

Usporedba produktivnosti visokoučinskog D-ARC zavarivanja u odnosu na konvencionalni MAG postupak kod izrade transformatorskih kotlova

Kocijan, Mihael

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Polytechnic of Međimurje in Čakovec / Međimursko veleučilište u Čakovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:110:268449>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-17**



Repository / Repozitorij:

[Polytechnic of Međimurje in Čakovec Repository](#) -
[Polytechnic of Međimurje Undergraduate and Graduate Theses Repository](#)





MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ ODRŽIVI RAZVOJ

Mihael Kocijan, JMBAG - 0231047643

**Usporedba produktivnosti visokoučinskog D-ARC
zavarivanja u odnosu na konvencionalni MAG postupak
kod izrade transformatorskih kotlova**

Završni rad

Čakovec, rujan 2024.



MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU
STRUČNI PRIJEDIPLOMSKI STUDIJ ODRŽIVI RAZVOJ

Mihael Kocijan, JMBAG – 0231047643

**Usporedba produktivnosti visokoučinskog D-ARC
zavarivanja u odnosu na konvencionalni MAG postupak
kod izrade transformatorskih kotlova**

**Comparasion of the productivity of high efficiency
D-ARC welding in relation to the conventional MAG
process in the production of transformer tanks**

Završni rad

Mentor:

mr. sc. Vjeran Panić

Čakovec, rujan 2024.



MEĐIMURSKO VELEUČILIŠTE U ČAKOVCU

PRIJAVA TEME I OBRANE ZAVRŠNOG/DIPLOMSKOG RADA

Stručni prijediplomski studij:

Računarstvo

Održivi razvoj

Menadžment turizma i sporta

Stručni diplomski studij Menadžment turizma i sporta:

Pristupnik: MIHAEL KOCIJAN, JMBAG: 0231047643
(ime i prezime)

Kolegij: ZAVARIVANJE II
(na kojem se piše rad)

Mentor: VJERAN PANIĆ, PREDAVAČ
(ime i prezime, zvanje)

Naslov rada: USPOREDBA PRODUKTIVNOSTI VISOKOUČINSKOG

D-ARC ZAVARIVANJA U ODNOSU NA KONVENCIONALNI MAG
POSTUPAK KOD IZRADE TRANSFORMATORSKIH KOTLOVA

Naslov rada na engleskom jeziku: COMPARISON OF THE PRODUCTIVITY OF HIGH

EFFICIENCY D-ARC WELDING IN RELATION TO THE CONVENTIONAL
MAG PROCESS IN THE PRODUCTION OF TRANSFORMER TANKS

Članovi povjerenstva: 1. TOMISLAV HUBLIN, V. PRED., predsjednik

(ime i prezime, zvanje)
2. MARIO ŠERGETZ, V. PRED., član

(ime i prezime, zvanje)
3. VJERAN PANIĆ, PRED, mentor

(ime i prezime, zvanje)
4. TIBOR PODIGER, V. PRED., zamjenski član

Broj zadatka: 2023-OR-13

Kratki opis zadatka: PRISTUPNIK NA PRAKTIČNOM
PRIMJERU PROIZVODNJE TRANSFORMATORSKIH
KOTLOVA ANALIZIRA PREDNOSTI UVOĐENJA
VISOKOUČINSKOG D-ARC POSTUPKA ZAVARIVANJA
LIMOVA U ODNOSU NA UOBICAJNE MIG-MAG
RUČNE POSTUPKE.

Datum: 2.9.2024.

Potpis mentora:

Predgovor

Cilj ovog završnog rada je usporedba produktivnosti konvencionalnog MAG i visokoučinskog D-Arc zavarivanja u proizvodnji trafokotlova.

Pošto imam 10 godina radnog iskustva u proizvodnji trafokotlova i radim u lokalnom poduzeću PRIMABIRO d.o.o. zadnjih 4 godine koje se bavi istim poslovima, od osobnog mi je interesa doprinijeti u svakom segmentu poboljšanja proizvodnog procesa.

Ovom prilikom želim se zahvaliti svom mentoru mr.sc. Vjeranu Paniću na pomoći i stručnom vođenju, te na ukazanoj strpljenju i povjerenju tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se lokalnom poduzeću SERVUS d.o.o. na izdvojenom vremenu i pomoći kod izrade eksperimentalnog dijela završnog rada.

Također, zahvaljujem se svojim kolegama sa posla i fakulteta na nesebičnoj pomoći, te na kraju najbitnije, zahvaljujem se svojoj obitelji bez čije podrške i razumijevanja moje obrazovanje nebi bilo moguće.

Mihael Kocijan

Popis korištenih kratica

Oznaka	Opis	Jedinica
HI	unos topline	[kJ/mm]
V	napon izvora	[V]
I	jakost struje izvora	[A]
v	brzina zavarivanja	[mm/min]
Re	granica razvlačenja	[MPa]
MIG	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina	
MAG	elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina	
TIG	zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina	
T	taljenje	
TM	toplinsko mehanička energija	
M	mehanička energija	
OM	osnovni materijal	
MZ	materijal zavara	
ZT	zona taljenja	
ZUT	zona utjecaja topline	
ZN	zaostala naprežanja	
ZD	zaostale deformacije	
Ar	argon	
He	helij	
CO ₂	ugljičkov dioksid	
WPS	eng. <i>welding procedure specification</i>	
SPZ	specifikacija postupka zavarivanja	
AC	Izmjenična struja	
DC	Istosmjerna struja	

Sažetak

U svrhu povećanja produktivnosti kod zavarivanja transformatorskih kotlova obrađena je usporedba konvencionalnog MAG postupka i visokoučinskog D-Arc postupka zavarivanja. U teorijskom dijelu opisan je konvencionalni MAG postupak zavarivanja sa potrebnom opremom. Također, u nastavku je opisan i D-Arc postupak čija je primjena zavarivanje debelostjenih konstrukcija.

U eksperimentalnom dijelu rada napravljena je usporedba produktivnosti gore navedenih postupaka kod zavarivanja transformatorskih kotlova za dva različita spoja, sučeljeni i kutni zavar. Oba postupka odrađena su u lokalnim poduzećima. Konvencionalno MAG zavarivanje se provodilo u poduzeću PRIMABIRO d.o.o. koje ima dugogodišnje iskustvo u proizvodnji trafokotlova, a visokoučinsko D-Arc zavarivanje u poduzeću SERVUS d.o.o. u Čakovcu. Materijal koji se koristio u praktičnom dijelu rada je nelegirani konstrukcijski čelik kvalitete S355J2 i debljine 15 mm koji se upotrebljava u proizvodnji trafokotlova. Za usporedbu produktivnosti uzeti su svi potrebni parametri. Nakon zavarenih spojeva sa zadovoljavajućom kvalitetom napravljen je WPS (**W**elding **P**rocedure **S**pecification) za oba postupka, za sučeljeni i kutni zavar. Kao rezultat pokusa pokazane su razlike u produktivnosti i cijeni koštanja te je dan zaključak o izboru optimalnog procesa zavarivanja za navedene uzorke.

Ključne riječi: *MAG, D-Arc, produktivnost, zavarivanje, transformatorski kotao, WPS*

Abstract

In order to increase productivity in the welding of transformer tanks, a comparison was made between the conventional MAG welding process and the high-efficiency D-Arc welding process. The theoretical part describes the conventional MAG welding process with the necessary equipment. Additionally, the D-Arc welding process is described, with its application in welding thick-walled structures.

In the experimental part of the study, a comparison of the productivity of the aforementioned welding processes was made for transformer tank welding using two different joints: butt and fillet welds. Both processes were carried out in local companies. Conventional MAG welding was performed at PRIMABIRO d.o.o., a company with many years of experience in the production of transformer tanks, while high-efficiency D-Arc welding was conducted at SERVUS d.o.o. in Čakovec. The material used in the practical part of the study was unalloyed structural steel of quality S355J2 and a thickness of 15 mm, which is used in the production of transformer tanks. All necessary parameters were considered for the comparison of productivity. After achieving welded joints of satisfactory quality, a WPS (Welding Procedure Specification) was created for both processes, for both butt and fillet welds. As a result of the experiment, differences in productivity and cost were shown, and a conclusion was drawn regarding the selection of the optimal welding process for the given samples.

Keywords: MAG, D-Arc, productivity, welding, transformer tank, WPS

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. TRANSFORMATORSKI KOTLOVI.....	2
2.1. Općenito o transformatorskim kotlovima	2
2.2. Način rada transformatora	2
3. MAG ZAVARIVANJE.....	4
3.1. Osnovni princip MAG postupka	4
3.2. Izvori struje za MAG zavarivanje	5
3.3. Žice za MAG zavarivanje	7
3.4. Uloga plinova pri zavarivanju	8
3.5. Metode prijenosa dodatnog materijala u električnom luku.....	8
3.5.1. Prijenos metala električnim lukom kratkog spoja	9
3.5.2. Prijenos metala prijelaznim električnim lukom	9
3.5.3. Prijenos metala rasprskavajućim električnim lukom	10
3.5.4. Prijenos metala impulsnim električnim lukom.....	11
3.5.5. Prijenos metala rotirajućim električnim lukom	11
3.6. Prednosti i nedostaci MAG postupka.....	13
4. MODIFICIRANI POSTUPCI MAG ZAVARIVANJA	14
4.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima	14
4.1.1. STT (Surface-Tension-Transfer) postupak zavarivanja	14
4.1.2. Cold metal transfer	16
4.1.3. FastROOT	16
4.1.4. Controlled bridge transfer	17
4.2. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja.....	17
4.2.1. Flux Cored Arc Welding.....	17
4.2.2. Tandem Welding.....	18
4.2.3. Rotirajući luk.....	18

4.2.3. Zakopani luk – „D-Arc“	19
5. EKSPERIMENTALNI DIO	22
5.1. Dokumentacija	22
5.2. Priprema radnih komada za zavarivanje	23
5.3. Zavarivanje konvencionalnim MAG postupkom	26
5.4. Zavarivanje visokoučinskim D-Arc postupkom	29
5.5. Mjerenje dimenzija zavara	32
5.6. Makroizbrusci.....	32
6. Troškovi zavarivanja	38
6.1. Trošak žice.....	38
6.2. Trošak plina	42
6.3. Trošak energije	44
6.4. Trošak amortizacije	46
6.5. Trošak rada	47
7. ZAKLJUČAK.....	50
LITERATURA	52
Popis slika	54
Popis tablica	55

1. UVOD

Proizvodnja transformatorskih kotlova veoma je razvijena u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. Međimurje koristi svoj geografski položaj prema zapadnim zemljama Europe koje igraju bitnu ulogu za razvoj energetike u cijelom svijetu. Jedan od najbitnijih segmenata u proizvodnji transformatorskih kotlova je zavarivanje. „Zavarivanje je postupak čvrstog, neraskidivog spajanja, dva ili više dijelova od istorodnih ili raznorodnih materijala, taljenjem ili pritiskom, u homogeni spoj sa ili bez dodavanja dodatnog materijala.“ (Panić, V., 2023)

Danas se u zavarivačkoj praksi, u proizvodnji masivnih zavarenih konstrukcija kao što su transformatorski kotlovi, aktivno primjenjuje nekoliko postupaka zavarivanja (TIG, REL, EPP) i njihovih inačica. Ipak najvećim dijelom zavarivanje se izvodi MAG postupkom zavarivanja. MAG postupak se prvi put spominje davne 1953. godine u SSSR-u. Jedan od osnovnih izazova ovog postupka zavarivanja je kako postići što veću produktivnost i time što manju cijenu izrade proizvoda. U tu svrhu razvijeni su novi visokoučinski postupci zavarivanja koji omogućavaju povećanje produktivnosti i time povećavaju konkurentnost izrade proizvoda. U uvodnom dijelu ovog rada dane su glavne značajke MAG postupka zavarivanja, njegovih prednosti i nedostataka kod zavarivanja transformatorskih kotlova. MAG postupak je relativno fleksibilan, ali se za zavarivanje debelih limova zahtijeva izvedba s više prolaza. U nastavku se spominje primjenjivi visokoučinski postupak zavarivanja koji može biti alternativa konvencionalnom MAG postupku s ciljem povećanja produktivnosti tzv. D-Arc postupak. Da bi se povećala produktivnost zavarivanja debelostjenih konstrukcija u proizvodnji trafokotlova, ključni koraci bi bili smanjivanje pripreme za zavar i smanjenje prolaza zavarivanja. Upravo ta dva čimbenika nam pruža D-Arc koji se temelji na dublje postavljenom izvoru topline u odnosu na konvencionalni MAG postupak i time se postiže veća penetracija i smanjuje se broj prolaza što je u ovome slučaju prikladnije. Kod debljih materijala izvodi se odgovarajuća priprema za zavar, te se zavarivanje vrši u više prolaza. Svaki prolaz zahtijeva više dodatnog materijala i određeno vrijeme za hlađenje te zbog toga dolazi do većih deformacija. U D-Arc procesu se koriste velike struje, te takav proces zahtijeva manje vremena, jednostavniju pripremu žlijeba, manje prolaza što znači manje potrošnje žice a rezultira se sa manjim deformacijama u zavarenom spoju.

2. TRANSFORMATORSKI KOTLOVI

2.1. Općenito o transformatorskim kotlovima

Transformatorski kotlovi su kućišta u koja se pohranjuju transformatori. Kućišta su pod dinamički opterećenjima glede rada samog transformatora i izrađuju se najčešće od konstrukcijskog čelika kvalitete S235 i S355. Prema izvedbi dijelimo ih na uljna i suha kućišta. U ovome radu govori se o uljnim kućištima za transformatore gdje ulje služi za izolaciju i hlađenje kompletnog sustava. Samim time kućišta moraju biti uljenepropusno zavarena tj. zavari ne služe samo kao spojni i nosivi, već njihova uloga je i brtvljenje spojeva. Takvi spojevi obavezno moraju biti izvedeni od strane kvalitetnih, atestiranih zavarivača i moraju biti ispitani raznim metodama ispitivanja zavara bez razaranja. Veličina transformatorskih kućišta se definira od strane konstruktora, a glavni parametri su volumen i radna snaga transformatora. Poduzeće koje proizvodi transformatorska kućišta mora biti veoma fleksibilno i zahtjeva širok spektar stručnih ljudi u granama strojarstva, ekonomije, elektrotehnike, zaštite na radu i drugo. U ovom radu iskustveno se govori o jedinicama proizvoda mase od 1 tone do nekoliko desetaka tona. Proizvodni proces zahtjeva znanja prvobitno o nabavi stotina različitih sirovina, raznim oblicima rezanja materijala kao što su plinski, plazma ili laserski rez, rezanje tračnim ili kružnim pilama, strojna ili ručna obrada odvajanja čestica, oblikovanje deformiranjem materijala pomoću kutnog ili kružnog savijanja, ravnanje materijala, bravarski i cjevarski rad, zavarivanje i nadzor zavarivanja, manipulacija tereta velikih masa, pripreme proizvoda za antikorozivnu zaštitu i antikorozivna zaštita, te kontrola kvalitete proizvoda kroz cijeli proizvodni proces.

