

RMT zavarivanje

Jović, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:059715>

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

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



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

Veleučilište u Karlovcu

Stručni studij strojarstva – proizvodno strojarstvo

Marin Jović

RMT ZAVARIVANJE

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2017. Godina

Veleučilište u Karlovcu

Stručni studij strojarstva – proizvodno strojarstvo

Marin Jović

Broj indeksa: 000483

RMT ZAVARIVANJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr.sc. Tanja Tomić, dipl.ing.stroj.

Karlovac, 2017. Godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni preddiplomski studij: Strojarsstvo

Usmjerenje: Proizvodno Strojarsstvo

Karlovac, 15.05.2017.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Marin Jović**

Matični broj: 0035190078

Naslov: **RAPID MIG/MAG TECHNOLOGY (RMT)**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati razvoj MIG/MAG zavarivanja te prednosti koje imaju suvremeni postupci nad konvencionalnim zavarivanjem. Detaljnije je potrebno opisati RMT zavarivanje, te mogućnosti primjene suvremenih metoda zavarivanja. Obraditi različite načine prijenosa metala kod suvremenih metoda zavarivanja. Prikazati MIG/MAG postupak zavarivanja.

Student treba u radu objasniti:

- Općenito objasniti primjenu i svrhu zavarivanja
- Detaljnije obraditi RMT zavarivanje
- Navesti primjene postupaka zavarivanja gdje se mogu koristiti
- Navesti prednosti suvremenih metoda zavarivanja

Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

15.05.2017.

20.06.2017

12.07.2017

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Dr.sc. Tanja Tomić, dipl.ing.stroj.

v.p. Marijan Brozović, dipl.ing

Sadržaj

Sadržaj.....	V
Popis slika.....	VI
Sažetak	VII
Uvod	1
Općenito o zavarivanju	1
MIG/MAG postupak.....	3
Prijenos metala pri zavarivanju.....	6
Analiza suvremenih postupaka MIG/MAG zavarivanja	8
STT - Surface Tension Transfer	8
Prijenos metala kod STT postupka zavarivanja	12
Područje primjene STT postupka.....	12
FastROOT	12
Prijenos metala kod FastROOT postupka.....	14
Područje primjene FastROOT postupka	14
CMT-Cold Metal Transfer	15
AC MIG (Alternating Current)	16
RMT-Rapid MIG/MAG Technology.....	17
Prijenos metala kod RMT postupka	20
Analiza RMT postupka	21
Zaključak.....	23
Literatura.....	24

Popis slika

Slika 1. Zona utjecaja topline	2
Slika 2. MIG/MAG zavarivanje	3
Slika 3. Način odvajanja kapljice pri STT zavarivanju.....	9
Slika 4. Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje za konvencionalni MIG/MAG postupak zavarivanja.....	10
Slika 5. Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje za STT postupak zavarivanja.....	11
Slika 6. Način odvajanja kapljice pri FastROOT zavarivanju	13
Slika 7. Utjecaj sekundarnog strujnog pulsa na oblik provara kod FastROOT postupka	13
Slika 8. Shematski prikaz povratnog gibanja žice.....	15
Slika 9. Način odvajanja kapljice kod CMT postupka	16
Slika 10. Utjecaj balansa negativnog polariteta na oblik zavara i geometriju spoja.....	17
Slika 11. Makroizbrusak tvrdo lemljenog spoja žicom ER-CuSi A na pocinčanom čeliku, udio negativnog polariteta EN=70%	17
Slika 12. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom d=6 mm	18
Slika 13. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom d=8 mm	18
Slika 14. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom d=20mm	19
Slika 15. Priprema kutnog spoja kod RMT postupka zavarivanja	19
Slika 16. Makroizbrusak kutnog spoja s potpunom penetracijom; S355 debljine 8mm; visina kutnog spoja 4mm; I=265A; Unos topline 11kJ/cm	20
Slika 17. Usporedba dosega jakosti struje za različite električne lukove	22

Sažetak

U radu su analizirani zahtjevi koji se javljaju u modernoj zavarivačkoj proizvodnji te mogućnosti rješavanja istih uz primjenu modificiranih prijenosa metala u električnom luku a koji se intenzivno javljaju kod suvremenih MIG/MAG postupaka. Ukratko se objašnjeni mehanizmi kojima se realiziraju različiti koncepti prijenosa i razvojne inačice. Predstavljeno je nekoliko karakterističnih suvremenih MIG/MAG postupaka koji koriste modificirane načine prijenosa metala i to u području kratkih spojeva i štrcajućem luku uz opis postupka i specifičnu primjenu.

Ključne riječi: MIG/MAG zavarivanje, kontrola prijenosa metala, STT, FastROOT, CMT, AC MIG, RMT

Summary

In this paper requirements in modern welding manufacturing are analysed as well as solution possibilities by means of application modified metal transfer in electric arc. This option is very often used in design of modern MIG/MAG welding processes. Basic physical mechanisms which are being employed in order to establish different metal transfer concepts are briefly described. Several characteristic modern MIG/ MAG welding processes which use modified metal transfer solutions, in short and spray arc modes, are presented as well as their typical applications.

Key words: MIG/MAG welding procedure, STT, FastROOT, RM

Uvod

U proteklih desetak godina kontinuirano se na tržištu i u industrijskoj primjeni pojavljuju „novi“ postupci MAG zavarivanja koji su nastali na temelju zahtjeva za povećanjem produktivnosti, uvođenjem zahtjevnih vrsta osnovnih materijala (visokočvrsti čelici, duplex čelici, pocinčani limovi, nikl legure, aluminijske legure), smanjenjem deformacija, kontroliranim unosom topline, korozijskom postojanošću zavarenog spoja, smanjenjem prskanja, potrebom spajanja tankih limova te mogućnošću za povezivanje s robotskim stanicama. Ovi zahtjevi rezultirali su pojavom više alternativa MIG/MAG zavarivanja koji se vrlo često deklariraju kao posebni postupci zavarivanja iako se u osnovi radi o postupku MAG (135) ili MIG (131).

Teško bi bilo ne primijetiti da i kod drugih elektrolučnih postupaka, poglavito EPP-a (zavarivanje s više žica, aplikacija AC izvora), TIG-a (posebno oblikovani valni oblici izmjenične struje, automatsko dodavanje dodatnog materijala), plazme (upotreba prašaka) i praškom punjene žice također bilježimo razna poboljšanja. Međutim MIG/MAG postupak je u tom kontekstu u bitnoj prednosti iz razloga što je novim izvorima struje i opreme omogućeno vrlo precizno i detaljno upravljanje prijenosom metala u električnom luku. S druge strane, sve intenzivnije uvođenje automatskog i robotiziranog zavarivanja zahtjeva i stabilan električni luk i kvalitetan prijenos materijala pri čemu se traži visoka intermitencija. Zbog visokih radnih opterećenja potrebno je i hlađenje pištolja za zavarivanje kao i robustan i pouzdan sustav za dovod žice. Time se postavlja novi niz kriterija na izvore struje za zavarivanje, dodavače žice, sustave hlađenja i ostalu opremu.

