Dinamička karakteristika izvora struje za MAG zavarivanje

Širić, Petra

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:763870

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Petra Širić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na pruženoj stručnoj pomoći tijekom izrade završnog rada.

Asistentici dr. sc. Maji Jurica se zahvaljujem na strpljenju, savjetima i pomoći tijekom provođenja eksperimenta.

Također, zahvaljujem svim djelatnicima Laboratorija za zavarene konstrukcije što su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog dijela rada.

Hvala mojoj obitelji, prijateljima i kolegama koji su me tijekom studiranja motivirali i slavili svaki moj uspjeh.

Najviše zahvaljujem svojoj majci, bratu i sestrama na beskrajnoj podršci i razumijevanju tijekom cijelog obrazovanja.

Naposljetku, posebno se zahvaljujem svojem ocu koji nažalost ovaj rad neće pročitati, a ostat će uvijek najveća motivacija.

Petra Širić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **PETRA ŠIRIĆ** Mat. br.:**0035201850**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **DINAMIČKA KARAKTERISTIKA IZVORA STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DYNAMIC CHARACTERISTIC OF GMAW WELDING POWER SOURCE**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu zadatka potrebno je opisati izvore struje za MIG/MAG zavarivanje s posebnim osvrtom na njihovu statičku i dinamičku karakteristiku. Detaljno opisati vrste prijenosa metala u električnom luku i navesti okvirni raspon parametara zavarivanja za određeni promjer žice. Proučiti mogućnost definiranja optimalne kombinacije parametara zavarivanja pomoću sinergijske krivulje.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno pomoću odgovarajuće opreme za određeni izvor struje snimiti dinamičke karakteristike. Odrediti raspone parametara zavarivanja za različite načine prijenose metala s obzirom na različite zaštitne plinove. Također je potrebno snimljene dinamičke karakteristike analizirati sa stanovišta stabilnosti procesa.

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

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA ... III
POPIS TABLICA ... V
POPIS KRATICA ... VI
POPIS OZNAKA ... VII
SAŽETAK ... VIII
SUMMARY ... IX
1. UVOD ... 1
2. MAG ZAVARIVANJE ... 2
2.1. Prijenos metala u električnom luku ... 5
2.1.1. Prirodni prijenos ... 5
2.1.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima ... 6
2.1.1.2. Prijenos premošćivanjem ... 8
2.1.1.3. Prisilan prijenos kratkim spojevima ... 9
2.1.1.4. Prijenos metala prijelaznim lukom ... 9
2.1.1.5. Prijenos metala štrcajućim lukom ... 11
2.1.1.6. Visokoučinski štrcajući luk ... 12
2.1.1.7. Rotirajući luk ... 12
2.1.2. Kontrolirani prijenos ... 13
2.1.2.1. Prijenos metala impulsnim lukom ... 14
2.1.3. Modificirano (prošireno) područje prijenosa ... 16
2.1.3.1. STT (Surface Tension Transfer) [3] ... 18
2.1.3.2. FastROOT [3] ... 19
2.1.3.3. CMT (Cold Metal Transfer) [3] ... 20
2.1.3.4. AC MIG [3] ... 21
2.1.3.5. RMT (Rapid MIG/MAG Technology) [3] ... 22
2.2. Okvirni raspon parametara zavarivanja za određeni promjer žice ... 23
3. IZVORI STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE ... 30
3.1. Inverterski izvori struje za MAG zavarivanje ... 30
3.1.1. Podešavanje parametara MAG zavarivanja ... 33
3.1.1.1. Sinergijske krivulje ... 33
4. EKSPERIMENTALNI DIO ... 34
4.1. Opis eksperimenta ... 34
4.2. Mjerni uređaji i oprema za zavarivanje ... 34
4.3. Osnovni materijal ... 36
4.4. Dodatni materijal ... 37
4.5. Zaštitni plin ... 38
4.6. Parametri navarivanja ... 38
4.7. Priprema i izrada ispitnih uzoraka ... 40
4.8. Provedba ispitivanja svojstava navara ... 40
4.9. Dobiveni rezultati mjerenja i njihova analiza ... 43
4.9.1. Analiza dinamičke karakteristike izvora struje Fronius TPS 400i ... 43

4.9.2. Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki navara 48
4.9.3. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki navara 49
5. ZAKLJUČAK 51
LITERATURA 53
PRILOZI 54

POPIS SLIKA

Slika 1. Detalj MIG/MAG procesa zavarivanja [2] ... 2
Slika 2. Oprema za MIG/MAG zavarivanje [2] ... 3
Slika 3. Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [5] ... 7
Slika 4. Dva slučaja odvajanja kapljice kod prijenosa metala prijelaznim lukom [5] ... 10
Slika 5. Prijenos metala kod visokoučinskog štrcajućeg luka [6] ... 12
Slika 6. Prijenos metala kod rotirajućeg luka [1] ... 13
Slika 7. Karakteristika impulsne struje [5] ... 14
Slika 8. Dinamička karakteristika: 1) u = f(t); 2) i = f(t) STT postupka [3] ... 18
Slika 9. Slijed odvajanja kapljice pri STT zavarivanju [3] ... 18
Slika 10. Dinamička karakteristika: 1) u = f(t); 2) i = f(t) FastROOT postupka [3] ... 19
Slika 11. Slijed odvajanja kapljice pri FastROOT zavarivanju [3] ... 20
Slika 12. Shematski prikaz povratnog gibanja žice (treći kadar) [3] ... 20
Slika 13. Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [3] ... 21
Slika 14. Makroizbrusak spoja aluminijskog i pocinčanog lima izvedenog CMT postupkom [3] ... 21
Slika 15. Dinamička karakteristika i = f(t) (žuti oscilogram) i u = f(t) (crveni oscilogram) kod AC MIG postupka [3] ... 22
Slika 16. Dinamička karakteristika: 1) u = f(t); 3) i = f(t) RMT postupka [3] ... 22
Slika 17. Odnos jakosti struje i brzine dodavanja žice od ugljičnog čelika [5] ... 24
Slika 18. Odnos jakosti struje i brzine dodavanja žice od aluminija [5] ... 24
Slika 19. Odnos jakosti struje i brzine dodavanja žice od nehrđajućeg čelika [5] ... 25
Slika 20. Odnos jakosti struje i brzine dodavanja žice od bakra [5] ... 25
Slika 21. Blok dijagram inverterskog izvora struje [3] ... 31
Slika 22. Dijagram struje i napona koji prikazuje ravnu (blagopadajuću) izlaznu karakteristiku, CV [3] ... 32
Slika 23. Radno mjesto u laboratoriju za zavarivanje, FSB, Zagreb ... 34
Slika 24. Izvor struje za zavarivanje Fronius TPS 400i [10] ... 35
Slika 25. Osciloskop Tektronix TDS 210 ... 36
Slika 26. Specifikacija dodatnog materijala [11] ... 37
Slika 27. Boca zaštitnog plina Argon 4.8 ... 38
Slika 28. Položaj pištolja kod zavarivanja uzoraka – neutralna tehnika [2] ... 39
Slika 29. Shema spajanja mjerne opreme [2] ... 41
Slika 30. Makroizbrusak 1. snimljen stereoskopskim mikroskopom – prijenos metala čistim CMT postupkom ... 42
Slika 31. Makroizbrusak 2. snimljen stereoskopskim mikroskopom – prijenos metala impulsnim CMT postupkom ... 42
Slika 32. Makroizbrusak 3. snimljen stereoskopskim mikroskopom – prijenos metala kombiniranim CMT postupkom ... 43
Slika 33. Dinamička karakteristika u, i = f(t) procesa navarivanja čistim CMT postupkom 44
Slika 34. Izgled navara postignutog čistim CMT postupkom ... 44
Slika 35. Dinamička karakteristika u, i = f(t) procesa navarivanja impulsnim CMT postupkom ... 45
Slika 36. Izgled navara postignutog impulsnim CMT postupkom ... 45
Slika 37. Dinamička karakteristika u, i = f(t) procesa navarivanja kombiniranim CMT postupkom ... 46
Slika 38. Izgled navara postignutog kombiniranim CMT postupkom ... 46

Slika 39. Oscilogram dinamičke karakteristike u, i = f(t), pri čistom CMT prijenosu metala 47
Slika 40. Prikaz kuta kvašenja i sila površinske napetosti za različite navare [5]..... 48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Znanstvena podjela načina prirodnog prijenosa [4] 6
Tablica 2. Rasponi parametara za MAG zavarivanje ugljičnih i niskolegiranih čelika (prijenos metala štrcajućim lukom) [5] 26
Tablica 3. Rasponi parametara za MAG zavarivanje ugljičnih i niskolegiranih čelika u ravnom položaju (prijenos metala kratkim spojem) [5] 26
Tablica 4. Rasponi parametara za MAG zavarivanje aluminija (štrcajući luk) [5] 27
Tablica 5. Rasponi parametara za MAG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika (štrcajući luk) [5] 27
Tablica 6. Rasponi parametara za MAG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika (prijenos metala kratkim spojem) [5] 28
Tablica 7. Rasponi parametara za MAG zavarivanje legura bakra [5] 28
Tablica 8. Rasponi parametara za MAG zavarivanje magnezija [5] 29
Tablica 9. Karakteristike izvora struje za zavarivanje Fronius TPS 400i [10] 35
Tablica 10. Zadani (postavljeni) i stvarni (očitani) parametri navarivanja uzoraka u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar 39
Tablica 11. Vrijednosti unosa topline za zadane i stvarne vrijednosti svakog uzorka 40
Tablica 12. Vremena trajanja cijelog impulsa i kratkog spoja kod sva tri načina prijenosa metala 47
Tablica 13. Geometrijska analiza makroizbrusaka 49

POPIS KRATICA

Oznaka	**Opis**
AC	Alternating Current
AC MIG	Alternating Current MIG
Ar	Argon
CC	Constant Current
CMT	Cold Metal Transfer
CO_2	Ugljični dioksid
CV	Constant Voltage
DC	Direct Current
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitnim praškom
He	Helij
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IIW	International Institute of Welding
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom
RMG	Regulated Metal Deposition
RMT	Rapid MIG/MAG Technology
STT	Surface Tension Transfer
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing
Zn	Cink

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
η	-	Iskoristivost
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje
Q	kJ/cm	Unos topline
R	Ω	Električni otpor
t	s	Vrijeme
θ	°	Kut kvašenja
U	V	Napon
v_z	m/min	Brzina dodavanja žice

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisan je MAG postupak zavarivanja, parametri MAG zavarivanja i načini prijenosa metala u električnom luku. Ukratko su opisani izvori struje za MIG/MAG zavarivanje osvrćući se posebno na njihovu statičku i dinamičku karakteristiku te mogućnost definiranja parametara zavarivanja pomoću sinergijske krivulje.

U eksperimentalnom dijelu rada, koji je proveden u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, snimljene su dinamičke karakteristike za različite prijenose CMT postupka zavarivanja koje su analizirane kako bi se uočile razlike u prijenosima metala. Također, analizirane su geometrijske značajke navara. Promatrano je ponašanje pojedinog načina prijenosa metala CMT postupka za nepromjenjive parametre navarivanja.

Ključne riječi: MAG zavarivanje, načini prijenosa metala, izvori struje za zavarivanje, CMT zavarivanje, dinamička karakteristika izvora struje

SUMMARY

The theoretical part of the paper describes the GMAW welding process, parameters of GMAW welding and metal transfer modes of metals. Welding power sources for GMAW welding are briefly discussed, with particular reference to their static and dynamic characteristic, and the ability to define welding parameters using synergic curves.

In the experimental part, which was performed in Laboratory for welding, Faculty of mechanical engineering and naval architecture, University of Zagreb, dynamic characteristics were recorded for different metal tranfer modes of CMT welding, which were analyzed to detect differences in metal transfers. The weld bead geometric characteristics were also analyzed. The behavior of a particular metal transfer mode of the CMT process for invariant welding parameters was observed.

Key words: GMAW welding, metal transfer modes, CMT welding process, welding power sources, dynamic characteristic of a welding power source

1. UVOD

Optimiranje proizvodnih procesa i zahtjevi tržišta za povećanjem učinkovitosti već se dulje osjete i na području primjene tehnoloških postupaka zavarivanja, posebno u proizvodnji u kojoj prevladavaju procesi zavarivanja. U tu svrhu postojeći postupci zavarivanja se usavršavaju, a nova tehnološka rješenja dobivaju na značenju. Kvalitetna i široka ponuda uređaja za zavarivanje te dodatnih materijala i zaštitnih plinova važni su čimbenici u tim procesima [1].

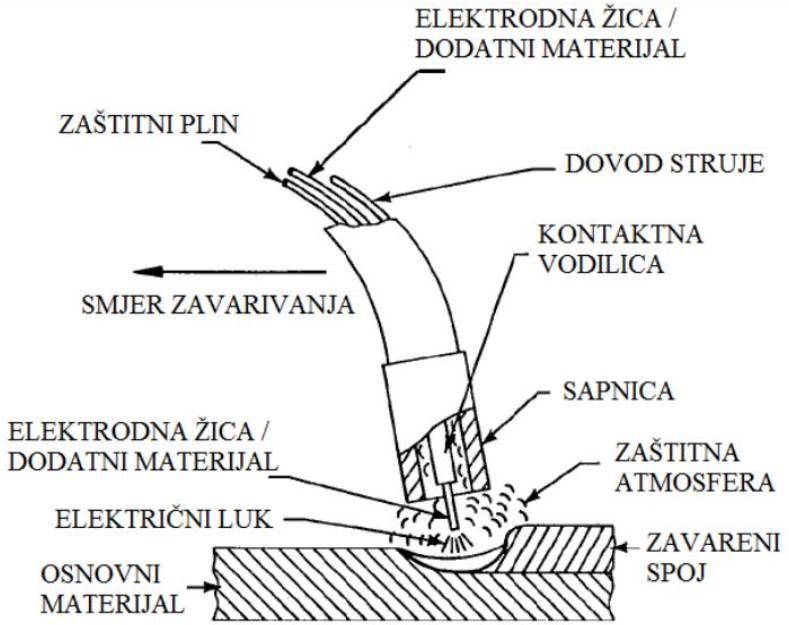
Postupak zavarivanja MIG/MAG pokazao se kao posebno pogodan za uvođenje mehaniziranih i automatiziranih procesa u proizvodnji. U zadnjih desetak godina ovaj postupak preuzeo je više od dvije trećine od svih zavarivačkih procesa u primjeni. Jednostavnost uvođenja i lakoća rukovanja, uz velike mogućnosti povećanja brzine zavarivanja i količine depozita, omogućili su primjenu ovog postupka i u područjima koja je do sada pokrivao isključivo EPP postupak zavarivanja [1].

MAG postupak prikladan je za zavarivanje tankih limova, ali je u području minimalnog unosa topline, tj. kratkom luku osjetljiv na štrcanje rastaljenih kapljica – posljedice nestabilnog procesa. Potrebno je naglasiti da prvenstveno automobilska industrija, kao i druge koje primjenjuju tanke limove, kontinuirano zahtijevaju od proizvođača opreme za zavarivanje razvoj u smjeru produktivnosti, ali i smanjenja naknadne obrade kako bi se smanjila količina industrijskog otpada i dodatni troškovi nastali uklanjanjem posljedica štrcanja [2].

Kao trenutno najučinkovitiji postupak zavarivanja, u smislu male količine štrcanja, koristi se impulsno MIG/MAG zavarivanje, no bilježi se i pojava modificiranih procesa. Klasično MIG/MAG zavarivanje kratkim spojevima, pomoću kojeg je moguće smanjiti unos topline u radni komad, koristi se kako bi se eliminiralo protaljivanje tanjih radnih komada. Međutim, pri korištenju klasičnog MIG/MAG postupka zavarivanja dolazi do veće količine štrcanja, i to u trenutku ponovne uspostave električnog luka, odmah nakon prekida kratkog spoja [2]. Opisana problematika rezultirala je razvojem nove metode prijenosa metala koja djelomično unapređuje ograničenja klasičnog postupka – CMT (eng. *Cold Metal Transfer*) metoda.