2.2. Način rada transformatora

„Rad transformatora zasniva se na Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije, prema kojem vremenska promjena magnetskog toka ulančanog vodljivom petljom inducira napon u petlji, dok struja uzrokovana tim naponom stvara magnetski tok, koji se u skladu s Lentzovim zakonom, opire promjeni toka koji inducira napon. Jednostavnije rečeno, izmjenična struja primara koja tokom vremena jakost mijenja po sinusoidi, u željeznoj jezgri transformatora proizvodi isto tako promjenjiv magnetski tok. Umetne li se u tako stvoreno promjenjivo magnetsko polje u okolini jezgre drugi namotaj (sekundar), u njemu će se po pravilima elektromagnetske indukcije pobuditi također sinusoidalni izmjenični napon. Zbog pojave samoindukcije, posljedično induciranoj struji sekundara, opirat će se induktivni otpor namotaja.“ (Novak, B., 2015.)

Slika 1. Probna montaža glavnih i osnovnih komponenti trafokotla



Izvor: Fotografirao autor

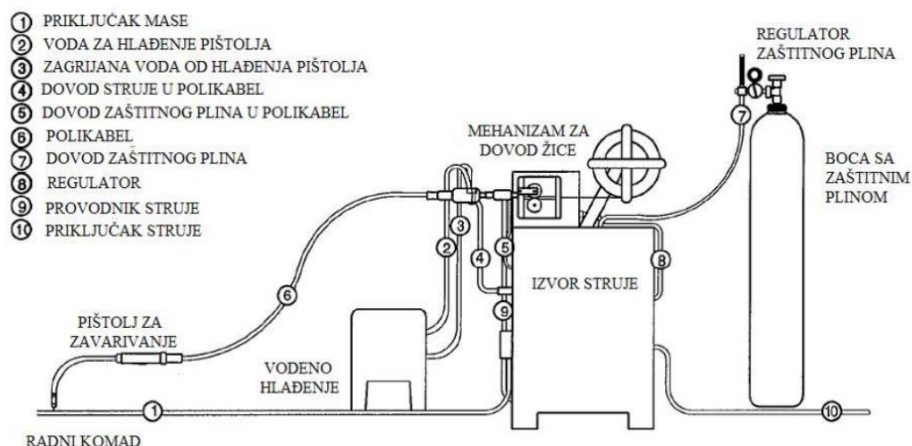
3. MAG ZAVARIVANJE

„MAG postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnoga plina. Električni luk se uspostavlja između radnoga komada i taljive, kontinuirane elektrode koja je u ovome postupku i dodatni materijal. Primjena MAG postupka zavarivanja započela je sredinom 20. stoljeća. Postupak je prvobitno bio namijenjen za zavarivanje aluminija, legura na bazi aluminija i ostalih obojenih materijala. Veća primjena u zavarivanju različitih materijala došla je sa razvojem aktivnih plinova i plinskih mješavina koje su znatno smanjile cijenu zavarivanja. Razvoj ovoga postupka je potaknut zbog veće brzine zavarivanja, većeg depozita materijala, jednostavnoga rukovanja i automatizacije, zbog čega je danas jedan od najčešćih korištenih postupaka zavarivanja u industriji.“ (Horvat M., Kondić V., 2012).

3.1. Osnovni princip MAG postupka

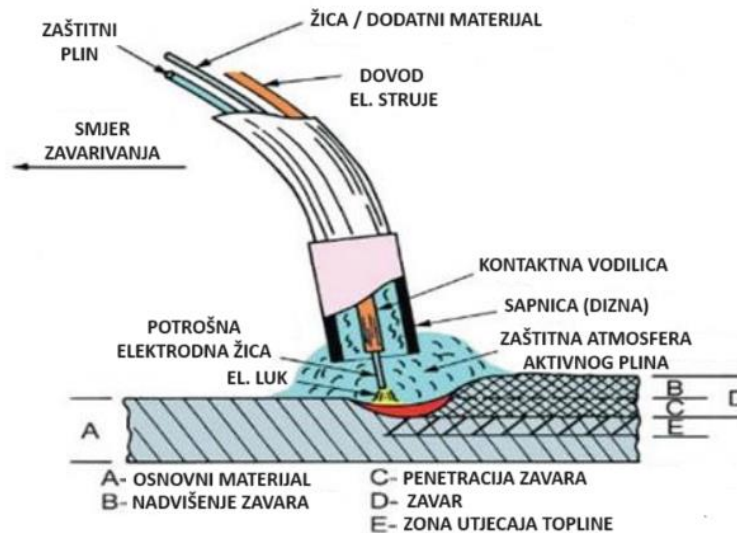
„Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Žica je istovremenom i elektroda i dodatni materijal, to jest njenim taljenjem se popunjava pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski (dodavanje žice mehanizirano a vođenje pištolja ručno) ili automatski potpuno mehaniziran. Kada se zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od 5 m od izvora struje obično se primjenjuje dodatni pogon za dodavanje žice smješten u samom pištolju. Uobičajeni naziv za takav sistem je „push-pull“. Njegova primjena je nužna i na manjim udaljenostima kada se radi s tanjim žicama ili žicama mekših materijala.“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)

Slika 2. Oprema za MAG postupak



Izvor: Jurica, Maja (2015.)

Slika 3. Shema postupka MIG/MAG zavarivanja



Izvor: <https://ewi.org/reciprocating-wire-feed-gmaw-an-advanced-short-circuit-gmaw-mode/> (Datum pristupa 14.7.2024)

3.2. Izvori struje za MAG zavarivanje

„Raspoloživu električnu energiju iz mreže nije moguće direktno koristiti za snabdijevanje luka energijom zbog njegove karakteristike. Električni luk za svoje održavanje treba relativno jaku struju (nekoliko desetaka do nekoliko stotina A) pri niskom naponu (nekoliko desetaka V), dok je u mreži suprotna situacija. Iz toga dolazi potreba za posebno konstruiranim uređajima koji prilagođavaju raspoloživu energiju u odgovarajući oblik.“ (Bee, J.V., Garrett, G.G., Taplin, D.M.R., 1985)

„Izvori struje dijele se na izmjenične (AC) i istosmjerne (DC). Kod MAG postupka zavarivanja električni luk održava se istosmjernim izvorima struje, a oni su:

- generatori istosmjerne struje
- ispravljači
- inverteri (najčešće korišteni).“ (Bee, J.V., Garrett, G.G., Taplin, D.M.R., 1985)

„Inverterska tehnologija razvijena je korištenjem visoko energetske poluvodiča, kao što su IGBT, kako bi bilo moguće napraviti prekidački izvor napajanja koji ima mogućnost da podnese velika strujna opterećenja izazvana procesom zavarivanja. Inverter je elektronički sklop koji najprije pretvara izmjeničnu struju u istosmjernu. Nakon toga, tranzistorske sklopke brzim prebacivanjem iz područja zapiranja u područje zasićenja stvaraju visokofrekventni

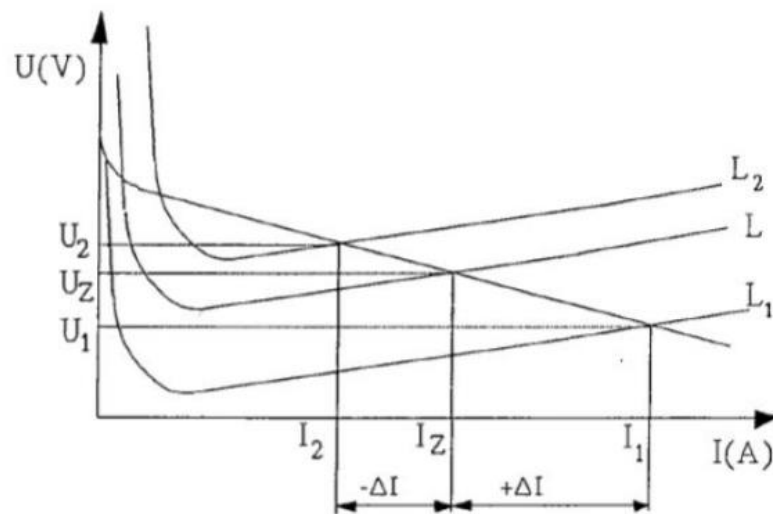
napon. Frekvencije izvora izmjenične struje ove vrste su najčešće između 10 kHz i 20 kHz. Prolaskom kroz transformator te struje postaju struje nižih frekvencija, ali znatno veće jakosti struje.“ (Garašić, I., Kožuh, Z, 2015)

„Statička karakteristika izvora struje je operativna karakteristika mjerena pod konstantnim opterećenjem izvora struje za zavarivanje u svrhu promatranja ponašanja navedenog izvora pod različitim strujnim opterećenjima. Statičke karakteristike dijele se na:

- strmopadajuća - konstantna jakost struje
- ravna - konstantan napon struje.“ (Kralj, S., Andrić, Š., 1992.)

„Kod ravne karakteristike koja se koristi kod MAG postupka zavarivanja jačina struje se mijenja s visinom električnog luka, a izvor struje održava napon struje konstantnim. Karakteristika se još naziva i blagopadajuća zbog toga što (iako se uzima da je krivulja konstantna) krivulja ipak pokazuje blagi pad uzrokovan unutarnjim otporima građe izvora struje za zavarivanje. Kod ravne karakteristike težnja je održati konstantnu visinu luka, jer bilo kakva promjena visine luka povlači za sobom promjenu jakosti struje što rezultira velikom promjenom depozita u zavaru. Zbog toga se primjenjuje automatska regulacija dužine električnog luka. Kod MAG postupka koristi se unutarnja ili strujna regulacija. Ako se duljina električnog luka poveća potreban je veći napon za održavanje luka pa se njegova karakteristika pomiče prema gore (L2), što znači da nastane trenutna ravnoteža. U tom slučaju struja se smanji za $-\Delta I$, što znači da se smanjila količina generirane topline. Zbog nedovoljne količine topline brzina taljenja žice je manja od prethodno namještene (dodaje se više žice nego što se stigne rastaliti) te se vrh žice spušta prema radnom komadu i električni luk se skraćuje. Analogno vrijedi i za smanjenje duljine električnog luka. Takav efekt se naziva „samoregulacija“ električnog luka i on se ostvaruje sa pomoću elektromotora za dodavanje žice koji je reguliran izlaznim naponom izvora struje koji zbog slabijeg intenziteta promjene osigurava sporiju reakciju dodavanja žice što znači i veću stabilnost procesa, dok intenzivnija promjena jakosti struje utječe na brzinu taljenja žice.“ (Garašić, I., Kožuh, Z, 2015)

Slika 4. Blagopadajuća karakteristika izvora struje za zavarivanje

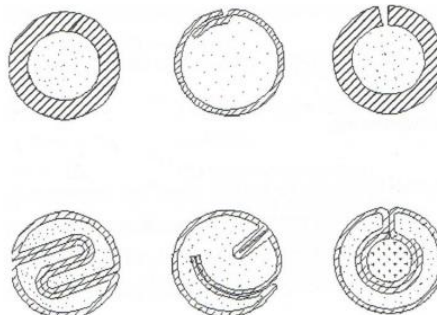


Izvor: Bee, J.V., Garrett, G.G., Taplin, D.M.R.(1985.)

3.3. Žice za MAG zavarivanje

Kod MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm. Površina žice mora biti vrlo glatka, vrlo točnih dimenzija te uredno namotana na kolut kako bi se izbjegli problemi sa dodavanjem materijala prilikom zavarivanja. Čelične žice su pobakrene ili poniklane kako bi se osigurala otpornost na koroziju i poboljšao električni kontakt između žice i radnog komada. Za MAG zavarivanje mogu se koristiti i praškom punjene žice. Presjeci takvih žica mogu biti različiti, a ovise o načinu proizvodnje (slika x.y.). Ovisno o vrsti punjene žice neke se koriste uz plinsku zaštitu, a neke same stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre pa nema potrebe za dodatnim zaštitnim plinom. (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)

Slika 5. Presjeci praškom punjenih žica



Izvor: S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić (2015.)

3.4. Uloga plinova pri zavarivanju

„Mjesto zavarivanja i kapljice rastaljenog metala za vrijeme leta kroz električni luk i talina moraju se zaštititi od djelovanja okolne atmosfere. Ta zaštita se uspješno može izvesti pomoću odgovarajućih plinova. Postoji mogućnost primjene čitavog niza plinova bilo aktivnih plinova ili njihovih mješavina.

Poznavanje utjecaja zaštitnih plinova je neophodno da bi se moglo ocijeniti njihovo djelovanje. Utjecaj zaštitnih plinova održava se na:

- električno-fizikalna svojstva električnog luka i time na prijenos metala s elektrode na radni komad,
- metalurške procese u talini zavara,
- tehnološke parametre.

Specifična gustoća zaštitnog plina ima veliki značaj za efikasnost zaštite mjesta zavarivanja od utjecaja okolne atmosfere. Ako se usporede najčešće upotrebljavani plinovi, može se uočiti da argon, koji je najgušći od inertnih plinova (10 puta gušći od helija), te ugljikov dioksid, koji je za 1/10 gušći od argona oblikuju dobar zaštitni omotač. S druge strane dušik, helij i vodik skloni su turbulentnom strujanju pri izlazu iz sapnice, Posebno je kod helija potreban veći protok za istu kvalitetu zaštite u položenom položaju (jedino je zbog male gustoće prikladan pri zavarivanju u nadglavnom položaju).“ (Kralj, Kožuh, Andrić 2015.)

