problem jer ne utječe na funkcionalnost navara, jeftine su i nije potreban zaštitni plin.

Problemi s dodatnim materijalom i kolutima žice se mogu javljati zbog namotaja žice. Tijekom namotavanja žice na kolut, ona se deformira. Kada izlazi kroz pištolj, odmotava se i pritom ostaje zakrivljena i uvija se, što se može uočiti ako se na pištolj izbací jedan namotaj žice. Problem može nastati ako je promjer slobodnog namotaja prevelik jer tada neće biti ostvaren dobar kontakt s diznom i neće se prenositi električna struja. Ako je promjer slobodnog namotaja premali, doći će do trenja između dizne i žice, zbog čega se dizna haba i troši, luk će biti nestabilan i stvarati će se mikro luk u dizni između dizne i žice. Kod automatskog zavarivanja i zavarivanja robotima ovi problemi se izbjegavaju ugrađivanjem ispravljača žice.

ZAVRŠNI DIO

Sistematizacija i ponavljanje obrađenog sadržaja

Obrađeni sadržaj će se sistematizirati i ponoviti prema pitanjima. Od učenika se očekuje aktivnost i sudjelovanje. Pitanja su:

- Koji su koncepti MAG postupka zavarivanja?
- Koje su važne karakteristike izvora struje?
- Koje izvedbe dodavača žice postoje i kada se primjenjuju?
- Od čega se sastoji sustav za zaštitni plin?
- Na što posebno treba paziti na reducijskom ventilu? Zašto?
- Što je pištolj za zavarivanje i koji su njegovi dijelovi?
- Koji su parametri MAG zavarivanja?
- Kako utječe brzina žice na jakost struje?
- Na koji način utječe indukcija na zavarivanje? Kako se ona može povećati?
- Koji se zaštitni plinovi koriste pri MAG zavarivanju?
- Koji bi zaštitni plin upotrijebili pri zavarivanju niskolegiranih čelika?
- Zašto je potreban zaštitni plin za održavanje el.luka, odnosno stvaranje plazme?
- Koji režim rada bi izabrali za zavarivanje crnog čelika debljine 4.5 mm?
- Koje vrste žica postoje?
- Kako se povećava kvaliteta punih žica?
- Koju biste žicu izabrali za navarivanje na otvorenom prostoru?

Pohvaliti će se učenike za aktivnost. Pitati će se treba li nešto još ponoviti ili dodatno objasniti te će se objasniti, ako bude trebalo. Zaključiti će se sat i pozdraviti učenike.

MAG postupak zavarivanja

Koncepti MAG zavarivanja su:

- Izvor struje
- Dodavač žice
- Sustav za zaštitni plin
- Pištolj za zavarivanje s polikablom
- Komandni ormarić (kućište)

Parametri MAG zavarivanja:

- Napon
- Jakost struje
- Brzina dovođenja žice
- Slobodan kraj žice
- Promjer žice
- Zaštitni plin
- Indukcija

Režimi rada ovisno o načinu prijenosa kapljice mogu biti:

- Zavarivanje u stabilnom režimu kratkog spoja
- Zavarivanje u stabilnom režimu spreja
- Zavarivanje u stabilnom režimu pulsa
- Zavarivanje u mješovitom (krupnokapljičastom) režimu
- Zavarivanje u stabilnom režimu rotacijskog luka
- Ostali režimi

Zaštitni plinovi:

- ugljikov dioksid, CO₂
- argon, Ar
- mješavine CO₂ i Ar
- mješavine Ar i O₂
- mješavine Ar, CO₂ i O₂

Žice mogu biti punog poprečnog presjeka ili punjene žice.

Potpis studentice:

Pregledao:

Datum: _____

Osvrt na izvođenje:

Potpis:

Prilog: Listovi sa zadacima za grupe

Tema: MAG postupak zavarivanja

Grupa: A

Članovi grupe:

Datum:

Zadatak za grupu: **Koncepti MAG postupka zavarivanja**

Upute za rješavanje zadatka:

Proučite zadatak na ovom listu, a potom sistematizirajte sadržaj prema navedenim natuknicama. Kada sve grupe završe zadatak, predstaviti će se sistematizirani sadržaj pred razredom. Neka svaka grupa izabere jednog predstavnika, koji će pred pločom predstavljati što je njegova grupa napravila. Trebate izdvojiti najvažnije pojmove i zapisati ih na ploču.