2. MAG ZAVARIVANJE

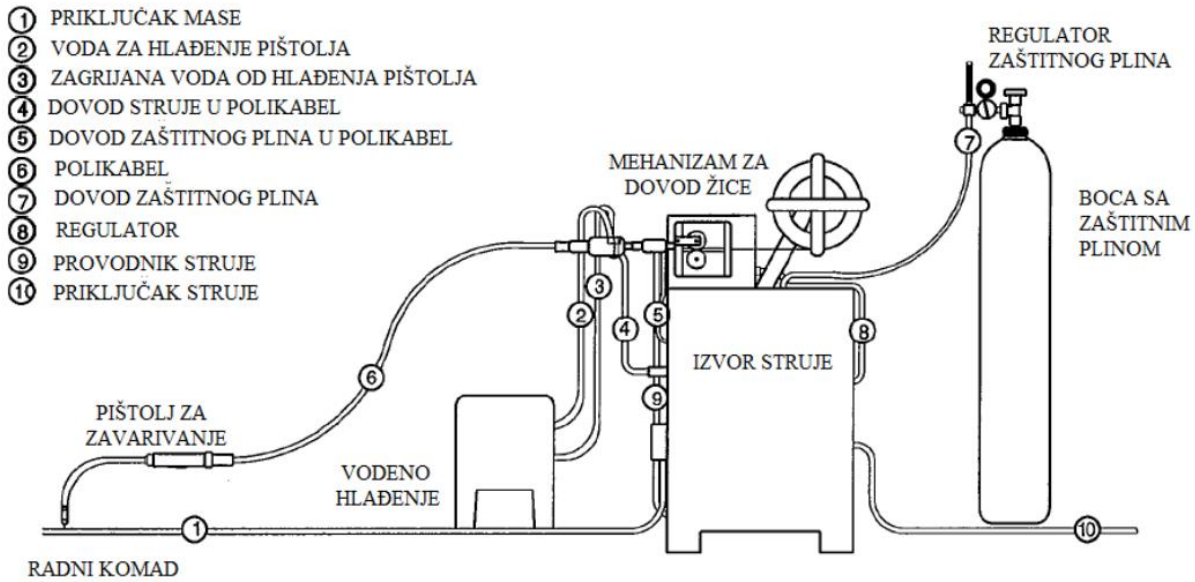
MIG/MAG zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja koji kao izvor topline za taljenje osnovnog i dodatnog materijala koristi električni luk uspostavljen između metalne elektrodne žice i radnog komada. Cjelokupni proces se odvija u zaštiti inertnog (Ar, He) ili aktivnog (CO_2 i mješavine) plina. Ovisno o vrsti upotrijebljenog zaštitnog plina postupak nosi oznaku MIG (zaštita inertnim plinom) ili MAG (zaštita aktivnim plinom). Električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu spojene na pozitivni pol istosmjernog izvora i radnog komada. Elektrodna žica je ujedno i dodatni materijal, tj. njenim taljenjem se popunjava pripremljeni žlijeb. Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk, sve u zaštitnoj atmosferi odgovarajućeg zaštitnog plina koji je pohranjen u vanjskom spremniku (boci), pod tlakom. Sam izvor struje za zavarivanje je isti u oba slučaja zavarivanja (MIG i MAG). Postupak MIG/MAG zavarivanja može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili u potpunosti automatiziran/robotiziran. Na slici 1 prikazan je detalj MIG/MAG procesa zavarivanja [2].



Slika 1. Detalj MIG/MAG procesa zavarivanja [2]

Osnovnu opremu za MIG/MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom (CV – eng. *Constant Voltage*), polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina (slika 2). Električna struja dolazi iz izvora struje za zavarivanje koji je priključen

na električnu mrežu putem vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom koja se kontinuirano i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem polikabela kroz sapnicu pištolja. Kontaktna vodilica pištolja, koja služi za vođenje elektrode i za dovođenje struje zavarivanja na žicu, i sapnica za plin koja služi za dovod zaštitnog plina, potrošni su dijelovi pištolja te ih se lako može mijenjati. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veće jakosti struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti) [2].



Slika 2. Oprema za MIG/MAG zavarivanje [2]

MIG/MAG postupak zavarivanja ima široku primjenu koja je omogućena brojnim prednostima od kojih su najbitnije [2]:

- MIG/MAG zavarivanje je jedini postupak zavarivanja taljivom elektrodom koji se koristi za zavarivanje svih komercijalnih materijala,
- zavarivanje se može izvoditi u svim položajima,
- učinak taljenja i brzina zavarivanja daleko su veći nego kod REL zavarivanja,
- zbog kontinuiranog dovođenja elektrode moguće je proizvesti zavare većih duljina bez prekida,
- pri zavarivanju štrcajućim lukom postiže se veća penetracija nego kod REL zavarivanja,

- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- širok raspon debljina materijala koji se zavaruje,
- velika učinkovitost i proizvodnost,
- automatska regulacija visine električnog luka.

Zbog navedenih prednosti MIG/MAG zavarivanje predstavlja dobar izbor kada je riječ o automatiziranim i robotiziranim proizvodnim procesima. Kao i svaki drugi proces zavarivanja, MIG/MAG zavarivanje ima određena ograničenja u primjeni [2]:

- oprema je složena, skuplja u odnosu na REL postupak zavarivanja i nije jednostavna za transport,
- zbog oblika pištolja za zavarivanje postoje određene poteškoće pri zavarivanju teško dostupnih zavarenih spojeva,
- kod rada na terenu moguće su greške zbog loše zaštite mjesta zavarivanja (vjetar otpuhuje zaštitni plin),
- mogući problemi kod dovođenja žice (zastoj žice u polikabelu),
- štrcanje kod nekih vrsta prijenosa metala (kratki spoj, prijelazni luk).

Kako bi zavareni spojevi izvedeni MIG/MAG postupkom bili zadovoljavajuće kvalitete potrebno je podesiti parametre zavarivanja na odgovarajući način. Parametri koje je potrebno podesiti su [2]:

- jakost struje,
- napon električnog luka,
- veličina induktiviteta (uspona struje),
- promjer žice,
- brzina zavarivanja,
- protočna količina i vrsta zaštitnog plina,
- dužina slobodnog kraja žice.

2.1. Prijenos metala u električnom luku

Prijenos metala u električnom luku rezultat je interakcije više fizikalnih fenomena od kojih 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 narinute struje i napona, promjeru žice i vrsti zaštitnog plina. Pri tome, prema gruboj podjeli, razlikuju se područje kratkih spojeva, područje prijelaznog (mješovitog) luka i 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 (eng. *International Institute of Welding*) definira tri glavna područja prijenosa metala kod elektrolučnog zavarivanja metalnom taljivom elektrodom [3]:

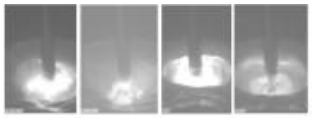
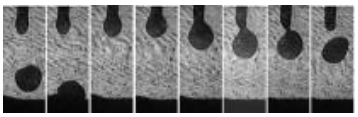
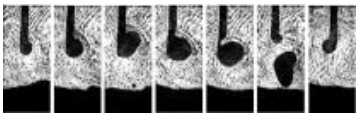
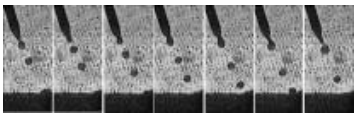
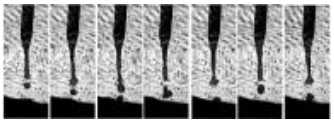
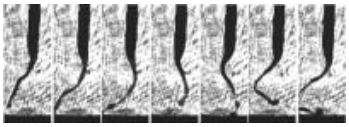
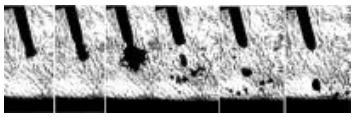
1. prirodni prijenos,
2. kontrolirani prijenos,
3. modificirano (prošireno) područje prijenosa.

Svakom području pripadaju određene grupe koje obuhvaćaju načine prijenosa materijala sa sličnim karakteristikama. Način prijenosa dodatnog materijala je karakteristično ponašanje kapljice u električnom luku tijekom prijenosa kod MIG/MAG zavarivanja.

2.1.1. Prirodni prijenos

U ovo područje ubrajaju se prijenosi koji se koriste kod konvencionalnih MIG/MAG postupaka, ali i visokoučinskih postupaka (postupci s brzinom dodavanja žice većom od 15 m/min). Ovi načini prijenosa imaju snažan utjecaj na performanse zavarivačkog procesa i određeni su parametrima zavarivanja. Prijenosi metala u ovom području funkcija su, prije svega, struje i napona. Izlaskom iz standardnih parametara prelazi se u područje visokoučinskih postupaka koji se baziraju na dugačkom slobodnom kraju žice [1]. Za sve načine je karakteristično da se ponašaju „prirodno“, a to znači da se ne odvijaju uz pomoć dodatnih električnih parametara ili kontrole dodavanja žice. U tablici 1 prikazana je detaljnija podjela načina prijenosa metala prema [4] s fizikalnim silama koje su dominantne za određene procese. Takva podjela karakteristična je za znanstveni pristup.

Tablica 1. Znanstvena podjela načina prirodnog prijenosa [4]

	Način prijenosa	**Izgled**	**Glavna upravljačka sila (učinak)**
Prijenos kontaktom	Kratki spoj		Površinska napetost i elektromagnetski „pinch“ efekt
	Premošćivanje		Površinska napetost
	Prisilan prijenos kratkim spojem	 (*)	Snažno izražen elektromagnetski „pinch“ efekt
Prijenos slobodnim letom	Prijelazni luk		Gravitacijska sila
	Odbojni prijelazni luk		Elektromagnetska sila i odbojne sile
	Štrcajući luk		Elektromagnetska sila
	Visokoučinski štrcajući luk		Elektromagnetska sila
	Rotirajući luk		Elektromagnetska sila
	Eksplozija		Elektromagnetska sila i kemijska reakcija

2.1.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima

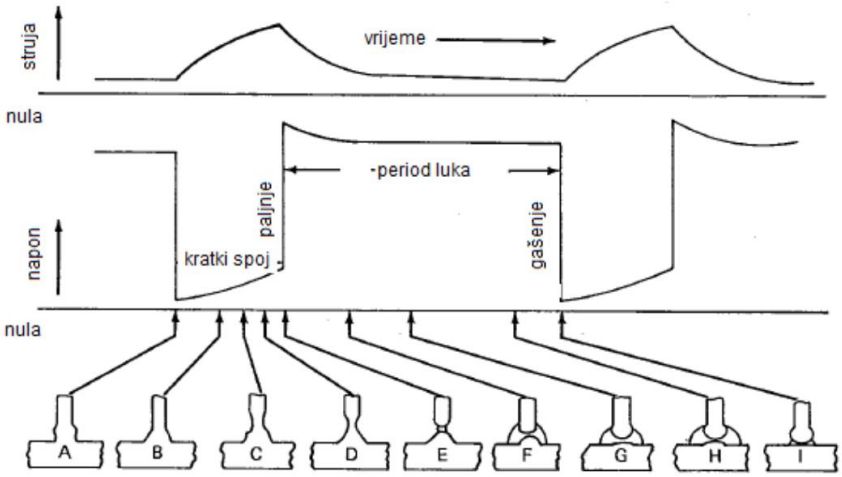
Kratkim spojevima metal se prenosi malim unosom energije uz male struje zavarivanja i niske napone električnog luka (12 – 17 V, 125 – 175 A; za promjere žica 0,8 mm do 1,2 mm). Metal

se prenosi s elektrode na radni komad samo za vrijeme dok je elektroda u kontaktu s metalom zavara. Frekvencija kojom elektroda dotiče metal zavara je od 20 do 200 puta u sekundi [3].

Slijed događaja kod prijenosa metala uz odgovarajuće struje i napone prikazan je na slici 3. Kako žica prilazi metalu, dolazi do kratkog spoja, luk nestaje, a struja počinje rasti (A). U tom periodu stvara se tekući rastaljeni most između žice i metala zavara koji se povećava kako se kapljica usisava u talinu zavara zbog površinskih napetosti. Kako struja kratkog spoja u tom trenutku nije jako izražena, premala je elektromagnetska sila koja bi suzila („pinch“ efekt) metalni most (B). Zatim, zahvaljujući smanjenom električnom otporu u premošćivanju, struja raste progresivno zagrijavajući žicu Jouleovim efektom (toplina koju proizvode električna struja prolaskom kroz vodič (elektrodu) tijekom nekoga vremena, jednaka umnošku električnoga otpora, kvadrata električne struje i vremena) (C), (D). Most je tako „odrezan“ kombiniranim efektom površinske napetosti i naposljetku progresivnih elektromagnetskih sila („pinch“ efekt) koje se javljaju kao posljedica povećanja struje u posljednjoj fazi (E) [5].

Time se kratki spoj prekida, dolazi do skoka napona, a struja počinje eksponencijalno padati prema svojoj nominalnoj vrijednosti. Porast struje mora biti dovoljno visok kako bi se ugrijala elektroda i da se obavi prijenos metala, ali ne smije biti previsok kako bi prskanje uzrokovano silovitim odvajanjem kapljice bilo što manje. Stopa rasta struje kontrolirana je podešavanjem induktiviteta u izvoru struje.

U točki (F) električni luk je ponovo uspostavljen. Po uspostavi kreće taljenje vrha elektrode koja se kontinuirano, jednolikom brzinom kreće prema radnom komadu i tako se smanjuje razmak koji je ostao otkidanjem njenog vrha. Kada elektroda premosti razmak i dotakne radni komad proces se ponavlja prema (A) [5].



Slika 3. Shematski prikaz prijenosa metala kratkim spojevima [5]

Glavna obilježja koja, uz navedene, također karakteriziraju prijenos metala električnim lukom kratkog spoja su [3]:

- promjeri žice: 0,8 mm do 1,2 mm,
- mali unos topline što uzrokuje brzo hlađenje i skrućivanje taline,
- minimalne deformacije radnog komada,
- štrcanje – posljedica naglog gašenja električnog luka i zaštitnog plina,
- spajanje malih debljina radnih komada: 1,0 mm – 5,0 mm,
- izrada korijenskog prolaza,
- metali osjetljivi na unos topline,
- premošćivanje zračnog mosta između radnih komada,
- prikladan za sve položaje zavarivanja,
- posebno prikladan za zavarivanje velikih debljina u nadglavnom položaju.

Veliki utjecaj na prijenos materijala ima sastav zaštitnog plina koji drastično utječe na sile površinske napetosti rastaljenog metala. Utječe i na veličinu kapljice, trajanje kratkog spoja te karakteristike procesa i dubinu penetracije.

Kod prijenosa metala kontaktom osim konvencionalnog čistog prijenosa kratkim spojevima, postoje još i prijenos premošćivanjem (eng. *bridging transfer*) te prisiljeni prijenos kratkim spojevima (eng. *forced short-circuiting transfer*) [4].

2.1.1.2. Prijenos premošćivanjem

Ovaj način prijenosa metala događa se kad je žica podvrgnuta samo niskoj struji kod prijenosa kratkim spojevima za vrijeme kontakta kapljica – talina. Sila površinske napetosti je tako pokretačka sila za prijenos metala, smanjujući važnost „pinch“ efekta na odvajanje kapljice. Kod ovog načina nema prskanja ili odbacivanja kapljice zbog plitke taline i oscilacije kapljica. Zato mirno ponašanje taline zavara dovodi do ujednačenosti zavara. Najčešće je ovaj način izazvan izvorom konstantne struje i/ili velikim induktivitetom jer ima ograničen raspon parametara (napon luka, struja zavarivanja i brzina

zavarivanja). Kad je namješten, ovaj način se može koristiti za spajanje tankih limova [4].

2.1.1.3. Prisilan prijenos kratkim spojevima

Prijenos se odvija pri parametrima namještenim za kratki spoj, ali s jako visokim brzinama dodavanja žice (iznad 10 – 20 m/min) za proizvodnju struje od 250 – 350 A. Kako je prijenos vođen velikim elektromagnetskim silama („pinch“ efekt), kapljice su male veličine (nema vremena za postizanje većeg volumena) s visokom brzinom prijenosa čime se smanjuje efekt površinske napetosti. Velika je količina prskanja [4].

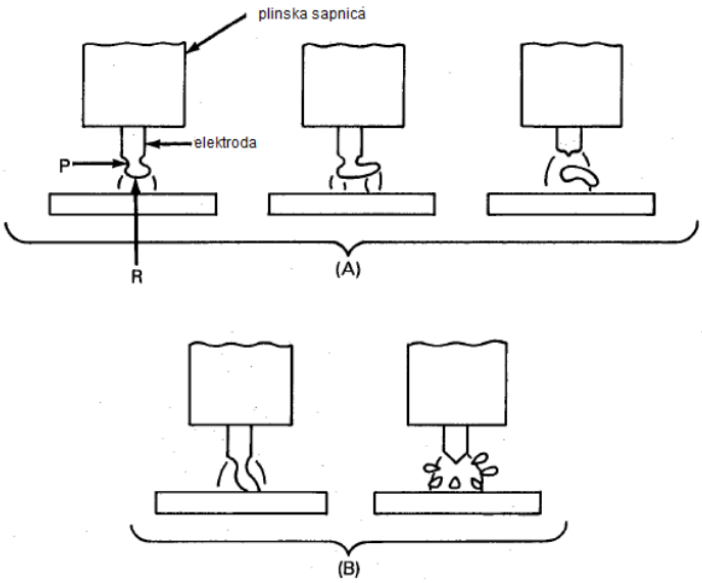
2.1.1.4. Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim (mješovitim) lukom je kombinacija prijenosa štrcajućim lukom i kratkim spojem s krupnijim kapljicama. Prijelaz se odvija pri relativno niskim strujama dok je elektroda priključena na pozitivan pol, ali uz veći napon kojem je cilj povećati dužinu luka kako bi se spriječilo stvaranje kratkog spoja (17 – 22 V, 180 – 230 A; za promjere žica 0,8 mm do 1,6 mm). Prijelazni luk karakterizira veličina kapljica čiji je promjer veći od promjera elektrode (1.5 do 3 puta) i mala brzina prijelaza kapljica, svega 1 do 10 kapljica u sekundi [4].

