Izračun unosa energije analizom dinamičke karakteristike kod MAG postupka zavarivanja

Car, Luka

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:235:733159

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Car

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing. Luka Car

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na pomoći i savjetima tijekom studiranja i izrade završnog rada.

Zahvaljujem se asistentu, Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na savjetima i pomoći tijekom provođenja eksperimentalnog dijela i pisanja završnog rada.

Također se zahvaljujem osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije na pristupačnosti i susretljivosti tijekom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem roditeljima, bratu, sestri, djevojci, bakama i djedovima i ostatku obitelji kao i prijateljima na podršci, strpljenju i razumijevanju tijekom studiranja i izrade završnog rada.

Luka Car

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: **Luka Car** Mat. br.: 0035205748

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izračun unosa energije analizom dinamičke karakteristike kod MAG postupka zavarivanja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Energy Input Calculation by Analysis of Dynamic Characteristic of MAG Welding Process**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu potrebno je opisati načine prijenosa metala kod konvencionalnog MAG postupka kao i kod njegovih modificiranih inačica. Za svaki način prijenosa metala obraditi pripadajuću dinamičku karakteristiku te obrazložiti uzročno-posljedične veze sa stabilnošću procesa. Detaljno objasniti konvencionalne načine određivanja unosa energije.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je pomoću osciloskopa snimiti dinamičku karakteristiku MAG postupka zavarivanja za više različitih prijenosa metala. Obraditi dobivene rezultate mjerenja te, na temelju istih, izračunati unos energije pri zavarivanju. U konačnici izvršiti komparativnu analizu uključujući i konvencionalne načine određivanja unosa energije te analizirati uzroke eventualnih razlika u rezultatima.

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

Zadatak zadan:
6. svibnja 2019.

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

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

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA V
POPIS OZNAKA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA 2
2.1. Općenito o postupku 2
2.2. Uređaj za MAG zavarivanje i opis principa rada 2
2.3. Parametri zavarivanja 7
2.3.1. Jakost struje 7
2.3.2. Napon 7
2.3.3. Brzina zavarivanja 8
2.3.4. Slobodni kraj žice 8
2.3.5. Zaštitni plinovi 9
2.3.6. Induktivitet 9
2.4. Načini prijenosa metala 10
2.4.1. Prijenos metala kratkim spojevima (engl. Short Arc) 10
2.4.2. Prijenos metala prijelaznim lukom (engl. Mixed arc) 11
2.4.3. Prijenos metala štrcajućim lukom (engl. Spray arc) 12
2.4.4. Prijenos metala impulsnim lukom (engl. Pulsed arc) 13
2.5. Modificirani postupci MAG zavarivanja 14
2.5.1. Modificirani postupci koji koriste prijenos metala kratkim spojevima 15
2.5.2. Modificirani postupci koji koriste prijenos metala štrcajućim lukom 19
2.6. Greške kod MAG zavarivanja 20
2.6.1. Pukotine 20
2.6.2. Šupljine (poroznosti) 22
2.6.3. Čvrsti uključci 22
2.6.4. Naljepljivanje i nedovoljni provar 22
2.6.5. Ugorine uz zavar 23
2.7. Prednosti MAG postupka zavarivanja [5,9,14,]: 24
2.8. Nedostatci MAG postupka zavarivanja [5,9,14,]: 24
2.9. Primjena MAG postupka 25
3. UNOS TOPLINE PRILIKOM ZAVARIVANJA 27
4. DINAMIČKA KARAKTERISTIKA 29
4.1. Dinamička karakteristika prijenosa metala kratkim spojevima 30
4.2. Dinamička karakteristika prijenosa metala prijelaznim lukom 31
4.3. Dinamička karakteristika prijenosa metala štrcajućim lukom 32

4.4. Dinamička karakteristika prijenosa metala impulsnim lukom 33
4.5. Dinamička karakteristika STT postupka 34
4.6. Dinamička karakteristika FastRoot® postupka 35
5. EKSPERIMENTALNI DIO 37
5.1. Oprema korištena za provedbu eksperimenta 37
5.2. Način izračuna unosa topline preko dinamičke karakteristike 40
5.3. Prijenos metala kratkim spojevima 43
5.3.1. Dinamička karakteristika 43
5.3.2. Izračun unosa topline 44
5.3.3. Analiza rezultata 45
5.4. Prijenos metala impulsnim lukom 46
5.4.1. Dinamička karakteristika 46
5.4.2. Izračun unosa topline 47
5.4.3. Analiza rezultata 48
5.5. ColdArc® postupak 49
5.5.1. Dinamička karakteristika 49
5.5.2. Izračun unosa topline 51
5.5.3. Analiza rezultata 51
5.6. Usporedna analiza rezultata 53
6. ZAKLJUČAK 57
7. LITERATURA 59

POPIS SLIKA

Slika 1. Oprema za MAG zavarivanje [4] 3
Slika 2. Presjek glave pištolja za MAG zavarivanje [5] 4
Slika 3. Mehanizam za dobavu žice kod uređaja EWM za MIG/MAG zavarivanje [8] 5
Slika 4. Pištolj za zavarivanje s kontrolama i zaslonom proizvođača EWM [10] 6
Slika 5. Utjecaj jakosti struje na geometriju zavara [13] 7
Slika 6. Utjecaj napona na geometriju zavara [13] 8
Slika 7. Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zavara [13] 8
Slika 8. Poprečni presjek zavara u ovisnosti o slobodnom kraju žice [13] 9
Slika 9. Shematski prikaz prijenosa materijala kratkim spojevima [17] 11
Slika 10. Shematski prikaz faza prijenosa materijala kratkim spojevima [2] 11
Slika 11. Shematski prikaz prijenosa materijala prijelaznim lukom [18] 12
Slika 12. Shematski prikaz prijenosa materijala štrcajućim lukom [18] 13
Slika 13. Shematski prikaz prijenosa materijala impulsnim lukom i impulsa [19] 14
Slika 14. Makroizbrusak korijenskog prolaza STT tehnologijom [2] 15
Slika 15. Shematski prikaz faza CMT postupka [2] 16
Slika 16. Zavareni spoj čelika debljine 2 mm uz razmak od ~2-3 mm [20] 17
Slika 17. Shematski prikaz principa rada CBT postupka [2] 18
Slika 18. Shematski prikaz principa rada ColdArc postupka [2] 19
Slika 19. Topla pukotina na licu zavara [9] 21
Slika 20. Hladna pukotina u ZUT-u kod sučeljenog spoja [9] 21
Slika 21. Naljepljivanje kod kutnog zavara (lijevo) i neprovaren korijen (desno) [9] 23
Slika 22. Ugorina između materijala zavara i dodatnog materijala [9] 23
Slika 23. Brodski propeler izrađen WAAM tehnologijom [22] 26
Slika 24. Shematski prikaz faza prijenosa metala kratkim spojevima [20] 30
Slika 25. Oscilogram prijenosa metala kratkim spojevima [20] 31
Slika 26. Oscilogram prijenosa metala prijelaznim lukom [24] 32
Slika 27. Oscilogram prijenosa metala štrcajućim lukom [20] 33
Slika 28. Oscilogram prijenosa metala impulsnim lukom [24] 34
Slika 29. Dinamička katakteristika *1-u=f(t); 2-i=f(t)* STT postupka [20] 35

Slika 30. Dinamička katakteristika *1-u=f(t); 2-i=f(t)* STT postupka [20] 36
Slika 31. EWM Titan XQ 350 puls [8] 37
Slika 32. Shema spajanja opreme za mjerenje tijekom provedbe eksperimenta [24] 38
Slika 33. Robotska ruka korištena prilikom zavarivanja [24] 39
Slika 34. Zid izrađen tijekom provođenja eksperimenta [24] 39
Slika 35. Primjer krivulja struje, napona i prosječnih vrijednosti za prijenos metala kratkim spojevima 41
Slika 36. Primjer krivulja struje, napona i prosječnih vrijednosti za prijenos metala impulsnim lukom 41
Slika 37. Dinamička karakteristika za prijenos metala kratkim spojevima pri 100 A 43
Slika 38. Dinamička karakteristika za prijenos metala kratkim spojevima pri 150 A 44
Slika 39. Grafički prikaz odnosa unesene topline tijekom Mjerenja 1 i Mjerenja 2 45
Slika 40. Dinamička karakteristika za prijenos metala impulsnim lukom pri 100 A 46
Slika 41. Dinamička karakteristika za prijenos metala impulsnim lukom pri 150 A 47
Slika 42. Grafički prikaz odnosa unesene topline tijekom Mjerenja 3 i Mjerenja 4 48
Slika 43. Dinamička karakteristika ColdArc postupka pri 100 A 50
Slika 44. Dinamička karakteristika ColdArc postupka pri 150 A 50
Slika 45. Grafički prikaz odnosa unesene topline tijekom Mjerenja 5 i Mjerenja 6 52
Slika 46. Usporedba postavljenih i izmjerenih vrijednosti struje 53
Slika 47. Usporedba očitanih i izmjerenih vrijednosti napona 53
Slika 48. Unesena toplina za različite načine prijenosa metala pri 100 A 54
Slika 49. Unesena toplina za različite načine prijenosa metala pri 150 A 55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Iznosi faktora korisnosti 28
Tablica 2. Unos topline za način prijenosa materijala kratkim spojevima 44
Tablica 3. Unos topline za način prijenosa metala impulsnim lukom 47
Tablica 4. Unos topline za ColdArc postupak 51

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
MAG	-	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom uz zaštitu aktivnog plina
MIG	-	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom uz zaštitu inertnog plina
REL	-	Ručno elektrolučno zavarivanje
η	-	Faktor korisnosti
DC	-	*Direct current* (istosmjerna struja)
t	s	Vrijeme
I	A	Jakost struje
U	V	Napon
Q	J	Toplina
v	m/s	Brzina
WAAM	-	*Wire and Arc Adictive Manufacturing* (aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom)

SAŽETAK

U završnom radu opisan je je MAG postupak zavarivanja te je navedena i objašnjena oprema koja se koristi u postupku, parametri zavarivanja i najčešće greške. Uz to, dan je pregled i opis načina prijenosa metala i modificiranih postupaka zavarivanja. Također su iznesene teorijske osnove dinamičke karakteristike i načina izračuna unesene topline.

U radu su prezentirani rezultati eksperimentalnog dijela u kojem je provedeno mjerenje dinamičkih karakteristika za metode prijenosa metala kratkim spojevima, impulsnim lukom i ColdArc postupkom. Dobiveni podaci su potom analitički obrađeni te je izračunat unos topline koji je uspoređen s unesenom toplinom izračunatom uobičajenim načinom u skladu s normom HRN EN 1011-1.2009. Dobiveni rezultati i odstupanja su grafički prikazani i analizirani na temelju prethodno stečenih znanja.

Ključne riječi: MAG, dinamička karakteristika, unos topline, kratki spojevi, ColdArc®

SUMMARY

In this thesis MAG welding procedure is described as well as related equipment, welding parameters, welding defects and metal transfer modes including few most common modified procedures. Also theoretical basics of dynamical characteristics and input energy calculation are included.

Thesis presents results obtained in the experimental part of the work while measuring dynamic characteristic for Short Arc, Pulsed Arc and ColdArc procedure . The data is analytically processed, and heat input is calculated accordingly. Also the heat input calculated from dynamic characteristic is compared with heat input calculated following norm HRN EN 1011-1.2009. Results are graphically presented and analysed according to the previously acquired knowledge.

Key words: MAG, dynamical characteristic, heat input, Short Arc, ColdArc®

1. UVOD

Zavarivanje je postupak spajanja dvaju materijala nerastavljivom vezom. Općenito govoreći to je postupak bez kojeg bi bilo nemoguće zamisliti današnji svijet. Zbog raznih zahtjeva i primjena razvilo se i mnogo različitih vrsta (postupaka) zavarivanja, a najveću primjenu pronalaze u području strojarstva, brodogradnje i građevine. Tema ovog završnog rada je izračun unosa energije tijekom elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina analizom dinamičke karakteristike te usporedba dobivenih rezultata s iznosima izračunatima uobičajenim načinom sukladno postojećoj normi.

U drugom poglavlju rada ukratko se objašnjavaju teorijske osnove MAG postupka, navedeni su i objašnjeni parametri zavarivanja kao i vrste prijenosa metala. Uz to iznesen je i pregled najčešće korištenih modificiranih postupaka uključujući i ColdArc® postupak koji je razvijen od strane tvrtke EWM, a koji se koristi u eksperimentalnom dijelu rada.

U trećem poglavlju je objašnjen pojam unosa topline u području zavarivanja i način izračunavanja istog, dok se u četvrtom poglavlju opisuje i objašnjava pojam dinamičke karakteristike. Uz to su prikazane i objašnjene dinamičke karakteristike različitih načina prijenosa metala kao i nekih modificiranih postupaka.

U petom poglavlju se obrađuje eksperimentalni dio ovog završnog rada, a koji se sastoji od mjerenja dinamičke karakteristike za šest različitih primjera. Za svaki od tri korištena načina prijenosa metala je obavljeno mjerenje dinamičke karakteristike pri dvije jačine struje. Dobiveni podaci tih šest slučaja analitički su obrađeni, a iz njih se izračunala unesena toplina koja je zatim uspoređena sa unesenom toplinom izračunatom klasičnim postupkom.

U zaključku su prezentirane spoznaje nastale temeljem analize literature i provedenih mjerenja, a vezano uz područje MAG zavarivanja i izračun unesene topline.

2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

2.1. Općenito o postupku

MAG (engl. *Metal Active Gas*) postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina što je najčešće ugljikov dioksid (CO_2), a moguće je korištenje i neke njegove mješavine s argonom, helijem ili kisikom. Zadaća zaštitnog plina je zaštititi električni luk i rastaljeni metal od negativnog utjecaja okoline i ionizirati vodljivi prostor za održavanje električnog luka [1,2,3].

MAG postupak je jedan od najčešće korištenih postupaka u današnje vrijeme zbog mogućnosti mehanizacije, automatizacije i robotizacije. Mogućnost udovoljavanja zahtjevima tržišta (povećanje kvalitete, poštivanje sve strožih normi i efikasnija proizvodnja) te varijabilnost samog postupka stavljaju MAG u dominantnu poziciju nad mnogim drugim postupcima zavarivanja. Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 Zavarivanje i srodni postupci - Nomenklatura postupaka i referentni brojevi označava se oznakom 135 [2].

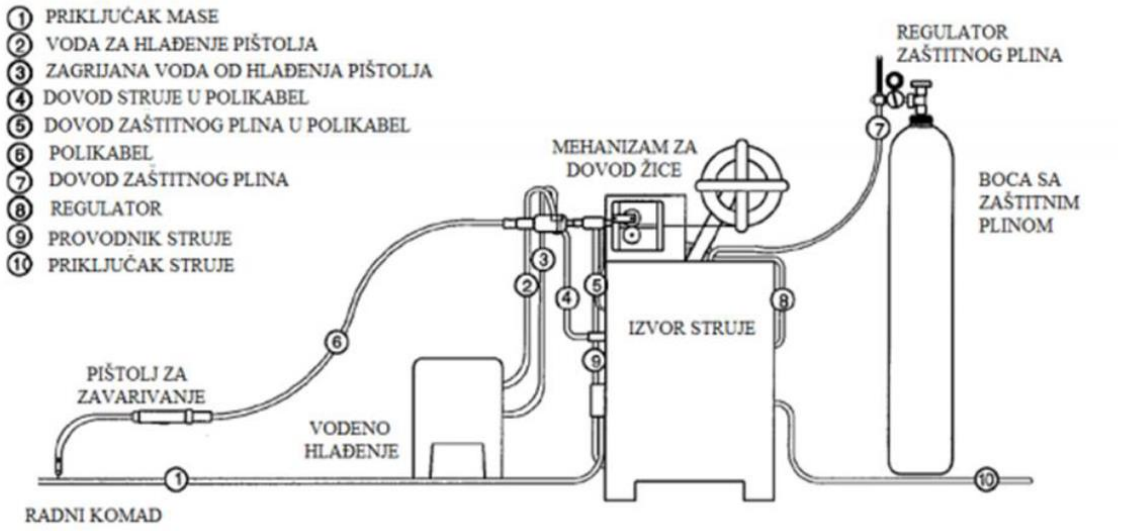
Ovaj postupak zavarivanja primjenjuje se od 1953. godine, a prvi put je korišten u SSSR–u. Primjenjuje se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika, a pod određenim uvjetima moguće je zavarivanje i visokolegiranih čelika. Postupak ima široku primjenu; koristi se za zavarivanje tankih kao i debelih materijala kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reparaturnog zavarivanja većine metalnih materijala u raznim granama industrije. Taljiva elektroda je ujedno i dodatni materijal, koji obično kemijskim sastavom i mehaničkim svojstvima odgovara osnovnom materijalu koji se zavaruje [3].

2.2. Uređaj za MAG zavarivanje i opis principa rada

Osnovni dijelovi svakog uređaja za MAG zavarivanje su (Slika 1) [3]:

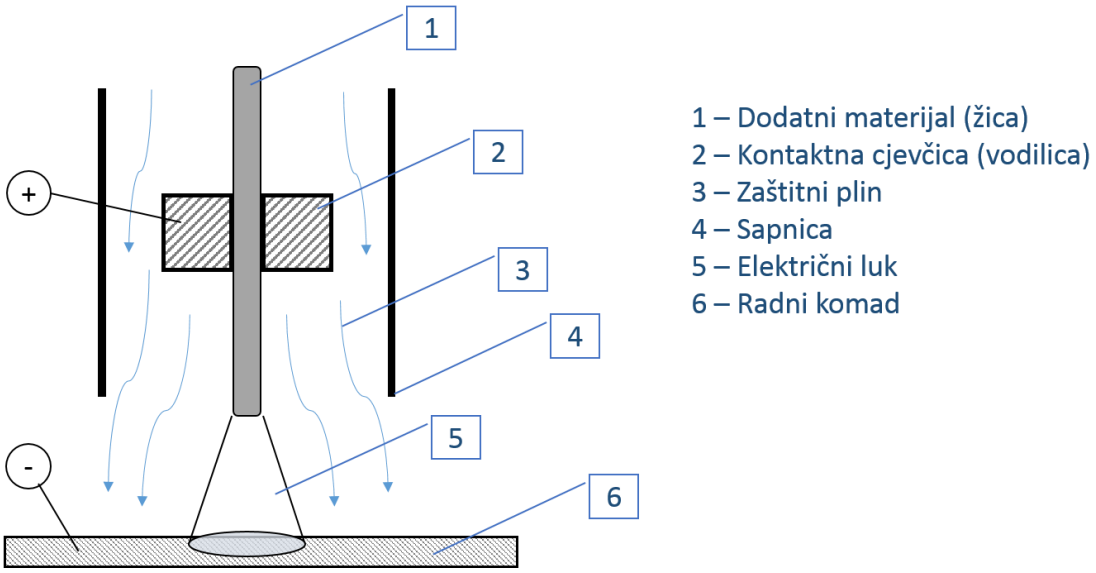
- izvor istosmjerne struje
- polikabel
- pištolj za zavarivanje
- dodavač žice

- uređaj za vodeno hlađenje pištolja
- boca sa zaštitnim plinom
- regulator protoka plina.



Slika 1. Oprema za MAG zavarivanje [4]

Uređaj za zavarivanje je spojen na električnu mrežu putem utičnice. Jedan kabel (masa) spojen je na radni komad, a drugi kabel povezuje uređaj i pištolj putem polikabela. U polikabelu se osim kabela pod naponom nalazi i dodatni materijal u obliku žice koja ide od dodavača žice kojeg pogoni elektromotor do pištolja, zatim cijev za dovod zaštitnog plina iz boce pod tlakom, cijevi za vodeno hlađenje (ako je pištolj vodeno hlađen) te, na novijim uređajima, komunikacijski i upravljački kabel [5].