U zadatku treba proučiti i predstaviti:

- Koji su koncepti MAG postupka zavarivanja
- Koja je uloga izvora struje i navesti izvore struje
- Koja je uloga dodavača žice, navesti izvedbe i ukratko ih opisati
- Koja je uloga sustava za zaštitni plin, koje su komponente sustava i čemu one služe; koji je optimalan protok plina
- Što je pištolj za zavarivanje (gorionik) i koji su dijelovi pištolja
- Koja je uloga komandnog ormarića (kućišta) uređaja za zavarivanje

Ocjena grupe: _____

Nastavnica: _____

Tema: MAG postupak zavarivanja

Grupa: B

Članovi grupe:

Datum:

Zadatak za grupu: **Parametri MAG postupka zavarivanja**

Upute za rješavanje zadatka:

Proučite zadatak na ovom listu, a potom sistematizirajte sadržaj prema navedenim natuknicama. Kada sve grupe završe zadatak, predstaviti će se sistematizirani sadržaj pred razredom. Neka svaka grupa izabere jednog predstavnika, koji će pred pločom predstavljati što je njegova grupa napravila. Trebate izdvojiti najvažnije pojmove i zapisati ih na ploču.

U zadatku treba proučiti i predstaviti:

- Koji su parametri MAG postupka zavarivanja
- Objasniti utjecaj najvažnijih parametara:
 - napon
 - jakost struje
 - brzina dovođenja žice
 - slobodan kraj žice
 - promjer žice
 - zaštitni plin
 - indukcija

Ocjena grupe: _____

Nastavnica: _____

Tema: MAG postupak zavarivanja

Grupa: C

Članovi grupe:

Datum:

Zadatak za grupu: **Režimi rada MAG postupka zavarivanja**

Upute za rješavanje zadatka:

Proučite zadatak na ovom listu, a potom sistematizirajte sadržaj prema navedenim natuknicama. Kada sve grupe završe zadatak, predstaviti će se sistematizirani sadržaj pred razredom. Neka svaka grupa izabere jednog predstavnika, koji će pred pločom predstavljati što je njegova grupa napravila. Trebate izdvojiti najvažnije pojmove i zapisati ih na ploču.

U zadatku treba proučiti i predstaviti:

- Što su režimi rada
- Koji su režimi rada MAG postupka zavarivanja
- Objasniti princip rada i djelovanja navedenih režima:
 - o Kratki spoj
 - o Sprej

Ocjena grupe: _____

Nastavnica: _____

Tema: MAG postupak zavarivanja

Grupa: D

Članovi grupe:

Datum:

Zadatak za grupu: **Režimi rada MAG postupka zavarivanja**

Upute za rješavanje zadatka:

Proučite zadatak na ovom listu, a potom sistematizirajte sadržaj prema navedenim natuknicama. Kada sve grupe završe zadatak, predstaviti će se sistematizirani sadržaj pred razredom. Neka svaka grupa izabere jednog predstavnika, koji će pred pločom predstavljati što je njegova grupa napravila. Trebate izdvojiti najvažnije pojmove i zapisati ih na ploču.

U zadatku treba proučiti i predstaviti:

- Objasniti princip rada i djelovanja navedenih režima:
 - Puls
 - Mješoviti
 - Rotirajući luk
 - Ostali režimi

Ocjena grupe: _____

Nastavnica: _____

Tema: MAG postupak zavarivanja

Grupa: E

Članovi grupe:

Datum:

Zadatak za grupu: **Zaštitni plinovi za MAG postupak zavarivanja**

Upute za rješavanje zadatka:

Proučite zadatak na ovom listu, a potom sistematizirajte sadržaj prema navedenim natuknicama. Kada sve grupe završe zadatak, predstaviti će se sistematizirani sadržaj pred razredom. Neka svaka grupa izabere jednog predstavnika, koji će pred pločom predstavljati što je njegova grupa napravila. Trebate izdvojiti najvažnije pojmove i zapisati ih na ploču.

U zadatku treba proučiti i predstaviti:

- Zašto se primjenjuju zaštitni plinovi
- O čemu ovisi izbor zaštitnog plina
- Koji se plinovi koriste pri MAG zavarivanju i koje su njihove karakteristike
 - o CO₂
 - o Ar
 - o Mješavine

Ocjena grupe: _____

Nastavnica: _____

Tema: MAG postupak zavarivanja

Grupa: F

Članovi grupe:

Datum:

Zadatak za grupu: **Dodatni materijal za MAG postupak zavarivanja**

Upute za rješavanje zadatka:

Proučite zadatak na ovom listu, a potom sistematizirajte sadržaj prema navedenim natuknicama. Kada sve grupe završe zadatak, predstaviti će se sistematizirani sadržaj pred razredom. Neka svaka grupa izabere jednog predstavnika, koji će pred pločom predstavljati što je njegova grupa napravila. Trebate izdvojiti najvažnije pojmove i zapisati ih na ploču.

