

Primjena trokomponentnih plinskih mješavina pri zavarivanju metalnim prahom punjenom žicom

Brković, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:713196>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Nikola Brković

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Nikola Brković

Zagreb, 2021.

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

Veliko hvala mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanoj prilici i danoj mogućnosti da diplomski rad radim na Katedri za zavarene konstrukcije.

Posebno hvala dr. sc. Maji Jurica, asistentici Andrei Zaninović, mag. ing. mech. i Krešimiru Sukobljeviću na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada u Laboratoriju za zavarivanje.

Najveće hvala mojim roditeljima i sestri. Hvala im na bezuvjetnoj podršci, radu i odricanju kako bi omogućili sve najbolje, jer bez toga ja ne bih bio tu gdje sam sada.

Nikola Brković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: *	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **NIKOLA BRKOVIĆ** Mat. br.: 0035205428

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena trokomponentnih plinskih mješavina pri zavarivanju metalnim prahom punjenom žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of threecomponent gas mixtures at metal cored arc welding**

Opis zadatka:

Na temelju literature potrebno je dati pregled i klasifikaciju praškom punjenih žica prema odgovarajućim normama s posebnim naglaskom na metalnim prahom punjene žice. Usporediti operativne značajke ostalih prahom punjenih žica s metalnim prahom punjenim žicama te dati primjere primjene iz prakse. Navesti područja i uvjete primjene višekomponentnih zaštitnih aktivnih plinova sa stanovišta povećanja produktivnosti uz zadržavanje traženih svojstava zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je definirati odgovarajuću tehnologiju za zavarivanje kutnog spoja metalnim prahom punjenom žicom uz primjenu trokomponentnih Ar-CO₂-O₂ zaštitnih plinskih mješavina. Na zavarenom uzorku je potrebno provesti razorna i nerazorna ispitivanja kao i analizu makrostrukture. U konačnici, na temelju dobivenih rezultata donijeti zaključke o opravdanosti primjene trokomponentne zaštitne mješavine pri zavarivanju metalnim prahom punjenom žicom u realnoj industrijskoj proizvodnji te usporediti sa značajkama konvencionalnih punih žica.

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

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA.....	2
2.1. Općenito o postupku.....	2
2.2. Uređaj i pribor za MAG postupak zavarivanja.....	3
2.3. Plinovi kod MAG postupka zavarivanja	5
2.3.1. Fizikalna svojstva plina	7
2.3.3. Vrste zaštitnih plinova i njihov utjecaj na svojstva zavarenog spoja.....	11
2.3.3. Dvokomponentne mješavine zaštitnog plina.....	12
2.3.4. Trokomponentne mješavine zaštitnog plina.....	15
2.4. Dodatni materijal za MAG postupak zavarivanja	17
2.4.1. Žice punjene metalnim praškovima	18
2.4.1.1. Označavanje praškom punjenih žica.....	20
2.4.1.2. Mehanička svojstva i kemijski sastav	22
2.4.1.3. Usporedba punih i praškom punjenih žica.....	23
2.5. Parametri MAG postupka zavarivanja	25
2.5.1. Jakost struje zavarivanja.....	25
2.5.2. Napon zavarivanja.....	26
2.5.3. Brzina zavarivanja.....	26
2.5.4. Slobodni kraj žice.....	27
2.5.5. Induktivitet	27

2.6.	Način prijenosa metala	28
2.6.1.	Prijenos metala kratkim spojevima	28
2.6.2.	Prijenos metala štrcajućim lukom	29
2.6.3.	Prijenos metala prijelaznim lukom.....	30
2.6.4.	Prijenos metala impulsnim strujama	30
3.	KONSTRUKCIJSKI ČELIK	32
3.1.	Opći konstrukcijski čelici	32
3.1.1	Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije	33
3.1.2.	Opći konstrukcijski čelici za strojogradnju	36
4.	EKSPERIMENTALNI RAD	37
4.1.	Oprema za zavarivanje	37
4.2.	Osnovni materijal	41
4.3.	Dodatni materijal	42
4.4.	Zaštitne plinske mješavine.....	44
4.5.	Proces zavarivanja	45
4.5.1.	Parametri zavarivanja	46
4.6.	Rezultati.....	50
5.	ZAKLJUČAK	60
	LITERATURA.....	62

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shema MAG postupka zavarivanja [2]	2
Slika 2.	Shematski prikaz opreme za MAG zavarivanje [3]	4
Slika 3.	Shematski prikaz završnog dijela pištolja za MAG zavarivanje [4]	5
Slika 4.	Karakterističan oblik i geometrija električnog luka i zavarenog spoja [1]: a) u argonu b) u ugljikovom dioksidu	6
Slika 5.	Profil zavarenog spoja ovisno o zaštitnom plinu [1]	7
Slika 6.	Shematski prikaz disocijacije zaštitnog plina [6]	9
Slika 7.	Toplinska vodljivost zaštitnih plinova u ovisnosti o temperaturi [6]	10
Slika 8.	Prikaz utjecaja zaštitnog plina na oblik zavara [7]	12
Slika 9.	Utjecaj dodavanja CO ₂ argonu na izgled zavara [6]	14
Slika 10.	Prikaz presjeka praškom punjenih žica [1]	17
Slika 11.	Usporedba kutnog zavara zavarenog sa žicom punjenom metalnim prahom (lijevo) i praškom punjenom žicom (desno) [10]	19
Slika 12.	Shema za označavanje praškom punjenih žica [11]	21
Slika 13.	Razlika u prijenosu metala i izgledu zavara za punu i praškom punjenu žicu [7].	23
Slika 14.	Shematski prikaz količine depozita pri različitim vrstama žice [12]	24
Slika 15.	Utjecaj napona na profil zavara [14]	26
Slika 16.	Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zavara [14]	27
Slika 17.	Utjecaj slobodnog kraja žice na profil zavara [14]	27
Slika 18.	Prikaz prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [16]	29
Slika 19.	Prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom kod MAG postupka zavarivanja [1] ...	30
Slika 20.	Prikaz prijenosa metala impulsnim strujama [4]	31
Slika 21.	Prikaz feritno-perlitne mikrostrukture općeg konstrukcijskog čelika [18]	34
Slika 22.	Shema za označavanje konstrukcijskih čelika [17]	35
Slika 23.	Daihen Varstroj WB 400 [19]	38
Slika 24.	Korisničko sučelje uređaja Daihen Varstroj WB – 400	39
Slika 25.	Uređaj za vođenje pištolja "BUG - O MDS 1002"	40
Slika 26.	Dodatni materijal - puna žica [21]	42
Slika 27.	Karakteristike metalnim prahom punjene žice [21]	43
Slika 28.	Izgled zavara uzorka 1	48
Slika 29.	Izgled zavara uzorka 2	48

Slika 30.	Izgled zavara uzorka 3	48
Slika 31.	Izgled zavara uzorka 4	48
Slika 32.	Izgled zavara uzorka 5	49
Slika 33.	Izgled zavara uzorka 6	49
Slika 34.	Izgled zavara uzorka 7	49
Slika 35.	Makroizbrusak uzorka 1	50
Slika 36.	Makroizbrusak uzorka 2	50
Slika 37.	Makroizbrusak uzorka 3	51
Slika 38.	Makroizbrusak uzorka 4	51
Slika 39.	Makroizbrusak uzorka 5	51
Slika 40.	Makroizbrusak uzorka 6	51
Slika 41.	Makroizbrusak uzorka 7	52
Slika 42.	Analiza visine zavara pomoću alata ImageJ na uzorku 2	53
Slika 43.	Analiza površine zavara pomoću alata ImageJ na uzorku 2	53
Slika 44.	Analiza bočne penetracije koristeći alat ImageJ na uzorku 2	54
Slika 45.	Analiza dubinske penetracije koristeći alat ImageJ na uzorku 2	54
Slika 46.	Analiza dubine penetracije koristeći alat ImageJ na uzorku 2.....	55
Slika 47.	Dijagram usporedbe analiziranih visina zavara ispitanih uzoraka.....	56
Slika 48.	Dijagram usporedbe analiziranih površina poprečnog presjeka metala zavara ispitanih uzoraka	57
Slika 49.	Dijagram usporedbe analiziranih površina bočnih penetracija zavara ispitanih uzoraka	57
Slika 50.	Dijagram usporedbe analiziranih površina dubinskih penetracija zavara ispitanih uzoraka	58
Slika 51.	Dijagram usporedbe analiziranih dubina penetracije zavara ispitanih uzoraka.....	58

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Vrijednost fizikalnih svojstava argona, ugljikovog dioksida i kisika [12].....	8
Tablica 2.	Plinovi i plinske mješavine i njihovo područje primjene [1]	13
Tablica 3.	Tablica trokomponentnih zaštitnih plinskih mješavina Ar - O ₂ - CO ₂ [7].....	16
Tablica 4.	Mehanička svojstva žice KX - 706M [11]	22
Tablica 5.	Kemijski sastav žice KX - 706M [11].....	22
Tablica 6.	Tehničke karakteristike izvora Daihen Varstroj WB 400 [20].....	38
Tablica 7.	Kemijski sastav čelika S235 [20]	41
Tablica 8.	Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S235 [20].....	41
Tablica 9.	Zaštitni plinovi korišteni u eksperimentu [7]	44
Tablica 10.	Tablica oznaka uzoraka i korištenih zaštitnih plinskih mješavina	45
Tablica 11.	Parametri zavarivanja za pojedini uzorak	47
Tablica 12.	Vrijednosti parametara dobivenih uz pomoć alata ImageJ	55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
I	A	Jakost struje zavarivanja
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
R_{ms}	N/mm^2	Savojna čvrstoća
R_{mu}	N/mm^2	Smična čvrstoća
U	V	Napon zavarivanja
v	cm/min	Brzina dodavanja žice
Q	kJ/cm	Unos topline
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatura
η	%	Iskoristivost

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
Ar	Argon
C	Ugljik
CO ₂	Ugljikov dioksid
He	Helij
H ₂	Vodik
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina
Mn	Mangan
N ₂	Dušik
OM	Osnovni materijal
O ₂	Kisik
P	Fosfor
S	Sumpor

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu obrađena je analiza svojstva zavarenih spojeva konstrukcijskog čelika primjenom različitih dodatnih materijala kao i različitih smjesa zaštitnih plinova. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu diplomskog rada opisan je MAG postupak zavarivanja i načini na koji se može izvoditi. Uz MAG postupak zavarivanja obrađeni su i opći konstrukcijski čelici te je navedeno gdje se primjenjuju. Naglasak u teorijskom dijelu rada stavljen je na dodatni materijal za MAG postupak zavarivanja, tj. na metalnim prahom punjene žice. Opisana su svojstva metalnim prahom punjenih žica i uspoređene su s konvencionalnim punim i praškom punjenim žicama. Opisane i navedene su dvokomponentne i trokomponentne mješavine zaštitnih plinova pri MAG postupku zavarivanja. Nakon teorijskog dijela rada uslijedio je eksperimentalni dio.

U eksperimentalnom dijelu MAG postupkom zavarivanja zavareno je sedam uzoraka. Uzorci su zavarivani konvencionalnom punom žicom i metalnim praškom punjenom žicom uz primjenu dvokomponentne i trokomponentne mješavine zaštitnog plina. Nakon toga analizirani su makroizbrusci.

Ključne riječi: MAG, konstrukcijski čelik, metalnim prahom punjena žica, zaštitni plin, trokomponentne mješavine zaštitnog plina

SUMMARY

The analysis of properties of welded joints of structural steel using different additional materials as well as different mixtures of shielding gases has been processed in this graduate thesis. The thesis consists of the theoretical and the experimental part.

The MAG procedure of welding and the manners of performing it have been described in the theoretical part of this graduate thesis. Along with the MAG procedure of welding, the general structural steels and their use have also been processed. The focus of the theoretical part was put on additional materials used for MAG procedure of welding. Metal cored welding wire took most of that focus. The properties of the metal cored welding wire have been described and they have been compared with the conventional full wires and flux cored wires. Two and three-component shielding gas mixtures used in the MAG welding procedure have been described and listed. The experimental part followed after the theoretical part.

Seven samples have been welded using the MAG welding procedure in the experimental part. The samples have been welded by the conventional full wire and the metal cored welding wire with the application of two and three-component shielding gas mixture. After the process, microstructure of samples was analyzed.

Keywords: MAG, structural steels, metal cored welding wires, shielding gas, three-component shielding gas mixture

1. UVOD

Zavarivanje je spajanje osnovnog materijala primjenom topline i/ili pritiska, s ili bez dodatnog materijala. Cilj zavarivanja je dobiti homogeni zavareni spoj. Iako se početci zavarivanja pokazuju u dalekoj prošlosti, ono spada u novije tehnologije metaloprerađivačke industrije. Kao prvi postupak zavarivanja smatra se kovačko zavarivanje, a daljnjim razvojem industrije javljaju se i mnogi drugi postupci zavarivanja kao što su elektrolučno i plinsko zavarivanje. Kao jedan od najčešće korištenih postupaka zavarivanja koristi se MAG postupak zavarivanja (engl. *Metal Active Gas*). To je najrašireniji postupak zavarivanja, a razlog tome je njegova ekonomičnost i mogućnost da se ispune brojni zahtjevi kvalitete koji su traženi. Osim ekonomičnosti kao razlog učestalosti ovog postupka je i velika fleksibilnost, niska cijena opreme kao i mogućnost mehanizacije. MAG postupak može se koristiti prilikom zavarivanja brojnih vrsta čelika, a jedna od vrsta koja se zavaruje MAG postupkom su konstrukcijski čelici. Konstrukcijski čelici se primjenjuju kao što im i sam naziv kaže za tipične dijelove uređaja i strojeva, ali i za nosive konstrukcije velikih masa kao što su dizalice i razna industrijska oprema.

[1]

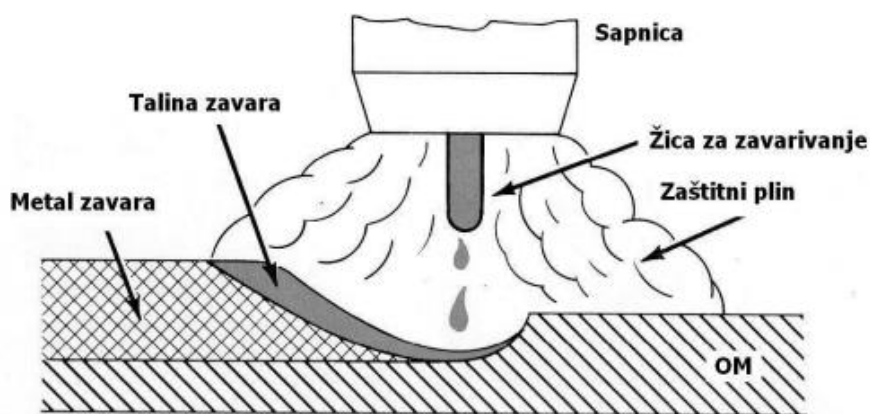
U ovom radu detaljnije će se opisati MAG postupak zavarivanja metalnim prahom punjenim žicama uz primjenu trokomponentne plinske mješavine zaštitnog plina te na koji način promjena plina utječe na karakteristike zavarenog spoja.

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u obliku žice u zaštitnoj atmosferi. Zaštitnu atmosferu osiguravaju aktivni plinovi, najčešće ugljikov dioksid (CO_2). Uz ugljikov dioksid koriste se i mješavine ugljikovog dioksida s argonom (Ar), helijem (He) i kisikom (O_2). [1]

2.1. Općenito o postupku

Kod ovog postupka električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice koja je u pravilu spojena na plus pol istosmjernog izvora struje. Žica kod MAG postupka zavarivanja je istovremeno elektroda koja održava električni luk, ali i dodatni materijal koji se tali i popunjava pripremljeni žlijeb. Žica se dodaje konstantno uz pomoć pogonskog sistema koji ju tjera kroz cijev do pištolja i dalje. Postupak može biti poluautomatski i automatski. Ako je dodavanje žice mehanizirano, a vođenje pištolja ručno onda je riječ o poluautomatskom postupku, dok je kod automatskog postupka i dodavanje žice i vođenje pištolja mehanizirano. Drugi slučaj automatskog postupka je kada je dodavanje žice mehanizirano, a pištolj je statičan, tada je gibanje obratka mehanizirano. Slika 1 prikazuje shemu MAG postupka zavarivanja, oznaka OM predstavlja osnovni materijal. [1]



Slika 1. Shema MAG postupka zavarivanja [2]

Prednosti postupka su [2]:

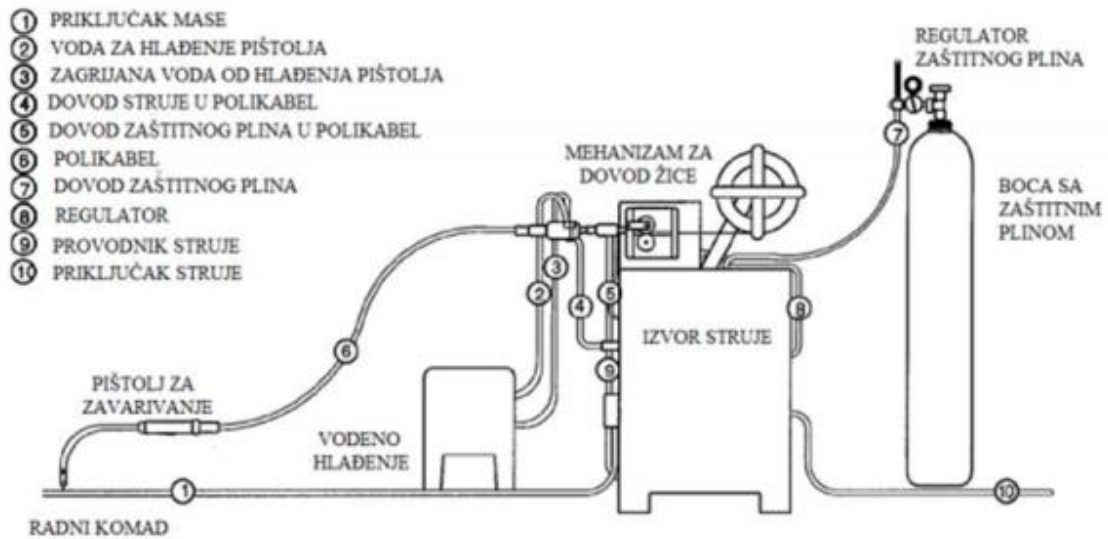
- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina
- zavarivanje u svim položajima
- lako i brzo čišćenje zavarenih spojeva
- unos vodika u metal zavara je nizak
- jednostavna automatizacija procesa
- visoka učinkovitost
- manji unos topline u usporedbi s drugim procesima
- niža cijena dodatnog materijala u usporedbi s drugim procesima
- ulogu zaštitnog plina mogu imati mješavine plina koje se sastoje od dva ili više plinova u određenim omjerima, ovisno o vrsti materijala koji se zavaruje kao i traženim svojstvima

Nedostaci postupka su [2]:

- složenost uređaja i opreme za zavarivanje
- opasnost od grešaka u početku i završetku zavarivanja
- problemi s dovođenjem žice prilikom zavarivanja aluminijske legure
- osjetljivost postupka na vanjske utjecaje prilikom rada na terenu
- kod prijenosa metala kratkim spojevima dolazi do velikog rasprskavanja
- nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe prijenosa metala štrcajućim lukom

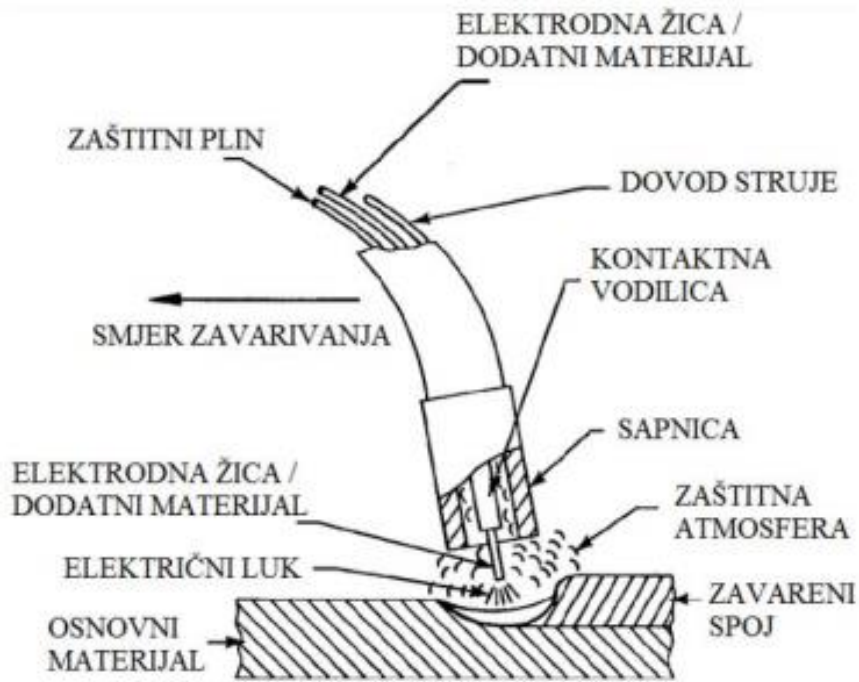
2.2. Uređaj i pribor za MAG postupak zavarivanja

Oprema za MAG postupak zavarivanja prikazana je na slici 2 i sastoji se od izvora struje za zavarivanje, boce sa zaštitnim plinom uz pripadajući regulator zaštitnog plina koji se priključuju u izvor struje za zavarivanje. Na izvoru struje za zavarivanje nalazi se mehanizam za dovod žice koji kroz polikabel dovodi žicu do pištolja za zavarivanje. Pri većim radnim temperaturama potrebno je imati i uređaj za hlađenje kako ne bi došlo do pregrijavanja.