3.5. Metode prijenosa dodatnog materijala u električnom luku

„Kod konvencionalnih izvora struje za zavarivanje ostvaruju se različiti načini prijenosa metala u električnom luku ovisno o jačini narinute struje i napona, promjeru žice i vrsti zaštitnog plina. Pri tome, prema gruboj podjeli, razlikujemo područje kratkih spojeva, područje mješovitog luka te područje rasprskavajućeg luka. Impulsno zavarivanje predstavlja kontrolirani prijenos materijala slobodnim letom i to u području niskih i visokih parametara zavarivanja zahvaljujući visokim razinama impulsne struje. Suvremeni postupci MAG zavarivanja se odlikuju modificiranim načinima prijenosa metala kod kojih je uvijek osnova kratki spoj, rasprskavajući luk i impulsna struja. To se postiže kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja (tzv. waveform control), indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu metala (površinska napetost), kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istom radnom ciklusu, promjenom balansa polariteta i uvođenjem

izmjenične struje te uvođenjem mehaničkog upravljanja odvajanja kapljice koja kompenzira vrlo mali unos topline koji je u konvencionalnom sustavu nedostatan za odvajanje dodatnog materijala. Danas se zahvaljujući razvoju uređaja moguće integracije dvije impulsne razine u istom procesu. Važno je naglasiti da se kontrola procesa provodi u svakom trenutku diskretizacijom vrijednosti tj. primjenom digitalne tehnologije. Ovisno o načinu prijenosa metala se drastično mijenjaju dinamičke karakteristike koje se mogu jednostavno grafički prikazati te dijagramima ukazati na prednosti i nedostatke pojedine karakteristike.“ (Kožuh, Z., Garašić, I., 2016)

3.5.1. Prijenos metala električnim lukom kratkog spoja

„Prijenos metala kratkim spojevima se ostvaruje pri malim gustoćama struje i malim naponima, i karakterizira ga niski unos energije. Upotrebljava se za zavarivanje tankih limova i u prisilnim položajima zavarivanja, pri zavarivanju žicama promjera do 1,2 mm uz napon 15 V do 23 V i jakosti struje do 190 A.“ (Lončar, D., 1987.)

„Kada žičana elektroda dotakne radni komad, struja počinje eksponencijalno rasti. Brzina rasta ograničena je induktivnim otporima kruga. Obzirom da u strujnom krugu otpor ima konačnu vrijednost, napon polagano raste zbog povećanja otpora. Do povećanja otpora dolazi zbog toga što povećanjem struje dolazi do pojačanog zagrijavanja vrha žice (efekt $Q = I^2 R$, sve do taljenja), a s povećanom strujom, povećava se i pinch efekt. On dovodi do smanjenja presjeka žice (izazivajući povećani otpor) i konačno do otkidanja zagrijanog vrha žice. Time se kratki spoj prekida i električni luk se ponovno uspostavlja, a struja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost. Skok napona je, opet zbog induktiviteta krugova nešto veći od nominalnog i u toku vremena se smanjuje na nominalnu vrijednost. Treba imati u vidu da se sve ovo zbiva dok se žičana elektroda jednolikom brzinom kreće prema radnom komadu. Dakle, kada žica ponovno premosti razmak nastao otkidanjem njenog vrha, ponavlja se ciklus. Broj ovakvih ciklusa u jednoj sekundi varira u ovisnosti od promjera žice i nametnutih parametara. Pri stabilnim parametrima obično ima između 100 i 200 kratkih spojeva u sekundi.“ (Kralj, S., Andrić, Š., 1992.)

3.5.2. Prijenos metala prijelaznim električnim lukom

„Pojava prijelaznog električnog luka se zamjećuje pri nižim vrijednostima jakosti struje, ali opet dovoljno visokim da prijenos metala u kratkom spoju učini vrlo nepredvidivim.

Tijekom prijelaznog el. luka se preporuča koristiti što inertniji plin (Ar + He) zbog nasilnog odvajanja kapljica koje nepravilnim preletom do rastaljene kupke metala mogu navući neželjene elemente u sam metal zavara. Zavarivanje pomoću prijelaznog el. luka je obilježeno mješovito stabilnim radom u kratkom spoju te nestabilnim radom rasprskavajućeg luka gdje se kapljice nepravilno formiraju te prilikom dodira sa rastaljenom talinom često nasilno rasprskavaju. Prilikom zavarivanja uz niske vrijednosti napona struje je el. luk vrlo kratak te se veći dio žice elektrootporno zagrijava i sudara sa radnim komadom, a zbog visokog unosa topline kapljica vrlo intenzivno rasprskava. Zavarivanje provedeno uz više vrijednosti napona struje manifestira visok el. luk koji ne zagrije radni komad i kraj žice dovoljno, čime se događa naljepljivanje ili nedovoljno protaljšivanje te nagomilavanje zavara. Unatoč ograničenjima, pronalaženje optimalnog seta parametara u kombinaciji s vještinom zavarivača ovaj proces mogu učiniti industrijski vrlo prikladnim.“ (Kožuh, Z., Garašić, I., 2016)

3.5.3. Prijenos metala rasprskavajućim električnim lukom

„Prijenos metala rasprskavajućim lukom ostvaruje se pri naponima od 25 V do 40 V i jakostima struje zavarivanja od preko 200 A, pri zavarivanju žicama promjera 1,2 mm. Ovim prijenosom postiže se visok učinak taljenja. Prijenos kapi se zbog visoke gustoće struje vrši bez kratkih spojeva. Ova se vrsta električnog luka koristi pri zavarivanju žicama promjera većim od 1,2 mm za popunjavanje žlijeba pri zavarivanju debelih limova, te za zavarivanje debljih materijala.“ (Lončar, D., 1987.)

„Za ovaj način prijenosa materijala karakteristično je da se prijenos dodatnog materijala s vrha elektrode vrši slobodnim letom malih kapljica kroz atmosferu luka. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u kontakt s osnovnim materijalom. To znači da sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (manje ili više aksijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Da bi se ostvario ovakav način prijenosa dodatnog materijala potrebna je velika energija.“ (Kralj, S., Andrić, Š., 1992.)

„Naime, potrebno je ostvariti velike sile i zagrijavanjem ili na neki drugi način smanjiti sile površinske napetosti koje utječu na veličinu kapljice metala. Kod postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi taljivom elektrodom dosta jasno se može uočiti veličina struje kada nestaju kratki spojevi, to jest kada se ostvaruju uvjeti za prijenos rasprskavajućim lukom. Ta veličina se naziva kritičnom strujom (I_{KR}). I_{KR} je svojstvena za određene zaštitne plinove i njihovim

sastavom se može utjecati na njenu veličinu. S obzirom na veliku toplinsku energiju oslobođenu u rasprskavajućem električnom luku, velikom strujom zavarivanja postiže se velika količina rastaljenog metala, što je povoljno za produktivnost, ali samo u slučaju zavarivanja debljih materijala i to u položenom položaju. U protivnom kod tanjih materijala postoji opasnost prokapljivanja (protaljivanja), a u prisilnim položajima i do cijedenja velike količine rastaljenog materijala zbog djelovanja sile gravitacije.“ (Kralj, S., Andrić, Š., 1992.)

3.5.4. Prijenos metala impulsnim električnim lukom

„Budući da se inače poželjan način prijenosa dodatnog materijala u malim kapljicama ostvaruje tek iznad određenog kritičnog praga (I_{KR}), razvijen je način impulsnog prijenosa dodatnog materijala. Kod ovog načina, prosječna struja zavarivanja manja je od I_{KR} koja bi dala nepravilan i neprihvatljiv prijenos grubim kapima, ali modulira se jačom strujom određene frekvencije, tako da struja varira između neke minimalne vrijednosti nazvane osnovna struja i maksimalne nazvane strujom impulsa. Pri tome osnovna struja ima zadatak da održava električni luk, dok je visina i duljina trajanja impulsa jake struje prilagođena da se premaši I_{KR} i osigura odvajanje jedne kapi po svakom impulsu. Impulsi mogu biti sinusnog, trokutastog ili četvrtastog oblika, ali za upravljanje procesom prijenosa materijala povoljniji je četvrtasti oblik. Na taj način se osigurava prijenos rasprskavajućim lukom pri malim prosječnim vrijednostima struje, tj. pri maloj ukupno unesenoj energiji. Impulsni način prijenosa zadržava prednosti, a otklanja nedostatke koje ima rasprskavajući luk, tj. moguće je primijeniti ga u svim položajima zavarivanja, te za materijale osjetljive na količinu unesene topline. Nadalje jednim promjerom žice moguće je zavariti širi raspon debljina materijala jer je i za deblje žice moguće namjestiti male prosječne struje potrebne kod zavarivanja tanjih limova.“ (Kralj, S., Andrić, Š., 1992.)

3.5.5. Prijenos metala rotirajućim električnim lukom

„Rotirajući luk je način prijenosa metala u električnom luku koji spada u grupu visokoučinskih postupaka MAG zavarivanja. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja su oni postupci MAG zavarivanja koji imaju mogućnost dodavanja jedne ili više žica brzinom većom od 15 m/min. Time se povećava količina nataljenog metala što se može iskoristiti za povećanje volumena zavara ili za povećanje brzine zavarivanja. Rotirajući luk je karakterističan po rotacijskom prijenosu rastaljenog kraja žice.

Kod rotirajućeg luka vrh žice tali se na osnovu velikog slobodnog kraja žice i velike struje zavarivanja. Uslijed povećanja slobodnog kraja žice, da ne bi došlo do pada struje zavarivanja i slabije penetracije, povećava se brzina dodavanja žice čime se struja zavarivanja održava konstantnom. Povećanjem struje zavarivanja, na kraju žice, razvija se Jouleova toplina koja tali žicu i bez utjecaja električnog luka. Povećanje topline u slobodnom kraju žice, zbog Jouleovog zakona, raste proporcionalno s njenom dužinom, vremenom i kvadratom struje te se na taj način kod iste struje prirast taljenja dodatnog materijala povećava i za 20 %. Kod prijenosa metala rotirajućim lukom koriste se plinske mješavine argona uz dodatak kisika kod kojih dolazi do snažnog smanjenja površinske napetosti taline, te se na kraju žice prvo stvara rastaljeni metal u obliku gusjenice, koji se zatim odvaja u sitne kapljice. Upravo te mješavine plinova potiskuju nestabilan visokoučinski rasprskavajući luk te omogućava izravan prijelaz iz stabilnog konvencionalnog rasprskavajućeg luka u rotirajući luk.“ (Dzelnitzki, D,2012)

3.6. Prednosti i nedostaci MAG postupka

„Glavne prednosti MAG zavarivanja su:

- zavarivanje raznorodnih materijala i različitih debljina materijala
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- visoka učinkovitost samoga postupka
- jednostavna obuka zavarivača
- lako čišćenje zavara
- unos vodika u zavar je malen (u većini slučajeva manji od 5 ml/100 g metala zavara)
- manje deformacije konstrukcija
- jeftina automatizacija
- korištenje raznih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjenih žica

Glavni nedostaci MAG zavarivanja su:

- nemogućnost zavarivanja u prisilnim položajima prilikom upotrebe aksijalnoga prijenosa metala
- kod prijenosa metala štrcajućim lukom potrebno je koristiti skuplje plinske mješavine
- kod terenskih radova potrebno je obratiti pozornost na uvjete zavarivanja (vjetar, vlaga i sl.)
- problemi kod zavarivanja aluminija u smislu dovođenja dodatnoga materijala
- moguće pojave grešaka u zavarenim spojevima
- oprema i uređaji su složene konstrukcije.“ (Golubić, M. 2018)

4. MODIFICIRANI POSTUPCI MAG ZAVARIVANJA

„Modificirani postupci MAG zavarivanja su razvijeni na temelju razvoja i modifikacija načina prijenosa metala u električnome luku. Navedeno je omogućio razvoj inverterskih izvora struje za MAG zavarivanje. Glavna svrha je postizanje bolje kvalitete zavara, bolja i veća produktivnost te optimizacija troškova.“ (Horvat, M., Kondić, V., 2012)

4.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima

Ovakav prijenos metala se često koristi u industriji zbog niskoga unosa topline, mogućnosti poput zavarivanja u svim položajima, zbog maloga stupnja deformacije i dr. Koristi se za zavarivanje limova manjih debljina jer ima manji unos topline te su iz tog razloga i manje deformacije konstrukcija. Neki od nedostataka ovakvoga prijenosa su intenzivno prskanje, mala penetracija i nestabilnost procesa. Zbog navedenih nedostataka, nastoji se ovakav prijenos metala modificirati. Neki od poznatijih modificiranih postupaka MAG zavarivanja koji se temelje na prijenosu metala kratkim spojevima su STT, CMT, FastROOT i CBT. (Grd, D., 2021.)

4.1.1. STT (Surface-Tension-Transfer) postupak zavarivanja

„STT (Surface-Tension-Transfer) postupak zavarivanja je visokoučinkovit sustav zavarivanja konstruiran za krajnji domet u karakteristikama zavarivanja. STT udružuje invertorsku tehnologiju visoke frekvencije s naprednim tehnologijama upravljanja oblikom električnog luka, koja zamjenjuju klasičnu MIG tehnologiju. STT postupak lak je za upravljanje i pogodan je za spajanje velikih količina različitih materijala od konstrukcijskog čelika pa sve do nehrđajućih čelika. STT postupak zavarivanja omogućuje kvalitetno zavarivanje u uvjetima koji otežavaju rad klasičnom MAG zavarivanju. Ti uvjeti prvenstveno uključuju zavarivanje korijena zavara kod zavarivanja cijevi, ali i zavarivanje tankih limova gdje se zahtijeva smanjeni unos topline u zoni zavara. U automatiziranom okruženju STT postupak daje visoke brzina popune na tankim materijalima. Prednost STT postupka očituje se u jednostavnosti upotrebe. Zavarivači koji se koriste MAG postupkom zavarivanja u kratkom vremenskom periodu mogu savladati i STT postupak. STT uređaj za zavarivanje vrlo je pouzdan kako u radionici tako i u terenskoj primjeni, što je posljedica robusnosti izrade. Preciznim upravljanjem strujom na STT uređaju značajno se smanjuje količina plinova nastalih pri zavarivanju, prskanje te vrijeme brušenja, čime se povećava produktivnost te smanjuju troškovi zavarivanja. STT uređaj ima

moгуćnost nezavisnog upravljanja brzinom žice od jaćine struje, a prikaz struje i napona zavarivanja omogućen je digitalnim voltmetrom i ampermetrom. Pogonski sustav žice u skladu je s cijelim uređajem pa je tako za pogon žice zadužen sustav s četiri valjka ćime se osigurava kontinuirana dobava žice bez zastoja. Pogonski sustav žice u skladu je s cijelim uređajem pa je tako za pogon žice zadužen sustav s četiri valjka ćime se osigurava kontinuirana dobava žice bez zastoja. Primjenom tehnologije upravljanja oblikom strujnog vala, STT omogućuje promjenu velićine struje u žici unutar mikro sekunde, ćime se znaćajno smanjuje ili ćak i uklanja osnovna mana zavarivanja MAG postupkom kod prijenosa metala kratkim spojevima, a to je eksponencijalni uspon struje i nekontrolirano prskanje rastaljenog materijala.“ (Ćorak, I., 2015.)