U zadatku treba proučiti i predstaviti:

- Kako se isporučuje dodatni materijal
- Na temelju kojih parametara se vrši izbor dodatnog materijala
- Vrste dodatnog materijala
 - o Karakteristike
 - o Prednosti, nedostaci
- Problemi s namotajem žice

Ocjena grupe: _____

Nastavnica: _____

5. ZAKLJUČAK

MAG postupak zavarivanja je vrlo raširen postupak zavarivanja zbog svojih različitih karakteristika, koje se mogu mijenjati, ovisno o potrebama. Može se izvoditi u različitim položajima i na različitim lokacijama, za širok spektar materijala, kako osnovnog, tako i dodatnog. Parametri, koji se podešavaju i time omogućuju kontrolu postupka, proučavaju se konstantno i razvijaju se nove tehnologije rada i novi režimi rada. Posljednjih godina se razvijaju brzi postupci MAG zavarivanja, koji omogućuju brz, produktivan i kvalitetan rad. Da bi se rad mogao obaviti kvalitetno, potrebna su znanja i sposobnosti, koji su analizirani u radu. Posebna pažnja se treba obratiti na parametre zavarivanja, jer znatno utječu na kvalitetu zavara i njegova mehanička svojstva. Pritom je vrlo važan i odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina. U radu su tablično prikazani preporučeni kemijski sastavi dodatnog materijala prema ISO standardu i kemijski sastavi i karakteristike dodatnog materijala tvrtke Elektroda Zagreb d.d. Svaki proizvođač odlučuje u kojoj mjeri će se držati preporučenog kemijskog sastava ovisno o tome kakvu kvalitetu želi pružiti svojim kupcima i za koju cijenu. Za zaštitni plin će se izabrati onaj, koji omogućuje dobivanje zavara željenih svojstava, a cijena će uvelike utjecati na izbor. Argon i helij su skupi plinovi jer se teško dobivaju i njihova zastupljenost u prirodi je malena. No, omogućuju bolji i kvalitetniji rad. Analizirani su troškovi postupka zavarivanja i prema toj analizi se može vidjeti da ima mnogo faktora koji utječu na cijenu postupka. Odluka je na zavarivaču i kupcu, koliko novca žele uložiti i kakav spoj žele dobiti. Često je bolje uložiti više novca na početku i dobiti kvalitetan i pouzdan proizvod, nego s manje novca dobiti proizvod koji će se morati često popravljati i doradivati, jer nije u stanju podnijeti sva opterećenja, za koja je predviđen.

LITERATURA

- [1] Jelaska, D.: *Elementi strojeva*, skripta za studente Industrijskog inženjerstva, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2005.
- [2] Lukačević, Z.: *Zavarivanje*, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 1998., preuzeto s internet stranice: <http://documents.tips/documents/lukacevic-zavarivanjepdf.html>, preuzeto 01.09.2016.
- [3] Kraut, B.: *Strojarski priručnik*, deveto hrvatsko ili srpsko izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.
- [4] Internet stranica: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje>, preuzeto 05.09.2016.
- [5] Domazet, Ž.; Krstulović-Opara, L.: *Skripta iz osnova strojarstva*, Sveučilište u Splitu, Kemijsko tehnološki fakultet, Split, 2006., preuzeto s internet stranice: https://bib.irb.hr/datoteka/761254.osnove_strojarstva.pdf, 25.05.2016.
- [6] Internet stranica: http://www.riteh.uniri.hr/zav_katd_sluz/zvd_kons_stroj/katedre/konstruiranje/kolegiji/ke1/ke1_materijali_vj/KE1%20www%20Zavareni%20spojevi.pdf, preuzeto 05.09.2016.
- [7] Atlija, N.: *Kontrola i osiguranje kvalitete u izradi zavarenih konstrukcija*, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Filozofski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2012., slika preuzeta s internet stranice <https://webmail.mef.unsa.ba/mts/studenti/onlinevezbe/TS/vTS1-v1.html> (veza nije više dostupna)
- [8] Internet stranica: <https://skveranka.wordpress.com/2016/02/29/brodosplit-laboratorij/#jp-carousel-1528>, preuzeto 05.09.2016.
- [9] Internet stranica: <http://svetzavarivanja.rs/znanje-o-zavarivanju/co2-zavarivanje-mig-mag-zavarivanje>, preuzeto 20.05.2016.
- [10] Horvat, M.; Kondić, V.; Brezovečki, D.: *Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija*, Tehnički glasnik 8, 3, Sveučilišni centar Varaždin, Varaždin, 2014., preuzeto s internet stranice: https://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjF4JGH5f_OAhVjMJokH5VhB5oQFggdMAA&url=http%3A%2F%2Fhrcak.srce.hr%2Ffile%2F191161&usg=AFQjCNF63EYTpFjhnl7GdmcYT8x21KmTWA, preuzeto 21.05.2016.
- [11] Samardžić, I.; Kolumbić, Z.; Baotić, M.: *Doprinos primjeni praškom punjenih žica za zavarivanje MAG postupkom*, Tehnički vjesnik 8, 3/4, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavanskom Brodu, Slavonski Brod, 2001., preuzeto s internet stranice: <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tocka6/tehn.vjes.pdf>, preuzeto 25.05.2016.
- [12] Bilandžija, J.: *Pregled i razvoj dodatnih materijala za MAG zavarivanje*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015., preuzeto s internet stranice: http://repozitorij.fsb.hr/3179/1/Biland%C5%BEija_2015_zavr%C5%A1ni_prediplomski.pdf, preuzeto 25.05.2016.