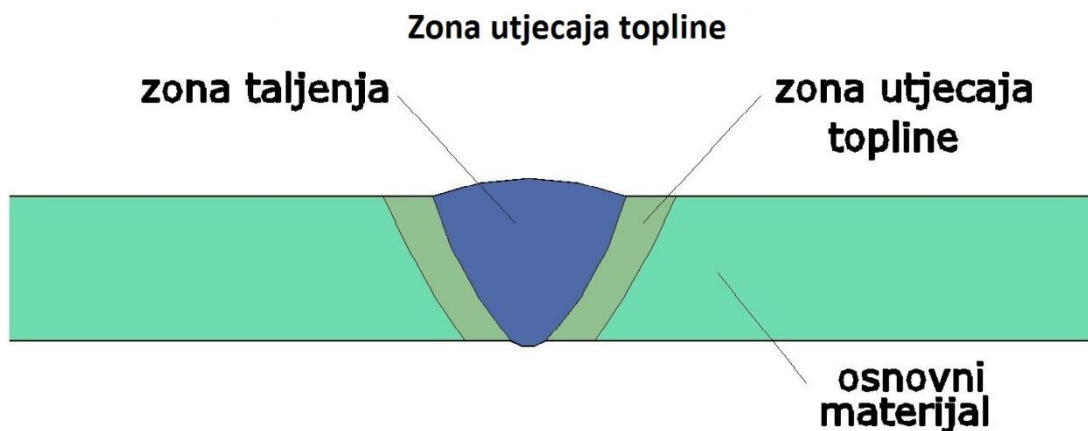
Općenito o zavarivanju

Zavarivanje je spajanje dvaju ili više, istovrsnih ili raznovrsnih materijala, taljenjem ili pritiskom, sa ili bez dodavanja dodatnog materijala, na način da se dobije homogeni zavareni spoj. Zavarivanje je u drukčije od

lemljenja, a to je spajanje taljenjem legure s nižim talištem od materijala predmeta koji se spajaju.

Različiti izvori energije se mogu koristiti za zavarivanje, kao što je mlaz vrućih plinova (plinski plamen ili mlaz plazme), električni luk, tok nabijenih čestica (mlaz elektrona ili iona u vakuumu), tokovi zračenja (laser), električna struja (elektrootporno zavarivanje), trenje, ultrazvuk i sl. Zavarivanje se može obavljati u radionici, na otvorenom prostoru, u vodi ili u svemiru.

Sve do kraja 19. stoljeća, jedino je bilo poznato kovačko zavarivanje, s kojim su kovači stoljećima spajali željezo i čelik grijanjem i udaranjem čekića. Elektrolučno zavarivanje i plinsko zavarivanje kisikom su bili među prvim postupcima koji su se razvili u 20. stoljeću. Nakon toga su se razvili mnogi procesi, ali među najzastupljenijim je postalo ručno elektrolučno zavarivanje.



Slika 1. Zona utjecaja topline

Zona utjecaja topline (kratica: ZUT) je dio osnovnog materijala, koji se nalazi neposredno uz zonu taljenja, a gdje dolazi do promjene kristalne strukture i mehaničkih svojstava zbog topline unesene zavarivanjem. Izrazite promjene strukture za nelegirani čelik su iznad $723\text{ }^{\circ}\text{C}$, pogotovo ako nisu dovoljno sporo hladene. Za poboljšane čelike, koji se kale i popuštaju pri relativno niskim temperaturama, bilo kakvo grijanje iznad otprilike $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, uzrokovati će bitne promjene svojstava. Zona utjecaja topline ovisi o unosu topline i obično je 2 do 8 mm.

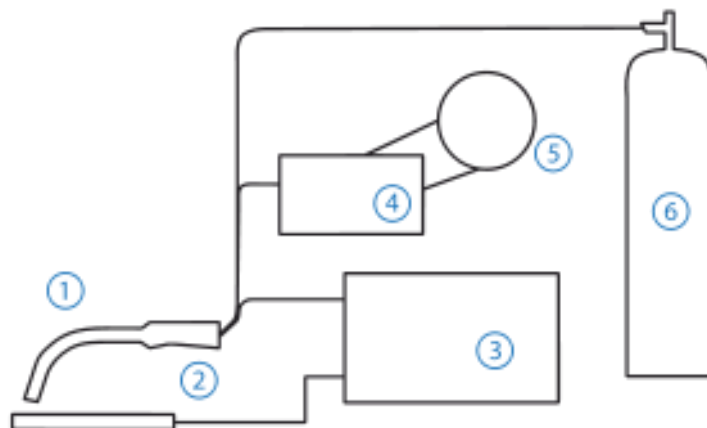
Količina unesene topline igra vrlo važnu ulogu u zavarivanju, pa recimo plinsko zavarivanje kisikom i acetilenom je vrlo nepovoljno, jer se previše unosi topline, dok lasersko zavarivanje unosi vrlo malu količinu topline. Elektrolučno zavarivanje je negdje između ova dva postupka i količina unesene topline se može izračunati:

$$Q = \left(\frac{U \times I \times 60}{S \times 1000} \right) \times \eta$$

gdje je: Q - unos topline (kJ/mm), U - napon (V), I = jačina struje (A) i S - brzina zavarivanja (mm/min). Stupanj iskorištenja (η) ovisi o vrsti postupka, pa je za elektrolučno zavarivanje sa obloženom elektrodom (engl. SMAW) 0,75, za MIG zavarivanje (engl. GMAW) 0,9, a za TIG postupak 0,8.

MIG/MAG postupak

Kod ovog postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice i radnog komada. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju inertni plinovi (Ar ili He) ili aktivni plinovi (CO₂ i mješavine). Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Žica je istovremeno 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.



Slika 2. MIG/MAG zavarivanje

- 1 - pištolj za zavarivanje
- 2 - radni komad
- 3 - izvor struje za zavarivanje
- 4 - uređaj za dobavu taljive žice
- 5 - kolut sa žicom
- 6 - spremnik sa zaštitnim plinom

Kada se zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od 5m od izvora struje, te kada se radi s tanjim žicama ili žicama od mekših materijala (Al i njegove legure) obično se primjenjuje dodatni sustav za dodavanje žice. Takav sustav zove se „push-pull “ sustav i njegova primjena sprječava gužvanje žice unutar cijevnog vodiča (polikabela).

Zaštitni plinovi koji se koriste kod ovog postupka

- štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere
- ionizacijom osiguravaju vodljivi prostor za održavanje električnog luka a dovode se na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju, koja se nalazi oko kontaktne cjevčice.

U slučaju primjene inertnog plina (Ar, He ili njihove mješavine) nema reakcije rastaljenog metala s plinom pa se takvi plinovi koriste kod zavarivanja osjetljivih materijala na utjecaj plinova iz atmosfere (Al, Cu i njihove legure, CrNi čelici, Ti i slično).

Kod zavarivanja u zaštiti aktivnih plinova dolazi do reakcije između CO₂ i rastaljenog metala. CO₂ je inertan pri nižim temperaturama, ali se iznad 1600°C disocira u ugljični monoksid CO i slobodni kisik koji tada reagira s rastaljenim metalom.

Kod MIG/MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6 do 2,4 mm.

Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi bolje električnog kontakta i zaštite od korozije. Osim punih žica koriste se i praškom punjene žice. Mogu se koristiti sa ili bez plinske zaštite.

Iako se osnovni principi i razvoj kontinuiranog električnog luka za zavarivanje spominju već početkom 19. stoljeća, elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih/aktivnih plinova (MIG/MAG ili GMAW – Gas

Metal Arc Welding) primjenu u industriji nalazi tek sredinom 20. stoljeća. Ovaj je postupak prvotno namijenjen zavarivanju aluminija, legura na bazi aluminija te ostalih obojenih materijala, a veću primjenu u zavarivanju čelika pronalazi razvojem aktivnih plinova i mješavina plinova koje su znatno smanjile cijenu zavarivanja. Razvoj ovog postupka prije svega je potaknut zbog veće brzine zavarivanja, veće količine rastaljenog materijala u jedinici vremena, jednostavnog rukovanja ili automatizacije, zbog čega je i danas jedan od najčešće korištenih postupaka u zavarivačkoj industriji.

Razvoj ovog postupka zavarivanja najviše ovisi o razvoju izvora struje za zavarivanje. S mogućnošću podešavanja većeg broja parametara, uz uvjet pravilnog odabira, zasigurno jamči kvalitetniji zavareni spoj uz optimalne troškove. Kvaliteti zavarenih spojeva pridonosi i razvoj plinskih mješavina koje direktno utječu na prijenos metala i na konačan oblik zavarenog spoja.