Kapljica se zadržava na vrhu elektrode za vrijeme svojeg rasta površinskom napetošću i reakcijom mlaza para. Kada veličina kapljice dostigne svoju kritičnu vrijednost, na nju najviše djeluje gravitacijska sila i aerodinamične sile zbog čega je proces moguć samo u položenom položaju. Na strujama malo većim od onih za prijenos kratkim spojem, aksijalni prijenos prijelaznim lukom postiže se u jako inertnoj atmosferi. Ako je dužina luka prekratka, zbog malog napona, kapljica koja raste može dotaknuti radni materijal pri čemu dolazi do pregrijavanja i raspada kapljice što uzrokuje značajno prskanje. Dužina luka mora biti dovoljna kako bi se omogućilo odvajanje kapljice prije kontakta s talinom zavara. S druge strane, veći napon luka po svojoj je prilici nepogodan zbog nedostatnog protaljivanja, nedovoljne penetracije i pretjeranog nataljivanja metala. Zbog ovih nedostataka koji proizlaze iz niskih struja i visokih napona kako bi se izbjegli kratki spojevi, upotreba ovog načina prijenosa materijala u proizvodnji je ograničena [5].

Upotreba ugljikovog dioksida rezultira slučajno usmjerenim mješovitim prijelazom kod struje i napona značajnije iznad područja kratkih spojeva. Takav prijenos naziva se prijenos odbojnim prijelaznim lukom. Kod upotrebe ugljikovog dioksida kao zaštitnog plina struja se provodi kroz rastaljenu kapljicu, a zaštitni plin obuhvaća vrh elektrode. Anodna mrlja električnog luka tako je sužena i koncentrirana ispod kapljice što stvara odbojne sile („pinch“ efekt djeluje unatrag,

a problem stvaraju pare metala). Najvažnije sile su „pinch“ efekt (P) i odbojna sila (R) prema slici 4. Velika kapljica formirana tik iznad taline zavara rezultira velikim pritiskom na kapljicu uslijed skučenosti prostora. Sile tako odbijaju kapljicu od aksijalne osi žice uzrokujući daljnji rast i odmicanje u stranu. Uslijed gravitacijske sile dolazi do odvajanja kapljice prema radnom komadu. Proces je prikazan na slici 4 pod (A). Kidanje kapljice se može odviti i kratkim spojem (B) [5].



Slika 4. Dva slučaja odvajanja kapljice kod prijenosa metala prijelaznim lukom [5]

Još neka od glavnih obilježja ovog postupka su [3]:

- promjeri žica: 0,8 mm do 1,6 mm,
- povećani unos topline što uzrokuje razlijevanje i sporije hlađenje taline,
- nasumično formiranje visine električnog luka (ovisno o naponu),
- vidljive deformacije radnog komada,
- kapljica nekoliko puta veća od promjera žice dodatnog materijala,
- povećano štrcanje kao posljedica nepravilnog gašenja električnog luka i zaštitnog plina,
- spajanje radnih komada debljina 5,0 mm i više,
- izrada prolaza popune,
- nije prikladan za prisilne položaje zavarivanja.

2.1.1.5. Prijenos metala štrcajućim lukom

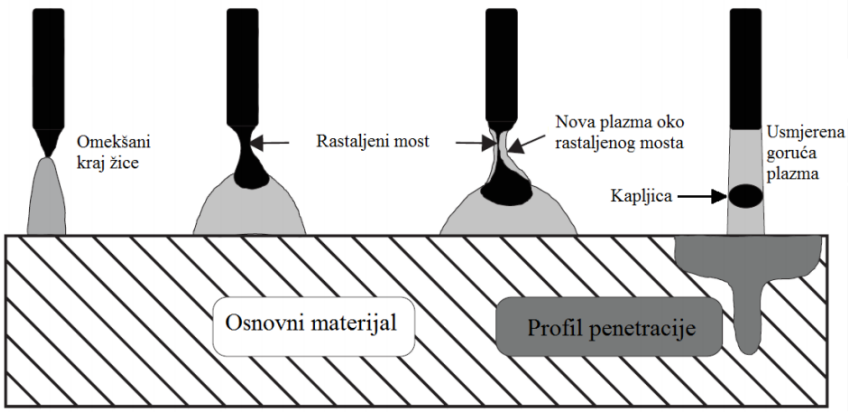
Moguće je postići veoma stabilan, aksijalni prijenos materijala bez prskanja, ali uz značajan udio inertnog plina, argona. Što je udio argona u mješavini veći, potrebna je manja struja zavarivanja. Struje moraju biti dovoljno velike kako bi se prešla kritična granica i omogućio fini prijelaz bez prskanja, iznad vrijednosti tzv. prijelaznih struja. Na vrijednostima malo iznad kritične struje stvara se tzv. usmjereni štrcajući prijenos. Iznad te struje prijelaz se ostvaruje veoma sitnim kapljicama, a frekvencija je nekoliko stotina kapljica u sekundi. Kapljice se ubrzano aksijalno gibaju kroz međuprostor prema radnom komadu, bez da i u jednom trenutku dođe do direktnog kontakta između elektrode i metala zavara. Da bi se smanjile sile površinske napetosti kapljice, dodaje se mala količina kisika (do 2 %) čime se smanjuje vrijednost kritične struje. Budući da je općenito pri prijenosu metala štrcajućim lukom velik unos topline, u nekim slučajevima nije moguće primijetiti tako velik unos topline, kao npr. kod tankih limova gdje može doći do izgaranja materijala umjesto njegovog zavarivanja. Također, zbog velikog depozita može doći do stvaranja prevelike taline zavara kod nadglavnog i vertikalnog zavarivanja [5].

Glavna obilježja prijenosa metala štrcajućim lukom su [3]:

- jakost struje: 240 – 500 A; napon struje: 23 – 30 V,
- promjeri žica: 1,2 mm do 2,4 mm,
- vrlo visok unos topline,
- preporučeno korištenje inertnog zaštitnog plina (argon),
- konstantna visina električnog luka uz minimalno štrcanje,
- mlaz sitnih kapljica koje kontinuirano i ujednačeno padaju na radni komad,
- izražene deformacije radnog komada,
- nije prikladan za prisilne položaje zavarivanja,
- izrada popunskih i završnih prolaza,
- spajanje radnih komada debljina 7,0 mm i više.

2.1.1.6. *Visokoučinski štrcajući luk*

Povećanje struje prati povećanje slobodnog kraja žice čime se preko omskog otpora oslobađa toliko topline da je ona dostatna sama taliti žicu bez utjecaja električnog luka. S nadolazećom toplinom električnog luka kapljica, ovisno o površinskim napetostima, može narasti toliko da bude veća od promjera elektrode pa se stup plazme proširuje. Pritom se stvara rastaljeni most između kapljice i krutog kraja žice koji se sve više smanjuje pod utjecajem „pinch“ efekta. Kada se most dovoljno suzi, nastaje nova plazma koja obuhvaća cijelu kapljicu. Nakon što se kapljica odvoji, električni luk ponovo dobiva svoj početni oblik i gori kao uski stup plazme zbog svojstvene kompresije uzrokovane okolnim magnetskim poljem. Suženi tok plazme ubrzava kapljicu na putu prema talini gurajući ju velikom silom. Rezultat prijenosa u obliku kapljica je uska i duboka penetracija prema slici 5 [6].

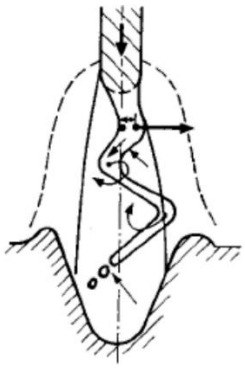


Slika 5. Prijenos metala kod visokoučinskog štrcajućeg luka [6]

2.1.1.7. *Rotirajući luk*

Rotirajući luk karakterističan je po rotacijskom prijenosu rastaljenog kraja žice pri čemu se tali vrh elektrodne žice na osnovi velikog slobodnog kraja žice i velike struje zavarivanja. Preduvjet za ovakav način prijenosa je dovoljno dugi rastaljeni stup žice. Ovaj prijenos se ostvaruje kod upotrebe zaštitnog plina argona uz dodatak kisika. U takvoj mješavini plinova dolazi do snažnog smanjenja površinske napetosti taline te se na kraju elektrodne žice prvo stvara rastaljeni metal u obliku gusjenice, koja se zatim odvaja u mnoštvo sitnih kapljica. Radijalna komponenta sila magnetskog polja upravlja ovom rastaljenom gusjenicom te je pomiče iz simetrale i rotira je, kao što je prikazano na slici 6. Zbog ove rotacije i amplitude električni luk se konusno proširuje, posebno kad ima dovoljnu dužinu. Prijenos materijala je radijalan u

odnosu na osnovni materijal i u sitnim kapljicama ulazi u metal zavara. Ovu pojavu je moguće vidjeti samo odgovarajućim tehničkim pomagalima jer je dužina svega nekoliko milimetara. Rotirajući luk ima visok stupanj stabilnosti i pritom zahtjeva duljinu slobodnog kraja žice od 25 do 35 mm [1].



Slika 6. Prijenos metala kod rotirajućeg luka [1]

2.1.2. Kontrolirani prijenos

Ovo područje sastoji se od „poboljšanog“ prirodnog prijenosa kako bi se dobile bolje karakteristike procesa; manje prskanja, kontrola geometrije zavara, stabilizacija unosa topline itd. [4] Kako bi se dobila ova specifična svojstva koristi se napredna zavarivačka oprema koja automatski namješta i kontrolira prijenos. Rezultirajući prijenos kategoriziran je kao kontrolirani prijenos metala, ali se radi o djelovanju prirodnih načina dobivenih namjerno, bilo kroz promjene programskih parametara ili kroz adaptivnu kontrolu kao odgovor na variranje parametara.

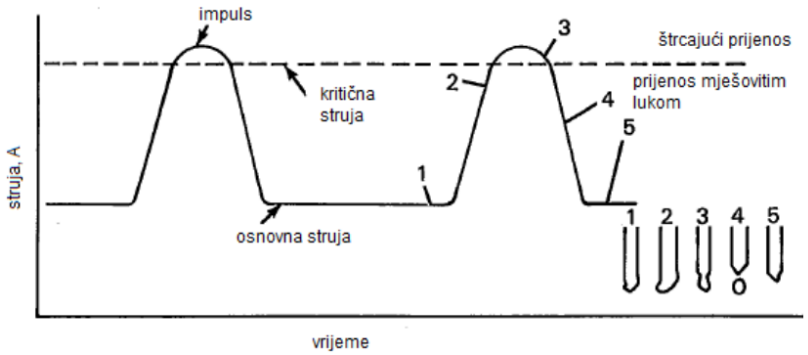
Izvorni transformatorski ispravljači za zavarivanje kod MIG/MAG zavarivanja imali su fiksnu statičku karakteristiku i induktivnu kontrolu dinamičkog odziva. Ove značajke su ispunjavale osnovne zahtjeve procesa i bile su izabrane kako bi se dobio stabilan rad pri kratkospojnim i štrcajućim prijenosima. No, postojao je prostor za napredak. Najraniji pokušaji kontroliranog prijenosa bili su prijenosi impulsnom strujom kod MIG/MAG zavarivanja koji su koristili impulse sinusoidne struje [7].

2.1.2.1. Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim strujama spada pod područje kontroliranog prijenosa, a komercijalna upotreba počela je 60-ih godina. Ovim prijenosom moguće je ostvariti štrcajući tip prijenosa s vrijednostima struja ispod kritične struje. Ovakav prijenos metala ima mnogobrojne prednosti nad klasičnim MAG zavarivanjem: veći depozit, smanjeno štrcanje, manje deformacije, primjena u svim položajima zavarivanja, mogućnost automatizacije itd.

Struja ima dvije razine, što je vidljivo na slici 7. Osnovna struja održava luk, ali ga ne opskrbljuje s dovoljno energije da se formira kapljica na vrhu elektrode. Kod struje impulsa vrh amplitude je veći od kritične struje koja je potrebna za štrcajući luk [5].

Konvencionalno impulsno zavarivanje podrazumijeva promjenu struje (i napona) zavarivanja između minimalne i maksimalne vrijednosti određenom dinamikom, tj. frekvencijom promjene intenziteta. Da bi se za određenu kombinaciju osnovnog i dodatnog materijala te zaštitnog plina odredili optimalni parametri impulsa, potrebno je odrediti približno dvadesetak parametara koji definiraju oblik impulsa te osnovnu i vršnu (impulsnu) struju. Za vrijeme trajanja vršne struje na kraju impulsa otkida se kapljica rastaljenog materijala i deponira u talinu osnovnog materijala. Za vrijeme trajanja osnovne struje ne dolazi do prekidanja električnog luka i nema prijenosa dodatnog materijala [8].



Slika 7. Karakteristika impulsne struje [5]

Za vrijeme svakog impulsa odvaja se kapljica, a vrijeme trajanja impulsa mora biti precizno određeno. Frekvencija i amplituda impulsa određuju energiju luka i na taj način brzinu taljenja žice. Uobičajeno se frekvencija impulsa pri MIG/MAG zavarivanju kreće od 50 do 250 Hz. Pri dobro oblikovanim i odabranim parametrima pulsa ne dolazi do kratkih spojeva te je visina električnog luka konstantna [8]. Smanjenjem prosječne energije luka i brzine taljenja žice moguća su zavarivanja u svim pozicijama i onih debljina koje su nedostupne kod štrcajućeg

luka [5]. Zato se impulsno zavarivanje većinom primjenjuje za zavarivanje tanjih materijala čime se postiže bolja kontrola unosa topline i prijenosa materijala bez pregorijevanja osnovnog materijala [8].

Glavna obilježja prijenosa metala impulsnim električnim lukom su [3]:

- jakost struje: 80 – 500 A; napon struje: 13 – 30 V,
- promjeri žica: 0,8 mm do 2,4 mm,
- kontroliran unos topline,
- preporučeno korištenje inertnog zaštitnog plina (argon),
- konstantna visina električnog luka uz minimalno štrcanje,
- mlaz sitnih kapljica koje kontinuirano i ujednačeno padaju na radni komad,
- prikladan za robotizaciju i mehanizaciju,
- prikladan za sve položaje zavarivanja ovisno o parametrima,
- izrada popunskih i završnih prolaza,
- spajanje radnih komada debljina 1,0 mm i više.

Zavarivanje duplim pulsom

Jedna od varijacija kontroliranog impulsnog zavarivanja je zavarivanje duplim pulsom ili korištenjem izmjenične struje.

Pri zavarivanju duplim pulsom dolazi do pulsiranja, tj. promjene intenziteta struje zavarivanja i brzine žice. Dodatno dolazi i do promjene frekvencije struje na višem i nižem nivou. Drugim riječima, za impulsnu struju postoje dva nivoa, tj. dva seta osnovne i vršne struje kao i dvije frekvencije za svaki od tih setova impulsa. Izmjena nižeg i višeg seta impulsa također ima definiranu frekvenciju i to najčešće reda veličine nekoliko Hz. Paralelno sa strujom raste i napon zavarivanja, što dovodi do povećanog unosa topline pri višem setu impulsa. Shodno tome, dupli puls daje više energije od običnog impulsnog zavarivanja te dolazi do povećanja količine nataljenog materijala. Za vrijeme višeg nivoa pulsa tali se više žice i osnovnog materijala, dok se pri nižem nivou unosi manje energije i sprječava se pregaranje osnovnog materijala. Kako se mijenja unos energije pri višem i nižem pulsu tako se pri zavarivanju duplim pulsom mijenja brzina dodavanja žice, od minimalne do maksimalne vrijednosti. Vizualni efekt daje vrlo veliku sličnost geometrije zavara s TIG zavarivanjem [8].

2.1.3. 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 te 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 što kompenzira vrlo mali unos topline koji je u konvencionalnom sustavu nedostatan za odvajanje dodatnog materijala. Danas su 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 [3].

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, legure nikla, aluminijske legure), smanjenjem deformacija, kontroliranim unosom topline, korozijskom postojanošću zavarenog spoja, smanjenjem prskanja, potrebom spajanja tankih limova te mogućnošću za povezivanjem 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) [3].

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 praška) i praškom punjene žice također se bilježe 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 zahtijeva i stabilan električni luk te 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 [3].

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 su [3]:

- 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, RMG – Regulated Metal Deposition, SP MAG, MicroMIG, Cold Pulse, IntelliArc itd.