- [13] Internet stranica: <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf> , preuzeto 25.05.2016.
- [14] Milotić, M.: *Priručnik za zavarivače, 2. Dopunjeno izdanje: Gasno zavarivanje, MIG/MAG, WIG (TIG), Autogeno i plazma rezanje*, Saobraćajni fakultet Doboj i BCD Elektro d.o.o. Doboj, Doboj, 2008., preuzeto s internet stranice: <http://www.bcdelektro.ba/images/BCD%20Elektro%20%20Prirucnik%20za%20zavarivanje.pdf> , preuzeto 25.05.2016.
- [15] Podgorski, L.: *Tehnologija izrade cijevnog jarbola MAG postupkom zavarivanja*, Završni rad, Sveučilište Sjever, Odjel za proizvodno strojarstvo, Varaždin, 2015., preuzeto s internet stranice: <https://repozitorij.unin.hr/islandora/object/unin%3A431/datastream/PDF/view> , preuzeto 25.05.2016.
- [16] Internet stranica: https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetska_indukcija, preuzeto 31.08.2016.
- [17] Mikulić, I.: *Visokoučinski postupci MAG zavarivanja*, Završni rad, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2016., preuzeto s internet stranice: <https://repozitorij.sfsb.hr/islandora/object/sfsb%3A52/datastream/PDF/view>, preuzeto 07.09.2016.
- [18] Internet stranica: <http://centar-alata.hr/abicor-binzel-mb-15-ak-gorionik-polikabel-za-co2-mig-mag-zavarivanje-180a-3m.html>, preuzeto 09.09.2016.
- [19] Brumec, G.: *Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010., preuzeto s internet stranice: http://repozitorij.fsb.hr/1173/1/09_12_2010_Zavarivanje_cjevovoda_MAG_postupcima.pdf, preuzeto 09.09.2016.
- [20] Bytyqi, B.; Osmani, H.; Idrizi, F.: *Utjecaj parametara zavarivanja na kvalitet zavara izvedenih MAG zavarivanjem*, UP, Fakulteti i Inzhinierisë Mekanike, Prishtinë, 4. Naučno – stručni skup sa međunarodnim učešćem „KVALITET 2005.“, Fojnica, 2005., preuzeto s internet stranice: <http://www.quality.unze.ba/zbornici/QUALITY%202005/057-Q05-003.pdf> , preuzeto 25.05.2016.
- [21] Internet stranica: https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektri%C4%8Dni_luk, preuzeto 10.09.2016.
- [22] Garašić, I.; Kožuh, Z.: *Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016., preuzeto s internet stranice: https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465220879-0-strojeviiopremazavarivanje_prirucnik_rev.2016_final.pdf, preuzeto 10.09.2016.
- [23] Delač, D.: *Klasifikacija postupaka zavarivanja prema HRN EN ISO 4063*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014., preuzeto s internet stranice: http://repozitorij.fsb.hr/2954/1/18_09_2014_Zavrzni_rad_Domagoj_Delac.pdf, preuzeto 12.09.2016.
- [24] Internet stranica: <http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tocka4/t44/tocka1/e.html>, preuzeto 12.09.2016.

- [25] Internet stranica: http://www.specialisedwelding.co.uk/data-sheets/Super_6_Data_Sheets_&_MSDS/Welding-wire-BS-2.pdf, preuzeto 13.09.2016.
- [26] Internet stranica: <http://www.ezg.hr/zice.html>, preuzeto 10.09.2016.
- [27] Samardžić, I.; Klarić, Š.; Despotović, B.; Dunder, M.; Kožul, A.; Topić, V.: *Analiza tehnološkičnosti zavarenih konstrukcija - digitalni udžbenik*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2001.
- [28] Internet stranica: <http://www.asoo.hr/UserDocsImages/dokumenti/Polazne%20osnove%20HKO-hr.pdf>, preuzeto 29. lipnja, 2016.
- [29] Internet stranica: <http://public.mzos.hr/Default.aspx?art=14649&sec=3781>, preuzeto 12.09.2016.