„STT izvor struje nema ni padajuću (CC) - konstantna jakost struje (eng. Constant Current) ni ravnu (CV) konstantan napon struje (eng. Constant Voltage) karakteristiku. Na osnovu trenutnih zahtjeva elektrićnog luka, uređaj osigurava izlazne parametre koji omogućuju zavarivanje kratkim spojevima, a rastaljena kapljica se prenosi u žlijeb za zavarivanje pomoću sile površinske napetosti između kapljice i kupke. STT uređaj kontinuirano prati jakost struje u elektrićnom luku te regulira istu, a optimalne karakteristike luka održavaju se i kod znaćajnijih promjena duljine slobodnog kraja žice. Uređaj je u sposobnosti regulirati struju zavarivanja u mikro sekundama, što je posljedica mikroprocesorskog upravljanja. Konstruiran je za poluautomatsku primjenu gdje se brzina zavarivanja i duljina slobodnog kraja žice konstantno mijenjaju pa zbog toga mikroprocesorska regulacija dolazi do posebnog izražaja. Moguća je uporaba razlićitih zaštitnih plinova te njihovih mješavina (CO₂ i Ar; Ar 82%- CO₂ 18%; Ar 98% - CO₂ 2%...), ovisno o vrsti osnovnog materijala koji se zavaruje. Takav naćin rada uređaja olakšava posao zavarivaću zbog toga što dolazi do manje kolićine plinova koji nastaju pri zavarivanju, manja je emisija zraćenja zbog manjeg unosa topline i nićih parametara zavarivanja, a smanjeno je i prskanje pa se potreba za naknadnim brušenjem zavarenog spoja uvelike smanjuje. Osim toga, zbog konstantne regulacije elektrićnog luka zavarivaću je olakšan rad te je smanjen utjecaj promjene slobodnog kraja žice. Smanjeni unos topline smanjuje mogućnost nastajanja deformacija i zaostalih naprezanja nastalih uslijed zavarivanja. Zbog tih karakteristika STT postupak najćešće se koristi za zavarivanje korijenskog zavara u grlu žlijeba. STT postupak je modificirani MAG postupak s prijenosom metala kratkim spojevima. To je sasvim nov, razlićit postupak zavarivanja s definiranim izlaznim oblicima napona i struje tijekom trajanja procesa zavarivanja, a pri kojime se rastaljene kapljice prenose u rastaljenu kupku pomoću sila površinske napetosti. Proces zavarivanja odvija se ciklićki, a postavljanjem ispravnih parametara osigurava se stabilnost elektrićnog luka kao i stabilnost cjelokupnog

procesa zavarivanja. Struja zavarivanja se regulira u mikrosekundama, ovisno o iznosu napona u električnom luku.“ (Čorak, I., 2015.)

4.1.2. Cold metal transfer

„CMT (engl. Cold metal transfer) postupak je jedna vrsta napretka u tehnologiji zavarivanja. Ovakva vrsta modificiranog MAG postupka omogućava novu primjenu koju konvencionalni postupak nije mogao pokriti, a to je mogućnost spajanja čelika i aluminija. Stoga se može zaključiti kako postoje materijali koji ne mogu podnijeti stalnu toplinu koja se oslobađa tijekom zavarivanja i zbog toga su nam potrebne niže temperature pri zavarivanju . CMT postupak se može opisati kao postupak gdje je unos topline relativno mali u usporedbi s konvencionalnim postupkom zavarivanja. Prilikom primjene ovoga postupka, žica odnosno taljiva elektroda se giba „push – pull“ mehanizmom, s prosječnom frekvencijom oscilacija i do 70 Hz.“ (Rosado, T., Almeida, P.,)

4.1.3. FastROOT

„FastROOT je modificirani postupak MAG zavarivanja kod kojeg se struja i napon kontroliraju digitalno. Postupak se zasniva na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima. Prijenos metala kod ovog postupka odvija se tako da se nakon prvog stanja kratkog spoja, u kojem dolazi do odvajanja kapljice "pinch" efektom, aktivira drugi strujni interval (sekundarni strujni impuls) koji služi za oblikovanje spoja (zagrijavanje osnovnog materijala i zagrijavanje vrha žice pripremajući ih za novi ciklus). Nakon toga struja pada na minimalnu vrijednost što omogućava stabilan električni luk do sljedećeg kratkog spoja. FastROOT postupak se koristi za zavarivanje korijenskog prolaza i za zavarivanje tankih limova. Ovaj postupak omogućava relativno mali unos topline s malim deformacijama radnog komada, a sve to bez prskanja do kojeg dolazi kod konvencionalnog prijenosa metala kratkim spojevima.“ (Mikulić, M., 2018.)

4.1.4. Controlled bridge transfer

„CBT (engl. Controlled Bridge Transfer) je modificirana metoda prijenosa metala koja kombinira prednosti impulsnog i klasičnog MAG zavarivanja. Temelji se na preciznom podešavanju jakosti struje u odnosu na napon električnog luka što omogućava stabilizaciju električnog luka i upravljanje prijenosom metala tijekom kratkog spoja. Neposredno prije uspostave električnog luka smanjuje se jakost struje te se rastaljena kapljica prenosi u talinu pomoću sila površinske napetosti, čime se izbjegava pojava rasprskavanja. Ovaj postupak se primjenjuje za zavarivanje korijenskih prolaza i za zavarivanje limova manjih debljina.“ (Mikulić, M., 2018.)

4.2. Visokoučinski postupci MAG zavarivanja

„Visokoučinski postupci zavarivanja su oni postupci koji uz ostvarivanje zahtijevane kvalitete i pouzdanosti zavarenog spoja te prihvatljive cijene zavarene konstrukcije povećavaju i produktivnost zavarivanja. Produktivnost zavarivanja karakteriziraju količina depozita, broj i duljina izvedenih zavara i vrijeme potrebno za zavarivanje. Najčešće korištene visokoučinske modifikacije MAG postupka zavarivanja su: FCAW, Tandem postupak, prijenos metala rotirajućim lukom i Buried Arc metoda.“ (Mikulić, M., 2018.)

4.2.1. Flux Cored Arc Welding

„FCAW (eng. Flux Cored Arc Welding) visokoučinski je postupak MAG zavarivanja kod kojeg se umjesto standardne, pune žice, koriste žice punjene praškom. Neki od mogućih presjeka praškom punjenih žica prikazani su na slici 26. Postupak se odvija u zaštitnoj atmosferi koju je moguće ostvariti na dva načina shematski prikazana na slici 27. Prvi način isti je kao i kod korištenja pune žice, odnosno koristi se dodatni izvor koji zaštitni plin dobavlja do električnog luka. Nedostatak kod ovog načina je stvaranje troske na zavaru što zahtijeva naknadno čišćenje zavarenog spoja. Drugi način je specifičan za ovaj postupak i naziva se još i metoda samozaštite. Ovdje se reakcijom sastojaka iz žice formira zaštitni plin. U odnosu na prvu metodu provarljivost je manja, kao i kvaliteta zavara zbog čega se koristi za zavarivanje manje kritičnih zavara. Kod primjene metode samozaštite potreban je nešto veći razmak između radnih komada.“ (Izvor: <http://www.weldguru.com/support-files/flux-cored-arc-welding.pdf>, preuzeto 22.08.2024.)

4.2.2. Tandem Welding

„Tandem MAG postupak zavarivanja je modificirani MAG postupak koji za postupak zavarivanja koristi dvije žice koje se kontinuirano tale i ostvaruju zavareni spoj. Svaka od njih ima svoj izvor energije i nisu u fizičkom kontaktu. Prva žica (vodeća) koja je većeg promjera daje određenu dubinu penetracije, dok druga žica (prateća) ispunjava kupku taline, odnosno daje izgled i oblik zavaru.“ (Mikulić, M., 2018.)

„Najčešći način prijenosa metala kod ove metode je prijenos metala impulsnim lukom. Proces se regulira vremenskim razmakom između impulsa na pojedinim elektrodama. Upotrebom impulsnog luka na vodećoj elektrodi kontrolira se unos topline što omogućuje primjenu metode na relativno tankim materijalima i zavarivanje u različitim položajima.“ (Rosado, T., Almeida, P.,)

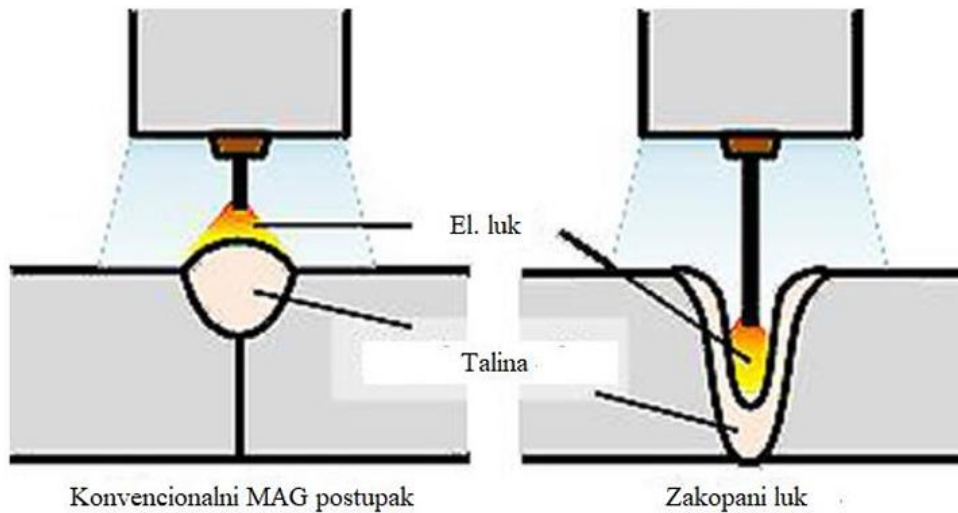
4.2.3. Rotirajući luk

„Rotirajući luk je način prijenosa metala u električnom luku kod kojeg se rastaljeni kraj žice rotacijski prenosi do taline. Vrh žice se tali zbog velikog slobodnog kraja žice (25 mm do 35 mm) i velike struje zavarivanja. Pad struje zavarivanja prilikom povećanja slobodnog kraja žice sprječava se povećanjem brzine dodavanja žice. Tako struja ostaje konstantna i održava se jednolika penetracija. Kod prijenosa metala rotirajućim lukom koriste se plinske mješavine argona i kisika iz razloga što one bitno utječu na smanjenje površinske napetosti taline i omogućavaju izravan prijelaz iz stabilnog konvencionalnog štrcajućeg luka u rotirajući luk. Rastaljeni metal stvara se u obliku gusjenice nakon čega se odvajaju sitne kapljice. Uslijed djelovanja radijalne komponente magnetskog polja u električnom luku, rastaljena gusjenica pomiče se iz simetrale i počinje rotirati. Električni luk se zbog toga konusno proširuje, a rastaljeni metal u sitnim kapljicama ulazi u talinu zavaru. Zavari su plosnati i široki.“ (Mikulić, M., 2018.)

4.2.3. Zakopani luk – „D-Arc“

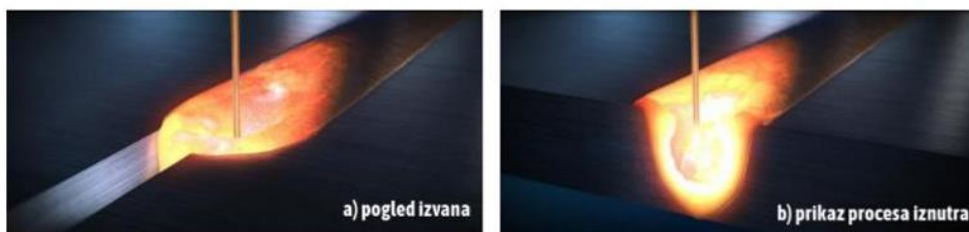
Zakopani električni luk (eng. Buried arc) način je prijenosa metala kod kojeg je električni luk, zajedno s vrhom rastaljene žice, postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara.

Slika 6. Shematski prikaz konvencionalnog MAG postupka i zakopanog luka



Izvor: <https://servus.hr/strucni-clanci/razvoj-visokoucinskog-zavarivanja-celika-debele-limove-primjenom-zakopanog-elektricnog-luka-velike-struje/>

Slika 7. Prikaz zakopanog luka



Izvor: <https://servus.hr/strucni-clanci/razvoj-visokoucinskog-zavarivanja-celika-debele-limove-primjenom-zakopanog-elektricnog-luka-velike-struje/>

„Iz razloga što je izvor topline postavljen dublje u odnosu na konvencionalni električni luk, kod zakopanog luka postiže se veća penetracija što ga čini prikladnim za zavarivanje debljih materijala. Tako je ovim postupkom moguće zamijeniti neke od postupaka koji se koriste za zavarivanje debljih materijala, a imaju određena ograničenja (položaj i smjer zavarivanja, priprema) kao što su zavarivanje plazmom, laserom ili hibridni postupci zavarivanja.

Konvencionalni MAG postupak zavarivanja nije dovoljno učinkovit za zavarivanje debljih materijala zbog potrebne velike količine dodatnog materijala uz zavarivanje u više prolaza što dovodi do velikih deformacija radnog komada. Svi navedeni nedostaci također se mogu eliminirati primjenom zakopanog luka. Razlog zbog kojeg se zakopani luk rijetko upotrebljavao u proizvodnji je njegova podložnost nestabilnom ponašanju i povremenoj pojavi kratkih spojeva, odnosno vrlo zahtjevna stabilizacija procesa naročito u području jakih struja. Brojnim istraživanjima na području tehnike stabilizacije zakopanog luka razvijen je visokoučinkoviti robotizirani sustav nazvan „D-Arc“. Uz robot, sustav čine dva izvora struje za zavarivanje koji mogu isporučiti struju do 1000 A. Ovim sustavom moguće je održavati stabilan proces pri jakim strujama. Koristi ga se uz zaštitni plin 100 % CO₂ uz primjenu pune žice te omogućuje zavarivanje nelegiranih čelika debljine do 20 mm u jednom prolazu.“ (Izvor: <https://servus.hr/strucni-clanci/razvoj-visokoucinskog-zavarivanja-celika-debele-limove-primjenom-zakopanog-elektricnog-luka-velike-struje/>)

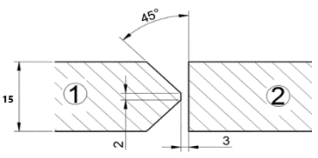
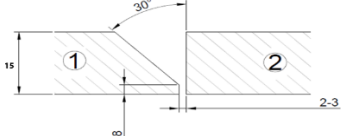
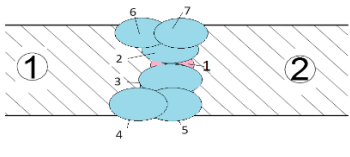
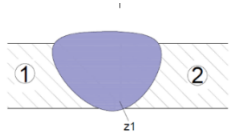
Prednosti „D-Arc“ tehnologije u odnosu na konvencionalni MAG postupak:

- veća penetracija
- veća količina rastaljenog metala
- veća produktivnost
- manje deformacija uslijed manjeg broja prolaza.

Nedostaci :

- zahtjevnija stabilizacija procesa
- cijena.