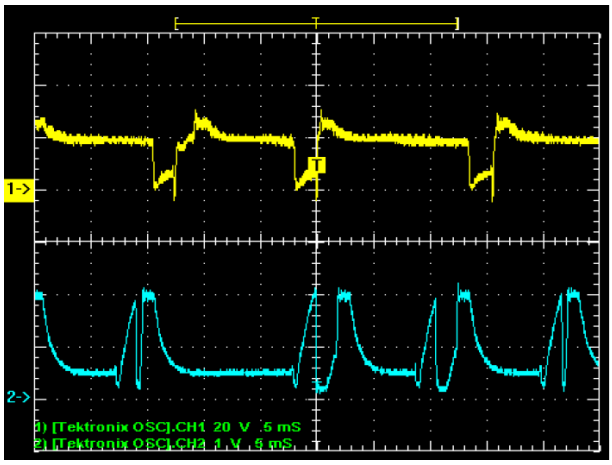
Vidljiv je intenzivan razvoj na području realizacije postupaka koji integriraju nekoliko opcija za prijenos metala u električnom luku, što se prvenstveno odnosi na kombinaciju kratkih spojeva i strujnih impulsa (STT, FastROOT) uz upravljanje valnim oblicima struje i napona. Pri tom se još može sniziti 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) [3].

Uz 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

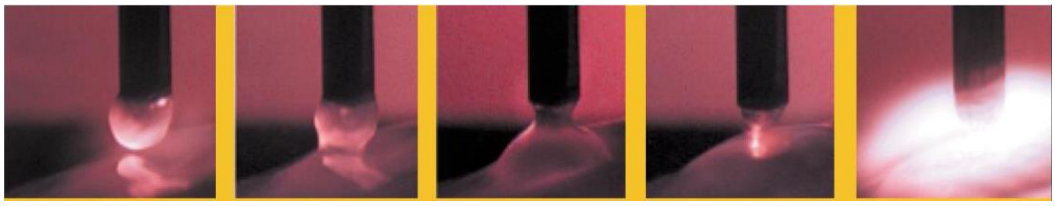
opreme. U protivnom kupnja skupe opreme može se pokazati neisplativom i promašenom investicijom. Određena područja aplikacije u poveznici s automatiziranim i robotiziranim zavarivanjem omogućuju produktivnost i postizanje kvalitete zavara kakva s konvencionalnom opremom nije bila moguća [3].

2.1.3.1. STT (Surface Tension Transfer) [3]

STT postupak za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizam površinske napetosti. Porast struje u kratkom spoju se zaustavlja kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala samo uz djelovanje površinske napetosti. Upravo ta kontrola sprječava porast struje koji uzrokuje rasprskavanje kapljice rastaljenog metala te istovremeno maksimalizira 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. njen nagib bitno utječe na unos topline te se kao parametar posebno regulira. Rezultat je vrlo nizak unos energije uz eliminaciju štrcanja. Na slici 8 prikazana je dinamička karakteristika STT postupka dok je slijed odvajanja kapljice prikazan na slici 9.



Slika 8. Dinamička karakteristika: 1) u = f(t); 2) i = f(t) STT postupka [3]

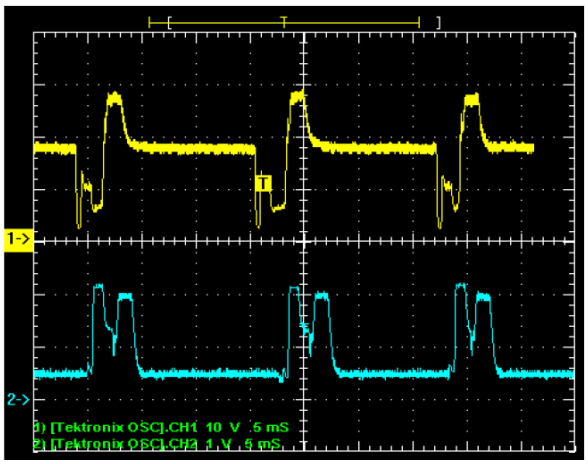


Slika 9. Slijed odvajanja kapljice pri STT zavarivanju [3]

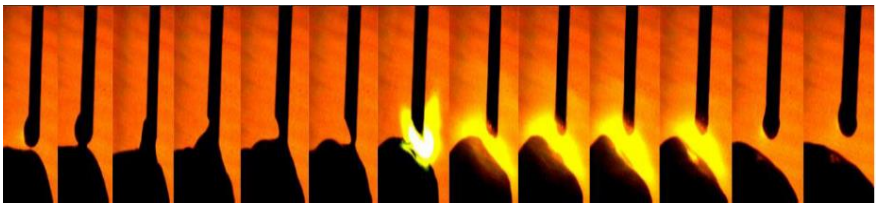
Glavna primjena STT postupka je za zavarivanje korijenskog prolaza jer kvalitetno odvajanje kapljice bez prskanja uz mali unos topline olakšava rad. Uz to, primjena MAG postupka, tj. pune žice kod zavarivanja čelika visoke čvrstoće, umanjuje rizik od nastanka hladnih pukotina zbog vrlo niske količine difundiranog vodika i eliminira potrebu zavarivanja tzv. „vrućeg“ sloja kod izgradnje cjevovoda. Još jedna karakteristika je i mogućnost zavarivanja pripreme s većim smaknućem i razmakom. Zbog malog unosa topline postupak je pogodan za zavarivanje tankih materijala i to nelegiranog i visokolegiranog čelika, legura nikla itd.

2.1.3.2. FastROOT [3]

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 zavarivanje 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 sljedećeg 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. Dinamička karakteristika FastROOT postupka prikazana je na slici 10 dok slika 11 prikazuje slijed odvajanja kapljice u električnom luku.



Slika 10. Dinamička karakteristika: 1) u = f(t); 2) i = f(t) FastROOT postupka [3]



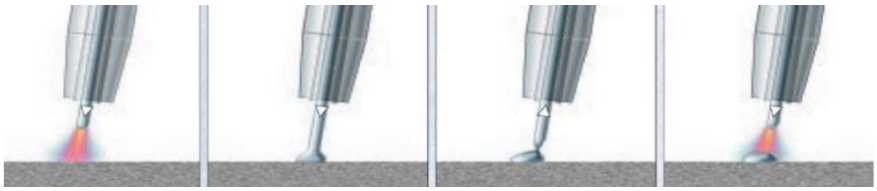
Slika 11. Slijed odvajanja kapljice pri FastROOT zavarivanju [3]

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 položaju karakteristika je ovog postupka koja je vrlo često aplicirana u praksi.

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. Isto tako moguća je primjena za tvrdo MIG lemljenje.

2.1.3.3. CMT (Cold Metal Transfer) [3]

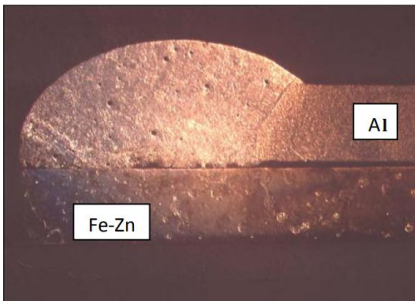
CMT postupak predstavlja modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima pri čemu se primjenjuje „mehaničko“ rješenje, tj. povratno gibanje žice (shematski prikazano na slici 12, treći kadar). Karakteristično je da se odvajanje kapljice odvija u uvjetima jako niskog unosa topline koji kod klasičnog 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. Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka prikazan je na slici 13.



Slika 12. Shematski prikaz povratnog gibanja žice (treći kadar) [3]

Slika 13. Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [3]

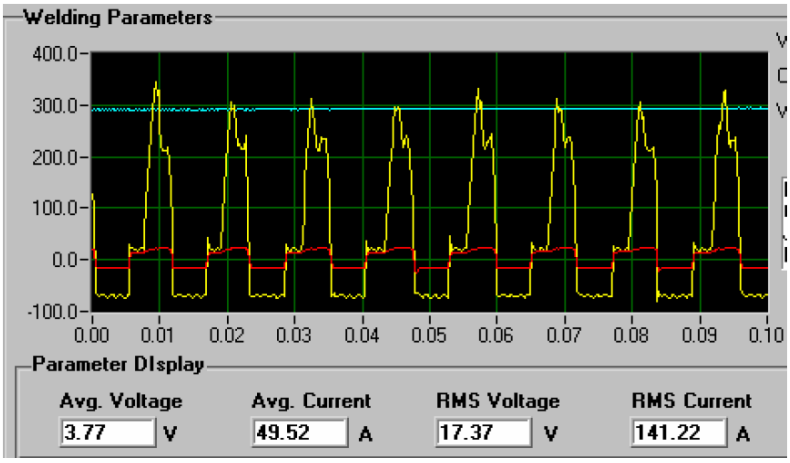
U graničnim slučajevima kada se zahtijeva veći unos topline od onog koji može ostvariti CMT proces postoji mogućnost ubacivanja strujnih impulsa koji daju više topline i bolju penetraciju između ciklusa odvajanja kapljice. Primjena CMT postupka prvenstveno se odnosi na područje MIG tvrdog lemljenja, zavarivanja tankih limova (aluminij, nelegirani i nehrđajući čelik) kao i spajanja aluminija i pocinčanog lima. Ovaj potonji slučaj posebno je zanimljiv jer integrira zavarivanje (na strani aluminija) i tvrdo lemljenje (na strani pocinčanog lima), slika 14. CMT također odlikuje dobra mogućnost premošćivanja zazora pri spajanju tankih materijala.



Slika 14. Makroizbrusak spoja aluminijskog i pocinčanog lima izvedenog CMT postupkom [3]

2.1.3.4. AC MIG [3]

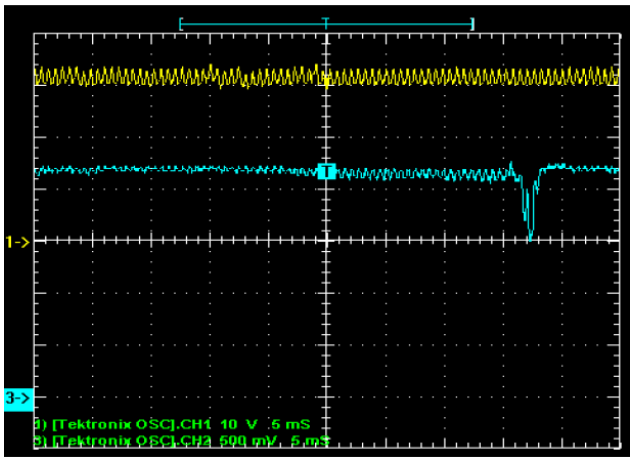
Kod MAG postupka se pretežito primjenjuje pozitivan polaritet na žici i to kod konvencionalnih i modernih postupaka. Negativan polaritet kod EPP daje veću brzinu taljenja i veći depozit uz manju penetraciju. Isti efekt postiže se i kod MAG postupka, ali je ponašanje električnog luka na negativnoj elektrodi 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 dosta složeni i kompleksni. Tipična dinamička karakteristika AC MIG postupka prikazana je na slici 15.



Slika 15. Dinamička karakteristika i = f(t) (žuti oscilogram) i u = f(t) (crveni oscilogram) kod AC MIG postupka [3]

2.1.3.5. RMT (Rapid MIG/MAG Technology) [3]

RMT postupak ne spada u skupinu niskoenergijskog MIG/MAG zavarivanja koje se realizira u području kratkih spojeva, već se bazira na štrcajućem prijenosu metala. Kod konvencionalnog štrcajućeg luka prijenos metala realizira se u neprekinutom nizu kapljica malog promjera. Prijelazna struja kod koje dolazi do stabilnog 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 RMT MAG postupka prijenos materijala odvija se u jako sitnim kapljicama pri čemu je frekvencija prijenosa oko 2 – 3 kHz. Tim mehanizmom se još sužava jezgra luka, snižava napon i visina luka u odnosu na klasični štrcajući luk, što rezultira većom koncentracijom energije i znatno intenzivnijom penetracijom. Dinamička karakteristika RMT postupka prikazana je na slici 16.



Slika 16. Dinamička karakteristika: 1) u = f(t); 3) i = f(t) RMT postupka [3]

Primjena RMT postupka omogućuje reviziju pripreme spoja u kontekst smanjenja otvora kuta ili potpune eliminacije izrade žlijeba kod zahtjeva za npr. potpunim kutnim provarom. Isto tako, relativno u odnosu na štrcajući luk postižu se veće brzine zavarivanja, tako da je u konačnici unos topline niži.

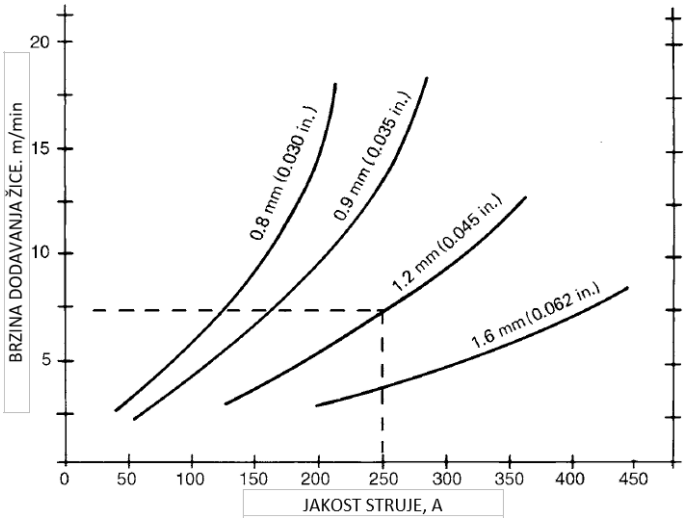
2.2. Okvirni raspon parametara zavarivanja za određeni promjer žice

Elektrode (žice) koje se koriste za MAG zavarivanje malog su promjera u usporedbi s onima koje se koriste kod EPP postupka i zavarivanja praškom punjenim žicama. Uobičajeni promjeri žice su od 0,9 mm do 1,6 mm. Međutim, mogu se koristiti i promjeri elektroda od 0,5 mm do 3,2 mm. Budući da su veličine elektroda male i struje razmjerno velike, brzine dodavanja žice su velike. Brzine se kreću za većinu metala u rasponu od približno 42 mm/s do 425 mm/s, osim magnezija za koji mogu biti potrebne brzine do 590 mm/s. Za takve brzine dodavanja žice osiguravaju se zagrijavane elektrode u dugom, kontinuiranom nizu i jednoličnog promjera, koje glatko i kontinuirano mogu prolaziti kroz zavarivačku opremu [5].

Veličina (promjer) žice utječe na konfiguraciju zavara. Veći promjer žice zahtjeva minimalnu struju od manjeg promjera žice za iste karakteristike prijenosa metala. Veće struje zauzvrat rezultiraju dodatnim taljenjem elektrode i veći, fluidniji depozit zavara. Kao posljedica, vertikalno i nadglavno zavarivanje se obično izvodi sa žicama manjeg promjera i manjim strujama, iako veće struje rezultiraju većim depozitom i većom penetracijom [5].

Mnogobrojni parametri mogu utjecati na penetraciju, geometriju zavara i općenito kvalitetu zavara. Poznavanje i kontrola parametara ključna je za konzistentnost zavara i zavare zadovoljavajuće kvalitete. Također, parametri međusobno nisu neovisni; promjena jednog zahtijeva promjenu drugog ili više drugih parametara kako bi se dobili željeni rezultati. Za odabir optimalnih postavki potrebno je dosta vještina i iskustva.

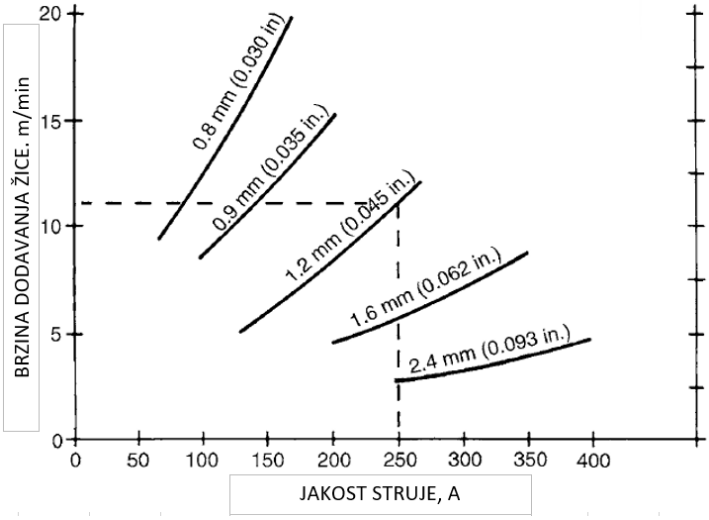
Kada se svi parametri održavaju konstantnima, jakost struje izravno ovisi o brzini dodavanja žice ili brzini taljenja žice. Ako se koristi izvor struje konstantnog napona, kako se brzina dodavanja žice mijenja, jakost struje varira na sličan način. Jakost ovisi o polaritetu, sastavu elektrode i drugim parametrima. Odnos struje zavarivanja i brzine dodavanja žice od ugljičnog čelika prikazan je na slici 17 [5].