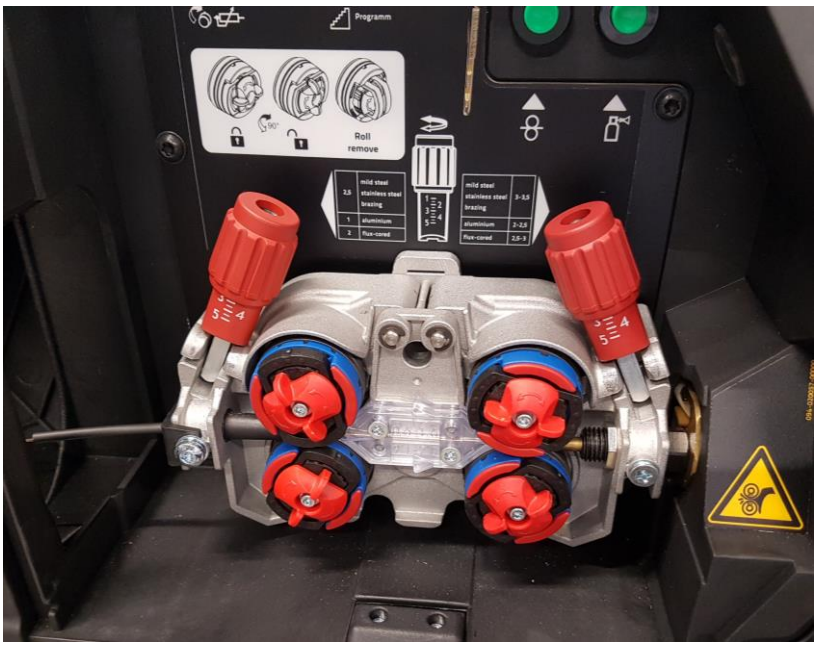


Slika 2. Presjek glave pištolja za MAG zavarivanje [5]

Proces zavarivanja započinje pritiskom na prekidač koji se najčešće nalazi na pištolju (izuzevši automatizirane postupke u kojima se zavarivanjem upravlja daljinski). Pritiskom na prekidač uspostavlja se električni luk. Električni luk je snažno i trajno pražnjenje (usmjereno gibanje elektrona) u ionizirajućem plinu između radnog komada i elektrode u obliku žice, koja je u pravilu spojena na pozitivni pol istosmjernog (engl. *Direct Current*, DC) izvora struje u strujnom krugu u kojem je radni komad spojen na negativni pol [6]. Istovremeno uspostavi električnog luka, zaštitni plin kroz sapnicu izlazi iz pištolja te zavjesa plina obavija zavar [5].

Zadaća mehanizma za dobavu žice (Slika 3) je osigurati konstantno dovođenje žice u električni luk kroz polikabel sve dok se električni luk ne prekine. Žica istovremeno ima funkciju elektrode i dodatnog materijala [2]. U slučajevima kada je polikabel duži od ~5 m potrebno je u pištolju imati sustav za povlačenje žice da ne bi došlo do „gužvanja“. Takav sustav naziva se *Push & Pull* [2]. Kontaktna cjevčica tj. vodilica pištolja (Slika 2, oznaka 2), koja služi za vođenje elektrode i za dovođenje/prijenos struje zavarivanja na žicu te sapnica za plin (Slika 2, oznaka 4) koja služi za usmjeravanje zaštitnog plina, potrošni su dijelovi te ih se lako može očistiti ili zamijeniti [2]. Prednost MAG postupka nad REL postupkom (Ručno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom) je u tome što se grije samo kratak dio vrha žice

(ako se zanemari kondukcija[1] unutar žice) između kontaktne cjevčice i električnog luka, dok se kod REL-a grije cijela elektroda [5].



Slika 3. Mehanizam za dobavu žice kod uređaja EWM za MIG/MAG zavarivanje [8]

Pištolj za zavarivanje (Slika 4) je važan dio opreme te je važno da bude ergonomično oblikovan i što kompaktnijih dimenzija. Pištolji mogu biti hlađeni zrakom i oni se koriste pri nižim naponima (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili hlađeni vodom u obliku zatvorenog vodenog sustava hlađenja za veće jakosti struje (300 – 600 A) [4]. Pištolji s vodenim hlađenjem su kompaktniji i manjih dimenzija od zračno hlađenih, ali je potreban modul za hlađenje i cirkulaciju vode koji se sastoji od: spremnika vode, pumpe i hladnjaka i taj modul obično je smješten u sklopu izvora struje [9].

[1] Kondukcija ili provođenje označava izmjenu toplinskog toka kroz homogenu tvar (krutinu ili kapljevinu) pod utjecajem temperaturnog gradijenta bez primjetnog gibanja čestica [7].



Slika 4. Pištolj za zavarivanje s kontrolama i zaslonom proizvođača EWM [10]

Žice za MAG postupak su najčešće promjera od 0,6 do 2,4 mm. Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Površina žice mora biti glatka, dimenzije vrlo točne, a kolut koji se postavlja u uređaj za dodavanje žice uredno namotan [9]. Osim punih žica koriste se i praškom punjene žice. Praškom punjene žice se koriste s ili bez plinske zaštite (same sebi stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem tj. izgaranjem punjenja žice). Pune žice dobivaju se hladnim vučenjem, dok se punjene žice proizvode od metalne trake (debljine do 0,5 mm) koja se savija po duljini i puni bazičnim ili rutilnim praškom. Zavarivanje žicom punog presjeka moguće je u svim položajima, dok se kod praškom punjene žice zavaruje u vodoravnom i okomitom položaju [1].

Taljenje dodatnog materijala, odnosno žice, i njegov prijenos u talinu uvijek je popraćen pojavom sila poput elektromagnetske i gravitacijske, sila uzrokovanih strujanjem i izgaranjem plinova, sila od pritiska plazme te sila površinske napetosti [1].

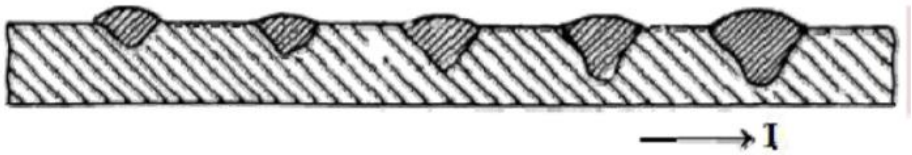
MAG postupak moguće je automatizirati i danas, ovisno o potrebi, postoji izbor između poluautomatskog, automatskog i robotiziranog sustava. Kod poluautomatskog sustava se mehanizirano dodaje žice, a ručno vodi pištolj dok je kod automatskog glava pištolja pokretana automatskim mehanizmom, a radni komad je nepomičan ili obratno uz mehanizirano dodavanje žice. Postoji još i robotiziranog sustava za MAG zavarivanje [6].

2.3. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja su oni čimbenici na koje se može utjecati i koji se mogu mijenjati. Ovisno o izabranoj kombinaciji parametara dobiva se zavar određenih svojstava i kvalitete. Često je potrebno prilagoditi parametre zavarivanja tijekom samog postupka kako bi se dobio željeni rezultat. Spomenuti parametri nisu jedino što utječe na zavar, ali se promjenom istih mogu korigirati čimbenici na koje nemamo utjecaja [11]. Ako ne postoji specifikacija postupka zavarivanja, za izbor parametara postoji okviran redoslijed, međutim u velikoj je većini slučajeva potrebno provesti zavarivanje probnog uzorka. Izbor parametara zavarivanja je usko povezan s kemijskim sastavom i debljinom osnovnog materijala, izborom elektrode te zahtijevanom kvalitetom zavara. Neki od najvažnijih i najutjecajnijih parametara su:

2.3.1. Jakost struje

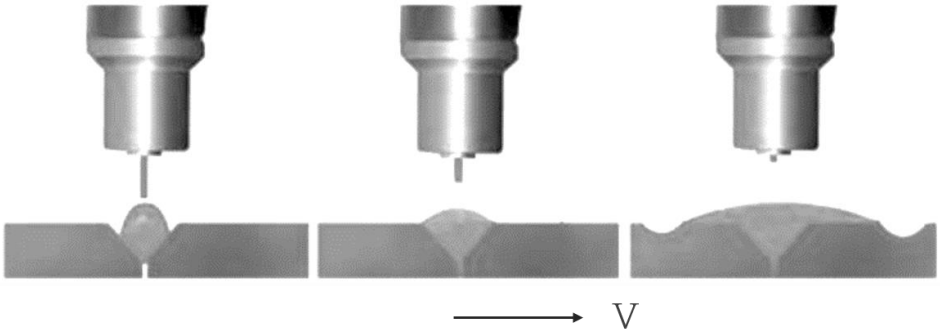
Jakost struje određuje se prema promjeru žice, položaju zavarivanja te vrsti i debljini materijala, a ovisi i o načinu prijenosa metala u električnom luku. O jakosti struje ovise stabilnost električnog luka, penetracija, količina taline i brzina zavarivanja (Slika 5) [12,14].



Slika 5. Utjecaj jakosti struje na geometriju zavara [13]

2.3.2. Napon

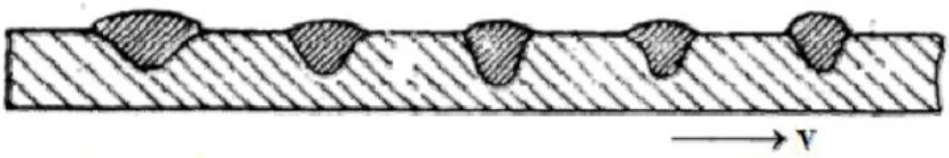
Stabilnost električnog luka te njegova duljina i širina u direktnoj su vezi s naponom. Veći napon uzrokuje duži električni luk čime se dobiva širi zavar uz manju penetraciju (Slika 6). Iznos napona drugačiji je za različite načine prijenosa metala. Odnos napona i jakosti struje reguliraju sami uređaji što znači da je potrebno unesti samo jedan od ova dva parametra [2,14].



Slika 6. Utjecaj napona na geometriju zavara [13]

2.3.3. Brzina zavarivanja

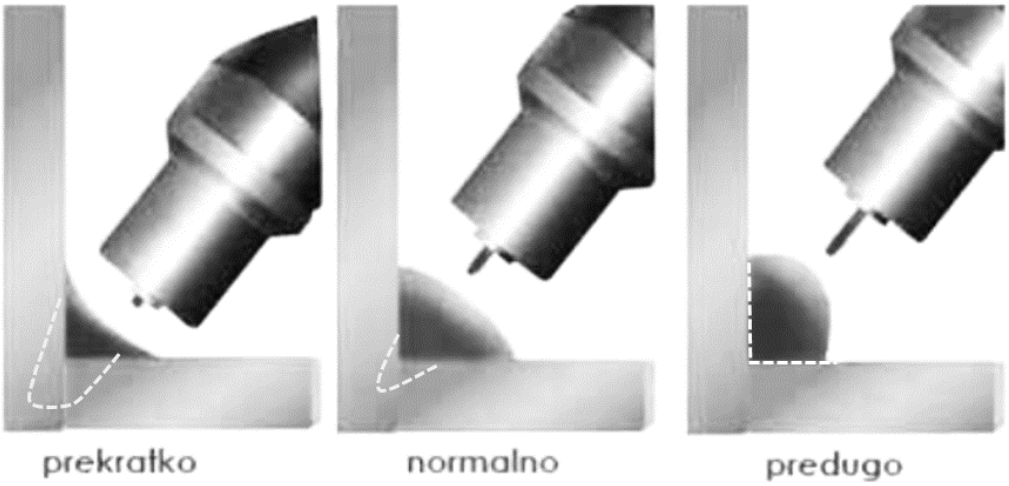
Pod brzinom zavarivanja se podrazumijeva relativna brzina pomicanja električnog luka u odnosu na radni komad. Povećanjem brzine zavarivanja smanjuju se profil (širina i visina) zavara, količina taline te penetracija u radni komad (Slika 7). Odabir brzine zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja i jakosti struje [2,14].



Slika 7. Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zavara [13]

2.3.4. Slobodni kraj žice

Pod slobodnim krajem žice podrazumijeva se dio žice od kraja kontaktne vodilice do početka električnog luka. Promjena duljine iste dovodi do promjene jakosti struje što dovodi do promjene penetracije, stabilnosti itd. (Slika 8). Povećanjem (produljenjem) slobodnog kraja žice povećava se i otpor što uzrokuje pad jačine struje, dok se smanjenjem slobodnog kraja žice smanjuje otpor i povećava jačina struje. Da bi se spriječila promjena jačina struje (i uz nju povezana penetracija u radni komad), potrebno je održavati slobodni kraj žice konstantnim [2,13,14].



Slika 8. Poprečni presjek zavara u ovisnosti o slobodnom kraju žice [13]

2.3.5. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi svojim sastavom i volumenskim protokom utječu na zavar. Većina metala i njihovih legura u rastaljenom stanju reagira s elementima iz okoliša i s njima tvori metalne okside. Ti oksidi onečišćuju talinu pri zavarivanju, što negativno utječe na mehanička svojstva te dovodi do pojave grešaka u zavarenom spoju [3]. Da bi se to spriječilo, koriste se zaštitni plinovi. Zaštitni plin, osim što štiti površinu zavara od okoliša, ima i ulogu ioniziranja zraka te na taj način direktno utječe na stabilnost luka kao i na dubinu penetracije [14]. Izbor zaštitnog plina ovisi o vrsti osnovnog materijala, načinu prijenosa materijala, dubini penetracije i dr., isto kao i određivanje volumenskog protoka plina [3].

2.3.6. Induktivitet

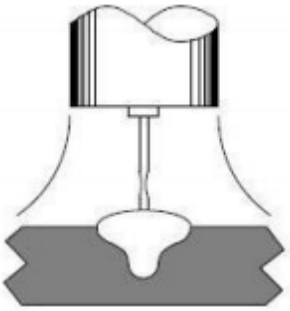
Induktivitet je parametar kojim opisujemo brzinu porasta jakosti struje unutar vremenskog perioda nakon ostvarivanja kratkog spoja. Moguće je namjestiti induktivitet na izvoru struje. Koristi se samo kod zavarivanja s načinom prijenosa materijala kratkim spojevima jer kod drugih načina prijenosa materijala nema utjecaja (zbog konstantnosti struje). Razlog zbog kojeg se koristi je fino podešavanje u svrhu efikasnijeg prijenosa materijala. Također o induktivitetu direktno ovisi i vizualni izgled zavara [3,20].

2.4. Načini prijenosa metala

U zavarivanju prijenos materijala podrazumijeva gibanje rastaljenog dodatnog materijala od vrha elektrode do radnog komada. Mijenjanjem i kombiniranjem parametara zavarivanja navedenih i objašnjenih u prošlom poglavlju moguće je mijenjati i način (metodu) prijenosa materijala (metala). 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 [20]. Pravilnim odabirom parametara i načina prijenosa materijala moguće je optimizirati postupak i dobiti željeno ponašanje električnog luka tijekom zavarivanja te konačni zavar potrebne kvalitete [3]. Iz tog razloga prijenos metala kod MAG zavarivanja ima veliku ulogu [16].

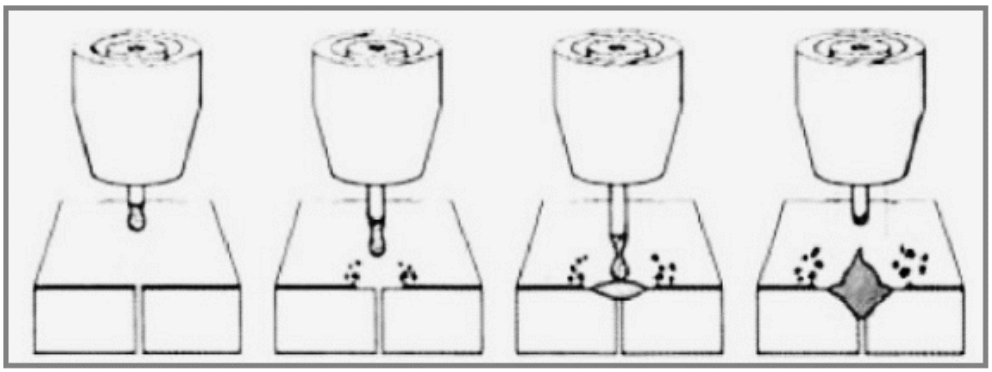
2.4.1. Prijenos metala kratkim spojevima (engl. Short Arc)

Prijenos metala kratkim spojevima (oznaka MAG - d) je vrsta prijenosa metala kod koje se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed djelovanja električnih kratkih spojeva koji se ponavljaju u ciklusima. Karakteristike ovog prijenosa metala su mali unos topline te činjenica da se sav prijenos dodatnog metala vrši pri fizičkom kontaktu elektrode i osnovnog materijala odnosno taline (Slika 9). Koristi se za tanje materijale, za korijenske prolaze, kod metala osjetljivih na unos topline te kod prisilnih položaja zavarivanja (npr. nadglavno zavarivanje većih debljina), a najveći utjecaj na uspješnost izvođenja imaju promjer elektrode i vrsta zaštitnog plina. Prijenos metala kratkim spojevima postiže se u području struje zavarivanja od 50 A do 170 A, napona od 13 V do 21 V. Pri stabilnim parametrima u sekundi se dogodi između 20 i 200 kratkih spojeva. Debljine žice koje se koriste pri zavarivanju kratkim spojevima kreću se između 0,6 mm i 1,2 mm [2,3,5]. Specifičnosti postupka su mali unos topline (brzo hlađenje i stvrdnjavanje taline), minimalne deformacije radnog komad uslijed malog unosa topline [20].



Slika 9. Shematski prikaz prijenosa materijala kratkim spojevima [17]

Period u kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se fazu kratkog spoja i fazu električnog luka (Slika 10). U prvoj fazi dolazi do odvajanja kapljice u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu s rastaljenim metalom, pri čemu raste jakost struje (faza kratkog spoja). To dovodi do povećanja magnetske sile koja stišće kapljicu taline, a javlja se na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja [3]. Nakon toga slijedi faza električnog luka tijekom koje se priprema nova kapljica za prijenos na radni komad tijekom sljedeće faze kratkog spoja.

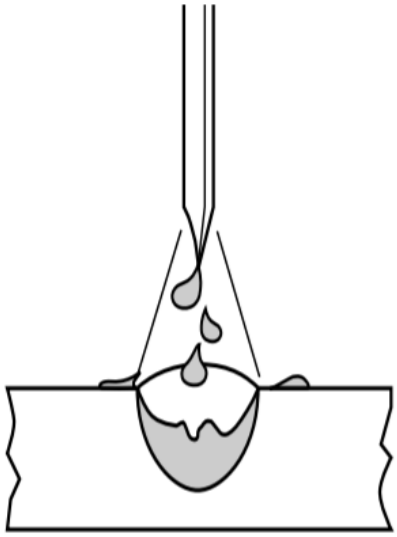


Slika 10. Shematski prikaz faza prijenosa materijala kratkim spojevima [2]

2.4.2. Prijenos metala prijelaznim lukom (engl. Mixed arc)

Prijelazni luk (oznaka MAG – g) je vrsta prijenosa metala kod koje se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed kombiniranog djelovanja kratkih spojeva i načina prijenosa metala štrcajućim lukom. Proces započinje stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrodne žice (i nekoliko puta veće od samog vrha elektrode) koja se uslijed djelovanja sila odvaja u električnom luku i pada u talinu bez kratkog spoja (Slika 11). Karakteristične vrijednosti

jakosti struje zavarivanja su od 170 A do 235 A, napona od 17 V do 22 V. Najčešće se koristi sa žicama debljine od 0,8 mm do 1,6 mm. Specifičnost postupka je veliko rasprskavanje (zbog čega postupak nije primjenjiv za prisilne položaje) i veliki unos topline. Zbog velikog unosa topline često dolazi do vidljivih deformacija radnog komada. S obzirom na nasumičnu pojavu kratkog spoja te općenitu nestabilnost ovog načina prijenosa metala ovaj postupak se u praksi u pravilu ne koristi osim iznimno (za izradu popunskih prolaza te za radne komade debljine 5 mm i više) [2,5,18,20].