Tablica 1. Usporedba presjeka pripreme i zavora za konvencionalni MAG i visokoučinskim „D-Arc“ postupak za sučeljeni spoj

	Konvencionalno MAG zavarivanje	D-Arc
	<p>Struja zavarivanja: 260 A</p> <p>Napon el.luka: 26 V</p> <p>Brzina zavarivanja: 40 cm/min</p> <p>Promjer žice: Ø 1,2 mm</p> <p>Protok plina: 16 l/min</p>	<p>Struja zavarivanja: 520 A</p> <p>Napon el.luka: 42 V</p> <p>Brzina zavarivanja: 35 cm/min</p> <p>Promjer žice: Ø 1,6 mm</p> <p>Protok plina: 30 l/min</p>
Priprema		
Poprečni presjek zavora		
Broj prolaza	7	1

Izvor: Izradio autor

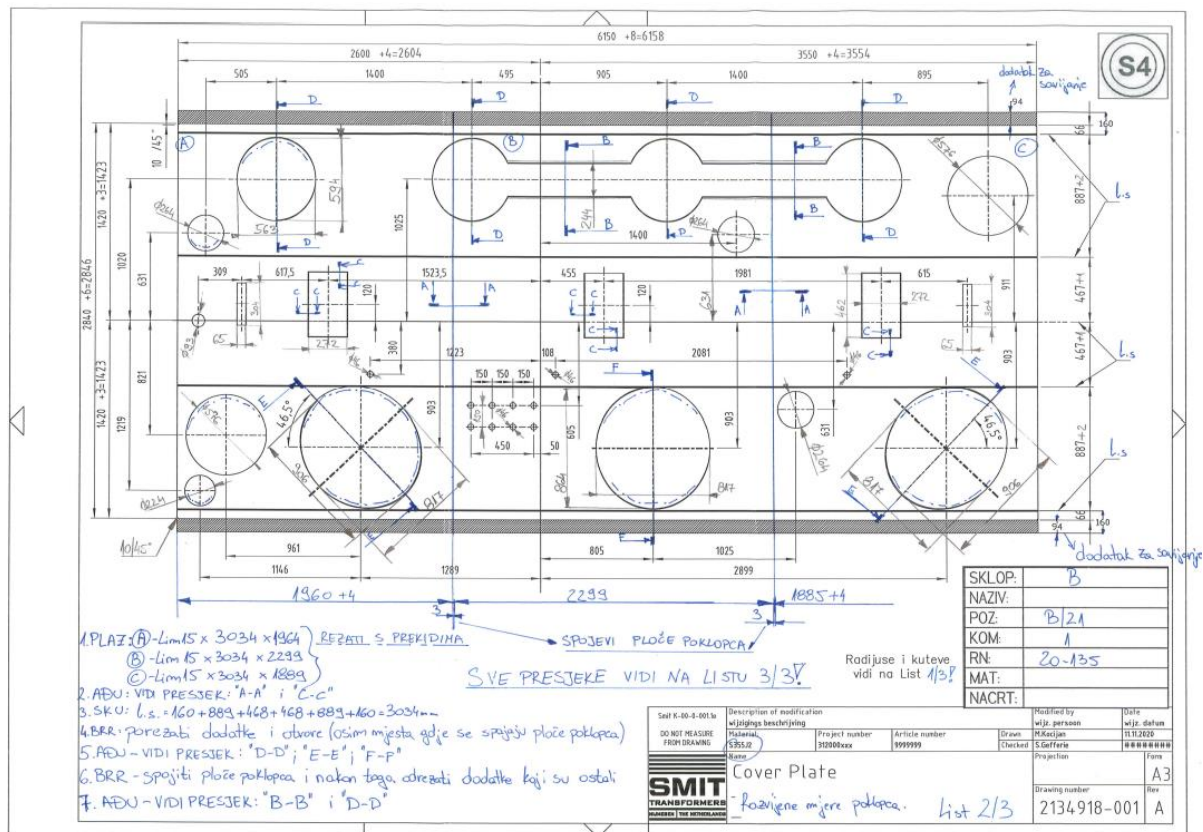
5. EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni dio rada provodio se u svrhu usporedbe produktivnosti u zavarivanju trafokotlova na najčešće izvedenim debelostjenim spojevima. Definirano je da se radi o sučeljenom i kutnom zavaru, nelegiranog čelika, kvalitete S355J2 i debljine od 15mm. Prvi dio eksperimentalnog rada napravljen je u lokalnom poduzeću PRIMABIRO d.o.o. gdje se obavila kompletna priprema obratka za oba postupka i zavarivanje konvencionalnog MAG postupka. Kasnije se odradilo D-Arc zavarivanje sa pripremljenim komadima u lokalnom poduzeću SERVUS d.o.o.. Nakon zavarivanja napravljeni su makroizbrusci na najboljim probama za sve 4 kombinacije zavara koje su se provodile u završnom radu. Sa zadovoljenim parametrima izrađen je WPS te je odrađeni proračun utroška zavarivanja i usporedba produktivnosti.

5.1. Dokumentacija

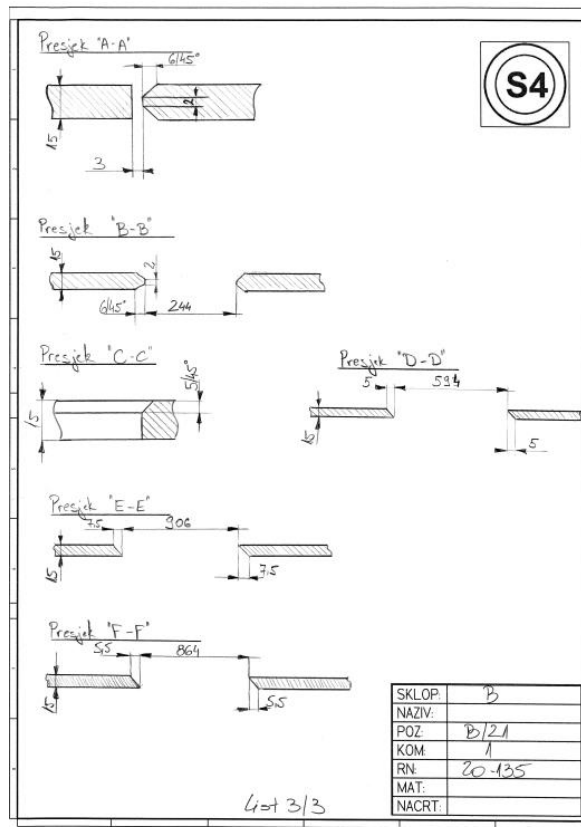
Prema priloženom nacrtu (slika 8.) vidi se da se radi o ploči poklopca debljine 15 mm koja zahtjeva "štukanje" iz više komada. Na slici 9. vide se sve potrebne pripreme za ugradnju raznih segmenata na ploču poklopca, a najbitnija je pod presjekom "A-A" jer ona služi za spajanje ploče poklopca iz više segmenata.

Slika 8. Nacrt ploče poklopca trafokotla



Izvor: Izradio autor

Slika 9. Nacrt ploče poklopca trafokotla

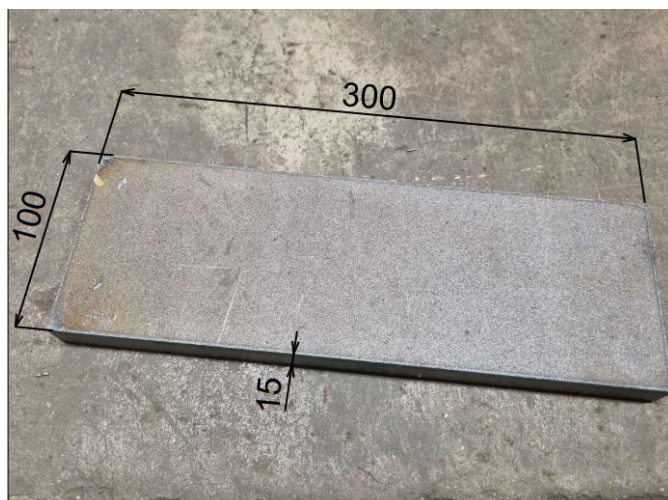


Izvor: Izradio autor

5.2. Priprema radnih komada za zavarivanje

Potrebni radni komadi su odrezani na plazma rezačici u dimenzija 300x100x15mm.

Slika 10. Odrezani probni komadi



Izvor: Fotografirao autor

Na radni komad označuje se radniku kakvu kosinu je potrebno izraditi.

Slika 11. Odrezani probni komadi



Izvor: Fotografirao autor

Prilikom izrade kosine za pripremu za zavar potrebno je za sigurnost dobro zategnuti radni komad za radni stol.

Slika 12. Stezanje radnog komada za radni stol



Izvor: Fotografirao autor

Za izradu kosine koristio se Promotech BM-18 prijenosni višenamjenski stroj za rezanje ploča i cijevi kojeg pokreće snažan električni motor. Omogućuje glodanje ravnih rubova do 18 mm širine kosine, kontura i rupa od 40 mm u promjeru te zaokruživanje čelične konstrukcije prije bojanja ili premazivanja radijusom R2, R3, R4 ili R5. Novo šesterokutno učvršćenje glava za glodanje povećava izdržljivost zakošenja i čini zamjenu glava praktičnijom i lakšom za korištenje.

Slika 13. Promotech BM-18



Izvor: Fotografirao autor

Tablica 2. Tehničke specifikacije stroja za izradu kosina

BM-18 TECHNICAL SPECIFICATION	
Power supply	1- 220-240 V, 50-60 Hz 1- 110-120 V, 50-60 Hz
Power	2200 W
Spindle speed (without load)	1800-5850 rpm
Maximum bevel width	b=18 mm (0.71", Fig. 1)
Bevel angle (depending on milling head)	$\beta = 22.5^\circ, 30^\circ, 37.5^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ (Fig. 1)
Minimum workpiece thickness	2 mm (0.08")
Minimal diameter of countersinking	ca 40 mm (1.57")
Rounding edges	R2, R3, R4, R5 (Fig. 2)
Dimensions (L x W x H)	585 mm (23.0") x 156 mm (6.1") x 238 mm (9.4")
Weight (without milling head)	10 kg (22 lbs)
Product code 220-240 V, 50-60 Hz	UKS-0670-10-20-00-0
Product code 110-120 V, 50-60 Hz	UKS-0670-10-10-00-0

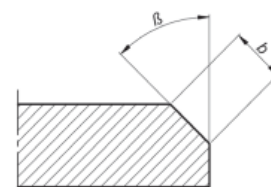


Fig. 1

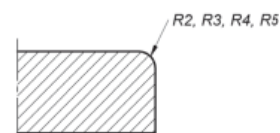
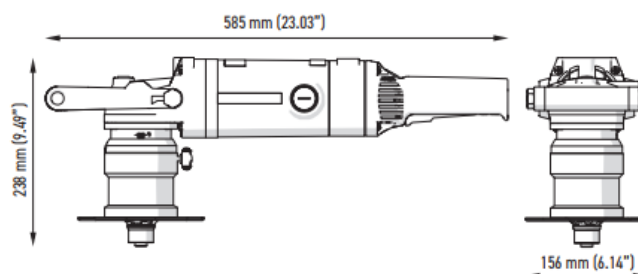


Fig. 2



Basic set:

- BM-18 beveling machine without accessories
- Plastic box
- 32mm flat wrench
- Allen wrench hex s=6
- Grease for screws (5 g, 0.17 oz)
- Operator's Manual (English)



Izvor: <https://www.promotech.eu/en/product/bm-18-multitask-plate-and-pipe-beveller/>

Slika 14. Priprema za zavar D-Arc



Izvor: Fotografirao autor

5.3. Zavarivanje konvencionalnim MAG postupkom

a) Sučeljeni zavar

Slika 15. Dva radna komada spremna za spajanje konvencionalnim MAG postupka



Izvor: Fotografirao autor

Prvi prolaz je uvijek korijenski i zavaruje se od 110A do 130A, na naponu el. luka od 17V, a brzina zavarivanja mu iznosi 25 cm/min što nam daje 4,6 kJ/cm unosa topline.

Slika 16. Korijenski zavar



Izvor: Fotografirao autor

Nakon svakog prolaza kod zavarivanja potrebno je očistiti zavar od nečistoća i troske.

Slika 17. Čišćenje nečistoća u zavaru sa kutnom brusilicom



Izvor: Fotografirao autor

Dobiveni rezultat je zavareni sučeljeni spoj od 7 prolaza.

Slika 18. Zavareni sučeljeni zavar konvencionalnim MAG postupkom



Izvor: Fotografirao autor

b) Kutni zavar

Slika 19. Priprema za kutni zavar konvencionalnim MAG postupkom



Izvor: Fotografirao autor

Slika 20. Zavareni kutni zavar sa 3 prolaza



Izvor: Fotografirao autor

5.4. Zavarivanje visokoučinskim D-Arc postupkom

D-Arc zavarivanje vršilo se sa Daihen, OTC zavarivačkim aparatom.

Slika 21. Oprema za D-Arc zavarivanje



Izvor: Fotografirao autor

Slika 22. Pištolj i vodilica za D-Arc zavarivanje

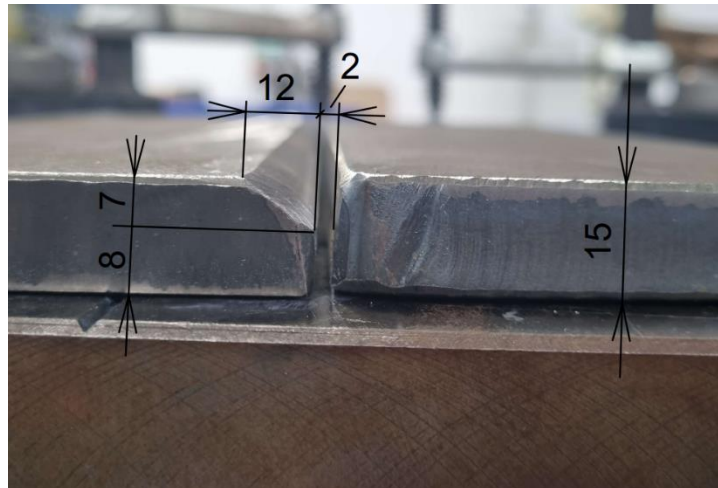


Izvor: Fotografirao autor

a) Sučeljeni spoj

Potrebna priprema za D-Arc zavarivanje sučelnog spoja je nešto manja prema presjeku od konvencionalnog MAG zavarivanja i odražuje se samo sa jedne strane te je potreban razmak od minimalno 2 mm.

Slika 23. Priprema radnih komada za zavarivanje D-Arc postupkom za sučeljeni spoj



Izvor: Fotografirao autor

Sa donje strane potrebno je staviti keramiku zbog jakih struja kojima se zavaruje.

Slika 24. Keramika za zavarivanje



Izvor: Fotografirao autor

b) Kutni spoj

Slika 25. Priprema za kutni zavar



Izvor: Fotografirao autor

Nakon nekoliko proba zadovoljeni su parametri za kutni zavar.

Slika 26. Kutni zavar D-Arc postupkom



Izvor: Fotografirao autor

5.5. Mjerenje dimenzija zavora

Kutni zavar mjeri se pomičnim mjerilom te se nakon toga iščitava zadovoljena veličina a7 zavora.

Slika 27. Mjerenje veličine zavora pomičnim mjerilom



Izvor: Fotografirao autor

5.6. Makroizbrusci

Za određene spojeve odradili su se makroizbrusci. Prvo su se odrezali zavareni komadi na tračnoj pili i izbrusili su se zavari pomoću brusnih papira granulacije 150 na tračnoj brusilici. Zatim se zavareni spoj namaže otopinom te kroz nekoliko sekundi obriše vodom. Na kraju se zavareni spoj polakira bezbojnim lakom.

Slika 28. Makroizbrusak sučeljenog spoja zavarenog konvencionalnim MAG postupkom



Izvor: Fotografirao autor

Slika 29. Makroizbrusak kutnog spoja zavarenog konvencionalnim MAG postupkom



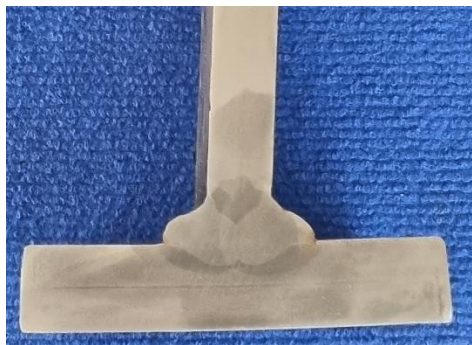
Izvor: Fotografirao autor

Slika 30. Makroizbrusak sučeljenog spoja zavarenog visokoučinskim D-Arc postupkom



Izvor: Fotografirao autor

Slika 30. Makroizbrusak kutnog spoja zavarenog visokoučinskim D-Arc postupkom



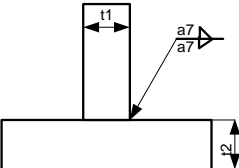
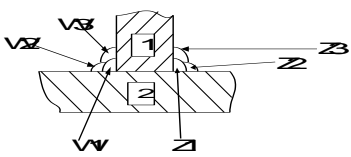
Izvor: Fotografirao autor

Tablica 3. WPS konvencionalnog MAG postupka za kutni zavar

SPECIFIKACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA
WELDING PROCEDURE SPECIFICATION – WPS
 Oznaka / Designation: **MAG DFW P**

Proizvođač / Manufacturer		PRIMABIRO d.o.o. Čakovec, Croatia		Položaj zavarivanja Welding position	PB
WPQR		0036-HR-16-04- 1221-001		Našim prijenosa metala Mode of metal transfer	Pulsed transfer
Vrsta spoja i zavara / Joint type and weld type		T spoj / DFW a7 ml bs		Vrsta mehaniziranog zavarivanja Type of mechanized welding:	Djelomično mehanizirano / Partly mechanized
Br. No.	Kvaliteta materijala Material quality	Debljina materijala Material thickness	Vanjski promjer Outside Diameter	Oznaka materijala Parent material designation	Grupa materijala / Group No. ISO/TR 15608
1	S355J2	15 mm	-	EN 10025-2	1.2
2	S355J2	15 mm	-	EN 10025-2	1.2
Način pripreme i čišćenja / Preparation and cleaning :				rezanje i brušenje	

Pojedinosti pripreme žlijeba / Weld preparation details (Sketch, Drawing)

Oblik spoja / Joint Design	Redoslijed zavarivanja / Welding sequences
	

Pojedinosti postupka zavarivanja / Welding details

Prolaz zavara Run	Postupak zavarivanja Welding Process	Promjer dodatnog materijala Size of filler material (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta struje-polaritet Type of current - polarity	Brzina žice Wire feed speed (m/min)	Brzina zavarivanja Travel speed (cm/min)	Unos topline Heat input (kJ/cm)
Z1-Z3	135	1,2	220	25,0	= +	8,0	45	5,9
W1-W3	135	1,2	220	25,0	= +	8,0	52	5,1

Dodatni podaci / Other data :

Dodatni materijal / Filler material:		Zaštitni plin Shielding gas	Prašak Flux	Zaštita korijena Backing gas
Oznaka i standard Mark and specification	G4Si1: EN ISO 14341-A	EN ISO 14175:2008 M21-ArC-18%	-	-
Oznaka i proizvođač Make and trade name	Ø1,2mm, AS-SG3 ASKAYNAK L.E.	Ferroline C18 Ar +18%CO2 Messer – Croatia	-	-
Posebne upute za sušenje Any special baking or drying	Ne			
Protok plina / Gas flow rate :		16.0 L / min	-----	- L / min

Vrsta i promjer volframove elektrode Tungsten electrode size and type	-	Pojedinosti žljebljenja i podloške Details of gouging and backing	-
Temperatura predgrijavanja Preheat Temperature	≥96°C 100°C za ≥50mm S235JR za ≥ 30mm S355J2	Međuslojna temperatura Interpass Temperature	≤ 300°C

Naknadna toplinska obrada i/ili odžarivanje / Postweld heat treatment :

- vrijeme, temperatura, proces / time, temperature, method	- brzina zagrijavanja i hlađenja / heating and cooling rate:
-	-

Razmak kontaktne sapnice / Standoff distance to work piece: 15 mm	Kut postavljanja sapnice / Torch angle: -
--	---

Izradio / Made by: Mihael Kocijan	Datum / Date: 12.07.24.
Provjerio / Checked by: Saša Latin, bacc.ing.mech. EWE	

Tablica 4. WPS visokoučinskog D-Arc postupka za kutni zavar

SPECIFIKACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA WELDING PROCEDURE SPECIFICATION – WPS Oznaka / Designation: D- Arc DFW P
--

Proizvođač / Manufacturer		Čakovec, Croatia		Položaj zavarivanja Welding position	PB
WPQR		-		Našim prijenosa metala Mode of metal transfer	Pulsed transfer
Vrsta spoja i zavara / Joint type and weld type		T spoj / DFW a7 bs		Vrsta mehaniziranog zavarivanja Type of mechanized welding:	Djelomično mehanizirano / Partly mechanized
Br. No.	Kvaliteta materijala Material quality	Debljina materijala Material thickness	Vanjski promjer Outside Diameter	Oznaka materijala Parent material designation	Grupa materijala / Group No. ISO/TR 15608
1	S355J2	15 mm	-	EN 10025-2	1.2
2	S355J2	15 mm	-	EN 10025-2	1.2
Način pripreme i čišćenja / Preparation and cleaning :				rezanje i brušenje	

Pojedinosti pripreme žlijebe / Weld preparation details (Sketch, Drawing)

Oblik spoja / Joint Design	Redosljed zavarivanja / Welding sequences

Pojedinosti postupka zavarivanja / Welding details

Prolaz zavara Run	Postupak zavarivanja Welding Process	Promjer dodatnog materijala Size of filler material (mm)	Jakost struje Current (A)	Napon Voltage (V)	Vrsta struje-polaritet Type of current - polarity	Brzina žice Wire feed speed (m/min)	Brzina zavarivanja Travel speed (cm/min)	Unos topline Heat input (kJ/cm)
Z1	135	1,6	500	42.4	= +	10.5	32	31.8

Dodatni podaci / Other data :

Dodatni materijal / Filler material:		Zaštitni plin Shielding gas	Prašak Flux	Zaštita korijena Backing gas
Oznaka i standard Mark and specification	G4Si1: EN ISO 14341-A	EN ISO 14175:2008 M21-ArC-18%	-	-
Oznaka i proizvođač Make and trade name	Ø1,6mm, EZ-SG2 Elektroda Zagreb	Ferroline C18 Ar +18%CO2 Messer – Croatia	-	-
Posebne upute za sušenje Any special baking or drying	Ne			
Protok plina / Gas flow rate :		30.0 L / min	-----	- L / min

Vrsta i promjer volframove elektrode Tungsten electrode size and type	-	Pojedinosti žljebljenja i podloške Details of gouging and backing	-
Temperatura predgrijavanja Preheat Temperature	≥96°C	Međuslojna temperatura Interpass Temperature	≤ 300°C

Naknadna toplinska obrada i/ili odžarivanje / Postweld heat treatment :

- vrijeme, temperatura, proces / time, temperature, method	- brzina zagrijavanja i hlađenja / heating and cooling rate:
-	-

Ostale informacije / Other information :

Pojedinosti impulsnog zavarivanja / Puls welding details:
Daihen, OTC

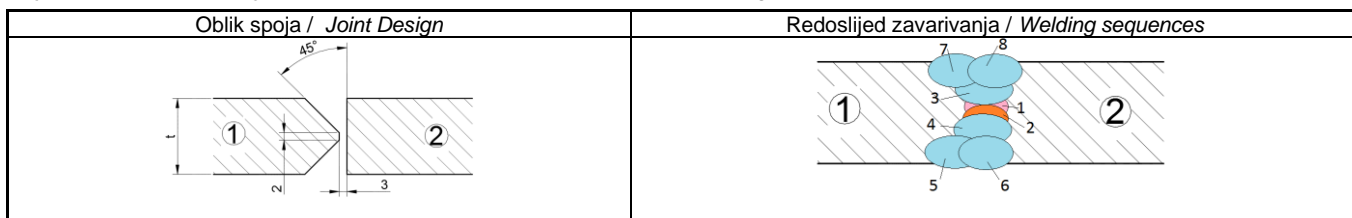
Izradio / Made by: Mihael Kocijan	Datum / Date: 12.07.24.
Provjerio / Checked by: Saša Latin, bacc.ing.mech. EWE	

Tablica 5. WPS konvencionalnog MAG postupka za sučeljeni zavar

SPECIFIKACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA WELDING PROCEDURE SPECIFICATION – WPS Oznaka / Designation: MAG BW P
--

Proizvođač / <i>Manufacturer</i>		PRIMABIRO d.o.o. Čakovec, Croatia		Položaj zavarivanja <i>Welding position</i>	PA
WPQR		0036/IS-TSS/16-11- 1221-007		Način prijenosa metala <i>Mode of metal transfer</i>	1- Short Circuit Transfer 2-7 Pulsed Transfer
Vrsta spoja i zavara / <i>Joint type and weld type</i>		BW bs ml S15		Vrsta mehaniziranog zavarivanja <i>Type of mechanized welding:</i>	Djelomično mehanizirano / <i>Partly mechanized</i>
Br. No.	Kvaliteta materijala <i>Material quality</i>	Debljina materijala <i>Material thickness</i>	Vanjski promjer <i>Outside Diameter</i>	Oznaka materijala <i>Parent material designation</i>	Grupa materijala / <i>Group No.</i> ISO/TR 15608
1	S355J2	15 mm	---	EN 10025-2	1.2
2	S355J2	15 mm	---	EN 10025-2	1.2
Način pripreme i čišćenja / <i>Preparation and cleaning :</i>				rezanje i brušenje	

Pojedinosti pripreme žlijeba / *Weld preparation details (Sketch, Drawing)*



Pojedinosti postupka zavarivanja / *Welding details*

Prolaz zavara <i>Run</i>	Postupak zavarivanja <i>Welding Process</i>	Promjer dodatnog materijala <i>Size of filler material (mm)</i>	Jakost struje <i>Current (A)</i>	Napon <i>Voltage (V)</i>	Vrsta struje-polaritet <i>Type of current-polarity</i>	Brzina žice <i>Wire feed speed (m/min)</i>	Brzina zavarivanja <i>Travel speed (cm/min)</i>	Unos topline <i>Heat input (kJ/cm)</i>
1	135	1,2	110-130	16,5-17,5	=+	2,6-4,0	20 – 25	4,6-4,6
2,3	135	1,2	240-280	25,2-26,7	=+	7,9-9,0	36 – 50	8,5-7,6
4,5,6,7	135	1,2	200-220	23,5-24,5	=+	7,0-7,5	32-36	7,5-7,6

Dodatni podaci / *Other data :*

Dodatni materijal / <i>Filler material:</i>		Zaštitni plin <i>Shielding gas</i>	Prašak <i>Flux</i>	Zaštita korijena <i>Backing gas</i>
Oznaka i standard <i>Mark and specification</i>	G4Si1: EN ISO 14341-A	EN ISO 14175:2008 M21-ArC-18%	-	-
Oznaka i proizvođač <i>Make and trade name</i>	Ø1,2mm, AS-SG3 ASKAYNAK L.E.	Ferroline C18 Ar +18%CO2 Messer – Croatia	-	-
Posebne upute za sušenje <i>Any special baking or drying</i>	Ne			
Protok plina / <i>Gas flow rate :</i>		15 - 18 L / min	-----	- L / min

Vrsta i promjer volframove elektrode <i>Tungsten electrode size and type</i>		Pojedinosti žljebčenja i podloške <i>Details of gouging and backing</i>	
Temperatura predgrijavanja <i>Preheat Temperature</i>	min 5°C	Međuslojna temperatura <i>Interpass Temperature</i>	≤ 300°C

Naknadna toplinska obrada i/ili odžarivanje / *Postweld heat treatment :*

- vrijeme, temperatura, proces / <i>time, temperature, method</i>	- brzina zagrijavanja i hlađenja / <i>heating and cooling rate:</i>
-	-

Ostale informacije / *Other information :*

Pojedinosti impulsnog zavarivanja / <i>Puls welding details:</i>
-

Izradio / <i>Made by:</i> Mihael Kocijan	Datum / <i>Date:</i> 12.07.24.
Provjerio / <i>Checked by:</i> Saša Latin, bacc.ing.mech.	