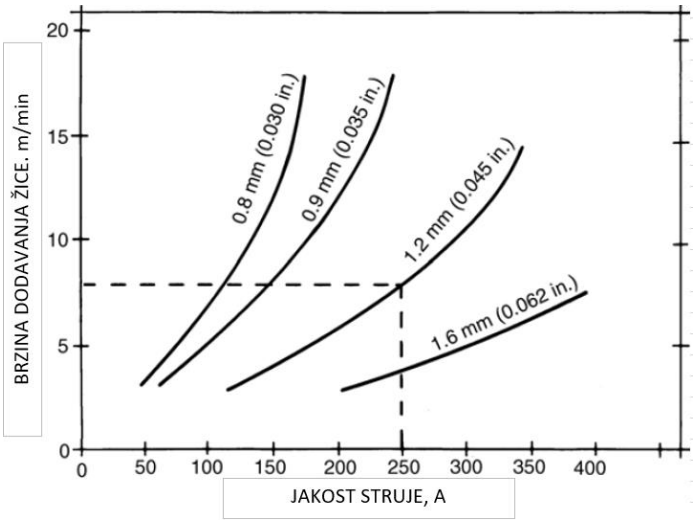
Slika 17. Odnos jakosti struje i brzine dodavanja žice od ugljičnog čelika [5]

Pri niskim vrijednostima struje za svaki promjer žice krivulja je gotovo linearna. Međutim, pri većim strujama zavarivanja, posebno za žice malog promjera, krivulje postaju nelinearne, progresivno se povećavaju s većom brzinom kako se struja zavarivanja povećava. To se pripisuje otporu zagrijavanja slobodnog kraja žice izvan kontaktne cjevčice.

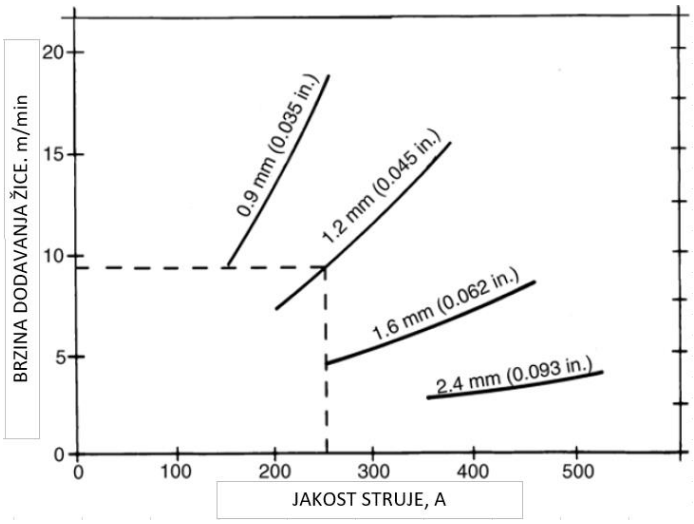
Kada se promjer elektrode povećava uz održavanje iste brzine dodavanja žice, potrebna je veća struja zavarivanja, kao što je prikazano slikama 17, 18, 19 i 20. Taj odnos između brzine dodavanja žice i jakosti struje uzrokovan je kemijskim sastavom žice i vidljiv je na slikama 17, 18, 19 i 20 za žice od ugljičnog čelika, aluminija, nehrđajućeg čelika i bakra. Različiti položaji i nagibi krivulja nastaju zbog razlike u temperaturama taljenja i električnom otporu metala. Slobodni kraj žice također utječe na ove odnose zbog otpora zagrijavanju žice [5].



Slika 18. Odnos jakosti struje i brzine dodavanja žice od aluminija [5]



Slika 19. Odnos jakosti struje i brzine dodavanja žice od nehrđajućeg čelika [5]



Slika 20. Odnos jakosti struje i brzine dodavanja žice od bakra [5]

Odabir parametara zavarivanja (jakost struje, napon, brzina zavarivanja, zaštitni plin i protok, slobodni kraj žice…) zahtijeva eksperimentiranje kako bi se utvrdile prihvatljive veličine parametara. Navedeni zadatak kompliciran je činjenicom da postoji međuovisnost nekoliko parametara. Na primjer, promjena jakosti struje (brzine dodavanja žice) može zahtijevati podešavanje napona luka kako bi se održala željena duljina luka. Utvrđeni su tipični rasponi parametara i navedeni u tablicama 2, 3, 4, 5, 6, 7 i 8 za različite osnovne materijale [5].

Tablica 2. Rasponi parametara za MAG zavarivanje ugljičnih i niskolegiranih čelika (prijenos metala štrcajućim lukom) [5]

Debljina materijala	Promjer žice	Jakost struje	Napon	Brzina dodavanja žice	Brzina zavarivanja
mm	mm	A	V	mm/s	mm/s
3,2	0,9	190	26	148	8 – 11
6,4	1,1	320	29	169	7 – 9
9,5	1,1	300	29	154	5 – 7
9,5	1,6	300	26	87	4 – 6
12,7	1,6	320	26	82	7 – 9
19,1	1,6	360	27	99	4 – 6

Tablica 3. Rasponi parametara za MAG zavarivanje ugljičnih i niskolegiranih čelika u ravnom položaju (prijenos metala kratkim spojem) [5]

Debljina materijala	Promjer žice	Jakost struje	Napon	Brzina dodavanja žice	Zaštitni plin	Protok plina
mm	mm	A	V	mm/s		l/min
1,6	0,9	95	18	64	75 % Ar 25 % CO_2	12
3,2	0,9	140	20	106	75 % Ar 25 % CO_2	12
4,7	0,9	150	20	112	75 % Ar 25 % CO_2	12
6,4	0,9	150	21	112	75 % Ar 25 % CO_2	12
6,4	1,1	200	22	106	75 % Ar 25 % CO_2	12

Tablica 4. Rasponi parametara za MAG zavarivanje aluminija (štrcajući luk) [5]

Debljina materijala	**Promjer žice**	**Jakost struje**	**Napon**	**Brzina dodavanja žice**	**Zaštitni plin**	**Protok plina**
mm	mm	A	V	mm/s		l/min
3,2	0,8	125	20	186	Ar	14
4,8	1,1	160	23	116	Ar	16
6,4	1,1	205	24	142	Ar	16
9,5	1,6	240	26	91	Ar	19
19	1,6	240	28	91	75 % He 25 % Ar	42
76	2,4	400	33	76	75 % He 25 % Ar	70

Tablica 5. Rasponi parametara za MAG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika (štrcajući luk) [5]

Debljina materijala	**Promjer žice**	**Jakost struje**	**Napon**	**Brzina dodavanja žice**	**Zaštitni plin**	**Protok plina**
mm	mm	A	V	mm/s		l/min
3,2	1,6	225	24	55	98 % Ar 2 % O	14
6,4	1,6	275	26	74	98 % Ar 2 % O	16
9,5	1,6	300	28	102	98 % Ar 2 % O	16

Tablica 6. Rasponi parametara za MAG zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika (prijenos metala kratkim spojem) [5]

Debljina materijala	**Promjer žice**	**Jakost struje**	**Napon**	**Brzina dodavanja žice**	**Zaštitni plin**	**Protok plina**
mm	mm	A	V	mm/s		l/min
1,6	0,8	85	21	78	90 % He 7,5 % Ar 2,5 % CO_2	14
2,4	0,8	105	23	97	90 % He 7,5 % Ar 2,5 % CO_2	14
3,2	0,8	125	24	118	90 % He 7,5 % Ar 2,5 % CO_2	14

Tablica 7. Rasponi parametara za MAG zavarivanje legura bakra [5]

Debljina materijala	**Promjer žice**	**Jakost struje**	**Napon**	**Brzina dodavanja žice**	**Zaštitni plin**	**Protok plina**
mm	mm	A	V	mm/s		l/min
3,2	0,9	175	23	430	Ar	12
4,8	1,1	210	25	240	Ar	14
6,4	1,6	365	26	240	Ar	16

Tablica 8. Rasponi parametara za MAG zavarivanje magnezija [5]

Debljina materijala	**Promjer žice**	**Jakost struje**	**Napon**	**Brzina dodavanja žice**	**Protok plina**
mm	mm	A	V	mm/s	l/min
1,6	1,6	70	16	68	24
2,3	1,6	105	17	104	24
3,2	1,6	125	18	123	24
6,4	1,6	265	25	254	28
9,5	2,4	335	26	157	28

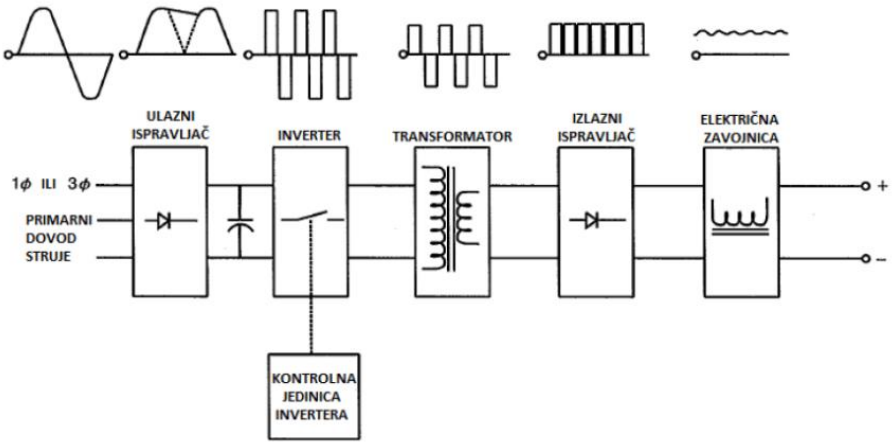
3. IZVORI STRUJE ZA MAG ZAVARIVANJE

Izvori struje za zavarivanje su uređaji za proizvodnju struje različitih vrsta i svojstava, kojima se ostvaruje postupak zavarivanja. Ovisno o unutrašnjoj građi izvora struje, o čemu ovise vrsta i svojstva izlazne struje, izvori struje za zavarivanje dijele se na: transformatore, ispravljače i invertere kao uređaje koji se spajaju na električnu mrežu te na motore s unutrašnjim izgaranjem, s generatorom koji se koriste na mjestima gdje je električna struja slaba ili je uopće nema. Vrsta izvora struje odabire se na temelju željene izlazne struje i njenih svojstava [3].

Danas se kao izvori struje za MAG zavarivanje najčešće koriste inverterski izvori struje za zavarivanje.

3.1. Inverterski izvori struje za MAG zavarivanje

Dizajn i mogućnosti izvora struje za zavarivanje su se promijenili i nastavljaju se ubrzano mijenjati, a izvori struje za zavarivanje bazirani na inverterskoj tehnologiji su pokretači tih promjena [9]. Inverterski izvori struje za zavarivanje razvijeni su korištenjem visoko energetskih poluvodiča kao što su IGBT (eng. *Insulated Gate Bipolar Transistor*) koji omogućavaju prekidni izvor napajanja i imaju mogućnost podnijeti velika strujna opterećenja izazvana postupkom zavarivanja. Inverter je elektronički sklop koji prije transformacije pretvara izmjeničnu u istosmjernu struju. Glavni razlog stavljanja invertera prije transformatora je u tome što broj zavoja transformatora linearno opada s povećanjem frekvencije na ulazu što za posljedicu ima korištenje dimenzijski malih izvora struje. Nakon pretvaranja struje, tranzistorske sklopke brzim prebacivanjem iz područja zapiranja u područje zasićenja stvaraju visokofrekventni napon (10000 do 20000 Hz). Prolaskom ove struje kroz transformator nastaje izmjenična struja, niskog napona, ali vrlo visoke jakosti struje. Slika 21 prikazuje blok dijagram punovalnog ispravljača s Graetzovim spojem na kojem je vidljiva građa inverterskih izvora struje za zavarivanje [3].



Slika 21. Blok dijagram inverterskog izvora struje [3]

Inverterski izvori struje za zavarivanje imaju: visoku iskoristivost (oko 90 %), vrlo preciznu regulaciju izlaznih parametara, zaštitu od preopterećenja, mogućnost promjene parametara zavarivanja tijekom rada u realnom vremenu, kontrolu impulsne struje (jakost, gustoća struje, omjer na kojem je polu struja duže zadržana, frekvencija impulsa te uzlazna i silazna karakteristika), napredniju kontrolu dodavanjem novog programskog paketa, brže vrijeme reakcije u odnosu na jednostavne transformatore i ispravljače te su manjih dimenzija nego transformatori [3].

Inverterski izvori struje za zavarivanje imaju mogućnost zavarivanja zavarenih spojeva visoke kvalitete različitim postupcima zavarivanja na istom uređaju. Tako se na istom uređaju može zavarivati REL, MAG, MIG, TIG postupcima te je moguće i žlijebljenje. Zbog svoje efikasnosti inverterski izvori struje za zavarivanje omogućavaju uštede električne energije [9].

Učinkovitost svih izvora struje za zavarivanje određena je pomoću dvije karakteristike: statičke i dinamičke. Svaka ima različit učinak na performanse zavarivanja, obje utječu na stabilnost luka, ali to čine na različite načine, ovisno o procesu zavarivanja [5].

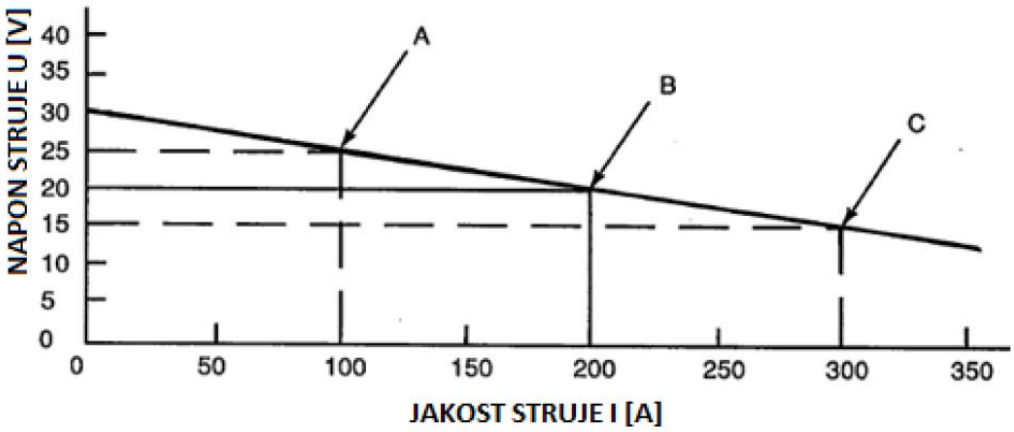
Statička karakteristika izvora struje za zavarivanje opisuje promjenu napona s porastom struje zavarivanja. Karakteristika je prikazana krivuljom napon struje (U) – jakost struje (I) dijagramu te je podijeljena najčešće na dva glavna tipa prema kojima se rade daljnje podjele izvora struje za zavarivanje [3]:

- Strmopadajuća – konstantna jakost struje (eng. *Constant Current*, CC),
- Ravna – konstantan napon struje (eng. *Constant Voltage*, CV).

Kod izvora struje MAG zavarivanja statička karakteristika je ravna. Ravna karakteristika je karakteristika gdje izvor struje održava napon struje konstantnim dok se jačina struje mijenja visinom električnog luka. Iako se uzima da je krivulja konstantna, ona ipak pokazuje blagi pad uzrokovan unutarnjim otporima građe izvora struje za zavarivanje [3].

Glavna razlika između statičkih karakteristika očituje se u načinu vođenja procesa. Kod CV karakteristike teži se održati visinu luka konstantnom, ali bilo kakva promjena visine luka povlači za sobom drastičniju promjenu jakosti struje – što ujedno znači i veliku promjenu količine depozita koja se polaže na radni komad. Takav efekt naziva se također i „samoregulacija“ električnog luka [3].

Dodavač žice je modul koji klasificira MAG postupak zavarivanja automatskim i kontroliran je izvorom struje za zavarivanje. Povećanjem napona povećava se i brzina dodavanja žice, tj. količina depozita, a obzirom da promjene napona nisu skokovite kao kod ručnih postupaka, dobiva se kontinuirana brzina dodavanja depozita uz mogućnost fine kontrole. Slika 22 prikazuje dijagram napona i struje koji prikazuju ravnu (blagopadajuću) statičku karakteristiku (CV) [3].



Slika 22. Dijagram struje i napona koji prikazuje ravnu (blagopadajuću) izlaznu karakteristiku, CV [3]

Dinamička karakteristika kod izvora struje je operativna karakteristika mjerena osciloskopom, pod konstantnim opterećenjem izvora struje za zavarivanje u svrhu detaljnog promatranja ponašanja električnog luka – promjene struje i napona tijekom formiranja i odvajanja rastaljene kapljice metala [3].