Upravo način prijenosa metala (prijenos rastaljene kapljice u talinu radnog komada) koji dijelimo na prijenos metala kratkim spojevima, prijenos štrcajućim lukom, prijenos mješovitim lukom i prijenos impulsnim lukom te razvoj izvora struje za zavarivanje omogućava modifikaciju konvencionalnog postupka zavarivanja u svrhu bolje kvalitete zavarenih spojeva, veće produktivnosti i optimizacije troškova.

Parametri kod MAG zavarivanja:

- jakost struje I (A) -brzina žice
- napon električnog luka U (V) -visina električnog luka
- brzina zavarivanja v (cm/min)
- slobodni kraj žice l (mm)
- protok plina Q (l/min) i vrsta plina
- induktivitet L (H)
- promjer žice d (mm) i nagib pištolja α (°)

Prednosti zavarivanja MIG postupkom su: razvijen dovoljno širok spektar dodatnih materijala za zavarivanje, manja cijena opreme za zavarivanje (uređaja za zavarivanje) u odnosu na zavarivanje TIG postupkom; pogodan za pojedinačnu i masovnu proizvodnju, te reparaturna zavarivanja, mogućnost zavarivanja u svim položajima zavarivanja, pogodan za automatizaciju i robotizaciju, daleko veća učinkovitost

(kilograma položenog materijala na sat) u odnosu na zavarivanje TIG postupkom, čista površina metala položenog zavara (bez troske), smanjenje iskrivljenja konstrukcije.

Nedostaci su: kvaliteta zavara još uvijek ovisi o vještini zavarivača (čovjeka) kod poluautomatskog zavarivanja, vrijeme za izobrazbu dobrog zavarivača je kraće nego kod zavarivanja TIG postupkom (mada je praksa da MIG zavarivači prvo nauče ručno elektrolučno zavarivanje), kvaliteta zavarenog spoja je slabija u odnosu na kvalitetu zavarivanja TIG postupkom (kako sa estetskog stajališta, tako i sa stajališta grešaka u zavarenom spoju i mehaničkih svojstava zavarenog spoja), dolazi do jakog bljeskanja pri zavarivanju, pri zavarivanju se oslobađaju plinovi (potrebna dobra ventilacija prostora), dugotrajni rad može ostaviti štetne posljedice na zdravlju zavarivača (reuma, oštećenja dišnog sustava).

Prijenos metala pri zavarivanju

Prijenos metala u električnom luku rezultat je interakcije više fizikalnih fenomena od koji elektromagnetska sila ima dominantnu ulogu. Zbog malog promjera žice moguće je kvalitetno i trenutačno upravljanje cijelim procesom odvajanja sferne kapljice rastaljenog metalnog materijala što se može dogoditi u kratkom spoju ili slobodnim letom kapljice.

Kod konvencionalnih izvora struje za zavarivanje ostvaruju se različiti načini prijenosa metala u električnom luku ovisno o jačini struje i naponu, promjeru žice i vrsti zaštitnog plina. Pri tome, prema gruboj podjeli, razlikujemo područje kratkih spojeva, područje mješovitog luka te područje štrcajućeg luka. Impulsno zavarivanje predstavlja kontrolirani prijenos materijala slobodnim letom i to u području niskih i visokih parametara zavarivanja zahvaljujući visokim razinama impulsne struje. Klasifikacija IIW-a definira tri glavna područja prijenosa metala kod elektrolučnog zavarivanja metalnom taljivom elektrodom: prirodni prijenos, kontrolirani prijenos i modificirano (prošireno) područje prijenosa.

Ono što omogućuju novi koncepti MIG/MAG zavarivanja je svojevrsna interakcija različitih opcija prijenosa materijala u području parametara i

energijskog nivoa gotovo neprimjenjivog kod konvencionalnih postupaka i izvora struje za zavarivanje. Suvremeni postupci MAG zavarivanja se odlikuju modificiranim načinima prijenosa metala kojih je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući 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.

Suvremeni postupci MAG zavarivanja primjenjuju sve nabrojene mehanizme kako bi se olakšalo zavarivanje tankih materijala, smanjio unos topline i deformacije, omogućilo lakše zavarivanje korijenskog prolaza, raznorodnih materijala te povećanih razmaka između limova. Međutim, osim ovih prednosti koje u biti predstavljaju zavarivanje u području razine parametar kratkih spojeva razvijeni su i sustavi modificiranog štrcajućeg luk koji se odlikuju znatno poboljšanom penetracijom.

Relativno niski unos topline omogućuje primjenu MIG lemljenja pocinčanih čeličnih limova. Kako cink (Zn) ima nisku temperaturu taljenja 420°C i isparava na 910°C postoje veliki problemi pri zavarivanju pocinčanih čeličnih limova jer pare cinka uzrokuju prskanje, loš prijenos metala, slabo protaljivanje, porozitet i pukotine. Jedno od rješenja je primjena dodatnog materijala s niskom temperaturom tališta na bazi legure bakra npr. CuSi ili CuAl. Tu MAG postupci s modificiranim prijenosom metala u području kratkog spoja postižu izvrsne rezultate jer ne dolazi od uništavanja cinčanog sloja a kako se većinom radi o tankim materijalima nema deformacija.

Kako su se novi MAG postupci zavarivanja razvili i kako se tehnologija izvora struje poboljšala, pronašlo se nekoliko novih načina prijenosa metala, posebno u izbacivanju metalnih kapljica kroz električni luk. Tako

se razvio prijenos metala impulsnim strujama da se dobije prijenos metala kapljicama kod manjih vrijednosti struje za zavarivanje. Intenzivni impuls struje koji se prenosi za vrijeme perioda male struje je upotrebljen da rastali i odvoji kapljicu od žice.

Bez impulsnih struja s niskim iznosom konstantne struje rastaljeni metal bi se prenosio kao velike kapljice (mješoviti luk).

Analiza suvremenih postupaka MIG/MAG zavarivanja

U današnjoj praksi postoji dvadesetak postupaka MAG zavarivanja koji koriste modificirane prijenose metala i to prvenstveno u području niskog unosa topline kombinirajući kratki spoj i strujni puls ali postoje i varijante koje apliciraju modificirani štrcajući luk. Karakteristični postupci koji integriraju specifične koncepte prijenosa metala jesu kako slijedi :

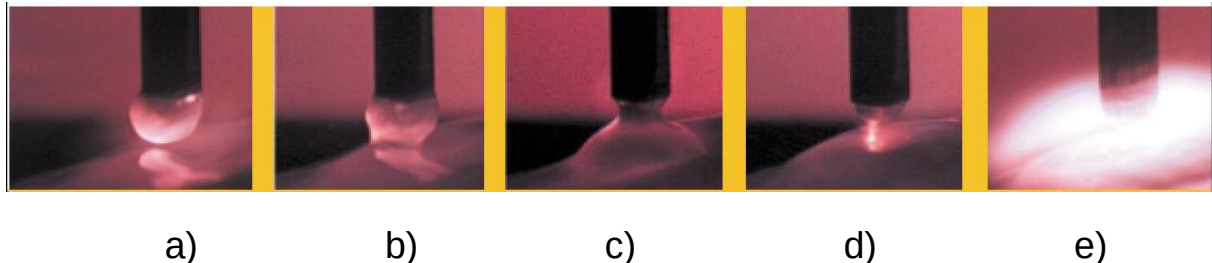
- STT- Surface Tension Transfer®
- FastROOT®
- CMT-Cold Metal Transfer®
- AC MIG-Alternating Current MIG®
- RMT -Rapid MIG/MAG Technology®

Navedeni postupci primjer su kako proizvođači primjenjuju neka od modernih rješenja kod MAG zavarivanja ali treba naglasiti da postoji još niz aplikacija koje se baziraju na sličnim principima poput inačica Cold Arc®, Force Arc®, Cold Weld®, Cold MIG®, RMD-Regulated Metal deposition ®, SP MAG®, MicroMIG®, Cold Pulse ® , IntelliArc ®itd.