Slika 2. Shematski prikaz opreme za MAG zavarivanje [3]

Prije početka zavarivanja potrebno je priključiti izvor struje na električnu mrežu i uključiti ga, namjestiti količinu protoka plina i parametre zavarivanja. Proces zavarivanja započinje tako da se zatvori strujni krug, jedan kabel je priključak mase i on je spojen na radni komad dok polikabel povezuje pištolj za zavarivanje s izvorom struje. Pritiskom tipke na pištolju otvara se magnetni ventil za protok plina i uključuje se motor za dovod žice. Uvijek prvo počne istjecati zaštitni plin kako bi se stvorila zaštitna atmosfera iznad radnog komada, odnosno mjesta koje se zavaruje, pa tek nakon toga pali se pogonski sustav za dovod žice koji pokreće žicu kroz polikabel. Na taj se način rastaljeni metal štiti od utjecaja okolne atmosfere. Kroz polikabel prolazi cijev za dovod zaštitnog plina kao i crijeva za vodeno hlađenje ako je ono potrebno. Vodeno hlađenje uglavnom se koristi pri strujama zavarivanja većima od 450 A ili kod korištenja žica koje imaju veliku toplinsku vodljivost. Kada zaštitni plin kroz polikabel dođe do pištolja on izlazi kroz sapnicu pištolja. U pištolju se nalazi i kontaktna vodilica koja prenosi struju zavarivanja na žicu, tako da se žica ne grije cijelom svojom duljinom već se samo vrh žice zagrijava i tali. Sapnica kao i kontaktna vodilica su potrošni dijelovi pištolja i lako se mogu zamijeniti. Na slici 3 prikazan je presjek završnog dijela pištolja za MAG zavarivanje.



Slika 3. Shematski prikaz završnog dijela pištolja za MAG zavarivanje [4]

Mehanizam za dovođenje žice je zapravo elektromotor koji dodaje žicu konstantnom brzinom. Najčešće se nalazi unutar kućišta izvora struje, no to nije pravilo. Brzina dodavanja žice može se odrediti na upravljačkoj ploči uređaja i jedan je od parametara koji se određuju prije početka samog procesa. Kako bi svojstva zavara bila što bolja bitno je da žica od mjesta gdje je namotana do mjesta gdje se uspostavlja električni luk pristize ravnomjerno.

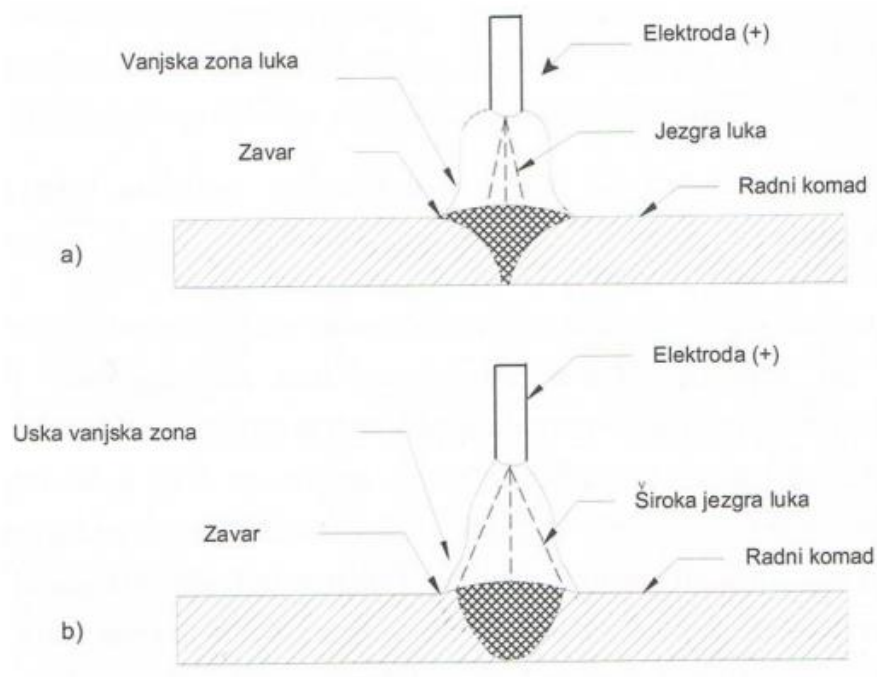
2.3. Plinovi kod MAG postupka zavarivanja

Kao što je već spomenuto prije u radu, zaštitni plin se dovodi kroz posebnu sapnicu na pištolju. Uloga plina je stvaranje zaštitne atmosfere iznad mjesta zavarivanja i na taj način štiti to mjesto, ali i kapljice taline od štetnih čimbenika u vanjskoj atmosferi. Osim što služi kao zaštitna atmosfera, zaštitni plin utječe i na karakteristiku električnog luka, način prijenosa metala, izgled profila zavara, pojavu nečistoća i svojstva metala zavara. Najčešće korištena mješavina prilikom zavarivanja konstrukcijskih čelika je mješavina argona i ugljikovog dioksida u omjeru 82 – 18% u korist argona.

Uloga plinova očituje se na [5]:

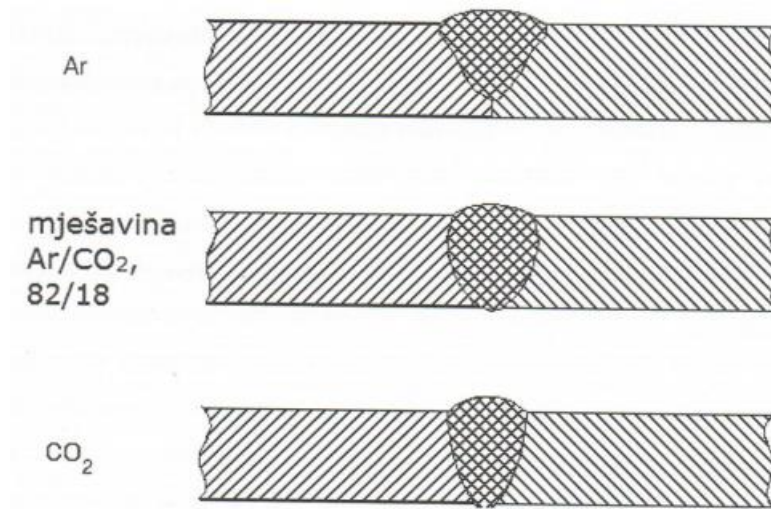
- električno-fizikalna svojstva električnog luka
- metalurške reakcije u talini zavara
- tehnološke parametre

Na efikasnost zaštite mjesta zavarivanja veliki utjecaj ima specifična gustoća zaštitnog plina, naime gušći plinovi poput argona i ugljikovog dioksida oblikuju dobar zaštitni omotač. Suprotno tome, plinovi koji imaju manju specifičnu gustoću poput helija, dušika i vodika imaju sklonost stvaranju turbulencija prilikom izlaska iz sapnice. Uz turbulencije još jedan nedostatak je što se za njih mora povećati protok plina, a kada se uzme u obzir visoka cijena naprimjer helija, onda to više nije isplativo. Zbog visoke cijene, helij se uglavnom koristi u mješavinama zaštitnih plinova i to u manjim udjelima. Uz specifičnu gustoću plina potrebno je obratiti pozornost i na toplinsku vodljivost zaštitnog plina. Gubitci topline koji se događaju u plinskoj atmosferi utječu na oblik i geometriju jezgre luke. Na slici 4 prikazan je oblik i geometrija električnog luka ovisno o kojem se zaštitnom plinu radi. [1]



Slika 4. Karakterističan oblik i geometrija električnog luka i zavarenog spoja [1]:
 a) u argonu
 b) u ugljikovom dioksidu

Kao što je i vidljivo na slici 4, argon daje usku zonu jezgre luka, dok ugljikov dioksid daje široku jezgru luka. Ovo se također odražava i na dubinu penetracije u osnovnom materijalu. Djelovanje zaštitnog plina na metal može biti neutralno, oksidirajuće ili reducirajuće. Iz svega je vidljivo da je ovisno o željenim karakteristikama zavarenog spoja, obliku kao i samoj dubini zavara potrebno pažljivo odabrati zaštitni plin ili mješavinu koja će se koristiti u samom postupku zavarivanja. Naime, korištenjem ugljikovog dioksida dobivaju se zavari sa širom penetracijom i mogu se pokriti netočnosti pripreme i vođenja pištolja, ali izgled zavara je nepovoljan, korištenjem argona osigurava se stabilnost električnog luka, stoga ta dva plina tvore mješavinu kako bi se dobila što bolja svojstva zavarenog spoja. Na slici 5 prikazan je profil zavarenog spoja ovisno o kojoj zaštitnoj atmosferi je riječ. [1]



Slika 5. Profil zavarenog spoja ovisno o zaštitnom plinu [1]

2.3.1. Fizikalna svojstva plina

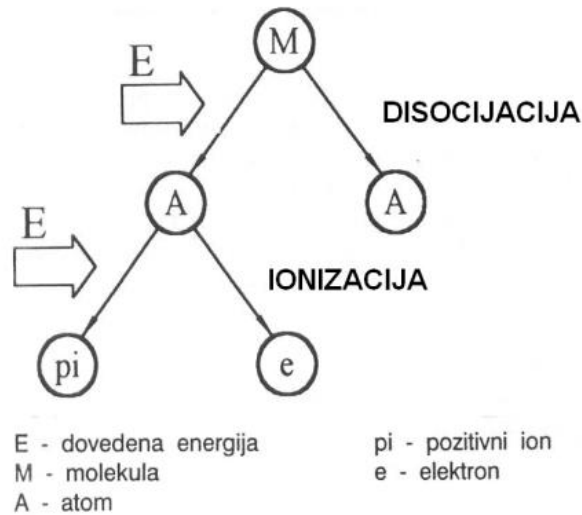
Plinovi kao i druge tvari imaju određena fizikalna svojstva. Kako bi dobro razumjeli ponašanje te sami utjecaj plinova na postupak zavarivanja potrebno je biti upoznat s fizikalnim svojstvima poput toplinske vodljivosti, ionizacijskog potencijala, rekombinacije i disocijacije, kemijske reaktivnosti, gustoće te čistoće plina. Gustoća plina ima veliki značaj za učinkovitost zaštite mjesta zavarivanja kao i dodatnog materijala od raznih utjecaja okoline. Plinovi koji su teži od zraka imaju dobar učinak zaštite mjesta zavarivanja, razlog tome je njihova tendencija padanja

uz stup električnog luka. Argon i ugljikov dioksid su plinovi velike gustoće i oni oblikuju dobar zaštitni omotač, dok su helij, vodik i dušik skloni turbulentnom strujanju pri izlazu iz sapnice. Može se zaključiti da plinovi koji su teži od zraka kao argon i ugljični dioksid trebaju manji protok plina nego plinovi koji su lakši od zraka kao što je helij. [1] U tablici 1 prikazane su vrijednosti najvažnijih fizikalnih svojstava argona, ugljikovog dioksida i kisika.

Tablica 1. Vrijednost fizikalnih svojstava argona, ugljikovog dioksida i kisika [12]

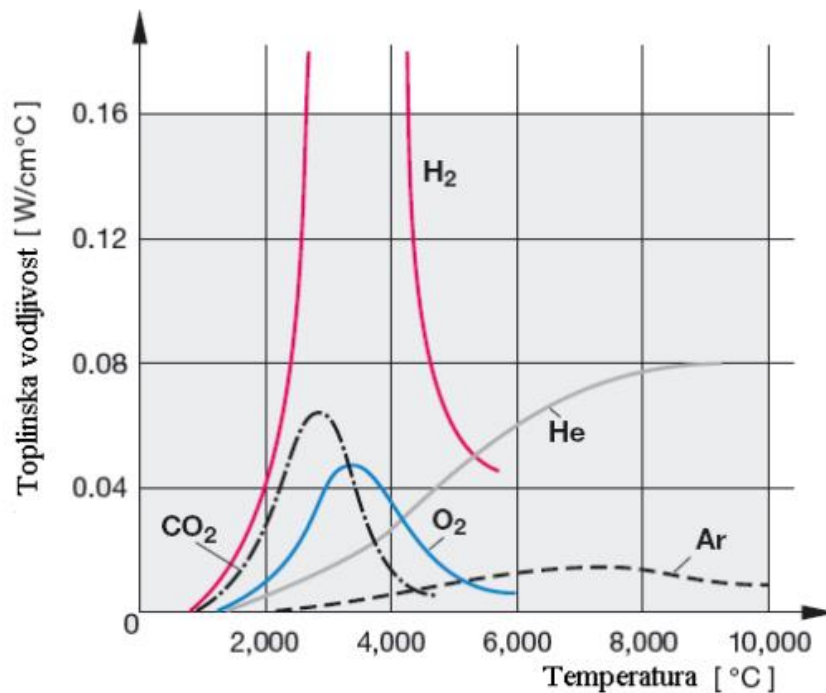
Zaštitni plin	Kemijski simbol	Gustoća, [kg/m ³]	Energija disocijacije, [eV]	Toplinska vodljivost, [W/(mK)]	Ionizacijski potencijal, [eV]
Argon	Ar	1,656	-	0,02573	15,8
Ugljikov dioksid	CO ₂	1,833	5,3	0,03293	14,4
Kisik	O ₂	1,429	5,1	0,025562	12,6

Energija disocijacije je količina energije koju je potrebno dovesti molekuli plina koja ima dva ili više atoma kako bi došlo do odvajanja jednog atoma. Odvajanje jednog atoma od molekule naziva se disocijacija. Prilikom zavarivanja u električnom luku razvijaju se visoke temperature koje dovode do već spomenute disocijacije. Pri visokim temperaturama molekule zaštitnih plinova se razdvajaju na atome koji se ioniziraju i kao takvi poboljšavaju električnu vodljivost zaštitne atmosfere. Kada dođe do kontakta toplog plina i hladnije površine radnog komada atomi se ponovno skupljaju u molekule i tada se oslobađa velika količina energije. To omogućuje da ugljikov dioksid pri istoj temperaturi električnog luka postiže veće zagrijavanje radnog komada od argona. Ovaj postupak nije moguć kod argona jer se on sastoji od jednog atoma. Slika 6 prikazuje shematski prikaz disocijacije i rekombinacije zaštitnog plina.



Slika 6. Shematski prikaz disocijacije zaštitnog plina [6]

Ionizacijski potencijal je u principu određena količina energije koju je potrebno dovesti molekuli plina kako bi se jedan atom iz elektronskog omotača izbio. Ta energija izražena je u elektronvoltima (eV). Izbijanjem, odnosno oduzimanjem elektrona iz omotača dobivamo električki nabijen atom. Ionizacijski potencijal je manji što je veća atomska masa plina. Minimalna energija koja je potrebna kako bi došlo do ionizacije, odnosno kako bi plin postao vodič, je zbroj energije disocijacije i ionizacijskog potencijala. Oni plinovi koji imaju niže vrijednosti ionizacijskog potencijala lakše oslobađaju elektrone, a samim time se i lakše uspostavlja i održava stabilni električni luk. Toplinska vodljivost plina govori nam kolika je sposobnost plina da provodi toplinu. Toplinska vodljivost pojedinog plina utječe na rasipanje električnog luka na koji se veže i utječe na profil zavara. Naime, ako se koristi plin koji ima nižu toplinsku vodljivost, kao naprimjer helij, električni luk se širi i toplina se raspodjeljuje po presjeku zavara. Na taj način se dobiva profil zavara koji ima širu i manju penetraciju. Prilikom korištenja argona koji ima veću toplinsku vodljivost, toplina se ne širi toliko po presjeku, već je više fokusirana na užem dijelu i na taj način dobiva se profil zavara s većom dubinom penetracije. Na slici 7 prikazana je toplinska vodljivost zaštitnih plinova u ovisnosti o temperaturi. [6]



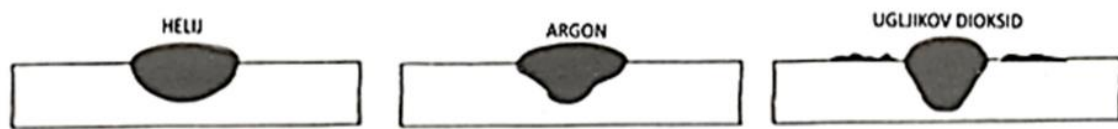
Slika 7. Toplinska vodljivost zaštitnih plinova u ovisnosti o temperaturi [6]

Važno svojstvo zaštitnog plina je i kemijska reaktivnost. Kemijska reaktivnost govori koliko je pojedini plin sklon da pri određenim temperaturama električnog luka reagira s talinom. Ovisno o toj sklonosti postoje plinovi koji su inertni kao što su argon i helij. Oni se nazivaju inertnima zato što su potpuno neaktivni i nemaju utjecaj na zavareni spoj. Plinovi koji su reaktivni reagiraju s elementima koji se nalaze u talini i mogu prouzrokovati značajne posljedice. To su ugljikov dioksid i kisik. Oni reagiraju s rastaljenim metalom i stvaraju okside. U reaktivne plinove ubraja se i vodik, no za razliku od ugljikovog dioksida i kisik on ne stvara okside već suprotno on sprječava njihov nastanak. Prilikom korištenja vodika treba biti oprezan zato što prevelika količina vodika uzrokuje nakupljanje atoma vodika i pojavu hladnih pukotina, poroznosti i drugih grešaka zavarenog spoja. Važno je još spomenuti i čistoću zaštitnog plina. Razlog tome je što i mali udio nečistoća u zaštitnim plinovima može utjecati na brzinu zavarivanja, penetraciju, izgled i oblik zavarenog spoja, poroznost i uzrokovati brojne druge probleme. Zbog toga je potrebno obratiti pozornost da plin koji se koristi zadovoljava minimalnu normom propisanu čistoću.