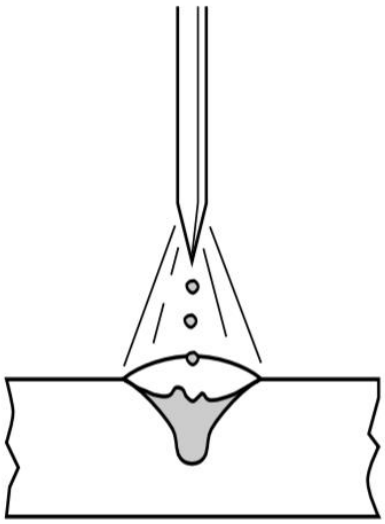


Slika 11. Shematski prikaz prijenosa materijala prijelaznim lukom [18]

2.4.3. Prijenos metala štrcajućim lukom (engl. Spray arc)

Karakteristika prijenosa metala štrcajućim lukom (oznaka MAG - g) je veliki unos topline koji tali kontinuirano dobavljanu žicu. Talina se u obliku mnogo malih kapljica slobodnim letom giba električnim lukom prema radnom komadu, a da pritom ne dolazi između kontakta elektrode i radnog komada (Slika 12). Za prijenos materijala štrcajućim lukom koristi se velika jačina struje od 200 A do 600 A te visok napon od 24 V do 40 V. Debljine žica koja se koriste za prijenos metala štrcajućim lukom se kreću od 1,2 mm do 2,4 mm. U jednoj sekundi broj kapljica taline naraste i na nekoliko stotina. Značajno povišen unos topline dovodi do izražaja deformacije radnog komada kao i veliku količinu tekuće taline koja se sporije hladi pa je podložnija negativnim utjecajima elemenata iz atmosfere. Zbog toga je preporučena debljina zavarivanja veća od 7 mm zbog rizika od protaljivanja radnoga komada i preporučene su veće brzine zavarivanja. Ovaj prijenos metala omogućuje veliku penetraciju,

korištenje velikih promjera žice (što rezultira smanjenjem rasprskavanja), veliki depozit dodatnog materijala, kao i olakšanu automatizaciju, ali nije primjenjiv za prisilne položaje. Najčešće se koristi za spajanje radnih komada debljine 7 mm i više [2,3,20].

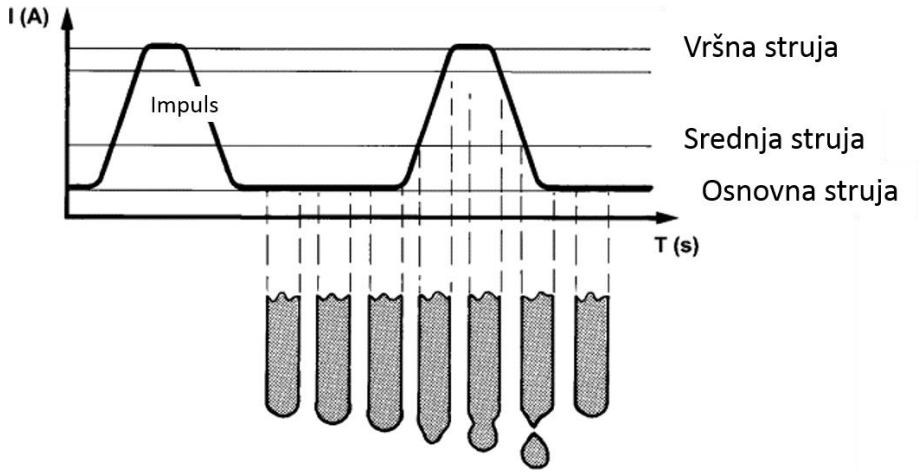


Slika 12. Shematski prikaz prijenosa materijala štrcajućim lukom [18]

2.4.4. Prijenos metala impulsnim lukom (engl. Pulsed arc)

Prijenos metala impulsnim lukom se može nazvati visoko-kontroliranom verzijom prijenosa metala štrcajućim lukom. Izumljen je kako bi se omogućilo zavarivanje koje ima pozitivne strane štrcajućeg luka - poput načina prijenosa metala sitnim kapljicama, ali uz manje struje zbog kontrole impulsa kojim se kapljica odvaja od žice. Izvor struje generira promjenjiv oblik struje zvan impuls. Jakost struje u jednom impulsu mijenja se od vršne vrijednosti (maksimalna vrijednost jakosti struje) do vrijednosti osnovne struje. U trenutku kada iznos struje dosegne vršnu vrijednost impulsne struje odvaja se jedna kapljica taline koja se slobodno giba duž električnog luka (Slika 13). Nakon odvajanja samo jedne kapljice vrijednost struje pada na osnovnu vrijednost koja osigurava stabilnost električnog luka. Specifičnost prijenosa metala impulsnim lukom je konstanta visina električnog luka uz minimalno rasprskavanje. Talina prelazi na radni komad u obliku sitnih kapljica koje kontinuirano i ujednačeno padaju na radni komad. Jedna kapljica je produkt jednog impulsa. Mogućnost reguliranja broja impulsa, promjera žice i brzine dodavanja iste omogućuje reguliranje količina taljevine, odnosno količine unesene topline. Zavarivanjem impulsnim

lukom moguće je zavarivati široki spektar debljina osnovnog materijala. Jakost vršne struje iznosi od 250 A do 650 A dok se vrijednosti osnovne struje kreću od 20 A do 50 A. Debljine žice koje se koriste su 0,8 mm do 2,4 mm. Zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala primjenjivo je u svim položajima i za sve materijale, a pogodno je i za metale osjetljive na količinu unesene topline. Koristi se za izradu popunskih i završnih prolaza, a pogodan je i za robotizaciju [2,3,20].



Slika 13. Shematski prikaz prijenosa materijala impulsnim lukom i impulsa [19]

2.5. Modificirani postupci MAG zavarivanja

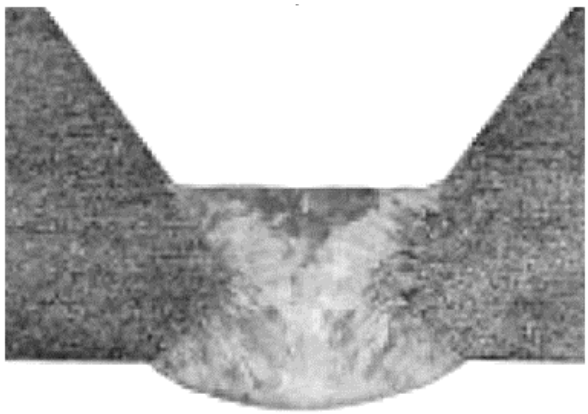
Novi koncepti na području MIG/MAG zavarivanja omogućuju svojevrsnu interakciju različitih opcija prijenosa materijala u području parametara i energijskog nivoa gotovo neprimjenjivog kod konvencionalnih postupaka i izvora struje za zavarivanje. Suvremeni postupci MAG zavarivanja se odlikuju modificiranim načinima prijenosa metala kojih je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući luk i/ili impulsna struja. Razvoj inverterskih izvora struje za zavarivanje, koji omogućuju modifikaciju načina prijenosa metala, omogućio je razvoj modificiranih MAG postupaka zavarivanja. Suvremeni modificirani postupci MAG zavarivanja razvijeni su s ciljem optimizacije postojećih postupaka u vidu olakšavanja zavarivanja tankih materijala, smanjenja unosa topline i deformacije, omogućavanjem lakšeg zavarivanja korijenskog prolaza, itd. [20]. Uz to se nastojalo povećati produktivnost te eliminirati nedostatke osnovnih procesa [2]. Modificirani postupci zavarivanja se dijele na dvije glavne skupine i to s obzirom na način prijenosa metala koji koriste:

2.5.1. Modificirani postupci koji koriste prijenos metala kratkim spojevima

Mnogi modificirani postupci koriste način prijenosa metala kratkim spojevima zbog prednosti istog. Mali unos topline, malo rasprskavanje, dobra kontrola postupka i sl. samo su neki od razloga zašto su mnoge tvrtke krenule sa svojim postupcima u smjeru kratkih spojeva. U ovom radu su nabrojani i kratko opisani osnovni postupci.

2.5.1.1. STT (Surface Tension Transfer®)

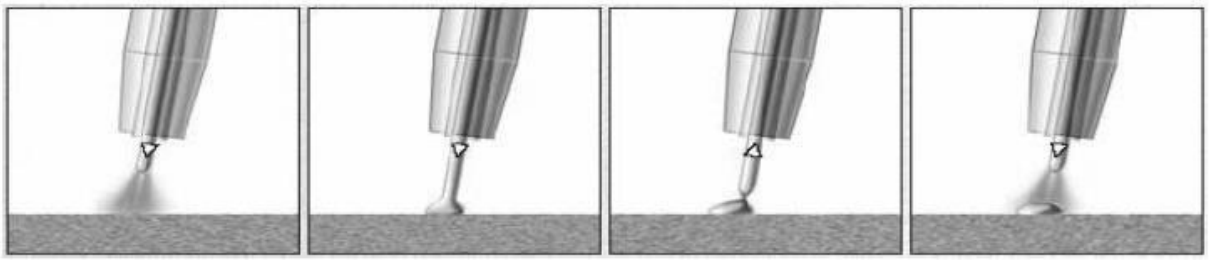
STT je modificirani MAG postupak zavarivanja koji za finu regulaciju odvajanja taljevine (u obliku kapljica) s vrha elektrode koristi mehanizam površinske napetosti. Maksimalni iznos jakosti struje je točno vremenski usklađen s trenutkom kada je za prijenos metala dovoljna samo površinska napetost te se na taj način izbjegava rasprskavanje kapljice metala i (nepotreban) daljnji unos topline. Najčešće se koristi za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu (Slika 14), i to najčešće cijevnih elemenata u prehrambenoj, procesnoj i automobilskoj industriji. [2]. Prednosti STT-a su manji unos energije, manje rasprskavanje i veća brzina u odnosu na konvencionalni postupak. Jedan od glavnih nedostataka je skuplji uređaj za zavarivanje.



Slika 14. Makroizbrusak korijenskog prolaza STT tehnologijom [2]

2.5.1.2. CMT (Cold Metal Transfer®)

CMT je modificirani MAG postupak zavarivanja kod kojeg se žica dodaje oscilatorno. Žica se giba s frekvencijom od 70 Hz „gore-dolje“ u odnosu na radni komad (Slika 15). Primicanje žice radnom komadu traje dok se ne ostvari kratki spoj, nakon čega žica mijenja smjer i odmiče se od radnog komada, čime se olakšava prijenos rastaljenog metala pomoću površinske napetosti taline. Nakon što se prekine kratki spoj, žica ponovno mijenja smjer i započinje novi ciklus. Prijenos metala kod CMT postupka zavarivanja odvija se uz vrlo malu struju zavarivanja, što rezultira smanjenjem unosa topline u odnosu na konvencionalni MAG postupak zavarivanja. Ovaj postupak najčešće se upotrebljava u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji za zavarivanje tankih limova te za zavarivanje čelika i aluminija. Glavne prednosti postupka se veća brzina zavarivanja te manji unos topline u odnosu na konvencionalne postupke [2].

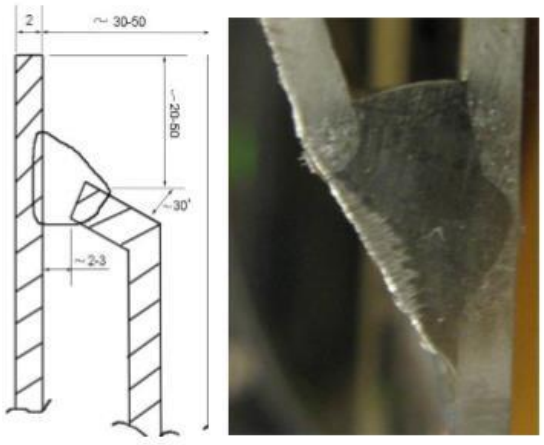


Slika 15. Shematski prikaz faza CMT postupka [2]

2.5.1.3. FastROOT®

FastROOT je modificirani MAG postupak zavarivanja kod kojeg se jakost struje zavarivanja i napona kontroliraju digitalno. Postupak se odvija na način da se nakon prvog stanja kratkog spoja u kojem dolazi do odvajanja kapljice “pinch” efektom, aktivira drugi sekundarni strujni impuls koji služi za zagrijavanje osnovnog materijala i zagrijavanje vrha dodatnog materijala pripremajući ih za novi ciklus. Nakon toga struja zavarivanja pada na minimalnu vrijednost koja omogućava stabilnost električnog luka i taline do sljedećeg kratkog spoja. Za ovakav način prijenosa metala koji rezultira minimalnim unosom topline uz smanjeno rasprskavanja potrebno je izrazito brzo i precizno upravljanje parametrima zavarivanja [2]. FastROOT postupak se primjenjuje za zavarivanje

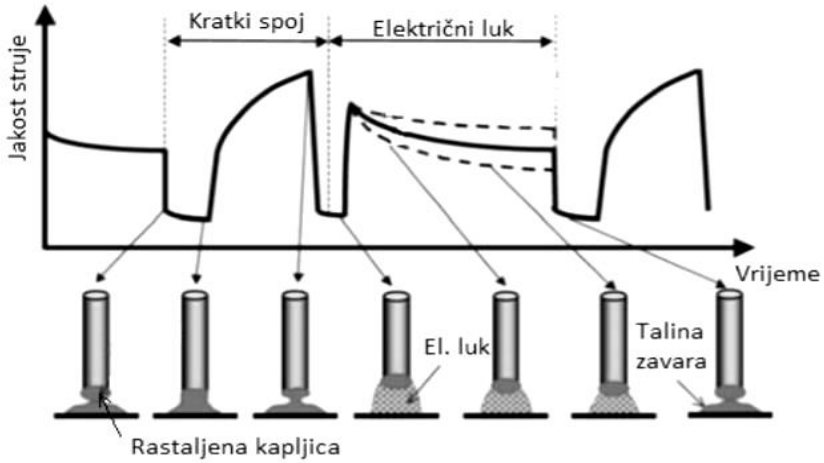
korijenskog prolaza jer je regulacijom parametara sekundarnog strujnog impulsa moguće precizno utjecati na oblik provara. Specifičnost je i mogućnost zavarivanja tankih komada prilikom većih razmaka (Slika 16) [20].



Slika 16. Zavareni spoj čelika debljine 2 mm uz razmak od ~2-3 mm [20]

2.5.1.4. CBT (Controlled bridge transfer®)

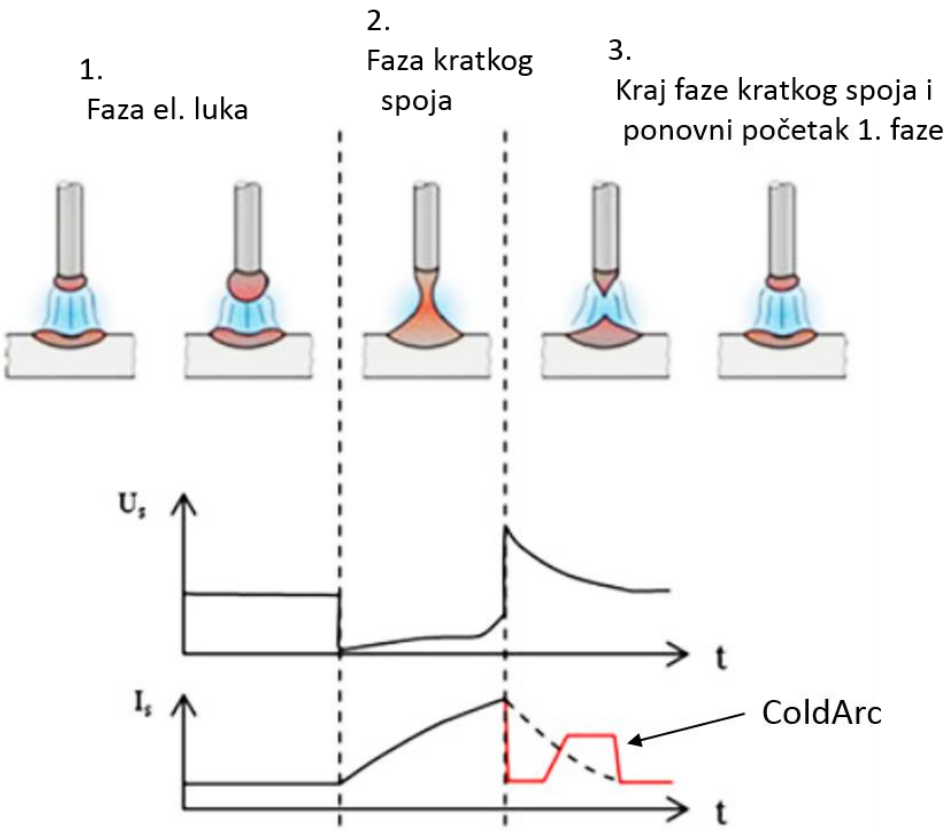
CBT je modificirani MAG postupak zavarivanja koji koristi prednosti impulsnog i klasičnog prijenosa metala kratkim spojevima (Slika 17). Postupak je temeljen na preciznom podešavanju jakosti struje u odnosu na napon električnog luka, što omogućava stabilan električni luk i upravljanje prijenosom metala tijekom kratkog spoja. Neposredno prije uspostave električnog luka smanjuje se jakost struje te se rastaljena kapljica prenosi u talinu zavara samo pomoću sila površinske napetosti čime se izbjegava rasprskavanje. Smanjen unos topline i visoko kontrolirani proces prijenosa metala omogućava zavarivanje korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje limova čija je debljina manja od promjera dodatnog materijala [2].



Slika 17. Shematski prikaz principa rada CBT postupka [2]

2.5.1.5. ColdArc®

ColdArc je modificirani MAG postupak zavarivanja koji koristi nove vrste visokodinamičkih inverterskih izvora struje u kombinaciji s digitalnom kontrolom jačine struje. Prve dvije faze su slične konvencionalnom prijenosu metala kratkim spojevima. Naglim smanjenjem napona i povećanjem struje, a zatim ponovnim smanjenjem struje se smanjuje unos topline i rasprskavanje taline te se omogućuje „fino“ odvajanje kapljice taline (Slika 18) [21].



Slika 18. Shematski prikaz principa rada ColdArc postupka [2]

2.5.2. Modificirani postupci koji koriste prijenos metala štrcajućim lukom

Sve veći zahtjevi u pogledu kvalitete zavara, penetracije i veće produktivnosti uz što veći depozit dodatnog materijala doveli su do razvoja modificiranih načina prijenosa metala štrcajućim lukom. Najpoznatiji su:

2.5.2.1. RMT (Rapid MAG Technology®)

RMT je modificirani MAG postupak kod kojeg se prijenos dodatnog materijala odvija u mnoštvu jako sitnih kapljica frekvencijom od 2 Hz do 3 kHz. Jezgra električnog luka dodatno se sužava te se smanjuju napon i visina električnog luka u odnosu na konvencionalni način prijenosa metala štrcajućim lukom. Rezultat je intenzivnija penetracija i koncentriraniji električni luk. RMT postupak je pogodan za zavarivanje debljih materijala, a koristi se i za kutne zavare gdje bitno utječe na smanjenje broja prolaza [2].

2.5.2.2. ForceArc®

ForceArc je modificirani MAG postupak kod kojeg se prijenos dodatnog materijala odvija na način da se mnoštvo malih i srednje velikih kapljica velikom brzinom giba kroz električni luk. Zbog povremenog dodirivanja (povezivanja) kapljica dolazi do pojave kratkih spojeva čime se ostvaruje direktan spoj s talinom i dolazi do rasprskavanja. Rasprskavanje se reducira pomoću digitalne kontrole i korekcije parametara. Specifičnost u odnosu na konvencionalni postupak je kraća duljina električnog luka. Najčešće se primjenjuje u izgradnji konstrukcija, kontejnera i vozila, u energetici, brodogradnji te u izradi *offshore* konstrukcija [2].

2.6. Greške kod MAG zavarivanja

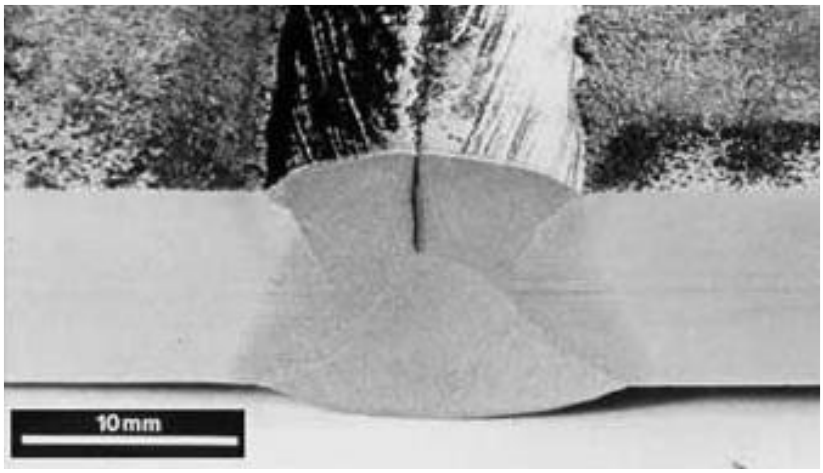
Nepravilnosti koje se javljaju u zavarenom spoju mogu se podijeliti na konstrukcijske nepravilnosti, nepravilnosti povezane s procesom zavarivanja i metalurške nepravilnosti. U sljedećem tekstu navedene su najučestalije.

2.6.1. Pukotine

Pukotine se smatraju najopasnijim pogreškama u zavarenom spoju i u pravilu nisu dopuštene. One smanjuju nosivi presjek zavarenog spoja, a time i čvrstoću spoja. Spadaju među pogreške koje se najviše provjeravaju, prvenstveno zbog toga što se iz iskustva zna da je upravo zbog njihove naknadne pojave, zbog pogrešaka u fazama prije ili nakon nastanka zavarenog spoja, mnogo zavarenih konstrukcija doživjelo katastrofalni lom [9].

2.6.1.1. Tople pukotine

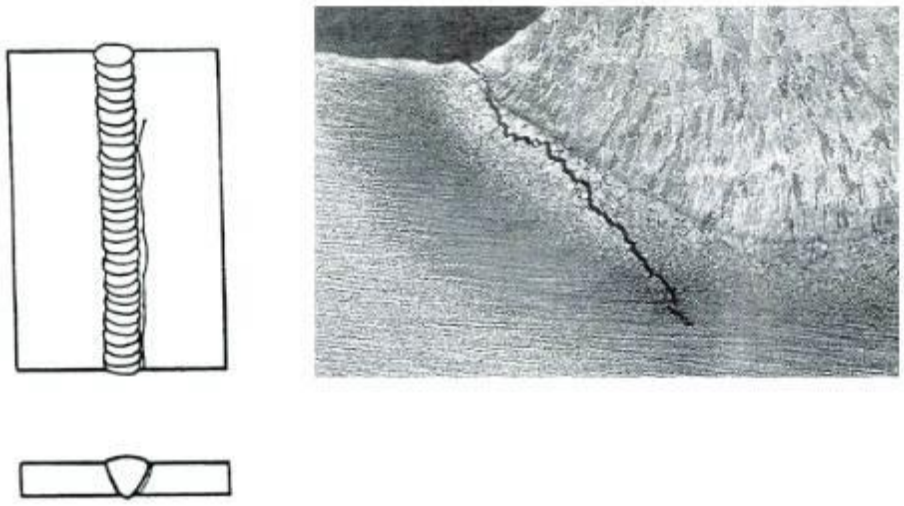
Tople pukotine (Slika 19) se javljaju na temperaturama iznad 300 °C, a najčešće u temperaturnom području od 900 °C do 1200 °C. Prostiru se po granicama zrna materijala, najčešće po dužini u sredini zavara, ali moguće su i u zoni utjecaja topline (ZUT-u). Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je nemogućnost metala zavara da izdrži (toplinska) naprezanja koja nastaju skupljanjem prilikom skrućivanja s visokim temperatura [9,11].



Slika 19. Topla pukotina na licu zavara [9]

2.6.1.2. Hladne pukotine

Hladne pukotine (Slika 20) se javljaju nakon zavarivanja na temperaturi manjoj od 300 °C. Mogu se pojaviti nakon nekoliko sati, a u nekim slučajevima i nekoliko dana nakon zavarivanja. Iz tog razloga su hladne pukotine izrazito opasne [9,11]. Javljaju se zbog nakupljanja vodika u mikrošupljinama i porasta tlaka zbog nakupljenog vodika. Mehanizam nastanka hladnih pukotina vrlo je složen.



Slika 20. Hladna pukotina u ZUT-u kod sučeljenog spoja [9]

2.6.2. Šupljine (poroznosti)

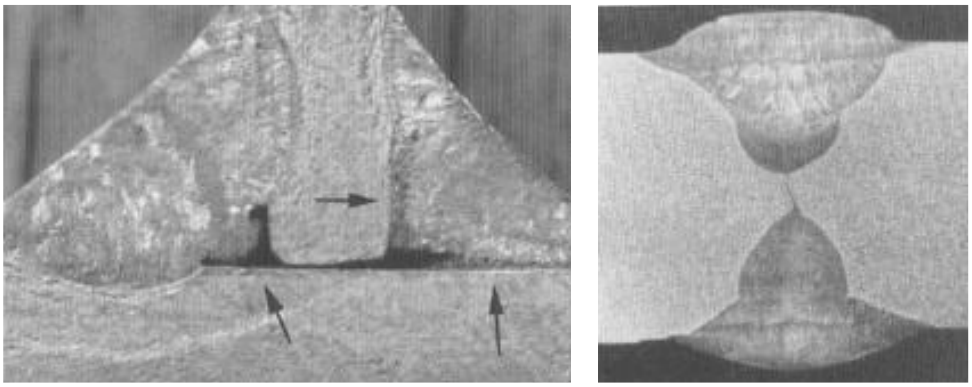
Šupljine su uzrokovane zarobljenim česticama plina u metalu zavara. Najčešće su to dušik i vodik koji imaju veću topivost u rastaljenom nego u čvrstom stanju materijala pa se tijekom skrućivanja izlučuju iz metala zavara u obliku mjehurića. Ako je brzina izlučivanja plinova manja od brzine skrućivanja metala, neki od tih mjehurića ostaju zarobljeni u metalu zavara. Utjecaj na čvrstoću zavarenog spoja ovisi o broju, veličini, obliku i mjestu poroznosti te vrsti i zahtjevima na kvalitetu konstrukcije. Pojedinačne pore (npr. u sučeljenom spoju) nemaju veći utjecaj na čvrstoću zavara [9,15].

2.6.3. Čvrsti uključci

Čvrsti uključci, kao strano tijelo u metalu zavara, mogu biti nemetali kao troska i prašak, a mogu biti i metalni poput uključaka volframa. Nemetalni uključci, kao i uključci stranog metala, smanjuju čvrstoću zavarenog spoja zbog nehomogenosti. Nehomogena mjesta u zavaru su koncentratori naprezanja. Utjecaj na čvrstoću zavarenog spoja ovisi o količini, obliku i veličini uključaka [9].

2.6.4. Naljepljivanje i nedovoljni provar

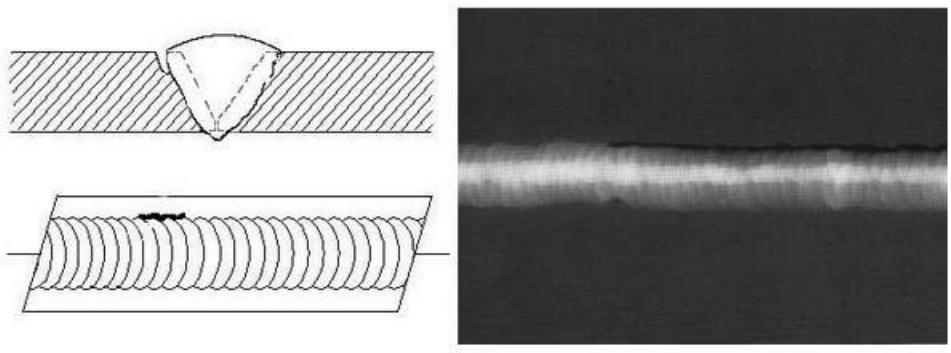
Naljepljivanje (lijevo na Slici 21) je pogreška izostanka čvrste strukturne veze u zavarenom spoju ili navaru između osnovnog materijala i materijala zavara [9]. Problem predstavlja činjenica da ju je i vrlo teško otkriti [15]. Nedovoljni provar (desno na Slici 21) je nedovoljna penetracija po cijelom presjeku zavarenog spoja, odnosno neprovar korijena zavara. Obje ove greške su vrlo česte upravo kod MAG postupka. Obje pogreške smanjuju čvrstoću zavarenog spoja, a mogu biti polazna točka loma u eksploatacijskim uvjetima. Posebno su opasne na dinamički opterećenim konstrukcijama te u pravilu nisu dozvoljene [9].



Slika 21. Naljepljivanje kod kutnog zavara (lijevo) i neprovaren korijen (desno) [9]

2.6.5. Ugorine uz zavar

Ugorine su oštri zarezi uz zavar na prijelazu između metala zavara i osnovnog materijala kod sučeljenog i kutnog spoja (Slika 22). Ugorine mogu biti mjestimične ili po cijeloj dužini spoja. Nastaju nepravilnom tehnikom rada i nepravilnim parametrima zavarivanja. Najčešće do ugorina dolazi kad je površina uz zavar oksidirana. Utjecaj ugorina ovisi o njihovoj duljini i dubini, kao i o pravcu djelovanja i vrsti opterećenja konstrukcije. Kod dinamičkog opterećenja konstrukcije oštri urezi uz zavar su vrlo štetni, djeluju kao inicijatori pukotina. Kod statički opterećenih konstrukcija ugorine nisu tako opasne, pa se mogu i dopustiti [9,15].



Slika 22. Ugorina između materijala zavara i dodatnog materijala [9]

Osim ranije navedenih, u zavarenim spojevima se pojavljuju i druge greške koje su u pravilu uzrokovane nestručnom pripremom i nestručnim izvođenjem zavarivanja.

2.7. Prednosti MAG postupka zavarivanja [5,9,14,]:

- postupak je primjenjiv za zavarivanje gotovo svih materijala
- regulacija velikog broja parametara zavarivanja
- više načina prijenosa materijala (mogućnost izbora)
- mogućnost zavarivanja u gotovo svim položajima
- mogućnost zavarivanja velikog raspona debljina
- veliki izbor dodatnih materijala
- konstantno dovođenje dodatnog materijala (nema potrebe za prekidanjem zavara)
- mogućnost korištenja različitih plinskih mješavina
- dobra penetracija
- mogućnost ostvarivanja velikog depozita materijala
- veće brzine zavarivanja u odnosu na REL i TIG
- mogućnost zavarivanja u radioni i na terenu
- postupak je pogodan za automatizaciju
- zbog odsutnosti troske potrebno minimalno čišćenje zavara nakon zavarivanja
- potrebna manja vještina zavarivača nego kod npr. TIG-a
- velika proizvodnost i učinkovitost
- postupak je pogodan za automatizaciju
- postupak je pogodan za pojedinačnu i masovnu proizvodnju.

2.8. Nedostatci MAG postupka zavarivanja [5,9,14,]:

- skuplja, glomaznija i kompleksnija oprema u odnosu na REL
- teža primjena na teško dostupnim mjestima zbog veličine pištolja
- na otvorenom vjetar može otežavati zaštitu plinskom atmosferom
- u zatvorenom je potrebna ventilacija zbog otpuštanja štetnih plinova
- relativno visoka emisija toplinskog zračenja
- mogući problemi s dovođenjem žice
- nezgrapno rukovanje bocama sa zaštitnim plinom.

2.9. Primjena MAG postupka

MAG postupak zavarivanja ima veliku primjenu u brodogradnji, autoindustriji, kotlogradnji, prehrambenoj industriji, izradi rešetkastih konstrukcija poput dizalica, krovišta, raznih spremnika, reaktora, zavarivanju tračnih vozila, cijevi itd. Primjenjuje se kod poluautomatskog, automatskog ili robotiziranog zavarivanja. Uspješna je primjena i kod zavarivanja limova u položenom ili prisilnom položaju [9].

Robotizacijom postupka MAG zavarivanja dobiva se na produktivnosti i podiže se kvaliteta zavara. Prije same robotizacije zavarivanja potrebno je provesti analizu parametara, kao što su gabariti predmeta zavarivanja te minimizirati gabarite zavarivačke robotske stanice. Robotsku stanicu čine, uz samog robota za zavarivanje, još i zavarivački izvor s pripadajućom zavarivačkom opremom, upravljačka ploča, pozicioneri te ostala sigurnosna oprema [9].

Sve veći zahtjevi tržišta (povećanje kvalitete proizvoda, sniženje troškova, skraćenje vremena izrade, personalizirana proizvodnja, izrada komponenata složene geometrije i sl.) dovode do razvoja i sve češće primjene postupaka aditivne proizvodnje. Glavna karakteristika postupaka aditivne proizvodnje je dodavanje materijala, najčešće sloj po sloj, do izrade komponente blizu ili do konačne dimenzije. Takav način omogućuje izradu komponenti vrlo složene geometrije koju bi klasičnim postupcima izrade bilo vrlo teško ili nemoguće izraditi. Posebno se ističe aditivna proizvodnja metala koja se sve više primjenjuje i razvija jer je sposobna odgovoriti visokim zahtjevima tržišta [3].

WAAM (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing*) je aditivni postupak proizvodnje žicom i električnim lukom. Oprema koja se koristi kod WAAM sustava za zavarivanja je izvor struje, pištolj za zavarivanje, robot te kontrolna jedinica. Proces proizvodnje se provodi nanošenjem dodatnog materijala na osnovnu ploču sloj po sloj po unaprijed definiranoj putanji (pištolja). Kapljice rastaljenog dodatnog materijala se talože na prethodni sloj, a jednim prolazom se dobiva jedan sloj (Slika 23). U svakom prolazu se mijenja visina pištolja u odnosu na osnovnu ploču [3]. MAG postupak je često korištenih u aditivnoj proizvodnji metala upravo zbog svojih prednosti kao što su velik raspon parametara, relativno jednostavno generiranje putanje glave pištolja koji je

na robotu, mogućnosti robotizacije i automatizacije, kao i ponovljivosti jednom robotiziranog postupka.



Slika 23. Brodski propeler izrađen WAAM tehnologijom [22]

3. UNOS TOPLINE PRILIKOM ZAVARIVANJA

U području zavarivanja unos topline predstavlja količinu energije koja se unosi u zavar. Unesena toplina je važan parametar koji značajno utječe na konačni zavar. Brzina hlađenja zavara je obrnuto proporcionalna količini unesene topline. Što je veća količina unesene toplina prilikom zavarivanja, to je veća količina rastaljenog osnovnog i dodatnog materijala [23].

Postoje mnogi načini računanja unesene energije odnosno topline u zavar. Najčešći pristup je preko jačine struje, napona i brzine. U Europi je izračun unesene topline definiran normom HRN EN 1011-1.2009. Po toj normi proračun unesen topline se provodi po jednadžbi:

$$Q = \frac{I*U}{v} * \eta \text{ , J/mm} \quad (1)$$

Gdje je:

Q – toplina unesena električnim lukom, J/mm

I – jakost struje zavarivanja, A

U – napon električnog luka, V

v – brzina zavarivanja, mm/s

η – stupanj iskoristivosti električnog luka prema HRN EN 1011-1.2009.

Iznos faktora korisnosti μ ovisi o vrsti postupka po normi HRN EN 1011-1.2009. prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Iznosi faktora korisnosti

Postupak zavarivanja:	Faktor korisnosti μ
REL	0,8
Plazma zavarivanje	0,6
MIG/MAG	0,8
TIG	0,6

4. DINAMIČKA KARAKTERISTIKA

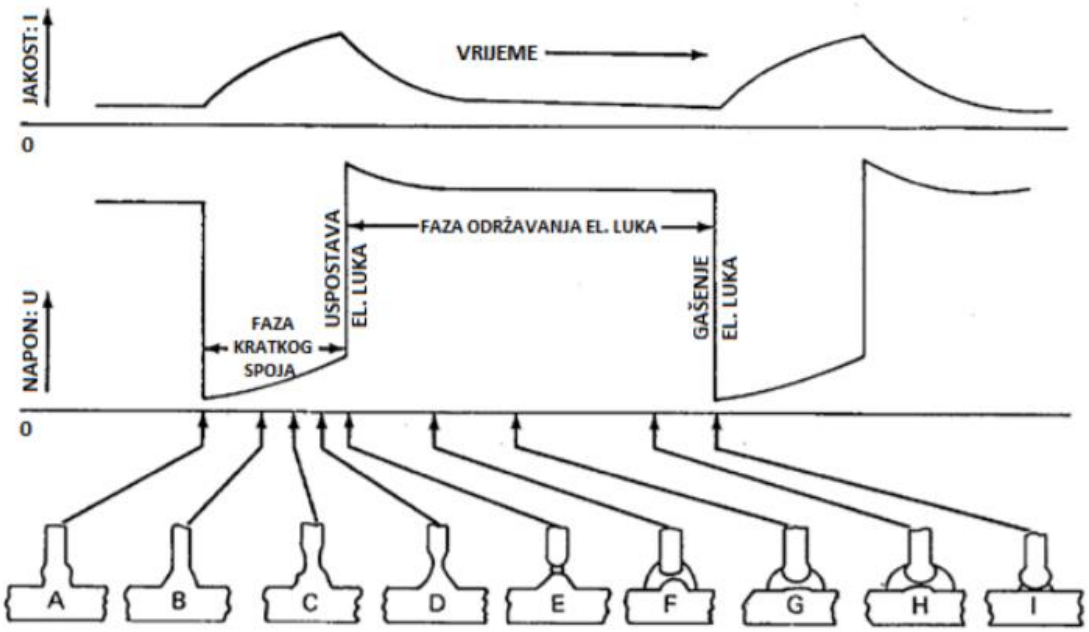
Dinamička karakteristika (engl. *waveform characteristic*) je karakteristika mjerena osciloskopom pod konstantnim opterećenjem izvora struje za zavarivanje u svrhu detaljnog promatranja ponašanja električnog luka – promjene struje i napona tijekom formiranja i odvajanja rastaljene kapljice metala u jako kratkom vremenskom periodu [20]. Jednostavnije rečeno, dinamička karakteristika predstavlja ponašanje napona i jakosti struje tijekom nekog perioda mjerenja. U području zavarivanja ne postoji jedinstveni način opisa dinamičke karakteristike nekog uređaja za zavarivanje, stoga ju je potrebno snimati tijekom samog postupka zavarivanja [24]. Dinamičke karakteristike se mogu jednostavno grafički prikazati u obliku dijagrama te ukazati na prednosti i nedostatke određene karakteristike, pa čak i cijelog procesa.

Mjerenje dinamičke karakteristike se generalno povezuje s MIG/MAG postupkom zavarivanja, gdje se ovisno o jačini i naponu struje mogu dobiti različiti prijenosi rastaljenog metala u električnom luku. Dinamička karakteristika se drastično mijenja ovisno o načinu prijenosa metala [20]. Ovisno o postupku zavarivanja, registriraju se promjene napona i jakosti struje zavarivanja do 10 kHz ili više, pri čemu se koriste različiti sustavi za mjerenje, registriranje i obradu glavnih parametara zavarivanja. Dinamička karakteristika uređaja za zavarivanje određuje se mjerenjem veoma kratkih (0,001 s) prijelaznih varijacija u naponu i jakosti struje koje se pojavljuju u električnom luku [24].

Dinamičku karakteristiku moguće je izraziti i preko matematičkih izraza do kojih su znanstvenici došli analitičkim metodama. Međutim, analitičke metode često imaju ograničenja koja nije moguće izbjeći, a uz to su i vrlo kompleksne pa se češće koriste eksperimentalne metode temeljene na mjerenju i snimanju promjena jakosti struje i napona. Instrument kojim se može snimiti dinamička karakteristika nekog drugog uređaja je osciloskop. Osciloskopom je moguće mjeriti struju, napon i otpor, a osnovna namjena mu je grafičko prikazivanje promjena izmjerenih naponskih signala u nekom vremenskom periodu [24].

4.1. Dinamička karakteristika prijenosa metala kratkim spojevima

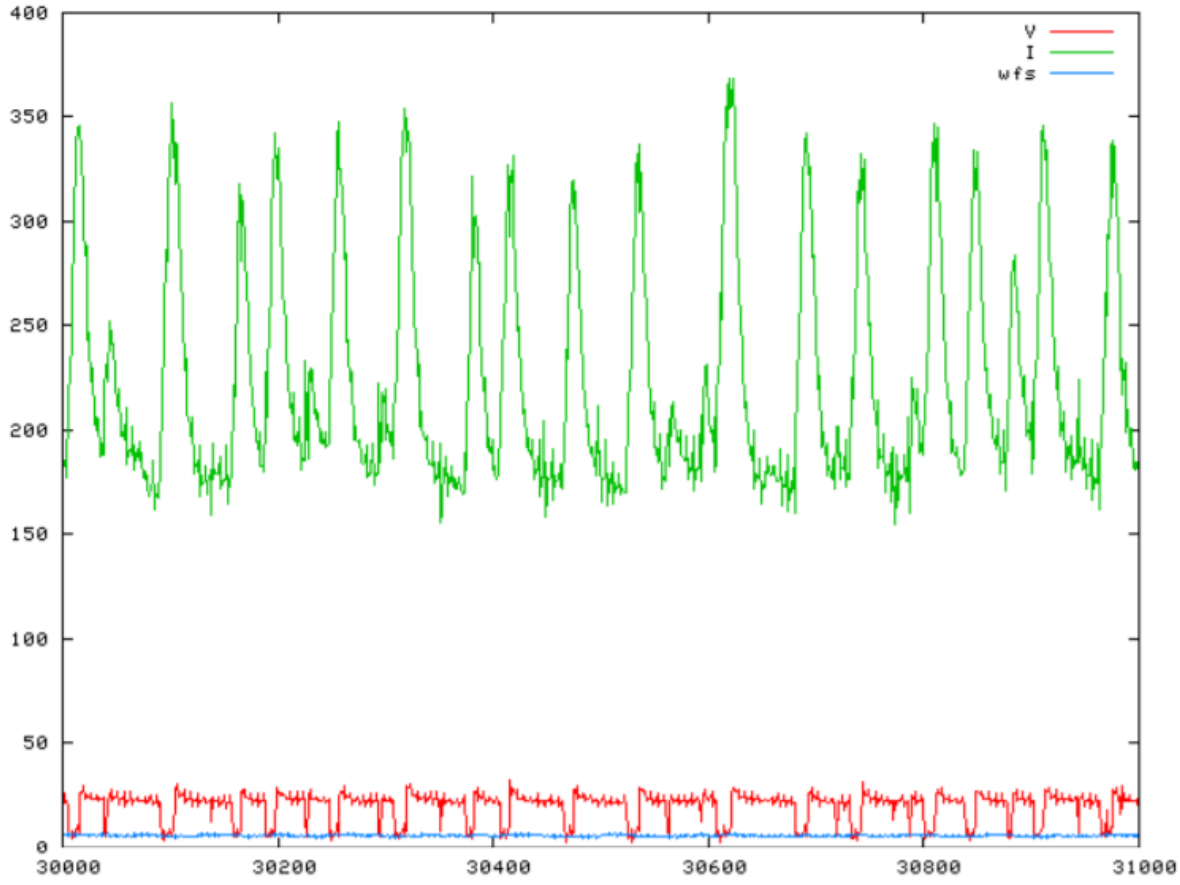
Na Slici 24 je prikazan shematski prikaz idealne dinamičke karakteristike prijenosa metala kratkim spojevima, dok je na Slici 25 prikazan realan prikaz izmjerene dinamičke karakteristike tijekom prijenosa metala kratkim spojevima.



Slika 24. Shematski prikaz faza prijenosa metala kratkim spojevima [20]

Vidljivo je da je u trenutku kada dolazi do povećanja struje napon gotovo u nuli te je u tom trenutku vršak elektrode u kratkom spoju s radnim komadom (faze A-D). Povećanje jakosti struje tijekom kratkog spoja pojačava elektromagnetno polje koje stvara efekt uklještenja (engl. *pinch effect*), na mjestu gdje je formirana kapljica prešla iz kruto u tekuće stanje (na radnom komadu) ali se samostalno nije odvojila od žice dodatnog materijala. Nakon odvajanja kapljice dodatnog materijala (kapljica ostane „zalijepljena“ za radni komad) električni luk se ponovno uspostavlja pomoću naglog izboja napona te smanjivanjem jakosti električne struje (faza E i F). U tim trenutcima se javlja ključan problem naglog prskanja kapljice metala jer se teži uspostavi električnog luka te zagrijavanju vrška žice kako bi se ostvarila sljedeća sekvenca prijenosa metala. Promjenom induktiviteta te delikatnim modifikacijama dinamičke karakteristike može se prskanje u određenoj mjeri smanjiti ili

gotovo eliminirati. Generirana toplina od električnog luka formira novu rastaljenu kapljicu koja mora biti dovoljno velika, ali takva da samostalno ne padne i „sudari“ s talinom (do faze H). Naglim smanjenjem napona struje se smanjuje visina električnog luka (faza I), što uz dovođenje žice uzrokuje dodirivanje vrška žice sa talinom i kontroliranog odvajanja kapljice metala. Pravilan oblik amplitude i duljine perioda jedne i druge krivulje ukazuje na miran i stabilan postupak.

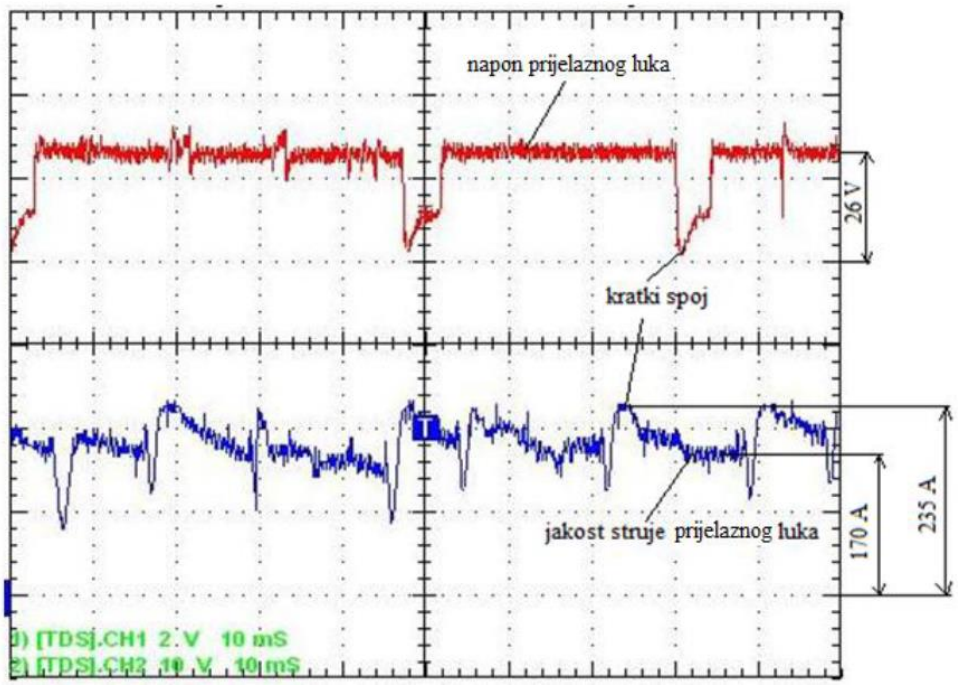


Slika 25. Oscilogram prijenosa metala kratkim spojevima (zelena krivulja jakost struje, crvena krivulja napon) [20]

4.2. Dinamička karakteristika prijenosa metala prijelaznim lukom

Na Slici 26 je prikazan izgled dinamičke karakteristike prijenosa metala prijelaznim lukom. Iz oscilograma je vidljivo da se javlja kombinacija prijenosa metala kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Zavarivanje pomoću prijelaznog električnog luka je obilježeno mješovito stabilnim radom u kratkom spoju te nestabilnim radom štrcajućim lukom u kojem se kapljice

nepravilno formiraju te prilikom dodira sa rastaljenom talinom često nasilno štrcaju. Ravni dijelovi krivulje napona su period prijenosa metala štrcajućim lukom, dok pojava pada napona prema nuli ukazuje da ipak, povremeno i nasumično, dolazi do pojave kratkih spojeva. Prilikom zavarivanja uz niske vrijednosti napona električni luk je vrlo kratak te se veći dio žice elektrootporno zagrijava i sudara s radnim komadom, a zbog visokog unosa topline kapljice se vrlo intenzivno rasprskavaju. Zavarivanje provedeno uz više vrijednosti napona struje manifestira visoki električni luk koji ne zagrijava radni komad i kraj žice dovoljno, čime se događa naljepljivanje ili nedovoljno protaljivanje te nagomilavanje zavara. Nepravilan i ne-periodički izgled krivulja struje i napona ukazuje na velika rasprskavanja i nestabilnost procesa, zbog čega se isti rijetko susreće u praksi, iako - ako se unatoč ograničenjima primijeni odgovarajući skup parametara u kombinaciji s vještinom zavarivača- ovaj proces može biti industrijski prikladan [20].

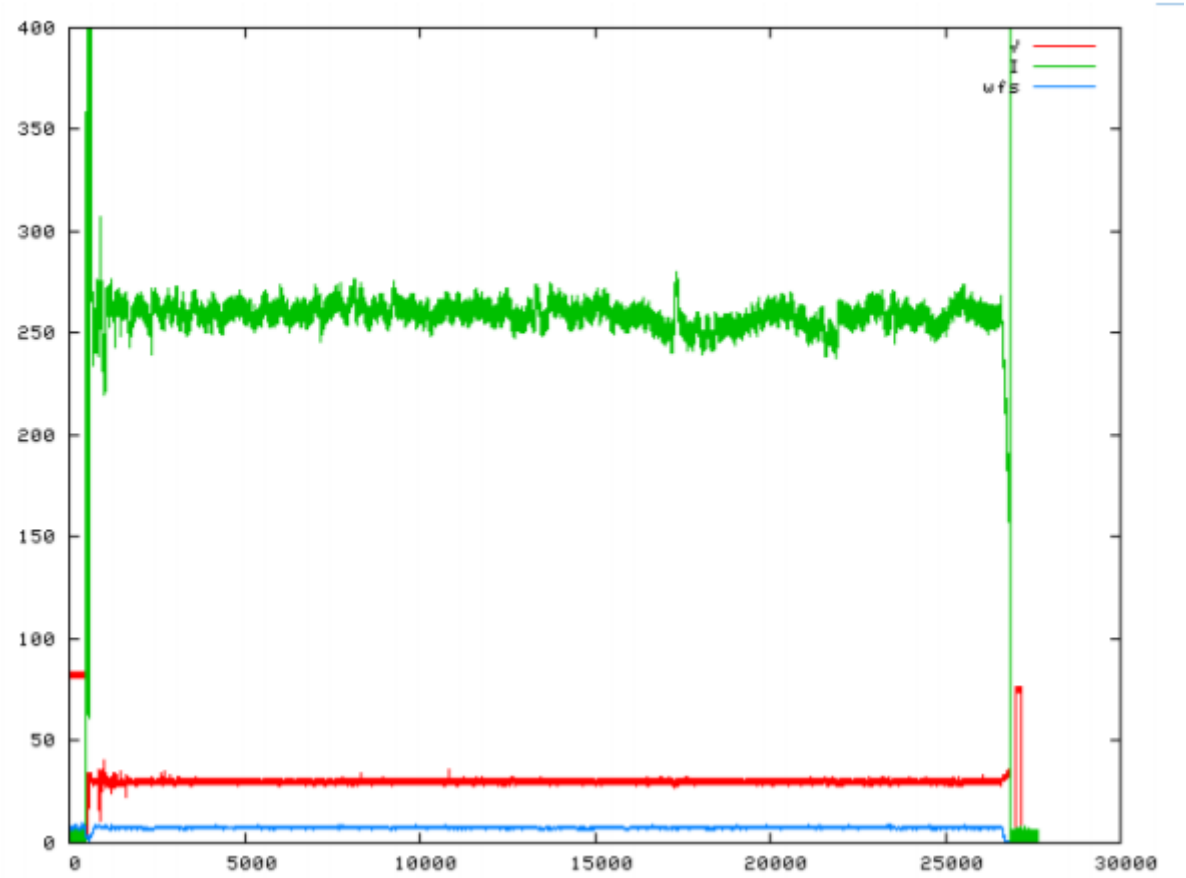


Slika 26. Oscilogram prijenosa metala prijelaznim lukom [24]

4.3. Dinamička karakteristika prijenosa metala štrcajućim lukom

Na Slici 27 je prikazan izgled dinamičke karakteristike prijenosa metala štrcajućim lukom. Povećanje vrijednosti napona i jakosti struje dovodi do stabilnijeg prijelaza metala u obliku mlaza sitnih kapljica koji se odlikuje visokom stabilnošću, velikim unosom topline i velikim

količinama depozita. Iz oscilograma je vidljivo da se zbog uspostave električnog luka visoke vrijednosti napona i struje javlja visoki električni luk, što omogućava da se kratki spojevi u potpunosti eliminiraju te da nema značajnijih skokova u iznosu struje i napona (osim u početku prilikom paljenja električnog luka), što rezultira stabilnim procesom [20].

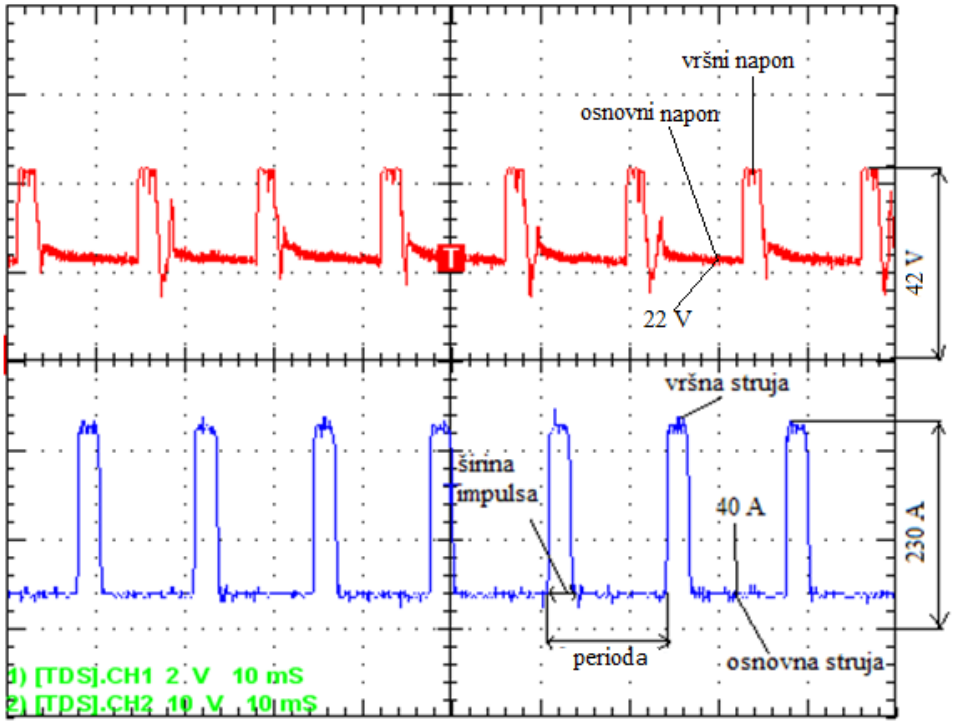


Slika 27. Oscilogram prijenosa metala štrcajućim lukom [20]

4.4. Dinamička karakteristika prijenosa metala impulsnim lukom

Na Slici 28 je prikazan izgled dinamičke karakteristike tijekom prijenosa metala impulsnim lukom. Iz oscilograma je vidljivo da se radi o visoko kontroliranom, izrazito stabilnom procesu prijenosa metala. Svaki impuls odgovara jednoj otpuštenoj kapljici taline i jednakog je trajanja, jednake osnovne i vršne struje kao i napona. Izvor struje proizvodi dvije razine jakosti struje čije se uzlazne i silazne karakteristike modificiraju prema tvorničkom programu ili prema odabiru korisnika. Niža (početna) vrijednost struje služi za održavanje električnog luka tijekom koje se kapljica odvaja, dok viša (vršna) vrijednost struje koje je značajno viša

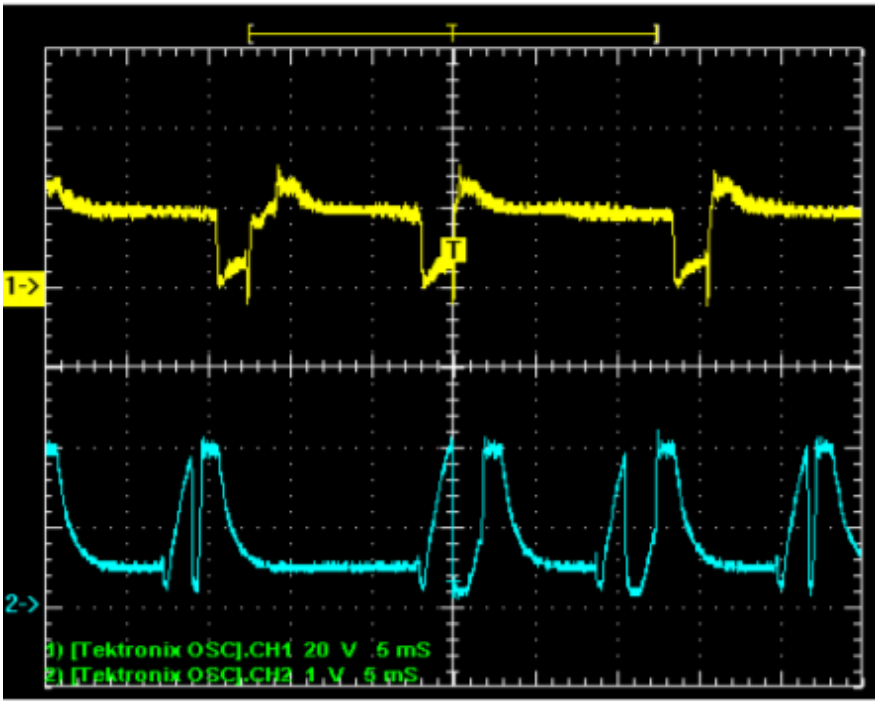
od zapravo potrebne služi da bi se ostvario štrcajući električni luk. Vidljiv je trenutak kad se struja povećava do vršne tj. trenutak u kojem dolazi do „otpuštanja“ kapljice prema radnom komadu. Odmah nakon toga slijedi nagli pad struje koji osigurava nastavak stabilnost procesa. Slijedi faza konstantne struje tijekom koje se tali sljedeća kapljica, koja se kao i prethodna nakon porasta struje, na vrijednosti vršne struje otpušta te se potom proces nastavlja ispočetka [20].



Slika 28. Oscilogram prijenosa metala impulsnim lukom [24]

4.5. Dinamička karakteristika STT postupka

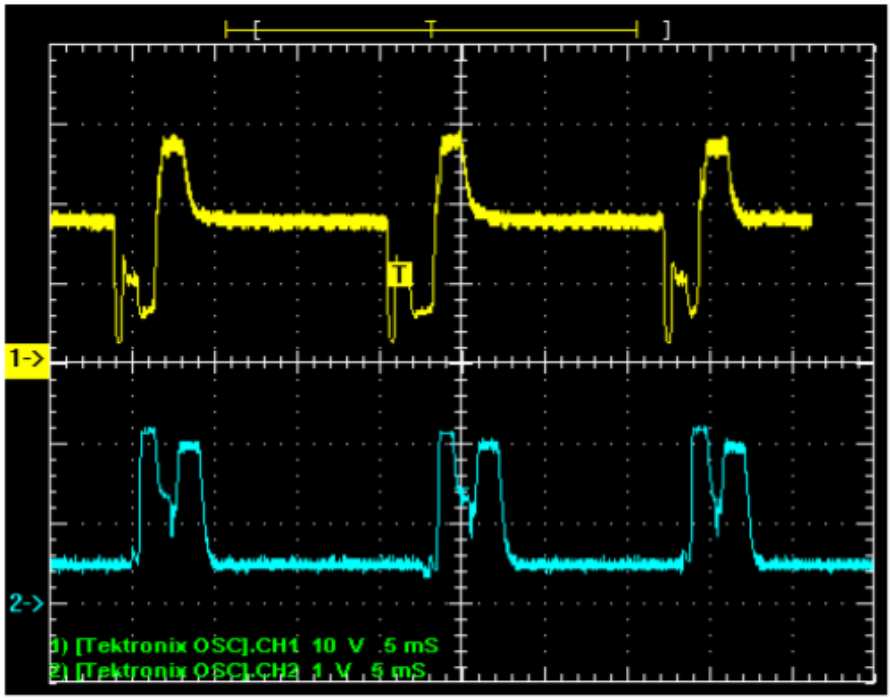
Na Slici 29 prikazana je dinamička karakteristika STT postupka. Tijekom STT postupka porast struje u kratkom spoju se zaustavlja kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala samo uz djelovanje površinske napetosti. Upravo ta kontrola sprječava daljnji porast struje koji uzrokuje rasprskavanje 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 [20].



Slika 29. Dinamička katakteristika *1-u=f(t); 2-i=f(t)* STT postupka [20]

4.6. Dinamička karakteristika FastRoot® postupka

Na Slici 30 prikazana je dinamička karakteristika FastRoot postupka. Tijekom FastRoot postupka se 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 rasprskavanja [20].



Slika 30. Dinamička karakteristika *1-u=f(t); 2-i=f(t)* STT postupka [20]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio ovog završnog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

U eksperimentalnom radu je izmjereno ukupno 6 dinamičkih karakteristika. Provedeno je mjerenje za prijenos metala kratkim spojevima, impulsnim lukom i ColdArc postupkom pri jakosti struje od 100 A i 150 A. Na taj način je dobiveno 6 dinamičkih karakteristika, po dvije za svaki način prijenosa metala. Dobiveni rezultati analitički su obrađeni te iskorišteni za izračun topline. Nakon toga je napravljena usporedba s rezultatima dobivenim u skladu s normom HRN EN 1011-1.2009, a rezultati mjerenja su prikazani tablično i u grafičkom obliku.

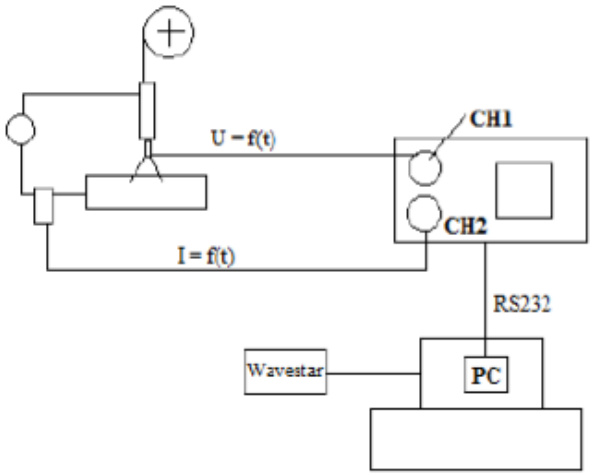
5.1. Oprema korištena za provedbu eksperimenta

Za potrebe izvođenja eksperimentalnog dijela ovog rada korišten je uređaj za zavarivanje (izvor struje) EWM Titan XQ 350 puls (Slika 31), koji spada među najsuvremenije uređaje na tržištu.



Slika 31. EWM Titan XQ 350 puls [8]

Zavarivanje je provedeno u zaštitnoj atmosferi sastavljenoj od 97,5 % argona i 2,5 % dušika u skladu s normom HRN EN ISO 14175:M21. Korišten je dodatni materijal promjera 1,2 mm proizvođača Elektrode Zagreb, namijenjen za zavarivanje nehrđajućih čelika. Osciloskop korišten za mjerenje dinamičke karakteristike je Tektronix TDS 210, a u kombinaciji s njim korištena su strujna kliješta i računalni programu Wavestart. Shema spajanja uređaja za zavarivanje, osciloskopa i računala je prikazana na Slici 32.



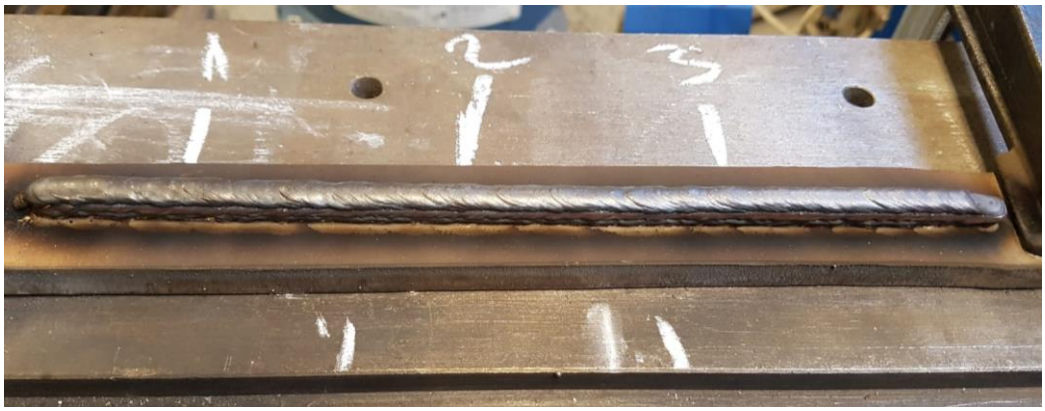
Slika 32. Shema spajanja opreme za mjerenje tijekom provedbe eksperimenta [24]

U svrhu dobivanja što točnijih rezultata unosa topline, zavarivanje čelika je provedeno na način da je pištolj za zavarivanje montiran na numerički upravljanu robotsku ruku, a robotska ruka se kretala zadanom putanjom (Slika 33). Na taj način se osiguralo da je u svakom prolazu brzina konstantna, da je visina pištolja u odnosu na radni komad uvijek jednaka te je eliminirana mogućnost ljudske greške.



Slika 33. Robotska ruka korištena prilikom zavarivanja [24]

Robotskoj ruci je za svaki prolaz bila zadana ista putanja u horizontalnoj ravnini, a jedino se mijenjala visina pištolja u odnosu na radni komad. Na taj način se sloj po sloj gradio zid (tehnologija aditivne proizvodnje žicom i električnim lukom – WAAM), što je i vidljivo na Slici 34. Na uređaju je namješten parametar jakosti električne struje (I), očitana je vrijednost napona (U), a brzina zavarivanja (v) se definirala pri programiranju robota.



Slika 34. Zid izrađen tijekom provođenja eksperimenta [24]

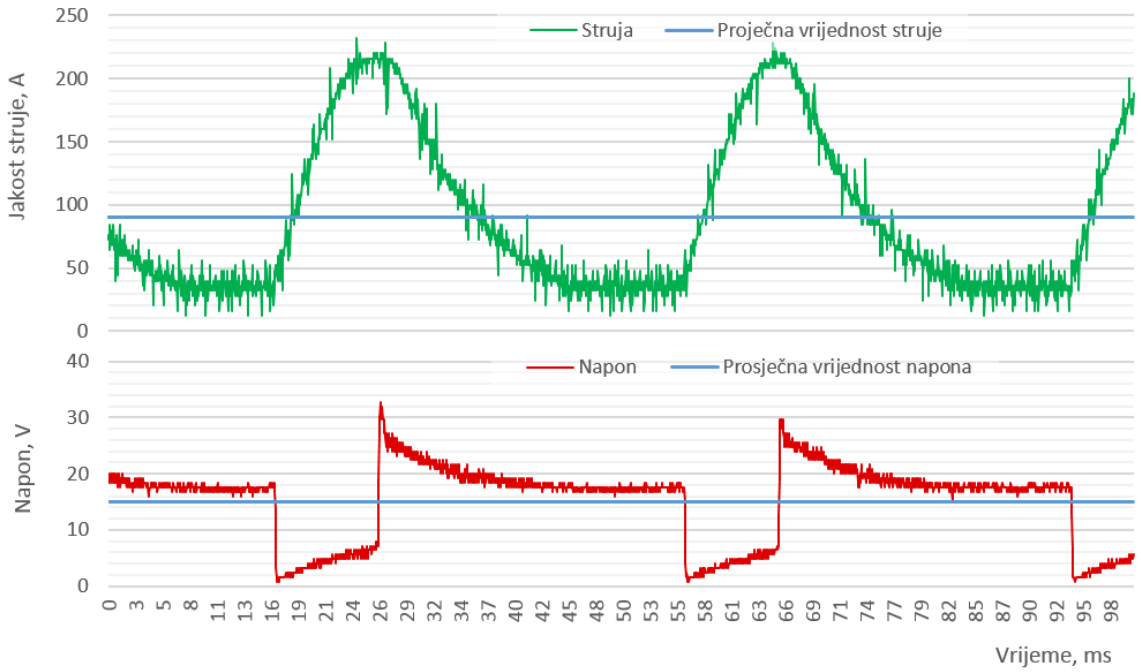
5.2. Način izračuna unosa topline preko dinamičke karakteristike

Podatke za izmjerenu dinamičku karakteristiku ranije navedenom opremom moguće je na računalu obraditi u obliku 2500 točaka zapisanih u formatu *(I,t)* za jakost struje i 2500 točaka zapisanih u formatu (*V,t*) za napon za vremenski interval od 0,1 sekunde. Drugim riječima, dvokanalni osciloskop je svake 4 ms mjerio vrijednost struje i vrijednost napona. Skup podataka za jedan prolaz zavarivanja od ukupno 5000 točaka je prebačen u tablični program Excel. Eksperimentalno izračunata vrijednost unosa topline dobivena je na načina da se umnožak osciloskopom izmjerene jakosti struje i napona (*I*U*) za svaki mjereni trenutak (za svake 4 ms) pomnoži sa stupnjem iskoristivosti električnog luka *(*η=konst.=0,8 za MAG postupak) i podijeli s brzinom zavarivanja (*v*=konst.=250 mm/min=4.17 mm/s) u skladu s normom HRN EN 1011-1.2009, kao što je prikazano matematičkom formulom (2) u općem obliku te formulom (3) s uvrštenim vrijednostima konstanti brzine zavarivanja i stupnja iskoristivosti električnog luka. Potom je iz cijelog skupa podataka od 2500 vrijednosti izračunata aritmetička sredina, odnosno prosječna vrijednost struje i napona.

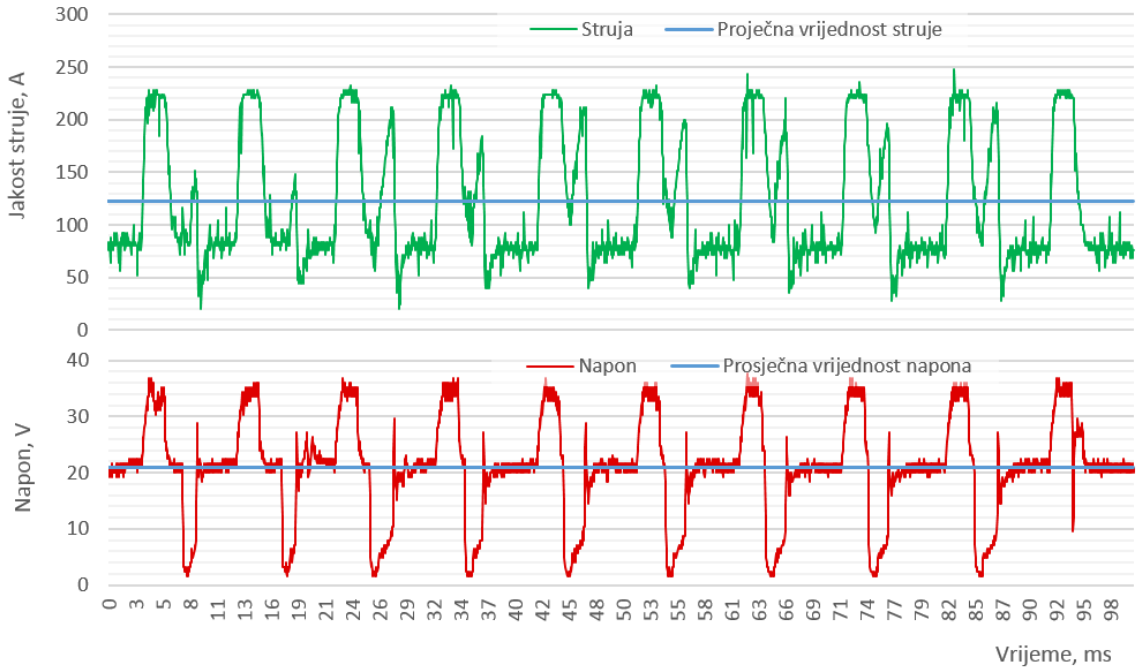
Na Slici 35, kao i na svim ostalim slikama koje prikazuju dinamičku karakteristiku, zelenom bojom prikazana je krivulja promjene jakosti struje u vremenu, a crvenom bojom krivulja promjene napona u vremenu. Plavim pravcem na Slikama 35 i 36 je označena prosječna vrijednost izmjerene jakosti struje i napona u promatranom periodu mjerenja od 0,1 s. Na Slici 35 nalazi se primjer krivulja struje, napona i izračunatih prosječnih vrijednosti struje i napona koje su korištene u eksperimentalnom načinu određivanja unosa topline za metodu prijenosa metala kratkim spojevima. Dodatno, na Slici 36 nalazi se primjer krivulja struje i napona i izračunatih prosječnih vrijednosti struje i napona koje su korištene za eksperimentalni način određivanja unosa topline za metodu prijenosa metala impulsnim lukom.

$$\tilde{Q} = \frac{\sum_1^n I*U*\frac{\eta}{v}}{2500}, \quad \text{J/mm} \tag{2}$$

$$\tilde{Q} = \frac{\sum_1^{2500} I*U*\frac{0.8}{4.17}}{2500}, \quad \text{J/mm} \tag{3}$$



Slika 35. Primjer krivulja struje, napona i prosječnih vrijednosti za prijenos metala kratkim spojevima



Slika 36. Primjer krivulja struje, napona i prosječnih vrijednosti za prijenos metala impulsnim lukom

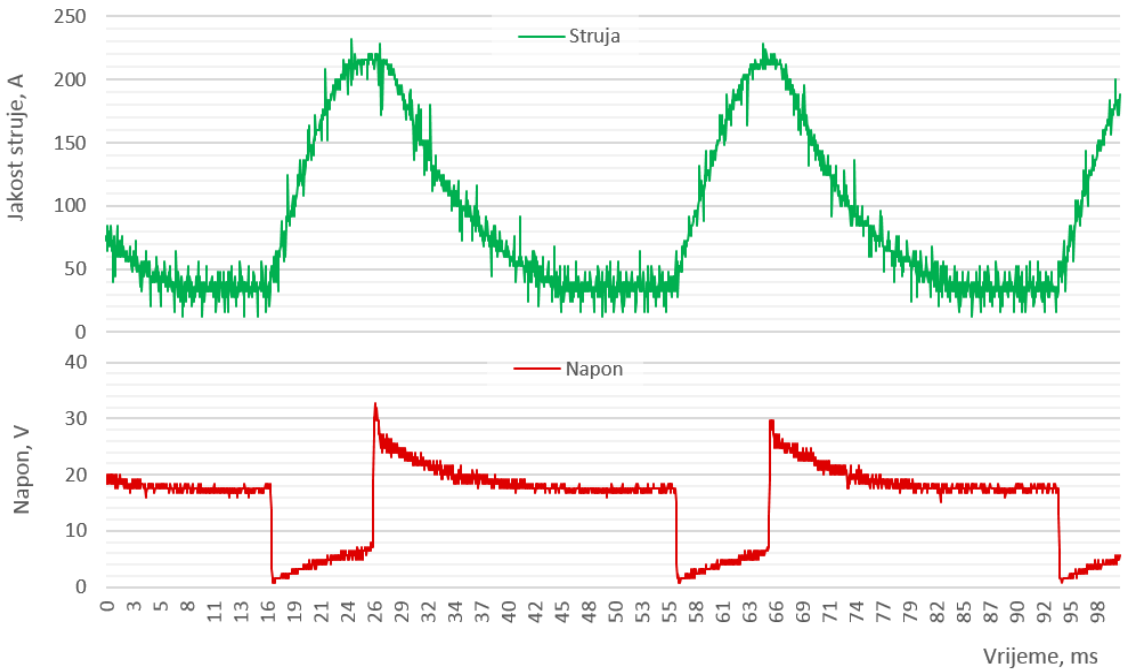
U svrhu usporedbe s eksperimentalno dobivenim vrijednostima izračunate su i vrijednosti unesene topline po istoj normi i formuli (1), ali na uobičajen način preko vrijednosti početnih parametara struje i napona postavljenih (struja) i očitanih (napon) s izvora struje tj. uređaja za zavarivanje prije početka samog zavarivanja.

5.3. Prijenos metala kratkim spojevima

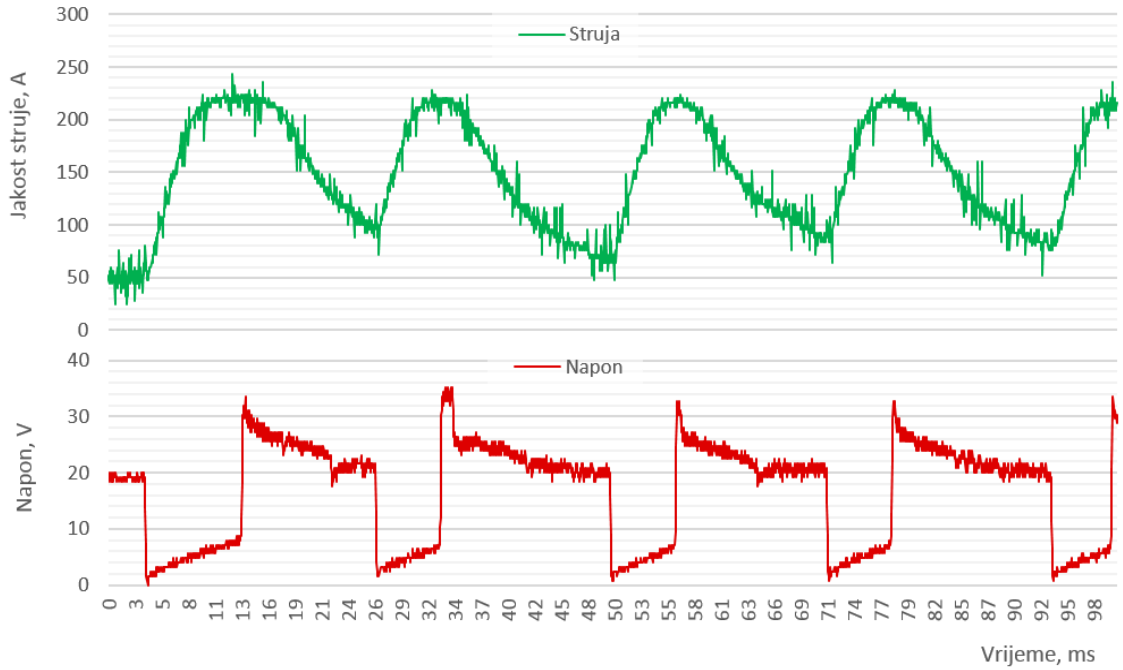
Nakon što je oprema postavljena na način opisan u poglavlju 5.1. započeta je provedba eksperimenta. Na uređaju za zavarivanje je postavljen unaprijed tvornički instaliran program za prijenos metala kratkim spojevima. Ovisno o postavljenoj jačini struje uređaj samostalno odabire optimalan napon, a tijekom samog zavarivanja korigira vrijednosti u svrhu održavanja što stabilnijeg luka. Parametri struje i napona tijekom samog postupka variraju za ~5 % oko zadane početne vrijednosti na ekranu samog uređaja.

5.3.1. Dinamička karakteristika

Na Slici 37 je prikazana dinamička karakteristika za prijenos metala kratkim spojevima izmjerena pri jakosti struje zavarivanja od 100 A. Iz pravilnih razmaka između ekstrema krivulje i općenito pravilnog oblika krivulje, moguće je zaključiti da je tijekom postupka električni luk stabilan. Na Slici 38 je prikazana dinamička karakteristika izmjerena pri 150 A za istu metodu prijenosa metala. Iz izgleda krivulje je vidljivo da je kao i pri 100 A riječ o stabilnom postupku. Iz obje dinamičke karakteristike je jasno vidljiv trenutak u kojem dolazi do kratkog spoja i pada vrijednosti napona u nulu.



Slika 37. Dinamička karakteristika za prijenos metala kratkim spojevima pri 100 A



Slika 38. Dinamička karakteristika za prijenos metala kratkim spojevima pri 150 A

5.3.2. Izračun unosa topline

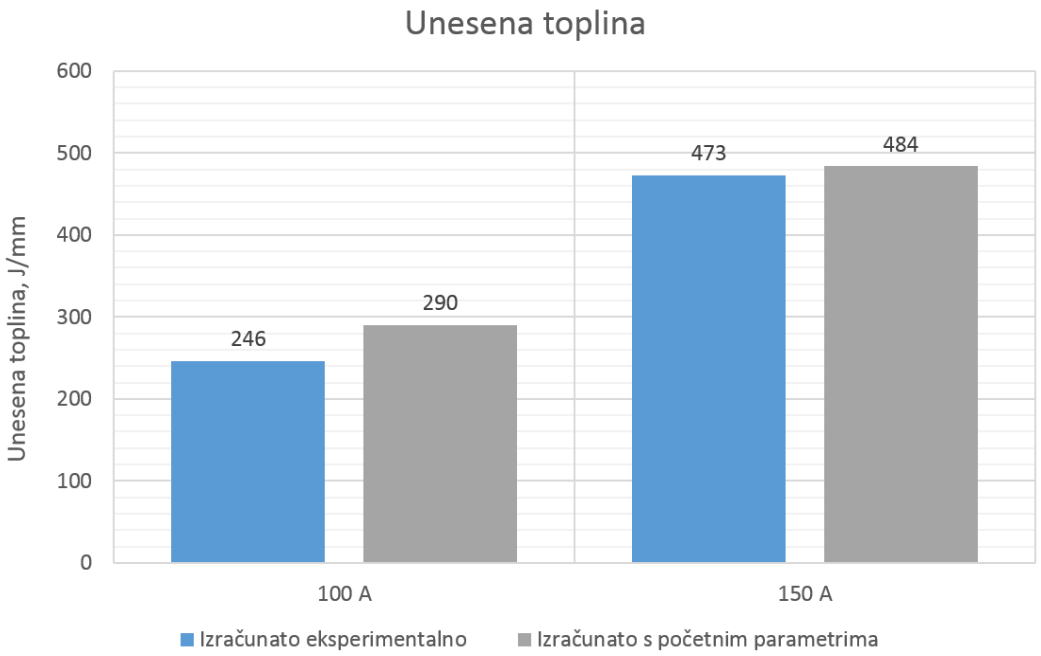
U Tablici 2 dan je prikaz početnih parametara zavarivanja za Mjerenje 1 i Mjerenje 2, kao i rezultati izračuna unosa topline. Rezultati su dobiveni na dva načina objašnjena u poglavlju 5.2.

Tablica 2. Unos topline za način prijenosa materijala kratkim spojevima

Način prijenosa metala	Kratki spojevi	
Mjerenje broj:	**1**	**2**
Početni parametri:		
Struja, A:	100	150
Napon, V:	15,1	16,8
Brzina zavarivanja, mm/min:	250	250
Unesena toplina, J/mm:		
Izračunata preko početnih parametara:	290	484
Izmjerena iz dinamičke karakteristike:	246	473
Razlika dobivenih vrijednosti:	44	11

5.3.3. Analiza rezultata

Za prijenos metala kratkim spojevima ustanovljeno je odstupanje izmjerenih i izračunatih vrijednosti (Slika 39). Pri struji zavarivanja od 100 A (Mjerenje 1) vrijednost izračunata preko početnih parametara je veća od izmjerene vrijednosti dinamičkom karakteristikom za 44 J/mm, odnosno za 18 %. Za jačinu struje zavarivanja od 150 A (Mjerenje 2) izračunato je manje odstupanje od onog pri 100 A. Vrijednosti drugog mjerenja se razlikuju za 11 J/mm, odnosno za 2 %. I u ovom drugom mjerenju, vrijednost izračunata preko početnih parametara je veća od vrijednosti dobivene analitičkom obradom dinamičke karakteristike.



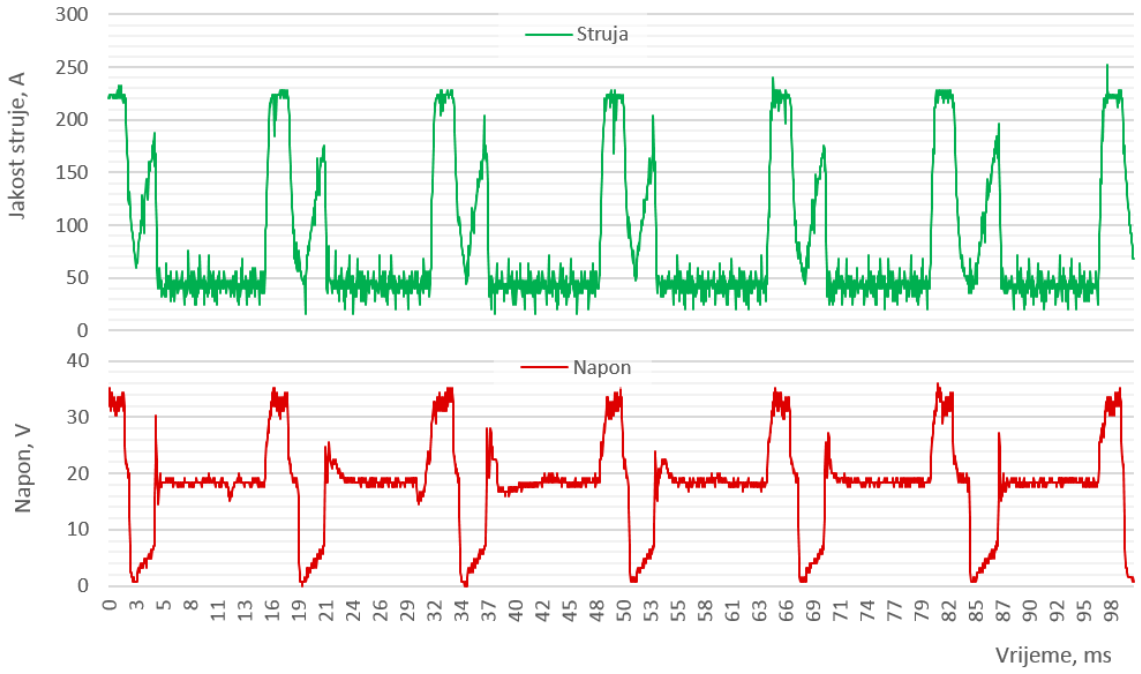
Slika 39. Grafički prikaz odnosa unesene topline tijekom Mjerenja 1 i Mjerenja 2

5.4. Prijenos metala impulsnim lukom

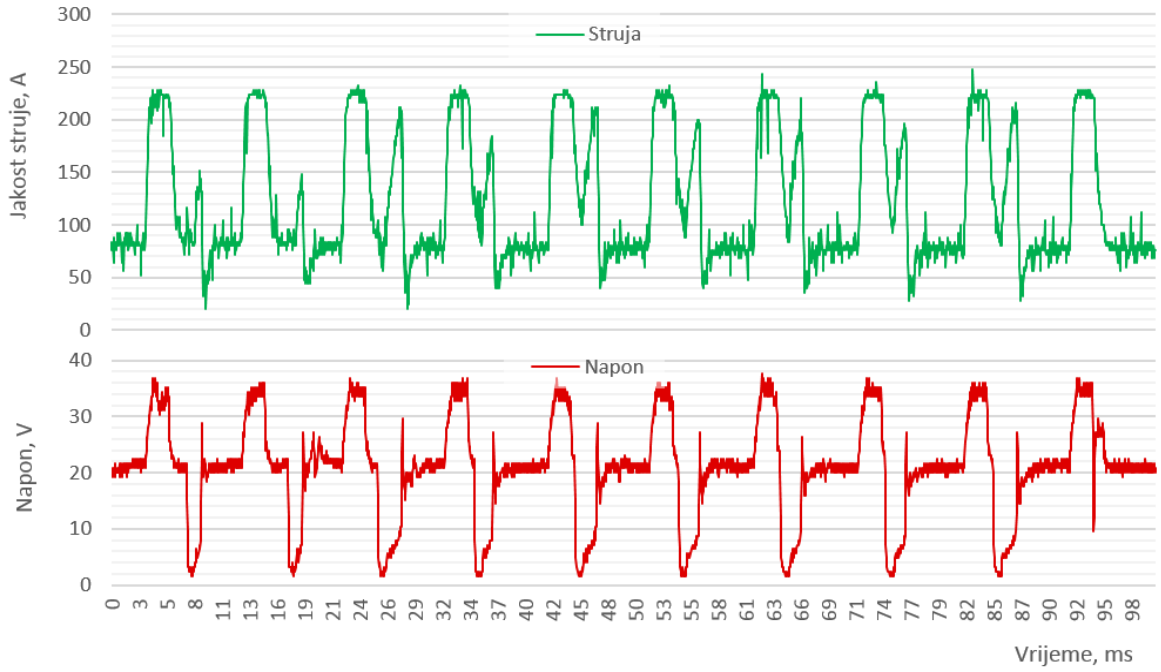
Tijekom druge faze provedbe mjerenja dinamičke karakteristike, na uređaju za zavarivanje je postavljen unaprijed tvornički instaliran program za prijenos metala impulsnim lukom. Ovisno o postavljenoj jačini struje uređaj je programiran da sam odabire optimalan napon, a tijekom samog zavarivanja korigira vrijednosti u svrhu održavanja što stabilnijeg luka. Parametri struje i napona kao i u prethodnom postupku variraju za ~5 % oko zadane početne vrijednosti tijekom zavarivanja.

5.4.1. Dinamička karakteristika

Na Slici 40 je prikazana dinamička karakteristika za način prijenosa metala impulsnim lukom koja je izmjerena pri jakosti struje zavarivanja od 100 A dok je na Slici 41 prikazana dinamička karakteristika izmjerena pri 150 A. Iz izgleda obje krivulje je vidljivo da je riječ relativno stabilnom i visoko kontroliranom procesu. Jedan impuls predstavlja prijenos jedne kapljice dodatnog materijala. Izvor struje proizvodi dvije razine jakosti struje, što je i vidljivo na oscilogramu. Unatoč tome što se radi o prijenosu metala impulsnim lukom vidljivo je (po naglom padu napona u nulu) da tijekom procesa dolazi do kratkih spojeva.



Slika 40. Dinamička karakteristika za prijenos metala impulsnim lukom pri 100 A



Slika 41. Dinamička karakteristika za prijenos metala impulsnim lukom pri 150 A

5.4.2. Izračun unosa topline

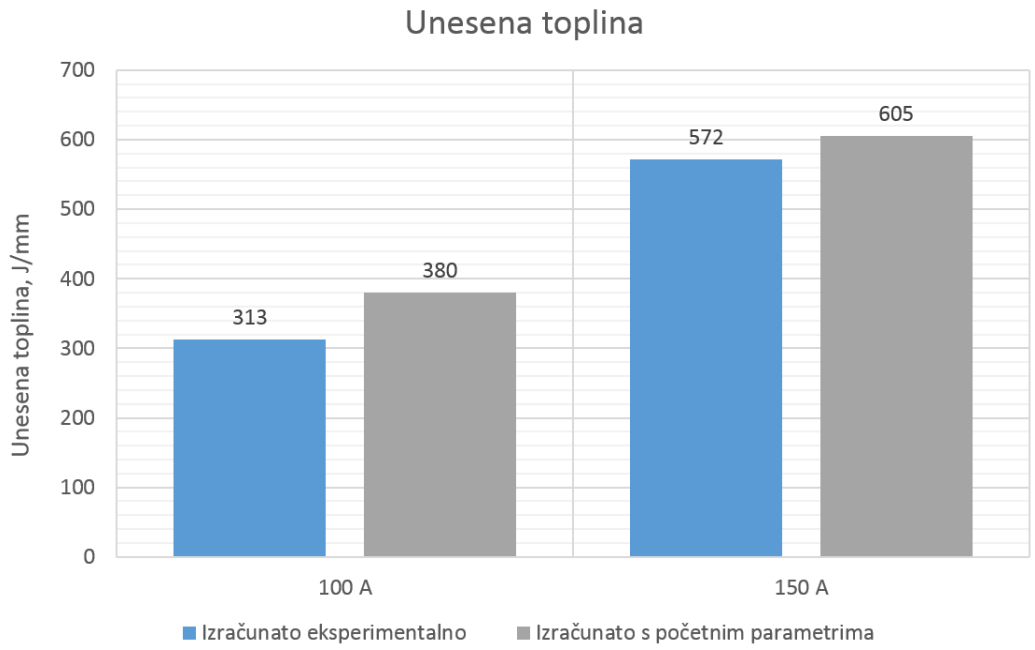
U Tablici 3 je prikaz početnih parametara zavarivanja za Mjerenja 3 i Mjerenje 4 kao i rezultati izračuna unosa topline. Rezultati su dobiveni na dva načina objašnjena u poglavlju 5.2.

Tablica 3. Unos topline za način prijenosa metala impulsnim lukom

Način prijenosa metala	Impulsni luk	
Mjerenje broj:	**3**	**4**
Početni parametri:		
Struja, A:	100	150
Napon, V:	19,8	21,0
Brzina zavarivanja, mm/min:	250	250
Unesena toplina, J/mm:		
Izračunata preko početnih parametara:	380	605
Izmjerena iz dinamičke karakteristike:	313	572
Razlika dobivenih vrijednosti:	68	33

5.4.3. Analiza rezultata

Za prijenos metala impulsnim lukom ustanovljeno je odstupanje izmjerenih i izračunatih rezultata (Slika 42). Pri struji zavarivanja od 100 A (Mjerenje 3) vrijednost izračunata preko početnih parametara je veća od izmjerene vrijednosti dinamičkom karakteristikom za 68 J/mm odnosno za 21 %. Za jačinu struje zavarivanja od 150 A (Mjerenje 4) ustanovljeno je manje odstupanje od onog pri 100 A, isto kao i u prvom i drugom mjerenju. Vrijednosti četvrtog mjerenja se razlikuju za 33 J/mm odnosno za 6 %, s tim da je vrijednost izračunata preko početnih parametara veća od vrijednosti dobivene analitičkom obradom dinamičke karakteristike.



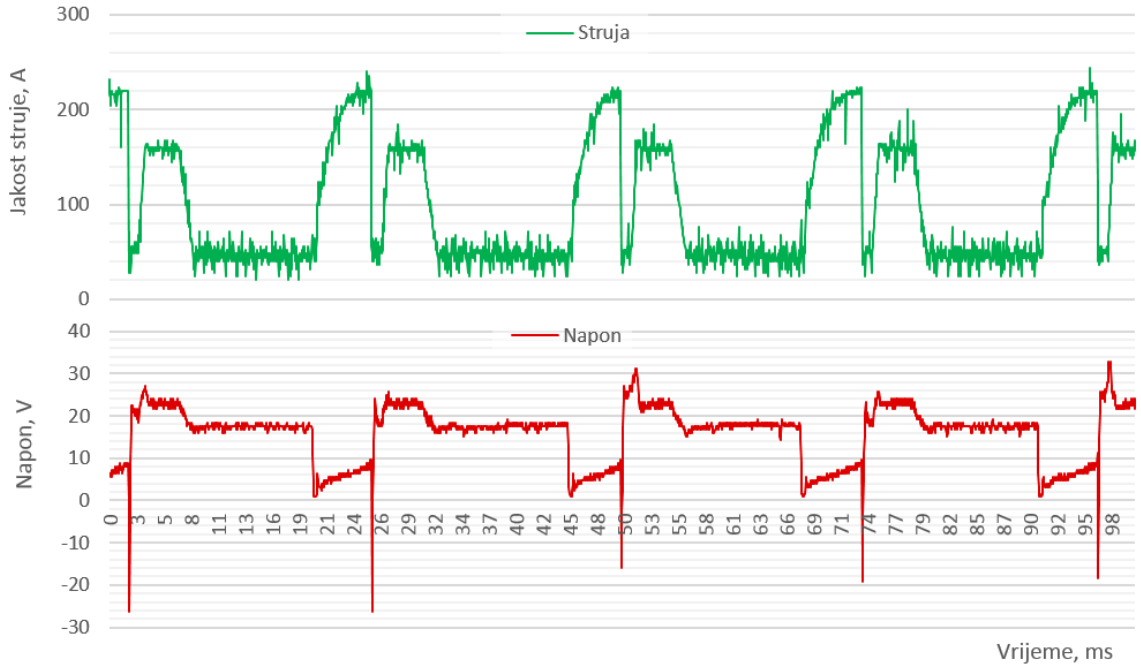
Slika 42. Grafički prikaz odnosa unesene topline tijekom Mjerenja 3 i Mjerenja 4

5.5. ColdArc® postupak

U posljednjoj, trećoj fazi provedbe mjerenja dinamičke karakteristike, na uređaju za zavarivanje je postavljen unaprijed tvornički instaliran program, patentiran od strane proizvođača ColdArc. Ovisno o postavljenoj jačini struje uređaj je programiran da sam odabere optimalan napon, a tijekom samog zavarivanja korigira vrijednosti u svrhu održavanja što stabilnijeg luka. Parametri struje i napona kao i tijekom prethodnih postupaka variraju za ~5 % oko zadane početne vrijednosti tijekom postupka.

5.5.1. Dinamička karakteristika

Na Slici 43 je prikazana dinamička karakteristika izmjerena prilikom korištenja ColdArc postupka sa strujom jakosti 100 A. Iz oblika krivulje, jednakih vremenskih intervala između impulsa i gotovo jednakih iznosa struje i napona može se zaključiti da se radi o najsuvremenijem postupku od sva tri. Vidljivo je da se radi o stabilnom procesu s visoko kontroliranim karakteristikama struje i napona. Na Slici 44 je prikazana dinamička karakteristika ColdArc postupka pri jakosti struje od 150 A. Vidljivo je da se porastom jakosti struje ne narušava značajno stabilnost procesa. Iz obje krivulje je vidljivo da napon u jednom trenutku prelazi u negativnu vrijednost. To se objašnjava time što se želi u što kraćem vremenskom roku što više smanjiti jakost struje da bi se što više smanjio (nepotreban) unos topline i sukladno tome smanjilo rasprskavanje. Da bi se u roku četiri milisekunde jakost struje smanjila za preko 150 A, u jednom trenutku postupka suvremeni uređaj za zavarivanje mijenja smjer istosmjerne struje. Upravo se na taj način najvećom brzinom smanjuje jakost struje, a ta promjena smjera struje se na dinamičkoj karakteristici očituje negativnom vrijednošću napona.