STT - Surface Tension Transfer

STT (Surface Tension Transfer) postupak zavarivanja razvijen je u tvrtki Lincoln Electric. Predstavlja suvremeni i učinkoviti postupak zavarivanja koji se najčešće koristi za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu (u jednom prolazu), i to najčešće cijevnih elemenata u prehrambenoj, procesnoj i automobilske industriji. Pogodan je za zavarivanje čelika, visokočvrstih čelika te osobito kod zavarivanja nehrđajućih čelika gdje se zbog samog procesa zavarivanja CPT (Critical

Pitting Temperature) mnogo uspješnije izbjegava nego kao kod klasičnog MIG zavarivanja. STT postupak zavarivanja predviđen je za zahtjevnija poluautomatska ili automatska (robotska) zavarivanja.

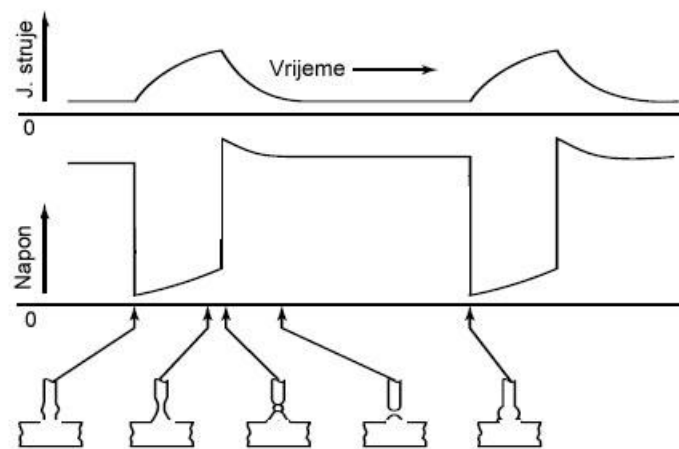


Slika 3. Način odvajanja kapljice pri STT zavarivanju

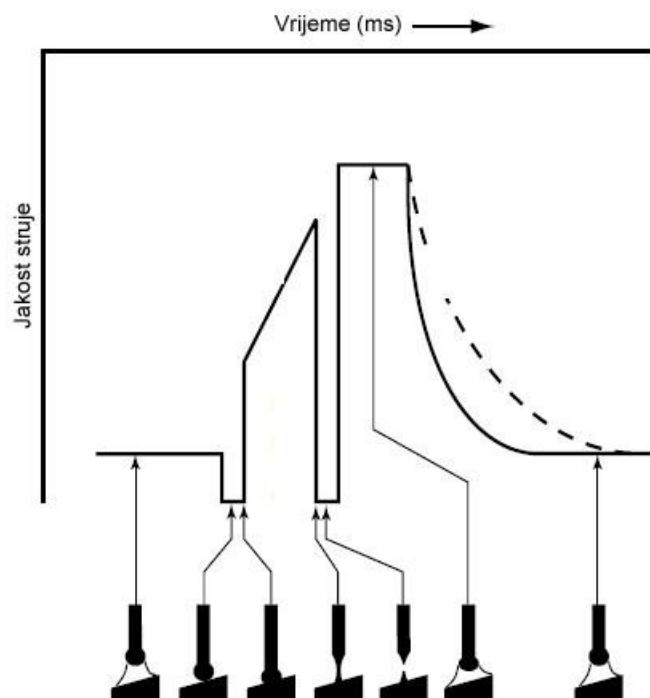
- a)** STT sklopovlje na početku stvara jednoličnu rastaljenu kapljicu koju održava u tom stanju sve dok kapljica ne dođe u kontakt s rastaljenom kupkom
- b)** Kada kapljica dođe u kontakt s rastaljenom kupkom, struja zavarivanja se smanjuje na niži iznos što omogućuje "mirniji" prelazak rastaljene kapljice u kupku
- c)** U ovom koraku se automatski uključuje precizna "pinch" struja (eng. pinch current) koja se primjenjuje kako bi se ubrzao prijenos rastaljene kapljice u kupku, te specijalno sklopovlje osigurava stabilnost luka s istodobnim smanjivanjem štrcanja uz pomoć precizne kontrole struje
- d)** STT sklopovlje ponovno uspostavlja električni luk s nižim iznosom struje
- e)** STT sklopovlje reagira na ponovno uspostavljeni električni luk te automatski uključuje vršnu struju koja određuje odgovarajuću duljinu električnog luka. Nakon toga sklopovlje automatski prebacuje na osnovnu struju koja služi kao bolji regulator unosa topline

STT postupak zavarivanja temelji se na prijenosu materijala kratkim spojevima, a samo odvajanje kapljice obavlja mehanizam površinske napetosti (Surface Tension Transfer). Izvor struje, uz vrlo čestu i

preciznu kontrolu struje zavarivanja, daje maksimum jakosti u trenutku kada je za prijenos metala dovoljan samo mehanizam površinske napetosti. Na taj se način izbjegava rasprskavanje kapljice metala u prijenosu i daljnji nepotreban unos topline, što bi bila posljedica povećanja jakosti struje u kratkom spoju kao što je to kod klasičnog MIG/MAG zavarivanja. Nakon odvajanja kapljice, počinje ponovo naglo povećavanje jakosti struje koje zagrijava vrh elektrode i na taj način priprema za novo odvajanje kapljice.



Slika 4. Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje za konvencionalni MIG/MAG postupak zavarivanja



Slika 5. Prikaz dinamičke karakteristike izvora struje za STT postupak zavarivanja

STT izvor struje za zavarivanje nema ni padajuću ni ravnu statičku karakteristiku već se proces odvija ciklički, a promjene vrijednosti struje su brze (nekoliko milisekunda) te ovise o naponu u električnom luku.

Osim mogućnosti upravljanja većim brojem parametara u odnosu na klasičan MIG/MAG postupak, osnovne prednosti STT-a postupka zavarivanja su:

- odvajanje kapljice bez prskanja
- manji unos topline
- nizak udio difundiranog vodika
- lako rukovanje
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- veća brzina zavarivanja u odnosu na konvencionalni MIG/MAG postupak
- mogućnost korištenja 100% CO₂ kod zavarivanja ugljičnih čelika
- odlično za izvođenje korijenskih zavora u otvorenom žlijebu (zamjena za izvođenje korijenskih zavora REL postupkom celuloznim elektrodama ili izvođenje korijenskih prolaza TIG postupkom)

- laka automatizacija postupka zavarivanja

Prijenos metala kod STT postupka zavarivanja

Postupak STT za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizam površinske napetosti. Porast struje u kratkom spoju se zaustavlja kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog materijala samo uz djelovanje površinske napetosti. Upravo ta kontrola sprječava porast struje koji uzrokuje rasprskavanje kapljice metala te istodobno povećava utjecaj površinske napetosti. Međutim, nakon tog odvajanja slijedi strujni impuls koji priprema i zagrijava vrh žice za novi ciklus odvajanja kapljice. Završna struja tog impulsa, tj. njezin nagib, bitno utječe na unos topline te se kao parametar posebno regulira. Rezultat je vrlo nizak unos energije uz uklanjanje štrcanja.