2.3.3. Vrste zaštitnih plinova i njihov utjecaj na svojstva zavarenog spoja

Uz već spomenute plinove i mješavinu ugljikovog dioksida (CO_2) i argona (Ar) kao zaštitni plin koriste se još kisik (O_2), helij (He), dušik (N_2) i u malim količinama može se pojaviti i vodik (H_2). Kisik je plinoviti kemijski element bez boje, okusa i mirisa. On se koristi u manjim količinama (1% - 5%) u mješavini s argonom. Pri tome se dobiva na stabilnosti luka i estetski prihvatljiv zavar. Uz to kisik smanjuje površinsku napetost rastaljenog metala elektrode, tako se dobije sitniji prijenos metala u električnom luku. Argon je jednoatomni kemijski inertni plin bez boje, okusa i mirisa, nije lako zapaljiv niti otrovan. Zbog njegove inertnosti i velike gustoće on je glavni zaštitni plin za zavarivanje. Koristi se samostalno ili u kombinaciji s drugim plinovima pri čemu se dobivaju mješavine zaštitnih plinova. Zbog male energije ionizacije argon olakšava uspostavu električnog luka. Mješavine zaštitnog plina koje imaju visoke udjele argona mogu se koristiti za sve konvencionalne načine prijenosa metala kao i za visokoučinsko zavarivanje. Helij je također jednoatomni inertni plin, no za razliku od argona helij ima malu atomsku masu kao i gustoću. Koristi se kada je potreban veliki unos topline prilikom čega se dobiva veća dubina penetracije i brzina zavarivanja. Helij ima veliku toplinsku vodljivost i širi stup električnog luka od argona. Iz tog razloga koristi se kod zavarivanja aluminijskih čelika, magnezija i kao dio plinskih mješavina za zavarivanje korozijski postojanih čelika. Veliki problem je njegova cijena koja je dosta visoka pa se rijetko primjenjuje kao samostalan zaštitni plin. Ugljikov dioksid je za razliku od argona i helija reaktivan plin bez boje, okusa, mirisa i ne gori. Pri sobnoj temperaturi njegova reakcija nije potaknuta, no u uvjetima prilikom zavarivanja on reagira i molekula ugljikovog dioksida (CO_2) se dijeli na ugljikov monoksid (CO) i kisik (O_2). To je postupak već spomenute disocijacije. Prilikom razdvajanja elemenata oni se miješaju s talinom ili ako se radi o hladnijem području ponovno se rekombiniraju i nastaje CO_2 . Prilikom rekombiniranja oslobađa se velika količina energije i kao posljedica dolazi do formiranja dubljeg i šireg zavara. Prilikom disocijacije kisik koji se odvojio nije poželjan, razlog tome je što on reagira i miješa se s talinom i na taj način dolazi do oksidacije. Kako bi se to spriječilo dodaju se određeni elementi u elektrodu poput silicija, mangana i titana. Oni vežu kisik na sebe i zajedno izlaze na površinu. Ugljikov monoksid može ostati zarobljen u metalu zavara i na taj način nastaje poroznost. U principu to znači da veće količine ugljikovog dioksida znače i više troske, ali i smanjenje stabilnosti luka, povećanje štrcanja kao i veći gubitak dodatnog materijala. Cijena ugljikovog dioksida je relativno niska pošto je on lako nabavljiv. No uvijek u obzir treba uzeti da ugljikov dioksid u konačnici ima manju učinkovitost zbog prskanja koje

treba naknadno očistiti. Slika 8 prikazuje utjecaj i oblik zavora koji se dobije prilikom korištenja najznačajnijih zaštitnih plinova koji su gore navedeni. [6, 7]



Slika 8. Prikaz utjecaja zaštitnog plina na oblik zavora [7]

Potrebno je još spomenuti vodik i dušik. Vodik je kemijski aktivan plin te je najlakši plin koji postoji. Vrlo je zapaljiv, temperatura zapaljenja iznosi 560 °C. U plinskim mješavinama zaštitnih plinova koristi se u malim količinama 1% - 5%. Ima visoku toplinsku vodljivost i to omogućava nastajanje viskozne taline i postizanje većih brzina zavarivanja. Dušik je plin koji kemijski nije aktivan, ali pri temperaturama koje nastaju tijekom procesa zavarivanja reagira s metalima poput aluminijskog, magnezijevog i titanovog. Primjenjuje se za zaštitu korozivnih čelika i prilikom zavarivanja ugljičnih čelika.

2.3.3. Dvokomponentne mješavine zaštitnog plina

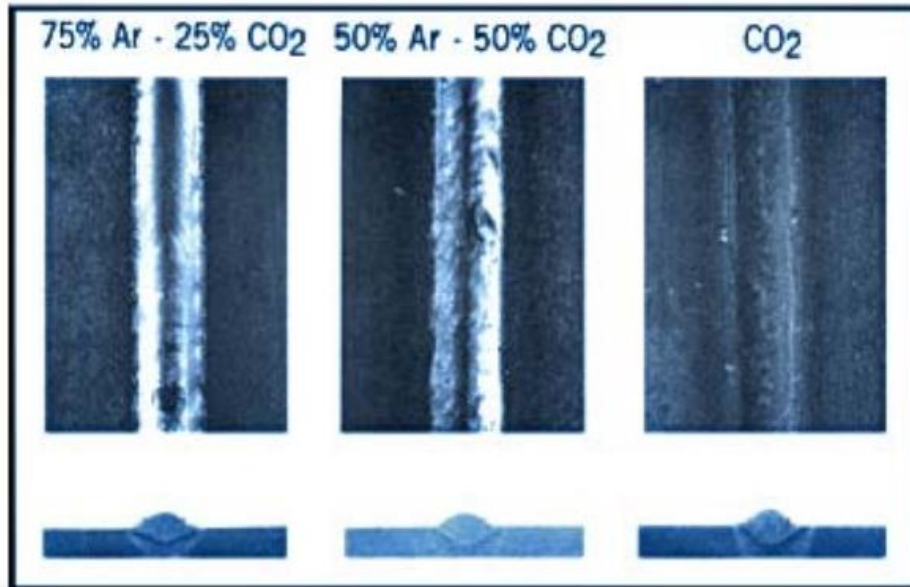
Pravilnim odabirom plinova te njihovog omjera dobiva se sastav mješavine zaštitnog plina kojom se postižu zahtijevana svojstva zavarenog spoja. Kao kriterij za odabir plinova i njihovih omjera u mješavini može se uzeti naprimjer željeni oblik penetracije, no to ne mora biti jedini kriterij. Kao kriterij za odabir mješavine zaštitnog plina može se uzeti željeni izgled zavora, otpornost na poprečno strujanje zraka, veći zaštitni učinak odnosno kraće vrijeme zavarivanja, te manji troškovi dodatnog materijala zbog manjeg rasprskavanja. Najčešće korištene dvokomponentne mješavine sadrže argon i kisik ili argon i ugljikov dioksid. U tablici 2 su prikazani plinovi i mješavine te njihovo područje primjene.

Tablica 2. Plinovi i plinske mješavine i njihovo područje primjene [1]

Plinovi i mješavine	Primjena
Ar	Svi metali
CO ₂	Nelegirani i niskolegirani čelici
He	Svi metali
Ar + He (35 – 75%)	Svi metali, posebno Al, Cu, Ni
Ar + O ₂ (0,5%)	Al, Al - legure
Ar + O ₂ (1 – 2%)	Visokolegirani CrNi čelici za automatizirano zavarivanje
Ar + O ₂ (3 – 5 %)	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + H ₂ (5 – 10%)	Visokolegirani CrNi čelici za automatizirano zavarivanje
Ar + N ₂ (25 – 30%)	Bakar i legure bakra
Ar + CO ₂ (18%)	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + CO ₂ + O ₂ (93+6+1%)	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ar + CO ₂ + O ₂ (86+12+2%)	Nelegirani i niskolegirani čelici

Ar – CO₂ je najčešće primjenjivana dvokomponentna plinska mješavina koja se može koristiti u sve četiri metode prijenosa metala. Kisik koji se disocira daje talini dodatnu gustoću i doprinosi stabilizaciji električnog luka. Uz doprinos stabilizaciji električnog luka CO₂ također utječe i na veću širinu provara. Najčešće upotrebljavana mješavina je u omjeru 82% Ar + 18% CO₂. Ta mješavina se koristi za zavarivanje različitih debljina stijenki, daje širok električni luk koji kao rezultat daje širi oblik zavara. Udio ugljikovog dioksida od 18% je gornja granica za metodu prijenosa metala štrcajućim lukom. Uglavnom se prilikom korištenja te metode koriste mješavine s manjim udjelom CO₂. Mješavine koje imaju 20% CO₂ u svom sastavu dodatno reduciraju rasprskavnje i doprinose kvalitetnijem izgledu zavara. Takve mješavine koriste se najčešće kod prijenosa metala kratkim spojevima. Prilikom zavarivanja tankostijenih materijala ako se želi postići maksimalna produktivnost koriste se mješavine s 11 – 20% CO₂. Niži udjeli CO₂ mogu povećati učinkovitost deponiranog materijala smanjivanjem nepotrebnog rasprskavanja. Veći udio CO₂ (25%) doprinosi kvalitetnijem izgledu zavara i ublažava prskanje. Mješavina s 50% CO₂ koristi se tamo gdje su zahtjevi za visokim unosom topline i dubokom

penetracijom. To su uglavnom radni komadi koji su deblji od 3 mm. Ova mješavina koristi se kod zavarivanja cjevovoda a razlog tome je što ima dobro kvašenje i viskoznost taline kao i dobar izgled zavara. Slika 9 prikazuje utjecaj udjela CO₂ argonu na izgled zavara. [6]



Slika 9. Utjecaj dodavanja CO₂ argonu na izgled zavara [6]

Ar – O₂ mješavine koriste se najčešće prilikom zavarivanja ugljičnih i korozijski postojanih čelika, te aluminija i Al – legura. Dodavanjem kisika argonu povećava se stabilnost električnog luka kao i žilavost taline. Uz to kisik pojačava plazmu luka, unos topline, brzinu zavarivanja. Smanjuje prijelaznu jakost struje kod prijenosa metala slobodnim letom kapljica i utječe na oblik zavara. Ove mješavine se koriste prilikom brzog zavarivanja tankostijenih materijala. Povećanjem udjela kisika u mješavini dodatno se povećava viskoznost taline i smanjuje prijelazna jakost struje u područje štrcajućeg luka. Naravno, veći udio kisika zahtjeva i korištenje elektrode s dezoksidansima. Uz navedene mješavine argonu se još dodaju helij, dušik i vodik. Svaka od navedenih mješavina primjenjuje se za određeni materijal ili željenu mikrostrukturu.

2.3.4. Trokomponentne mješavine zaštitnog plina

Trokomponentne plinske mješavine primjenjuju se prilikom zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika. Većina ovih mješavina može se koristiti za sve konvencionalne metode načina prijenosa materijala, također i za impulsni način. Koristeći mješavine zaštitnog plina koje imaju većinski udio argona uz udio helija od 15 do 35% i udio ugljikovog dioksida od 1 do 2% moguće je dobiti i do 20% veću brzinu zavarivanja, manje deformacije kod tanjih materijala kao i bolji utjecaj na profil zavara nego prilikom korištenja dvokomponentnih plinskih mješavina. Dodavanjem 40% helija u mješavinu argona i ugljikovog dioksida daje širi profil zavara. Helij također omogućuje veću toplinsku vodljivost za prijenos materijala kratkim spojevima. Kod zavarivanja korozijski postojanih čelika argonu se dodaju udjeli helija između 55 – 90% i udio ugljikovog dioksida iznosi 2,5% za prijenos metala kratkim spojevima. Ove mješavine zaštitnih plinova imaju brojne prednosti a neke od njih su [7]:

- smanjeno rasprskavanje
- poboljšana viskoznost taline
- stabilniji električni luk
- ravni i položeniji izgled zavara

U tablici 3 prikazane su Ar – O₂ – CO₂ trokomponentne plinske mješavine.

Tablica 3. Tablica trokomponentnih zaštitnih plinskih mješavina Ar - O₂ - CO₂ [7]

Grupa po HRN EN ISO 14175	Volumni udio, %			Postupak prema HRN EN 14610	Primjena
	Ar	CO ₂	O ₂		
M14	96	3	1	MAGM	Visokolegirani čelici i čelici na bazi Ni
M23	90	5	5	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici
M24	93	6	1	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici
M24	86	12	2	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelik

Ar – CO₂ – O₂ trokomponentne mješavine služe za zavarivanje ugljičnih, niskolegiranih čelika različitih debljina, visokolegiranih čelika i legura na bazi nikla. Sadrže između 3 – 12% ugljikovog dioksida i 1 – 6% kisika. Udio kisika pomaže za održavanje stabilnog luka i smanjuje jakost struje koja je potrebna za zavarivanje. Na taj način dobiva se kratki luk kojim se lako upravlja i smanjuje se prekomjerno protaljivanje zbog smanjenog unosa topline u područje zavara. Ova mješavina plinova koristi se kada se zahtijevaju dobra mehanička svojstva zavara. Kod primjene na nelegiranim i niskolegiranim čelicima ova mješavina može se koristiti uz prijenos metala kratkim spojevima, štrcajućim lukom i impulsnim strujama.

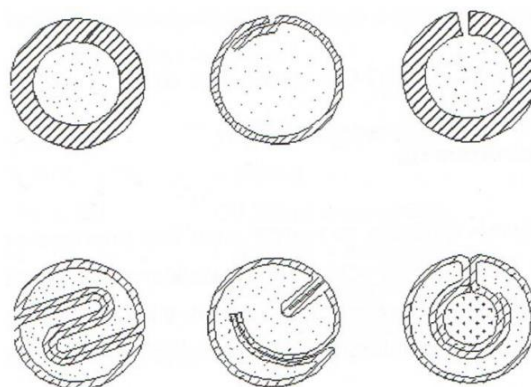
He – Ar – CO₂ mješavina s omjerom 90% He + 7,5% Ar + 2,5% CO₂ je mješavina najčešće u primjeni prilikom zavarivanja MAG postupkom zavarivanja korozivskih postojanih čelika kratkim spojevima. Ova mješavina kao rezultat daje ravan zavar i dobro spajanje materijala koji se zavaruje, razlog toga je visoka toplinska vodljivost helija. Također omogućuje visoke brzine zavarivanja prilikom zavarivanja korozivski postojanih čelika. Ova mješavina može se koristiti i kod impulsnog prijenosa metala ali samo na radnim komadima koji su deblji od 1,5 mm. Mješavina s omjerom 55% He + 42,5% Ar + 2,5% CO₂ nije toliko uobičajena u primjeni. S

obzirom na manji udio helija, električni luk daje manje topline prilikom impulsne metode prijenosa metala. Također zbog manjeg udjela helija može se primijeniti i kod metode prijenosa metala štrcajućim lukom kao i kod zavarivanja kratkim spojevima korozijski postojanih čelika i niklovihi legura..

Ar – He – O₂ mješavina kao glavno svojstvo ima povećanu energiju električnog luka. To je zbog dodavanja helija i kisika argonu. Ova mješavina koristi se za prijenos metala štrcajućim lukom kod niskolegiranih i korozijski postojanih čelika kada se želi povećati viskoznost taline, odnosno kada se želi dobiti pravilan oblik zavara i smanjiti poroznost. [6,7]

2.4. Dodatni materijal za MAG postupak zavarivanja

Dodatni materijal u MAG postupku zavarivanja materijala ima dvije uloge. Jedna uloga je zatvaranje strujnog kruga kako bi proces mogao započeti, dok je pri tome istovremeno dodatni materijal kojim se popunjava žlijeb. Najčešće se koriste žice promjera od 0,6 do 2,4 milimetra. Površina žice mora biti glatka pri čemu dimenzije moraju biti vrlo točne. Kako bi se dobila dobra svojstva zavara žica treba imati sličan kemijski sastav kao i materijal koji se zavaruje, također mora biti lijepo namotana kako prilikom zavarivanja ne dođe do bilo kakvih zastoja ili trzaja prilikom dovodjenja žice. Žice su pobakrene ili niklirane kako bi se što lakše uspostavio električni luk, ali i kao zaštita od korozije. Uz pune žice koriste se još i praškom punjene žice. Praškom punjene žice imaju različite presjeke ovisno o načinu proizvodnje. Na slici 10 prikazani su presjeci praškom punjenih žica. [1,5]



Slika 10. Prikaz presjeka praškom punjenih žica [1]

Praškom punjene žice također koriste zaštitni plin kako bi osigurali zaštitnu atmosferu oko mjesta zavarivanja, no postoje i praškom punjene žice koje same stvaraju zaštitnu atmosferu. Takve žice zovu se samozaštitne praškom punjene žice. Punjene žice nešto su većih promjera od punih, najčešće korišteni promjeri punjenih žica kreću se od 1,2 – 3,2 milimetra, no ima i manjih promjera. Jezgra u sredini žice može biti na bazi metala, minerala, dezoksidansa i dodataka. Ona omogućava pročišćivanje metala zavara, dezoksidaciju, legiranje, veću stabilnost električnog luka i drugo. [9]

S obzirom na vrstu punjenja, postoje tri osnovne vrste punjenih žica [9]:

- žice punjene rutilnim mineralnim praškovima
- žice punjene bazičnim mineralnim praškovima
- žice punjene metalnim praškovima

Sve tri vrste punjenih žica koriste se u brodogradnji, kotlogradnji, izgradnji mostova, automobilske industriji, željezničkoj industriji i drugim područjima. Dok se žice punjene metalnim praškom prvenstveno koriste tamo gdje je moguća automatizacija i robotizacija.

2.4.1. Žice punjene metalnim praškovima

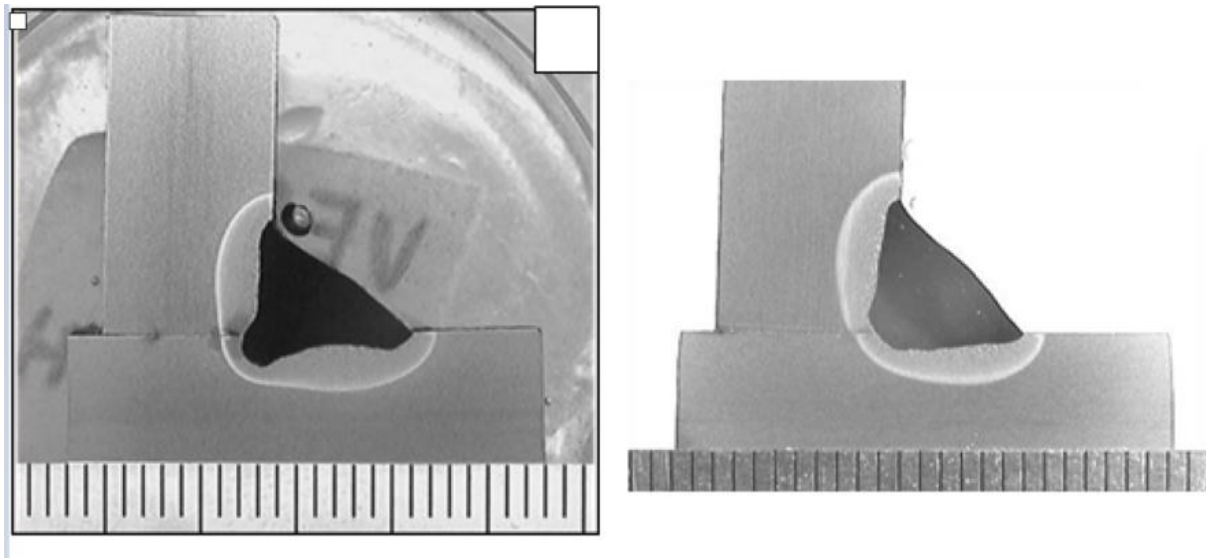
Struktura metalom punjenih žica ista je kao i praškom punjenim žicama, a svojstva zavarivanja su slična kao kod punih žica. Jezgra ovih žica pretežito je sastavljena od metalnog praha feromangana, ferotitana te ferosilicija. Uz to, u malim količinama se dodaju i stabilizatori električnog luka kao što su natrij i kalij. Uz sve nabrojano u sastav punjenja moguće je dodati i legirne elemente, pa se pretežito koriste za zavarivanje visokolegiranih čelika visoke čvrstoće i visokog udarnog rada loma kod niskih temperatura. One se izrađuju iz traka čiji je kemijski sastav sličan sastavu materijala koji se zavaruje. Prilikom korištenja ovih žica potrebno je koristiti zaštitni plin, a koriste se i za zavarivanje pod praškom i navarivanje. Glavna prednost prilikom korištenja ovih žica je visoka produktivnost, razlog tome je što se ne stvara ili se stvara jako malo troske. Sukladno tome nema potrebe za čišćenjem nakon zavarivanja. Kako bi se ostvario maksimalni potencijal ovih žica najbolje ih je koristiti prilikom automatiziranog zavarivanja. [8,9,10]

Prednosti žica punjenim metalnim praškom su [9,10]:

- visoka produktivnost
- malo rasprskavanje
- nema troske
- pogodne za kutne zavare
- visoka iskoristivost
- velika brzina taljenja
- dobra zavarljivost
- laka uspostava i održavanje električnog luka

Nedostaci žica punjenih metalnim praškom su [9]:

- skuplji zaštitni plin
- veći početni troškovi
- jaka ultraljubičasta radijacija tijekom postupka zavarivanja
- velika količina nastale topline u električnom luku