Tablica 6. WPS visokoučinskog D-Arc postupka za sučeljeni zavar

SPECIFIKACIJA POSTUPKA ZAVARIVANJA WELDING PROCEDURE SPECIFICATION – WPS Oznaka / Designation: D-Arc BW
--

Proizvođač / <i>Manufacturer</i>		PRIMABIRO d.o.o. Čakovec, Croatia		Položaj zavarivanja <i>Welding position</i>	PA
WPQR		-		Način prijenosa metala <i>Mode of metal transfer</i>	Pulsed Transfer
Vrsta spoja i zavara / <i>Joint type and weld type</i>		BW ss sl mb S15		Vrsta mehaniziranog zavarivanja <i>Type of mechanized welding:</i>	Djelomično mehanizirano / <i>Partly mechanized</i>
Br. No.	Kvaliteta materijala <i>Material quality</i>	Debljina materijala <i>Material thickness</i>	Vanjski promjer <i>Outside Diameter</i>	Oznaka materijala <i>Parent material designation</i>	Grupa materijala / <i>Group No.</i> ISO/TR 15608
1	S355J2	15 mm	---	EN 10025-2	1.2
2	S355J2	15 mm	---	EN 10025-2	1.2
Način pripreme i čišćenja / <i>Preparation and cleaning :</i>				rezanje i brušenje	

Pojedinosti pripreme žlijeba / *Weld preparation details (Sketch, Drawing)*

Oblik spoja / <i>Joint Design</i>	Redosljed zavarivanja / <i>Welding sequences</i>

Pojedinosti postupka zavarivanja / *Welding details*

Prolaz zavara <i>Run</i>	Postupak zavarivanja <i>Welding Process</i>	Promjer dodatnog materijala <i>Size of filler material (mm)</i>	Jakost struje <i>Current (A)</i>	Napon <i>Voltage (V)</i>	Vrsta struje-polaritet <i>Type of current - polarity</i>	Brzina žice <i>Wire feed speed (m/min)</i>	Brzina zavarivanja <i>Travel speed (cm/min)</i>	Unos topline <i>Heat input (kJ/cm)</i>
z1	135	1,6	520	42,0	=+	11,2	35	29,9

Dodatni podaci / *Other data :*

Dodatni materijal / <i>Filler material:</i>		Zaštitni plin <i>Shielding gas</i>	Prašak <i>Flux</i>	Zaštita korijena <i>Backing gas</i>
Oznaka i standard <i>Mark and specification</i>	G4Si1: EN ISO 14341-A	EN ISO 14175:2008 M21-ArC-18%	-	-
Oznaka i proizvođač <i>Make and trade name</i>	Ø 1,6mm, EZ-SG2 Elektroda Zagreb	Ferroline C18 Ar +18%CO2 Messer – Croatia	-	-
Posebne upute za sušenje <i>Any special baking or drying</i>	Ne			
Protok plina / <i>Gas flow rate :</i>		30.0 L / min	-----	- L / min

Vrsta i promjer volframove elektrode <i>Tungsten electrode size and type</i>		Pojedinosti žljebljenja i podloške <i>Details of gouging and backing</i>	
Temperatura predgrijavanja <i>Preheat Temperature</i>	min 5°C	Međuslojna temperatura <i>Interpass Temperature</i>	≤ 300°C

Naknadna toplinska obrada i/ili odžarivanje / *Postweld heat treatment :*

- vrijeme, temperatura, proces / <i>time, temperature, method</i>	- brzina zagrijavanja i hlađenja / <i>heating and cooling rate:</i>
-	-

Ostale informacije / *Other information :*

Pojedinosti impulsnog zavarivanja / <i>Puls welding details:</i>
Daihen, OTC

Izradio / <i>Made by:</i> Mihael Kocijan	Datum / <i>Date:</i> 12.07.24.
Provjerio / <i>Checked by:</i> Saša Latin, bacc.ing.mech.	

6. Troškovi zavarivanja

Ukupni troškovi zavarivanja (T_{UK}) sastoje se od:

$T_{\dot{z}}$ – trošak žice

T_{MJ} – trošak mješavine

T_{EN} – trošak električne energije

T_{AM} – trošak amortizacije

T_{OD} – osobni dohodi

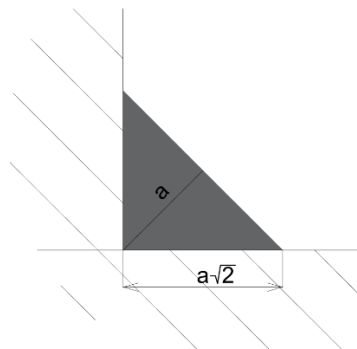
$$T_{UK} = T_{\dot{z}} + T_{MJ} + T_{EN} + T_{AM} + T_{OD}$$

6.1. Trošak žice

Da bi se mogao izračunati utrošak žice za određeni zavar bitno je poznavati njegovu geometriju, preko koje se dođe do mase zavara koja je proporcionalna masi utrošene žice. Cijena koluta žice od 15 kg iznosi 30€, što znači da je 1 kg iznosi 2€.

a) MAG postupak – kutni zavar a7

Slika 31. Kutni zavar - skica



Izvor: Izradio autor

$$A_{a7} = \frac{(7\sqrt{2})^2}{2} = \frac{49 \cdot 2}{2} = 49 \text{ mm}^2$$

Ukupna duljina jednog neprekidnog zavara iznosi 1m.

$$V_{a7} = A_{a7} \cdot l = 49 \text{ mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} = 49000 \text{ mm}^3$$

$$V_{a7} = 49 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_{a7} = V_{a7} \cdot \rho_{FeC}$$

$$m_{a7} = 49 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{a7} = 0,384 \text{ kg}$$

Utrošena masa žice za zavar veličine a7 na jedan metar dužni iznosi 0,384 kg.

Cijena utrošene žice:

$$T_{\dot{z}} = 0,384 \text{ kg} \cdot 2 \text{ €/kg} = 0,77 \text{ €}$$

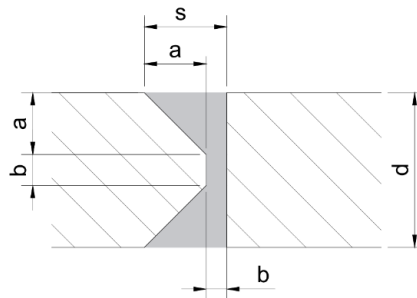
b) D-Arc postupak – kutni zavar a7

Pošto se radi o istoj veličini tj. geometriji zavara kao i na konvencionalnom MAG postupku utrošak žice je jednak.

$$T_{\dot{z}} = 0,77 \text{ €}$$

c) MAG postupak – sučeljeni zavar

Slika 32. Sučeljni zavar – skica – MAG postupak



Izvor: Izradio autor

$$a = 6,5 \text{ mm}$$

$$b = 2 \text{ mm}$$

$$d = 15 \text{ mm}$$

$$s = 8 \text{ mm}$$

$$l = 1000 \text{ mm}$$

$$A_{s8}, V_{s8}, m_{s8}, T_{\dot{z}}?$$

$$A_{s8} = \frac{a^2}{2} \cdot 2 + b \cdot d$$

$$A_{s8} = \frac{6,5^2}{2} \cdot 2 + 2 \cdot 15 = 72,25 \text{ mm}^2$$

$$V_{s8} = A_{s8} \cdot l = 72,25 \text{ mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} = 72250 \text{ mm}^3$$

$$V_{s8} = 72,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_{s8} = V_{s8} \cdot \rho_{FeC}$$

$$m_{s8} = 72,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{s8} = 0,567 \text{ kg}$$

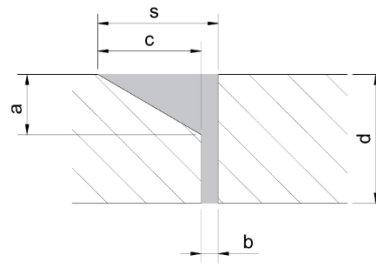
Utrošena masa žice za zavar veličine s8 na jedan metar dužni iznosi 0,567 kg.

Cijena utrošene žice:

$$T_{\frac{z}{z}} = 0,567 \text{ kg} \cdot 2 \text{ €/kg} = 1,13 \text{ €}$$

d) D-Arc postupak – sučeljeni zavar

Slika 33. Sučeljni zavar – skica – D-Arc



Izvor: Izradio autor

$$a = 7 \text{ mm}$$

$$b = 2 \text{ mm}$$

$$c = 12 \text{ mm}$$

$$d = 15 \text{ mm}$$

$$s = 14 \text{ mm}$$

$$l = 1000 \text{ mm}$$

$A_{s14}, V_{s14}, m_{s14}, T_{\check{z}}?$

$$A_{s14} = \frac{a \cdot c}{2} + b \cdot d$$

$$A_{s14} = \frac{7 \cdot 12}{2} + 2 \cdot 15 = 72 \text{ mm}^2$$

$$V_{s14} = A_{s14} \cdot l = 72 \text{ mm}^2 \cdot 1000 \text{ mm} = 72000 \text{ mm}^3$$

$$V_{s14} = 72 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_{s14} = V_{s14} \cdot \rho_{FeC}$$

$$m_{s14} = 72 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$m_{s14} = 0,565 \text{ kg}$$

Utrošena masa žice za zavar veličine s8 na jedan metar dužni iznosi 0,565 kg.

Cijena utrošene žice:

$$T_{\check{z}} = 0,565 \text{ kg} \cdot 2 \text{ €/kg} = 1,13 \text{ €}$$

6.2. Trošak plina

a) MAG postupak – kutni zavar a7

Protok plina je 16 l/min.

Ukupna duljina koju zavarujemo je 1m.

1 litra mješavine plina iznosi 0,01€ po litri.

Kod MAG zavarivanje za kutni zavar veličine a7 imamo tri prolaza.

Prvi prolaz je nešto sporiji nego druga dva zbog zavarivanja korijena.

$$v_1 = 0,45 \text{ m/min} \rightarrow 2,2 \text{ min/m} \rightarrow 132 \text{ sec/m}$$

$$v_{2,3} = 0,52 \text{ m/min} \rightarrow 1,9 \text{ min/m} \rightarrow 114 \text{ sec/m}$$

Ukupno vrijeme zavarivanja:

$$t_{uk} = (t_1 + t_2 + t_3)$$

$$t_{uk} = (132 + 114 + 114)$$

$$t_{uk} = 360 \text{ sec/m} = 6 \text{ min/m}$$

$$\text{Utrošak plina u litrama} - 16 \text{ l/min} \cdot 6 \text{ min} = 96 \text{ l}$$

$$\text{Utrošak plina u eurima} - 96 \text{ l} \cdot 0,01 \text{ €} = 0,96 \text{ €}$$

b) D-Arc postupak – kutni zavar a7

Protok plina je 30 l/min.

Ukupna duljina koju zavarujemo je 1m.

1 litra mješavine plina iznosi 0,01€ po litri.

Kod D-Arc zavarivanja za kutni zavar veličine a7 imamo samo jedan prolaz.

To je prednost u odnosu sa konvencionalnim MAG zavarivanjem.

$$v = 0,32 \text{ m/min} \rightarrow t_{uk} = 3,1 \text{ min/m}$$

Ukupno vrijeme zavarivanja:

$$t_{uk} = 3,1 \text{ min/m}$$

Utrošak plina u litrama - $30 \text{ l/min} \cdot 3,1 \text{ min} = 93 \text{ l}$

Utrošak plina u eurima - $93 \text{ l} \cdot 0,01 \text{ €} = 0,93 \text{ €}$

c) MAG postupak – sučeljeni zavar

Protok plina je 16 l/min.

Ukupna duljina koju zavarujemo je 1m.

1 litra mješavine plina iznosi 0,01€ po litri.

Kod sučeljenog spoja na debljini limova od 15 mm zavarivanje MAG postupkom vrši se zavarivanje sa 7 prolaza.

$$\begin{aligned}v_1 &= 0,25 \text{ m/min} \rightarrow t_1 = 4 \text{ min/m} \\v_{2,3} &= 0,40 \text{ m/min} \rightarrow t_{2,3} = 2,5 \text{ min/m} \\v_{4-7} &= 0,35 \text{ m/min} \rightarrow t_{4-7} = 2,85 \text{ min/m}\end{aligned}$$

Ukupno vrijeme zavarivanja:

$$t_{uk} = t_1 + (t_{2,3} \cdot 2) + (t_{4-7} \cdot 4)$$

$$t_{uk} = 4 + (2,5 \cdot 2) + (2,85 \cdot 4)$$

$$t_{uk} = 20,4 \text{ min/m}$$

Utrošak plina u litrama - $16 \text{ l/min} \cdot 20,4 \text{ min} = 326,4 \text{ l}$

Utrošak plina u eurima - $326,4 \text{ l} \cdot 0,01 \text{ €} = 3,26 \text{ €}$

d) D-Arc postupak – sučeljeni zavar

Protok plina je 30 l/min.

Ukupna duljina koju zavarujemo je 1m.

1 litra mješavine plina iznosi 0,01€ po litri.

Kod sučeljenog spoja na debljini limova od 15 mm zavarivanje D-Arc postupkom vrši se zavarivanje samo sa jednim prolazom.

Ukupno vrijeme zavarivanja:

$$v = 0,35 \text{ m/min} \rightarrow t_{uk} = 2,85 \text{ min/m}$$

$$\text{Utrosak plina u litrama} - 30 \text{ l/min} \cdot 2,85 \text{ min} = 85,5 \text{ l}$$

$$\text{Utrosak plina u eurima} - 85,5 \text{ l} \cdot 0,01 \text{ €} = 0,85 \text{ €}$$

6.3. Trošak energije

a) MAG postupak – kutni zavar a7

$$U = 25 \text{ V}$$

$$I = 220 \text{ A}$$

$$\eta = 0,8$$

$$t_z = 6 \text{ min} = 0,1 \text{ h}$$

$$C_{el.en.} = 0,02253 \text{ €/kWh}$$

Snaga uređaja u kW:

$$P = U \cdot I \cdot \eta$$

$$P = 25 \text{ V} \cdot 220 \text{ A} \cdot 0,8$$

$$P = 4400 \text{ W} = 4,4 \text{ kW}$$

Potrošnja električne energije:

$$4,4 \text{ kW} \cdot 0,1 \text{ h} = 0,44 \text{ kWh}$$

Ukupni trošak energenata:

$$0,44 \text{ kWh} \cdot 0,022563 \text{ €/kWh} = 0,0099277 \text{ €}$$

b) D-Arc postupak – kutni zavar a7

$$U = 42,4 V$$

$$I = 500 A$$

$$\eta = 0,8$$

$$t_z = 3,1 \text{ min} = 0,052 h$$

$$C_{el.en.} = 0,02253 \text{ €/kWh}$$

Snaga uređaja u kW:

$$P = U \cdot I \cdot \eta$$

$$P = 42,4 V \cdot 500 A \cdot 0,8$$

$$P = 16960 W = 16,96 kW$$

Potrošnja električne energije:

$$16,96 kW \cdot 0,052 h = 0,88 kWh$$

Ukupni trošak energenata:

$$0,88 kWh \cdot 0,022563 \text{ €/kWh} = 0,019898 \text{ €}$$

c) MAG postupak – sučeljeni zavar

$$U = 26 V$$

$$I = 260 A$$

$$\eta = 0,8$$

$$t_z = 20,4 \text{ min} = 0,34 h$$

$$C_{el.en.} = 0,02253 \text{ €/kWh}$$

Snaga uređaja u kW:

$$P = U \cdot I \cdot \eta$$

$$P = 26 V \cdot 260 A \cdot 0,8$$

$$P = 6760 W = 6,76 kW$$

Potrošnja električne energije:

$$6,76 kW \cdot 0,34 h = 2,2984 kWh$$

Ukupni trošak energenata:

$$2,2984 \text{ kWh} \cdot 0,022563 \text{ €/kWh} = 0,051858 \text{ €}$$

d) D-Arc postupak – sučeljeni zavar

$$U = 42 \text{ V}$$

$$I = 520 \text{ A}$$

$$\eta = 0,8$$

$$t_z = 2,85 \text{ min} = 0,0475 \text{ h}$$

$$C_{el.en.} = 0,02253 \text{ €/kWh}$$

Snaga uređaja u kW:

$$P = U \cdot I \cdot \eta$$

$$P = 42 \text{ V} \cdot 520 \text{ A} \cdot 0,8$$

$$P = 17472 \text{ W} = 17,47 \text{ kW}$$

Potrošnja električne energije:

$$17,47 \text{ kW} \cdot 0,0475 \text{ h} = 0,83 \text{ kWh}$$

Ukupni trošak energenata:

$$0,83 \text{ kWh} \cdot 0,022563 \text{ €/kWh} = 0,018727 \text{ €}$$

6.4. Trošak amortizacije

a) MAG postupak

Ukupna investicija u opremu zavarivanja za MAG postupak iznosi 8.542,46 €.