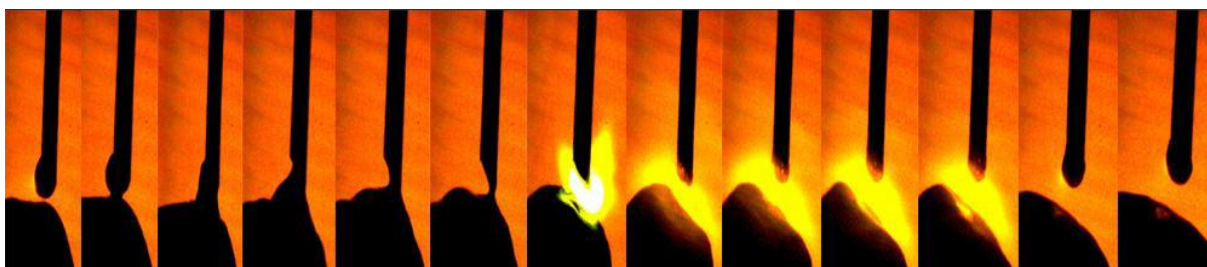
Područje primjene STT postupka

Glavna primjena postupaka STT je za zavarivanje korijenskog prolaza jer kvalitetno odvajanje kapljice bez prskanja, uz mali unos topline, olakšava rad. Usto, primjena MAG postupaka, tj. pune žice kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće, umanjuje rizik od nastanka hladnih pukotina zbog vrlo niske količine difundiranog vodika i uklanja potrebu zavarivanja tzv. „vrući“ prolaz“ kod izgradnje cjevovoda. Još je jedna značajka koja predstavlja mogućnost zavarivanja pripreme s većim smaknućem i razmakom. Zbog malog unosa topline postupak je pogodan za zavarivanje tankih materijala, i to nelegiranoga i visokolegiranog čelika, legure nikla.

FastROOT

Osnovni koncept FastROOT postupka zasniva se na modificiranom prijenosu metala kratkim spojevima što rezultira niskim unosom energije. Pri zavarivanju ovim postupkom napon i struja zavarivanja su digitalno

kontrolirani. Obrazac kombinacije struje kratkog spoja i sekundarnog strujnog pulsa za zagrijavanje javlja se i ovom slučaju. Naime, nakon prvog stanja kratkog spoja u kojem dolazi do odvajanja kapljice aktivira se drugi strujni interval koji zagrijava osnovni materijal i vrh žice te ga priprema za novi ciklus. Ovim sekundarnim strujnim pulsom dovodi se značajna količina topline koja utječe na oblikovanje zavarenog spoja. Nakon toga održava se osnovna struja koja osigurava energijsko stabilno stanje električnog luka i taline do slijedećeg kratkog spoja. Da bi se realizirao ovako sofisticirani prijenos metala u električnom luku potrebna je izrazito brza regulacija jačine struje i napona u svakom trenutku odvajanja kapljice što rezultira prijenosom metala bez štrcanja.



Slika 6. Način odvajanja kapljice pri FastROOT zavarivanju

Glavna primjena FastROOT postupka je zavarivanje korijenskog prolaza gdje se regulacijom parametara sekundarnog strujnog pulsa može precizno utjecati na oblik provara, slika 7. Brzo zavarivanje korijenskog prolaza čak i u uvjetima većeg razmaka i smaknuća bez štrcanja u PG položaju karakteristika je ovog postupka koja je vrlo često aplicirana u praksi.



Slika 7. Utjecaj sekundarnog strujnog pulsa na oblik provara kod FastROOT postupka

Osim za korijenski prolaz, FastROOT je zbog niskog unosa energije pogodan za zavarivanje tankih limova (nelegirani i visokolegirani čelik, Ni legure) poglavito u situacijama većeg razmaka između komada, slika 7. Isto tako moguća je primjena za tvrdo MIG lemljenje.

Uz pravilno namještanje osnovne struje zavarivanja i struje zavarivanja nakon odvajanja kapljice koja oblikuje zavareni spoj i brzine žice zavarivanja, ovakav postupak zavarivanja daje am sljedeće prednosti:

- niski unos energije – zavarivanje tankih limova
- mogućnost zavarivanja korijenskih prolaza
- veća produktivnost (veća brzina zavarivanja)
- olakšan rad zavarivača

Prijenos metala kod FastROOT postupka

Obrazac kombinacije struje kratkog spoja i sekundarnog strujnog pulsa za zagrijavanje javlja se i u ovom slučaju. Naime, nakon prvog stanja kratkog spoja, u kojem dolazi do odvajanja kapljice, aktivira se drugi strujni interval koji zagrijava osnovni materijal i vrh žice te ga priprema za novi ciklus. Ovim sekundarnim strujnim pulsom dovodi se značajna količina topline koja utječe na oblikovanje zavarenog spoja. Nakon toga održava se osnovna struja koja osigurava energijsko stabilno stanje električnog luka i taline do sljedećega kratkoga spoja. Da bi se ostvarilo ovako sofisticirani prijenos metala u električnog luku potrebna je izrazito brza regulacija jačine struje i napona u svakom trenutku odvajanja kapljice, što rezultira prijenosom metala bez štrcanja.

Područje primjene FastROOT postupka

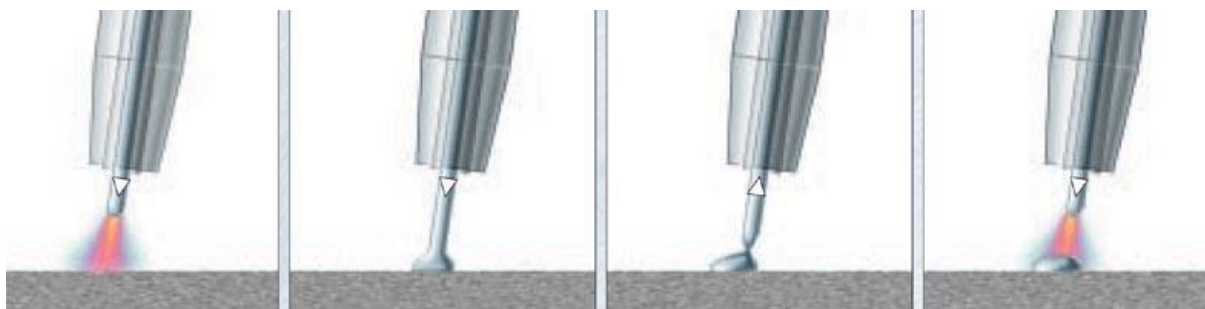
Glavna primjena FastROOT postupka je zavarivanje korijenskog prolaza gdje se regulacijom parametara sekundarnog strujnog pulsa može

precizno utjecati na oblik provara. Brzo zavarivanje korijenskog prolaza, čak i u uvjetima većeg razmaka i smaknuća bez štrcanja u PG (Položaj zavarivanja: vertikalno prema dolje) položaju, značajka je ovog postupka koji je vrlo često primjenjen u praksi.

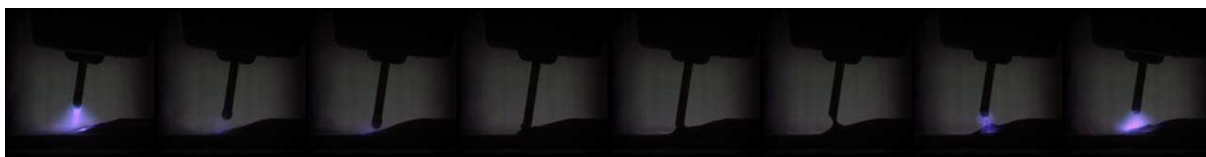
Osim za korijenski prolaz, FastROOT je zbog niskog unosa energije pogodan za zavarivanje tankih i ultra tankih limova od 0,3 mm pa na dalje (nelegirani i visokolegirani čelik, nikal legure) poglavito u situacijama većeg razmaka između komada.