3.1.1. Podešavanje parametara MAG zavarivanja

Izvori struje za MAG zavarivanje najčešće nemaju direktno podešavanje jakosti struje zavarivanja, nego se ona mijenja podešavanjem brzine dobavljanja žice. Podešavanjem napona mijenja se duljina električnog luka i način prijenosa metala u električnom luku. Podešavanje parametara MAG zavarivanja moguće je izvesti na dva načina: klasično ili pomoću sinergijskih krivulja. Klasično podešavanje parametara MAG zavarivanja odnosi se na odvojeno podešavanje brzine dobavljanja žice (samim time i jakosti struje zavarivanja) i napona. Podešavanje parametara preko sinergijskih krivulja uvelike olakšava podešavanje parametara zavarivanja jer se podešavanjem brzine dobavljanja žice podešavaju i ostali parametri zavarivanja. Parametri se podešavaju u ovisnosti o vrsti osnovnog materijala te ovisno o zaštitnom plinu [5].

3.1.1.1. Sinergijske krivulje

Sinergijski izvori struje za zavarivanje dolaze s predprogramiranim modelima prijenosa metala gdje je pojedini način prijenosa tvornički ispitan kako bi izvor dao optimalnu kombinaciju jakosti struje i uzlazno silaznih karakteristika [3]. Moderni uređaji imaju mogućnost programiranja i odabira odgovarajućih tzv. sinergijskih krivulja za određenu kombinaciju materijala, zaštitnog plina, debljine materijala i promjera žice. Korisnik odabire željenu količinu depozita (brzine žice) i unosa topline sa samo jednim potenciometrom, tzv. *„one knob“ control* pri čemu postoji mogućnost fine regulacije visine električnog luka [8].

Nakon odabira zaštitnog plina i vrste osnovnog materijala te podešavanja brzine dodavanja žice, ostali parametri se podešavaju automatski. Sinergijske krivulje su unaprijed definirane krivulje koje međusobno povezuju parametre zavarivanja. Dolaze pohranjene u memoriji izvora struje za zavarivanje, a moguće ih je naknadno mijenjati te dodavati nove. Podešavanje parametara bazirano na sinergijskim krivuljama koristi se kod konvencionalnog MAG zavarivanja i modificiranih načina prijenosa metala MAG zavarivanja. Kod konvencionalnog MAG zavarivanja pomoću sinergijskih krivulja napon se podešava odabirom brzine dobavljanja žice. Kod impulsnog MAG zavarivanja podešavanjem parametara osnovnog i dodatnog materijala te zaštitnog plina podešavaju se napon i svi ostali parametri impulsa. Trenutno dostupni izvori struje za zavarivanje mogu raditi, ako je to potrebno, kao sinergijski izvori, ali također dopuštaju operateru prilagodbu parametara zasebno. Ova značajka omogućuje prilagođavanje električnog luka optimalnim svojstvima za svaku primjenu [5].

4. EKSPERIMENTALNI DIO

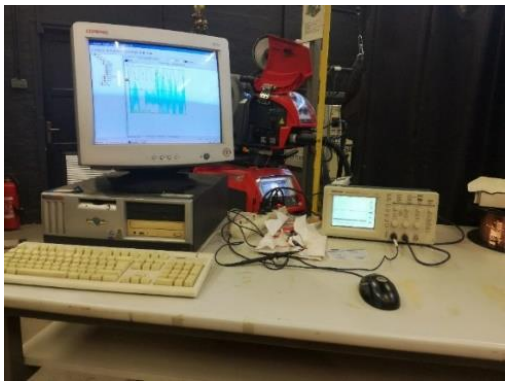
4.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu u svrhu analize dinamičkih karakteristika izvora struje za zavarivanje pri prijenosu metala „čistim“ CMT postupkom, impulsnim CMT postupkom i kombiniranim CMT postupkom (MIX CMT). Korišteni izvor struje za zavarivanje je Fronius TPS 400i. Prijenos metala izveden je navarivanjem u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar. Na temelju snimljenih dinamičkih karakteristika analizirane su osnovne značajke stvarnih i nazivnih parametara za različite varijante CMT postupka. Postupak navarivanja materijala proveden je pomoću robota identičnim parametrima zavarivanja pri različitim prijenosima metala kako bi se pružili jednaki uvjeti za svaki uzorak i izbjegao utjecaj ljudskog čimbenika (zavarivača) na rezultate ispitivanja.

U eksperimentu korišten je osnovni materijal od pocinčanog lima i dodatni materijal žica CuSi3 koja ima niže talište od osnovnog materijala. Prethodno je u svrhu predefiniranja optimalnih parametara eksperiment proveden na osnovnom materijalu S235. Praćene su dinamičke karakteristike tijekom navarivanja pomoću osciloskopa, analizirani i određeni podaci dobiveni osciloskopom, a nakon postupka ocijenjen je izgled spoja i površine radnih komada. Iz svih spojeva izrađeni su makroizbrusci na kojima je provedeno mjerenje geometrijskih značajki.

4.2. Mjerni uređaji i oprema za zavarivanje

Na slici 23 prikazano je radno mjesto gdje je izveden eksperimentalni rad i vidljiv je izvor struje, osciloskop (pomoću kojeg se mjere dinamičke karakteristike) i računalo (na kojem su analizirani i određeni podaci dobiveni osciloskopom).



Slika 23. Radno mjesto u laboratoriju za zavarivanje, FSB, Zagreb

U sastavu robotske stanice nalazi se izvor struje za zavarivanje Fronius TPS 400i (slika 24) čije su karakteristike navedene u tablici 9. Navedeni izvor struje preuređen je uređaj starije verzije i kao rezultat toga svojstva zavara su značajno poboljšana, optimizirana je komunikacija između čovjeka i stroja, a rukovanje je usavršeno [10]. Izvor struje Fronius TPS 400i omogućuje navarivanje sa sva tri prijenosa koja se provode ovim eksperimentom: čisti CMT, impulsni CMT i kombinirani CMT postupak.

Slika 24. Izvor struje za zavarivanje Fronius TPS 400i [10]

Tablica 9. Karakteristike izvora struje za zavarivanje Fronius TPS 400i [10]

Izvor struje		**Fronius TPS 400i**
Priključni napon, V		3 × 400
Područje struje zavarivanja, A		3 – 400
Područje napona zavarivanja, V		14,2 – 34,0
Intermitencija, A	**100 %**	320
	60 %	360
	40 %	400
Masa, kg		36,45
Dimenzija (D × Š × V), mm		706 × 300 × 590

Osciloskop je prikazan na slici 25 kojim su snimljene dinamičke karakteristike napona i struje u eksperimentalnom dijelu rada. Navedeni uređaj je dvokanalni Tektronix TDS 210 osciloskop koji nudi veliko frekvencijsko područje, automatizaciju mjernih značajki i jednostavnost korištenja. Dva ulazna kanala su kontrolirana svaki zasebno pomoću potenciometra i prekidača. Podaci dobiveni osciloskopom su prikazani i određeni pomoću programske aplikacije WaveStar.

Slika 25. Osciloskop Tektronix TDS 210

4.3. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentu je pocinčani lim. Lim za pocinčavanje je lim od običnog ugljičnog čelika, što znači da je vrlo osjetljiv na koroziju. Prevlači se tankim slojem cinka koji mu daje odličnu otpornost na koroziju.

Kako cink (Zn) ima nisku temperaturu taljenja (420 ℃) i isparava na 910 ℃ 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 do uništavanja cinčanog sloja, a kako se većinom radi o tankim materijalima nema deformacija [3].

4.4. Dodatni materijal

Odabrani dodatni materijal je žica CuSi3 kojoj je temperatura tališta oko 980 °C, a talište osnovnog materijala približno na 1100 °C zbog čega dolazi do miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Žica CuSi3 korozijski je otporan materijal zbog čega je mjesto spoja otporno na koroziju.

Korišteni dodatni materijal je puna žica promjera 1,0 mm proizvedena u tvrtki Elektroda Zagreb d.d. Na slici 26 prikazana je specifikacija dodatnog materijala gdje se daje prikaz svojstava i područja primjene, mehanička svojstva čistog metala zavara, orijentacijski kemijski sastav žice i preporučeni zaštitni plin.

EZ - MIG CuSi3

NORME

HRN EN ISO 24373	AWS / ASME SFA-5.7	DIN 1733	W. Nr.
S Cu 6560 (CuSi3Mn1)	ERCuSi-A	SG-CuSi3	2.1461

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Silicijem legirana bakrena žica za zavarivanje bakra, niskolegiranog bakra i bakar-cink legura, te za njihovo spajanje s čelikom. Koristi se i za MIG lemljenje pocinčanih limova te za platiranje sivog lijeva, nelegiranih i niskolegiranih čelika. Zavar je otporan na povišene temperature i koroziju.

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R_{eL} N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	KV (20°C) J
> 120	330 - 370	> 40	≥ 60

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	Cu	Mn	Si	Sn
%	bal.	0,75 - 0,95	2,80 - 2,95	≤ 0,1

ZAŠTITNI PLIN

I1 (Ar)

PAKIRANJE

Promjer žice mm	Namotaj
0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Žica do žice (S-S)

15 kg - plastični ili žičani kolut

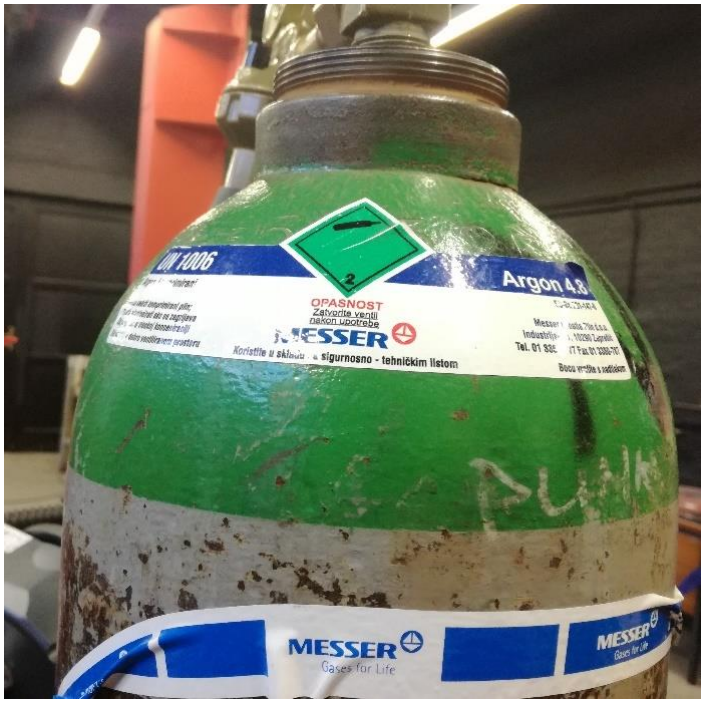
= +

Slika 26. Specifikacija dodatnog materijala [11]

4.5. Zaštitni plin

U eksperimentu je korišten zaštitni plin trgovačkog naziva Argon 4.8 I1 (prema normi HRN EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke). Navedeni zaštitni plin sadrži 100 % Ar i koristi se za zavarivanje visokolegiranih čelika, aluminija i njegovih legura, drugih obojenih metala, austenitnih CrNi čelika, duplex čelika, materijala osjetljivih na plinove (titan, cirkonij, molibden), itd. [13]

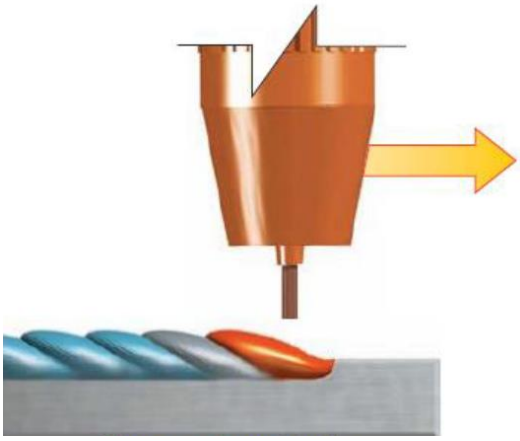
Protok plina tijekom provođenja eksperimenta bio je 15 l/min. Na slici 27 prikazana je boca zaštitnog plina korištena u eksperimentu.



Slika 27. Boca zaštitnog plina Argon 4.8

4.6. Parametri navarivanja

Eksperimentalni dio provodio se postupkom navarivanja na pocinčanom limu debljine 3 mm (pocinčani sloj debljine 4 μm), uz pomoć navedenog izvora struje i robotske stanice radi održavanja stabilnosti procesa. Navarivalo se neutralnom tehnikom rada (slika 28), u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar, čistim CMT postupkom, impulsnim CMT postupkom i kombiniranim CMT postupkom. Slobodni kraj žice iznosio je 10 mm, a brzina navarivanja držala se konstantnom (30 cm/min).



Slika 28. Položaj pištolja kod zavarivanja uzoraka – neutralna tehnika [2]

Zadani (postavljeni) i stvarni (očitani) parametri navarivanja uzoraka dani su u tablici 10.

Tablica 10. Zadani (postavljeni) i stvarni (očitani) parametri navarivanja uzoraka u zaštitnoj atmosferi 100 % Ar

Uzorak	Postavljena brzina dodavanja žice, m/min	Očitana brzina dodavanja žice, m/min	Postavljena jakost struje, A	Očitana jakost struje, A	Postavljeni napon, V	Očitani napon, V	Načina prijenosa metala
1.	4,1	5,0	70	77	10,1	9,8	Čisti CMT
2.	4,0	5,6	70	86	9,6	9,5	Impulsni CMT
3.	4,3	4,3	70	69	17,5	17,8	MIX CMT

Moguće je na temelju dobivenih vrijednosti izračunati unos topline prema izrazu (1) [2]:

$$Q = \frac{U \times I}{v_z} \times \eta \qquad \textbf{(1)}$$

gdje je:

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, mm/s

η – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (za MAG: η=0,8) .

Izračunate vrijednosti unosa topline su male i prikazane su u tablici 11 za zadane i stvarne vrijednosti svakog uzorka.

Tablica 11. Vrijednosti unosa topline za zadane i stvarne vrijednosti svakog uzorka

Uzorak	Parametri	Unos topline, kJ/cm
1.	Zadani	1,13
	Stvarni	1,21
2.	Zadani	1,08
	Stvarni	1,31
3.	Zadani	1,96
	Stvarni	1,97

4.7. Priprema i izrada ispitnih uzoraka

Nakon provedenog navarivanja ploče potrebno je bilo pristupiti izradi ispitnih uzoraka za sva stanja pokusa. Uzorci su u Laboratoriju za zavarivanje rezani na tračnoj pili na točnu mjeru i nakon toga podvrgnuti brušenju. Grubo brušenje izvedeno je na tračnoj brusilici (granulat trake – 150), a ručno brušenje izvedeno je brusnim papirima hrapavosti: #80, #180 i #240, gdje broj brusnog papira predstavlja njegovu granulaciju.

Kako bi se uklonile nečistoće, uzorci su isprani vodom, polirani i očišćeni etilnim alkoholom. Uzorci su polirani u Laboratoriju za metalografiju na stolu stroja koji rotira 300 o/min. Kao sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje korištena je voda iz slavine.

U svrhu mjerenja geometrije navara, u Laboratoriju za zaštitu materijala uzorci su nagriženi u 3 %-tnoj otopini nitala. Nital je rastvor dušične kiseline u alkoholu, sastava 3 ml dušične kiseline i 97 ml etanola. Uzorci se ostave u sredstvu za nagrizanje 2 do 3 sekunde pri čemu dolazi do kemijske reakcije na površini uzoraka. Zatim se uzorci isperu u vodi, osuše i spremni su za daljnju analizu.

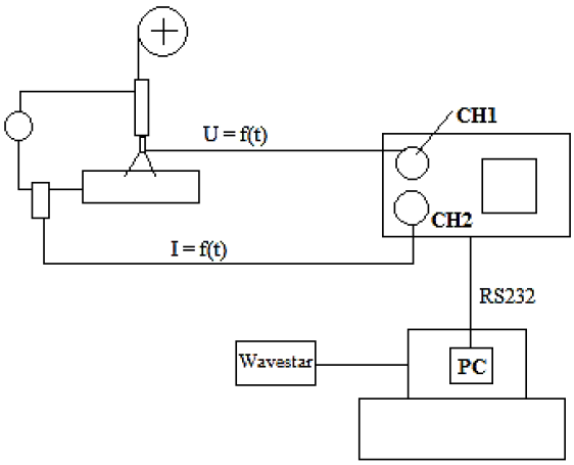
4.8. Provedba ispitivanja svojstava navara

U svrhu analize utjecaja variranih parametara na svojstva navara provedena je analiza dinamičkih karakteristika izvora struje Fronius TPS 400i za različite prijenose metala i mjerenje geometrije navara (širina navara, nadvišenje, kut kvašenja).

Analiza dinamičke karakteristike u, i=f(t) izvora struje Fronius TPS 400i

Dinamička karakteristika prikazuje promjenu napona i struje u jedinici vremena prilikom zavarivanja. Ovisno o postupku zavarivanja registriraju se promjene napona i jakosti struje zavarivanja do 10 ili više kHz, pri čemu se koriste različiti sustavi za praćenje, odnosno sustavi za mjerenje, registraciju i obradu glavnih parametara zavarivanja (napona i struje). Dinamičkim praćenjem parametara zavarivanja pruža se mogućnost ocjene stabilnosti procesa i upravljanja parametrima zavarivanja. Budući da ne postoji jedinstveni način kako opisati dinamičku karakteristiku nekog uređaja za zavarivanje, potrebno ju je mjeriti tijekom zavarivanja [2].

Shema spajanja mjerne opreme prikazana je na slici 29. Analiza dinamičkih karakteristika provedena je u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

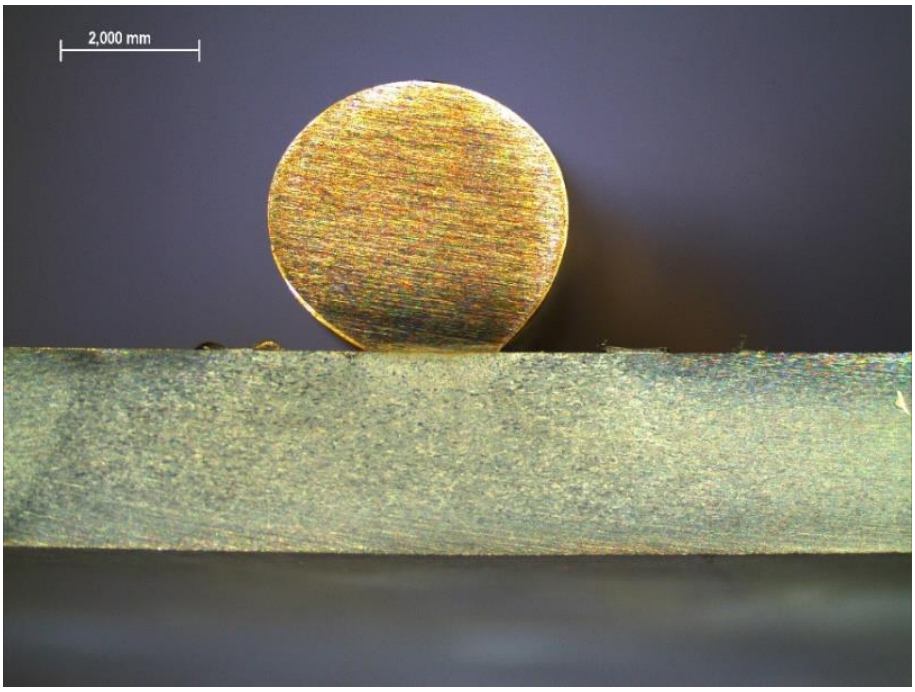


Slika 29. Shema spajanja mjerne opreme [2]

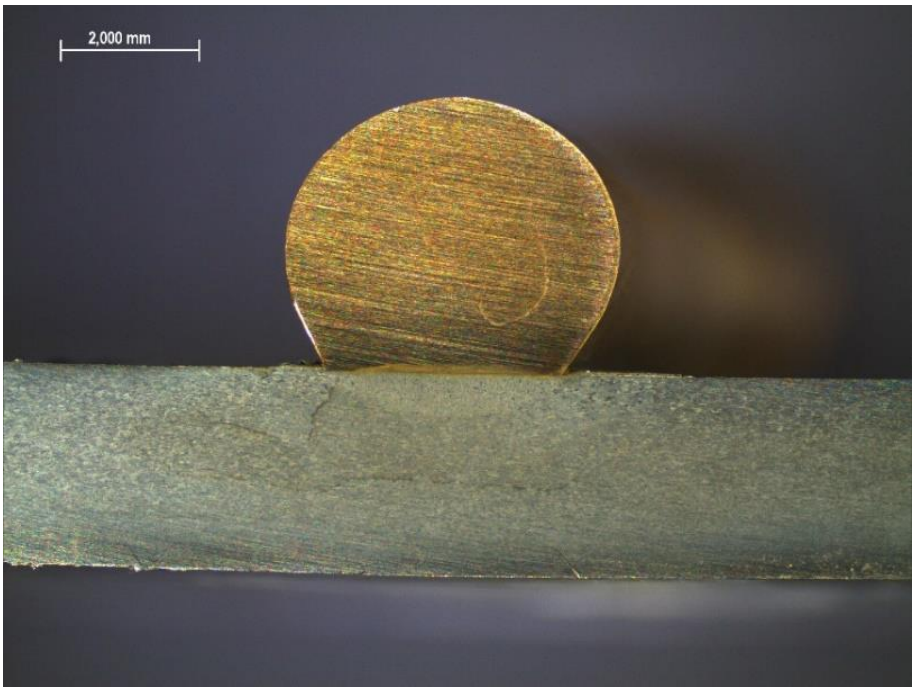
Mjerenje geometrije navara

Pripremljeni makroizbrusci snimljeni su stereoskopskim mikroskopom i podvrgnuti analizi geometrije navara. Tijekom geometrijske analize navara korišten je program ImageJ kojim je izmjerena širina navara, nadvišenje navara i kut kvašenja. Pomoću računalnog programa ImageJ izmjereni pikseli se pretvaraju u odabrane mjerne jedinice tako da se prije samog mjerenja karakterističnih značajki navara definira odnos milimetra i piksela naredbom *Set Scale*. Naredba *Set Scale* koristi mjerno sredstvo koje se nalazi na fotografiji zajedno s ispitnim uzorkom kako bi se definirao omjer između piksela i označene veličine na slici [2].

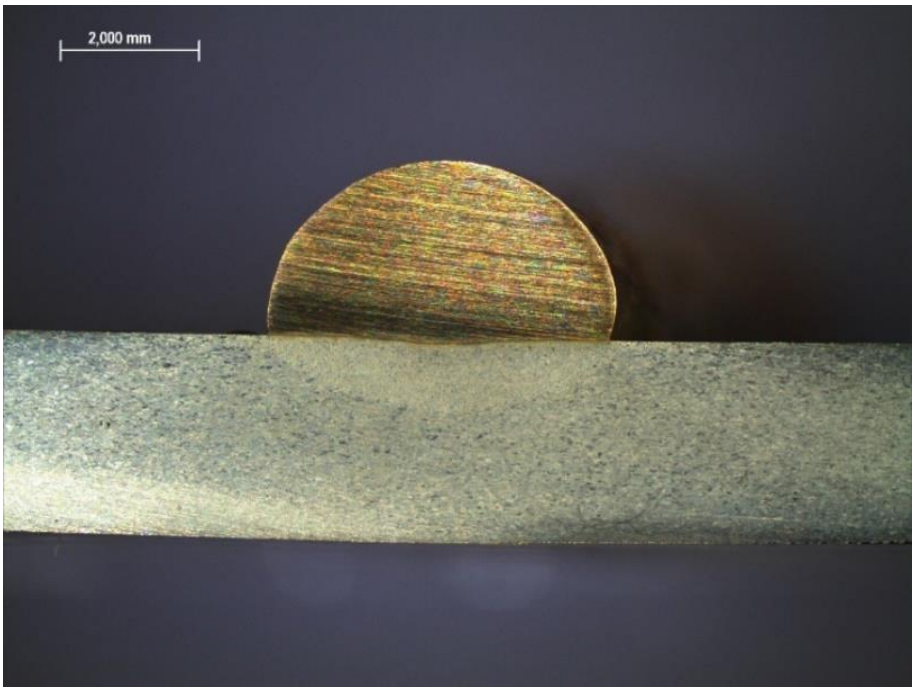
Slike 30, 31 i 32 prikazuju gotove uzorke snimljene stereoskopskim mikroskopom Leica MZ6 u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 30. Makroizbrusak 1. snimljen stereoskopskim mikroskopom – prijenos metala čistim CMT postupkom



Slika 31. Makroizbrusak 2. snimljen stereoskopskim mikroskopom – prijenos metala impulsnim CMT postupkom



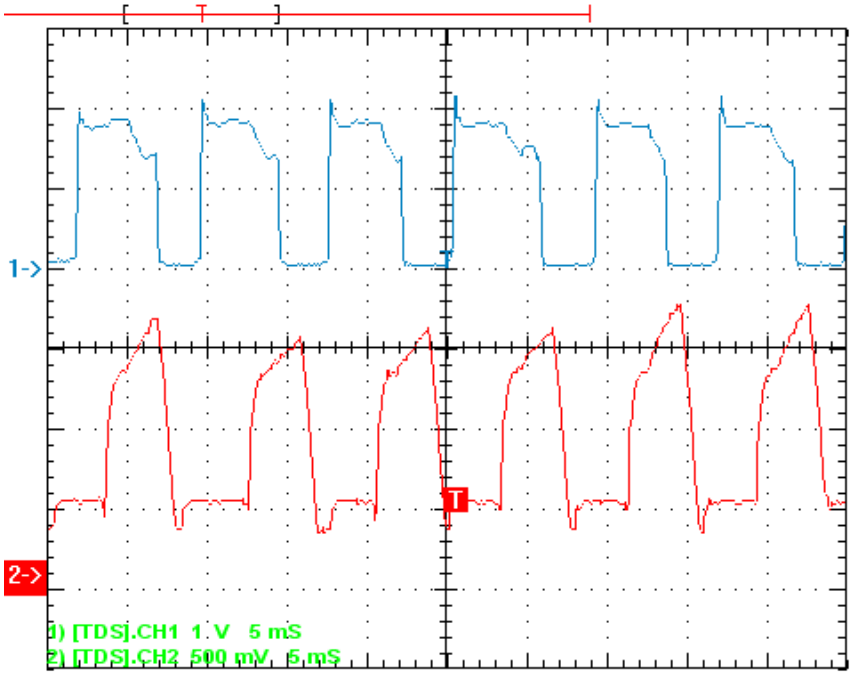
Slika 32. Makroizbrusak 3. snimljen stereoskopskim mikroskopom – prijenos metala kombiniranim CMT postupkom

4.9. Dobiveni rezultati mjerenja i njihova analiza

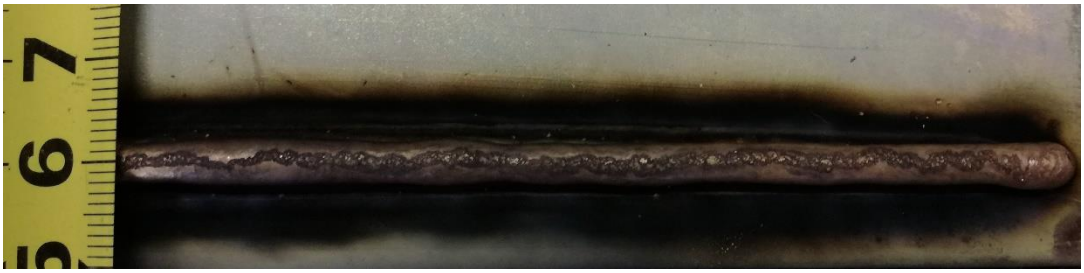
4.9.1. Analiza dinamičke karakteristike izvora struje Fronius TPS 400i

Snimane su dinamičke karakteristike izvora struje kako bi se uočile razlike u prijenosima metala kroz električni luk pri različitim inačicama CMT postupka i međusobno usporedili navedeni postupci. Podaci s osciloskopa analizirani su nakon snimanja dinamičkih značajki, čime se dobio detaljan uvid u proces prijenosa metala. Parametri navarivanja nisu mijenjani tijekom navarivanja različitim prijenosima metala. Slike 33, 35 i 37 prikazuju snimljene dinamičke karakteristike za čisti CMT, impulsni CMT i kombinirani CMT postupak. Dinamičke karakteristike napona označene su plavom bojom, a dinamičke karakteristike struje crvenom bojom. Na slikama 34, 36 i 38 prikazani su izgledi navara.

Iz oscilograma (slika 33) vidljivo je da je proces bio stabilan, što potvrđuje i izgled navara (slika 34) gdje je vidljivo da nije došlo do štrcanja. Navar kao i okolni dio radnoga komada čisti su od kapljica metala. Vidljivi su cijelom duljinom po sredini navara uključci oksida. Dobiveni oscilogram jasno prikazuje mijenjanje jakosti struje ovisno o trenutku ponovne uspostave električnog luka kako bi se smanjila pojava štrcanja. Prema izgledu oscilograma može se reći da CMT postupak smanjuje unos topline u radni komad.

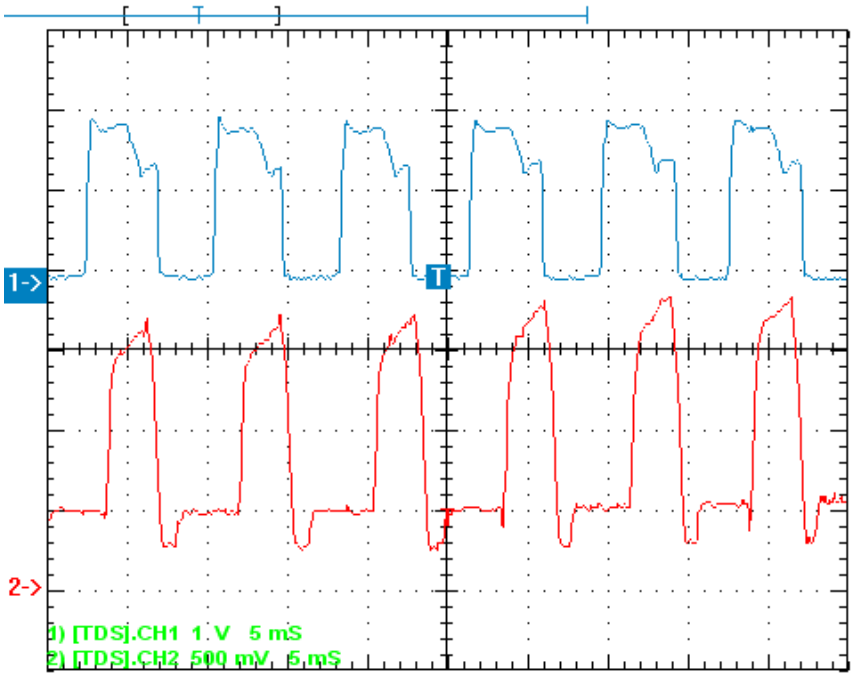


Slika 33. Dinamička karakteristika u, i = f(t) procesa navarivanja čistim CMT postupkom

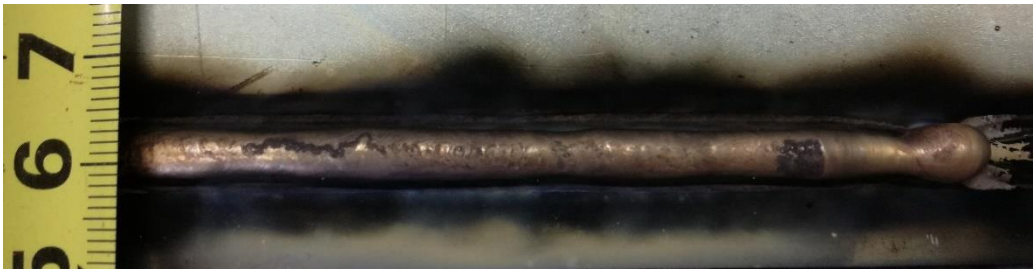


Slika 34. Izgled navara postignutog čistim CMT postupkom

Nadalje, na slici 35 prikazan je oscilogram dobiven pri navarivanju impulsnim CMT postupkom. I dalje je vidljivo da je riječ o izrazito stabilnom procesu. Gledajući dobiveni izgled navara (slika 36) nema pojave štrcanja, a uključci oksida prisutni su u manjoj mjeri u odnosu na prethodni navar koji je postignut čistim CMT postupkom. Iznos frekvencije kod čistog i impulsnog CMT postupka je veći u odnosu na kombinirani prijenos, što je kasnije potvrđeno u tablici 12 izračunatim iznosom frekvencija.

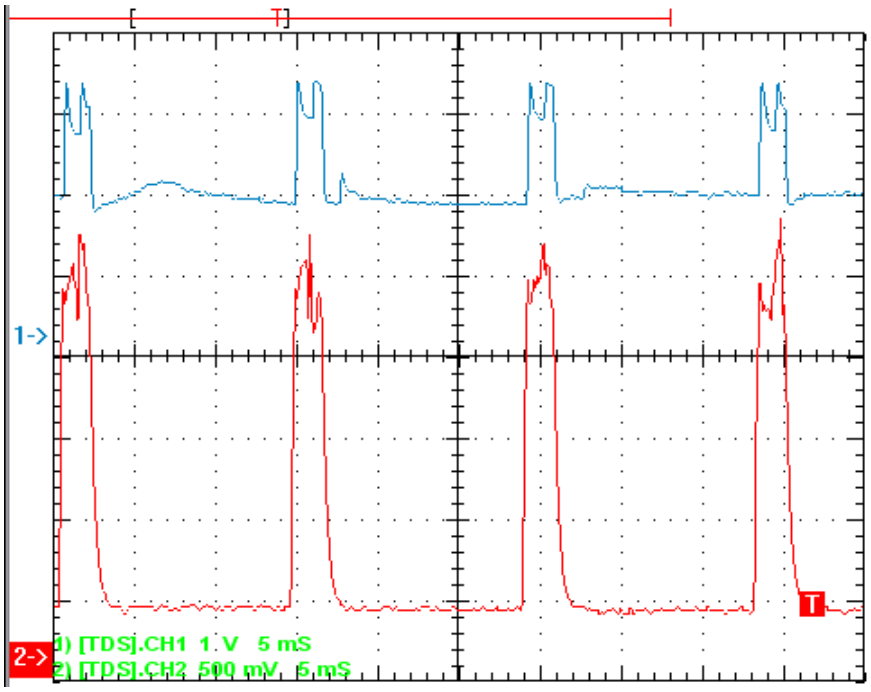


Slika 35. Dinamička karakteristika u, i = f(t) procesa navarivanja impulsnim CMT postupkom

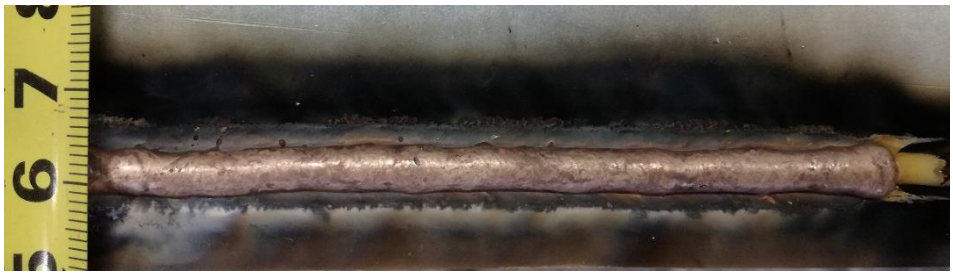


Slika 36. Izgled navara postignutog impulsnim CMT postupkom

Zadnji snimljeni oscilogram postignut je navarivanjem kombiniranim CMT postupkom i prikazan je na slici 37. Proces je zadržao visoku razinu stabilnosti te rezultira urednim navarom i dalje bez štrcanja (slika 38). Navar je čišći nakon navarivanja i nema oksida zbog većeg unosa topline. Vidljiv je mali iznos frekvencije (kasnije je i u tablici 12 potvrđeno izračunatim iznosom) koji uzrokuje manje kapljice i veće razlijevanje taline. Vršne struje su veće u odnosu na iznose kod prijenosa metala čistim i impulsnim CMT postupkom. Također, ni u jednom trenutku nije vidljiv napon vrijednosti nula što ukazuje na to da nema kratkog spoja, tj. da je tijekom cijelog procesa konstantan električni luk.

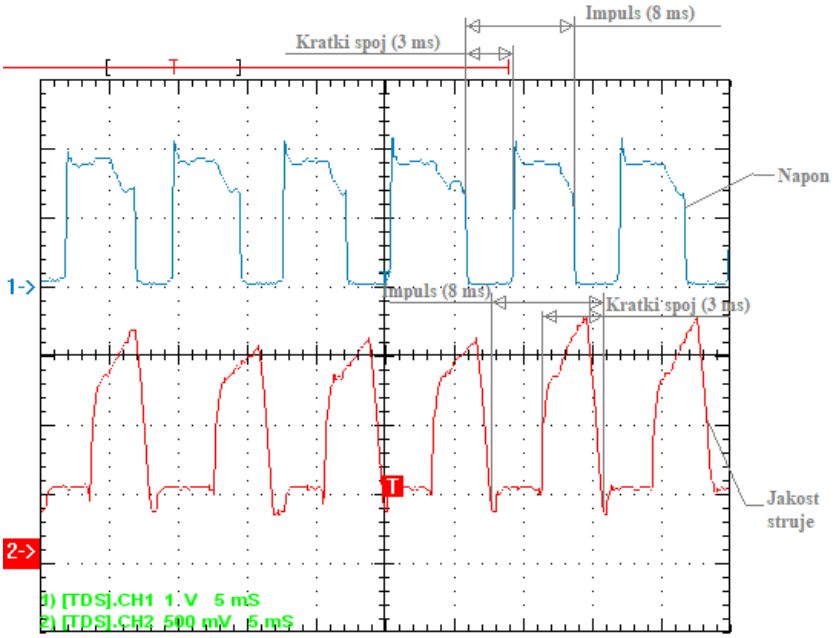


Slika 37. Dinamička karakteristika u, i = f(t) procesa navarivanja kombiniranim CMT postupkom



Slika 38. Izgled navara postignutog kombiniranim CMT postupkom

Snimljene dinamičke karakteristike jasno definiraju područja stabilnog procesa kod sva tri načina prijenosa metala. Analizom snimljenih oscilograma moguće je usporediti razlike u očitanim vrijednostima jakosti struje i napona u ovisnosti o načinu prijenosa metala. Može se vidjeti da su impulsi vrlo stabilni i razmaci između njih pravilni. Na slici 39 označene su duljine (vrijeme) trajanja cijelog impulsa i vrijeme trajanja perioda dok je žica u kontaktu s talinom, tj. u kratkom spoju.



Slika 39. Oscilogram dinamičke karakteristike u, i = f(t), pri čistom CMT prijenosu metala

Kako bi se analizirala vremena trajanja impulsa i kratkog spoja, bilo je potrebno izmjeriti vrijeme trajanja impulsa i kratkih spojeva na način koji je prikazan na slici 39. Izmjereni i izračunati podaci za sva tri prijenosa metala dani su u tablici 12.

Tablica 12. Vremena trajanja cijelog impulsa i kratkog spoja kod sva tri načina prijenosa metala

Prijenos metala	**Vrijeme cijelog impulsa (ms)**	**Vrijeme trajanja kratkog spoja (ms)**	**Frekvencija (Hz)**
Čisti CMT	8	3	125
Impulsni CMT	8,5	4	118
Kombinirani CMT	14	11	71

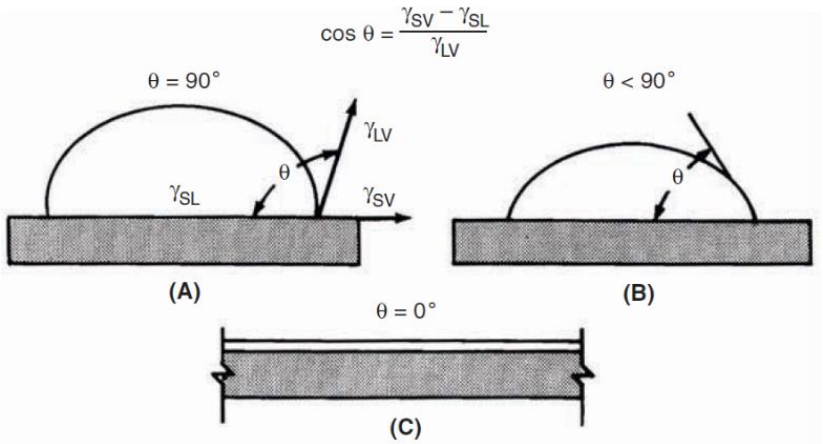
Složeni valni oblik struje navarivanja kod CMT postupka i mehaničko uvlačenje žice za zavarivanje koje potpomaže taloženju dodatnog materijala, čine teško razumljiv odnos između parametara zavarivanja, prijenosa metala i prijelaza topline. Tijekom prijenosa metala struja zavarivanja pada blizu nulte vrijednosti, a to omogućuje izbjegavanje rasprskavanja. Kad je prijenos metala završen, ponovno se pali električni luk, žica mijenja smjer sve do ponovne pojave kratkog spoja.

Brzina dodavanje žice, proces uspostavljanja i prekidanja električnog luka kontrolirani su kako bi se ostvario potreban unos topline za taljenje male količine osnovnog materijala te kako bi se odvojila kap dodatnog materijala (žice). Provedenim eksperimentom opravdane su glavne značajke CMT postupka, a to su: uspostavljanje kratkog spoja na određenom mjestu povezanog s niskim strujama zavarivanja (što omogućuje nizak unos topline) i pojava kratkog spoja na stabilan i kontrolirani način.

4.9.2. Prikaz rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki navara

Na obrađenim makroizbruscima vidljiva je razlika u poprečnome presjeku između dodatnoga i osnovnoga materijala, te širina zone utjecaja topline (ZUT). Izgledi makroizbusaka kao i izmjerene vrijednosti širine metala navara, nadvišenja metala navara i kuta kvašenja prikazane su u tablici 13.

U svrhu određivanja kuta kvašenja na makroizbruscima, na slici 40 prikazana su tri općenita slučaja kvašenja kako bi se dao kriterij ocjene kvašenja. Kut kvašenja označen je oznakom θ na mjestu spoja navara i osnovnog metala.



Slika 40. Prikaz kuta kvašenja i sila površinske napetosti za različite navare [5]

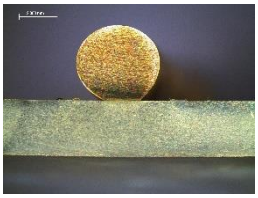
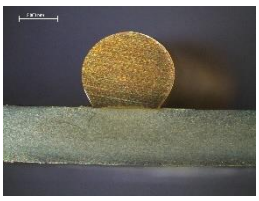
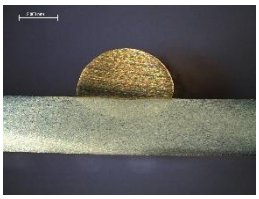
Na slici 40 prikazan je [5]:

(A) kut kvašenja (θ) za slučaj kad kvašenja nema (veći od 90°),

(B) kut kvašenja (θ) kod dobrog kvašenja (manji od 90°),

(C) kut kvašenja (θ) za slučaj odličnog kvašenja (približno 0°).

Tablica 13. Geometrijska analiza makroizbrusaka

Oznaka uzorka	**Uzorak**	**Širina metala navara, mm**	**Nadvišenje metala navara, mm**	**Kut kvašenja, °**
1.		1,9	3,9	137
2.		3,5	4,0	123
3.		4,9	2,6	105

Zbog niskog unosa topline, širina penetracije na sva tri makroizbruska nije vidljiva (na trećem uzorku koji je postignut kombiniranim CMT postupkom nazire se minimalna penetracija). Nadalje, primjećuje se različito razlijevanje taline navara za sva tri prijenosa metala, što je i potvrđeno iznosom kutova kvašenja za svaki prijenos metala.

4.9.3. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki navara

Vidljivo je da CMT postupak u kontekstu primjene na pocinčanom limu eliminira probleme koji su inače prisutni kod zavarivanja na navedenom materijalu – prskanje, loš prijenos metala, slabo protaljivanje, porozitet i pukotine. Rezultati dobiveni mjerenjem geometrijskih značajki

navara potvrđuju već analizirani unos topline, da je najveći unos topline od tri uzorka kod trećeg makroizbruska nastalog kombiniranim CMT postupkom kod kojeg je vidljiva mala penetracija.

Iznosi nadvišenja navara za svaki prijenos metala pokazuju da je najviši navar postignut čistim CMT postupkom, a najniži onaj postignut kombiniranim CMT postupkom. Usporedno nadvišenju navara, širina navara se obrnuto mijenja tako da je najuži navar postignut čistim CMT postupkom, a najširi navar dobiven je kombiniranim CMT postupkom.

5. ZAKLJUČAK

Modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima koji primjenjuje povratno gibanje žice naziva se CMT postupak. Zavarivanje CMT postupkom daje iznimne rezultate kod primjene na različitim materijalima i znatno smanjuje unos topline u usporedbi s drugim postupcima MIG/MAG zavarivanja. CMT eliminira pojavu štrcanja na osnovnom materijalu tijekom zavarivanja i time pridonosi optimalnim rezultatima zavarivanja. U kombinaciji s inteligentnim TPS/i izvorom struje za zavarivanje otvara se još širi spektar područja primjene. Brojne mogućnosti podešavanja omogućuju optimiranje unosa topline pri zavarivanju, sposobnosti premošćivanja zazora i određivanje dubine penetracije. Kombinacija različitih postavki parametara sa širokim rasponom aplikacija za univerzalne i miješane karakteristike zavarivanja već su pohranjene u uređaju, što znači da korisnik više ne mora definirati određena svojstva kako je to uobičajeno pri drugim uređajima. Na taj način korisniku je znatno lakše izabrati odgovarajući program zavarivanja.

Eksperimentom u sklopu ovog rada potvrđene su navedene karakteristike tako što su analizirani navari nastali različitim inačicama CMT postupka: čistim, impulsnim i kombiniranim. Parametri navarivanja nisu mijenjani, već su na početku namješteni. Dalje je bilo vidljivo kako izvor struje za zavarivanje prilagođava parametre navarivanja tijekom postupka navarivanja. Sva tri prijenosa metala CMT postupkom dokazuju stabilnost, iznosi struje su mali, kao i unos topline. Najveći unos topline izračunat je za slučaj navarivanja kombiniranim CMT postupkom što je potvrđeno najmanjim iznosom kuta kvašenja i najvećim razlijevanjem taline. Također, izgledi navara opravdavaju veći unos topline tako što je treći navar čišćeg izgleda i nema uključaka oksida. Dinamičke karakteristike za kombinirani CMT postupak pokazuju kako ovim prijenosom ne dolazi do kratkog spoja, već je električni luk konstantan.

U kontekstu primjene navedenih inačica CMT postupka na pocinčanom limu dobiveni su odlični rezultati čime su eliminirana ograničenja (prskanje, loš prijenos metala, porozitet, pukotine…) pocinčanog lima kao osnovnog materijala i postignuti su navari bez grešaka. Zbog neznatnog miješanja dodatnog i osnovnog materijala postignuti navari ne bi bili primjenjivi u praksi, odnosno kad bi se ovim postupcima spajali materijali s namještenim parametrima zavarivanja kao u ovom eksperimentu, zavari ne bi zadovoljili tražena svojstva (došlo bi samo do naljepljivanja).

Zbog svih navedenih prednosti CMT postupka zavarivanja postižu se uštede na vremenu zavarivanja, kvalitetni zavareni spojevi, nisu potrebne naknadne obrade zavara i postupak nudi razne mogućnosti primjene. Jedno od novih područja primjene je kombinacija CMT postupka s tehnologijom WAAM (eng. *Wire and Arc Additive Manufacturing*), odnosno tehnologijom aditivne proizvodnje u kojoj se predmeti izrađuju tako da se materijal dodaje sloj po sloj. CMT postupak pogodan je u ovoj kombinaciji jer je njime moguće postići slojeve izvrsne kvalitete. Taj postupak daje dobre rezultate prilikom uporabe čelika ili aluminija. Nadalje, u mnogim granama industrije, gdje se primjenjuju tanki materijali, vrlo je važna masa zavarenih dijelova. CMT postupak karakterizira mali unos topline pa je sada moguće spojiti npr. aluminijske ploče do debljine 0,3 mm. Dakle, postupak nudi razne mogućnosti primjene i u budućnosti će omogućiti nova područja zavarivanja.

LITERATURA

[1] Dzelnitzki, D., Prednosti visokoučinskog MAG zavarivanja, Zavarivanje, 55., Zagreb, siječanj – travanj 2012.

[2] Jurica, M., Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.

[3] Garašić, I., Kožuh, Z., Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje, FSB, Zagreb, 2016.

[4] Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W., A scientific application oriented classification for metal transfer mode sin GMA welding; Journal of materials processing technology 212, 1406-1413, 2012.

[5] O`Brien, A. (Ed.), Welding handbook (9th edition) Volume 2, Welding processes; American Welding Society, Miami, USA, 2004.

[6] Dzelnitzki, D., Increasing the deposition volume or the welding speed? – Advantages of heavy-duty MAG welding, EWM HIGHTEC WELDING GmbH, Muendersbach, 2000.

[7] Norrish, J., Process control and automation development sin welding, Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th International Conference, Springer, Berlin, 2009.

[8] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1547210503-0-strojeviiopremazazavarivanjepi.pdf; dostupno: 20.8.2019.

[9] https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/inverter-based-power-detail.aspx; dostupno: 1.9.2019.

[10] https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/tpsi/tpsi/tps-400i; dostupno: 1.9.2019.

[11] http://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZMIGCUSI3.html; dostupno: 1.9.2019.

[12] HRN EN ISO 14175:2008; Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje – Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke

[13] https://www.messer.hr/plinovi-za-zavarivanje-i-rezanje; dostupno: 1.9.2019.

PRILOZI

I. CD-R disc