Slika 43. Dinamička karakteristika ColdArc postupka pri 100 A



Slika 44. Dinamička karakteristika ColdArc postupka pri 150 A

5.5.2. Izračun unosa topline

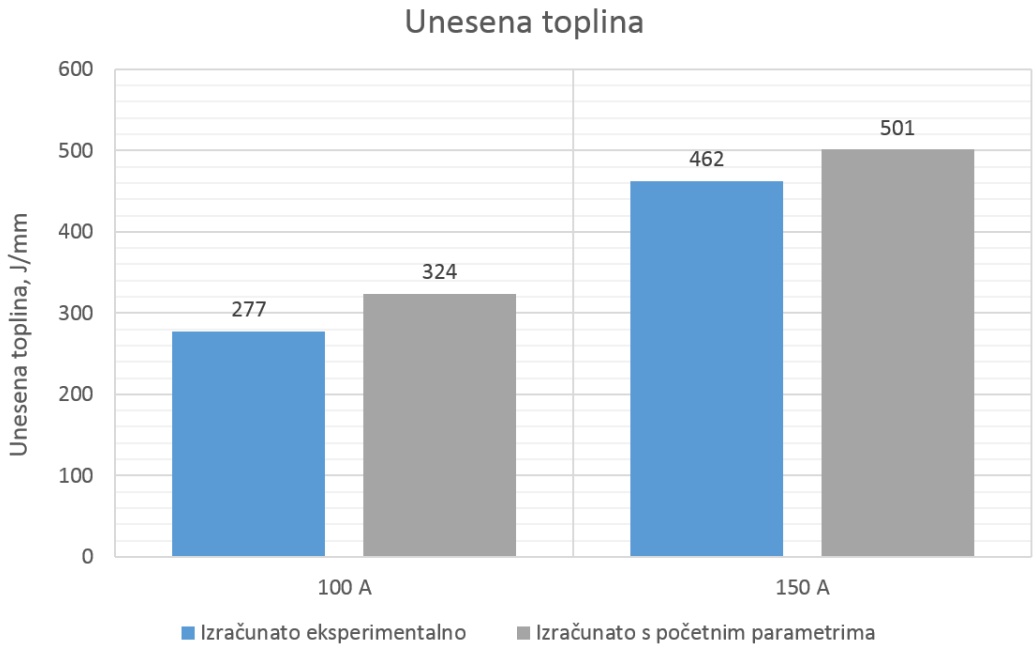
U Tablici 4 je prikaz početnih parametara zavarivanja za Mjerenje 5 i Mjerenje 6 kao i rezultati izračuna unosa topline. Rezultati su dobiveni na dva načina objašnjena u poglavlju 5.2

Tablica 4. Unos topline za ColdArc postupak

Način prijenosa metala	ColdArc	
Mjerenje broj:	**5**	**6**
Početni parametri:		
Struja, A:	100	150
Napon,V:	16,9	17,4
Brzina zavarivanja, mm/min:	250	250
Unesena toplina, J/mm		
Izračunata preko početnih parametara:	324	501
Izmjerena iz dinamičke karakteristike:	277	462
Razlika dobivenih vrijednosti:	48	39

5.5.3. Analiza rezultata

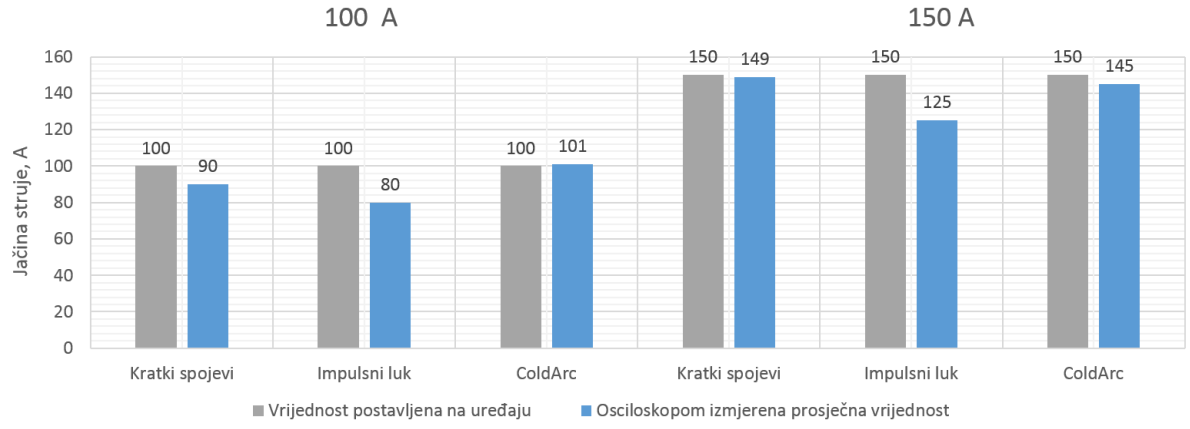
Za ColdArc postupak primijećeno je odstupanje izmjerenih i izračunatih rezultata (Slika 45). Pri struji zavarivanja od 100 A (Mjerenje 5) vrijednost izračunata preko početnih parametara je veća od izmjerene vrijednosti dinamičkom karakteristikom za 48 J/mm, odnosno za 17 %. Za jačinu struje zavarivanja od 150 A (Mjerenje 6) ustanovljeno je manje odstupanje od onog pri 100 A, isto kao i u prethodna četiri mjerenja. Vrijednosti šestog mjerenja se razlikuju za 39 J/mm, odnosno za 8 %, s tim da je vrijednost izračunata preko početnih parametara veća od vrijednosti dobivene analitičkom obradom dinamičke karakteristike, isto kao i u svim provedenim mjerenjima.



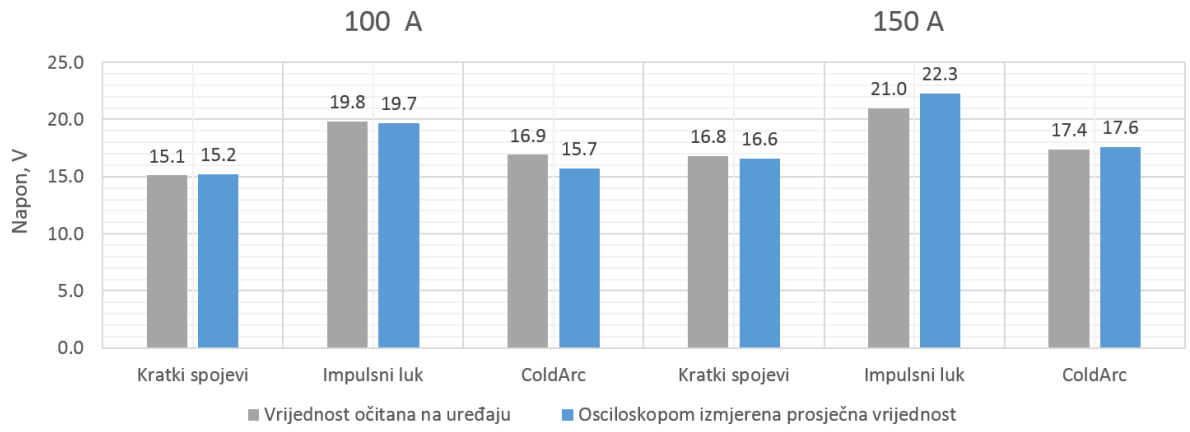
Slika 45. Grafički prikaz odnosa unesene topline tijekom Mjerenja 5 i Mjerenja 6

5.6. Usporedna analiza rezultata

Razlike između vrijednosti jačine struje postavljenih na uređaju (prije početka zavarivanja) i prosječne jačine struje izmjerene osciloskopom tijekom zavarivanja, za obje struje provođenja eksperimenta, prikazane su na Slici 46. Vidljivo je da izmjerene vrijednosti nisu jednake zadanima na uređaju. Za razliku od jačine struje, iz Slike 47 vidljivo je da osciloskopom izmjerene vrijednosti napona značajno manje odskaču od vrijednosti očitanih na uređaju (prije početka zavarivanja).

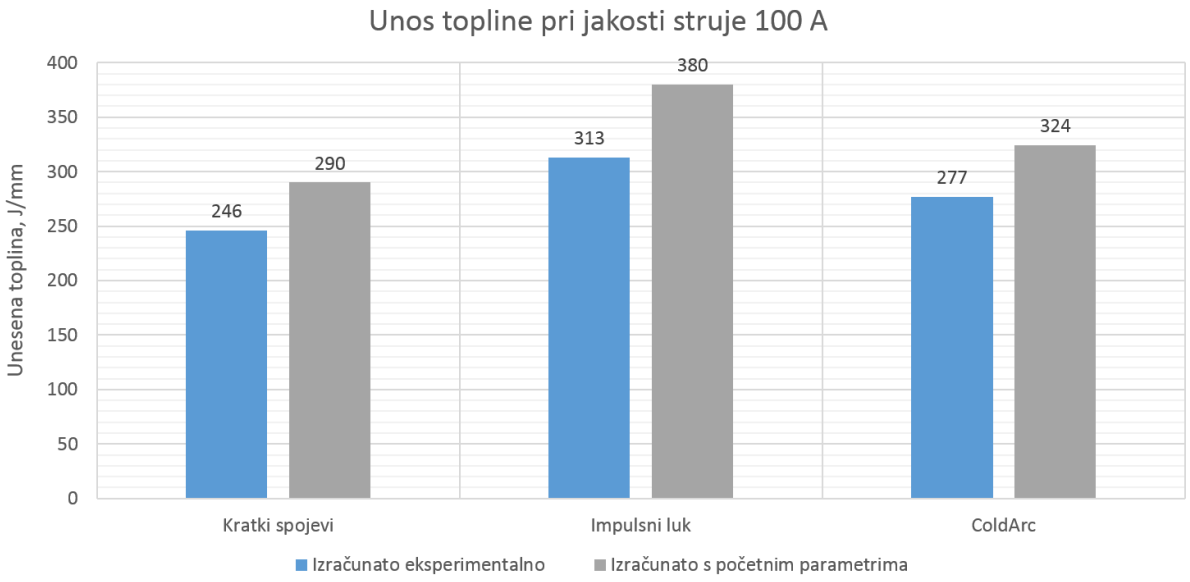


Slika 46. Usporedba postavljenih i izmjerenih vrijednosti struje



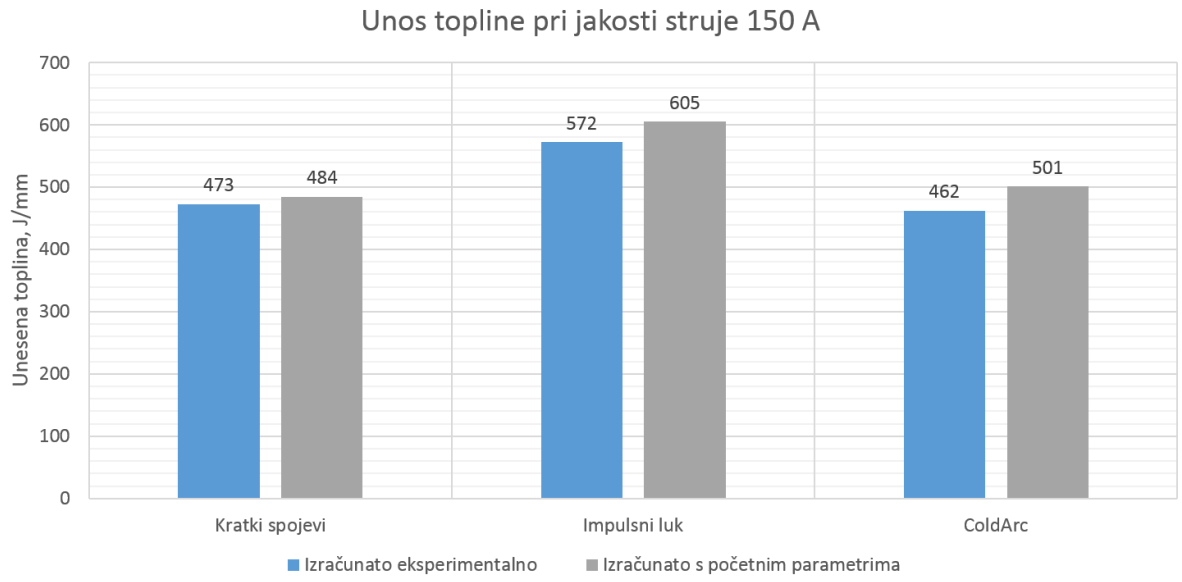
Slika 47. Usporedba očitanih i izmjerenih vrijednosti napona

Na Slici 48 prikazan je usporedan grafički prikaz unosa topline za sve tri metode prijenosa metala pri jakosti struje zavarivanja od 100 A. Sukladno grafu prikazanom na slici može se zaključiti da su pri zadanoj struji najmanja odstupanja eksperimentalnih vrijednosti i vrijednosti izračunatih prema normi za metodu prijenos metala kratkim spojevima, a najveća za prijenos metala impulsnim lukom. Također, vidljivo je da je unos topline najmanji za način prijenosa metala kratkim spojevima, a najveći za impulsni luk. ColdArc postupak koji se zasniva na visoko-modificiranoj inačici prijenosa metala kratkim spojevima ima unos topline veći za ~12 % od klasičnog načina prijenosa metala kratkim spojevima (za oba načina izračuna). S druge strane ColdArc postupak ima za ~13 % manji unos topline od metode impulsnog luk (za oba načina izračuna), a upravo smanjen unos topline i smanjeno rasprskavanje taline su specifičnosti tog postupka.



Slika 48. Unesena toplina za različite načine prijenosa metala pri 100 A

Na Slici 49 prikazan je usporedni grafički prikaz unosa topline za sve tri metode prijenosa metala pri jakosti struje od 150 A. Iz podataka se može zaključiti da su pri zadanoj struji zavarivanja ponovno najmanja odstupanja eksperimentalnih vrijednosti i vrijednosti izračunatih prema normi za metodu kratkih spojeva, a najveća za prijenos metala impulsnim lukom. Također, vidljivo je da je eksperimentalno izračunat unos topline najmanji za ColdArc postupak, dok je najmanja izračunata vrijednost preko početnih parametara za prijenos metala kratkim spojevima. U najvećem unosu topline prednjači postupak impulsnog luka. Kod eksperimentalno dobivenih iznosa unesene topline postupak s načinom prijenosa metala kratkim spojevima ima ~2 % veći unos topline u odnosu na ColdArc postupak, a impulsni za ~21 % u odnosu na kratke spojeve. Najmanji izračunati unos topline po normi ima postupak koji koristi prijenos metala kratkim spojevima. U odnosu na njega ColdArc postupak ima ~4 % veći unos topline. Impulsni luk u odnosu na ColdArc ima ~21 % veći unos topline.



Slika 49. Unesena toplina za različite načine prijenosa metala pri 150 A

Moguće je utvrditi da se povećanjem jačine struje razlika unesene topline između ColdArc postupka i postupka koji koristi način prijenosa metala kratkim spojevima smanjuje. Uz to je vidljivo da su se razlike između vrijednosti izmjerenih eksperimentalno i onih dobivenih preko početnih parametara u skladu s normom HRN EN 1011-1.2009 smanjile povećanjem

jakosti struje. Za povećanje struje od 50 A razlika između vrijednosti za prijenos metala kratkim spojevima se smanjila s 18 % na 2 %, za impulsne lukove s 21 % na 6 %, a za ColdArc postupak s 17 % na 8 %.

Unatoč tome što je na prvi pogled moguće prepoznati uzorak ponašanja razlika između unesene topline dobivene eksperimentalno mjerenjem dinamičke karakteristike i one dobivene po normi preko početnih parametara, u ovisnosti o jačini postavljene struje zavarivanja (manja struja – veća razlika vrijednosti), broj ispitivanja obuhvaćen ovim radom nije dovoljan da bi se moglo predvidjeti dugoročno ponašanje istog i donijeti konkretan zaključak.

6. ZAKLJUČAK

MAG postupak zavarivanja je danas jedan od najčešće korištenih postupaka u proizvodnji i industriji. Zbog mnogo prednosti koje postupak pruža pred drugim postupcima, kao na primjer velikog broja podesivih parametara i relativno jednostavnog odabira načina prijenosa metala, proizvođači uređaja neprekidno rade na razvoju novih, modificiranih, naprednijih i kompleksnijih postupaka prijenosa metala. Jedan od takvih postupaka je i ColdArc. To je postupak koji se zasniva na visoko-modificiranoj inačici prijenosa metala kratkim spojevima te se odlikuje malim unosom topline uz istovremenu preciznu regulaciju količine taline. Velika prednost MAG postupka je mogućnost automatizacije i robotizacije zbog čega se postupak uz klasične primjene i dalje intenzivno razvija, unaprjeđuje i koristi u suvremenim proizvodnim postupcima.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada mjerile su se i analitički obradile dinamičke karakteristike prijenosa metala kratkim spojevima, impulsnim lukom i ColdArc postupka u svrhu izračuna unesene topline. Uočeno je da su odstupanja izmjerenih vrijednosti unosa topline u odnosu na numerički dobivene vrijednosti po normi HRN EN 1011-1.2009 relativno značajna. Premda su se odstupanja kretala u području manjem od ~20 %, za nove visoko-tehnološki razvijene postupke poput aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM), kod kojih i mala promjena unesene topline može predstavljati značajnu razliku u konačnom (zidu) zavara, to svakako predstavlja potencijalno veliki problem. Također, u eksperimentalnom dijelu je uočeno da su odstupanja rezultata najmanja za metodu prijenosa metala kratkim spojevima.

U zadnjih tridesetak godina dogodio se veliki tehnološki napredak u području elektrotehnike i elektronike po pitanju visoko dinamičkih inverterskih izvora struje kao i digitalnog upravljanja, što je omogućilo rapidan razvoj modificiranih postupaka prijenosa materijala. Problem u izračunu topline prema normi koja datira iz 2009. godine je u tome što je preopćenita u smislu da se istom formulom izračunava unesena toplina kod klasičnih načina prijenosa metala koji se nisu značajnije mijenjali (kratki spojevi, štrcajući, prijelazni i

impulsni luk) kao i suvremenih, tehnološki visoko razvijenih postupaka poput ColdArc-a i sličnih. Tijekom provođenja eksperimentalnog dijela ovog rada pokazalo se da jakost struje zavarivanja ima utjecaj na odstupanja vrijednosti izmjerenog unosa topline putem početnih parametara u skladu s normom i iznosa dobivenog eksperimentalno putem dinamičke karakteristike, na način da se povećanjem jakosti struje smanjuje razlika između unesenih toplina. Također, ustanovljeno je da na razliku između iznosa unesenih toplina utječe i način prijenosa metala u postupku i to tako da su odstupanja najmanja za prijenos metala kratkim spojevima, dok su za modificirane postupke odstupanja veća. Međutim, postojećom normom za izračun unesene topline nije obuhvaćen utjecaj jakosti struje kao ni način prijenosa metala u postupku. Stoga je u ovom području potrebno provoditi daljnja istraživanja koja će definirati količine unesene topline uzimajući u obzir jakost struje, način prijenosa metala kao i nove tehnologije i postupke.

7. LITERATURA

[1] Bajs M.: *Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[2] Mikulic M.: *Modificirani MAG postupci za visokoučinsko zavarivanje*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[3] Torer I.: *Primjena MAG CBT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

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

[5] Garašić, I.: *Bilješke s predavanja iz kolegija „Zavarivanje i montaža"*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[6] Kralj, S.; Andrić, Š.*: „Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka"*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[7] Hrgovan I.: *Hlađenje lopatica plinskih turbina*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.

[8] Slikano prilikom izvođenja eksperimentalnog dijela u Laboratoriju za zavarivanje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb,

[9] Gjutrek D.: *Greške kod MAG zavarivanja*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[10] Online katalog, *EWM*. Dostupno na: https://www.ewm-sales.com/en (posjećeno 1.9.2019.)

[11] Garašić, I.: *Bilješke s predavanja iz kolegija „Zavarljivost materijala"*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[12] Rudan, M.; *Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG) - Glavna obilježja i područja primjene*, Društvo za tehniku zavarivanja Istra, Pula, 2005.

[13] Stevanović S.; *Parametri zavarivanja i njihov uticaj na kvalitet i vizuelni izgled zavarenog spoja*,PP prezentacija. Dostupno na: http://www.alatistherm.co.rs/pdf.zavarivanje/ParametriZavarivanja.pdf, (posjećeno 1.9.2019.)

[14] Garašić, I.: *Bilješke s predavanja iz kolegija „Postupci zavarivanja“*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[15] Juraga I.,. Ljubić K, Ţivičić M.; *Pogreške u zavarenim spojevima*, Zagreb 2007.

[16] Jurica, M.; *Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80*, Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[17] Sinković M., *MAG CBT zavarivanje s trokomponentnim plinskim mješavinama*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[18] Gas Metal Arc Welding, Product and Procedure Selection, *Lincoln electric.* Dostupno na: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf (Posjećeno 1.9.2019.)

[19] Pulsed Arc, *Science Direct.* Dostupno na: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pulsed-arc (Posjećeno 1.9.2019.)

[20] Garašić I., Kožuh, Z.: *Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[21] Kah P., Suoranta R., Martikainen J., *Advanced gas metal arc welding processes*. Dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/257337180 (Posjećeno 1.9.2019.)

[22] WAAM — Wire Arc Additive Manufacturing, *Fit production.* Dostupno na: http://www.fit-production.de/waam.php?language=2 (Posjećeno 1.9.2019.)

[23] Jurgec K.: *Analiza dinamičke karakteristike izvora struje pri MAG zavarivanju*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[24] Pučo A.: *Određivanje dinamičke karakteristike MAG zavarivanja*, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.