CMT-Cold Metal Transfer

CMT postupak predstavlja modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima pri čemu se primjenjuje „mehaničko“ rješenje tj. povratno gibanje žice. Karakteristično je da se odvajanje kapljice odvija u uvjetima jako niskog unosa topline koji kod klasičnog prijenosa kratkim spojevima jednostavno ne bi bio dovoljan. U ovom slučaju povratno gibanje žice kompenzira nedostatak toplinske energije i elektromagnetske sile jer se prijenos metala odvija pri vrlo niskoj jačini struje. Digitalna tehnologija omogućuje precizno upravljanje gibanjem žice a specifična je i vrlo precizna regulacija duljine električnog luka pomoću mehaničkog gibanja. Frekvencija povratnog gibanja žice je najčešće između 60 i 80 Hz što zahtjeva vrlo sofisticiranu kontrolu gibanja žice i primjenu određenih rješenja poput ugradnje dodatnog servomotora u pištolj za zavarivanje i ugradnju međuspremnika žice tzv. „wire buffer“ koji kompenzira povrat žice elastičnom deformacijom.



Slika 8. Shematski prikaz povratnog gibanja žice



Slika 9. Način odvajanja kapljice kod CMT postupka

U graničnim slučajevima kada se zahtjeva veći unos topline od onog koji može ostvariti CMT proces postoji mogućnost ubacivanja strujnih impulsa koji daju više topline i bolju penetraciju i to između ciklusa odvajanja kapljice. Primjena CMT postupka prvenstveno se odnosi na područje MIG tvrdog lemljenja, zavarivanje tankih limova (aluminij, nelegirani i nehrđajući čelik) kao i spajanje aluminija i pocinčanog lima. Ovaj slučaj posebno je zanimljiv jer integrira zavarivanje (na strani aluminija) i tvrdo lemljenje (na strani pocinčanog lima), CMT također odlikuje dobra mogućnost premošćivanja zazora pri spajanju tankih materijala.

AC MIG (Alternating Current)

Kod MAG postupka se pretežito primjenjuje pozitivan polaritet na žici i to kod konvencionalnih i modernih postupaka. Negativan polaritet kod EPP daje veću brzinu taljenja i veći depozit uz manju penetraciju. Isti efekt postiže se i kod MAG postupka ali je ponašanje električnog luka na negativnoj elektrodi nepravilno i ima dosta prskanja. Primjena negativnog polariteta je česta kod praškom punjenih žica. Primjena promjenjivog polariteta na žici kod MAG zavarivanja tj. izmjena pozitivnog i negativnog ciklusa na žici omogućuje bolju kontrolu procesa i premošćivanje većih zazora kod tanjih materijala. Izmjenom polariteta postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku tj. balansom pozitivnog i negativnog pola na elektrodi i radnom komadu. Međutim, treba napomenuti da su izvori struje za AC MIG su dosta složeni i kompleksni.

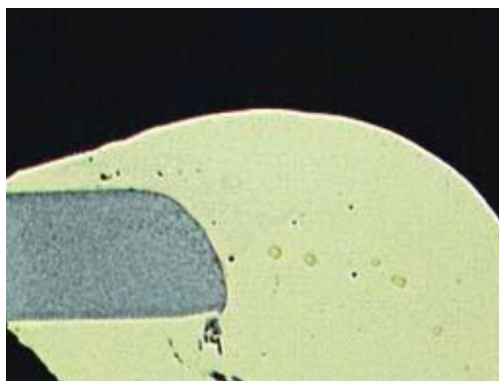
Ovisno o primjeni negativnog polariteta na žici (EN ratio) mijenja se oblik penetracije kao i mogućnost premošćivanja pri zavarivanju tankih

limova. Na slici 10. prikazan je utjecaj negativnog polariteta pri spajanju aluminijske legure AlMg4,5Mn debljine 1,5mm.



Slika 10. Utjecaj balansa negativnog polariteta na oblik zavora i geometriju spoja

AC MIG moguće je, kao i sve niskoenergijske postupke, primijeniti i za tvrdo lemljenje pri čemu balans negativnog polariteta na žici zanatno utječe na mogućnost premošćivanja između radnih komada, slika 11.

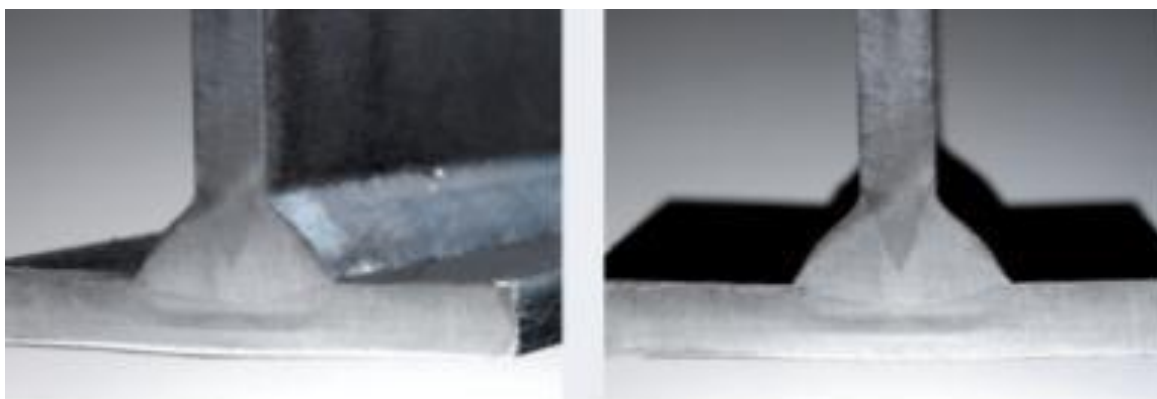


Slika 11. Makroizbrusak tvrdo lemljenog spoja žicom ER-CuSi A na pocinčanom čeliku, udio negativnog polariteta EN=70%

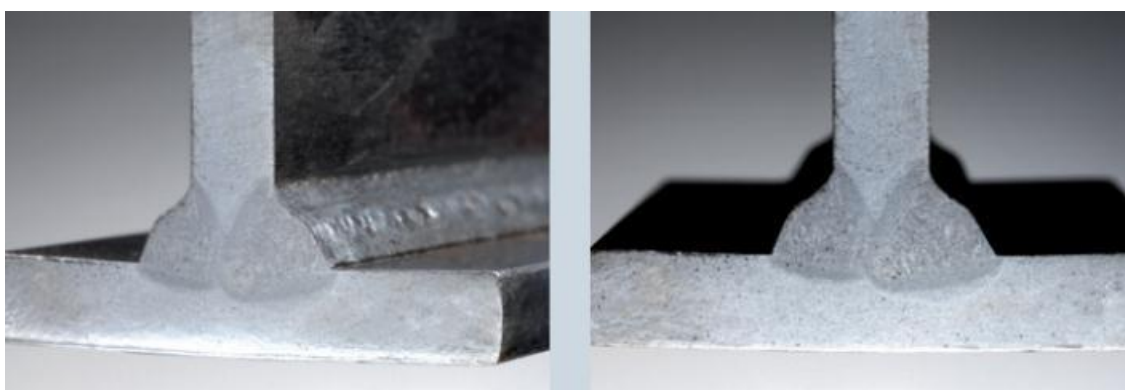
RMT-Rapid MIG/MAG Technology

RMT (Rapid MIG/MAG Technology), razvijen u tvrtki ESS Schweisstechnik, je postupak koji se temelji na štrcajućem luku (štrcajućem prijenosu metala). RMT postupak ne spada u skupinu