$$\text{Godišnja amortizacija} = \frac{\text{Nabavna vrijednost}}{\text{Koristan vijek trajanja}} = \frac{8542,46}{10} = 854,24 \text{ €}$$

$$\text{Mjesečna amortizacija} = \frac{854,24}{12} = 71,19 \text{ €}$$

$$\begin{aligned} \text{Amortizacija po jedinici} &= \frac{\text{Mjesečna amortizacija}}{\text{Mjesečni broj proizvedenih jedinica}} = \frac{71,19\text{€}}{300 \text{ m}} \\ &= 0,24\text{€} \end{aligned}$$

Mjesečna amortizacija za opremu MAG postupka kroz 10 godina iznosi 71,19€, a ako se uzme u obzir da se kroz period od mjesec dana proizvede 300 m zavara dobije se da na metar zavara ide 0,24 € za amortizaciju.

b) D-Arc postupak

Ukupna investicija u opremu zavarivanja za MAG postupak iznosi 15.367,52 €.

$$\text{Godišnja amortizacija} = \frac{\text{Nabavna vrijednost}}{\text{Koristan vijek trajanja}} = \frac{15367,52}{10} = 1536,75 \text{ €}$$

$$\text{Mjesečna amortizacija} = \frac{1536,75}{12} = 128,06\text{€}$$

$$\begin{aligned} \text{Amortizacija po jedinici} &= \frac{\text{Mjesečna amortizacija}}{\text{Mjesečni broj proizvedenih jedinica}} = \frac{128,06\text{€}}{300 \text{ m}} \\ &= 0,43 \text{ €} \end{aligned}$$

6.5. Trošak rada

Za trošak rada računa se osobni dohodak od 20 €/h.

Potrebno je dobiti trošak rada po metru zavara.

Trošak rada po metru zavara dobiva se umnoškom osobnog dohotka sa vremenom zavarivanja i vremenom pripreme.

$$T_{OD} = \frac{\text{osobni dohodak}}{60} = \frac{20}{60} = 0,333 \text{ €/min}$$

a) MAG postupak – kutni zavar a7

$t_z = 6 \text{ min/m}$ – vrijeme zavarivanja

$t_p = 3 \text{ min}$ – vrijeme pripreme

$$T = T_{OD} \cdot (t_z + t_p)$$
$$T = 0,333 \cdot (6 + 3) = 3 \text{ €/m}$$

b) D-Arc postupak – kutni zavar a7

$t_z = 3,1 \text{ min/m}$ – vrijeme zavarivanja

$t_p = 3 \text{ min}$ – vrijeme pripreme

$$T = T_{OD} \cdot (t_z + t_p)$$
$$T = 0,333 \cdot (3,1 + 3) = 2,03 \text{ €/m}$$

c) MAG postupak – sučeljeni zavar

$t_z = 20,4 \text{ min/m}$ – vrijeme zavarivanja

$t_p = 6 \text{ min}$ – vrijeme pripreme

$$T = T_{OD} \cdot (t_z + t_p)$$
$$T = 0,333 \cdot (20,4 + 6) = 8,79 \text{ €/m}$$

d) D-Arc postupak – sučeljeni zavar

$t_z = 2,85 \text{ min/m}$ – vrijeme zavarivanja

$t_p = 3 \text{ min}$ – vrijeme pripreme

$$T = T_{OD} \cdot (t_z + t_p)$$
$$T = 0,333 \cdot (2,85 + 3) = 1,95 \text{ €/m}$$

Tablica 7. Usporedba troškova za kutni zavar

Vrsta troškova	Konvencionalni MAG	D-Arc
Trošak žice (€/m)	0,770	0,770
Trošak plina (€/m)	0,960	0,930
Trošak energenata (€/m)	0,009	0,020
Trošak amortizacije (€/m)	0,240	0,430
Troškovi rada (€/m)	3,000	2,030
UKUPNO (€/m)	4,979	4,180

Tablica 8. Usporedba troškova za sučeljeni zavar

Vrsta troškova	Konvencionalni MAG	D-Arc
Trošak žice (€/m)	1,130	1,130
Trošak plina (€/m)	3,260	0,850
Trošak energenata (€/m)	0,052	0,019
Trošak amortizacije (€/m)	0,240	0,430
Troškovi rada (€/m)	8,790	1,950
UKUPNO (€/m)	13,472	4,379

7. ZAKLJUČAK

1. Povećana produktivnost kod D-Arc postupka

Eksperimentalna usporedba pokazala je da visokoučinski D-Arc postupak zavarivanja značajno povećava produktivnost u odnosu na konvencionalni MAG postupak. Ovo povećanje produktivnosti posebno je vidljivo kod zavarivanja debelostjenih konstrukcija, gdje D-Arc postupak omogućuje brže taljenje materijala i smanjuje vrijeme potrebno za završetak zavarivanja.

Dobili smo da na mjesečnoj razini od 300 metara kutnog zavara treba za konvencionalni MAG postupak 30 sati samog zavarivanja, dok je za D-Arc potrebno 15,5 sati. Vrijeme pripreme je relativno isto. To znači da smo sa D-Arc zavarivanjem brži za 48% vremena.

Sa D-Arc zavarivanjem treba 14,25 sati bez pripreme da bi se zavario sučeljeni spoj na limu debljine 15mm, dok za konvencionalni MAG treba 102 sata. Veliku razliku na vremenu radi broj prolaza jer za D-Arc je dovoljan jedan prolaz dok za konvencionalni MAG treba odraditi 7 prolaza. Prema gore navedenim činjenicama konvencionalni MAG je u ovome slučaju sporiji za više od 7 puta.

2. Niži troškovi zavarivanja

Analiza je pokazala da D-Arc postupak, iako zahtijeva specifičnu opremu i postavke, može rezultirati nižim ukupnim troškovima zavarivanja zbog smanjenog vremena rada i manje potrošnje dodatnog materijala. Učinkovitija iskorištenost resursa i smanjenje radnog vremena dovode do smanjenja ukupne cijene koštanja.

Konačna razlika između konvencionalnog MAG zavarivanja sa D-Arc zavarivanjem na kutnom zavaru po jednom metru iznosi 0,799 €. Kroz mjesečnu količinu zavara dobije se 239,7€ profita, a to znači da bi se oprema za D-Arc u ovome slučaju isplatio kroz 5 i pol godina.

Vidno je da je najveća razlika kod troškova rada čiji je glavni parametar vrijeme zavarivanja. Kada se računa da na mjesečnoj razini ima 300 metara zavara ostvaruje se razlika od 2727,9 € na sučeljenom zavaru. Tako da bi se isplatila investicija u novi visokoučinski D-Arc kroz 5,63 mjeseca tj. već u 7 mjesecu bi se zamijetila osjetna dobit.

3. Primjena u industriji

S obzirom na prednosti visokoučinskog D-Arc postupka u smislu produktivnosti i ekonomičnosti, njegova primjena se preporučuje u slučajevima gdje su zahtjevi za kvalitetom visoki, a brzina i troškovna učinkovitost ključni faktori, poput proizvodnje transformatorskih kotlova. Za manje zahtjevne aplikacije, gdje je ekonomičnost opreme i jednostavnost primjene važnija, konvencionalni MAG postupak i dalje ostaje pouzdan izbor.

5. Izbor optimalnog postupka zavarivanja

Na temelju provedenih istraživanja i analize, zaključeno je da se visokoučinski D-Arc postupak pokazao optimalnim izborom za zavarivanje debelostjenih čeličnih konstrukcija, poput transformatorskih kotlova, zbog svoje učinkovitosti, smanjenja radnog vremena i ukupnih troškova. Ipak, konačni izbor postupka zavarivanja treba temeljiti na specifičnim potrebama proizvodnje, dostupnosti opreme i vještinama operatera.

6. Daljnje istraživanje i optimizacija

Preporučuje se daljnje istraživanje u svrhu optimizacije parametara visokoučinskog D-Arc postupka, kako bi se dodatno povećala učinkovitost i smanjili troškovi u različitim industrijskim uvjetima. Također, buduća istraživanja trebala bi uključivati i procjenu utjecaja različitih materijala i debljina na rezultate oba postupka zavarivanja.

LITERATURA

- [1] Horvat M., Kondić V.: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Varaždin, 2012., <https://hrcak.srce.hr/94796> preuzeto 26.05.2024.
- [2] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić (2015.): Priručnik: Zavarivački i srodni postupci, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja i Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [3] Jurica, Maja: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4] Bee, J.V., Garrett, G.G., Taplin, D.M.R.: Materials Engineering: Proceedings of the First International Symposium, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa, 1985.
- [5] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [6] Kožuh, Z., Garašić, I.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Izdanje 2016., Zagreb, 2016.
- [7] Lončar, D.: Priručnik za zavarivanje; Elektroda Zagreb, Zagreb, 1987.
- [8] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [9] Dzelnitzki, D.: Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja, Zavarivanje vol.55, pp. 15.- 21., siječanj-travanj, 2012.
- [10] Bilandžija, J.: Značajke modernih izvora struje za MAG zavarivanje, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [11] Golubić, M.: Usporedna analiza zavarenih spojeva izrađenih konvencionalnim MAG i D-arc postupkom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018., <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A4303> ...preuzeto 12.06.2024.
- [12] V. Panić: Zavarivanje , predavanja iz kolegija „Zavarivanje 1“ / Datum pristupa: (19.06.2024.)
- [13] Novak, B.: Tehnološki proces izrade transformatorskog poklopca SGB, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2015.,

- [14] Grd, D.: Optimiranje parametara D – Arc zavarivanja limova većih debljina, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2021.,
- [15] Čorak, I.: Visokoučinski postupci zavarivanja, Završni rad, Sveučilište u Rijeci – odsjek za politehniku, Rijeka, 2015.,
- [16] Rosado, T., Almeida, P., Pires, I., Miranda, R., Quintino, L.: Innovation in Arc Welding, https://www.researchgate.net/publication/228908389_Innovations_in_arc_welding preuzeto 28.07.2024.
- [17] Mikulić, M.: Modificirani MAG postupci za visokoučinsko zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [18] Flux Cored Arc Welding, s interneta,
<http://www.weldguru.com/support-files/flux-cored-arc-welding.pdf> ...dostupno 18.04.2018.
- [19] Razvoj visokoučinskog zavarivanja čelika za debele limove primjenom zakopanog električnog luka velike struje, s interneta <https://servus.hr/strucni-clanci/razvoj-visokoucinskog-zavarivanja-celika-debele-limove-primjenom-zakopanog-elektricnog-luka-velike-struje/> ...dostupno 18.06.2024.

Popis slika

Slika 1. Probna montaža glavnih i osnovnih komponenti trafokotla	3
Slika 2. Oprema za MAG postupak	4
Slika 3. Shema postupka MIG/MAG zavarivanja.....	5
Slika 4. Blagopadajuća karakteristika izvora struje za zavarivanje	7
Slika 5. Presjeci praškom punjenih žica	7
Slika 6. Shematski prikaz konvencionalnog MAG postupka i zakopanog luka	19
Slika 7. Prikaz zakopanog luka.....	19
Slika 8. Nacrt ploče poklopca trafokotla.....	22
Slika 9. Nacrt ploče poklopca trafokotla.....	23
Slika 10. Odrezani probni komadi	23
Slika 11. Odrezani probni komadi	24
Slika 12. Stezanje radnog komada za radni stol	24
Slika 13. Promotech BM-18	25
Slika 14. Priprema za zavar D-Arc	26
Slika 15. Dva radna komada spremna za spajanje konvencionalnim MAG postupka	26
Slika 16. Korijski zavar.....	27
Slika 17. Čišćenje nečistoća u zavaru sa kutnom brusilicom	27
Slika 18. Zavareni sučeljeni zavar konvencionalnim MAG postupkom	27
Slika 19. Priprema za kutni zavar konvencionalnim MAG postupkom	28
Slika 20. Zavareni kutni zavar sa 3 prolaza	28
Slika 21. Oprema za D-Arc zavarivanje	29
Slika 22. Pištolj i vodilica za D-Arc zavarivanje	29
Slika 23. Priprema radnih komada za zavarivanje D-Arc postupkom za sučeljeni spoj ...	30
Slika 24. Keramika za zavarivanje.....	30
Slika 25. Priprema za kutni zavar	31
Slika 26. Kutni zavar D-Arc postupkom.....	31

Slika 27. Mjerenje veličine zavora pomičnim mjerilom.....	32
Slika 28. Makroizbrusak sučeljenog spoja zavarenog konvencionalni MAG postupkom	32
Slika 29. Makroizbrusak kutnog spoja zavarenog konvencionalnim MAG postupkom ...	33
Slika 30. Makroizbrusak sučeljenog spoja zavarenog visokoučinskim D-Arc postupkom	33
Slika 30. Makroizbrusak kutnog spoja zavarenog visokoučinskim D-Arc postupkom.....	33
Slika 31. Kutni zavar - skica.....	38
Slika 32. Sučeljni zavar – skica – MAG postupak.....	39
Slika 33. Sučeljni zavar – skica – D-Arc	41

Popis tablica

Tablica 1. Usporedba presjeka pripreme i zavora za konvencionalni MAG i visokoučinskim „D-Arc“ postupak za sučeljeni spoj	21
Tablica 2. Tehničke specifikacije stroja za izradu kosina.....	25
Tablica 3. WPS konvencionalnog MAG postupka za kutni zavar	34
Tablica 4. WPS visokoučinskog D-Arc postupka za kutni zavar	35
Tablica 5. WPS konvencionalnog MAG postupka za sučeljeni zavar	36
Tablica 6. WPS visokoučinskog D-Arc postupka za sučeljeni zavar.....	37
Tablica 7. Usporedba troškova za kutni zavar.....	49
Tablica 8. Usporedba troškova za sučeljeni zavar.....	49