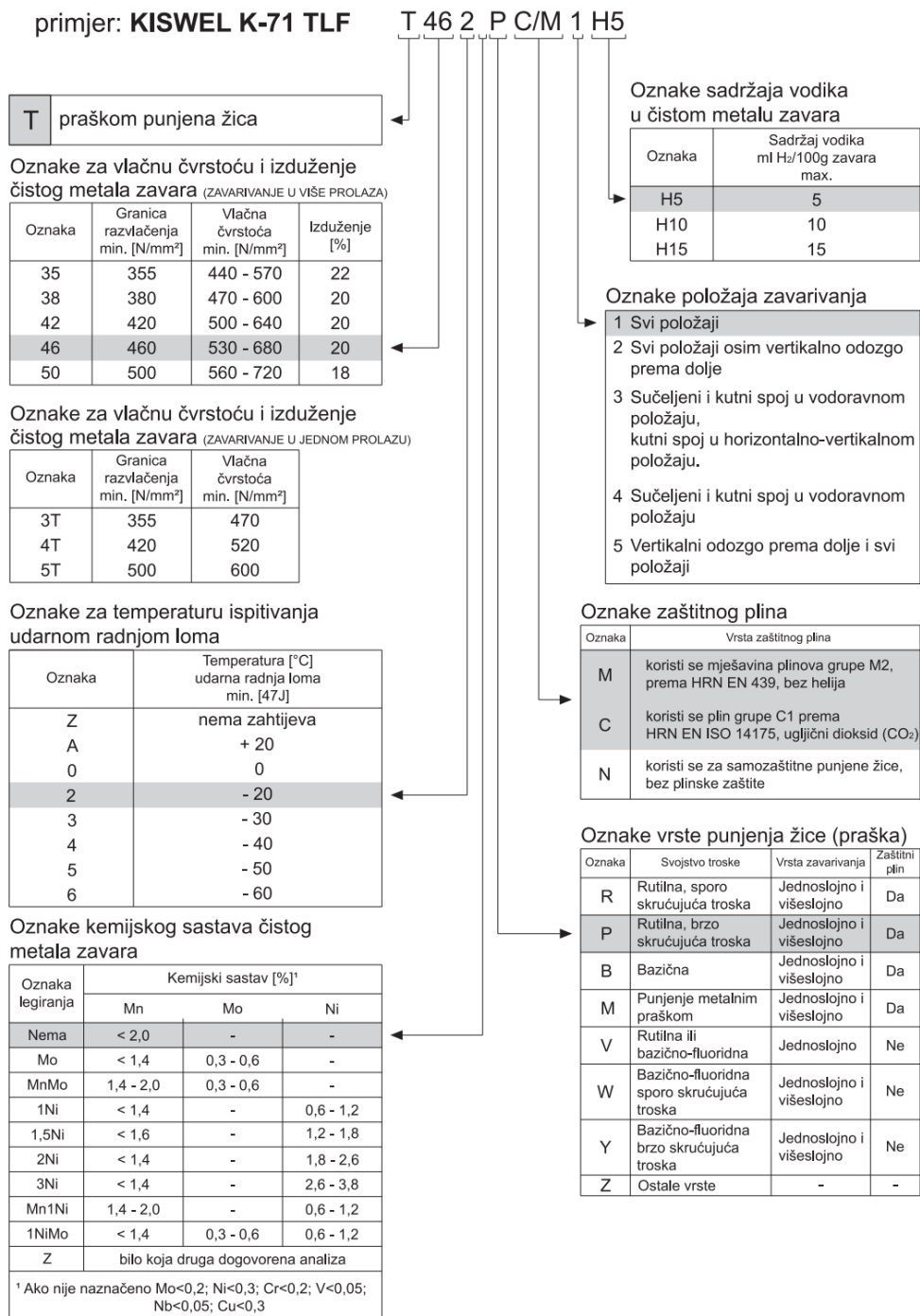


Slika 11. Usporedba kutnog zvara zavarjenog sa žicom punjenom metalnim praškom (lijevo) i praškom punjenom žicom (desno) [10]

Slika 11 prikazuje makroizbrusak kutnog spoja zavara istog materijala koji je zavaren sa žicom punjenom metalnim praškom i praškom punjenom žicom, pri istoj temperaturi predgrijavanja. Vidljivo je kako se prilikom zavarivanja sa metalnim praškom punjenom žicom postiže veća penetraciju, razlog tome je metalno punjenje jezgre koje zahtijeva veću gustoću energije kako bi se talio dodatni materijal. To uzrokuje i veću penetraciju zavara. Uz to prilikom zavarivanja metalnim prahom punjenim žicama ostvaruje se veći depozit materijala.

2.4.1.1. Označavanje praškom punjenih žica

Označavanje praškom punjenih žica propisano je standardima s obaveznom primjenom, i to posebno za pojedine vrste konstrukcijskih materijala. Osim standardnih oznaka koje su propisane ISO normom ili nekom drugom treba uzeti u obzir i oznake proizvođača. U katalogu od proizvođača date su oznake, sastav, mehanička svojstva, primjena i osnovne karakteristike elektroda. Na slici 12 prikazana je shema za označavanje praškom punjenih žica za zavarivanje nelegiranih i sitnozrnatih čelika sa zaštitom i bez zaštite plina prema normi HRN EN ISO 17362-A: 2008.



Slika 12. Shema za označavanje praškom punjenih žica [11]

2.4.1.2. Mehanička svojstva i kemijski sastav

Mehanička svojstva elektroda dana su u katalogu od strane proizvođača, koji garantira vrijednosti. Potrebno je odabrati žicu koja ima mehanička i kemijska svojstva ista ili približna svojstvima materijala koji se zavaruje. Kao primjer kako izgleda prikaz mehaničkih svojstava koji je dan od strane proizvođača uzeta je metalnim praškom punjena žica KX – 706M proizvođača Elektroda Zagreb. Prema normi HR EN ISO 17632-A naziv ove elektrode je T46 2 M M 4 H5. Iz ovog naziva može se zaključiti koja mehanička svojstva mora ispunjavati, kolika je temperatura prilikom ispitivanja udarnog rada loma, kemijski sastav, maksimalni sadržaj vodika, položaj u kojem je moguće zavarivati i zaštitni plin koji je potrebno koristiti. U tablici 4 prikazana su mehanička svojstva elektrode KX – 706M.

Tablica 4. Mehanička svojstva žice KX - 706M [11]

$R_{p0,2}$, N/mm ²	R_m , N/mm ²	A ₅ , %	KV (-20 °C), J
480	540	29	70

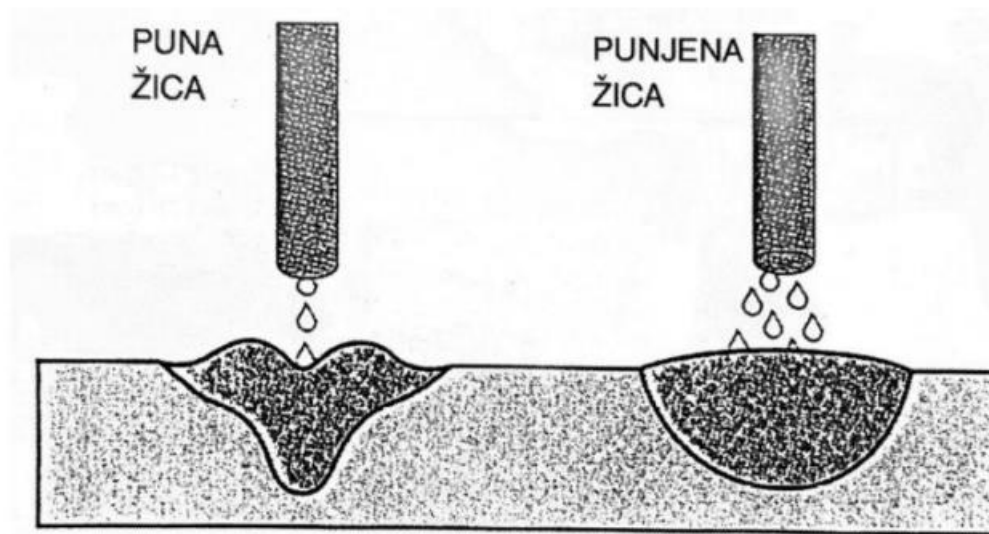
Iz tablice 5 vidljivo je kako su mehanička svojstva navedene žice unutar vrijednosti koje propisuje norma iz tablica na slici 12. Odnosno granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) iznosi 480 N/mm² što je više od minimalne vrijednosti koja iznosi 460 N/mm². Vlačna čvrstoća (R_m) iznosi 540 N/mm² što je unutar propisanih granica koje su 530 – 680 N/mm². Minimalni udarni rad loma prilikom ispitivanja pri -20 °C iznosi 70 što je više od zahtijevanih minimalno 47 J. Kemijski sastav također treba biti sličan materijalu koji se zavaruje. Ovisno o tome zavaruje li se nelegirani, niskolegirani ili visokolegirani čelik, bira se i žica s određenim kemijskim sastavom. Žica KX – 706M koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 490 N/mm². Primjenjuje se za zavarivanje u jednom ili više prolaza za sučeljeni ili kutni spoj u vodoravnom položaju. U tablici 5 prikazan je kemijski sastav žice KX – 706M.

Tablica 5. Kemijski sastav žice KX - 706M [11]

C	Si	Mn	P	S
0,04 %	0,60 %	1,50 %	0,014	0,010

2.4.1.3. Usporedba punih i praškom punjenih žica

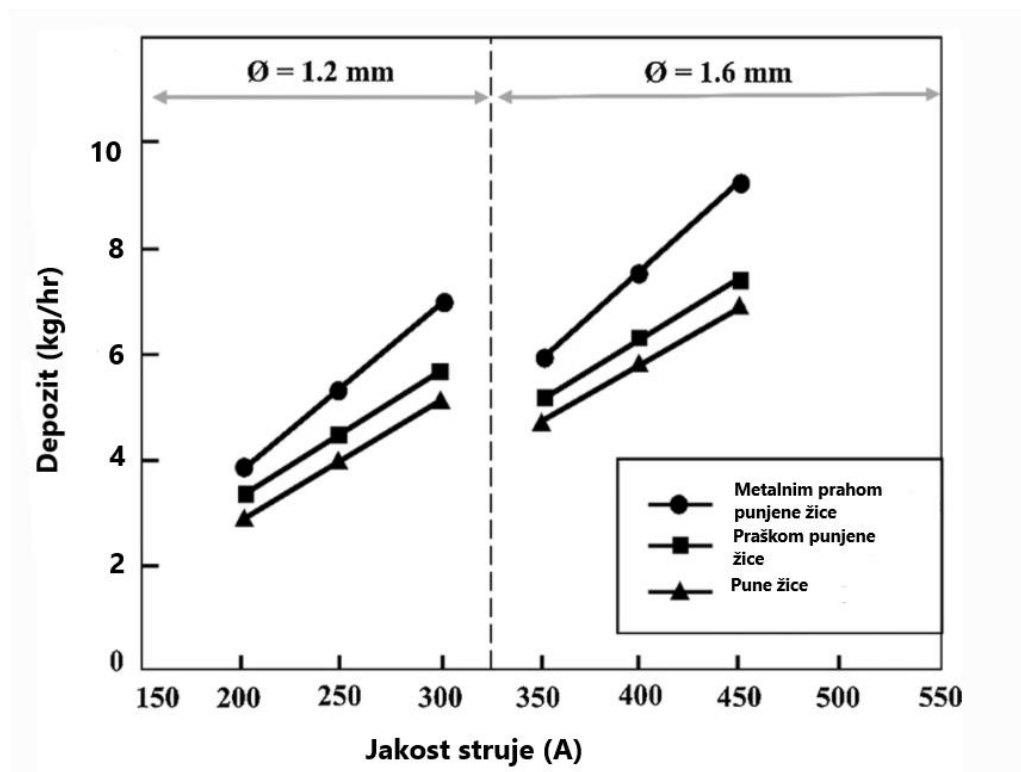
Kada se uspoređuje izgled zavora koji je napravljen praškom punjenom žicom i punom žicom vidi se kako je estetski vanjski izgled zavora koji je napravljen s praškom punjenom žicom puno bolji. Uz bolji izgled kao još jedna razlika je i smanjenje grešaka poput naljepljivanja ili nepravilnog vezivanja. Korištenjem praškom punjenih žica dobiva se veći depozit materijala kao i moguće veće brzine zavarivanja uz veću količinu taline. Slika 13 prikazuje razlike u profilu zavora i načinu prijenosa metala za punu i praškom punjenu žicu.



Slika 13. Razlika u prijenosu metala i izgledu zavora za punu i praškom punjenu žicu [7]

Kada se govori o velikom depozitu i učinkovitost depozita koju određena vrsta žica ima misli se na onu količinu dodatnog materijala koja se formirala u zavora, znači bez troske i dijela koji je otišao na rasprskavanje i ostale gubitke. Ovisno o promjeru žice i volumenu koji je potrebno popuniti prilikom zavarivanja kod praškom punjenih žica, zbog troske koja se stvara, učinkovitost je u rasponu od 84 – 89%. Kako se može reći da kod punih i metalnim praškom punjenih žica nema troske njihova učinkovitost je u rasponu od 95 – 98%, ovisno o načinu prijenosa materijala koji je korišten. Najveća učinkovitost dobiva se korištenjem štrcajućeg luka uz zaštitni plin koji ima veliki udio argona. Uz učinkovitost može se usporediti i sama količina depozita. Naime ta dva faktora govore o tome kolika je zapravo iskoristivost dodatnog

materijala. Praškom punjene žice skupa s metalnim prahom punjenim žicama imaju depozite koji se kreću između 5,4 – 6,4 kilograma po satu (kg/h) za žicu promjera 1,2 mm. Puna žica istog promjera daje manji depozit u iznosu od 3,6 – 4,5 kg/h. Iz ovog se zaključuje kako se metalnim prahom punjenim žicama i praškom punjenim žicama postižu veće brzine zavarivanja i povećava produktivnost, a razlog tome je količina i učinkovitost depozita koji se stvara kao i skoro pa neznatna količina troske. Slika 14 prikazuje usporedbu depozita prilikom korištenja metalnim prahom punjenih žica, praškom punjenih žica i punih žica pri određenoj jakosti struje zavarivanja. [12]



Slika 14. Shematski prikaz količine depozita pri različitim vrstama žice [12]

Kao što je već spomenuto automatizacijom i robotiziranim zavarivanjem ostvaruje se puni potencijal metalnim praškom punjenih žica. Puna žice kao i praškom punjene žice također se mogu automatizirati, no one nemaju mogućnost većeg broja prolaza pri velikim brzinama kao metalnim prahom punjene žice, a da pri tome ne dolazi do narušavanja mikrostrukture zavara, penetracije i ostalih karakteristika. Razlog toma je i jedna od najvećih prednosti metalnim prahom punjenih žica nad ostalim, a to je jako mala količina troske koja se stvara. Povećanje

brzine i mogućnost višestrukih prolaza bez čišćenja između prolaza smanjuje trošak zavarivanja.

Uz sve ove brojne prednosti nad ostalim žicama, naravno postoje i neki nedostaci. Kao jedan od nedostataka koji je već naveden su skupi troškovi opreme, kao i skuplja cijena same metalnim prahom punjene žice. Zbog skuplje cijene dodatnog materijala u samom startu metalnim prahom punjene žice često se smatraju preskupima, no kada se uzme u obzir da je trošak dodatnog materijala oko 10% ukupnog troška, dok je rad ljudi puno veći dio ukupnog troška (oko 85%) može se zaključiti kako se uz povećanu produktivnost i smanjenje potrebnog rada čovjeka dolazi do pozitivne računice koja ide u korist metalnim prahom punjenim žicama. Potrebno je pripremiti automatiziranu stanicu, isto tako imati operatere koji znaju programirati robote. Sve to treba uzeti u obzir kako bi se vidjelo isplati li se investicija, ovisno o količini posla koji će se raditi. Kao još jedan razlog zašto je dobro i poželjno koristiti robotiziranu stanicu je korištenje zaštitnog plina s visokim udjelom argona. Naime, takvi zaštitni plinovi stvaraju više topline, ali i veće količine zračenja. Svakako to zahtijeva korištenje pištolja na vodeno hlađenje kao i zaštitu od povećanog zračenja samog zavarivača. [12]

2.5. Parametri MAG postupka zavarivanja

Izbor parametara ključan je za kvalitetu zavarenog spoja. Potrebno je dobro poznavati parametre kako bi se promjenom i namještanjem istih došlo do optimalnih rezultata.

Izbor parametara povezan je s faktorima [13]:

- kemijski sastav i debljina osnovnog materijala
- kemijski sastav elektrode
- zahtjevanom kvalitetom zavarenog spoja

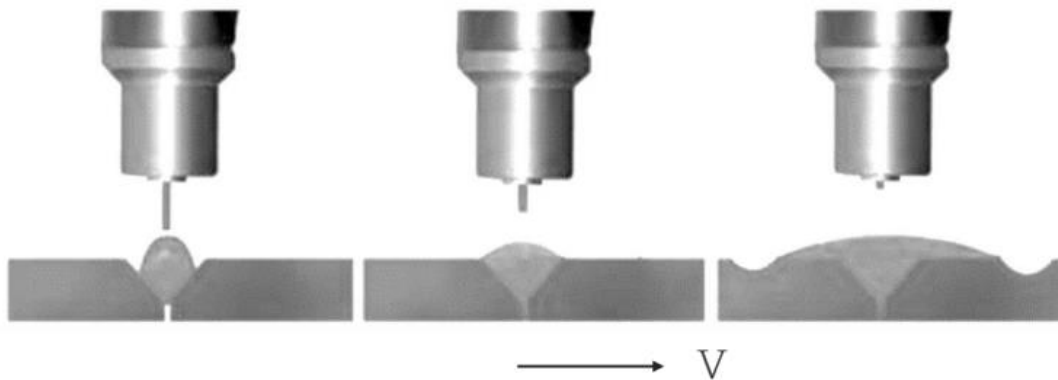
2.5.1. Jakost struje zavarivanja

Jakost struje vrlo je važan parametar i ona ovisi o brzini dovođenja žice. Jakost struje zavarivanja podešava se odabirom određene brzine dovođenja žice. Što je veća brzina dovođenja žice to je veća i jakost struje zavarivanja. Povećanje jakosti struje zavarivanja dovodi do nadvišenja zavara, veće penetracije, većeg koeficijenta topljenja i povećanja količine taline.

Prejaka struja dovest će do prskanja materijala. Jakost struje prilikom zavarivanja s metalnim prahom punjenom žicom kao i praškom punjenom žicom su veće nego prilikom zavarivanja punom žicom. Razlog tome je potrebna veća toplina kako bi se punjenje žice rastalilo kao i veći otpor zbog manje površine žice. [13]

2.5.2. Napon zavarivanja

Uz jakost struje, napon je najvažniji parametar o kojem ovisi kvaliteta zavarenog spoja. Vrijednost napona ovisi o duljini električnog luka. Što je veća duljina električnog luka, veći je i napon. Napon također utječe i na izgled zavora, naime prenizak napon daje uzak i ispupčen zavar dok previsok napon daje širok i zavar malog nadvišenja. Današnji uređaji za zavarivanje sami reguliraju odnos napona i jakosti struje, pa je potrebno ručno unijeti samo jedan od ova dva parametra. Slika 15 prikazuje utjecaj napona na profil zavora. [5]



Slika 15. Utjecaj napona na profil zavora [14]

2.5.3. Brzina zavarivanja

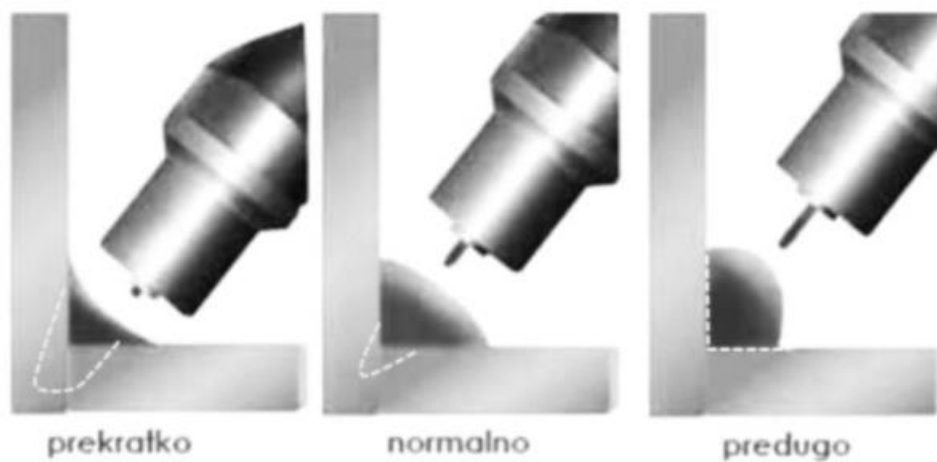
Kada se kaže brzina zavarivanja misli se na brzinu kojom električni luk pomiče po liniji koju je potrebno zavariti. Ona ovisi o jakosti struje, ali i o položaju zavarivanja. Promjenom brzine zavarivanja utječe se na dubinu, širinu i visinu zavora. Odnosno povećanjem brzine smanjuje se profil zavora, količina taline i penetracija u radni komad, a to je prikazano na slici 16.



Slika 16. Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zavara [14]

2.5.4. Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice računa se od kraja kontaktne vodilice do vrha žice. Kao što je već spomenuto samo taj dio žice, odnosno elektrode je u strujnom krugu. To dovodi do toga da što je veći slobodni kraj žice, veći je otpor odnosno struja zavarivanja je manja i obrnuto. Kako ne bi došlo do takvih promjena u parametrima, potrebno je održavati slobodni kraj žice konstantnim. Na slici 17 prikazano je kako slobodni kraj žice utječe na profil zavara. [14]



Slika 17. Utjecaj slobodnog kraja žice na profil zavara [14]

2.5.5. Induktivitet

Induktivitet je parametar kojim se opisuje brzina porasta jakosti struje u vremenu nakon ostvarivanja kratkog spoja. Ovaj parametar koristi se samo kod zavarivanja s načinom prijenosa

metala kratkim spojevima. Njegova svrha je podešavanje radi efikasnijeg prijenosa materijala. On također utječe i na izgled zavara. [15]

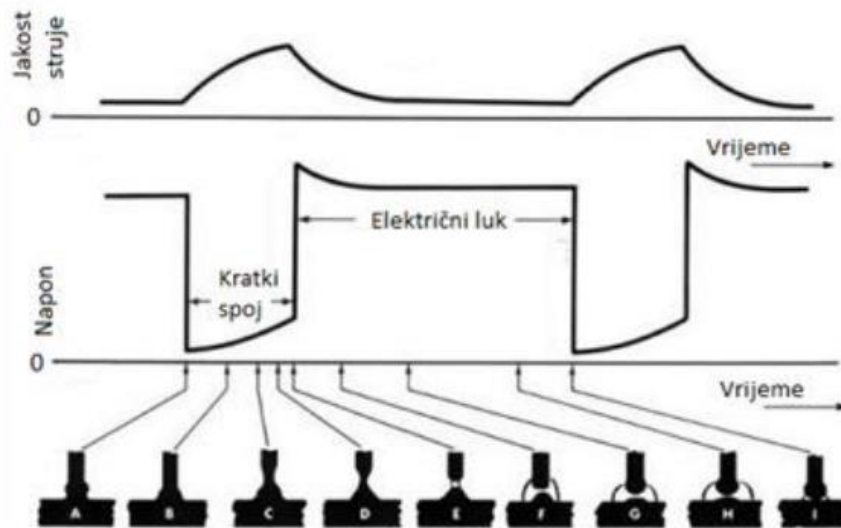
2.6. Način prijenosa metala

Prijenos metala je proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavara. Dobro poznavanje samog procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se odabrali parametri i postigla optimalna svojstva zavarenog spoja. Prilikom MAG postupka zavarivanja način prijenosa metala ovisi o polaritetu struje, jakosti struje zavarivanja, naponu zavarivanja, vrsti zaštitnog plina, kemijskom sastavu žice, te karakteristikama izvora struje za zavarivanje. Sukladno tome prijenos metala može biti prirodni i kontrolirani [5]:

- kratkim spojevima
- štrcajući luk
- mješoviti ili prijelazni luk
- impulsni luk – kontrolirani prijenos metala

2.6.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Ovo je jedan od prirodnih načina prijenosa metala kod MAG postupka zavarivanja. Kod ovog prijenosa koriste se male struje zavarivanja, ovisno o promjeru žice, i iznose od 50 – 170 A. Uz male struje niski su i naponi koji iznose od 13 – 21 V. Zbog male količine rastaljenog metala ovaj način prijenosa pogodan je za zavarivanje tankih limova, korijenskog zavara i za zavarivanje u prisilnim položajima. Na slici 18 prikazan je princip prijenosa metala kratkim spojevima u pojedinim fazama. [1,16]



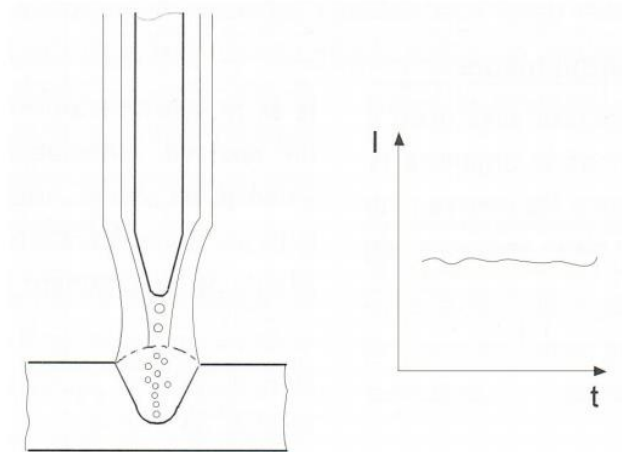
Slika 18. Prikaz prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [16]

Kao što je vidljivo iz slike 18 ovaj postupak se sastoji od dvije faze. Kratki spoj nastane kada elektroda dotakne radni komad. U tom trenutku napon pada na nulu, a struja počinje eksponencijalno rasti. Brzina rasta struje ograničena je induktivnim otporima kruga. Samim povećavanjem struje dolazi do povećanog zagrijavanja slobodnog kraja žice i povećava se pinch – efekt. On dovodi do smanjena presjeka žice i otkidanja zagrijanog vrha žice. Tada se kratki spoj prekida i električni luk uspostavlja. Sve ovo se odvija dok se elektroda jednolikom brzinom giba prema radnom komadu. Kada žica ponovno premosti razmak nastao otkidanjem vrha, ponavlja se ciklus od faze A. Broj ciklusa u sekundi iznosi od 100 – 200 kratkih spojeva, ako su parametri stabilni. Ovaj način rada se može prepoznati po pucketanju prilikom rada ako su parametri dobro odabrani. Glavni nedostatak ovog načina prijenosa materijala je veliko štrcanje. [1]

2.6.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prilikom ovog prijenosa metala ne dolazi do dodira elektrode i osnovnog materijala, već kapljice slobodnim letom kroz zaštitnu atmosferu idu prema osnovnom materijalu. Kako bi se kapljice odvojile i krenule prema osnovnom materijalu potrebna je jaka struja zavarivanja od 200 – 600 A, kao i visoki napon od 24 – 40 V. Zbog ovako velikih iznosa parametara ovaj

prijenos metala ima dosta veliki unos topline i veliku količinu rastaljenog materijala pa se koristi za zavarivanje debljih radnih komada u vodoravnom položaju. Prednosti ovog načina su već spomenuti depozit, velika penetracija, mogućnost korištenja većih promjera žica i mala količina prskanja. Nedostaci su mogućnost pregaranja tanjih materijala, opasnost od curenja taline u prisilnim položajima. Slika 19 prikazuje prijenos metala štrcajućim lukom kod MAG postupka zavarivanja dok na grafu možemo vidjeti kako se električni luk stalno održava. [1,16]



Slika 19. Prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom kod MAG postupka zavarivanja [1]

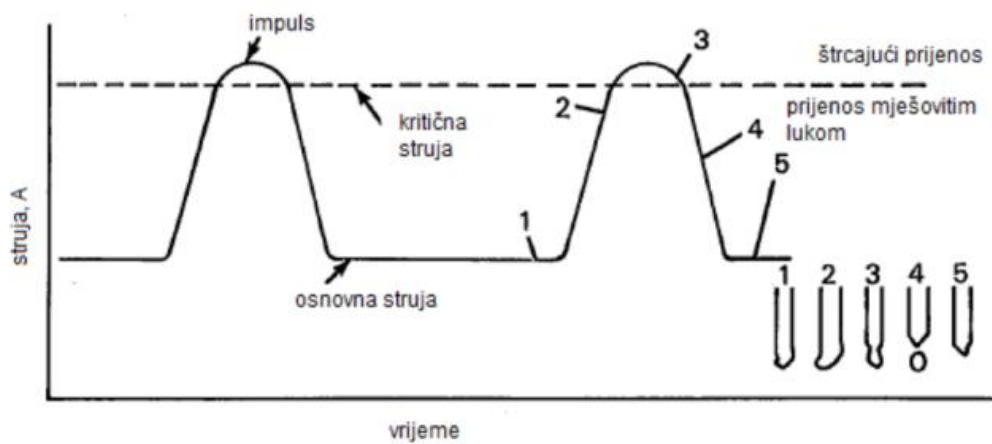
2.6.3. Prijenos metala prijelaznim lukom

Kod ovog načina prijenosa metala pojavljuje se prijenos štrcajućim lukom uz povremeno i nepredvidljivo javljanje kratkih spojeva. To povremeno i nepredvidljivo javljanje predstavlja veliki nedostatak u vidu štrcanja materijala. To je razlog zašto se ovaj postupak izbjegava u praksi. Ovisno o promjeru žice do ovakvog načina prijenosa metala može doći pri strujama od 170 – 235 A i naponu od 17 – 22 V. [5]

2.6.4. Prijenos metala impulsnim strujama

Kod kontroliranog prijenosa metala impulsnim strujama zadržavaju se prednosti, a otklanjaju mane koje ima prijenos metala štrcajućim lukom. Naime, kod ovog načina prijenosa metala struja varira između određene kritične struje (I_{kr}) i minimalne/osnovne struje (I_0). Osnovna

struja ima ulogu održavanja električnog luka, dok duljina trajanja i visina impulsa kritične struje služi kako bi se kontrolirano odvojila kapljica dodatnog materijala. Ti impulsi koji se izmjenjuju mogu biti sinusnog, trokutnog i četvrtastog oblika. Najpovoljniji je četvrtasti oblik koji je prikazan na slici 20. Ovaj način prijenosa metala moguće je koristiti u svim položajima, kao i za materijale koji su osjetljivi na količinu unesene topline. Pošto je moguće koristiti male prosječne struje, moguće je jednom žicom zavariti širi raspon debljina materijala.



Slika 20. Prikaz prijenosa metala impulsnim strujama [4]

3. KONSTRUKCIJSKI ČELIK

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ($\leq 2\% C$) uz prisutne pratioce (Si, Mn) i nečistoće (P, S i ostali). Uz navedeno može kao dodatak imati jedan ili više legiranih elemenata kako bi se postigla određena svojstva. Nakon lijevanja taljevine u kalupe (kokile), čelici se oblikuju postupcima deformiranja (valjanje, prešanje i sl.) u određeni oblik (limovi, trake, šipke, cijevi i sl.). Čelik je najvažniji tehnički materijal u proizvodnji i primjeni. Razlog tome je što čelik u primjeni ima dobru kombinaciju svojstava kao što su čvrstoća, žilavost, rezljivost, spojivost i druga. Također moguće je prilagođavati svojstva korištenjem pojedinih legura, toplinskom obradom i obradom deformiranjem. Uz sve to ima relativno malu cijenu. [17]

Konstruktivni čelici se primjenjuju za izradu konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja koji obavljaju funkcije poput prijenosa gibanja, preuzimanja sila, spajanja elemenata konstrukcija i sl. Od njih se izrađuju osovine, vratila, zupčanici, opruge, vijci i ostali slični proizvodi. Na temelju svega navedenog i raznovrsne primjene od konstrukcijskih čelika se zahtjevaju određena svojstva a to su [17]:

- **MEHANIČKA SVOJSTVA:** visoka granica razvlačenja, dovoljna plastična deformabilnost, visoka granica puzanja i čvrstoća prilikom povišenih temperatura, dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama i dovoljna dinamička izdržljivost;
- **OTPORNOST NA TROŠENJE:** što manja promjena stanja površine prilikom međusobnog djelovanja dijelova;
- **OTPORNOST NA KOROZIJU:** otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama, korozivna postojanost u različitim okruženjima;
- **TEHNOLOŠKA SVOJSTVA:** obradljivost različitim postupcima, zavarljivost, hladna oblikovljivost.

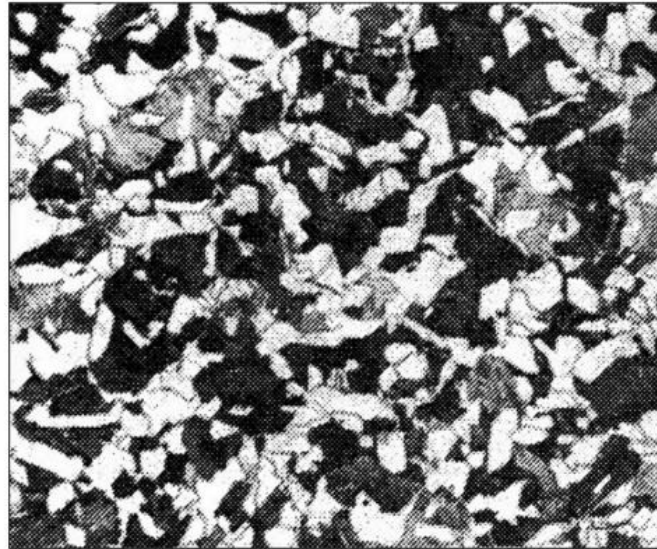
3.1. Opći konstrukcijski čelici

Opći konstrukcijski čelici su jedna od mnogobrojnih podskupina konstrukcijskih čelika. Može ih se podijeliti u dvije skupine a to su opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije i čelici za strojogradnju. Razlog velikog broja skupa i podskupina čelika je velika raznovrsnost u

svojstvima koja su tražena za određene primjene. Stoga je potrebno dobro poznavati vrste i skupine čelika kako bi se mogla optimizirati njihova primjena ovisno o traženim svojstvima. U proizvodnji opći konstrukcijski čelici su najzastupljeniji (65 – 80% mase), ali i u primjeni za konstrukcije kao što su mostovi, brodske konstrukcije, u industriji nafte i plina i brojne druge stvari. [17]

3.1.1 Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije

Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije su nelegirani čelici sa feritno-perlitnom mikrostrukturom čiji kemijski sastav nije propisan. Kao što i samo ime kaže, ovi čelici zbog svoje primjene moraju imati dovoljnu nosivost a samim time i sigurnost. To se ostvaruje postizanjem dovoljne granice razvlačenja (R_e), vlačnom čvrstoćom (R_m), savojnom čvrstoćom (R_{ms}), smičnom čvrstoćom (R_{mu}) i žilavošću (udarni rad loma). Uz sva nabrojena svojstva još je važna i zavarljivost kako bi se konstrukcije mogle napraviti, kao i hladna oblikovljivost. Uvjet dobre zavarljivosti je što manja vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_e . Zavarljivost će biti bolja što je postotak ugljika manji i što je manji stupanj legiranosti. Prihvatljiva vrijednost je $C_e < 0,4$. Čelici koji imaju veći C_e moraju se predgrijavati, a tim se postiže sporije hlađenje nakon zavarivanja. Ova skupina čelika zbog već spomenutog kemijskog sastava koji nije definiran, nehomogenosti u mikrostrukтури i višeg masenog udjela nečistoća nije predviđena za toplinsku obradu. Slika 21 prikazuje feritno-perlitnu mikrostrukтуру općeg konstrukcijskog čelika.



Slika 21. Prikaz feritno-perlitne mikrostrukture općeg konstrukcijskog čelika [18]

Kod općih konstrukcijskih čelika za nosive konstrukcije osigurana su mehanička svojstva. Ova svojstva za cijelu skupinu kreću se u rasponima od [17]:

- $R_e = 190 - 370 \text{ N/mm}^2$
- $R_m = 330 - 700 \text{ N/mm}^2$
- $A_5 = 10 - 28\%$

Granica razvlačenja R_e ovisi o debljini materijala, a vrijednosti su veće što je viši maseni udio ugljika i viši udio perlita u mikrostrukтури. Dodatkom mangana (Mn) i silicija (Si) postiže se viša čvrstoća. Prilikom dodavanja mangana treba paziti da njegov udio ne premaši 1,65% jer se onda povisuje prokaljivost i opasnost od spontanog zakaljivanja pri zavarivanju. Viši omjer mangana i ugljika daje veću žilavost i to posebno pri niskim temperaturama. Viši maseni udio mangana poviseuje prokaljivost i opasnost od spontanog zakaljivanja pri zavarivanju.

Podskupine općih konstrukcijskih čelika za nosive konstrukcije su [17]:

- S185 – nema zajamčena svojstva, za niskopterećene dijelove i za armirano-betonske konstrukcije.
- S235JRG1, S235JRG2 – koristi se za statički manje opterećene konstrukcije, ovi čelici su slabije zavarljivi.

- S275JRG2, S355JRG2 – imaju zajamčen udarni rad loma pri +20 °C, primjenjuje se za tlačno i savojno opterećene konstrukcije.
- S275J0G3, S355J0G3 – imaju zajamčen udarni rad loma pri 0 °C, primjenjuje se za statički i dinamički opterećene zavarene konstrukcije.
- S275J2G3, S355J2G3 – imaju zajamčen udarni rad loma od 27 J pri -20 °C pa su čelici otporni na krhki lom, primjenjuje se za statički i dinamički opterećene konstrukcije pri nižim temperaturama.

Slika 22 prikazuje shemu za označavanje konstrukcijskih čelika.

Konstrukcijski čelici							
Glavna oznaka		Dodatne oznake za			Dodatne oznake za		
G S n n n		an			+an +an		
Glavne oznake		Dodatne oznake					
slovo	mehaničko svojstvo	za čelik				za čelični proizvod	
G = čelični lijev (gdje je potrebno)	nnn = min granica razvlačenja (R_e), N/mm ² za područje najmanjih debljina	grupa 1 ²⁾			grupa 2 ³⁾		
		Udarni rad loma, J			Ispit. temp. °C		
S = konstrukcijski čelik		27 J	40 J	60 J	20	C = posebno hladno obradljivo	tablice 16, 17, 18
		JR	KR	LR	0	D = za prevlake vrućim uranjanjem	
		J0	K0	L0	-20	E = za emajliranje	
		J2	K2	L2	-30	F = za kovanje	
		J3	K3	L3	-40	H = šuplji profili	
		J4	K4	L4	-50	L = za snižene temperature	
		J5	K5	L5	-60	M = termomehanički valjano	
		J6	K6	L6		N = normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano	
						O = Offshore	
						P = za žmurje	
						Q = poboljšano	
						S = za brodogradnju	
						T = za cijevi	
				W = otporan na atmosferilije			
				an = znakovi propisanih dodatnih kemijskih elemenata, npr. Cu, ako je potrebno zajedno s jednoznačnim brojem koji je 10 × srednja vrijednost (zaokružena na 0,1 %) propisanog područja masenog udjela tog elementa			

1) n = brojevi znak, a = abecedni znak, an = abecedno brojevi znak (alfanumerički) znak

2) Oznake A, M, N i Q u grupi 1 vrijede za sitnozrnate čelike

3) Oznake grupe 2, osim kemijskih znakova, mogu biti upotrijebljene s jednom ili dvije brojke u svrhu razlikovanja kvalitete prema pripadajućoj normi za proizvod

Slika 22. Shema za označavanje konstrukcijskih čelika [17]

3.1.2. Opći konstrukcijski čelici za strojogradnju

Ovi čelici su slabije zavarljivi zato što imaju viši masneni udio ugljika, imaju višu čvrstoću od općih konstrukcijskih čelika ($500 - 700 \text{ N/mm}^2$), ali i nižu istezljivosti (10 – 20%). Bez obzira na viši udio ugljika, nisu namijenjeni za kaljenje. Primjenjuju se za strojne dijelove koji se gibaju kao što su osovine, vretena, zupčanici, ali i za zatike, klinove, poluge i slične stvari. Prema normama nemaju zahtjeva na zavarljivost i žilavost. Osnovna znaka sastoji se od slova „E“ i troznamenkastog broja koji označuje kolika je minimalna granica razvlačenja (R_e) za područje najmanjih debljina. Primjeri označavanja čelika za strojogradnju [17]:

- E295 – ima oko 0,3 %C, višu istezljivost, ali nižu čvrstoću;
- E335 – ima oko 0,4 %C;
- E360 – ima oko 0,5 %C, nižu istezljivost, ali višu čvrstoću.

4. EKSPERIMENTALNI RAD

Zadatak eksperimentalnog dijela rada bio je osmisliti plan pokusa i definirati odgovarajuću tehnologiju za zavarivanje kutnog spoja metalnim prahom punjenom žicom uz primjenu trokomponentnih Ar-CO₂-O₂ zaštitnih plinskih mješavina. Kako bi imali što bolju usporedbu rezultata, provedeno je dodatno ispitivanje prilikom kojeg je korištena i dvokomponentna mješavina zaštitnog plina Ar – CO₂. Materijal koji je korišten u eksperimentu je konstrukcijski čelik, prema normi EN 10025 to je čelik S235. Kako ove mješavine prvenstveno i jesu za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika. Kako bi dobili rezultate kojima se može utvrditi zaključak o opravdanosti primjene trokomponentne zaštitne mješavine odlučeno je kako će se napraviti sedam uzoraka od kojih će se tri uzorka zavarivati punom žicom dok će se druga tri uzorka zavarivati metalnim prahom punjenom žicom koristeći iste plinove. Još jedan, sedmi uzorak zavarit će se metalnim prahom punjenom žicom, ali impulsnim MAG zavarivanjem. Nakon zavarivanja uzorci su izrezani i pripremljeni su makroizbrusci te je analizirana makrostruktura. Kao izvor struje zavarivanja korišten je Daihen Varstroj Welbee P400 kao i automat za vođenje pištolja „BUG – O MDS 1002“. Rezultati kao i korišteni parametri prikazani i objašnjeni su dalje u radu.

4.1. Oprema za zavarivanje

Korišteni izvor struje za zavarivanje je WB – P400 koji proizvodi tvrtka Daihen Varstroj. Ovaj uređaj predstavlja jednu od novijih generacija izvora struje za MAG zavarivanje. Ovaj inverterski izvor struje s Welbee mikroprocesorom nudi velik broj prednosti prilikom automatiziranog kao i ručnog zavarivanja. Pogodan je za zavarivanje čeličnih i korozijski postojanih materijala, te daje vrlo dobru stabilnost električnog luka i u području velikih brzina zavarivanja. Ovisno o tipu osnovnog materijala ima mogućnost visokokvalitetnog impulsnog zavarivanja. Na slici 22 prikazan je Daihen Varstroj WB – 400.



Slika 23. Daihen Varstroj WB 400 [19]

U tablici 6 su prikazane neke tehničke karakteristike korištenog izvora struje.

Tablica 6. Tehničke karakteristike izvora Daihen Varstroj WB 400 [20]

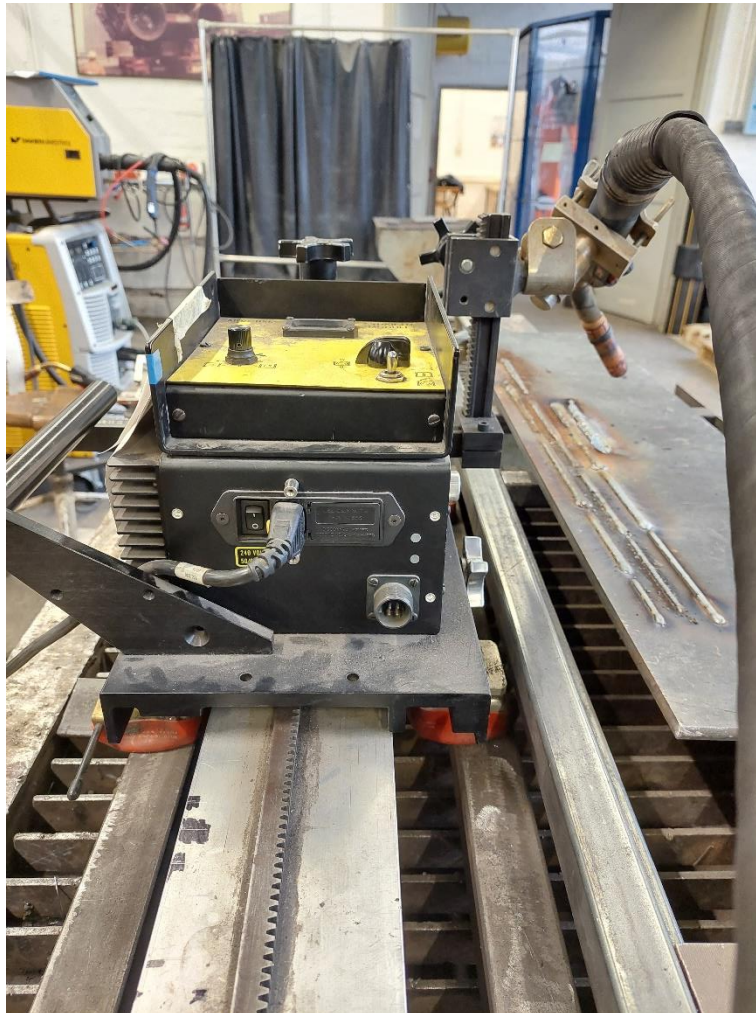
Nazivna frekvencija	50/60 Hz
Priključni napon	400 V (+/- 15 %)
Nazivna izlazna struja	400 A
Nazivni izlazni napon	34 V
Raspon struje zavarivanja	30 – 400 A
Raspon napona zavarivanja	12 – 34 V
Maksimalni izlazni napon	80 V
Intermitencija	400 A = 50 %
	370 A = 100 %
Radna temperatura	-10 do 40 °C
Dimenzije	395 x 710 x 592 mm
Masa	62 kg
Statička karakteristika	Konstantna naponska karakteristika

Na slici 24 prikazano je sučelje korištenog izvora struje za zavarivanje. Pomoću tog sučelja namještaju se parametri kojim će se provoditi postupak zavarivanja, u ovom slučaju radilo se o kutnom spoju dva lima od čelika S 235. Kako je vidljivo iz slike 24 namješten je promjer žice za zavarivanje koji iznosi 1,2 mm kao i kvalitetu materijala odnosno vrstu žice kojom se zavaruje. Mild steel označava konvencionalnu punu žicu koja je korištena na uzorcima jedan (U1), tri (U3) i pet (U5). Ovaj uređaj ima mogućnost automatskog generiranja sinergijskih strujnih krivulja ovisno o tome o kojoj je mješavini zaštitnog plina riječ. Za navedene uzorke odabran je mod od 20% CO₂ kako je to najbliže korištenoj plinskoj mješavini koja sadržava 18% CO₂. Uz sve navedeno na uređaju je još i namještena jakost struje koja iznosi 250 A prilikom čega uređaj sam sebi prilagođava napon. Brzina zavarivanja podešena je na uređaju za vođenje pištolja.



Slika 24. Korisničko sučelje uređaja Daihen Varstroj WB – 400

Prilikom promjene mješavine zaštitnog plina u trokomponentnu mješavinu promijenjen je i mod plina kako bi uređaj promijenio sinergijsku krivulju. Odabran je MAG (10% CO₂) zato što je to najbliži postotak CO₂ koji ima korišteni zaštitni plin. Također kako je prilikom zavarivanja uzoraka dva (U2), četiri (U4), šest (U6) i sedam (U7) korištena metalnim prahom punjena žica promjera 1,2 mm, promijenjena je i kvaliteta materijala u mild steel cored. Kako bi se dobili što pouzdaniji rezultati u eksperimentu je korišten automat za vođenje pištolja „BUG – O MDS 1002“. Korištenjem ovog uređaja omogućena je konstantna brzina vođenja pištolja kao i konstantno odstojanje slobodnog kraja žice od 18 mm. Brzina zavarivanja za uzorke U1, U3 i U5 iznosi 34 cm/min, dok je za uzorke U2, U4, U6 i U7 brzina zavarivanja namještena na 40 cm/min. Uređaj za zavarivanje prikazan je na slici 25.



Slika 25. Uređaj za vođenje pištolja "BUG - O MDS 1002"

4.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal prilikom zavarivanja uzoraka korišten je čelik oznake S235. Ovaj čelik spada u skupinu niskougličnih nelegiranih konstrukcijskih čelika. Sadrži nizak udio ugljika, te se ovaj čelik relativno lako zavaruje i nije sklon nastajanju grešaka u metalu zavara. Zbog niske cijene i dobre zavarljivosti često se koristi u građevinskoj, proizvodnoj i brodogradilišnoj industriji. Isporučuje se hladno valjan u pločama lima, profilima i cijevima različitih duljina. Debljina radnih komada kod svih uzoraka iznosi 10 milimetara. Tablica 7 prikazuje kemijski sastav čelika S235, a tablica 8 prikazuje vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće.

Tablica 7. Kemijski sastav čelika S235 [20]

Čelik	C, %	Mn, %	P, %	S, %	Si, %
S235	0,22	1,60	0,05	0,05	0,05

Tablica 8. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za čelik S235 [20]

Čelik	Granica razvlačenja – R_e , N/mm ²	Vlačna čvrstoća - R_m , N/mm ²
S235	235	360 - 510

4.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal u eksperimentalnom radu korištene su različite vrste elektrodnih žica. Prilikom zavarivanja uzoraka U1, U3 i U5 korištena je puna elektrodna žica promjera 1,2 mm, proizvođača Elektroda Zagreb d.d. Trgovačko ime navedene elektrode je EZ – SG 2. Karakteristike korištenog dodatnog materijala prikazane su na slici 26.

EZ - SG 2

NORME			
HRN EN ISO	AWS / ASME	DIN	W. Nr.
14341-A	SFA-5.18	8559	
G 42 4 C/M 3Si1	ER70S-6	SG 2	1.5125

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE			
Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO ₂ ili mješavine plinova Ar/CO ₂ . Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm ² .			
Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstruktivski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204 Č 3133 Č 3105	HI (1.0345) HII (1.0425) 17Mn4 (1.0461) 16Mn6 (1.0473)	P235GH P265GH P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) SIE 210.7 (1.0307) do SIE 360.7 (1.0582)	D955D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Slitnoznači čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	SIE 285 (1.0486) SIE 355 (1.0562) WSE 285 (1.0487) WSE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični ljev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-62 (1.0551)	C18D do S355JRC



MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA			
R _m N/mm ²	R _{eH} N/mm ²	A ₅ %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE			
	C	Mn	Si
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0

ZAŠTITNI PLIN	
C1 ili M21	


PAKIRANJE	
Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)
1 kg - plastični kotul (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)	
5 kg - plastični kotul (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)	
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kotul (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)	
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)	

ODOBRENJA	
ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TUV	

Slika 26. Dodatni materijal - puna žica [21]

Kao dodatni materijal za zavarivanje uzoraka U2, U4, U6 i U7 korištena je metalnim prahom punjena žica promjera 1,2 mm trgovačkog naziva KX – 706M. Karakteristike ovog dodatnog materijala dane su na slici 27.

KX - 706M					
NORME					
HRN EN ISO 17632-A	AWS / ASME SFA-5.18				
T46 2 M M 4 H5	E70C-6M				
SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE					
Metalom punjena žica za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 490 N/mm ² . Značajka ove žice jest dobra penetracija, visoka otpornost nastanku poroziteta, dobro razljevanje taline metala zavara te nizak udio vodika u metalu zavara. Žica se primjenjuje za zavarivanje u jednom i više prolaza.					
MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA					
R _m N/mm ²	R _{eH} N/mm ²	A ₅ %	KV (-20°C) J		
480	540	29	70		
ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ČISTOG METALA ZAVARA					
	C	Si	Mn	P	S
%	0,04	0,60	1,50	≤ 0,014	≤ 0,010
ZAŠTITNI PLIN					
M21 (Ar + 18%CO ₂) protok 15 - 25 l/min					
PARAMETRI ZAVARIVANJA					
Promjer žice mm	Jakost struje A	Napon el. luka V	Polarnost		
1,2	160 - 340	24 - 32	DCEP (DC+)		
PAKIRANJE					
Promjer žice mm	Namotaj	Težina kg			
1,2	Žica do žice (S-S)	5; 15			
ODOBRENJA					
ABS (3YSA); BV (3S3YS); DNV (III YMS); GL (3YS); LR (3YS)					
					

Slika 27. Karakteristike metalnim prahom punjene žice [21]

4.4. Zaštitne plinske mješavine

Kako bi se mogli donijeti zaključci o opravdanosti primjene trokomponentne zaštitne mješavine pri zavarivanju metalnim prahom punjenom žicom u realnoj industrijskoj proizvodnji pri usporedbi s konvencionalnom punom žicom, korištene su dvije mješavine zaštitnog plina. Uzorci U1 i U2 zavarivani su s dvokomponentnom mješavinom Ar – CO₂ u omjeru 82% Ar – 18% CO₂. Korišten je plin proizvođača Messer pod nazivom Ferroline C18. Ostali uzorci zavarivani su uz korištenje trokomponentne mješavine zaštitnog plina Ar – O₂ – CO₂ u omjeru 93% Ar – 1% O₂ – 6% CO₂ i 86% Ar – 2% O₂ – 12% CO₂. Korišteni su plinovi proizvođača Messer pod nazivom Ferroline C6X1 i Ferroline C12X2. Prema normi HRN EN ISO 14175:2008 koja govori o dodatnom i potrošnom materijalu za zavarivanje, ove plinske mješavine imaju oznaku M21 i M24. Protok plina prilikom zavarivanja svih uzoraka bio je 18 l/min. U tablici 9 su prikazani zaštitni plinovi koji su korišteni u eksperimentalnom dijelu.

Tablica 9. Zaštitni plinovi korišteni u eksperimentu [7]

Naziv proizvoda	Grupa po HRN EN ISO 14175	Volumni udio, %			Postupak prema HRN EN 14610	Primjena
		Ar	O ₂	CO ₂		
Ferroline C18	M21	82	-	18	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ferroline C6X1	M24	93	1	6	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici
Ferroline C12X2	M24	86	2	12	MAGM	Nelegirani i niskolegirani čelici

4.5. Proces zavarivanja

Kao osnovni materijal u postupku zavarivanja korišten je opći konstrukcijski čelik u kvaliteti S235. Položaj zavarivanja prema HRN EN ISO 6947:2011 je PB, odnosno horizontalno vertikalni položaj, spoj je kutni. Tehnika zavarivanja je neutralna tehnika. Parametri zavarivanja (jakost struje, protok plina, slobodni kraj žice) konstantni su prilikom zavarivanja svih uzoraka. Oni su konstantni kako bi se što bolje učio i analizirao utjecaj promjene dodatnog materijala i smjese zaštitnog plina prilikom zavarivanja. Povećana je brzina zavarivanja i brzina dodavanja žice kod zavarivanja s metalnim prahom punjenom žicom. Brzina dodavanja žice prilikom zavarivanja uzoraka s konvencionalnom punom žicom iznosila je 7,9 m/min, dok je brzina zavarivanja iznosila 34 cm/min. Promjenom moda dodatnog materijala na izvoru struje za zavarivanje promijenila se i brzina dodavanja žice i iznosi 10,4 m/min. Prilikom iste brzine zavarivanja luk je postao nestabilan zbog velike količine taline koja se stvarala, stoga je bilo potrebno povećati brzinu zavarivanja na 40 cm/min. U tablici 10 su prikazane oznake uzoraka te zaštitna plinska mješavina koja je korištena prilikom zavarivanja pojedinog uzorka.

Tablica 10. Tablica oznaka uzoraka i korištenih zaštitnih plinskih mješavina

Oznaka uzorka Plinska zaštita	U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7
	Ferroline C18	x	x				
Ferroline C6X1			x	x			
Ferroline C12X2					x	x	

Oznake u tablici 10 predstavljaju:

- U1 – zavareni spoj izveden pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine Ferroline C18 punom žicom EZ – SG 2

- U2 – zavareni spoj izveden pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine Ferroline C18 metalnim praškom punjenom žicom KX – 706M
- U3 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine Ferroline C6X1 punom žicom EZ – SG 2
- U4 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine Ferroline C6X1 metalnim praškom punjenom žicom KX – 706M
- U5 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine Ferroline C12X2 punom žicom EZ – SG 2
- U6 – zavareni spoj izveden pod zaštitom trokomponentne plinske mješavine Ferroline C12X2 metalnim praškom punjenom žicom KX – 706M
- U7 – zavareni spoj izveden pod zaštitom dvokomponentne plinske mješavine Ferroline C18 metalnim praškom punjenom žicom KX – 706M impulsnom metodom prijenosa metala

4.5.1. Parametri zavarivanja

Tijekom procesa zavarivanja izmjereni i praćeni su sljedeći parametri:

- struja zavarivanja [A]
- napon [U]
- protok plina [l/min]
- slobodni kraj žice [mm]
- brzina dodavanja žice [m/min]
- unos topline [kJ/cm]
- brzina zavarivanja [cm/min]

Unos topline izračunat je prema izrazu za unos topline pri zavarivanja:

$$Q = \frac{U * I * 60}{v * 1000} * \eta \text{ [kJ/cm]} \quad (1)$$

Gdje je:

Q – unesena toplina, kJ/cm

U – napon zavarivanja, U

I – jakost struje zavarivanja, A

v – brzina zavarivanja, cm/min

η – stupanj iskorištenja koji ovisi o postupku zavarivanja [MAG – 0,8]

Tablica 11. Parametri zavarivanja za pojedini uzorak

Parametri	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6	Uzorak 7
Zaštitni plin	Ferroline C18	Ferroline C18	Ferroline C6x1	Ferroline C6x1	Ferroline C12x2	Ferroline C12x2	Ferroline C18
Brzina zavarivanja [cm/min]	34	40	34	40	34	40	40
Nominalna jakost struje [A]	250	250	250	250	250	250	250
Radna jakost struje [A]	233	269	235	267	240	254	259
Radni napon [V]	23,1	24,1	22,9	23,9	23,2	24,5	29
Unos topline [kJ/cm]	7,59	7,78	7,59	7,66	7,86	7,47	9,01
Brzina dobavljanja žice [m/min]	7,9	10,4	7,9	10,4	7,9	10,4	7,9

U tablici 11 prikazani su parametri kojima su zavarivani pojedini uzorci. Može se primijetiti kako su parametri vrlo slični, razlike u radnoj jakosti struje, radnom naponu i unosu topline su poprilično male i nema velikog odstupanja. Protok plina prilikom zavarivanja svih uzoraka iznosio je 18 l/min, a slobodni kraj žice iznosio je 18 milimetara. Najveća razlika je u brzini

dobavljanja žice i brzini zavarivanja, one su se povećale prilikom promjene moda rada izvora struje na mod za praškom punjene žice. Naime, prilikom pokušaja zavarivanja metalnim prahom punom žicom uz zaštitnu mješavinu trokomponentnog plina došlo je do nestabilnog luka zbog velike količine taline i male brzine zavarivanja za toliki depozit materijala. Stoga je povećana brzina zavarivanja s 34 cm/min na 40 cm/min. Brzina zavarivanja nije još više povećavana zbog toga što je ciljana visina zavara bila a5 odnosno 5 milimetara uz dopuštena mala pozitivna odstupanja. Na slikama 28 – 34 prikazan je izgled zavara svih uzoraka koji su daljnje analizirani.



Slika 28. Izgled zavara uzorka 1



Slika 29. Izgled zavara uzorka 2



Slika 30. Izgled zavara uzorka 3



Slika 31. Izgled zavara uzorka 4



Slika 32. Izgled zavora uzorka 5



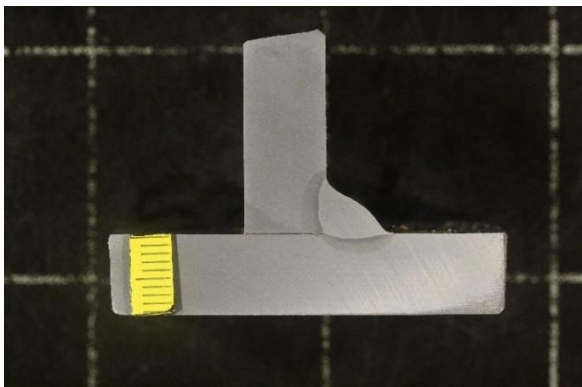
Slika 33. Izgled zavora uzorka 6



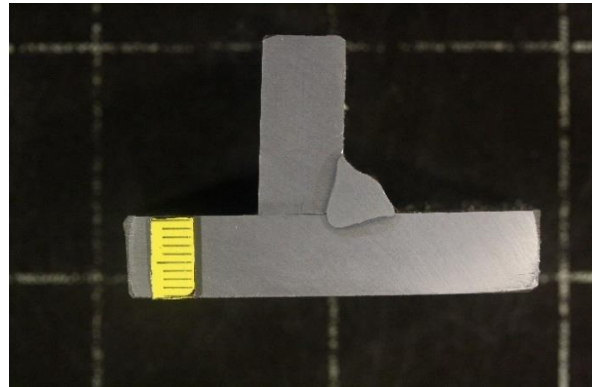
Slika 34. Izgled zavora uzorka 7

4.6. Rezultati

Nakon zavarivanja svih uzoraka izrezani su dijelovi za izradu makroizbrusaka. Limovi su rezani na strojnoj pili i nakon toga su poprečni presjeci izbrušeni strojno, a nakon toga ručno brusnim papirima. Brušenje je provedeno postupno od grublje prema finijoj obradi uz posljednju granulaciju brusnog papira P 400. Nakon brušenja dobiveni uzorci su nagriženi u 3% - tnoj otopini nitala. Nital je otopina klorovodične kiseline u etilnom alkoholu. Vrijeme nagrizanja iznosilo je 20 sekundi. Nakon nagrizanja uzorci su isprani pod mlazom vode kako bi se zaustavila kemijska reakcija. Nakon toga su očišćeni alkoholom i osušeni. Takvi uzorci spremni su za vizualnu kontrolu makrostrukture. Nakon vizualne kontrole programskim paketom za analizu fotografija *ImageJ* analizirana je površina metala zavara, dubinske i bočne penetracije kao i sama visina zavara. Slika 35 i slika 36 prikazuju makroizbruske uzorka 1 i uzorka 2.

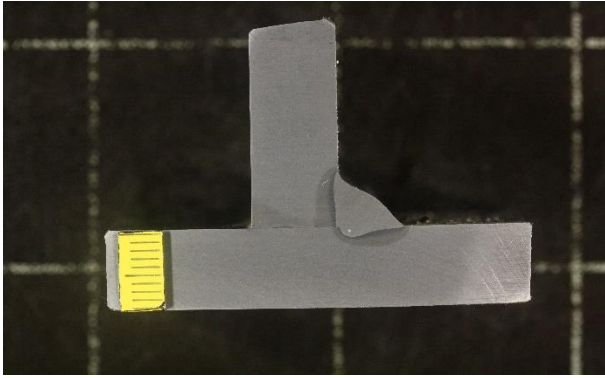


Slika 35. Makroizbrusak uzorka 1

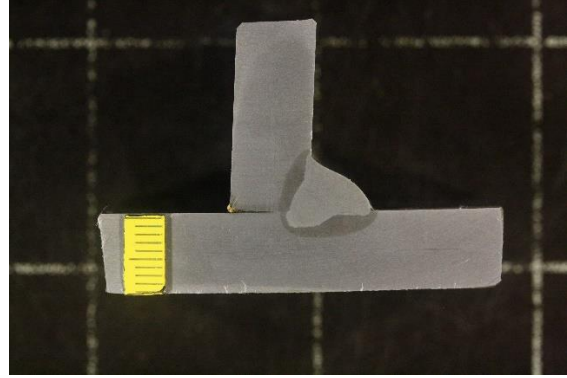


Slika 36. Makroizbrusak uzorka 2

Prilikom zavarivanja oba uzorka korišten je ista mješavina zaštitnog plina, odnosno plin *Ferroline C18*. Razlika u parametrima je već ranije spomenuta. Vidljivo je da se primjenom metalnim prahom punjenom žicom pri istoj mješavini zaštitnog plina ostvarila puno veća dubina penetracije, dok kod obične pune žice penetracije znatno manja. Osim dubine penetracije također je površina metala zavara veća korištenjem metalnim prahom punjenu žicu. Na slikama 37 i 38 prikazane su makrostrukture uzorka 3 i uzorka 4.

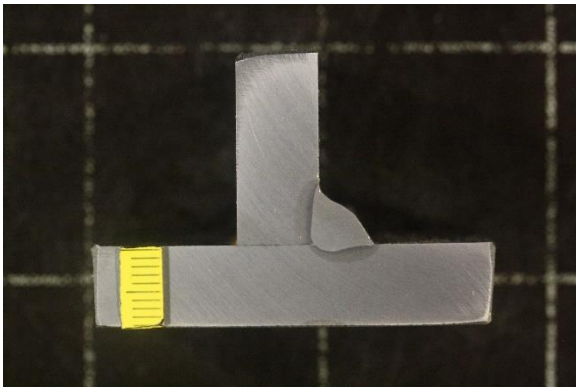


Slika 37. Makroizbrusak uzorka 3

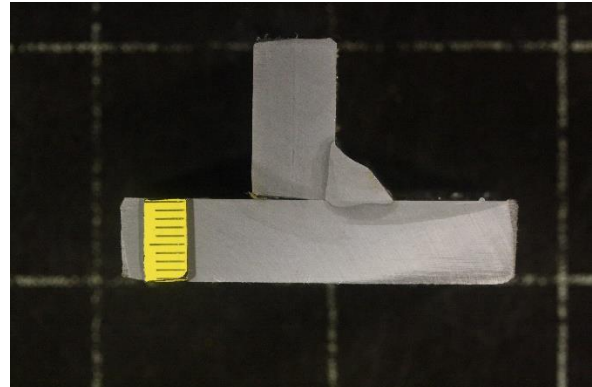


Slika 38. Makroizbrusak uzorka 4

Iz makroizbrusaka vidljivo je kako pri istom zaštitnom plinu (*Ferroline C6X1*) korištenjem metalnim prahom punjene žice dobivamo puno veću penetraciju kao i samu površinu metala zavara. Na makroizbrusku uzorka 3 može se primijetiti i pora u metalu zavara. Slike 39 i 40 prikazuju makroizbruske uzoraka 5 i 6.



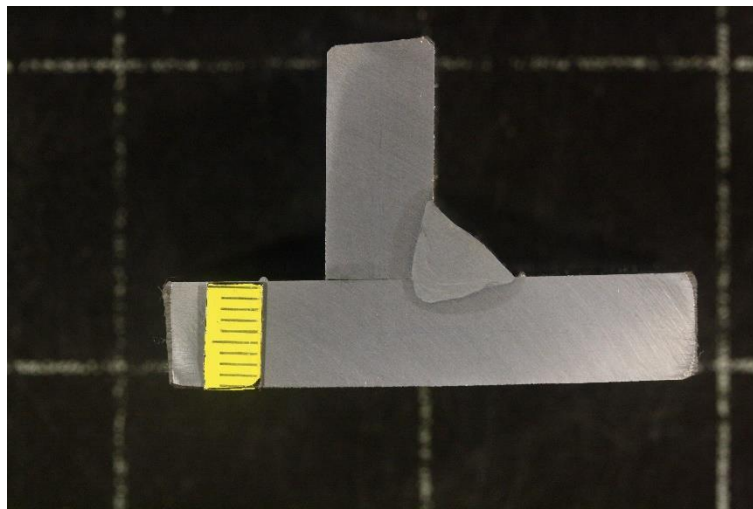
Slika 39. Makroizbrusak uzorka 5



Slika 40. Makroizbrusak uzorka 6

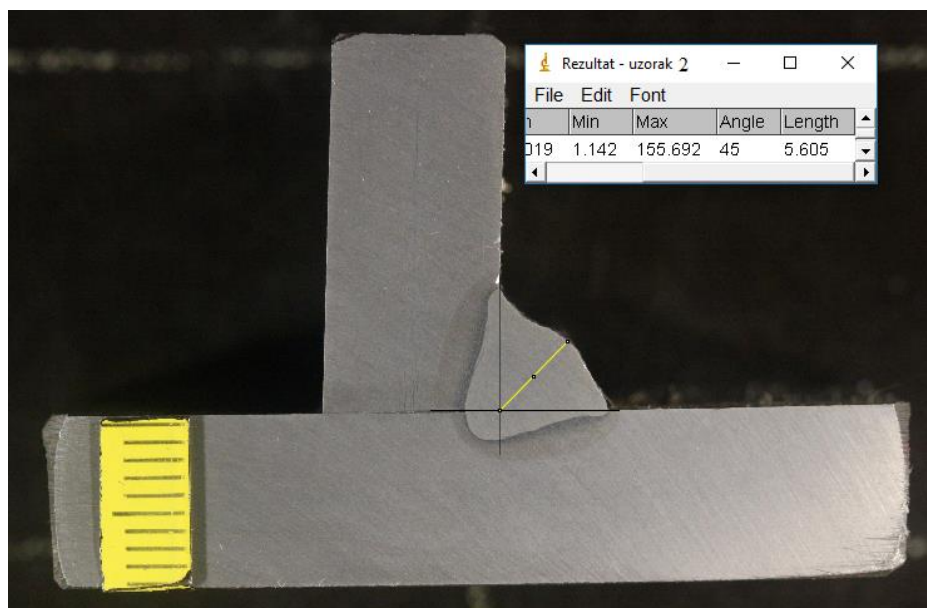
Uzorak 6 koji je zavaren metalnim prahom punjenom žicom kao i u prijašnjim slučajevima za istu mješavinu trokomponentnog zaštitnog plina, u ovom slučaju korišten je *Ferroline C12X2*, daje veću površinu metala zavara kao i nešto veću površinu dubinske penetracije. Na makroizbrusku uzorka 5 koji je zavaren metalnim prahom punjenom žicom možemo učiti nekoliko sitnih pora na samom rubu metala zavara kao i jednu poru u dubinskom dijelu metala

zavara. Slika 41 prikazuje makroizbrusak uzorka 7. Uzorak 7 kako je već ranije spomenuto zavaren je dvokomponentnom mješavinom zaštitnog plina *Ferroline C18*, ali kontroliranim prijenosom, odnosno impulsnim načinom prijenosa metala. Ovakav prijenos metala ima mnogorojne prednosti nad klasičnim MAG zavarivanjem: povoljniji prijenos metala, smanjeno štrcanje, manje deformacije, mogućnost zavarivanja u svim položajima itd. Iz makrostrukture možemo vidjeti dobru dubinsku ali i bočnu penetraciju kao i veliku površinu metala zavara uz odgovarajuću visinu zavara. Pore ili uključci nisu prisutni. Na slici 41 prikazan je makroizbrusak uzorka 7.

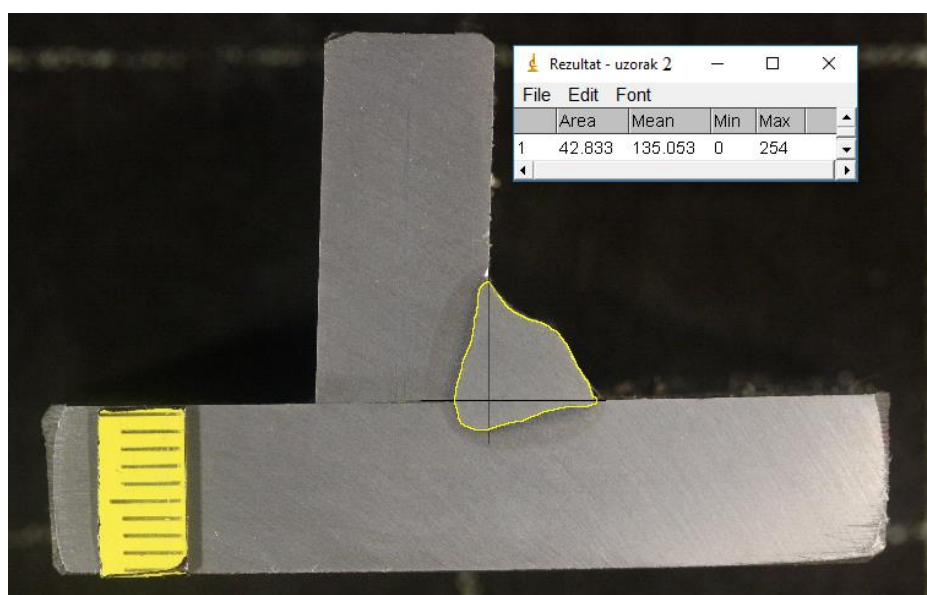


Slika 41. Makroizbrusak uzorka 7

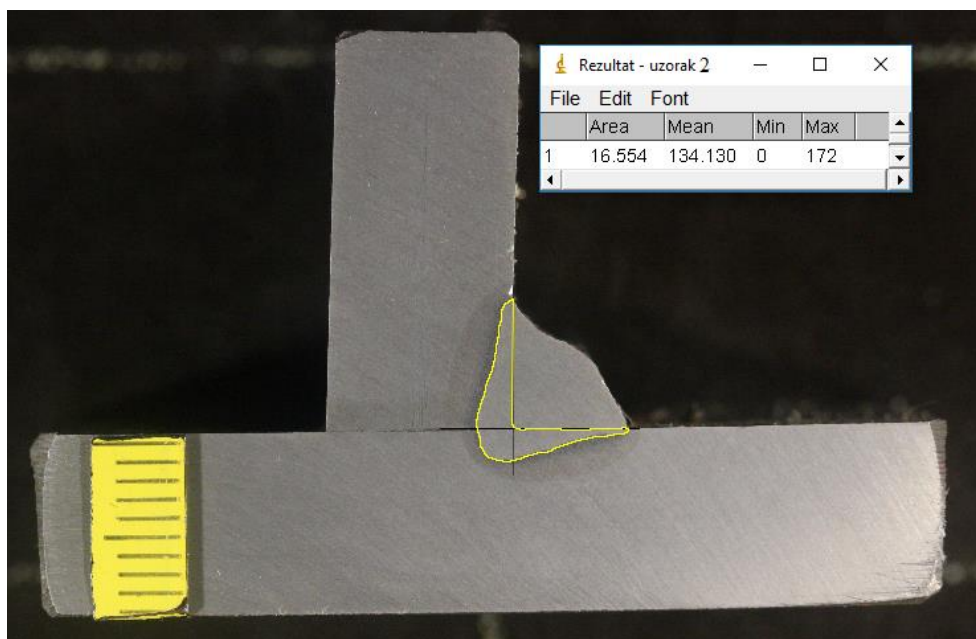
Korištenjem programa *ImageJ* izmjereni su i dobiveni sljedeći podaci visina zavara, površina metala zavara, bočna penetracija i dubinska penetracija za svaki od uzoraka. Kao primjer analize svih uzoraka prikazana je analiza uzorka 2. Slika 42 prikazuje visinu zavara, slika 43 prikazuje površinu zavara. Površina bočne penetracije prikazana je na slici 44, na slici 45 nalazi se površina dubinske penetracija, te na slici 46 prikazana je dubina penetracije.



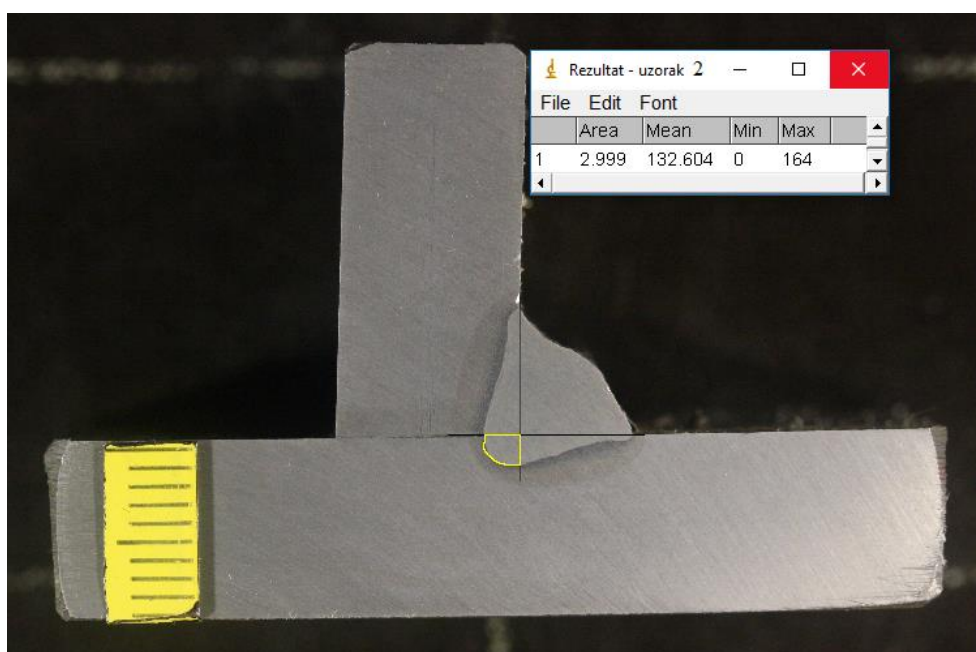
Slika 42. Analiza visine zavora pomoću alata *ImageJ* na uzorku 2



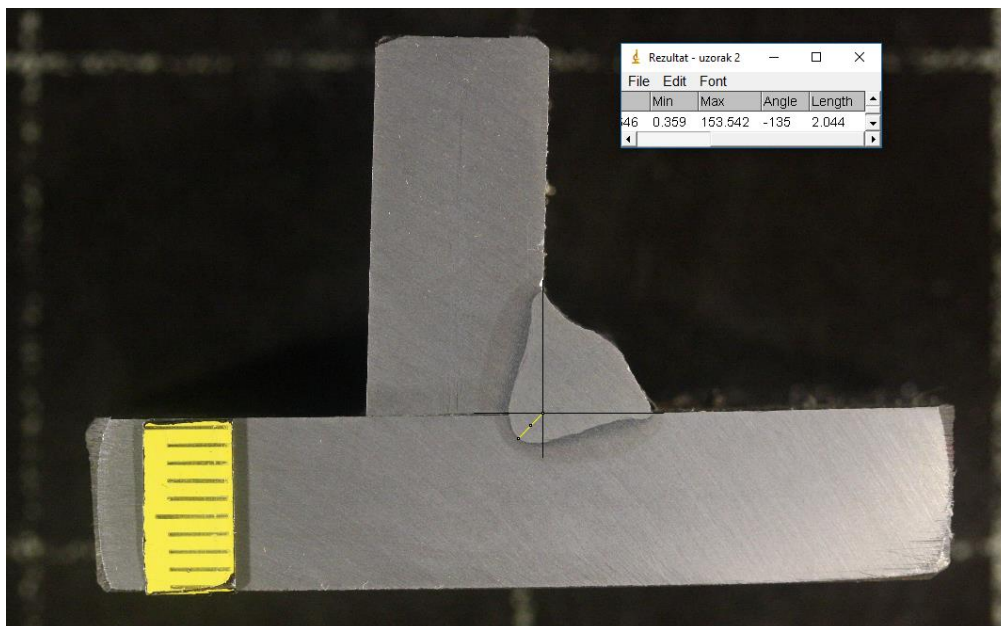
Slika 43. Analiza površine zavora pomoću alata *ImageJ* na uzorku 2



Slika 44. Analiza bočne penetracije koristeći alat *ImageJ* na uzorku 2



Slika 45. Analiza dubinske penetracije koristeći alat *ImageJ* na uzorku 2

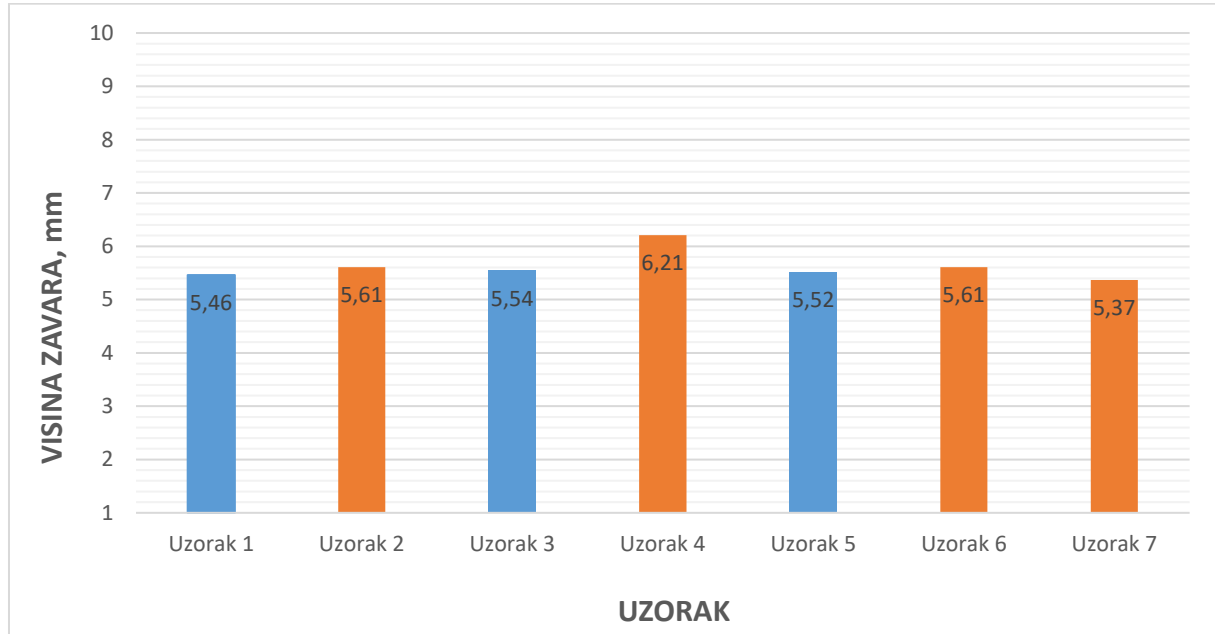
Slika 46. Analiza dubine penetracije koristeći alat *ImageJ* na uzorku 2

U tablici 12 prikazane su dobivene vrijednosti ispitanih parametara pomoću alata za analizu slike *ImageJ*.

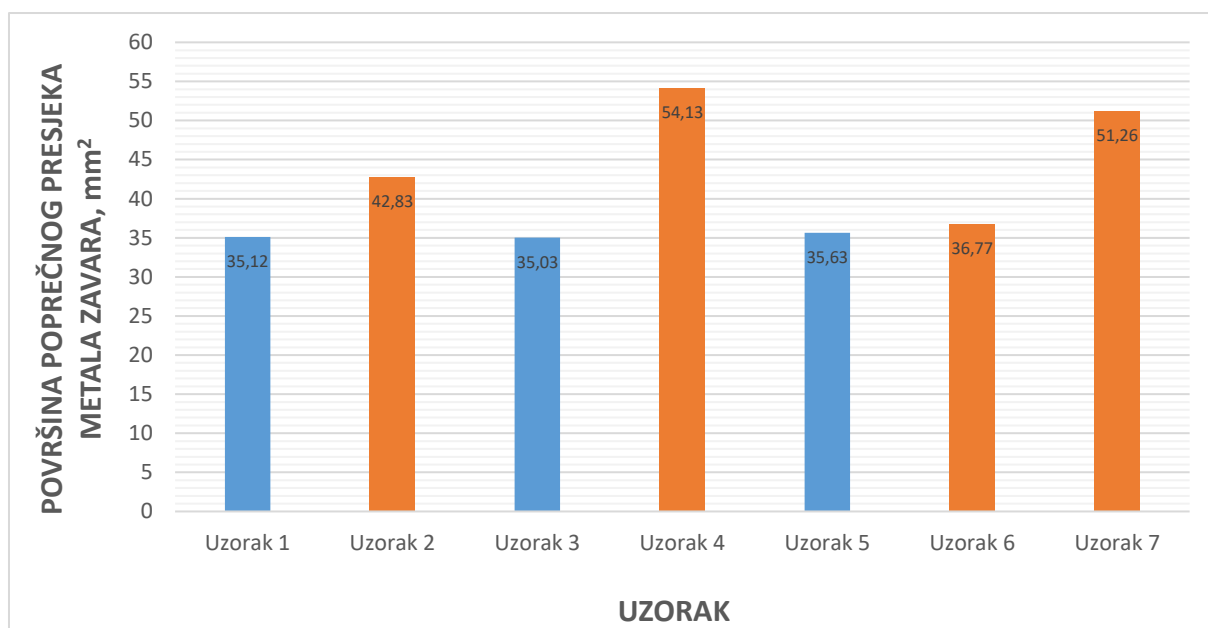
Tablica 12. Vrijednosti parametara dobivenih uz pomoć alata *ImageJ*

Uzorak	Visina zavara, mm	Površina metala zavara, mm ²	Površina bočne penetracije zavara, mm ²	Površina dubinske penetracije zavara, mm ²	Dubinska penetracija, mm
Uzorak 1	5,46	35,12	7,65	0,06	0,08
Uzorak 2	5,61	42,83	16,55	3,00	0,27
Uzorak 3	5,54	35,03	7,91	0,03	0,39
Uzorak 4	6,21	54,13	21,36	6,10	3,215
Uzorak 5	5,52	35,63	7,78	0,17	0,52
Uzorak 6	5,61	36,77	8,78	0,31	2,04
Uzorak 7	5,37	51,26	24,36	3,74	2,31

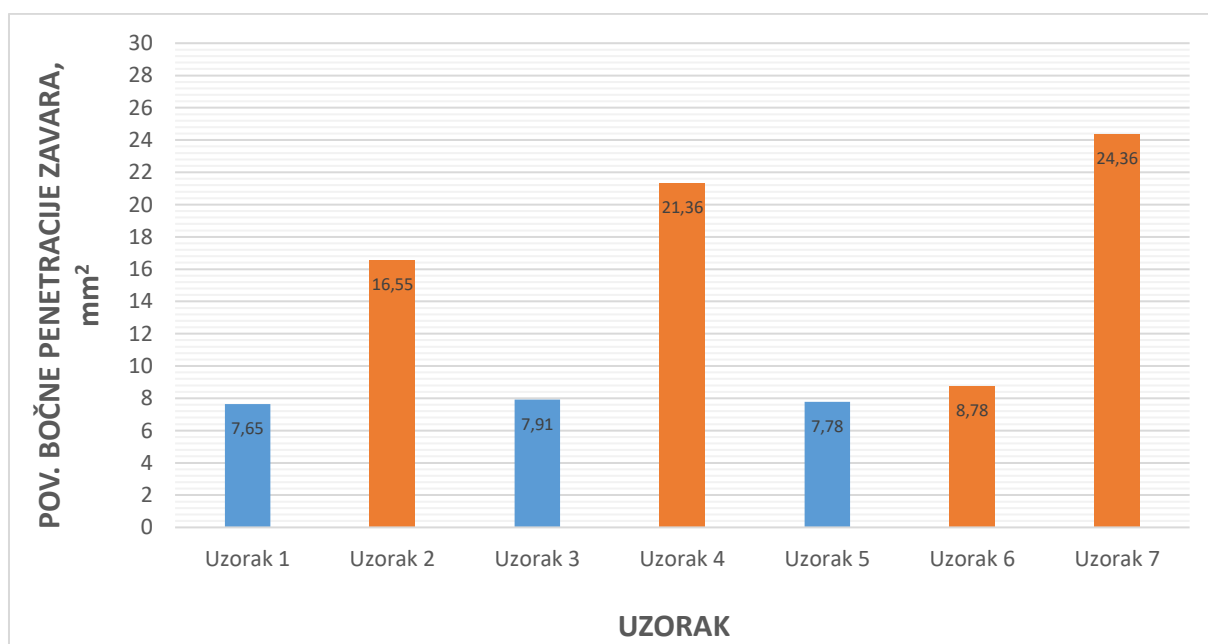
Slika 47 - 51 prikazuju dijagrame dobivenih rezultata ispitivanja.



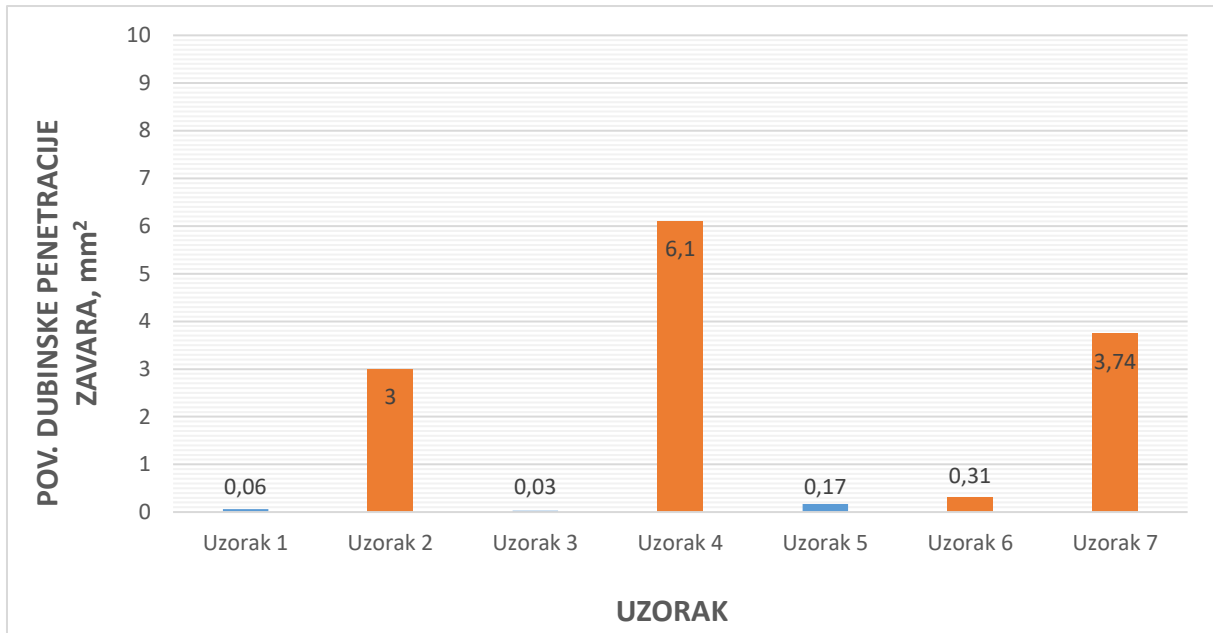
Slika 47. Dijagram usporedbe analiziranih visina zavara ispitanih uzoraka



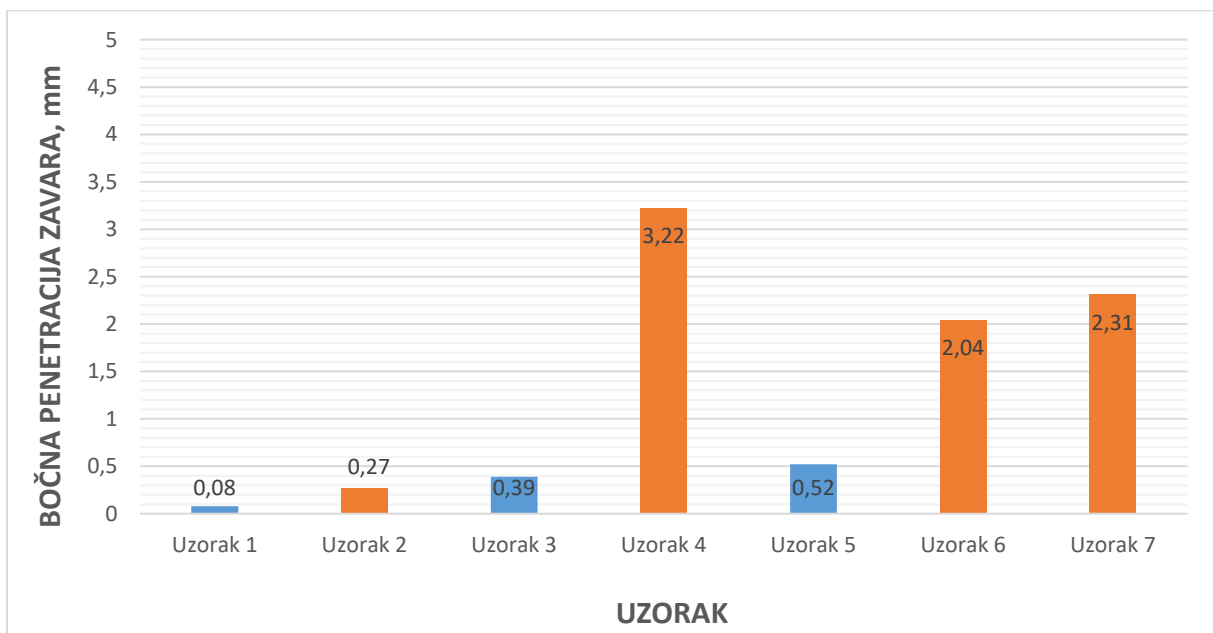
Slika 48. Dijagram usporedbe analiziranih površina poprečnog presjeka metala zavara ispitanih uzoraka



Slika 49. Dijagram usporedbe analiziranih površina bočnih penetracija zavara ispitanih uzoraka



Slika 50. Dijagram usporedbe analiziranih površina dubinskih penetracija zavara ispitanih uzoraka



Slika 51. Dijagram usporedbe analiziranih dubina penetracije zavara ispitanih uzoraka

Analizom rezultata utvrđeno je da je površina poprečnog presjeka metala zavara najveća kod uzorka 4, pri zavarivanju s metalnim prahom punjenom žicom u zaštitnoj atmosferi trokomponentnog plina *Ferroline C6X1*. Jako blizu toj vrijednosti su i ostali uzorci zavareni

metalnim prahom punjenom žicom uz druge zaštitne plinove, dok su površine poprečnog presjeka metala zavara uzoraka koji su zavareni konvencionalnom punom žicom znatno manji. Površina poprečnog presjeka metala zavara kod uzorka 2 je za 18% veća od uzorka 1, najveća razlika u analiziranoj površini poprečnog presjeka metala zavara vidljiva je kod uzoraka 3 i 4. Uzorak 4 ima 35% veću površinu poprečnog presjeka metala zavara. Ista situacija vrijedi i za površinu bočne penetracije. Najveću površinu bočne penetracije ima uzorak 7 (korišteni zaštitni plin je *Ferroline C18*) i ona je za 3% veća od uzorka 4. Kada gledamo uzorak 4 i uzorak 3, površina bočne penetracije uzorka 4 je 63% veća. Najveću površinu dubinske penetracije kao i dubinu penetracije ima uzorak 4. Dubina penetracije uzorka 4 je 28% veća od dubine penetracije uzorka 7 koji ima drugu po redu najveću penetraciju. Uzorak 7 prilikom čijeg zavarivanja se koristilo impulsno MAG zavarivanje potvrđuje brojne prednosti koji taj način rada ima. Iako se radi o dvokomponentnom plinu koji je korišten kao zaštitni plin prilikom zavarivanja uzorka 7, dobila se odlična dubinska penetracija kao i površina metala zavara. Visina zavara kod svih uzoraka varira između 5,46 do 6,21 milimetar, što je za debljinu radnog komada koja iznosi 10 milimetara zadovoljavajuće.

5. ZAKLJUČAK

Analizom makroizbrusaka dobivenih iz zavarenih uzoraka vidljivo je kako se prilikom korištenja metalnim prahom punjene žice dobije znatno veća površina poprečnog presjeka metala zavara, odnosno da metalnim praškom punjena žica daje veći depozit dodatnog materijala. Također, prilikom zavarivanja metalnim praškom punjenom žicom dobivene su najveće vrijednosti površina dubinske i bočne penetracije kao i naveća dubina penetracije. Prilikom korištenja praškom punjene žice možemo uočiti porast jakosti radne struje za u prosjeku 30 A, brzina zavarivanja povećana je na 40 cm/min što je 15% veća brzina zavarivanja nego prilikom zavarivanja s punom žicom. Brzina dodavanja žice povećana je za 24% u odnosu na brzinu dodavanja žice prilikom zavarivanja s punom žicom i iznosi 10,4 m/min. Povećanjem struje i brzine dodavanja žice povećava se i depozit dodatnog materijala, te se na taj način dobivaju veće površine zavara koje su analizirane u eksperimentu. Povećanjem brzine zavarivanja povećava se i produktivnost samog postupka. Za usporedbu, za zavarivanje jednog metra zavara punom žicom uz parametre koji su određeni u eksperimentu potrebno bi bilo približno tri minute, dok bi pri zavarivanju metalnim praškom punjenom žicom isto to trajalo 2,5 minute što je velika razlika. Analizom makroizbrusaka vidljivo je kako najveću dubinu penetracije ima uzorak koji je zavaren sa trokomponentnom mješavinom zaštitnog plina *Ferroline C6X1*, tome pridonosi povišeni udio plina argona koji iznosi 93% u toj mješavini koji daje prstasti izgled zavarenog profila s većom penetracijom. Analizom uzoraka 1, 2 i 7 prilikom čijeg se zavarivanja koristila dvokomponentna mješavina zaštitnog plina *Ferroline C18* očitana je najveća površina poprečnog presjeka metala zavara, na uzorku 7. Razlog najveće očitane površine poprečnog presjeka metala zavara je korištenje praškom punjene žice uz kontrolirani prijenos metala impulsno prilikom čega je porastao radni napon i povećao se unos topline. Uz spomenuto, utjecao je i veći udio aktivne komponente, odnosno CO₂ u mješavini *Ferroline C18* koja potiče oblikovanje šire zone električnog luka, a samim time i šireg područja metala zavara.

Troškovi proizvodnje značajno su porasli u posljednjih nekoliko godina. Kako bi se osiguralo što bolje upravljanje troškovima proizvodnje te povećala produktivnost potrebno je osigurati korištenje ispravnih osnovnih materijala, dodatnih materijala i zaštitnih plinova kako bi se izbjegle pogreške prilikom zavarivanja. Također potrebno je uzeti u obzir i potreban rad koji se mora obaviti prije i poslije samog postupka zavarivanja. Korištenjem trokomponentnih

mješavina zaštitnog plina dodatno se poboljšava stabilnost luka, minimizira se rasprskavanje, te se dubina penetracije povećava. Uz navedeno također korištenjem trokomponentnih mješavina povećava se stabilnost luka i olakšava sam proces zavarivanja. Dugoročno gledajući korištenjem ovih mješavina smanjuju se troškovi proizvodnje zato što se smanjuje dodatni rad nakon zavarivanja potreban za čišćenje rasprskanog materijala kojeg ima znato manje. Smanjivanju troškova proizvodnje te povećanju produktivnosti također doprinose i metalnim prahom punjene žice kao izbor dodatnog materijala. Iako su u samom startu one skuplje od punih žica, uvelike doprinose povećanju produktivnosti u smislu brzine zavarivanja, velikog depozita materijala kao i smanjenju potrebnog rada koji se mora obaviti prije i poslije samog postupka. Smanjuje se potreba za odmašćivanjem materijala prije zavarivanja, rasprskavanje materijala je znatno manje što znači da je potreba za naknadnim radom također smanjena. Uz sve prethodno spomenute prednosti možemo zaključiti kako veća cijena materijala u samom početku zapravo donosi niz ušteta prilikom dobro organizirane proizvodnje te se na taj način kompenzira viša početna jedinična cijena dodatnog materijala.

LITERATURA

- [1] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Zavarivački i srodni postupci, Zagreb, 2015.
- [2] Golubić M.: Usporedna analiza zavarenih spojeva izrađenih konvencionalnim MAG i D-Arc postupkom, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2018.
- [3] Torer I.: Primjena MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [4] Širić P.: Dinamička karakteristika izvora struje za MAG zavarivanje, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2019.
- [5] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak, 2003.
- [6] Bilić L.: Utjecaj plinova na svojstva zavarenog spoja pri MAG zavarivanju konstrukcijskih čelika, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2009.
- [7] Štavalj S.: Stabilnost procesa MAG zavarivanja s trokomponentnim plinskim mješavinama, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [8] Radiković M.: Zavarivanje duplex čelika praškom punjenim žicama, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2018.
- [9] I. Lakota, M. Bregant, M. Šolar: Metalne punjene žice, Zavarivanje i zavarene konstrukcije (2009)3, s. 112-118
- [10] Kuzmikova L.: An Investigation of the weldability of high hardness armour steels, Doktorski rad, Faculty of Engineering, University of Wollongong, 2005.
- [11] https://www.ezg.hr/download/EZ_katalog_2018_hrv.pdf, dostupno 25.6.2021.
- [12] <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/advantages-and-disadvantages-of-metal-cored-wires.cfm>, dostupno 8.6.2021.
- [13] Bytyqi B., Osmani H., Idrizi F.: Influence of welding parameters on seam welded quality with MAG welding, Strojarski fakultet, Priština, 2005.

- [14] <http://www.alatistherm.co.rs/pdf.zavarivanje/ParametriZavarivanja.pdf>, dostupno 04.06.2021.
- [15] Garašić I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [16] Jurica M.: Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [17] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [18] Kostadin T.: Čelici i željezni ljevovi, Materijali II, Sveučilište u Karlovcu, Studij strojarstva, Karlovac, 2017.
- [19] <https://servus.hr/proizvodi/zavarivanje/migmag-zavarivanje/welbee-p-400/>, dostupno 21.11.2021.
- [20] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>, dostupno 28.11.2021.
- [21] <http://ezg.hr/download/prod/097%20KX-706M.pdf>, dostupno 21.11.2021.