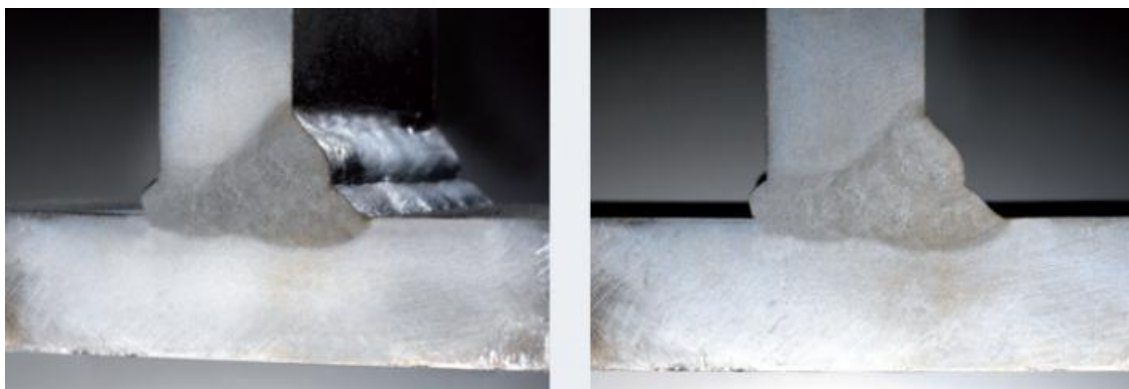
niskoenergijskog MIG/MAG zavarivanja koje se realizira u području kratkih spojeva. Za razliku od klasičnog štrcajućeg luka, koji ovisi o karakteristikama dodatnog materijala i o zaštitnom plinu. Optimalan prijenos štrcajućim lukom postiže se u mješavinama bogatim argonom a prijelazna struja pada kako udio argona raste. Kod RMT tehnologije teži se skraćivanju električnog luka, pri čemu dolazi do pada napona i povećanja koncentracije unesene energije. Na taj način električni luk se sužava, a energija električnog luka djeluje na manjoj površini, čime se dobiva veća penetracija. Zbog spomenutih karakteristika ovaj je postupak iznimno pogodan za zavarivanje debljih pozicija, a kutni zavareni spojevi debljine do 8 mm mogu se zavarivati bez posebne pripreme spoja.



Slika 12. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom $d=6$ mm

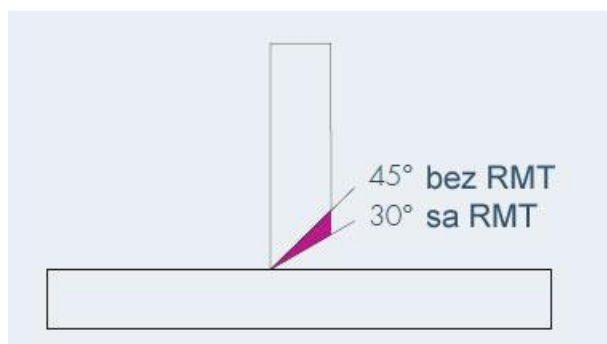


Slika 13. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom $d=8$ mm



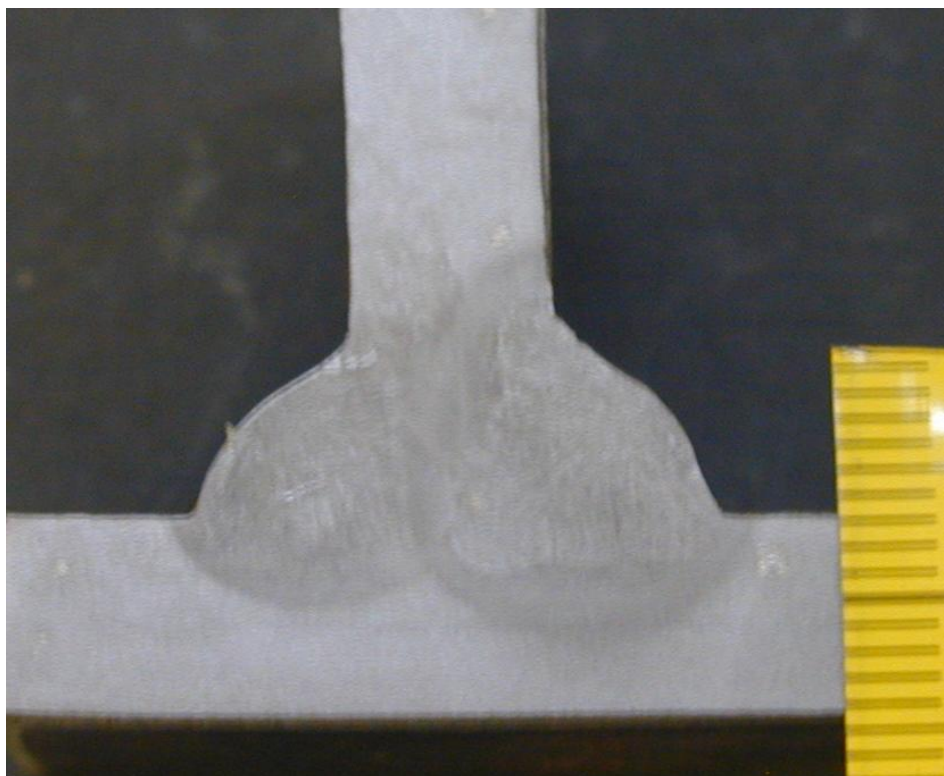
Slika 14. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom $d=20\text{mm}$

Primjena RMT postupka omogućuje reviziju pripreme spoja u kontekst smanjenja otvora kuta ili potpune eliminacije izrade žlijeba kod zahtjeva za npr. potpunim kutnim provarom, slika 15. Kod većih debljina materijala kut pripreme se smanjuje sa 45° na 30° čime smanjujemo broj prolaza. Isto tako, relativno u odnosu na štrcajući luk postižu se veće brzine zavarivanja tako da je u konačnici unos topline niži.



Slika 15. Priprema kutnog spoja kod RMT postupka zavarivanja

Iako je filozofija smanjenja unosa energije za razliku od STT i FastROOT postupka drukčija, i ovdje se zbog veće penetracije, a time i manjeg broja prolaza, unosi znatno manja količina energije nego što je slučaj kod konvencionalnih MIG/MAG postupaka. To rezultira boljim spojem, manjim deformacijama (manji broj prolaza), većom brzinom zavarivanja (velika gustoća električnog luka) i znatno manjim vremenom pripreme spoja.



Slika 16. Makroizbrusak kutnog spoja s potpunom penetracijom; S355 debljine 8mm; visina kutnog spoja 4mm; $I=265A$; Unos topline $11kJ/cm$

Prijenos metala kod RMT postupka

Kod konvencionalnoga štrcajućeg luka prijenos metala se ostvaruje u neprekidnom nizu kapljica malog promjera. Prijelazna struja, kod koje dolazi do stabilnoga štrcajućeg luka, ovisi o vrsti i promjeru žice te zaštitnom plinu. Optimalan prijenos štrcajućim lukom postiže se u mješavinama bogatim argonom, a prijelazna struja pada kako udio argona raste.

Kod postupaka RMT MAG prijenos materijala zbiva se u vrlo sitnim kapljicama, pri čemu je frekvencija prijenosa oko 2-3 kHz. Tim mehanizmom još se sužava jezgra luka, snižava napon i visina luka u odnosu na klasični štrcajući luk, što rezultira većom koncentracijom energije i znatno intenzivnijom penetracijom.

Analiza RMT postupka

Sa tehničke perspektive, debele stijenke zahtjevaju posebnu kvalitetu zavora. Dubina i oblik zavora utječu na čvrstoću zavarenog spoja. Uz to, postoje i brojni drugi zahtjevi na izgled i efikasnost postupka zavarivanja. Pa tako novi razvoj RMT (Rapid MIG/MAG Technology) postupka ostvaruje brojne prednosti.

Pomoću jako brze analize i sistematskog odnosa parametara elektrolučnih procesa, moguće je prebaciti konvencionalni električni luk u područje sa manje električnog otpora. To znači da RMT električni luk prenosi 10% više snage za istu brzinu dovoda žice što je očito zbog veće jakosti struje. Dužina električnog luka ostaje ista kao kod konvencionalnog električnog luka. RMT ne zahtjeva posebno rukovanje pištoljem. Korisnik prepoznaje RMT električni luk po prepoznatljivom tihom zviždanju i jako stabilnom i koncentriranom električnom luku sa izvrsnom penetracijom.

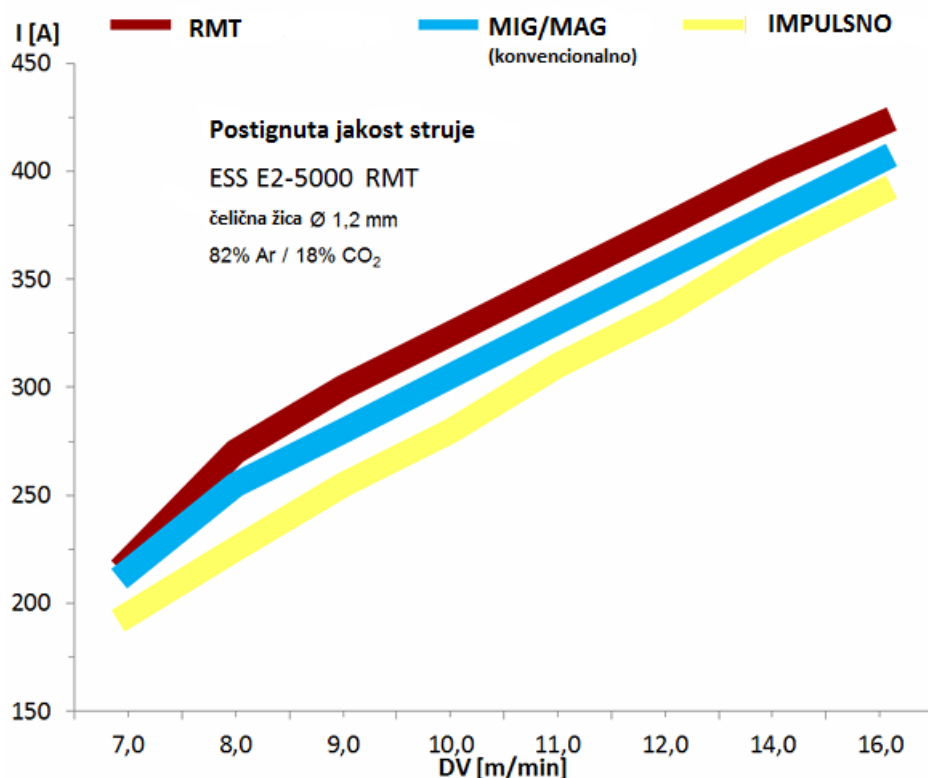
Proces jakog električnog luka može se ostvariti na više načina. Jedna metoda je da se smanji dužina električnog luka tako da se smanji napon, što obično uzrokuje kratke spojeve sa jakim prskanjem. Upotrebom modernih uređaja za mjerenje i kontrolu moguće je da izvor struje prepozna te kratke spojeve i brzo reagira tako da se smanji prskanje. Ovisno o karakteristikama, jakost struje se povećava sa kraćim električnim lukom i smanjuje se širina zavora, tj. struja za zavarivanje će nam utjecati na manjem dijelu električnog luka (dobili smo središnju točku na predmetu kojeg zavarujemo). Zbog velike gustoće struje, penetracija se povećava sa skraćivanjem električnog luka.

Drugi način povećavanja jakosti električnog luka može se dobiti sa jako brzim mjerenjem i kontrolom. Konvencionalni električni luk je prebačen u područje sa manje električnog otpora. To znači da se za istu brzinu dobave žice može predati više energije nego kod konvencionalnog električnog luka. Zbog povećane energije električni luk je stabilniji, a uobičajena dužina električnog luka ostaje nepromijenjena.

Prema tome, RMT metoda je najbolja za smanjenje skošenja koja su predviđena za zavarni spoj. Sa RMT električnim lukom, šavovi su bolje

spojeni zbog više energije za istu dužinu električnog luka. Smanjenje kutova predviđenih za zavareni spoj je jako ekonomično zbog toga što je potrebno manje slojeva, a tako imamo i ljepši zavar. Posljedica toga je da je upravljanje pištoljem znatno olakšano i zahtjeva manju preciznost.

Ovisno o vrsti zavara, veća gustoća struje sa RMT električnim lukom može se provoditi većom brzinom zavarivanja.



Slika 17. Usporedba dosega jakosti struje za različite električne lukove

Zaključak

Potaknuti sve boljom konkurencijom, ali i zahtjevima industrije (optimizacija troškova, povećanje produktivnosti, razvoj novih materijala, specifični tehnički zahtjevi itd.), proizvođači opreme i uređaja za zavarivanje primorani su ulagati u razvoj svojih proizvoda. Dokaz tome je i niz modifikacija gotovo svih postupaka zavarivanja koje su trenutačno dostupne na tržištu. Vidljivo je da se razvoj bazira najčešće na suvremenim izvorima struje za zavarivanje koji u specifičnim uvjetima daju optimalne rezultate: zadovoljavajuću kvalitetu zavarenog spoja, minimalni unos topline i nastale deformacije itd. Kako je riječ i o specifičnim uređajima i postupcima zavarivanja, prije odabira treba analizirati sve tehničke zahtjeve i isplativost ulaganja u iste jer se radi o skupim i sofisticiranim uređajima koji možda pri nekim drugim tehničkim zahtjevima neće dati bolja svojstva zavarenih spojeva, bolju produktivnost ili optimizaciju troškova s obzirom na konvencionalne uređaje, opremu i postupke.

Vidljiv je intenzivan razvoj na području realizacije postupaka koji integriraju nekoliko opcija za prijenos metala u električnom luku, što se prvenstveno odnosi na kombinaciju kratkih spojeva i strujnih impulsa (STT, FastROOT) uz upravljanje valnim oblicima struje i napona. Pri tom se još može sniziti količina potrebne energije ako se implementira mehanički rad poput povratnog gibanja kod CMT postupka. Uvođenjem izmjenične struje i promjenom balansa polariteta na žici i radnom komadu postiže se precizna raspodjela topline (AC MIG). Isto tako, modifikacije u području štrcajućeg luka omogućavaju bitno bolju penetraciju i veću brzinu zavarivanja (RMT).

Uza sve svoje prednosti, potrebno je naglasiti da nabrojeni postupci zahtijevaju znatno složeniju i sofisticiraniju opremu što se očituje u cijeni iste. Osim toga, za kvalitetnu primjenu potrebno je definirati i odrediti područja gdje će se rad s takvim postupcima isplatiti preko povećanja produktivnosti i postizanja određenih komparativnih karakteristika poput smanjenja deformacije. Isto tako, da bi se optimalno iskoristila npr. veća penetracija potrebno je napraviti reviziju pripreme žlijeba. Suvremeni postupci MAG zavarivanja imaju velike mogućnosti samo ako se točno odredi područje u kojem imaju bitno bolje karakteristike od konvencionalne opreme. U protivnom kupnja skupe opreme može se pokazati neisplativom i promašenom investicijom. Određena područja aplikacije u poveznici s automatiziranim i robotiziranim zavarivanjem omogućuju produktivnost i postizanje kvalitete zavara kakva s konvencionalnom opremom nije bila moguća.

Literatura

- [1] Garašić I., Suvremeni postupci MAG zavarivanja, nastupno predavanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.
- [2] Norrish J., A Review of Metal Transfer Classification in Arc Welding, IIW doc XII-1769-03, 2003.
- [3] Kralj, S., Andrić, J., (1992.), Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, FSB, Zagreb
- [4] Anzulović, B., (1990.), Zavarivanje i srodni postupci, FESB Split
- [5]<https://www.scribd.com/document/257395397/Zavarivanje>
- [6]http://www.ess-welding.com/en/technologies/ess_rmt,388,67.php
- [7]<http://www.lincolnelectric.com/assets/us/en/literature/nx220.pdf>
- [8]http://www.axson.se/pdf/fro_bro_CMT_eng.pdf
- [9]<https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje>