Primjena modificiranih MAG postupaka u području štrcajućeg luka

Špehar, Marko

Master's thesis / Diplomski 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:235:881777

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Špehar

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Marko Špehar

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 savjetima i primjedbama tijekom izrade ovoga rada.

Posebno hvala asistentici, dr. sc. Maji Jurici na svim savjetima, kritikama i pruženoj pomoći tijekom izrade ovoga rada.

Zahvaljujem se Krešimiru Sukobljeviću i Mati Šokičiću na velikoj pomoći pri izradi eksperimentalnoga dijela rada.

Također, zahvaljujem svim kolegama i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Na kraju, posebno se zahvaljujem svojoj obitelji – ocu Josipu, majci Anki te sestri Barbari na ukazanome povjerenju, podršci i strpljenju tijekom studiranja.

Marko Špehar

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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARKO ŠPEHAR** Mat. br.: 0035188538

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena modificiranih MAG postupaka u području štrcajućeg luka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of modified MAG process in spray arc mode**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je navesti načine prijenosa metala u električnom luku za različita područja parametara zavarivanja kod MAG postupka s posebnim naglaskom na područje štrcajućeg luka. Detaljno obraditi ForceArc modificiranu inačicu MAG postupka. Opisati prednosti i nedostatke ovog načina prijenosa metala u usporedbi s konvencionalnim načinom prijenosa pri MAG zavarivanju debelostjenih konstrukcija.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno za odabranu debelostjenu konstrukciju definirati pripremu spoja i parametre zavarivanja za konvencionalni i modificirani (ForceArc) način prijenosa metala. Zavarene spojeve je potrebno podvrgnuti odgovarajućim ispitivanjima te usporediti dobivene rezultate. U konačnici analizirati prikladnost korištenja modificiranog načina prijenosa metala spram konvencionalnog pri zavarivanju debelostjenih konstrukcija.

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

Zadatak zadan:
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
10. srpnja 2019.
11. srpnja 2019.
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA VI
POPIS KRATICA VII
POPIS OZNAKA IX
SAŽETAK X
SUMMARY XI
1. UVOD 1
2. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA 3
2.1. Načini prijenosa metala kod MIG/MAG postupka 6
2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima 6
2.1.2. Prijenos metala mješovitim lukom 8
2.1.3. Prijenos metala štrcajućim lukom 10
2.1.4. Prijenos metala impulsnim lukom 11
3. MODIFICIRANE VARIJANTE MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA 14
3.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima 15
3.1.1. Controlled Bridge Transfer 15
3.1.2. Cold Metal Transfer 19
3.1.2.1. Prednosti CMT postupka 21
3.1.2.2. Područje primjene CMT postupka 22
3.1.3. FastROOT 23
3.1.4. SpeedCold 26
3.1.5. Surface Tension Transfer 28
3.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom 34
3.2.1. Power Mode 36
3.2.2. Rapid MIG/MAG Technology 38
3.2.3. ForceArc 42
3.2.3.1. Prijenos materijala konceptom forceArc 43
3.2.3.2. Prednosti primjene forceArc varijante MAG zavarivanja 45
3.2.3.3. Područja primjene forceArc varijante MAG zavarivanja 50
3.2.4. SpeedArc 51
3.2.5. NewArc 53
3.2.6. Rapid Weld 55
4. EKSPERIMENTALNI RAD 57
4.1. Oprema za zavarivanje 57
4.2. Osnovni materijal 62
4.3. Dodatni materijal 62
4.4. Zaštitni plin 64
4.5. Navarivanje 65

4.5.1. Parametri navarivanja 65
4.5.2. Makroizbrusci navarenih uzoraka 68
4.6. Zavarivanje uzoraka 71
4.6.1. Zavarivanje sučeljenoga I – spoja 72
4.6.2. Zavarivanje spojeva u uskome žlijebu 74
4.7. Izrada makroizbrusaka 77
4.8. Analiza rezultata 80
5. ZAKLJUČAK 83
LITERATURA 85
PRILOZI 90

POPIS SLIKA

Slika 1. Detalj MIG/MAG postupka zavarivanja [3] 3
Slika 2. Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja [5] 4
Slika 3. Podjela načina prijenosa metala u električnome luku [8] 6
Slika 4. Dijagramski prikaz ovisnosti struje i napona tijekom kratkoga spoja [10] 7
Slika 5. Prijenos metala mješovitim lukom [4] 9
Slika 6. Prijenos metala štrcajućim lukom [13] 11
Slika 7. Prikaz električnog impulsa i njegovih pripadajućih parametara [14] 13
Slika 8. Princip rada CBT MIG/MAG postupka zavarivanja [18] 16
Slika 9. Princip preciznoga predviđanja ponovne uspostave električnoga luka [20] 17
Slika 10. Faze prijenosa metala pri CBT varijanti MAG zavarivanja ovisno o vremenu [20] 18
Slika 11. Faze CMT postupka zavarivanja [24] 20
Slika 12. Shematski prikaz odnosa struje i napona zavarivanja pri CMT procesu [22] 21
Slika 13. Volkswagen Phaeton – karoserija zavarena CMT postupkom [24] 23
Slika 14. Dinamička karakteristika FastROOT postupka: 1 – u = f (t); 2 – i = f (t) [15] 24
Slika 15. Utjecaj sekundarnoga strujnog pulsa na oblik provara kod FastROOT postupka [15] 25
Slika 16. Zavareni spoj dupleks i superaustenitnoga čelika debljine 2 mm uz razmak 2 do 3 mm [15] 25
Slika 17. Rubni spoj čelika S235; izrađen konvencionalnim prijenosom metala kratkim spojevima (lijevo) i SpeedCold postupkom (desno) [28] 27
Slika 18. Utjecaj vršne struje na geometriju zavarenoga spoja [33] 29
Slika 19. Utjecaj osnovne struje na geometriju zavarenoga spoja [32] 30
Slika 20. Prikaz dinamičke karakteristike STT procesa zavarivanja [34] 31
Slika 21. Usporedba korijenskih prolaza: a) REL postupak; b) STT postupak [1] 33
Slika 22. Radno područje modificiranoga štrcajućega luka u odnosu na područje parametara konvencionalnoga štrcajućega luka, prijelaznoga luka (PL) te kratkih spojeva (KS) [37] 35
Slika 23. Kutovi pripreme spoja: a) modificirani štrcajući luk; b) standardni štrcajući luk [38] 35
Slika 24. Prikaz statičke karakteristike Power Mode postupka zavarivanja [40] 36
Slika 25. Promjena struje i napona zavarivanja u odnosu na odstupanja duljine električnoga luka [39] 37
Slika 26. Usporedba penetracijskog profila postupka Power Mode i konvencionalnoga MIG/MAG postupka [42] 38
Slika 27. Razine jakosti struje u ovisnosti o vrsti električnog luka [43] 39
Slika 28. Dinamička karakteristika RMT postupka: 1 – u = f (t); 3 – i = f (t) [15] 39
Slika 29. Kutni spoj debljine 8 mm s potpunom penetracijom izveden RMT postupkom [43] 40
Slika 30. Priprema kutnoga spoja kod RMT varijante MAG zavarivanja [45] 41
Slika 31. ForceArc postupak zavarivanja: a) prijenos metala i oblik električnoga luka; b) oscilogram dinamičke karakteristike [8, 48] 43
Slika 32. Faze forceArc načina prijenosa materijala [49] 44

Slika 33. Usporedba penetracije kod forceArc postupka (lijevo) i konvencionalnog MAG zavarivanja (desno) [48] ... 45
Slika 34. Duljina slobodnoga kraja žice: a) prijenos metala štrcajućim lukom; b) forceArc varijanta [48] ... 47
Slika 35. Širina zone utjecaja topline: a) standardni štrcajući luk; b) forceArc postupak [52] ... 47
Slika 36. Utjecaj duljine i plazme električnoga luka na pojavu ugorina u zavarenom spoju: a) prijenos metala štrcajućim lukom; b) forceArc varijanta [48] ... 48
Slika 37. Usporedba ukupnih troškova forceArc postupka i konvencionalnog štrcajućeg luka [50] ... 49
Slika 38. Usporedba emisije dimnih plinova forceArc postupka i konvencionalnog štrcajućeg luka [50] ... 49
Slika 39. Zavareni spoj čelika S355 debljine 30 mm izveden forceArc postupkom [53] ... 50
Slika 40. Usporedba dubine penetracije na kutnome spoju između SpeedArc varijante i konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja [54] ... 51
Slika 41. Usporedba sučeljenih spojeva izvedenih SpeedArc postupkom i konvencionalnim MAG zavarivanjem s obzirom na kut pripreme spoja [54] ... 52
Slika 42. Izvođenje zavarivanja u uskome žlijebu s većom duljinom slobodnoga kraja žice [55] ... 52
Slika 43. Usporedba konvencionalnog štrcajućeg luka i newArc postupka s obzirom na kut pripreme spoja, broj prolaza i ZUT [56] ... 53
Slika 44. Primjena newArc postupka na kutnome spoju: a) vođenje pištolja; b) izgled gotovog zavarenog spoja [56] ... 54
Slika 45. Smanjenje operativnih troškova i do 50 % u odnosu na standardni štrcajući luk [56] ... 54
Slika 46. T – spoj s potpunom penetracijom izveden Rapid Weld postupkom [59] ... 56
Slika 47. Izvor struje za zavarivanje Titan XQ 350 puls ... 58
Slika 48. Upravljačko sučelje uređaja Titan XQ 350 puls [62] ... 60
Slika 49. Automat za zavarivanje BUG – O Systems MDS 1002 ... 61
Slika 50. Specifikacija dodatnoga materijala EZ – SG 2 [66] ... 63
Slika 51. Spremnik zaštitnoga plina Ferroline C18 ... 64
Slika 52. Položaj pištolja – neutralna tehnika rada ... 65
Slika 53. Izraz za unos topline u zavareni spoj [68] ... 66
Slika 54. Uzorak 1 ... 67
Slika 55. Uzorak 2 ... 67
Slika 56. Uzorak 3 ... 68
Slika 57. Uzorak 4 ... 68
Slika 58. Uzorak 5 ... 68
Slika 59. Uzorak 6 ... 68
Slika 60. Makroizbrusak 1 ... 69
Slika 61. Makroizbrusak 2 ... 69
Slika 62. Makroizbrusak 3 ... 69
Slika 63. Makroizbrusak 4 ... 70
Slika 64. Makroizbrusak 5 ... 70
Slika 65. Makroizbrusak 6 ... 70
Slika 66. I – priprema spoja za zavarivanje [69] ... 72
Slika 67. Prikaz položaja pištolja tijekom zavarivanja sučeljenog spoja ... 72
Slika 68. Zavareni spoj A ... 73

Slika 69. Zavareni spoj B 74
Slika 70. Priprema spoja za zavarivanje [50] 74
Slika 71. Položaj pištolja u žlijebu s kutom od 35° 75
Slika 72. Položaj pištolja u žlijebu s kutom od 45° 75
Slika 73. Uzorak C s prednje strane 76
Slika 74. Uzorak D s prednje strane 76
Slika 75. Uzorak C sa stražnje strane 77
Slika 76. Uzorak D sa stražnje strane 77
Slika 77. Makroizbrusak uzorka A 78
Slika 78. Makroizbrusak uzorka B 78
Slika 79. Iznos duljine koji dijeli uzorak A od potpunoga provara 79
Slika 80. Nepotpuni provar uzorka A 79
Slika 81. Usporedba širina navarenih uzoraka 80
Slika 82. Usporedba nadvišenja navarenih uzoraka 80
Slika 83. Usporedba dubina penetracije navarenih uzoraka 81

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba makroizbrusaka sučeljenih spojeva izvedenih forceArc varijantom i konvencionalnim štrcajućim lukom s obzirom na kut pripreme spoja [51] 46
Tablica 2. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje Titan XQ 350 puls [61] 59
Tablica 3. Kemijski sastav čelika S235 [64] 62
Tablica 4. Mehanička svojstva čelika S235 [65] 62
Tablica 5. Sastav plinske mješavine Ferroline C18 [67] 64
Tablica 6. Parametri navarivanja uzoraka 1, 2 i 3 66
Tablica 7. Parametri navarivanja uzoraka 4, 5 i 6 67
Tablica 8. Izmjerene vrijednosti geometrije navarenih uzoraka 71
Tablica 9. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka A 73
Tablica 10. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka B 73
Tablica 11. Parametri zavarivanja uzoraka C i D 76

POPIS KRATICA

Kratica	**Opis**
AC - CBT	Alternating Current – Controlled Bridge Transfer
Ar	Argon
C	Ugljik
CBT	Controlled Bridge Transfer
CBT - EX	Controlled Bridge Transfer - Expanded
CC	Constant Current
CMT	Cold Metal Transfer
CO_2	Ugljikov dioksid
Cr	Krom
Cu	Bakar
CV	Constant Voltage
EN - CBT	Electrode Negative – Controlled Bridge Transfer
GMAW	Zavarivanje kontinuiranom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi
He	Helij
KV	Ispitni uzorak s V zarezom kod mjerenja udarnoga rada loma
MIG/MAG	Zavarivanje kontinuiranom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi
Mn	Mangan
Ni	Nikal
O_2	Kisik
P	Fosfor
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
RMD	Regulated Metal Deposition
RMT	Rapid MIG/MAG Technology
S	Sumpor
Si	Silicij
STT	Surface Tension Transfer
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u inertnoj atmosferi

ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	%	Istezljivost
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje
k	-	Stupanj korisnosti postupka zavarivanja
KV	J	Udarni rad loma
m	kg	Masa
P	W	Snaga
Q	kJ/cm	Unos topline
R_e	MPa	Granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
t	s	Vrijeme
U	V	Napon
v_{zav}	cm/min	Brzina zavarivanja
ϑ	°C	Temperatura

SAŽETAK

U teorijskome dijelu rada opisan je MAG postupak zavarivanja i konvencionalni načini prijenosa metala u električnome luku. Osim toga, opisane su modificirane varijante MAG postupka zavarivanja, s posebnim naglaskom na područje štrcajućega luka. Na kraju je detaljno obrađena forceArc varijanta MAG zavarivanja i sve prednosti koje pruža u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje.

U eksperimentalnome dijelu rada provedeno je zavarivanje sučeljenoga I – spoja impulsnim MAG načinom prijenosa metala i forceArc puls modificiranom varijantom. Također, izvršeno je zavarivanje forceArc varijantom u uskome žlijebu s većim duljinama slobodnoga kraja žice. Analizom dobivenih rezultata doneseni su zaključci o prikladnosti upotrebe forceArc varijante MAG zavarivanja u odnosu na konvencionalno pri zavarivanju debelostjenih konstrukcija, kao i o mogućnosti upotrebe forceArc varijante kod zavarivanja u uskim žlijebovima s većim duljinama slobodnoga kraja žice.

Ključne riječi: MAG zavarivanje, modificirani štrcajući luk, forceArc

SUMMARY

The theoretical part of the thesis deals with MAG welding process and the basic methods of metal transfer. In addition, modified variants of MAG welding procedure are described, with particular regard to modified spray transfer variants. Finally, forceArc MAG welding variant is described, including all the benefits it provides in regards to the conventional MAG welding process.

In the experimental part of the thesis, welding of square butt joint was carried out using pulsed MAG welding and forceArc pulse modified variant. Also, narrow groove welding was performed with forceArc modified variant, applying longer wire stickouts. By analyzing the results obtained, conclusions were made on the appropriateness of using forceArc modified variant in relation to conventional MAG welding process for welding of thick – walled components, as well as on the possibility of using forceArc modified variant for narrow groove welding, applying longer wire stickouts.

Key words: MAG welding, modified spray transfer, forceArc

1. UVOD

Razvoj novih materijala potiče usavršavanje postojećih postupaka zavarivanja, a time i definiranje posebnih zahtjeva, od kojih se ističu mogućnost zavarivanja tankih limova, zavarivanje limova prevučenih slojem cinka, zavarivanje nehrđajućih čelika te čelika visokih čvrstoća. Novi zahtjevi koji se postavljaju bili su predmet posebne pažnje u prethodnome desetljeću, što je općenito dovelo do značajnih inovacija na području tehnologije zavarivanja, a posebno kada je u pitanju MAG postupak zavarivanja.

Elektrolučno zavarivanje predstavlja grupu najčešće upotrebljivanih postupaka spajanja, a unutar iste skupine najviše se ističe MAG postupak zavarivanja koji je ostvario daleko najveću praktičnu primjenu. Prije svega, navedeni postupak obilježavaju jednostavnost i fleksibilnost u primjeni te pogodnost za zavarivanje širokoga raspona metala i legura. Današnji industrijski zahtjevi koje MAG postupak mora ispunjavati su povećana učinkovitost samoga procesa, niži troškovi i veća brzina zavarivanja, uz ostvarivanje visoke kvalitete zavarenih spojeva, pri čemu više nema potrebe za visokokvalificiranim zavarivačkim kadrom. S obzirom na mehanizirano dovođenje žice u električni luk postupak je poluautomatski, a iz istoga razloga pogodan je za jednostavnu linearnu ili tvrdu automatizaciju, odnosno robotizaciju unutar fleksibilne radne stanice u spoju s modernim robotom sa šest stupnjeva slobode gibanja. Posljednja izvedba privlači najviše zanimanja, pogotovo u današnjem, izrazito konkurentnome tržištu jer omogućuje najniže troškove rada i najveću produktivnost.

Stalnim napretkom na području elektroničkih komponenti dolazi i do značajnih unaprjeđenja izvora struje za MAG zavarivanje. Tu se ponajviše misli na inverterske uređaje za zavarivanje te njihovu digitalizaciju, čime je ostvarena bolja kontrola i prijenos metala u električnome luku kao rezultat bržega i točnijega upravljanja i regulacije struje i napona zavarivanja. Navedena postignuća omogućila su razvoj suvremenih inačica MAG zavarivanja koje se temelje na modifikacijama postojećih načina prijenosa metala u električnome luku. Primjena modificiranih varijanti MAG zavarivanja pruža mnoge prednosti u odnosu na standardno MAG zavarivanje, a izdvajaju se mogućnost kontroliranoga unosa topline u radni komad, smanjenje deformacija, manje rasprskavanje kapljica rastaljenoga metala i poboljšana penetracija. Kao takvi, modificirani MAG postupci predstavljaju odgovor na zahtjeve tržišta

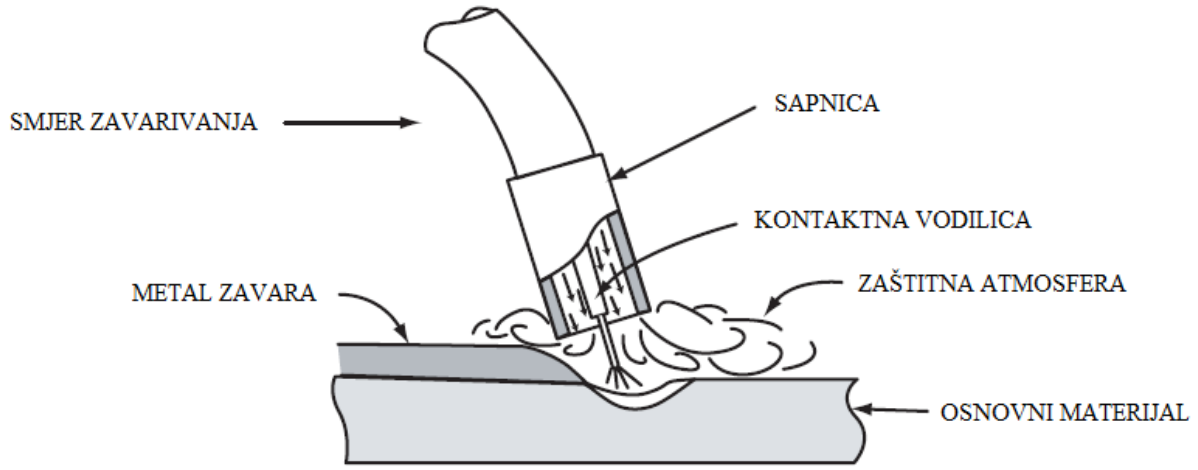
za boljom kvalitetom zavarenih spojeva, većom produktivnosti i nižim troškovima, uz prethodno detaljno provedenom analizom planiranoga područja primjene istih.

2. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MIG/MAG postupak zavarivanja predstavlja elektrolučni postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi inertnoga (MIG – Metal Inert Gas) ili aktivnoga (MAG – Metal Active Gas) plina. Električni luk ostvaruje se između radnoga komada i taljive, kontinuirane elektrode koja je u ovome postupku zavarivanja ujedno i dodatni materijal [1].

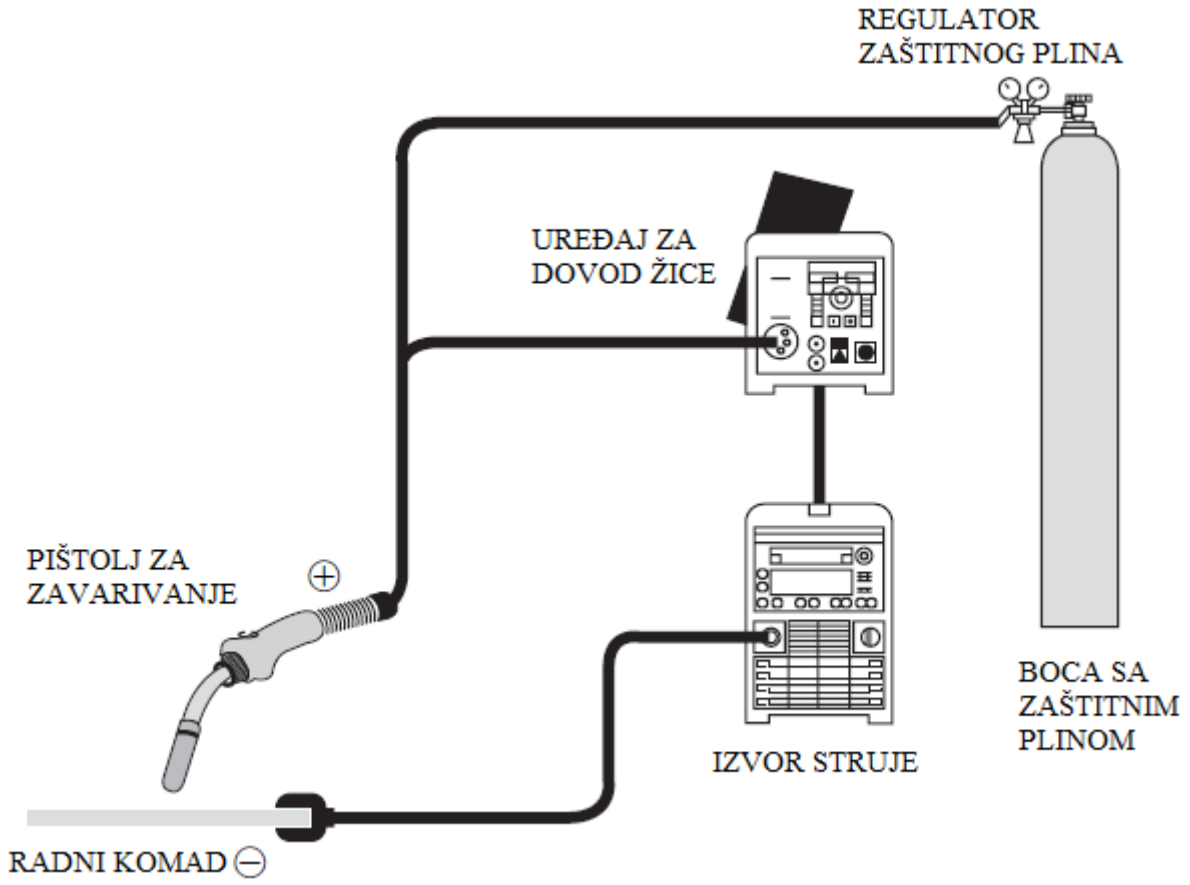
Iako se osnovna načela i razvoj kontinuiranoga električnoga luka za zavarivanje spominju već početkom 19. stoljeća, elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih/aktivnih plinova (MIG/MAG ili GMAW – Gas Metal Arc Welding) primjenu u industriji pronalazi tek sredinom 20. stoljeća. Isti je postupak prvotno namijenjen zavarivanju aluminija, legura na bazi aluminija te ostalih obojenih metala, a veću primjenu u zavarivanju čelika pronalazi razvojem aktivnih plinova i mješavina plinova koje su znatno smanjile cijenu zavarivanja. Razvoj ovoga postupka prije svega je potaknut zbog veće brzine zavarivanja, veće količine rastaljenoga materijala u jedinici vremena, jednostavnoga rukovanja ili automatizacije, zbog čega je i danas jedan od najčešće korištenih postupaka zavarivanja u industriji [1].

Postupak može biti poluautomatizirani (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja ručno) ili potpuno automatizirani, odnosno robotizirani [2]. Slikom 1 prikazan je detalj MIG/MAG postupka zavarivanja.



Slika 1. Detalj MIG/MAG postupka zavarivanja [3]

Osnovna oprema za MIG/MAG zavarivanje sastoji se od izvora struje, uređaja za dodavanje žice, pištolja za zavarivanje, boce sa zaštitnim plinom, regulatora protoka zaštitnoga plina, polikabela te potrebnih električnih vodiča (slika 2). Veći i složeniji sustavi mogu imati još i vodeno hlađenje te mehanizam za ostvarivanje gibanja radnoga komada ili pištolja, a ponekad i oboje. Sustav može biti stacionarni ili prijenosni. U većini slučajeva sustav je namijenjen samo za jedan proces zavarivanja. Međutim, neki proizvođači izrađuju izvore struje koji mogu biti upotrijebljeni i u neku drugu svrhu, tj. za neki drugi postupak zavarivanja [4].



Slika 2. Oprema za MIG/MAG postupak zavarivanja [5]

Kao ključni parametri MIG/MAG procesa izdvajaju se [6]:

- jakost električne struje
- napon električnoga luka
- brzina zavarivanja
- slobodni kraj žice

- vrsta zaštitnoga plina
- protok zaštitnoga plina
- induktivitet
- promjer žice.

Prednosti postupka su sljedeće [7]:

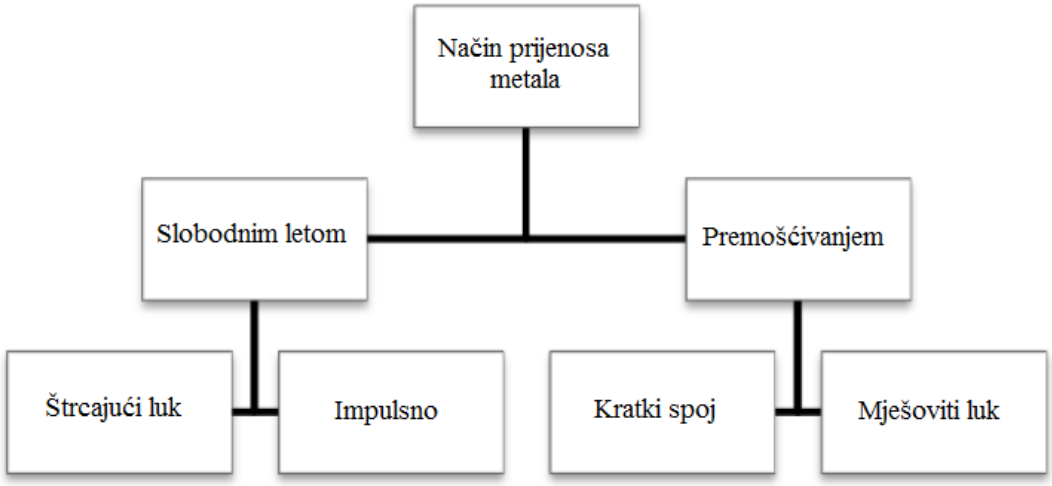
- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala
- zavarivanje u svim položajima
- zavarivanje u radionici i na terenu
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- široki raspon debljina materijala koji se zavaruje
- velika učinkovitost i proizvodnost
- pogodan za automatizaciju
- moguća primjena i za lemljenje.

Neki nedostatci procesa [7]:

- prilikom rada na otvorenome potrebna je zaštita od vjetra
- problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij)
- složeniji uređaji (dovođenje žice i automatska regulacija) i skuplji u odnosu na REL postupak
- povećani broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost)
- pojava rasprskavanja prilikom zavarivanja kratkim spojevima.

2.1. Načini prijenosa metala kod MIG/MAG postupka

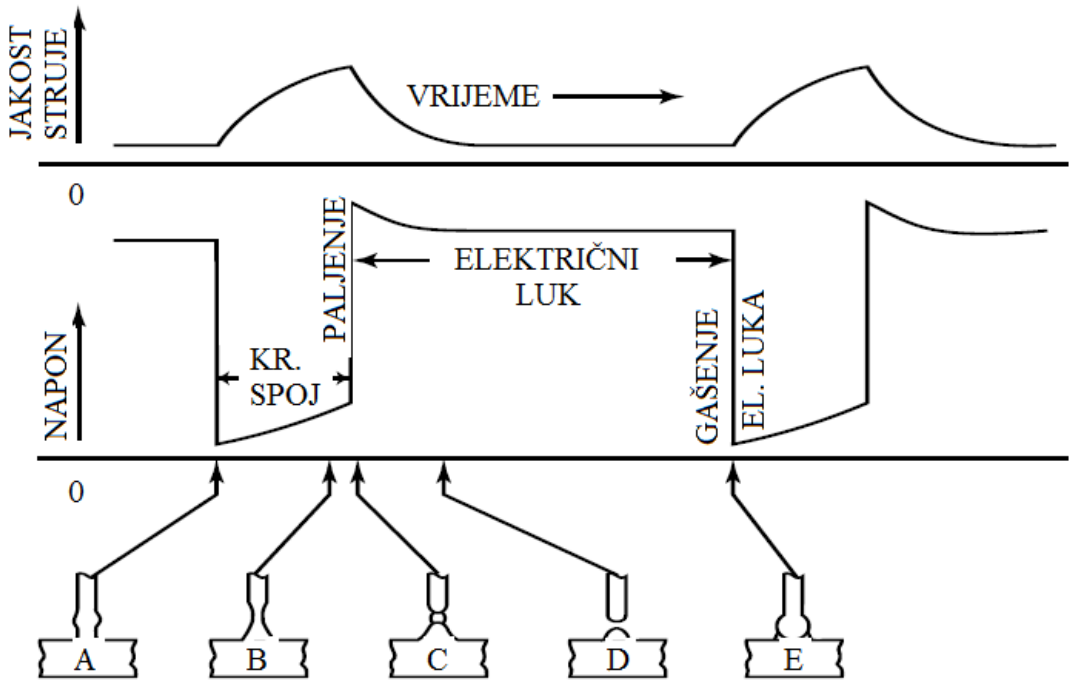
Kod elektrolučnoga zavarivanja taljivom elektrodom postoje dva osnovna načina prijenosa dodatnoga materijala od elektrode do radnoga komada, tj. taline. Materijal se može prenositi slobodnim letom kapljica ili premošćivanjem. Zbog specifičnosti pojava i duljine električnoga luka kod prijenosa premošćivanjem razlikujemo prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom, a kod prijenosa slobodnim letom kapljica štrcajući i impulsni luk [2]. Podjela načina prijenosa metala u električnome luku prikazana je slikom 3.



Slika 3. Podjela načina prijenosa metala u električnome luku [8]

2.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenosom metala kratkim spojevima dolazi do taljenja kontinuirano dobavljane žice pomoću električnih kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Kod prijenosa kratkim spojevima, ovisno o promjeru žice, koriste se male struje zavarivanja (od 50 A do 170 A), niski naponi (od 13 V do 21 V) te zaštitni plin CO_2 ili mješavine (CO_2 + Ar, CO_2 + Ar + O_2). Glavne značajke su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnoga materijala vrši pri fizičkome dodiru elektrode i osnovnoga materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkih spojeva i fazu električnoga luka [9]. Slikom 4 dan je dijagramski prikaz ovisnosti struje i napona tijekom kratkoga spoja.



Slika 4. Dijagramski prikaz ovisnosti struje i napona tijekom kratkoga spoja [10]

Objašnjenje faza prijenosa kapljica metala električnim lukom kratkoga spoja [10]:

A. Elektroda ostvaruje fizički kontakt s rastaljenim metalom, napon luka se približava nuli, a jakost struje se povećava, brzina porasta struje ovisi o količini primijenjenog induktiviteta

B. Ova točka pokazuje utjecaj elektromagnetskih sila koje su podjednako aktivne oko elektrode, napon počinje polagano rasti s vremenom prije odvajanja, dok jakost struje nastavlja rasti ka vršnoj vrijednosti

C. U ovoj točki dolazi do odvajanja kapljice od vrha elektrode, jakost struje postiže maksimalnu vrijednost

D. Kratki spoj završava te za vrijeme silazne putanje jakosti struje prema nultoj vrijednosti počinje stvaranje nove kapljice

E. Elektroda ponovno dolazi u dodir sa rastaljenim metalom i priprema se prijenos nove kapljice, učestalost toga je između 20 i 200 puta u sekundi, frekvencija kratkoga spoja je uvjetovana veličinom induktiviteta i vrstom zaštitnoga plina, dodatak argona povećava frekvenciju kratkih spojeva i snižava veličinu kapljice.

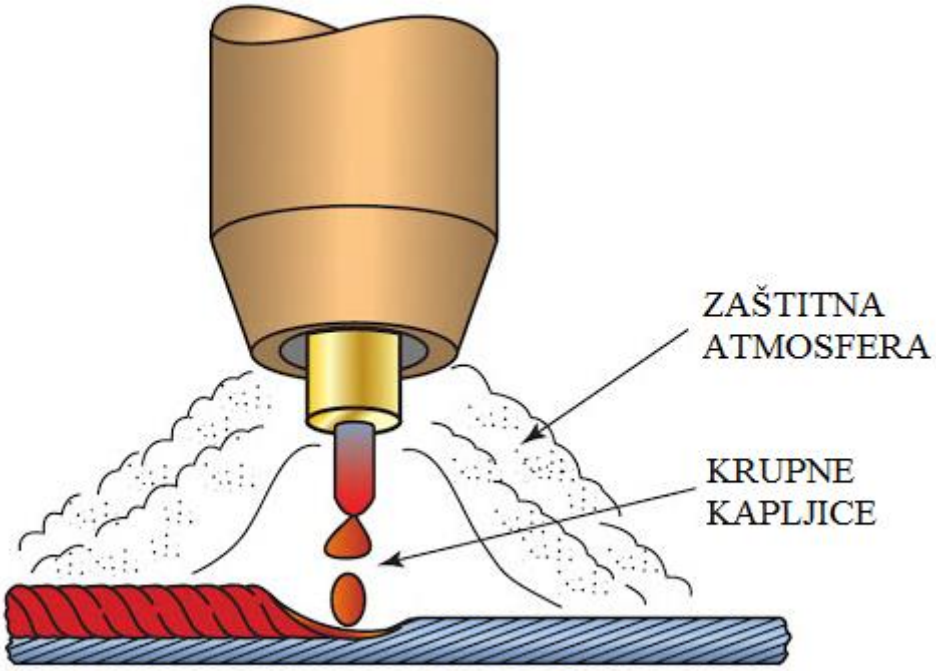
Zbog maloga unosa topline posebno je pogodan za zavarivanje tanjih materijala (0,6 – 5,0 mm), a često se koristi pri zavarivanju korijena cijevi. Elektrode koje se koriste pri ovome načinu prijenosa metala promjera su od 0,6 mm do 1,1 mm, a pri tome je zaštitna atmosfera 100 % CO_2 ili smjesa 75 – 80 % Ar i 20 – 25 % CO_2 [10].

2.1.2. Prijenos metala mješovitim lukom

Kod prijenosa metala mješovitim lukom pojavljuje se prijenos štrcajućim lukom, ali se povremeno pojavi jedan ili više kratkih spojeva. Odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrodne žice koja se pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja i pada u talinu bez kratkoga spoja. Pojedine kapljice, ovisno o duljini električnoga luka, gustoći i jakosti struje te naponu luka, mogu toliko narasti da u određenom trenutku dodirnu talinu čime nastupa kratki spoj [9].

Za postizanje prijenosa metala mješovitim lukom prikladne su veće struje zavarivanja (od 170 A do 235 A) i naponi (od 22 V do 25 V), ovisno o promjeru žice. Takvi parametri uzrokuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu. Preporučuje se korištenje mješovitoga luka u kombinaciji sa što inertnijim zaštitnim plinom, kako kapljice koje prelijeću kroz luk ne bi reagirale sa plinom i donijele neželjene elemente u metal zavara. Često se događa da se kapljica prilikom dodira sa rastaljenom talinom rasprsne. Iako se ovom vrstom luka može zavarivati velikim brzinama uz jeftinu opremu, u novije vrijeme zamijenjen je novim, naprednijim postupcima zbog skupe naknadne obrade koja je često potrebna zbog rasprskavanja kapljica metala [9, 11].

Slikom 5 prikazan je prijenos metala mješovitim lukom.



Slika 5. Prijenos metala mješovitim lukom [4]

Tijekom mješovitoga električnoga luka preporučuje se koristiti inertni plin (Ar + He) zbog nasilnoga odvajanja kapljica koje nepravilnim preletom do rastaljene kupke metala mogu navući neželjene elemente u metal zavara. Zavarivanje pomoću prijelaznoga električnoga luka je obilježeno mješovito stabilnim radom u kratkom spoju te nestabilnim radom štrcajućim lukom gdje se kapljice nepravilno formiraju te prilikom dodira sa rastaljenom talinom često nasilno rasprskuju [12].

Prilikom zavarivanja uz niske vrijednosti napona struje električni luk je vrlo kratak te se veći dio žice elektrootporno zagrijava i sudara s radnim komadom, a zbog visokoga unosa topline kapljica vrlo intenzivno rasprskava. Zavarivanje provedeno uz više vrijednosti napona struje manifestira visok električni luk koji ne zagrije radni komad i kraj žice dovoljno, čime se događa naljepljivanje ili nedovoljno protaljivanje te nagomilavanje zavara [12].

Posebni problemi javljaju se prilikom korištenja CO_2 zaštitnoga plina, koji ipak ostaje dominantan u području zavarivanja konstrukcijskih čelika zbog komercijalnih i praktičnih razloga. Zbog disocijacije plina CO_2 se stvara vrlo reaktivna smjesa koja je nepravilnom tehnikom rada sklona usisavanju nečistoća iz okolnoga zraka, sagorijevanjem legirnih elemenata te mjestimična oksidiranja taline zavara. Također se može primijetiti da se

električni luk ne prekriva u potpunosti sa stupom plazme električnoga luka te su zbog toga prilike za ulazak nečistoća i oksidiranje zavara povećane. Kako bi se ublažio efekt rasprskavanja, preporučeno je smanjiti visinu električnoga luka, čime se smanjuje i napon struje. Time se dobiva ukopani električni luk čiji je vrh elektrode ispod razine vrha taline. Unatoč ograničenjima, pronalaženje pravog seta parametara u kombinaciji sa vještinom zavarivača ovaj proces mogu učiniti industrijski vrlo prikladnim [12].

2.1.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

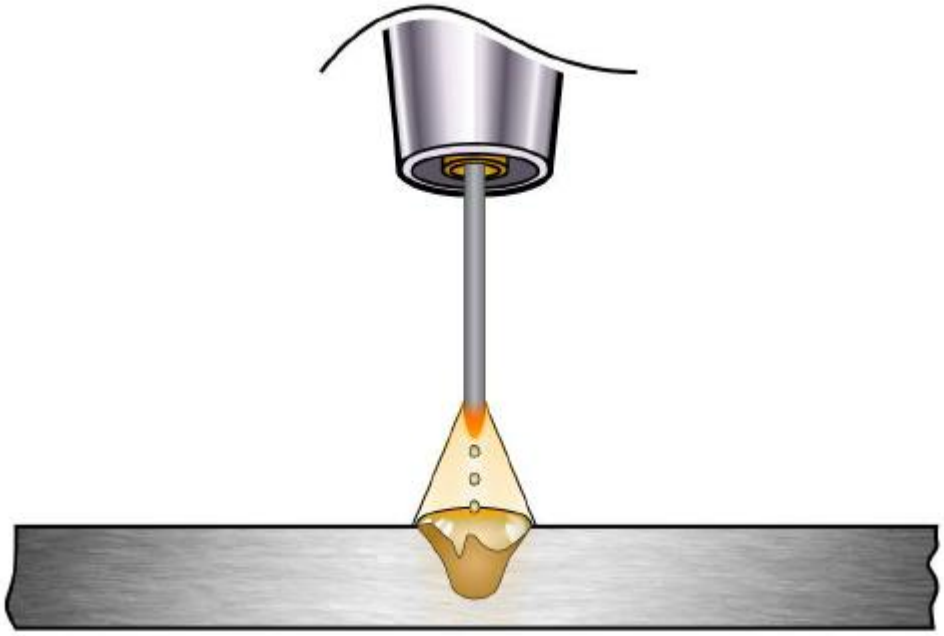
Prijenos metala štrcajućim lukom način je prijenosa metala u električnome luku kojeg karakterizira veliki unos topline pri čemu se kontinuirano dobavljana žica tali uslijed topline i u obliku malih kapljica, slobodnim padom putuje duž električnoga luka bez da elektroda dodiruje radni komad. Parametri zavarivanja su veći nego kod prethodnih načina prijenosa metala, vrijednosti napona su između 25 V i 40 V, dok je jakost struje između 200 A i 600 A [7, 10].

Da bi se postigao način prijenosa metala štrcajućim lukom koriste se plinske mješavine Ar + 1 – 5 % O_2 i Ar + CO_2 (udio CO_2 mora biti 18 % ili manji). Ovaj prijenos metala se može koristiti kod većine legura, uključujući: aluminij, magnezij, ugljični čelik, nehrđajući čelik, legure nikla i legure bakra [10].

Kod zavarivanja ugljičnih čelika, prijenos metala štrcajućim lukom koristi se pri većim debljinama osnovnih materijala uglavnom za zavarivanje kutnih i sučeljenih spojeva. Upotrebom zaštitne atmosfere od 95 % Ar i 5 % O_2 dobiva se duboka penetracija u obliku prsta, dok plinske mješavine koje sadrže više od 10 % CO_2 smanjuju penetraciju i daju zaobljeniji zavar [10].

Odabir ovoga načina prijenosa metala ovisi o debljini osnovnoga materijala te o mogućnosti pozicioniranja spoja u vodoravni položaj zavarivanja. Izgled gotovoga zavarenoga spoja je izvrstan i operaterima pogoduje rad ovim načinom prijenosa materijala. Najbolji rezultati se postižu ovim postupkom kada je spoj kvalitetno pripremljen [10].

Slika 6 prikazuje prijenos metala štrcajućim lukom.



Slika 6. Prijenos metala štrcajućim lukom [13]

2.1.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Ovaj prijenos naziva se još i visoko kontrolirana varijanta prijenosa materijala štrcajućim lukom. Proces stvaranja kapljice i održavanja električnoga luka isti je kao i kod štrcajućeg luka. U trenutku kada se kapljica treba odvojiti od žice, uređaj pojačava jakost struje zavarivanja. Djelovanjem veće struje, kapljica prije dolazi u talinu zavara nakon čega vrijednost struje pada na početnu i osigurava stabilnost električnoga luka. Proces se ponavlja u određenim vremenskim razmacima koji se prilagođavaju po potrebi [11].

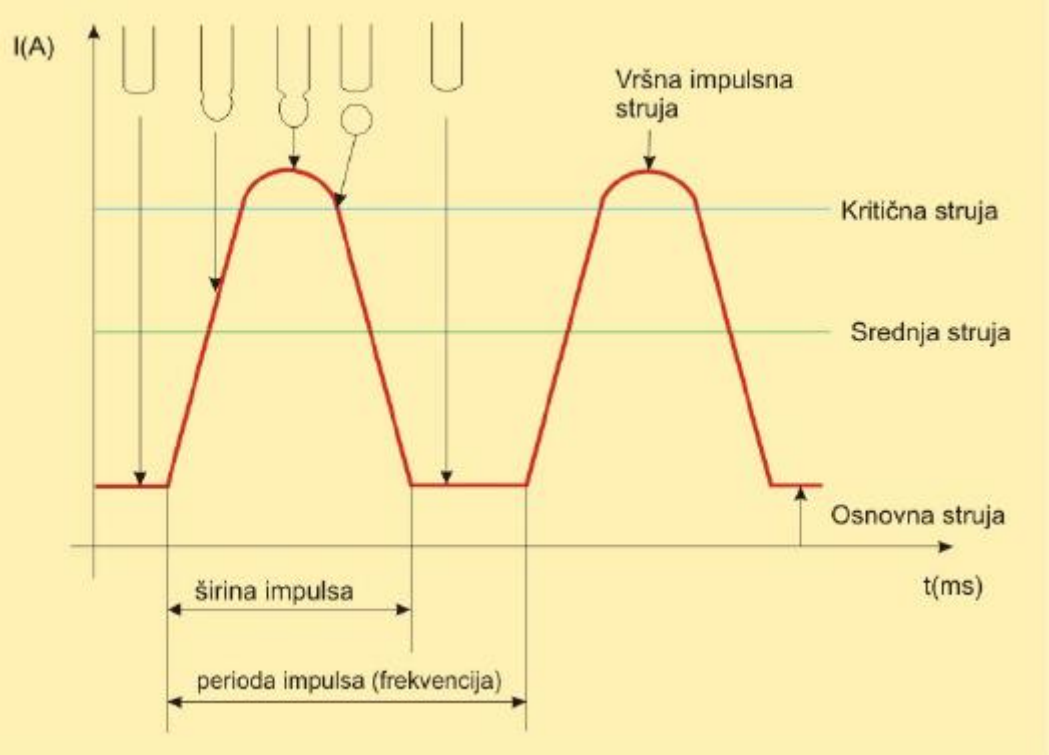
Impulsnim načinom prijenosa kapljica osigurava se stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja kapljica. Daljnje mogućnosti razvoja i primjene postupka omogućili su digitalno upravljani tranzistorski izvori kojima je moguće stvarati impulse proizvoljnoga oblika što znači da je moguće utjecati na način odvajanja i veličinu kapljice. Ovisno o načinu proizvodnje impulsa kod zavarivanja, mogu se koristiti sinusoidalni oblik impulsa, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznoga ili trokutastoga. Kod prijenosa impulsnim lukom metal se prenosi bez kratkih spojeva, a najvažnije sile koje utječu na prijenos su elektromagnetska sila i sila površinske napetosti. Upravo je mogućnost upravljanja elektromagnetskom silom omogućilo razvoj impulsnih struja [9].

Ovaj način prijenosa metala razvijen je iz dva glavna razloga, kontrole rasprskavanja tijekom zavarivanja i radi uklanjanja nedovoljnoga protaljivanja svojstvenog prijenosu prijelaznim lukom i kratkim spojevima. Prva primjena ovoga načina prijenosa metala bila je kod zavarivanja trupa broda u prisilnome položaju, a u pitanju je bio niskolegirani osnovni materijal visoke čvrstoće [10].

Postoji pet osnovnih parametara koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk kod impulsnoga zavarivanja [14]:

1) Vršna impulsna struja, koja se određuje prema vrsti osnovnoga materijala, promjera žice i mješavine zaštitnoga plina, obično se kreće u granicama od 250 – 600 A.
2) Osnovna struja služi da onemogući gašenje luka nakon prestanka impulsa, podešava se na što manju vrijednost i obično se kreće u granicama od 20 A do 50 A. Veća struja povećava stabilnost, ali i unesenu energiju i duljinu luka.
3) Širina impulsa, odabire se tako da omogući odvajanje samo jedne kapljice tijekom trajanja impulsa, kreće se u granicama od 1 – 3 ms.
4) Frekvencija je parametar koji zapravo predstavlja broj kapljica u sekundi, a odabire se tako da kod određene brzine žice odvajanje kapljica bude stabilno, podešava se u području od 20 – 300 Hz.
5) Brzina žice je parametar kojim se određuje količina rastaljenoga materijala i kojem je podređeno podešavanje ostalih parametara, zavisno od promjera žice kreće se u granicama od 2 do 15 m/min.

Na slici 7 prikazan je električni impuls i njegovi pripadajući parametri.



Slika 7. Prikaz električnog impulsa i njegovih pripadajućih parametara [14]

Pored ovih parametara postoji još nekoliko korekcijskih faktora koji se moraju podesiti kako bi se osigurao potpuno stabilan luk i željeni način prijenosa metala. Jasno je da zbog kompleksnosti nije moguće prepustiti zavarivaču podešavanje uređaja pa moderni uređaji za to koriste programske, obično mikroprocesorske jedinice u kojima su pohranjeni podatci o pojedinim parametrima i njihovoj međusobnoj povezanosti u odnosu na materijal i zaštitni plin. Zavarivač nakon odabira ponuđene kombinacije materijala, promjera žice i zaštitnoga plina postavlja samo jedan parametar (obično brzinu žice), a uređaj sve ostalo (impulsnu struju, širinu impulsa, osnovnu struju, frekvenciju, korekcijske faktore). Ovakav način sinkroniziranoga podešavanja parametara u praksi je poznat kao Synergic [14].

Pri ovoj vrsti prijenosa najčešće se koriste pune elektrode promjera 0,8 – 1,6 mm i praškom punjene elektrode promjera 1,1 – 2,0 mm. Moguće je zavarivanje širokoga raspona materijala u što se ubrajaju ugljični i niskolegirani čelici, aluminij, nehrđajući čelici, legure nikla itd. Debljine osnovnih materijala koje se mogu zavarivati ovim načinom prijenosa metala su od 1 mm nadalje. Zaštitni plinovi koji podržavaju prijenos metala impulsnim lukom su argon ili smjese bogate argonom (kod zavarivanja ugljičnih čelika dodaje se maksimalno 18 % CO_2) [10, 12].

3. MODIFICIRANE VARIJANTE MAG POSTUPKA ZAVARIVANJA

U proteklih desetak godina kontinuirano se na tržištu i u industrijskoj primjeni pojavljuju nove inačice MAG zavarivanja koje su nastale na temelju zahtjeva za povećanjem produktivnosti, uvođenjem zahtjevnih vrsta osnovnih materijala (visokočvrsti čelici, duplex čelici, pocinčani limovi, legure nikla, aluminijske legure), smanjenjem deformacija, kontroliranim unosom topline, korozijskom postojanošću zavarenoga spoja, smanjenjem prskanja, potrebom spajanja tankih limova te mogućnošću za povezivanjem s robotskim stanicama. Ovi zahtjevi rezultirali su pojavom više alternativa MIG/MAG zavarivanja koji se vrlo često deklariraju kao posebni postupci zavarivanja, iako se u osnovi radi o postupku MAG (135) ili MIG (131) [15].

Ono što omogućuju novi koncepti MIG/MAG zavarivanja je svojevrsna interakcija različitih opcija prijenosa materijala u području parametara i energijskog nivoa gotovo neprimjenjivog kod konvencionalnih postupaka i izvora struje za zavarivanje. Suvremeni postupci MAG zavarivanja se odlikuju modificiranim načinima prijenosa metala kojima je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući luk i impulsna struja. To se postiže kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja (engl. *Waveform control*), indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu metala (površinska napetost), kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istom radnom ciklusu, promjenom balansa polariteta i uvođenjem izmjenične struje te uvođenjem mehaničkoga upravljanja odvajanja kapljice koja kompenzira vrlo mali unos topline koji je u konvencionalnom sustavu nedostatan za odvajanje dodatnoga materijala. Danas su zahvaljujući razvoju uređaja moguće integracije dvije impulsne razine u istom procesu. Važno je naglasiti da se kontrola procesa provodi u svakom trenutku diskretizacijom vrijednosti, tj. primjenom digitalne tehnologije [15].

Suvremeni postupci MAG zavarivanja primjenjuju sve nabrojene mehanizme kako bi se olakšalo zavarivanje tankih materijala, smanjio unos topline i deformacije, omogućilo lakše zavarivanje korijenskog prolaza, raznorodnih materijala te povećanih razmaka između limova. Međutim, osim ovih prednosti koje u biti predstavljaju zavarivanje u području razine parametara kratkih spojeva, razvijeni su i sustavi modificiranog štrcajućeg luka koji se odlikuju znatno poboljšanom penetracijom [15].

3.1. Modificirani prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima kombinira niske struje zavarivanja (mali unos topline) i male promjere dodatnoga materijala s ponavljajućim kratkim spojevima između žice i rastaljenoga metala zavara, čineći proces prikladnim za zavarivanje tankih materijala, korijenskih prolaza te za izvođenje zavarivanja u svim položajima, za što je potrebna značajna kontrola taline zavara. Međutim, glavni nedostatak klasičnoga prijenosa metala kratkim spojevima je rasprskavanje, koje je povezano s odvajanjem rastaljene kapljice s vrha elektrode povećanjem elektromagnetske sile, tj. porastom struje. Taj znatni porast struje od ključnoga je značenja za uravnoteženje prijenosa metala, a time i za smanjenje ili eliminaciju rasprskavanja [16].

Kako bi se tome stalo na kraj, različiti proizvođači opreme za zavarivanje pronašli su nekoliko rješenja, od kojih se sva temelje na poboljšanju upravljivosti i stabilnosti strujnoga profila s ciljem smanjenja rasprskavanja i unaprjeđenja kontrole unosa topline. Da bi to bilo moguće, svi sustavi koriste digitalno upravljane izvore struje za zavarivanje s točnijim nadzorom valnoga oblika struje i napona zavarivanja. Primjeri takvih sustava su Froniusov CMT, Lincolnov STT, Kemppijev FastROOT, Daihenov CBT te Millerov RMD [17].

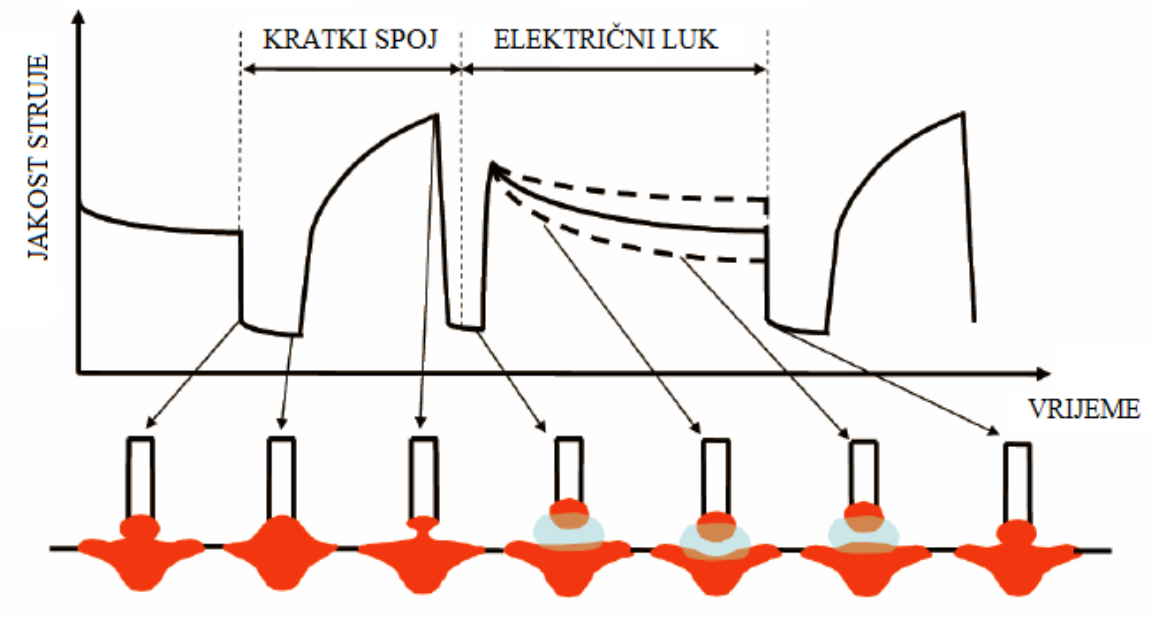
3.1.1. Controlled Bridge Transfer

U automobilskoj industriji i industriji motocikala zagovara se upotreba tankih metalnih limova u svrhu smanjivanja mase karoserija i reduciranja rasprskavanja tijekom zavarivanja kako bi se smanjila količina industrijskoga otpada i dodatni troškovi povezani s naknadnim uklanjanjem posljedica rasprskavanja. Pri prijenosu metala kratkim spojevima rasprskavanje se uglavnom pojavljuje u trenutku ponovne uspostave električnoga luka, odmah nakon kratkog spoja. Kako bi se to eliminiralo predložena je posebna metoda kojom se opaža odvajanje kapljice metala na vrhu elektrode za vrijeme kratkoga spoja i potom brzo snižava struja zavarivanja prije ponovne uspostave električnoga luka kako bi se rastaljeni metal prenio u talinu zavara samo pomoću mehanizma površinske napetosti [18].

Kod metoda kojima se želi smanjiti rasprskavanje brzim smanjivanjem struje zavarivanja prije ponovne uspostave električnoga luka potrebno je točno predvidjeti trenutak ponovne uspostave. Međutim, taj izračun vremena može odstupati ovisno o smetnjama koje mogu biti prouzrokovane produljenjem žice, brzinom zavarivanja, položajem zavarivanja, veličinom,

oblikom i viskoznosti kapljice rastaljenoga metala te oscilatornim gibanjem taline zavara. Stoga, kako bi se ostvarila stabilna kontrola rasprskavanja, potrebno je razviti posebnu metodu za predviđanje ponovne uspostave električnoga luka koja je otporna na moguće poremećaje. Tako je naposljetku došlo do razvoja novoga načina prijenosa metala koji kombinira prednosti impulsnoga i konvencionalnoga MIG/MAG zavarivanja – CBT (engl. *Controlled bridge transfer)* načina prijenosa metala [18].

Princip rada CBT MIG/MAG postupka zavarivanja prikazan je na slici 8.

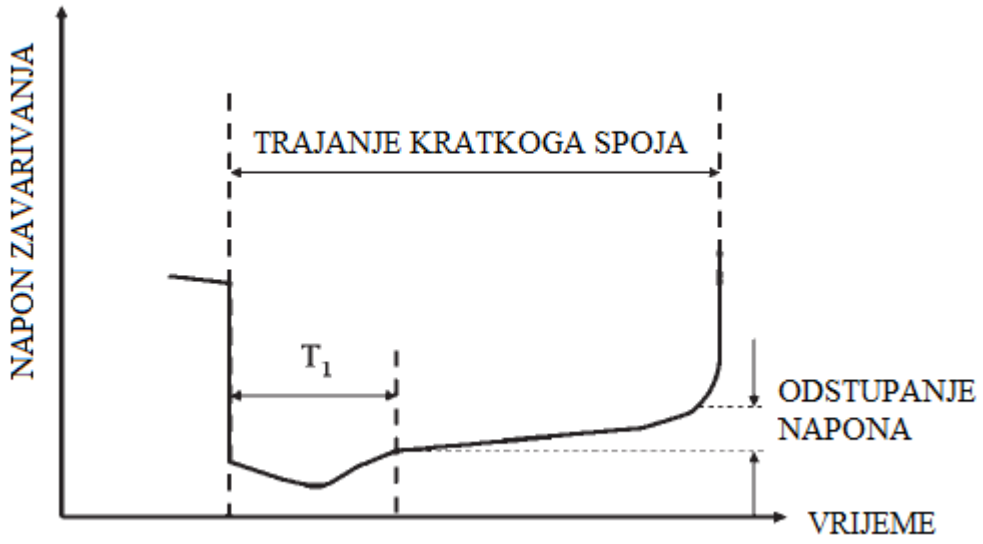


Slika 8. Princip rada CBT MIG/MAG postupka zavarivanja [18]

Pojava rasprskavanja je najproblematičnija i najčešća pri MIG/MAG zavarivanju kratkim spojevima odmah nakon prekida kratkoga spoja, odnosno u trenutku ponovne uspostave električnoga luka. U tom trenutku na rastaljeni metal djeluje sila pinch efekta te ako se želi smanjiti rasprskavanje potrebno je precizno odrediti iznos pada napona u trenutku neposredno prije uspostave električnoga luka. Zajedno s padom napona u istom trenutku dolazi do pada vrijednosti jakosti struje. Posljedica pada vrijednosti jakosti struje je prijenos rastaljenog metala s vrha elektrodne žice isključivo pomoću površinske napetosti. Kako bi se nadoknadio gubitak energije zbog smanjenja jakosti struje u kratkom spoju i na taj način postigla odgovarajuća veličina kapljice metala, u trenutku kada je električni luk uspostavljen jakost

struje se naglo povećava. Princip rada CBT metode temelji se na preciznom podešavanju jakosti struje optimalno prema varijabilnom parametru, naponu električnog luka [19].

Slikom 9 prikazan je princip preciznog predviđanja trenutka ponovne uspostave električnoga luka pomoću mjerenja napona zavarivanja. Nakon uspostave kratkoga spoja vrijednost napona pada u ovisnosti sa vrijednosti jakosti struje kako bi se lakše kontrolirala pojava rasprskavanja. Period kratkoga spoja u kojemu napon još nije počeo rasti je označen s T_1 i napon u tom području se smatra referentnim naponom. Daljnje se odstupanje od referentnoga napona mjeri često i precizno te kada odstupanje dosegne određenu graničnu vrijednost dolazi do ponovnog uspostavljanja električnoga luka [20].

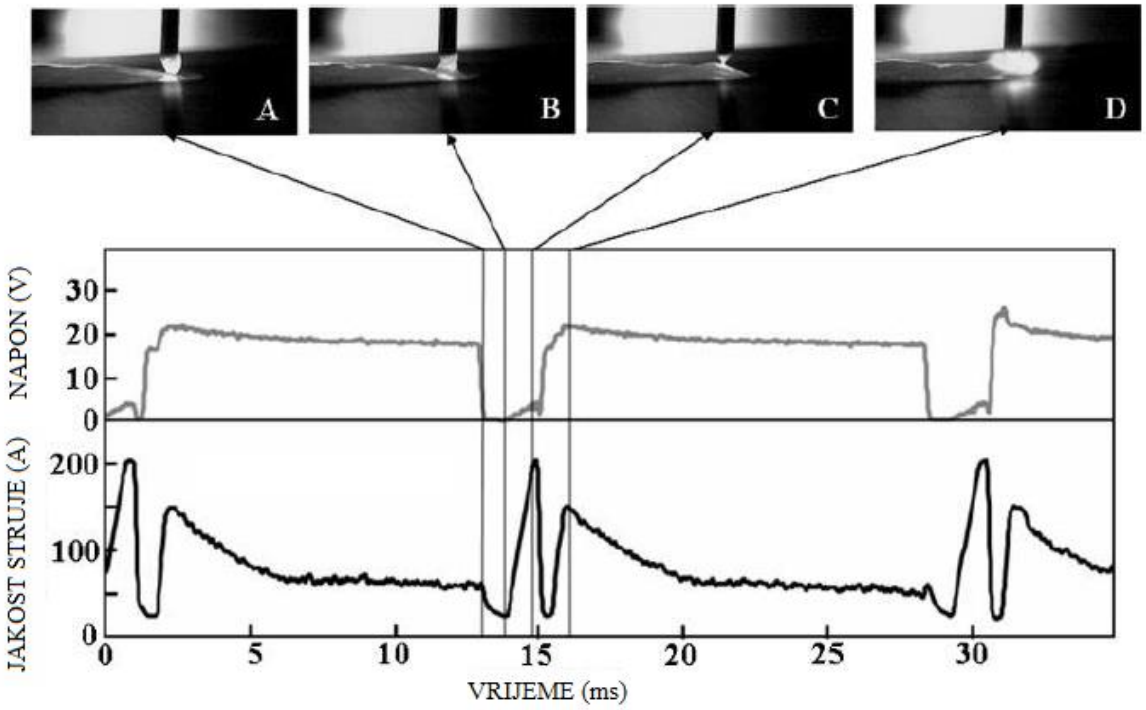


Slika 9. Princip preciznoga predviđanja ponovne uspostave električnoga luka [20]

Kod MAG postupaka zavarivanja sa zaštitnim plinom 80 % Ar + 20 % CO_2 optimalno odstupanje napona je u rasponu od 1,2 V do 2,0 V. Nužno je predvidjeti točan trenutak ponovne uspostave električnoga luka koji može odstupati zbog različitih nepravilnosti kao što su duljina slobodnoga kraja žice, brzina zavarivanja, položaj zavarivanja, veličina, oblik i viskoznost rastaljene kapljice metala te ponašanje taline. Preciznim predviđanjem uspostave električnoga luka i smanjivanjem struje neposredno prije uspostave električnoga luka, rastaljena kapljica se prenosi u talinu zavara samo pomoću sila površinske napetosti i rasprskavanje se uspijeva kontrolirati [20].

Opisana tehnologija zavarivanja rezultira smanjenjem ili u potpunosti eliminacijom rasprskavanja. Zbog precizno kontroliranoga procesa i smanjenoga unosa topline omogućuje se zavarivanje korijenskih prolaza s većim razmacima kao i zavarivanje ploča debljine manje od promjera dodatnoga materijala (što uvelike utječe na troškove izrade konstrukcije) [19].

Na slici 10 prikazan je prijenos rastaljene kapljice metala s elektrode u osnovni materijal pri CBT varijanti MAG zavarivanja, koji je snimljen pomoću visokobrzinske kamere te je u korelaciji s promjenom struje i napona zavarivanja. Zavarivanje je provedeno uz korištenje pune žice promjera 1,0 mm, prosječnom strujom zavarivanja od 80 A, prosječnim naponom 16,2 V i brzinom zavarivanja od 50 cm/min. Zaštitni plin koji je pri tome bio korišten je 80 % Ar + 20 % CO_2 [20].



Slika 10. Faze prijenosa metala pri CBT varijanti MAG zavarivanja ovisno o vremenu [20]

Kadar A na slici 10 prikazuje trenutak odmah nakon prekida kratkoga spoja. Prolaskom vremena, na kadrovima B i C moguće je vidjeti prijenos rastaljene kapljice prema talini zavara te njen stisnuti oblik na vrhu žice. Kadar C prikazuje trenutak prije ponovne uspostave električnoga luka kada je jakost struje već smanjena, tako da kada se ponovno uspostavi električni luk (kadar D), ne dođe do pojave rasprskavanja [20].

Postoje tri inačice CBT varijante MAG zavarivanja, a to su EN – CBT, AC – CBT i CBT – EX postupci. EN – CBT (engl. *Electrode Negative CBT*) je postupak u kojem je žica spojena na negativni pol što omogućuje mali unos topline i smanjuje rasprskavanje. Pri ovome postupku toplina u žici je veća nego toplina u osnovnome metalu te je brzina taljenja žice veća nego kod običnog CBT postupka, tj. za isti depozit pri EN – CBT postupku je manji unos topline. AC – CBT (engl. *Alternating Current CBT*) je inačica CBT postupka kod koje se koristi izmjenična struja male frekvencije. Precizna kontrola karakteristika električnog luka za vrijeme oba polariteta omogućava stabilnost ovoga postupka. Prednost istoga postupka je smanjenje penetracije s povećanjem omjera negativnoga polariteta. Omogućeno je kontroliranje profila zavara i precizna kontrola unosa topline te višestruko smanjenje rasprskavanja. CBT – EX (engl. *CBT Expanded*) je inačica CBT postupka zavarivanja koja je nastala kao odgovor na zahtjeve za većom produktivnosti CBT postupka i većim brzinama zavarivanja uz visoku kvalitetu zavarenog spoja. U ovome postupku pojačavaju se parametri zavarivanja što dovodi do krupnokapljičastog prijenosa metala. Time se poboljšava produktivnost i raste brzina zavarivanja uz smanjenje unosa topline i manje rasprskavanje [21].

3.1.2. Cold Metal Transfer

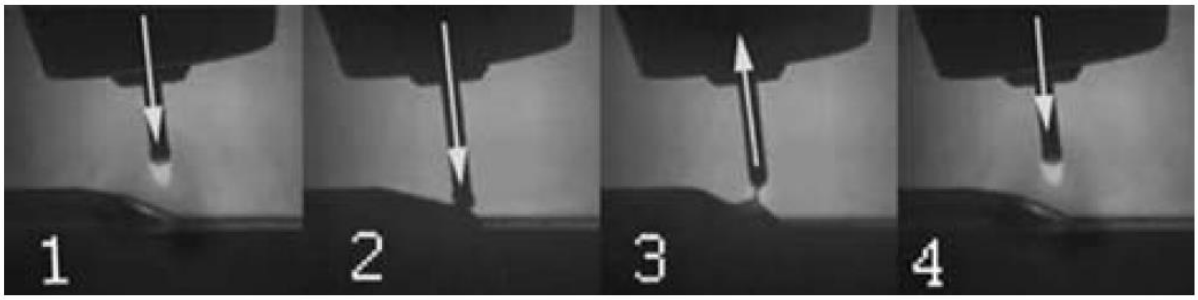
Nakon mnogo godina istraživanja i razvoja, tvrtka Fronius iz Austrije predstavila je novu modifikaciju MAG postupka zavarivanja nazvanu CMT (engl. *Cold Metal Transfer*). CMT proces se temelji na prijenosu metala kratkim spojevima, no tome je dodan novi način odvajanja rastaljene kapljice sa žice dodatnoga materijala [22].

Tri su značajke CMT postupka koje predstavljaju razliku u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje kratkim spojevima [23].

Prije svega, gibanje žice je izravno uključeno u upravljanje procesa zavarivanja. Sve do sad je brzina dodavanja žice za vrijeme zavarivanja bila nepromjenljiva ili je imala predodređeni vremenski raspored. Kod CMT postupka žica se giba prema radnome komadu sve dok ne dođe do pojave kratkoga spoja. U tome trenutku brzina žice mijenja pravac i žica se počinje kretati unazad. Kad dođe do prekida kratkoga spoja brzina žice ponovno mijenja smjer te se žica ponovno giba ka radnome komadu i započinje novi ciklus. Ovdje nema unaprijed definiranoga vremenskoga rasporeda, no uspostava i prekid kratkoga spoja određuju brzinu i

smjer gibanja žice. Dakle, gibanje žice definira što se događa u talini zavara, a isto tako ono što se događa u talini zavara utvrđuje gibanje žice [23].

Slikom 11 prikazane su faze CMT postupka zavarivanja.

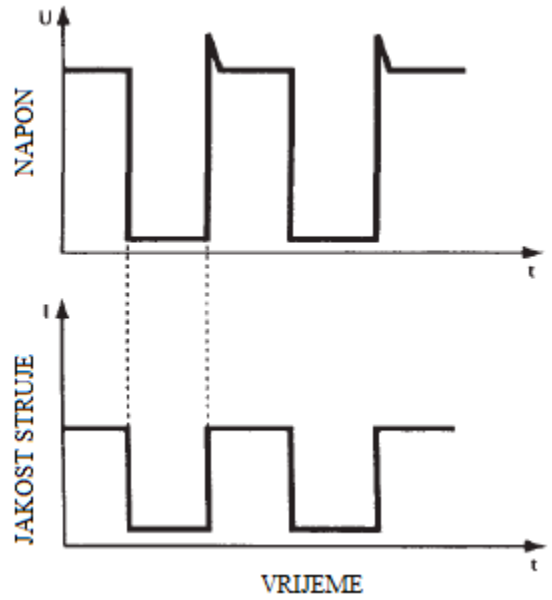


Slika 11. Faze CMT postupka zavarivanja [24]

Kod CMT postupka može se govoriti samo o prosječnoj frekvenciji prilaska i odmicanja žice. Kada se kratki spoj ranije ostvari, povlačenje žice će također biti ranije. Kada se kratki spoj ostvari nešto kasnije, odmicanje žice će također započeti nešto kasnije. Stoga, frekvencija osciliranja žice odstupa s vremenom, a prosječna frekvencija oscilatornoga gibanja žice je do 70 Hz [23].

Druga značajka koja karakterizira CMT postupak temelji se na činjenici da je prijenos metala pri ovome postupku skoro pa neovisan o struji zavarivanja, dok je kod konvencionalnoga zavarivanja u području kratkih spojeva upravo visoka struja kratkoga spoja ta koja igra ključnu ulogu u prijenosu metala. Kod CMT procesa prekid kratkoga spoja više ne ovisi o struji zavarivanja. Ovdje se žica krene gibati unazad, a to gibanje potpomaže daljnji prijenos rastaljenoga metala koji se tad odvija mehanizmom površinske napetosti. Tako da struja zavarivanja za vrijeme kratkoga spoja može biti jako mala kao i s time povezani niski unos topline u radni komad [23].

Na slici 12 shematski je prikazan odnos između struje i napona zavarivanja pri CMT procesu.



Slika 12. Shematski prikaz odnosa struje i napona zavarivanja pri CMT procesu [22]

I kao treća značajka CMT procesa izdvaja se činjenica da je prijenos metala potpomognut kretanjem žice, kao što je već spomenuto ranije [23].

3.1.2.1. Prednosti CMT postupka

Kod konvencionalnoga zavarivanja kratkim spojevima potrebna je velika struja za vrijeme te faze kako bi ga prekinula. Kod istoga se kratki spojevi relativno nekontrolirano prekidaju, a rezultat toga je povećano rasprskavanje kapljica metala [23].

Pri CMT procesu struju zavarivanja za vrijeme trajanja kratkoga spoja može se održavati vrlo niskom. Nadalje, kratki spojevi se ne prekidaju nekontroliranim putem, već se zbog odmicanja žice prekidaju na vrlo kontrolirani način. Na temelju ta dva podatka dobivaju se zavareni i zalemljeni spojevi bez prisutnoga rasprskavanja. To je ostvarivo ukoliko se radi s uobičajenim kutovima nagiba pištolja za zavarivanje. Malo rasprskanih kapljica metala može se pojaviti jedino u slučajima zavarivanja izrazito neprikladnim kutovima nagiba pištolja. Takvo rasprskavanje je uzrokovano kretanjem taline, a ne samim zavarivačkim postupkom. Kako pri CMT postupku gotovo nema rasprskavanja, korisnicima omogućava uštedu i vremena i novaca koje bi potrošili na naknadno uklanjanje posljedica rasprskavanja [23].

Još jedna prednost CMT postupka je vrhunska mogućnost upravljanja duljinom električnoga luka. Pri standardnim MAG postupcima u svrhu utvrđivanja duljine električnoga luka mjeri se

napon zavarivanja. No napon zavarivanja nije samo funkcija duljine električnoga luka, već varira ovisno o stanjima površine radnih komada (prisutnost oksida, masnoće). Prema tome, nadzor duljine električnoga luka može biti narušen varijacijama površinskih stanja osnovnih materijala koji se zavaruju [23].

Kod CMT postupka žica se giba prema radnome komadu sve dok ne dođe do uspostave kratkoga spoja te je u tome trenutku duljina električnoga luka jednaka nuli. Nakon toga žica se odmiče od radnoga komada određenom brzinom i u poznatome vremenu. Dakle, duljina električnoga luka je produkt brzine i vremena. Pri CMT postupku duljina električnoga luka nije regulirana putem napona zavarivanja, već je mehanički prilagođena nakon svakoga kratkoga spoja. Kako frekvencija osciliranja žice ostvaruje vrijednosti do 70 Hz, tako je i duljina električnoga luka podešena 70 puta u sekundi. S jedne strane, čak i uslijed promjena u duljini slobodnoga kraja žice duljinu električnoga luka moguće je održavati konstantnom. S druge strane, duljina električnoga luka više se ne mijenja u slučaju različitih brzina zavarivanja, što je uobičajeno za konvencionalne načine prijenosa metala pri MAG zavarivanju [23].

Treća značajna prednost CMT postupka je izvrsna mogućnost premošćivanja zračnosti pri spajanju materijala. Problem pri zavarivanju tankih materijala s većim zračnostima konvencionalnim MAG postupkom u području kratkih spojeva je relativno veliki unos topline. Uslijed toga tanki limovi se protale prije nego se zračnosti uspiju premostiti [23].

3.1.2.2. Područje primjene CMT postupka

Potpuno automatizirani sustavi koji koriste CMT varijantu MAG zavarivanja skoro su pet puta učinkovitiji od onih prijašnjih koji su se primjenjivali kod automatizirane proizvodnje, a koji su se temeljili na standardnome MAG postupku. CMT postupak omogućava zavarivanje sučeljenih spojeva čelika jako malih debljina (od 0,3 mm nadalje) te sučeljenih spojeva aluminijskih legura (od 0,4 mm nadalje). Pored toga, CMT proces ni na koji način ne ograničava projektante jer omogućuje kombinacije raznorodnih radnih komada na istoj konstrukciji (npr. kombinacija čelika i aluminija u automobilskoj industriji, što je poprilično teško zavarljivo uobičajenim postupcima zbog pojave krhkih intermetalnih faza) [24].

CMT inačica MAG zavarivanja prvenstveno je ostvarila primjenu u automobilskoj industriji (KIA, Opel, Volkswagen, Ford, BMW i Volvo), a potom u zrakoplovnoj industriji te zbog

svojih vrlo dobrih estetskih rezultata također i u industriji namještaja [24]. Slika 13 prikazuje Volkswagen Phaeton, čija je karoserija zavarena CMT postupkom.



Slika 13. Volkswagen Phaeton – karoserija zavarena CMT postupkom [24]

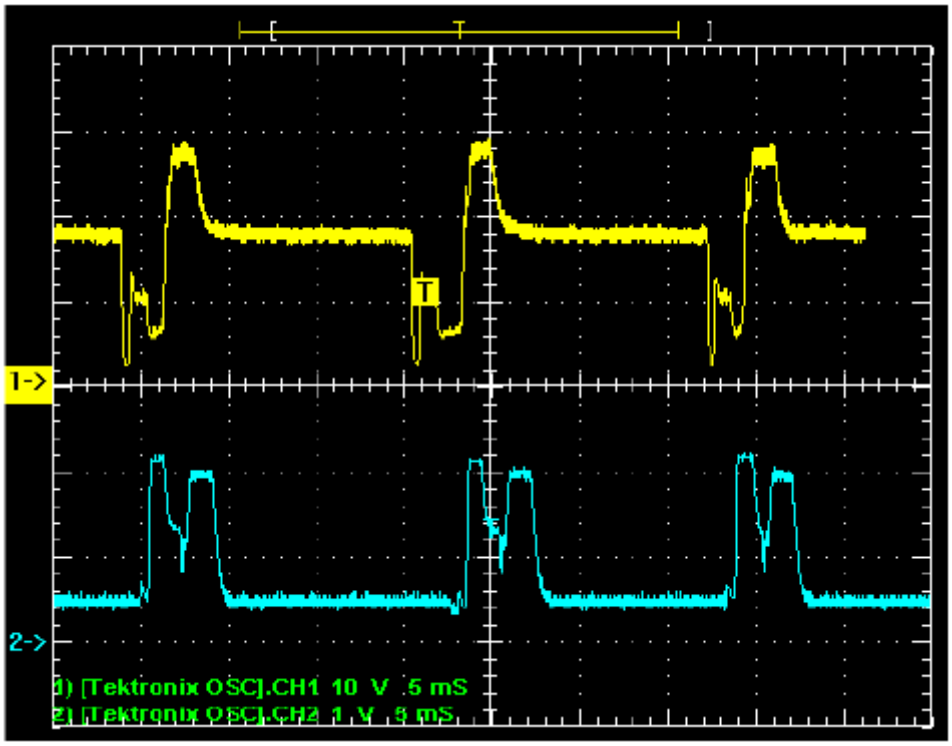
3.1.3. FastROOT

Kemppijevi klijenti su pokazali veliku zainteresiranost za razvoj postupaka zavarivanja kojima je prvenstvena namjena zavarivanje korijenskih prolaza i tankih materijala. U zavarivačkoj industriji se intenzivno traga za načinima kako poboljšati produktivnost i kvalitetu zavarenih spojeva, a jedan od uzroka tome je što postojeći postupci koji se koriste za zavarivanje korijenskoga prolaza, REL, TIG i konvencionalno MIG/MAG zavarivanje nisu postupci koji su izričito namijenjeni za zavarivanje korijena. Postoje već i uređaji za zavarivanje koji izvode modificirane MIG/MAG postupke za zavarivanje korijenskih prolaza, ali čak i oni imaju svoja ograničenja. Tvrtka Kemppi je razvila FastROOT postupak u uskoj suradnji sa zavarivačkom industrijom i mogla bi prema tome nastaviti rad na razvoju čak i bržim tempom, a posebno iz razloga stalnih zahtjeva današnje industrijske proizvodnje [25].

Osnovni koncept FastROOT postupka zasniva se na modificiranome prijenosu metala kratkim spojevima, što rezultira niskim unosom energije. Pri zavarivanju ovim postupkom napon i struja zavarivanja su digitalno kontrolirani. Obrazac kombinacije struje kratkoga spoja i sekundarnoga strujnoga pulsa za zagrijavanje javlja se i u ovome slučaju. Naime, nakon prvog stanja kratkoga 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

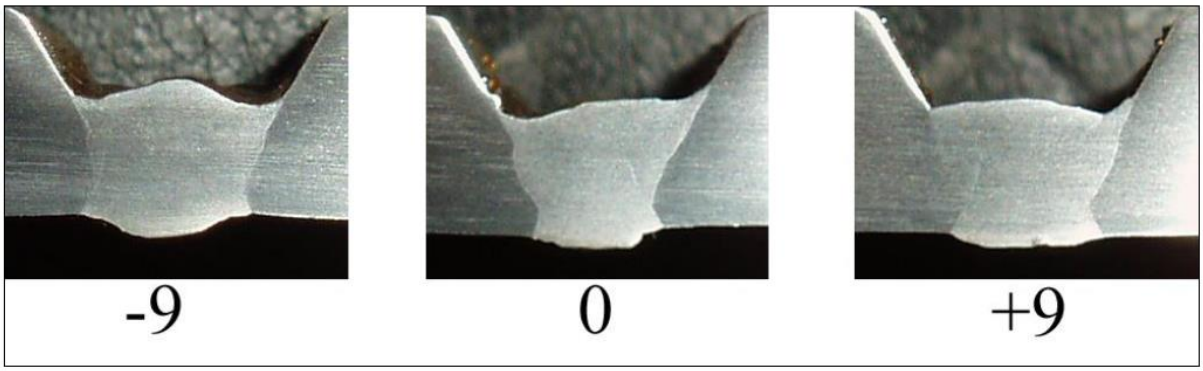
strujnim pulsom dovodi se značajna količina topline koja utječe na oblikovanje zavarenoga spoja. Nakon toga održava se osnovna struja koja osigurava energijsko stabilno stanje električnoga luka i taline do sljedećeg kratkoga spoja. Da bi se realizirao ovako sofisticirani prijenos metala u električnome luku potrebna je izrazito brza regulacija jačine struje i napona u svakom trenutku odvajanja kapljice, što rezultira prijenosom metala bez rasprskavanja [15].

Slikom 14 prikazana je dinamička karakteristika FastROOT postupka zavarivanja.



Slika 14. Dinamička karakteristika FastROOT postupka: 1 – u = f (t); 2 – i = f (t) [15]

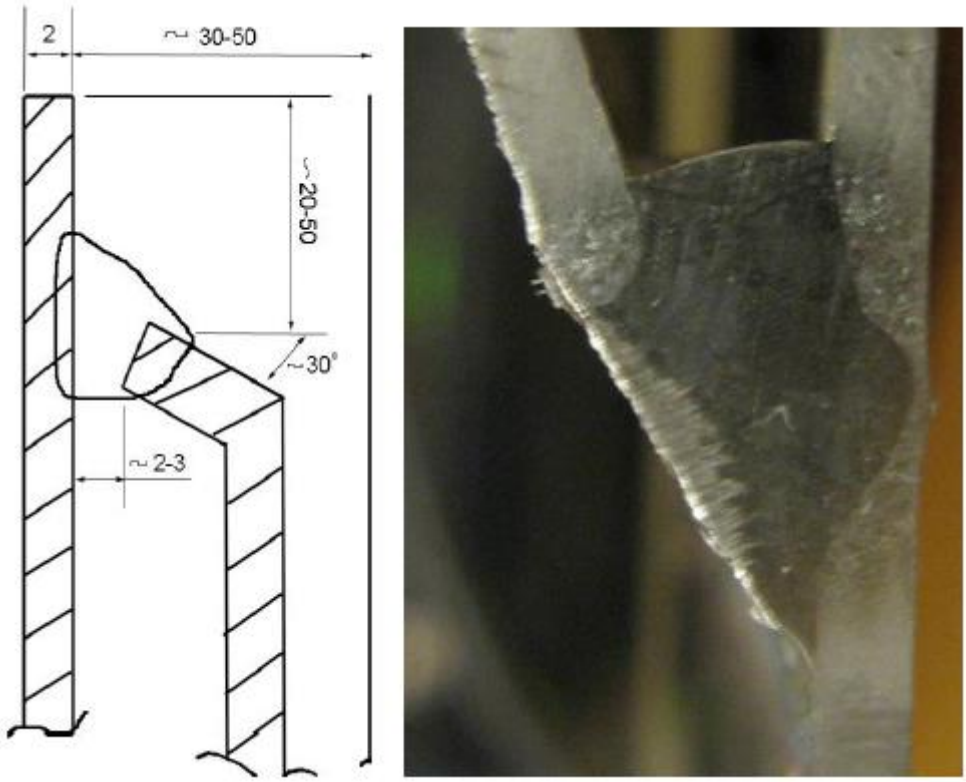
Glavna primjena FastROOT postupka je za zavarivanje korijenskog prolaza, gdje se regulacijom parametara sekundarnoga strujnoga pulsa može precizno utjecati na oblik provara, što je prikazano na slici 15. Brzo zavarivanje korijenskoga prolaza čak i u uvjetima većega razmaka i smaknuća bez štrcanja u PG položaju karakteristika je ovoga postupka koja je vrlo često aplicirana u praksi [15].



Slika 15. Utjecaj sekundarnoga strujnog pulsa na oblik provara kod FastROOT postupka [15]

Osim za korijenski prolaz, FastROOT postupak je zbog niskog unosa energije pogodan za zavarivanje tankih limova (nelegirani i visokolegirani čelici, Ni legure) poglavito u situacijama većega razmaka između komada. Isto tako moguća je primjena za tvrdo MIG lemljenje [15].

Slikom 16 prikazan je zavareni spoj dupleks i superaustenitnoga čelika debljine 2 mm uz razmak 2 do 3 mm.



Slika 16. Zavareni spoj dupleks i superaustenitnoga čelika debljine 2 mm uz razmak 2 do 3 mm [15]

Prednosti FastROOT postupka zavarivanja [25]:

- veća produktivnost i brzina zavarivanja u odnosu na TIG postupak
- eliminirano rasprskavanje kapljica metala
- istom opremom moguće je zavarivati i korijenski prolaz i popunu
- dobra kvaliteta površine korijenskoga prolaza
- značajno smanjenje potrebe za naknadnom obradom poslije zavarivanja
- fleksibilnost i olakšano rukovanje opremom
- mogućnost zavarivanja u svim položajima.

Mogućnosti primjene FastROOT postupka u industriji [26]:

- metaloprerađivačka industrija
- brodogradnja i offshore poslovi
- petrokemijska industrija
- kemijska i prehrambena industrija
- poslovi montaže, održavanja i prometni sektor
- izrada spremnika.

3.1.4. SpeedCold

SpeedCold je sinergijski upravljana varijanta MAG postupka zavarivanja, razvijena u tvrtki Lorch, koja je posebno prilagođena za izvršavanje operacija zavarivanja pri kojima se zahtijeva niski unos topline u radni komad, tj. procesom se ostvaruje modificirani prijenos metala kratkim spojevima [27].

Konvencionalni prijenos metala kratkim spojevima već pri debljinama čeličnih limova od 1 mm razotkriva svoje granice. SpeedCold postupak te granice nadilazi. Omogućeno je zavarivanje limova već pri debljinama od 0,5 mm i to vrlo pouzdano te uz vrlo malu vjerojatnost pojave rasprskavanja. Čak i kad dođe do rasprskavanja, nije nužno koristiti opremu za četkanje i brušenje. Rasprskane kapljice metala nastale SpeedCold postupkom

obično su dovoljno hladne da se ne zalijepe za površinu radnoga komada. Dovoljno je samo jedanput rukavicom prijeći preko površine kako bi se takve kapljice uklonile [28].

SpeedCold postupak ostvaruje najbolje rezultate pri zavarivanju sučeljenih, preklopnih i rubnih spojeva na tankim materijalima. Svaki pojedini dio procesa je upravljan sa visokom točnosti, tako da je bila kakva promjena u električnome luku regulirana u jednoj milisekundi. Posljedica toga je iznimna stabilnost električnoga luka i izvrsna kontrola taline zavara. Kako SpeedCold postupak pruža izvanredne mogućnosti oblikovanja spoja i premošćivanja zračnosti, zavarivaču je omogućeno da uslijed deformacije radnoga komada reagira na optimalni način [28].

Na slici 17 prikazan je rubni spoj čelika S235 izrađen konvencionalnim prijenosom metala kratkim spojevima (lijevo) i SpeedCold postupkom (desno).



Slika 17. Rubni spoj čelika S235; izrađen konvencionalnim prijenosom metala kratkim spojevima (lijevo) i SpeedCold postupkom (desno) [28]

Toplina koja se unosi u osnovni materijal je odlučujući faktor za opseg pripreme spoja za zavarivanje i naknadnu obradu potrebnu za ostvarenje zadovoljavajućega zavarenog spoja. Manji unos topline znači i manje deformacije. SpeedCold postupkom moguće je ostvariti unos topline snižen za 25 % u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje kratkim spojevima, što u konačnici uvelike pridonosi financijskom planu tvrtke [28].

3.1.5. Surface Tension Transfer

STT (engl. *Surface Tension Transfer*) je moderna, visokoučinkovita i iznimno kvalitetna inačica MAG postupka zavarivanja koja se primjenjuje kod zavarivanja tankih materijala i korijenskih prolaza materijala većih debljina. Isti postupak razvijen je u tvrtki Lincoln Electric 1988. godine, ali do prve upotrebe došlo je tek 1994. kada je proizveden i prodan prvi uređaj za zavarivanje STT postupkom. Izvor struje za navedeni proces zavarivanja osigurava stabilne glavne parametre zavarivanja tijekom samoga postupka, čime se ostvaruje modificirani prijenos metala kratkim spojevima. Prijenos metala u električnome luku temelji se na sili površinske napetosti između rastaljene kapljice i taline zavara [29].

Stručnjaci na području zavarivanja koji su razvili ovaj postupak posebno su dobro oblikovali valni oblik struje zavarivanja da bude prilagođavan stotine puta u sekundi kako bi se obavljao prijenos rastaljenih kapljica metala u trenutku kad elektroda bude kratko spojena, tako da ne dolazi do nekontroliranih eksplozija i da se na taj način eliminira pojava rasprskavanja. Ključna prednost STT postupka je mogućnost upravljanja strujom zavarivanja neovisno o brzini dodavanja žice. To znači da se može primijeniti veća ili manja struja bez potrebe za povećanjem dodavanja žice. STT proces je nazvan prema načinu na koji ova tehnologija nadzire i upravlja površinskom napetosti rastaljene kapljice koja se sjedinjuje s talinom zavara. To se ostvaruje upotrebom visokobrzih inverterskih uređaja koji točno podešavaju valni oblik izlazne struje za vrijeme trajanja kratkoga spoja. Ova jedinstvena visokofrekvencijska inverterska tehnologija poznata je kao *Waveform Control Technology*™ [30].

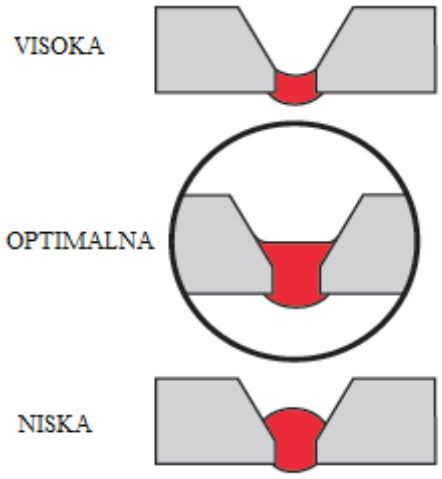
Waveform Control Technology je tehnologija koja omogućuje programiranje izvora struje tako da se ostvare specifični valni oblici struje zavarivanja kako bi se optimizirale karakteristike električnoga luka za konkretne primjene. Čimbenici kao što su vrsta spoja, materijal i debljina, brzina zavarivanja, promjer i vrsta elektrode, kao i određeni zaštitni plin

su također uzeti u obzir. Nakon unosa programa u upravljačku jedinicu izvora struje za zavarivanje ostvaruje se optimalni električni luk za traženu primjenu, što čini ovu tehnologiju raznovrsnom za mnoštvo aplikacija i osnovnih materijala [30].

STT postupak ne radi niti u području ravne niti u području strmopadajuće statičke karakteristike. Tu se točnije radi o visokofrekvencijskome, strujno upravljanome uređaju za zavarivanje kod kojega je energija potrebna za električni luk temeljena na trenutnim potrebama luka, a ne na prosječnome istosmjernome naponu. U načelu, to je izvor struje koji je sposoban dopremati i mijenjati struju zavarivanja u periodu mikrosekunde. Nadalje, STT postupak je namijenjen za poluautomatsku primjenu, gdje će varirati brzina zavarivanja i duljina slobodnoga kraja žice. Područje primjene STT postupka gotovo je identično primjeni koja se ostvaruje upotrebom standardnoga prijenosa metala kratkim spojevima. Uz novi izvor struje koji se javlja kod STT postupka moguće je koristiti različite plinske mješavine prilikom zavarivanja, uključujući 100 % CO_2 i mješavine CO_2 i Ar za niskougljične čelike, kao i mješavine na bazi helija za nehrđajuće čelike [30].

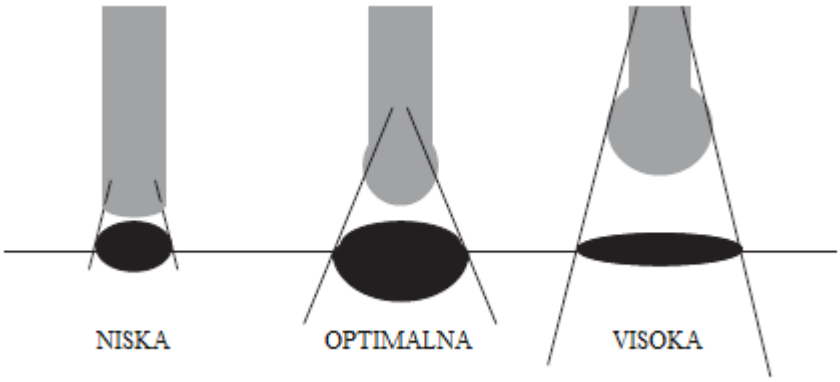
Parametri kod STT postupka zavarivanja su [10, 31, 32]:

- vršna struja (engl. *Peak current*) – upotrebljava se za definiranje duljine električnoga luka te poboljšava vezivanje, staljivanje sa stijenkama osnovnoga materijala. Ako je postavljena previsoka vrijednost vršne struje, rastaljene kapljice će postati prevelike. Ako je pak njezina vrijednost preniska javlja se nestabilni električni luk. Slikom 18 prikazan je utjecaj vršne struje na geometriju zavarenoga spoja.



Slika 18. Utjecaj vršne struje na geometriju zavarenoga spoja [33]

- osnovna struja (engl. *Background current*) – predstavlja glavnu komponentu koja je odgovorna za osiguravanje odgovarajuće penetracije u osnovni materijal te o njoj uvelike ovisi sveukupni unos topline u zavareni spoj. Previsoka vrijednost osnovne struje uzrokuje veći promjer kapljice i povećano rasprskavanje, dok njezine niže vrijednosti čine električni luk nestabilnim te je slabije kvašenje na stranicama žlijeba. Na slici 19 prikazan je utjecaj osnovne struje na geometriju zavarenoga spoja.



Slika 19. Utjecaj osnovne struje na geometriju zavarenoga spoja [32]

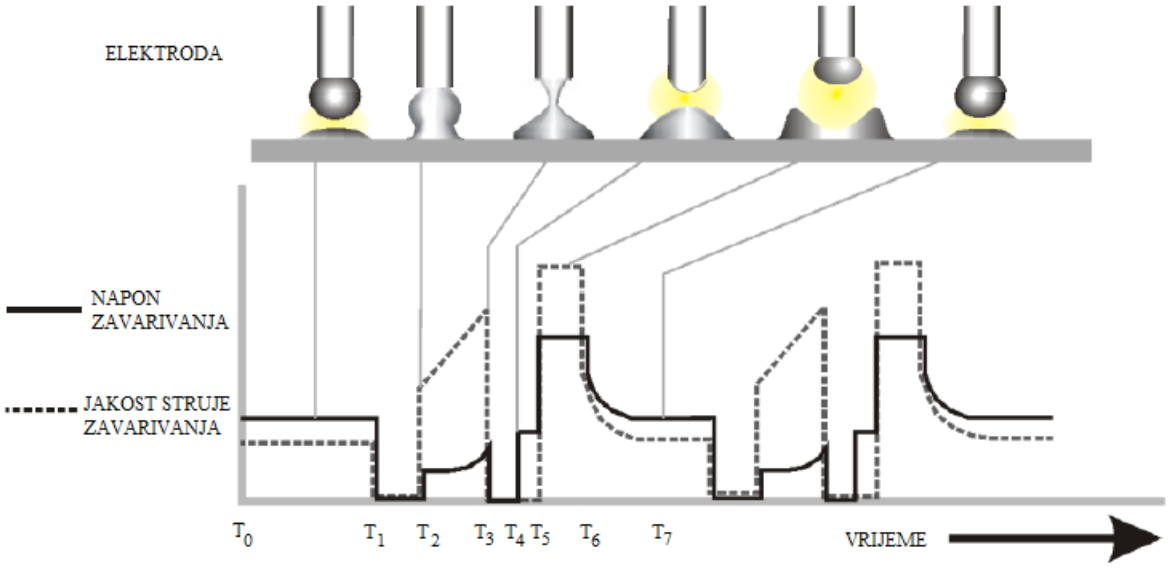
- topli start (engl. *Hot start*) – parametar koji se namješta kako bi se pospješila uspostava električnoga luka i osigurala sposobnost povećanja unosa topline prilikom početka zavarivanja koja u tome slučaju djeluje kao naknada za hladni radni komad, čime se izbjegava pojava naljepljivanja

- *Tailout* područje – pruža dodatni unos topline, a da pri tome rastaljene kapljice ne postanu prevelike. Duljina električnoga luka također se ne mijenja u tome slučaju. Time se omogućuje veća brzina zavarivanja. Povećanjem vrijednosti ovoga parametra vršna i osnovna struja u pravilu se smanjuju.

- brzina dodavanja žice – utječe na količinu rastaljenoga metala, neovisna je, posebno se definira te ne utječe na vrijednosti vršne i osnovne struje

- slobodni kraj žice – utječe na geometriju zavarenoga spoja, velika vrijednost slobodnoga kraja žice čini naličje zavarenoga spoja konkavnim i užim, a visinu većom, dok je kod manjih vrijednosti istoga parametra zavareni spoj širi i ima manju visinu.

Princip rada STT postupka zavarivanja karakterizira šest različitih faza koje se odvijaju unutar jednoga ciklusa. Dinamička karakteristika STT procesa zavarivanja prikazana je slikom 20.



Slika 20. Prikaz dinamičke karakteristike STT procesa zavarivanja [34]

Opis faza STT procesa zavarivanja [30, 35]:

1) Razdoblje od T_0 do T_1 – ovaj interval predstavlja vrijeme trajanja osnovne struje zavarivanja. To je vrijednost jakosti struje prije nego što dođe do uspostave kratkoga spoja. Jakost struje nalazi se u području od 50 do 100 A. Elektroda prilazi radnome komadu.

2) Razdoblje od T_1 do T_2 – u ovome periodu dolazi do stvaranja rastaljene kapljice. Neposredno prije izvršenja kratkoga spoja između elektrode i osnovnoga materijala uređaj putem senzora očitava smanjenje vrijednosti napona te u odnosu na to snižava i vrijednost jakosti struje. Osnovna struja potom poprima iznos od 10 A nakon vremena od samo 0,75 ms.

3) Razdoblje od T_2 do T_3 – brzina dodavanja žice i dalje se održava konstantnom te se odvija staljivanje između elektrode i osnovnoga materijala. Kako bi se osigurao daljnji prijenos rastaljene kapljice u kupku, mora se povećati struja zavarivanja. Povećanje struje zavarivanja izvodi se kontrolirano, nakon čega dolazi do ubrzanja prijenosa rastaljene kapljice u talinu zavara uslijed povećanja elektromagnetske sile i pojave tzv. *pinch* efekta.

4) Razdoblje od T_3 do T_4 – derivacija dU/dt ukazuje na trenutak prije nego dođe do potpunoga odvajanja rastaljene kapljice sa vrha elektrode. Kada ista derivacija postigne karakterističnu vrijednost, koja upućuje na to da se približava trenutak odvajanja, struja zavarivanja se ponovno smanjuje na vrijednost od 50 A za nekoliko mikrosekundi. To je u svrhu sprječavanja nagloga odvajanja kapljice koje može dovesti do pojave rasprskavanja. U trenutku T_4 dolazi do odvajanja kapljice pri niskoj struji zavarivanja.

5) Razdoblje od T_5 do T_6 – u ovome periodu dolazi do ponovnoga povećanja jakosti struje zavarivanja nakon što je električni luk ponovno uspostavljen. Time je osiguran odgovarajući unos topline u zavareni spoj.

6) Razdoblje od T_6 do T_7 – u ovome intervalu jakost struje se smanjuje s vršne vrijednosti na vrijednost osnovne struje, što se naziva i *tail – out* periodom. Time je ciklus završen te počinje novi. Vrijeme trajanja jednoga ciklusa je 25 – 35 ms.

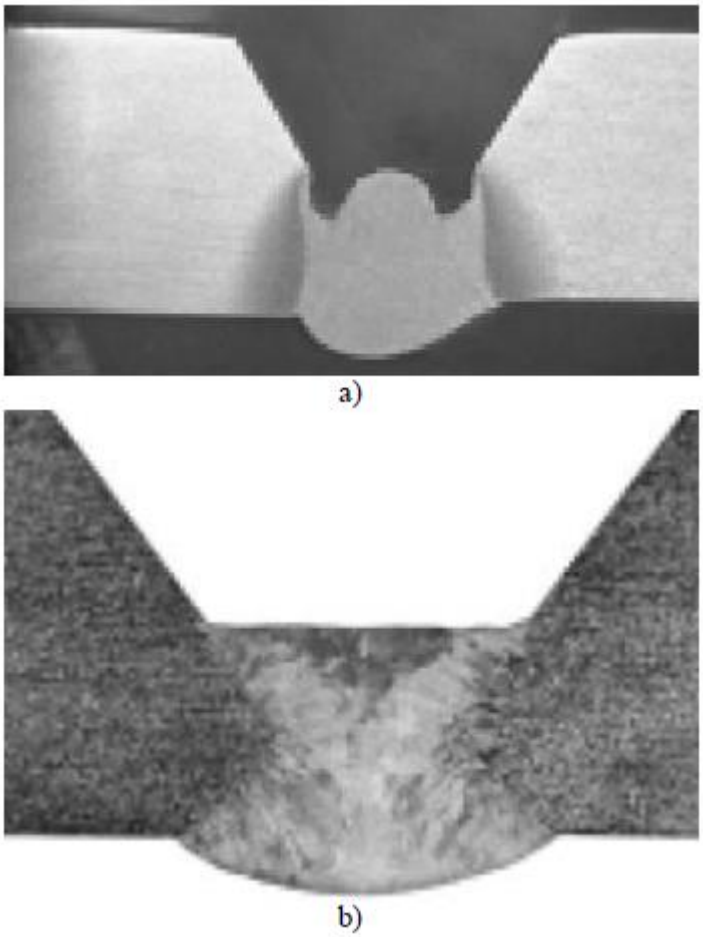
Prednosti STT postupka zavarivanja [31, 36]:

- velika brzina zavarivanja i veća produktivnost
- dobro protaljivanje i kontrola unosa topline u zavareni spoj
- smanjena mogućnost hladnoga naljepljivanja
- minimalno rasprskavanje rastaljenoga metala
- mogućnost korištenja različitih plinskih mješavina
- manji broj prekida zavarivanja, a time i manja mogućnost pojave grešaka
- zadovoljavajuća korozijska otpornost
- smanjena emisija dimnih plinova
- mogućnost upotrebe većih promjera žice
- ostvarenje kvalitetnog zavarenoga spoja usprkos neadekvatnoj pripremi spoja
- mogućnost zavarivanja u svim položajima.

Nedostatci STT postupka zavarivanja [31, 36]:

- visoka cijena izvora struje za STT postupak u odnosu na uređaj za konvencionalno MIG/MAG zavarivanje
- ograničena primjena postupka (zavarivanje tankih limova i korijenskih prolaza)
- prednosti samoga postupka dolaze do izražaja tek u odgovarajućoj kombinaciji s ostalim visokoučinskim postupcima za popunu žlijeba
- nemogućnost zavarivanja aluminija.

Slikom 21 dana je usporedba korijenskih prolaza izvedenih REL postupkom (slika 21a) i STT postupkom (slika 21b), pri čemu je vidljivo da je STT postupkom ostvaren kvalitetniji zavareni spoj.



Slika 21. Usporedba korijenskih prolaza: a) REL postupak; b) STT postupak [1]

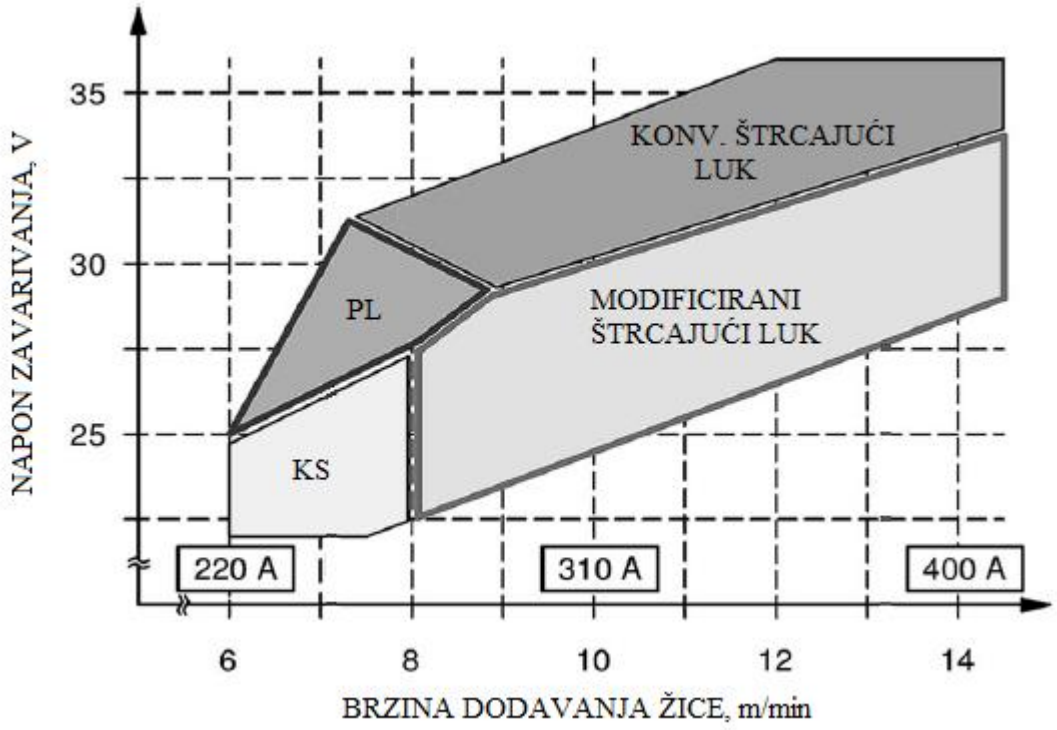
3.2. Modificirani prijenos metala štrcajućim lukom

Danas se MAG postupak zavarivanja ističe kao najvažniji za zavarivanje općih konstrukcijskih čelika i čelika visoke čvrstoće. Pri zavarivanju čelika visoke čvrstoće često se koristi prijelazni luk čije se radno područje nalazi između područja parametara kratkih spojeva i štrcajućega luka. Primjena prijelaznoga luka opravdana je prikladnim omjerom učinkovitosti (kg/h depozita) istoga načina prijenosa metala i unosa topline u zavareni spoj, pogotovo radi kratkoga vremena hlađenja koje je potrebno ostvariti kada su u pitanju zavareni spojevi čelika visoke čvrstoće. Ipak, veća učinkovitost procesa zavarivanja može se postići upotrebom štrcajućega luka kao načina prijenosa metala. Kako bi se ograničio unos topline i odstupanje štrcajućega luka potrebno je duljinu električnoga luka i napon zavarivanja koji su se dosad primjenjivali kod njegove standardne izvedbe svesti na minimum. Međutim, istoimena minimalizacija je ograničena stabilnim uvjetima luka, pri čemu se izbjegava pretjerano rasprskavanje kapljica rastaljenoga metala [37].

Stoga su proizvođači izvora struje za zavarivanje razvili mnogo varijanti MAG postupka kojima je osnova modificirani štrcajući luk, za što je najviše pridonio napredak na području suvremene inverterske tehnologije. Takvi modificirani postupci omogućuju vrlo kratke štrcajuće lukove i niske napone zavarivanja uslijed naprednoga upravljanja strujom zavarivanja pri većim iznosima brzine dodavanja žice. Time je spriječena pojava iznenadnih kratkih spojeva i pretjeranoga rasprskavanja iz taline. Svaka varijanta modificiranoga štrcajućega luka ovisno o proizvođaču uređaja za zavarivanje ima različiti naziv, ali zapravo pružaju podjednake karakteristike i daljnju ekonomsku korist [37].

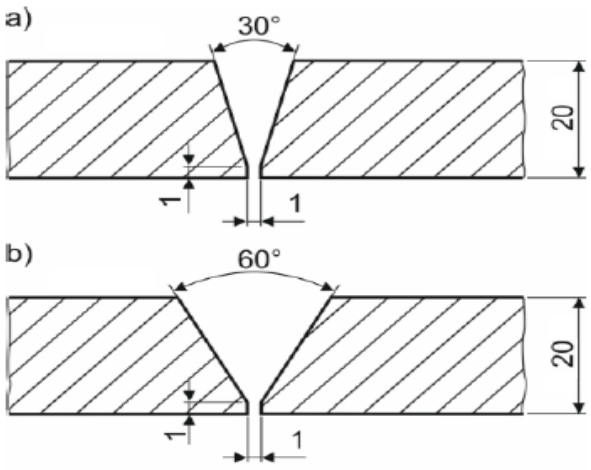
Zahvaljujući velikome tlaku plazme i vrlo kratkome električnome luku ostvaruje se poboljšani, koncentriraniji i stabilniji štrcajući luk s većom dubinom penetracije i dobrim protaljivanjem korijena. S obzirom na to, zavarivanje se odvija uz veće duljine slobodnoga kraja žice (do 40 mm), što omogućuje znatno manje kutove pripreme spojeva i izuzetne uštede dodatnoga materijala, vremena zavarivanja kao i potrebnoga vremena za pripremu spojeva i naknadnu mehaničku doradu u usporedbi sa standardnim štrcajućim lukom. Nadalje, u kontekstu promijenjene geometrije i manjih volumena zavarenih spojeva te ukupnoga unosa topline, ostvarena su značajno manja naprezanja u zavarenim spojevima. Prema tome, moguće je i povećati opterećenja na zavarenim konstrukcijama čelika visoke čvrstoće [37].

Na slici 22 prikazano je radno područje modificiranoga štrcajućeg luka u odnosu na područje parametara konvencionalnog štrcajućeg luka, prijelaznoga luka (PL) te kratkih spojeva (KS).



Slika 22. Radno područje modificiranoga štrcajućega luka u odnosu na područje parametara konvencionalnoga štrcajućega luka, prijelaznoga luka (PL) te kratkih spojeva (KS) [37]

Slikom 23 prikazani su kutovi pripreme spoja za zavarivanje modificiranim štrcajućim lukom (slika 23a) i standardnim štrcajućim lukom (slika 23b) kod iste debljine osnovnog materijala.

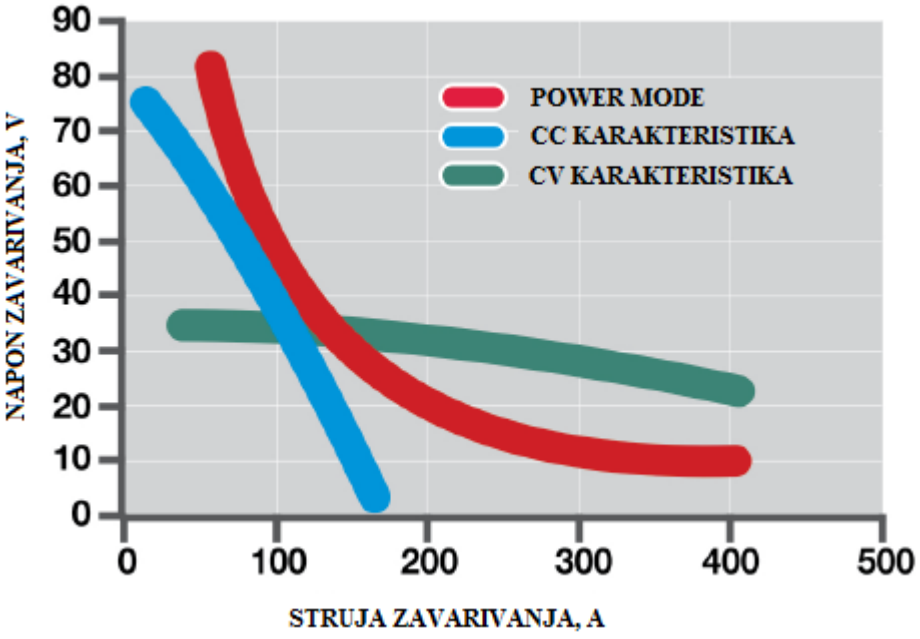


Slika 23. Kutovi pripreme spoja: a) modificirani štrcajući luk; b) standardni štrcajući luk [38]

3.2.1. Power Mode

Power Mode je naziv za modificiranu varijantu MAG postupka zavarivanja koja se temelji na prednostima ranije spomenute *Waveform Control* tehnologije u kombinaciji s izlaznim svojstvima klasičnih izvora struje sa strmopadajućom (CC) karakteristikom. Postupak obilježava visokobrzinska regulacija izlazne snage kad god se uspostavi luk te osiguravanje vrlo brzoga odgovora na promjene u električnome luku. Time se želi naglasiti da se kod Power Mode postupka konstantnima ne održavaju niti struja niti napon zavarivanja, već izlazna snaga uređaja za zavarivanje [39, 40].

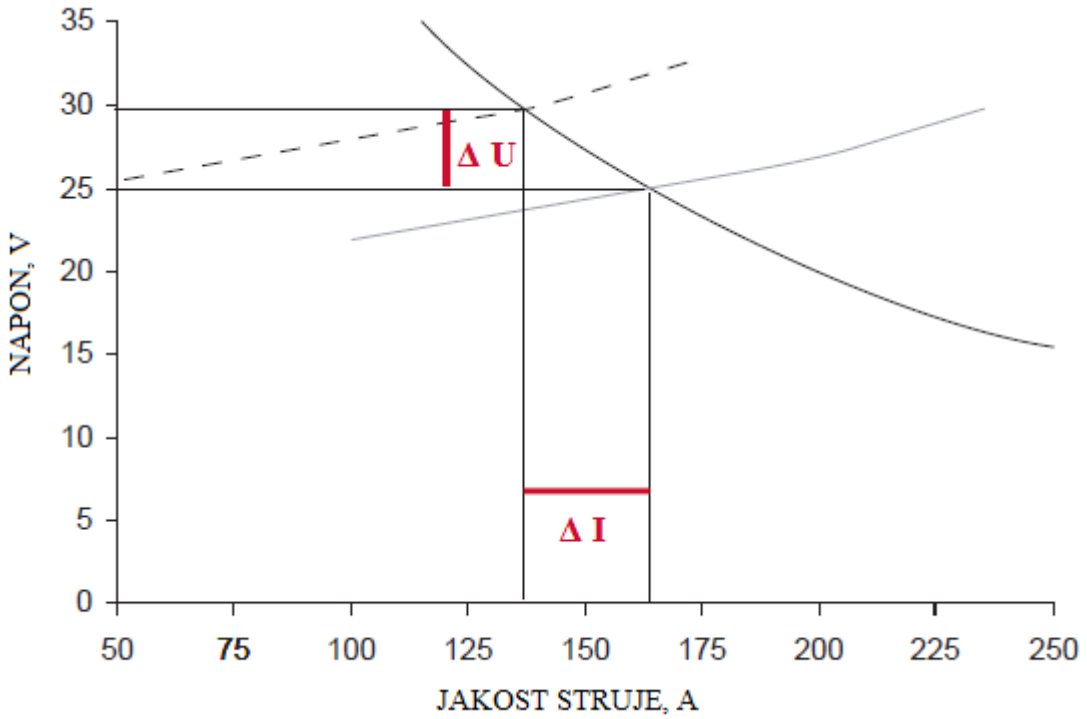
Dakle, Power Mode koristi snagu električne energije (U x I = P) za regulaciju duljine električnoga luka. Izvor struje za zavarivanje odgovara na očitane promjene napona u električnome luku. Međutim, za razliku od izvora struje sa ravnom statičkom karakteristikom (CV), Power Mode postupak odgovara s manjom promjenom struje zavarivanja. Takav način regulacije električnoga luka omogućava konstantni odziv unutar istoga. Prednost takvoga načina kontrole najbolje dolazi do izražaja kod primjena gdje energija i penetracija moraju biti strogo nadzirane i nepromjenljive. U području viših struja zavarivanja Power Mode postupak ponaša se u skladu s ravnom statičkom karakteristikom za razliku od područja nižih struja zavarivanja gdje se ponaša prema strmopadajućoj statičkoj karakteristici, što je prikazano slikom 24 [39].



Slika 24. Prikaz statičke karakteristike Power Mode postupka zavarivanja [40]

Power Mode postupak je prilagodljiviji na odstupanja duljine električnoga luka prilikom zavarivanja aluminija štrcajućim lukom u odnosu na konvencionalno MIG/MAG zavarivanje koje se ponaša prema ravnoj statičkoj karakteristici, iz razloga što je njegov valni oblik programiran tako da reagira na smanjenje napona porastom vrijednosti struje u manjim, ali češćim inkrementima, održavajući tako unaprijed postavljenu vrijednost snage [39].

Slikom 25 prikazana je promjena struje i napona zavarivanja u odnosu na odstupanja duljine električnoga luka.

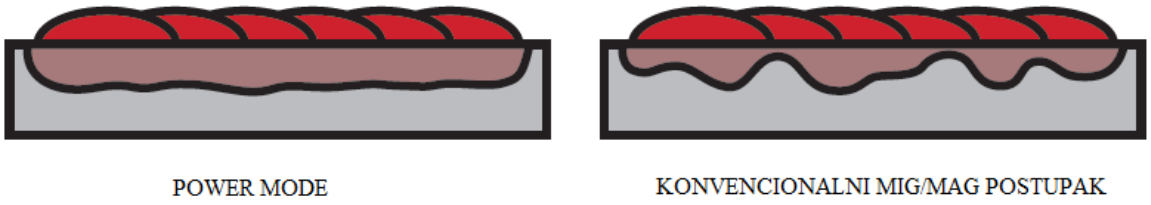


Slika 25. Promjena struje i napona zavarivanja u odnosu na odstupanja duljine električnoga luka [39]

Kao i konvencionalno MIG/MAG zavarivanje, Power Mode može raditi unutar čitavoga raspona brzina dodavanja žice te time omogućuje prijenos metala i kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Moguće je zavarivati aluminij, konstrukcijski čelik i nehrđajući čelik. Međutim, visoka toplinska vodljivost aluminija čini prijenos metala kratkim spojevima nepreporučljivim, tako da se Power Mode postupak obično upotrebljava prilikom zavarivanja debljih materijala na većim brzinama dovođenja žice. Kada se koristi u tu svrhu, onda pruža značajne prednosti u odnosu na općenito MIG/MAG zavarivanje. Pri prijenosu materijala modificiranim štrcajućim lukom kao glavne prednosti postupka Power Mode ističu se

jednoliki profil penetracije uzduž cijeloga zavarenoga spoja te visoka stabilnost električnoga luka. Uz to, još valja spomenuti dodatne prednosti istoga postupka kao što su mogućnost ostvarenja većih brzina zavarivanja, smanjeno rasprskavanje rastaljenih kapljica te manji broj grešaka povezanih s protaljivanjem osnovnoga materijala [39, 40, 41, 42].

Na slici 26 prikazana je usporedba penetracijskog profila postupka Power Mode i konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja.



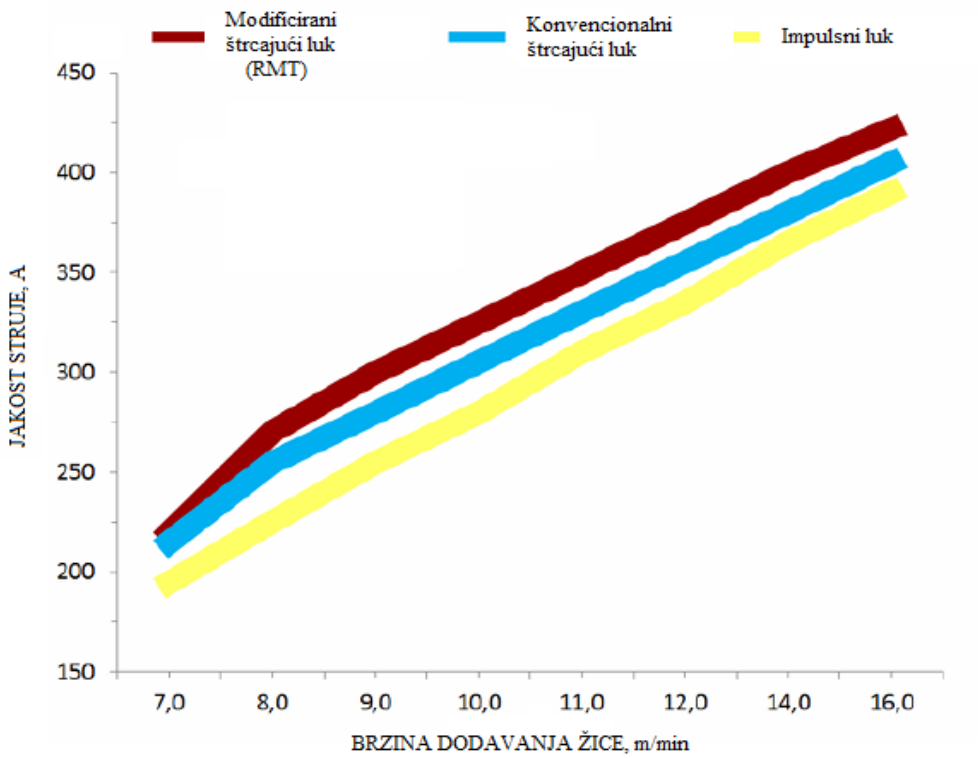
Slika 26. Usporedba penetracijskog profila postupka Power Mode i konvencionalnoga MIG/MAG postupka [42]

3.2.2. Rapid MIG/MAG Technology

Rapid MIG/MAG Technology ili skraćeno RMT modificirana je varijanta MIG/MAG postupka zavarivanja koja se temelji na modifikacijama prijenosa metala u štrcajućem luku. U odnosu na konvencionalni prijenos štrcajućim lukom koji ovisi o svojstvima dodatnoga materijala i o zaštitnome plinu, kod RMT inačice MIG/MAG procesa se teži skraćivanju električnoga luka, prilikom čega dolazi do snižavanja napona te povećanja koncentracije unesene energije. Time se električni luk sužava, a energija koju on daje djeluje na manjoj površini, što dovodi do veće penetracije u osnovni materijal. Prijenos metala u električnome luku se odvija u jako sitnim kapljicama, pri čemu je frekvencija prijenosa u rasponu od 2 – 3 kHz [1, 15].

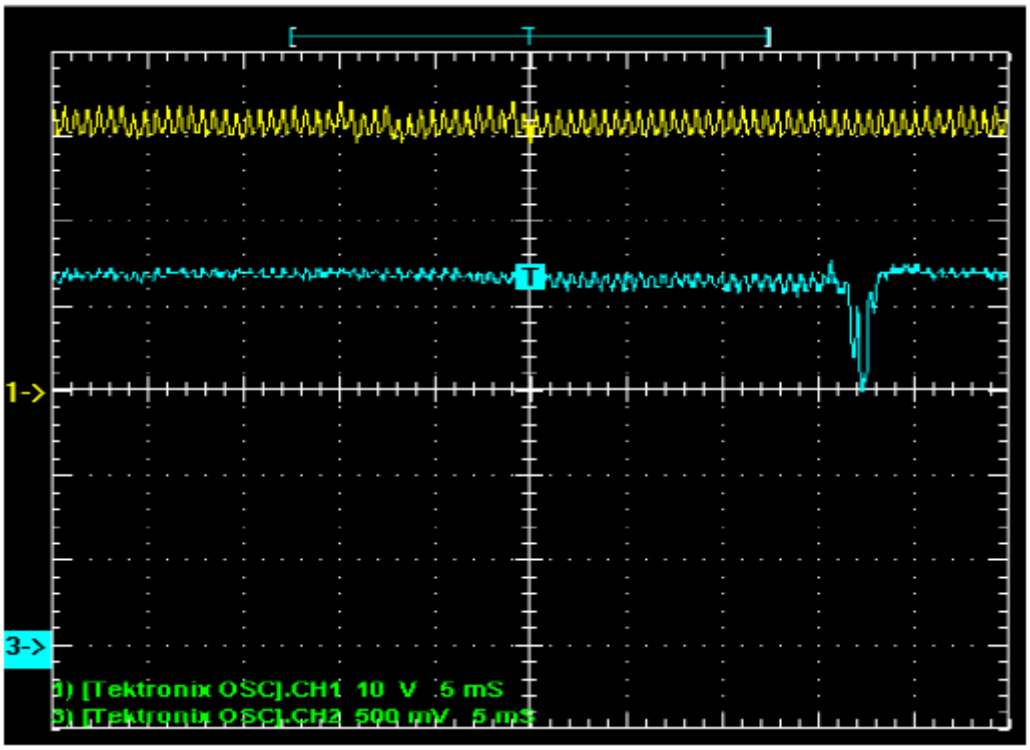
Vrlo brzom analizom i sustavnim međudjelovanjem parametara elektrolučnoga procesa, moguće je konvencionalni štrcajući luk premjestiti u područje manjega električnoga otpora. To podrazumijeva da električni luk koji se ostvaruje RMT postupkom prenosi do 10 % više energije pri jednakim brzinama dodavanja žice, što je vidljivo kod većih iznosa struje zavarivanja [43].

Slikom 27 dana je usporedba ostvarenih razina jakosti struje za pojedinu vrstu električnoga luka.



Slika 27. Razine jakosti struje u ovisnosti o vrsti električnog luka [43]

Na slici 28 prikazana je dinamička karakteristika RMT postupka zavarivanja.



Slika 28. Dinamička karakteristika RMT postupka: 1 – u = f (t); 3 – i = f (t) [15]

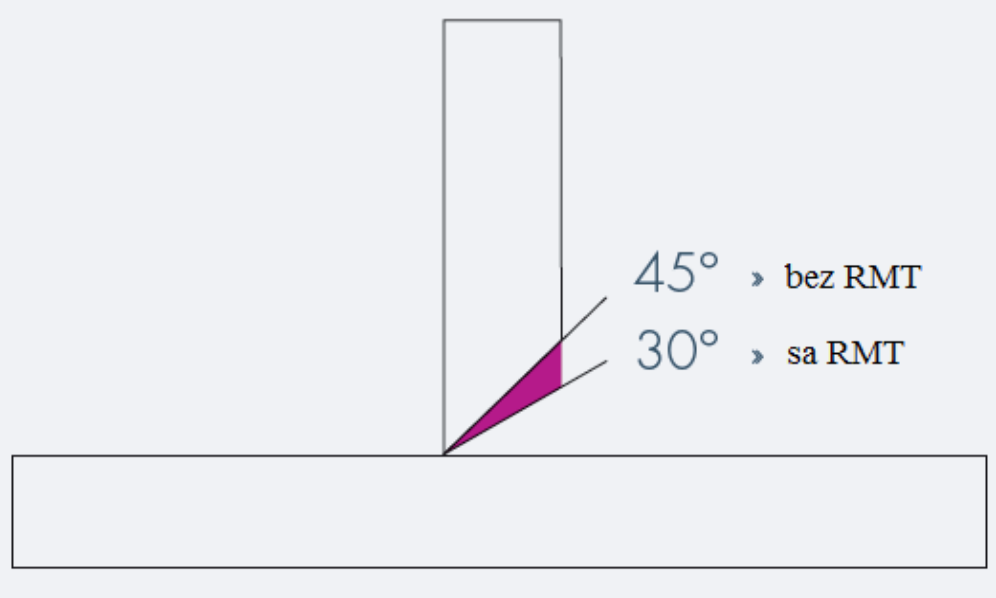
S tehničkoga gledišta, prilikom zavarivanja debljih elemenata postavljaju se posebni zahtjevi na kvalitetu zavarenih spojeva. Profil i dubina penetracije uvelike utječu na njihovu čvrstoću. Nadalje, potrebno je ispuniti i dodatne zahtjeve koji se tiču izgleda zavarenoga spoja te učinkovitosti procesa zavarivanja. Stoga se RMT postupak uz sve prednosti koje donosi u odnosu na konvencionalni štrcajući luk nameće kao izvrsno rješenje u pogledu zavarivanja debelih limova [43].

Na slici 29 prikazan je kutni zavareni spoj debljine 8 mm s potpunom penetracijom, izveden RMT postupkom zavarivanja.



Slika 29. Kutni spoj debljine 8 mm s potpunom penetracijom izveden RMT postupkom [43]

Kod materijala većih debljina gdje je obavezno potrebna priprema spoja i kod kojih se vrši višeslojno zavarivanje, moguće je kut pripreme smanjiti sa 45° na 30° (slika 30), čime se bitno smanjuje broj potrebnih prolaza. Time ne samo da se smanjuje ukupno vrijeme rada, upotreba dodatnoga materijala i zaštitnoga plina, već se uslijed kraćega vremena zavarivanja i s time povezanim manjim unosom topline u osnovni materijal znatno smanjuju i deformacije u području zavarenoga spoja [44].



Slika 30. Priprema kutnoga spoja kod RMT varijante MAG zavarivanja [45]

Prednosti RMT varijante MAG zavarivanja [1, 46]:

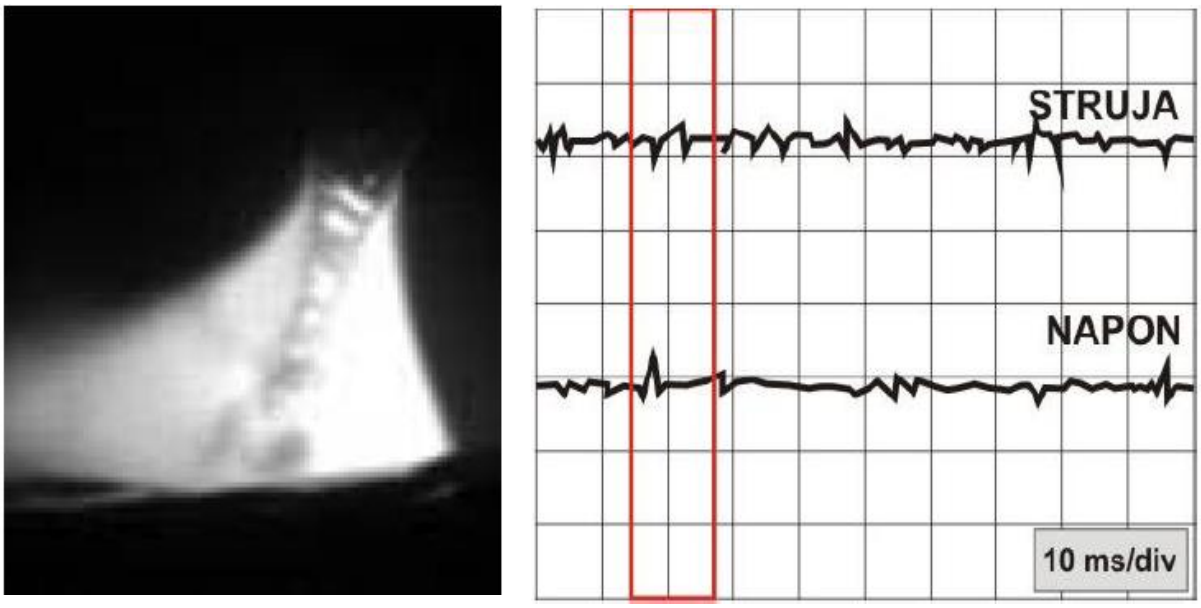
- koncentrirani, visokoenergijski štrcajući luk
- manji broj prolaza potrebnih za izradu zavarenoga spoja uslijed smanjenja kuta pripreme
- skraćenje vremena zavarivanja i veća produktivnost
- bolja kvaliteta zavarenih spojeva uslijed smanjenja deformacija i veće dubine penetracije
- veća brzina zavarivanja
- mogućnost zavarivanja debljih materijala
- kutni spojevi do 8 mm debljine mogu se zavarivati bez pripreme spoja.

3.2.3. ForceArc

Danas se u izradi čeličnih konstrukcija većih dimenzija primjenom MIG/MAG postupka zavarivanja najčešće koristi prijenos metala štrcajućim lukom. Kao što je spomenuto, ovaj proces zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi smjesa plinova s visokim udjelom argona i pri relativno visokim parametrima. Do kraja 1980 – ih norma DIN 1910 – 4 definirala je štrcajući luk kao: „ … prijenos materijala koji se sastoji od sitnih kapljica i nema pojave kratkih spojeva … “. Međutim, takav način prijenosa zahtijeva relativno dugi električni luk, tj. veliki napon zavarivanja, što u praksi ponekad može biti problematično jer može doći do puhanja luka, ali i do pojave ugorina i pora. Također, dolazi i do većega gubitka legirnih elemenata u električnome luku [8, 47].

Hans – Ulrich Pomaska, jedan od preteča tehnologije zavarivanja, u zaštitnome plinu tragao je za kratkim, uskim štrcajućim lukom koji se realizirao na nešto nižem naponu, što je dovodilo do povremene pojave kratkih spojeva. Intenzitet i trajanje kratkih spojeva bili su zanemarivi i otkriveni su samo promjenom napona, dok su promjene struje bile minimalne. Taj tip prijenosa materijala u električnome luku postao je vrlo brzo prihvaćen u praksi, što je dovelo do promjene definicije štrcajućega luka u toj normi: „Prijenos materijala sastoji se od sitnih kapljica i moguća je pojava kratkih spojeva.“ Daljnje skraćivanje električnoga luka, tj. smanjivanje napona električnoga luka često je poželjno u mnogim slučajevima zbog tehničkih razloga, ali nije bilo moguće zbog pojave duljih perioda kratkih spojeva i povećanoga rasprskavanja pri zavarivanju. Zahvaljujući inverterskoj tehnologiji i modernome digitalnome upravljanju omogućena je korekcija procesa brzom kontrolom parametara u slučaju pojave kratkih spojeva pri zavarivanju štrcajućim lukom nižim naponom. Struja zavarivanja se smanjuje vrlo brzo nakon ponovne uspostave električnoga luka, dok napon ne postigne nominalnu vrijednost. To znatno smanjuje vrijeme trajanja kratkoga spoja i reducira rasprskavanje kapljica na minimum. Novi tip električnoga luka rezultat je opsežnih istraživanja i naziva se *forceArc*, a razvijen je u tvrtki EWM [47].

Na slici 31 prikazan je prijenos materijala i oblik električnoga luka (slika 31a) te pripadajući oscilogram dinamičke karakteristike forceArc postupka zavarivanja (slika 31b).



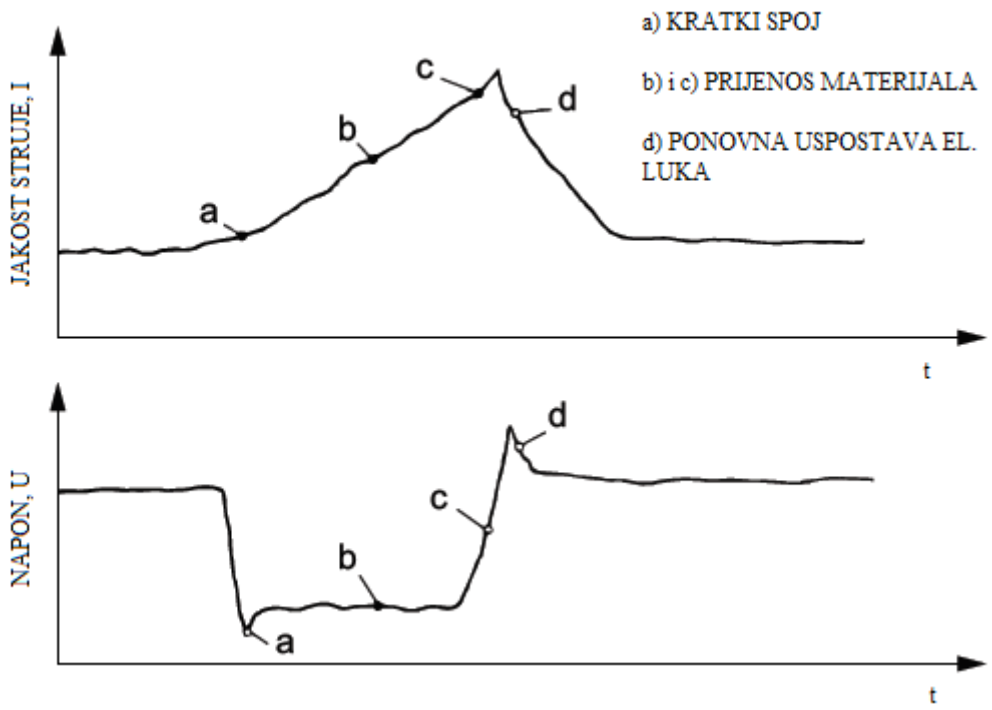
a) b)

Slika 31. ForceArc postupak zavarivanja: a) prijenos metala i oblik električnoga luka; b) oscilogram dinamičke karakteristike [8, 48]

3.2.3.1. Prijenos materijala konceptom forceArc

Električni luk kod forceArc varijante MAG zavarivanja je kraći, a time pada i napon kao što je već spomenuto. Kao što se može uočiti na slici 31a, koja je snimljena visokobrzinskom kamerom, tlak plazme električnoga luka formira talinu. To rezultira stvaranjem malih i srednje velikih kapljica koje se prenose velikom brzinom kroz električni luk jedna za drugom. Kod ove vrste prijenosa materijala neizbježno je da se povremeno kapljice međusobno dotaknu te se stvara izravni spoj s talinom, što rezultira kratkim spojem i ostvarivanjem uvjeta za rasprskavanje pri ponovnoj uspostavi luka. Ponašanje struje i napona prilikom duljega perioda kratkoga spoja najbolje je objašnjeno primjenom ciklusa kratkoga spoja u zavarivanju zato što je to tipični proces. Kada kapljice ostvare kontakt s talinom smanjuje se napon jer je električni otpor sada niži nego u slučaju električnoga luka [47].

Slikom 32 prikazane su faze forceArc načina prijenosa materijala.



Slika 32. Faze forceArc načina prijenosa materijala [49]

Odmah nakon toga dolazi do porasta struje do razine kratkoga spoja. Kod prisiljenoga štrcajućega luka štetni porast energije (struja x napon x vrijeme) koji bi u ovom području parametara rezultirao rasprskavanjem, blokira se. Kod konvencionalnih izvora struje za zavarivanje nije moguće smanjiti struju u kratkome vremenu jer induktivitet transformatora i izlazne prigušnice to onemogućava. Kod inverterskih izvora struje to je bitno drugačije jer se kod njih induktivitet namješta i regulira elektronički i može se, pa čak i kod kratkih spojeva, u potpunosti isključiti. To znači da samo induktivitet u zavarivačkim kabelima ostaje aktivan. Zbog toga se uspon i pad električne struje kod kratkoga spoja i ponovne uspostave luka mogu vrlo brzo regulirati, pri čemu je pojava rasprskavanja minimalna. Promjene napona se mogu koristiti kao ulazni signal za kontroliranje procesa. Međutim, potrebno je kontinuirano mjerenje napona i odgovarajuća reakcija na sve promjene u vrijednosti napona kako bi se postigli opisani učinci (trenutna dinamička regulacija vrijednosti napona) [47].

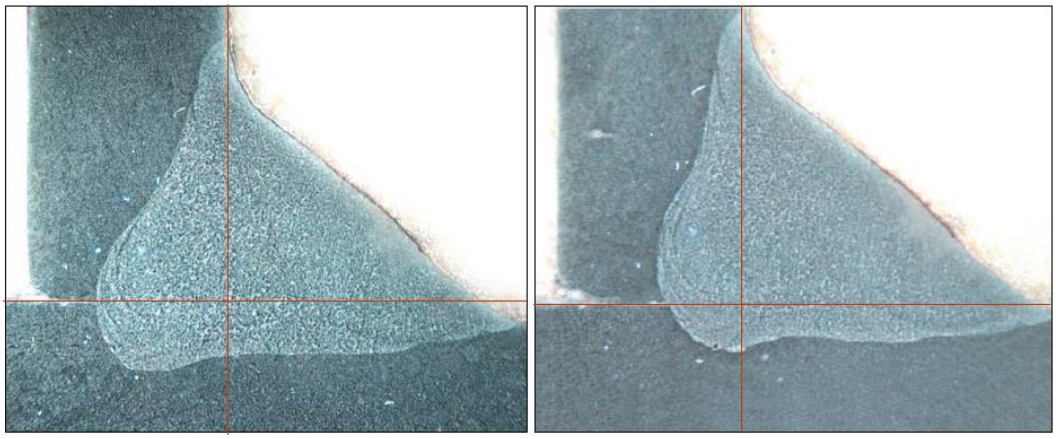
Brza regulacija procesa omogućuje zavarivanje s duljim slobodnim krajem žice, što je dobro u situacijama teže dostupnosti radnih pozicija. Međutim, treba napomenuti da stabilnost procesa ovisi o kvaliteti plinske zaštite [47].

Ne treba naglašavati kako je primjena forceArc varijante MAG zavarivanja moguća samo upotrebom modernih izvora struje za zavarivanje. Trenutna regulacija parametara je moguća samo kod inverterskih izvora i digitalnoga mjerenja te obrađivanja podataka. Izvori struje razvijeni posebno za EWM forceArc mogu raditi i s konvencionalnim MAG – om i impulsnim strujama, a budući da se radi o multiprocesnom izvoru, može se primijeniti TIG i REL [47].

3.2.3.2. Prednosti primjene forceArc varijante MAG zavarivanja

ForceArc varijanta MAG zavarivanja koristi se pri višoj razini parametara koji su svojstveni prijenosu materijala štrcajućim lukom, no za razliku od istoga postiže mnoge prednosti od kojih se navode najbitnije [8, 47, 50]:

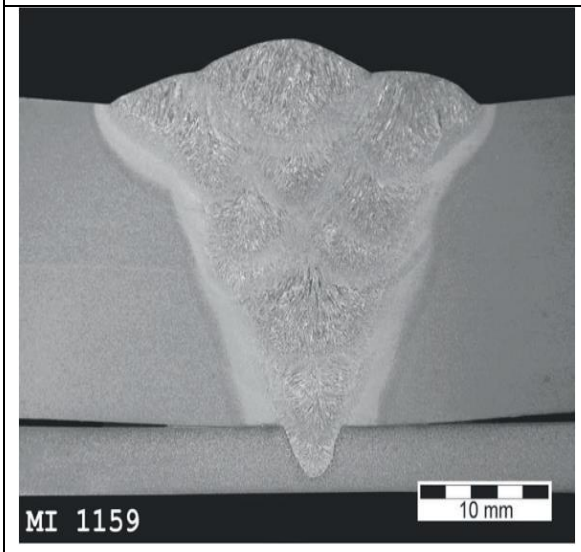
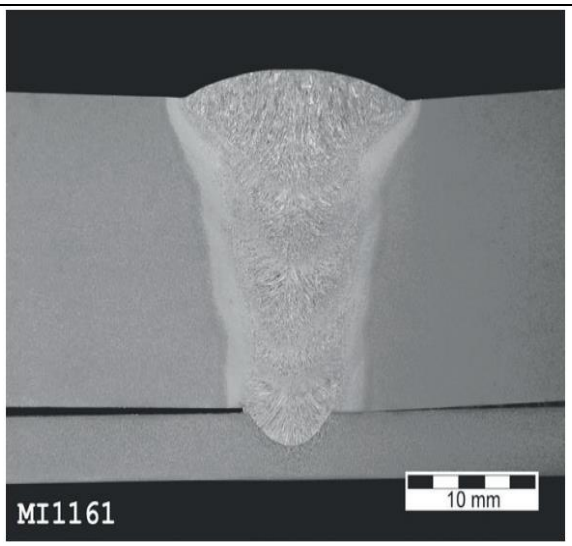
- dobro protaljivanje i penetracija zahvaljujući povišenome tlaku plazme električnoga luka – na slici 33 prikazana je usporedba profila kutnih zavarenih spojeva načinjenih forceArc varijantom (lijevo) i konvencionalnim štrcajućim lukom (desno) u PB položaju. Penetracija kod postupka forceArc donekle je uža i dublja u odnosu na konvencionalni štrcajući luk.



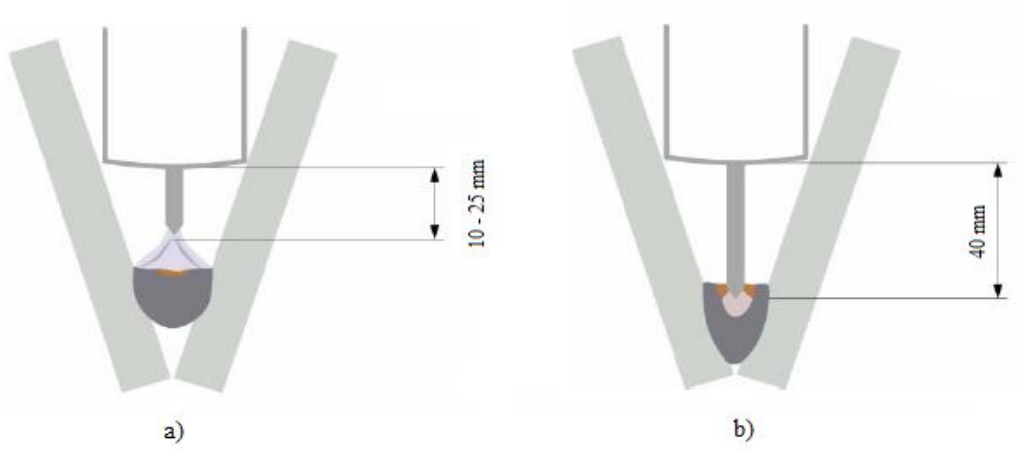
Slika 33. Usporedba penetracije kod forceArc postupka (lijevo) i konvencionalnog MAG zavarivanja (desno) [48]

- manji kut pripreme spoja – rezultira manjim brojem prolaza, smanjenjem unosa topline u osnovni materijal i kasnijim deformacijama, ostvaruju se uštede u pogledu dodatnoga materijala, zaštitnoga plina i cjelokupnoga vremena zavarivanja. Tablicom 1 prikazana je usporedba makroizbrusaka sučeljenih spojeva izvedenih forceArc varijantom i konvencionalnim štrcajućim lukom s obzirom na kut pripreme spoja.

Tablica 1. Usporedba makroizbrusaka sučeljenih spojeva izvedenih forceArc varijantom i konvencionalnim štrcajućim lukom s obzirom na kut pripreme spoja [51]

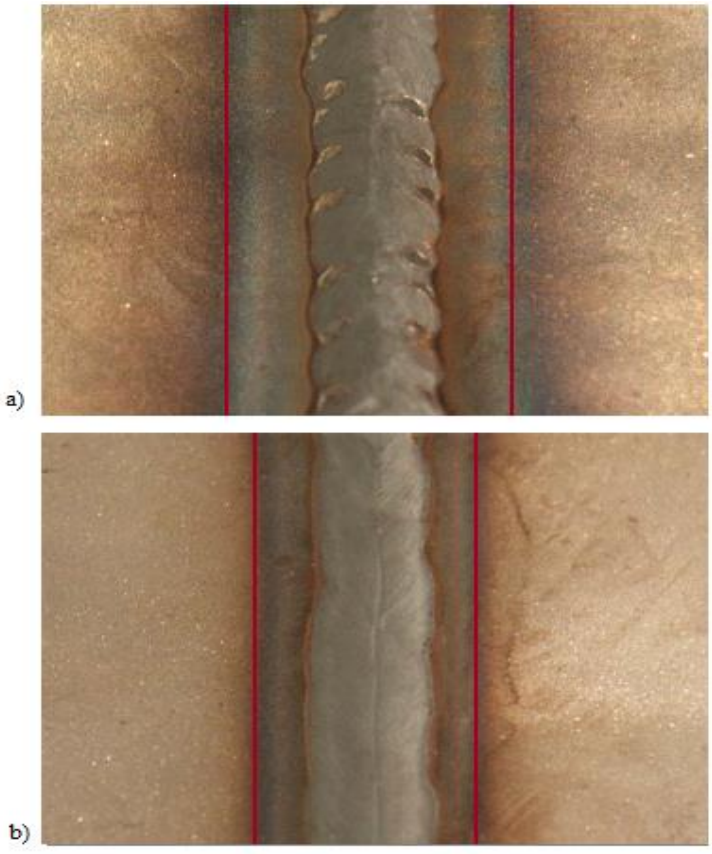
Konvencionalni štrcajući luk	forceArc
Kut pripreme od 60°	Kut pripreme od 30°
8 prolaza	5 prolaza
	

- stabilnost luka i jednostavnije izvođenje ručnoga zavarivanja – skraćivanje luka daje luku stabilnost i usmjerenost, što je direktna posljedica povećanoga pritiska plazme električnoga luka. Time se izbjegava mekanost konvencionalnoga štrcajućega luka, osobito u geometrijski zahtjevnim pozicijama zavarivanja. Također, dinamička regulacija parametara zavarivanja uz preciznu regulaciju slobodnoga kraja žice omogućava rad sa slobodnim krajem žice duljina i do 40 mm, što je osobito važno u izvođenju korijenskih prolaza, bez pojave puhanja luka i naljepljivanja (slika 34).



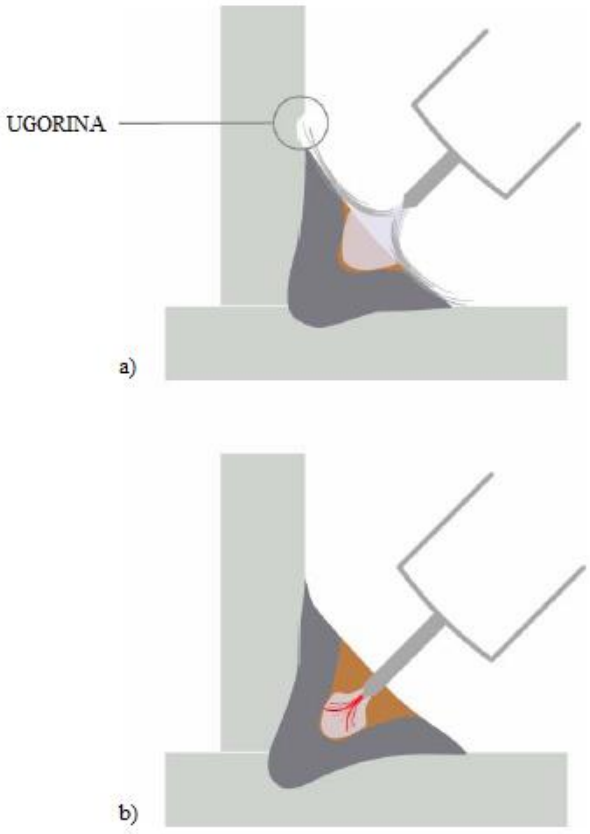
Slika 34. Duljina slobodnoga kraja žice: a) prijenos metala štrcajućim lukom; b) forceArc varijanta [48]

- bolja kvaliteta zavarenoga spoja u odnosu na širinu zone utjecaja topline i deformacije zbog manjega rasipanja topline – razlika u širini zone utjecaja topline rezultat je reduciranoga unosa topline i uže zone luka u odnosu na konvencionalni štrcajući luk. Usporedba ZUT – a prikazana je na slici 35.



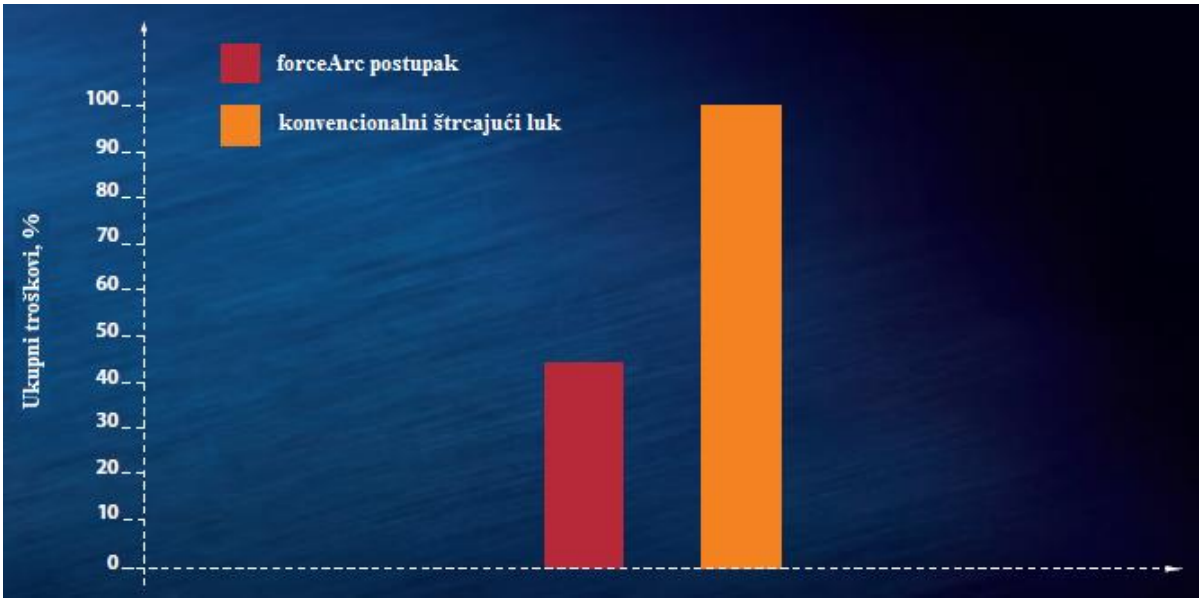
Slika 35. Širina zone utjecaja topline: a) standardni štrcajući luk; b) forceArc postupak [52]

- smanjena mogućnost pojave pora i ugorina – skraćivanje električnoga luka smanjuje mogućnost nastanka ugorina na najmanju moguću mjeru (slika 36). Povećani tlak plazme električnoga luka povoljno utječe i na geometriju zavarenoga spoja, tj. približava je idealnom konkavnome obliku (npr. kod kutnih spojeva).



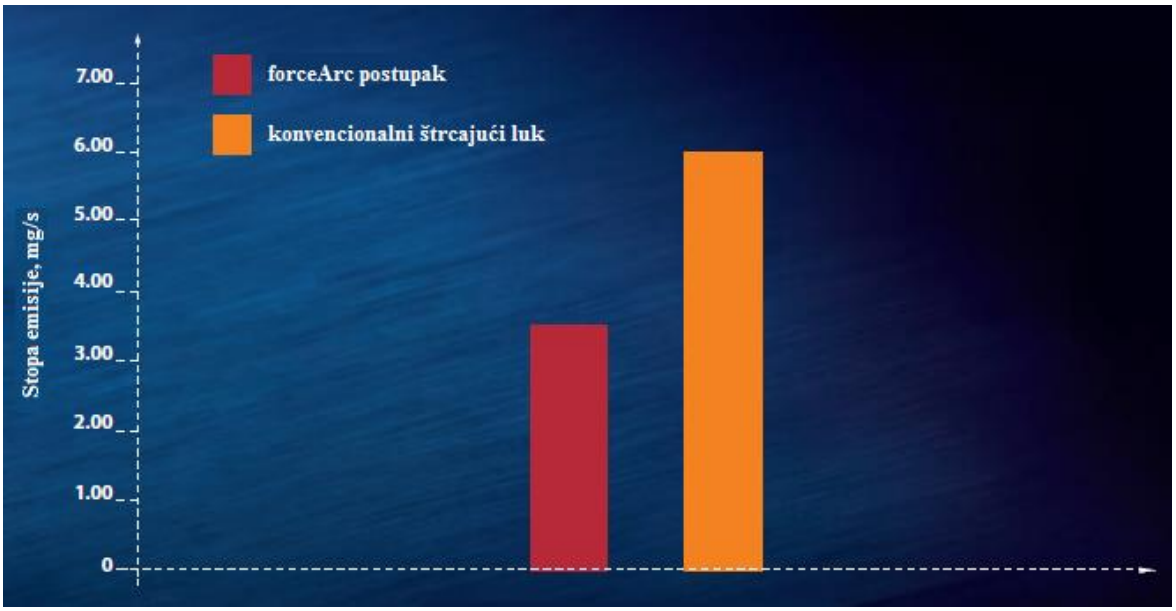
Slika 36. Utjecaj duljine i plazme električnoga luka na pojavu ugorina u zavarenom spoju: a) prijenos metala štrcajućim lukom; b) forceArc varijanta [48]

- ekonomska isplativost – temelji se na povećanoj brzini zavarivanja (poluautomatsko i automatizirano zavarivanje). Uslijed svih prednosti koje nudi forceArc postupak moguće je ostvariti smanjenje ukupnih troškova i do 56 % u odnosu na konvencionalni prijenos metala štrcajućim lukom (slika 37).



Slika 37. Usporedba ukupnih troškova forceArc postupka i konvencionalnog štrcajućeg luka [50]

- forceArc postupak karakterizira smanjeni unos topline u zavareni spoj, čime se bitno umanjuju emisije dimnih plinova (slika 38) i time osiguravaju kvalitetniji radni uvjeti te koncept održivosti.

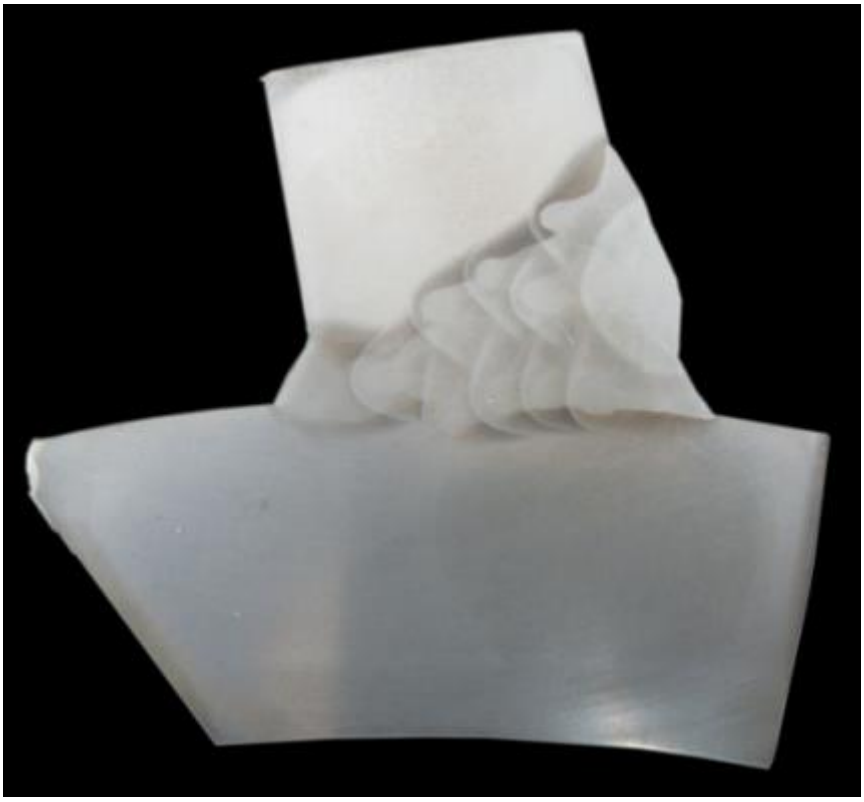


Slika 38. Usporedba emisije dimnih plinova forceArc postupka i konvencionalnog štrcajućeg luka [50]

3.2.3.3. Područja primjene forceArc varijante MAG zavarivanja

ForceArc varijanta MAG zavarivanja pogodna je za primjenu u izgradnji čeličnih konstrukcija, energetici, brodogradnji, izgradnji vozila i kontejnera, izradi opreme i offshore konstrukcija. Do sada postoje dokazana iskustva na nelegiranome, niskolegiranome i visokolegiranome čeliku, ali bilježi se primjena i na aluminiju i njegovim legurama debljina većih od 5 mm. Najčešće korištene žice su promjera 1,0 i 1,2 mm za čelike i visokolegirane Cr – Ni čelike te 1,2 i 1,6 mm za aluminij i aluminijske legure. Ovisno o osnovnome materijalu, zaštitni plin je argon (aluminij) te aktivne plinske mješavine s visokim udjelom argona [47].

Na slici 39 prikazana je primjena forceArc postupka na zavarenome spoju čelika S355 debljine 30 mm. Zavareni spoj je izveden jednostrano, bez podloške na korijenskoj strani, uz kut pripreme spoja od 25°. Upotrijebljen je dodatni materijal promjera 1,2 mm kvalitete G4Si1 [53].

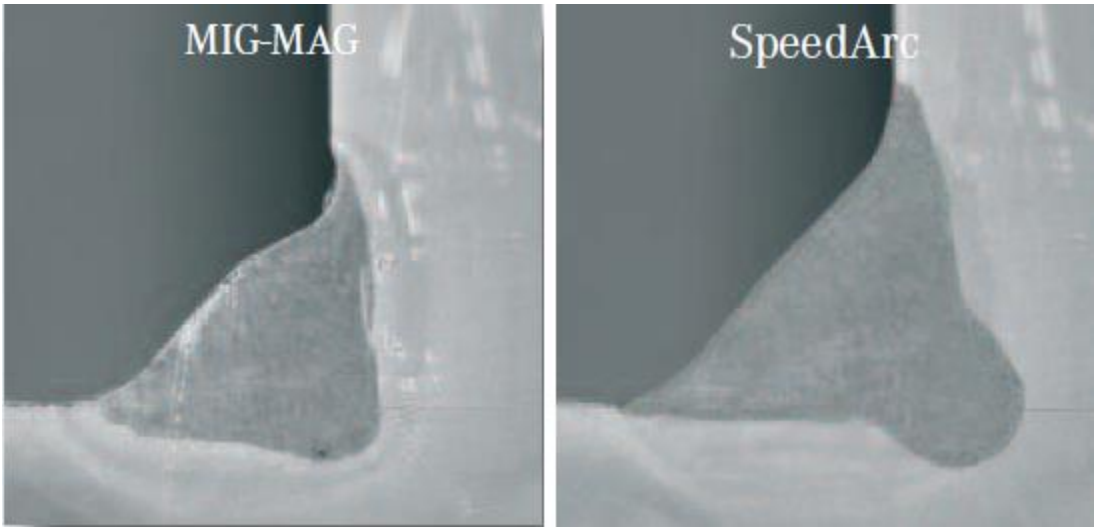


Slika 39. Zavareni spoj čelika S355 debljine 30 mm izveden forceArc postupkom [53]

3.2.4. SpeedArc

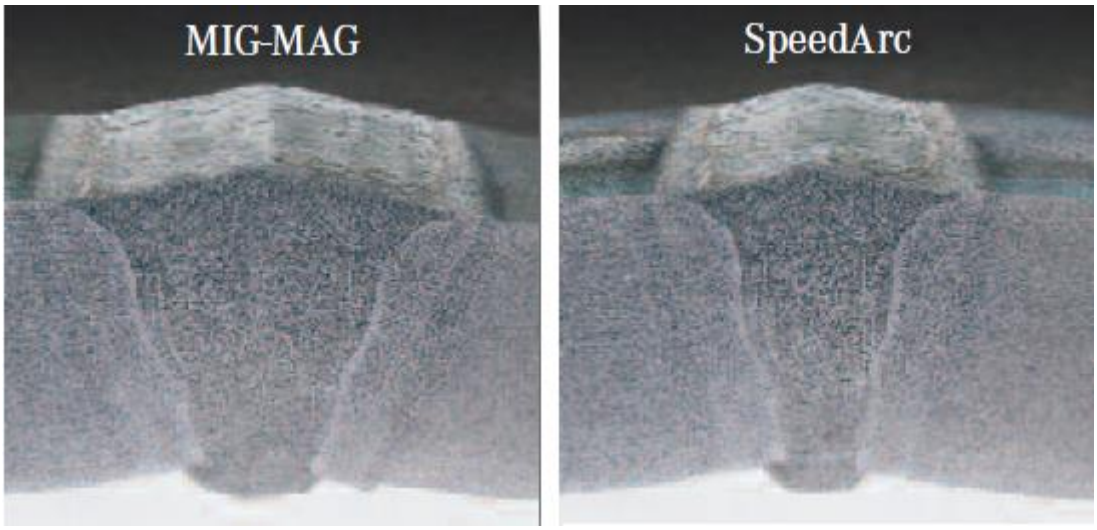
SpeedArc postupak modificirana je varijanta MAG procesa zavarivanja tvrtke Lorch koja se temelji na modifikacijama prijenosa metala u štrcajućem luku. Postupak karakterizira znatno usmjereniji i kraći električni luk s većom gustoćom energije te većim tlakom električnoga luka prema talini. Kao što piše u samome nazivu postupka, cilj je na ubrzanju postupka zavarivanja pa u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje ostvaruju i do 30 % veće brzine zavarivanja [54].

O visokoj produktivnosti SpeedArc postupka govori i činjenica da komponente koje su se prije zavarivale većim brojem prolaza sada mogu biti izvedene samo u jednome prolazu, a što se odnosi na debljine limova do 15 mm. U odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje, SpeedArc varijantom se ostvaruju značajno veće dubine penetracije u osnovni materijal, slika 40 [54].



Slika 40. Usporedba dubine penetracije na kutnome spoju između SpeedArc varijante i konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja [54]

Upotrebom SpeedArc postupka omogućeno je smanjenje kuta pripreme spoja sa 60° na 40°, čime se ostvaruju ogromne uštede u pogledu dodatnoga materijala. Slikom 41 prikazana je usporedba sučeljenih spojeva izvedenih SpeedArc postupkom i konvencionalnim MAG zavarivanjem s obzirom na kut pripreme spoja [54].



Slika 41. Usporedba sučeljenih spojeva izvedenih SpeedArc postupkom i konvencionalnim MAG zavarivanjem s obzirom na kut pripreme spoja [54]

Usmjerenim i stabilnim lukom SpeedArc procesa olakšano je rukovanje pri zavarivanju, čak i s većim duljinama slobodnoga kraja žice, što je vrlo pogodno pri izvođenju zavarivanja u uskim žlijebovima (slika 42) [54].

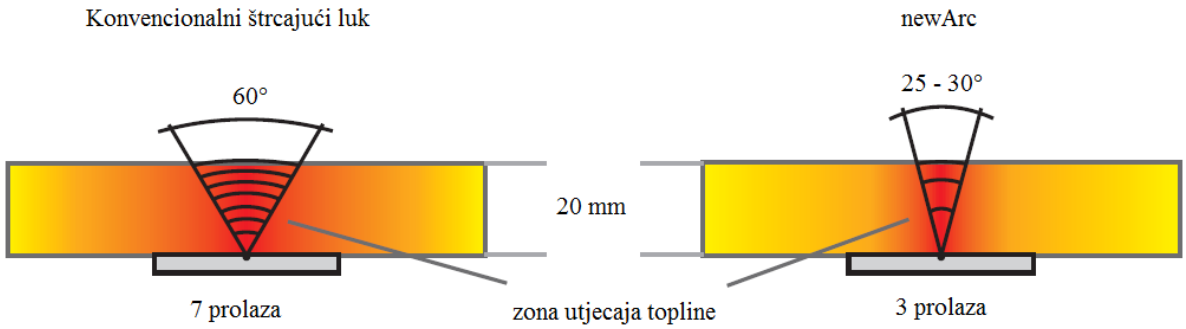


Slika 42. Izvođenje zavarivanja u uskome žlijebu s većom duljinom slobodnoga kraja žice [55]

3.2.5. NewArc

NewArc inačica MAG zavarivanja razvijena je u tvrtki Kjellberg Finsterwalde, a odnosi se na modificirani prijenos metala u štrcajućem luku. Glavne značajke ove tehnologije su stabilni i vrlo usmjereni električni luk koji uz mogućnost kvalitetnoga praćenja spoja i korištenja većih duljina slobodnoga kraja (do 40 mm) žice ostvaruje veće dubine penetracije u odnosu na tradicionalni prijenos štrcajućim lukom [56].

Kao najvažnija novina kod newArc postupka ističe se smanjenje kuta pripreme spoja. U usporedbi s kutom pripreme kod konvencionalnoga štrcajućega luka, iznos kuta kod newArc postupka je i do dva puta manji, što rezultira manjim brojem potrebnih prolaza za izvršenje zavarenoga spoja, a time i minimalnom zonom utjecaja topline, slika 43 [56].

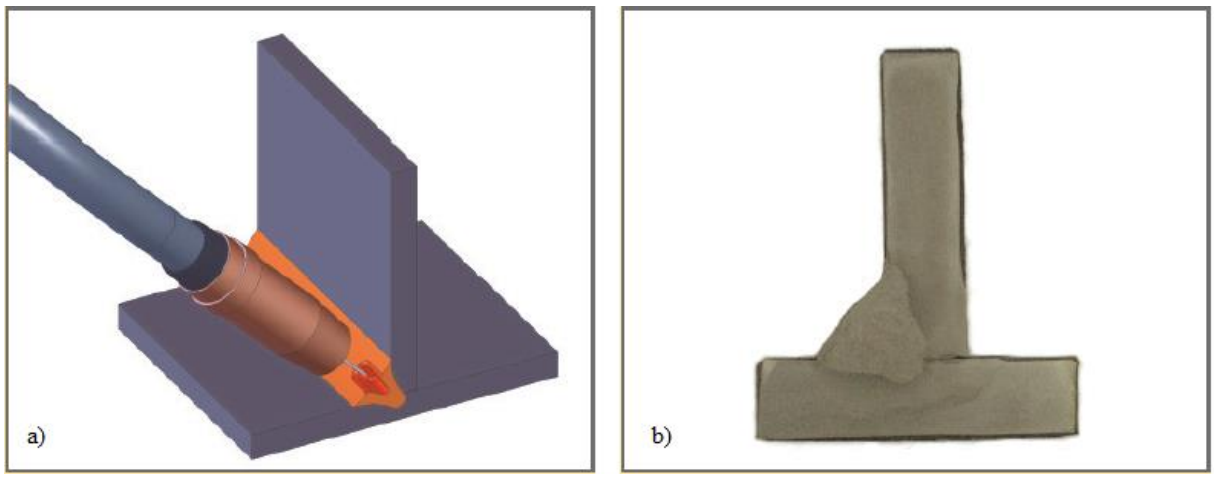


Slika 43. Usporedba konvencionalnog štrcajućeg luka i newArc postupka s obzirom na kut pripreme spoja, broj prolaza i ZUT [56]

Ostale tehnološke prednosti koje se postižu newArc postupkom su [56]:

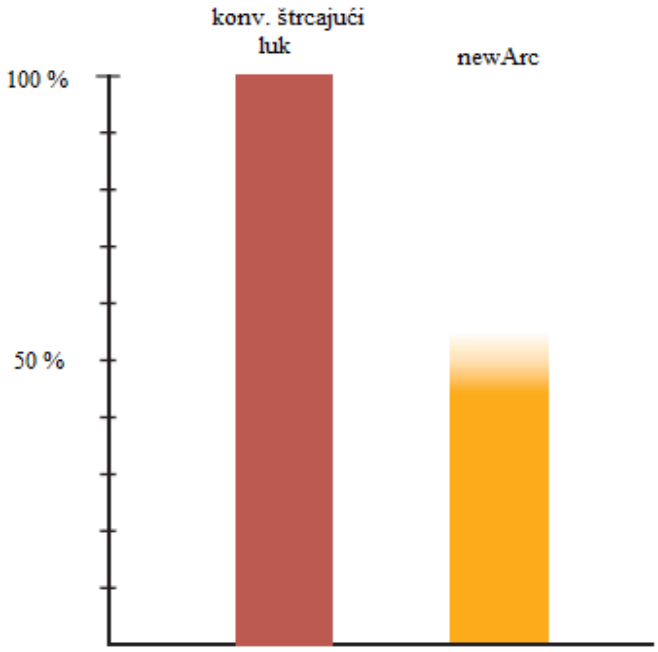
- visoka pouzdanost procesa, čak i kod zavarivanja u vrlo uskim žlijebovima i na složenim dijelovima debljina od 6 mm nadalje
- visoka kvaliteta koja se očituje kroz dobro protaljivanje korijena i bočnih strana žlijeba
- brži proces u odnosu na konvencionalno zavarivanje štrcajućim lukom
- manji unos topline u zavareni spoj
- gotovo bez pojave pora, ugorina i rasprskavanja kapljica
- bolja kvaliteta površine zavarenog spoja.

Na slici 44 prikazano je vođenje pištolja prilikom zavarivanja kutnoga spoja newArc postupkom i izgled gotovog zavarenog spoja.



Slika 44. Primjena newArc postupka na kutnome spoju: a) vođenje pištolja; b) izgled gotovog zavarenog spoja [56]

NewArc postupkom ostvaruju se uštede u pogledu skraćenja vremena zavarivanja, smanjenja operativnih troškova i do 50 % u odnosu na konvencionalni štrcajući luk (slika 45) te manjega broja zastoja koji su izbjegnuti pojednostavljenom pripremom spoja, većom kvalitetom procesa zavarivanja te manjim rasprskavanjem [56].



Slika 45. Smanjenje operativnih troškova i do 50 % u odnosu na standardni štrcajući luk [56]

3.2.6. Rapid Weld

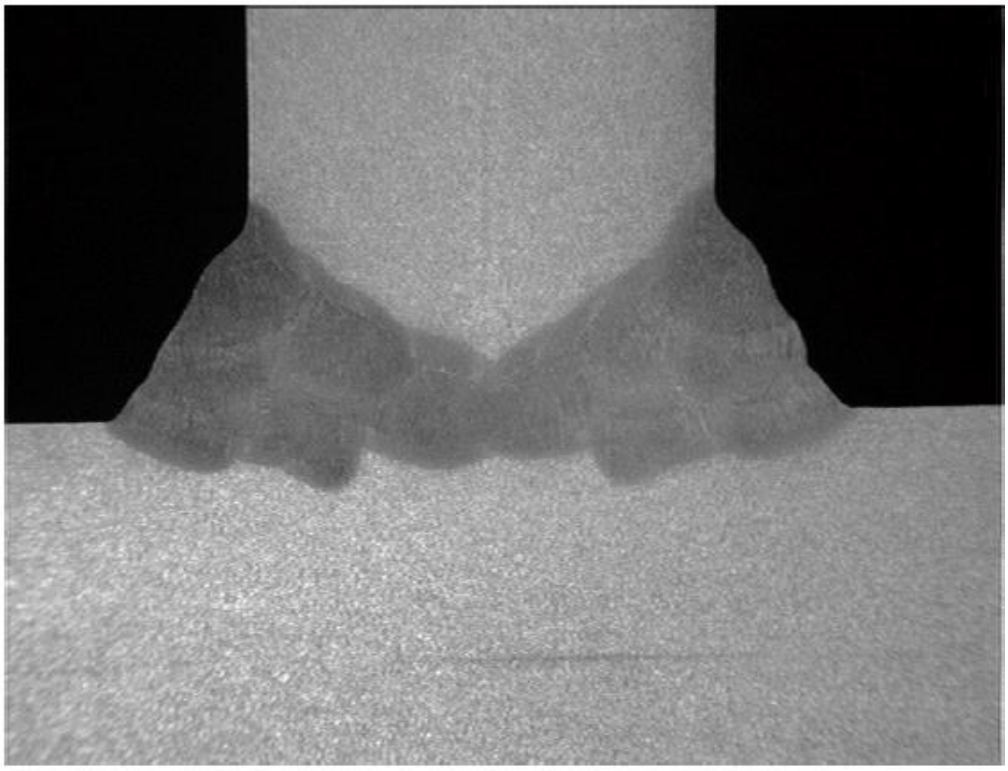
Rapid Weld postupak tvrtke CLOOS zasniva se na modificiranome prijenosu metala štrcajućim lukom. Iznimnim mogućnostima upravljanja izvora struje za zavarivanje ostvaruje se jako stabilni i koncentrirani električni luk visoke gustoće energije, koji najbolje pokazuje svoje prednosti prilikom zavarivanja srednje debelih i debelih limova, gdje je potrebno zadovoljiti kriterije većih količina depozita i optimalne dubine penetracije. Nadalje, procesom se ostvaruju veće brzine zavarivanja, a zbog užega električnog luka unos topline je sveden na minimum [57].

Ključne prednosti Rapid Weld varijante [57, 58]:

- odlična penetracija u osnovni materijal
- velike brzine zavarivanja
- smanjena potrošnja dodatnog materijala i zaštitnog plina uslijed manjega kuta pripreme spoja
- kraća vremena zavarivanja zbog manjeg broja potrebnih prolaza
- minimalni unos topline
- mogućnost podešavanja penetracijskog profila.

Rapid Weld varijanta MAG zavarivanja prvenstveno se koristi prilikom zavarivanja nelegiranih i niskolegiranih konstrukcijskih čelika većih debljina. Postupak je osobito pogodan za ručnu i automatiziranu primjenu u područjima kao što su strojogradnja, brodogradnja i izrada tračničkih vozila [58].

Na slici 46 prikazana je primjena Rapid Weld postupka na T – spoju s potpunom penetracijom uz obostrano zavarivanje, pri čemu debljina osnovnoga materijala iznosi 40 mm.



Slika 46. T – spoj s potpunom penetracijom izveden Rapid Weld postupkom [59]

4. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnome dijelu rada definirana je priprema spoja i parametri zavarivanja za konvencionalni i modificirani (forceArc) način prijenosa metala, te je na temelju dobivenih rezultata analizirana prikladnost uporabe forceArc varijante u odnosu na konvencionalno MAG zavarivanje debelostjenih konstrukcija. Eksperimentalni rad je izveden u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Eksperiment je proveden u tri faze. Osnovni materijal koji je upotrijebljen u eksperimentu je je opći konstrukcijski čelik S235. U prvoj fazi izvršeno je navarivanje na osnovni materijal s tri različita načina prijenosa metala (impulsno MAG zavarivanje, forceArc i forceArc puls), izrađeni su makroizbrusci navara te je analizirana njihova geometrija, sa svrhom odabira odgovarajuće kombinacije parametara zavarivanja za sljedeću fazu pokusa. U drugoj fazi rada provedeno je zavarivanje dvaju sučeljenih spojeva i dvaju spojeva u uskome žlijebu. Treći dio pokusa obuhvaća izradu makroizbrusaka zavarenih spojeva i analizu dobivenih rezultata.

Zavarivanje uzoraka izvedeno je automatiziranim MAG postupkom. Automatizirani postupak odabran je iz razloga da svi zavareni spojevi budu izvršeni u jednakim uvjetima, tj. kako bi se izbjegao utjecaj ljudskoga faktora na rezultate zavarivanja.

Dodatni materijal korišten u eksperimentu je puna žica komercijalnoga naziva EZ – SG 2, proizvođača Elektroda Zagreb d.d., dok je za zaštitni plin odabrana plinska mješavina Ferroline C18.

4.1. Oprema za zavarivanje

Navarivanje i zavarivanje ispitnih uzoraka provedeno je automatiziranim MAG postupkom koji uključuje izvor struje za zavarivanje Titan XQ 350 puls i automat za zavarivanje BUG – O Systems MDS 1002.

Uređaj za zavarivanje Titan XQ 350 puls predstavlja novu generaciju invertera tvrtke EWM. Kao dodatak mnogim drugim digitalnim funkcijama koje uređaj posjeduje, ističe se mogućnost povezivanja sa sustavom upravljanja zavarivanjem EWM Xnet (Zavarivanje 4.0). WPS dokumenti tako se šalju izravno iz ureda za planiranje u upravljačku jedinicu uređaja, bez potrebe za papirima te uključujući sve potrebne parametre zavarivanja [60].

U sami uređaj su osim konvencionalnog i impulsnog MAG načina prijenosa metala integrirani i svi modificirani EWM – ovi načini prijenosa metala, a to su: forceArc, forceArc puls, wiredArc, wiredArc puls, coldArc, coldArc puls, rootArc, rootArc puls te pozicijsko zavarivanje. Prema tome, bilo da se radi o tanjim ili debljim limovima, korijenskim prolazima, prolazima popune ili završnim prolazima, uređaj je sposoban kvalitetno izvršiti zadatak na niskolegiranim i visokolegiranim čelicima te aluminijskim legurama [60]. Na slici 47 prikazan je izvor struje za zavarivanje Titan XQ 350 puls.



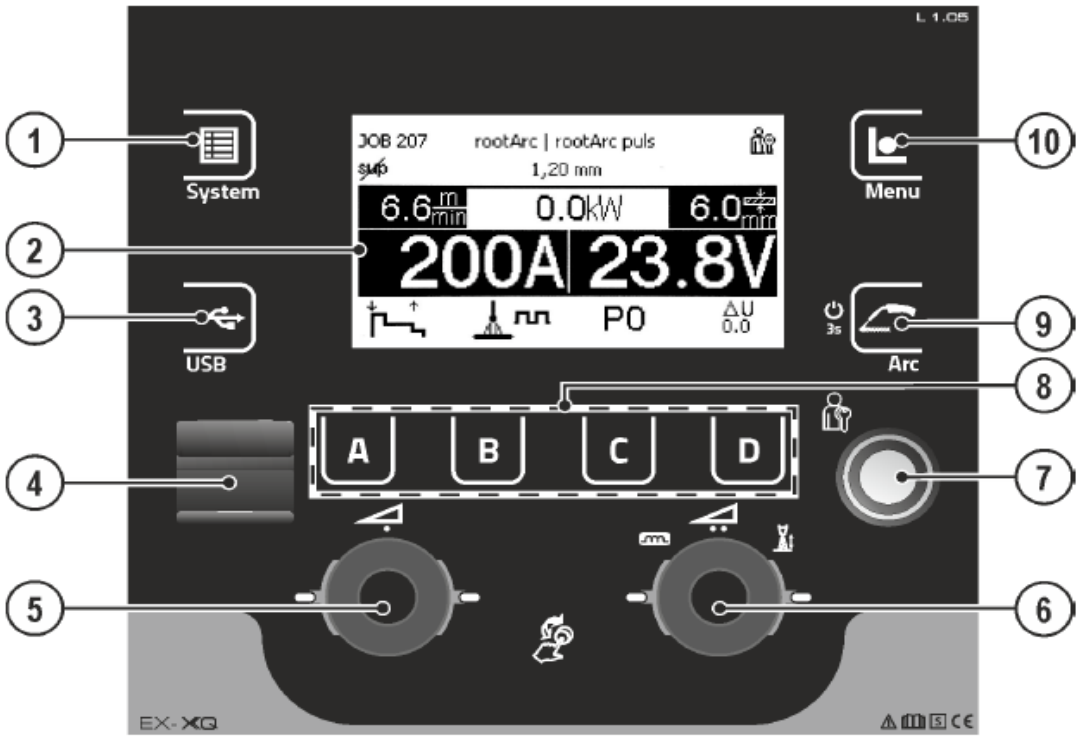
Slika 47. Izvor struje za zavarivanje Titan XQ 350 puls

Uređaj je projektiran tako da izdrži teške uvjete rada, kao što su oni u izradi čeličnih konstrukcija, brodogradnji te automobilskoj industriji, gdje se kontinuirano radi u tri smjene. Otporan je pri ekstremnim uvjetima na kiši, mrazu i snijegu, te radi u temperaturnome području od –25 °C do +40 °C. Tvrtka EWM garantira intermitenciju uređaja od 80 %. Preciznim projektiranjem napajanja i hlađenja osiguran je dugi vijek trajanja uređaja [60]. Tablicom 2 prikazane su tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje Titan XQ 350 puls.

Tablica 2. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje Titan XQ 350 puls [61]

Titan XQ 350 puls	
Priključni napon	3 x 400 V
Tolerancija priključnog napona	-25 % do +20 %
Frekvencija mreže	50/60 Hz
Maksimalno opterećenje uređaja	14,7 kVA
Faktor snage (cosφ)	0,99
Raspon struje zavarivanja	5 A - 350 A
Radni napon	14,3 V - 31,5 V
Intermitencija, 10 min/40 °C	100 % pri 350 A
Napon praznog hoda	82 V
Temperatura okoliša	-25 °C do +40 °C
Masa uređaja	128,5 kg
Dimenzije, d/š/v	1152 mm/686 mm/976 mm
Statička karakteristika	CV

Na slici 48 prikazano je upravljačko sučelje uređaja za zavarivanje Titan XQ 350 puls.



Slika 48. Upravljačko sučelje uređaja Titan XQ 350 puls [62]

Kratki opis pojedinih dijelova i gumbova upravljačkoga sučelja uređaja [62]:

1) gumb za konfiguraciju sustavnih postavki
2) ekran uređaja
3) gumb za upotrebu i konfiguraciju USB sučelja
4) utor za USB flash memoriju (offline prijenos podataka)
5) okretni gumb za namještanje struje zavarivanja, brzine dodavanja žice ili debljine osnovnoga materijala (*One Knob* načelo)
6) okretni gumb za korekciju duljine električnoga luka i podešavanje njegove dinamike
7) gumb za postavljanje zaštite od neovlaštenoga pristupa parametrima zavarivanja ili nenamjerne rekonfiguracije
8) gumbovi za definiranje dodatnih značajki uređaja
9) gumb za promjenu načina prijenosa metala u električnome luku
10) izbornik uređaja, organizacija zavarivačkih zadataka.

Automat za zavarivanje BUG – O Systems MDS 1002 osigurava kontrolu smjera i brzine zavarivanja u kontinuiranim primjenama, a koristi se i za operacije rezanja. Brzinu zavarivanja automata moguće je podešavati u rasponu od 5,1 cm/min do 304,8 cm/min [63].

Slikom 49 prikazan je automat za zavarivanje BUG – O Systems MDS 1002.



Slika 49. Automat za zavarivanje BUG – O Systems MDS 1002

4.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u eksperimentalnome radu korišten je opći konstrukcijski čelik oznake S235 prema normi EN 10027 – 1:2016. U tablici 3 prikazan je kemijski sastav osnovnoga materijala, dok su u tablici 4 prikazana njegova mehanička svojstva.

Tablica 3. Kemijski sastav čelika S235 [64]

Kemijski element	C	Mn	P	S	Si
Maseni udio elementa, %	0,22	1,6	0,05	0,05	0,05

Tablica 4. Mehanička svojstva čelika S235 [65]

Oznaka	Granica razvlačenja (R_e), MPa	Vlačna čvrstoća (R_m), MPa	Udarni rad loma pri 20 °C (*KV*), J
S235	235	340 - 470	27

Za provedbu eksperimentalnoga dijela rada korištene su ploče osnovnoga materijala debljine 10 mm.

4.3. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal za izradu uzoraka upotrijebljena je puna žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d., trgovačkoga imena EZ – SG 2, promjera 1,2 mm. Specifikacija dodatnoga materijala prikazana je na sljedećoj stranici slikom 50.

EZ - SG 2

NORME

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

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Pobakrena ili pobrončana žica za zavarivanje u zaštitnoj atmosferi plina CO_2 ili mješavine plinova Ar/CO_2. Za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm².

Grupa čelika	HRN (stari)	DIN (W. Nr.)	HRN / EN / ISO
Konstrukcijski čelici	Č 0261 do Č 0545	St 33 (1.0035) do St 52-2N (1.0050)	S 185 do E 295 Fe 310-0 do Fe 490-2
Kotlovski čelici	Č 1202 Č 1204	HI (1.0345) HII (1.0425)	P235GH P265GH
	Č 3133 Č 3105	17Mn4 (1.0481) 19Mn6 (1.0473)	P295GH P355GH
Čelici za cijevi	Č 1212 do Č 3100	St 35.4 (1.0309) do St 52.4 (1.0581) StE 210.7 (1.0307) do StE 360.7 (1.0582)	DX55D do P355T2 L210 do L360NB
Brodski čelici	A, B, D, E AH 32 do EH 36	A, B, D, E AH 32 do EH 36	
Sitnozrnati čelici	ČRO 250 do ČRO 350 ČRV 250 do ČRV 350	StE 285 (1.0486) StE 355 (1.0562) WStE 285 (1.0487) WStE 355 (1.0565)	P275N P355N P275NH P355NH
Čelični lijev	ČL 0300 do ČL 0500	GS-38 (1.0416) do GS-52 (1.0551)	C18D do S355JRC

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

R_{eL} N/mm²	R_m N/mm²	A_5 %	KV (-40°C) J
> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŽICE

	C	Mn	Si	Cu
%	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 - 1,0	≤ 0,3

ZAŠTITNI PLIN

C1 ili M21

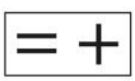
PAKIRANJE

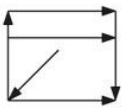
Promjer žice mm	Namotaj
0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6	Slobodan (S-L); žica do žice (S-S)

1 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
5 kg - plastični kolut (promjer žice 0,6 i 0,8 mm)
15 kg - plastični (S-L ili S-S) ili žičani kolut (S-S) (promjer žice 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm)
250 kg - bačva (promjer žice 0,8; 1,0 i 1,2 mm)

ODOBRENJA

ABS (3YSA); BV (SA 3Y M); CRS (3YS); DB; DNV (IIIYMS); GL (3YS); LR (3S,3YS); RINA (3YS); TÜV





Slika 50. Specifikacija dodatnoga materijala EZ – SG 2 [66]

4.4. Zaštitni plin

U eksperimentu je korišten dvokomponentni zaštitni plin Ferroline C18 proizvođača Messer. Tablicom 5 prikazan je sastav plinske mješavine.

Tablica 5. Sastav plinske mješavine Ferroline C18 [67]

Naziv proizvoda	Grupa prema EN ISO 14175	Volumni sastav, %	
		Ar	CO_2
Ferroline C18	M21	82	18

Slika 51 prikazuje spremnik zaštitnoga plina Ferroline C18.



Slika 51. Spremnik zaštitnoga plina Ferroline C18

4.5. Navarivanje

U svrhu definiranja odgovarajućih parametara zavarivanja za daljnji tijek rada, provedeno je navarivanje na osnovnome materijalu. Navarivanje je izvedeno s tri različita načina prijenosa metala, MAG impulsni prijenos metala, forceArc prijenos te forceArc puls prijenos metala. Nakon navarivanja izrađeni su makroizbrusci navarenih uzoraka te je izmjerena njihova geometrija (širina navara, nadvišenje navara i dubina penetracije), kako bi se ocijenila podudarnost postavljenih parametara s dobivenim rezultatima geometrije i potvrdile teorijske pretpostavke forceArc načina prijenosa metala (prvenstveno u vidu dubine penetracije). Postupak navarivanja izvršen je neutralnom tehnikom rada, što je prikazano na slici 52.



Slika 52. Položaj pištolja – neutralna tehnika rada

4.5.1. Parametri navarivanja

Parametri navarivanja su definirani na dva načina. Prva skupina parametara navarivanja definirana je preko jakosti struje zavarivanja, dok je druga skupina parametara definirana s obzirom na debljinu osnovnoga materijala. Slobodni kraj žice i protok zaštitnoga plina bili su jednaki u oba slučaja. Protok je iznosio 18 l/min, dok je slobodni kraj žice postavljen na 15 mm.

Unos topline u zavareni spoj računa se prema izrazu na slici 53.

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_{zav}} \times \frac{60}{1000} \quad (1)$$

Slika 53. Izraz za unos topline u zavareni spoj [68]

Gdje su:

Q – unos topline u zavareni spoj, kJ/cm

k – stupanj korisnosti postupka zavarivanja (za MAG postupak iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_{zav} – brzina zavarivanja, cm/min

Kod prve skupine parametara navarivanja, tj. onih kojima su se navarivali uzorci 1, 2 i 3, struja zavarivanja namještena na uređaju iznosila je 301 A. Ostali parametri potom se automatski podešavaju prema sinergijskoj krivulji izvora struje. U tablici 6 prikazani su parametri navarivanja uzoraka 1, 2 i 3, pri čemu je za svaki uzorak korišten drugi način prijenosa metala. Za proračun unosa topline uvrštene su očitane vrijednosti struje i napona tijekom procesa navarivanja.

Tablica 6. Parametri navarivanja uzoraka 1, 2 i 3

Oznaka uzorka		Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
Način prijenosa metala		MAG - impulsno	forceArc	forceArc puls
Jakost struje, A	Podešena	301	301	301
	Očitana	284	285	292
Napon, V	Podešeni	27,4	28,2	28,5
	Očitani	28	27,4	28,6
Brzina dodavanja žice, m/min		10,6	9,9	9,9
Brzina navarivanja, cm/min		35	35	35
Unos topline, kJ/cm		10,91	10,71	11,45
Protok zaštitnog plina, l/min		18	18	18
Slobodni kraj žice, mm		15	15	15

Parametri navarivanja uzoraka 4, 5 i 6 definirani su s obzirom na debljinu osnovnoga materijala. Prema tome, na sučelju uređaja namješten je iznos debljine od 9,5 mm za sva tri načina prijenosa metala, dok ostale parametre uređaj automatski podešava. Parametri navarivanja uzoraka 4, 5 i 6 prikazani su tablicom 7.

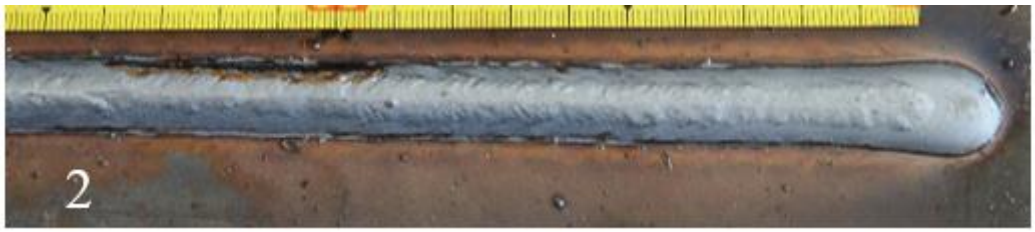
Tablica 7. Parametri navarivanja uzoraka 4, 5 i 6

Oznaka uzorka		Uzorak 4	Uzorak 6	Uzorak 5
Način prijenosa metala		MAG - impulsno	forceArc	forceArc puls
Jakost struje, A	Podešena	279	349	311
	Očitana	269	330	306
Napon, V	Podešeni	26,7	30,1	28,9
	Očitani	26,2	29,5	29,1
Brzina dodavanja žice, m/min		9,7	12	10,3
Brzina navarivanja, cm/min		35	35	35
Unos topline, kJ/cm		9,67	13,35	12,21
Protok zaštitnog plina, l/min		18	18	18
Slobodni kraj žice, mm		15	15	15

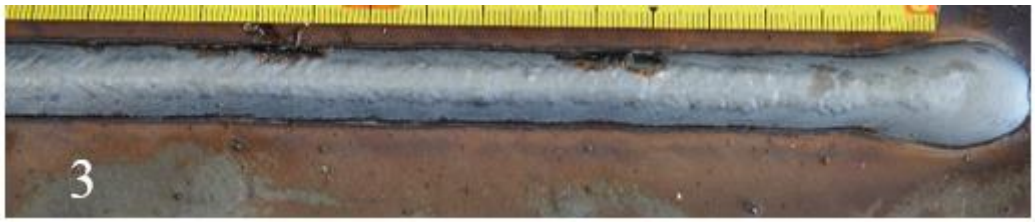
Nakon definiranja parametara izvršen je postupak navarivanja. Slike navarenih uzoraka prikazane su u nastavku.



Slika 54. Uzorak 1



Slika 55. Uzorak 2



Slika 56. Uzorak 3



Slika 57. Uzorak 4



Slika 58. Uzorak 5

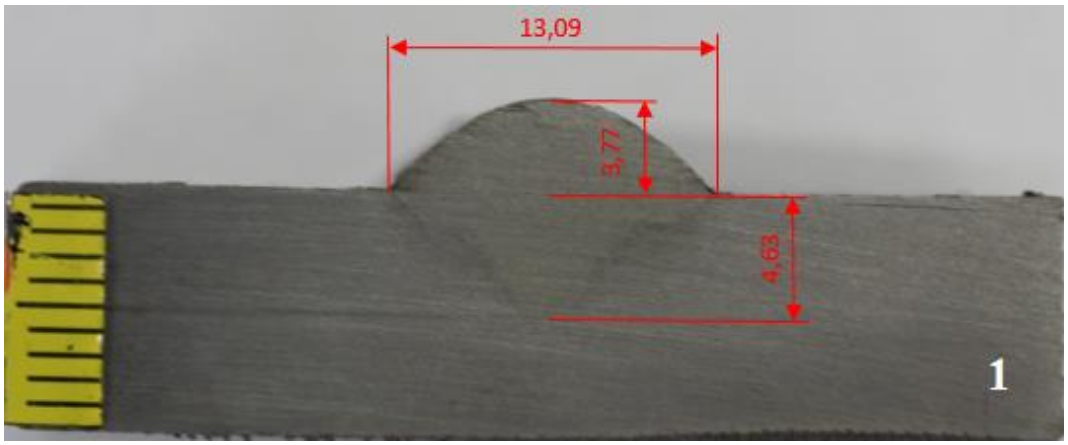


Slika 59. Uzorak 6

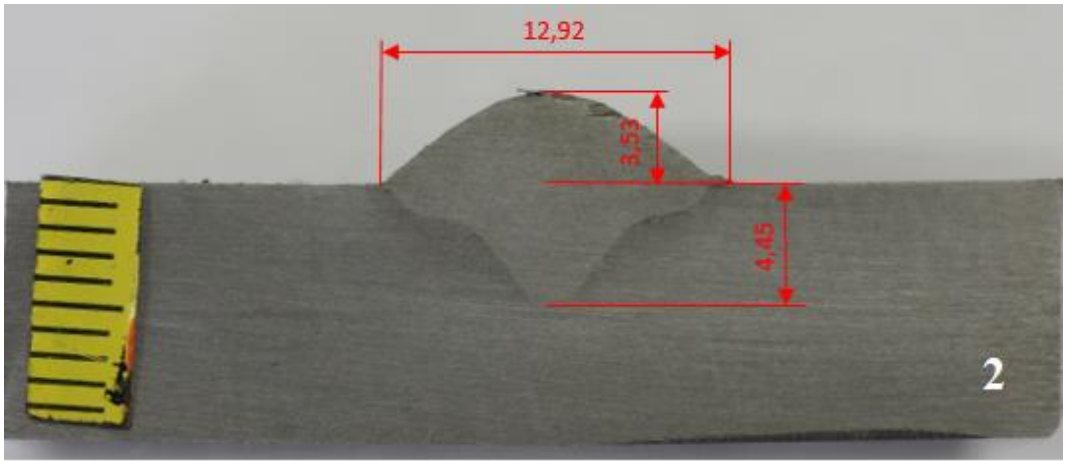
4.5.2. Makroizbrusci navarenih uzoraka

Poslije navarivanja napravljeni su makroizbrusci uzoraka na kojima su vršena mjerenja dubine penetracije, širine navara te nadvišenja navara u programu ImageJ. Cilj je geometriju uzoraka povezati s parametrima navarivanja te na temelju toga donijeti odluku o parametrima za daljnje zavarivanje sučeljenoga spoja. Jedna kombinacija parametara se odabire za zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala, a druga za zavarivanje forceArc/forceArc puls prijenosom metala, pošto je u konačnici potrebno usporediti upravo te dvije varijante. Postupak izrade makroizbrusaka nije spomenut jer je naveden u kasnijoj točki rada.

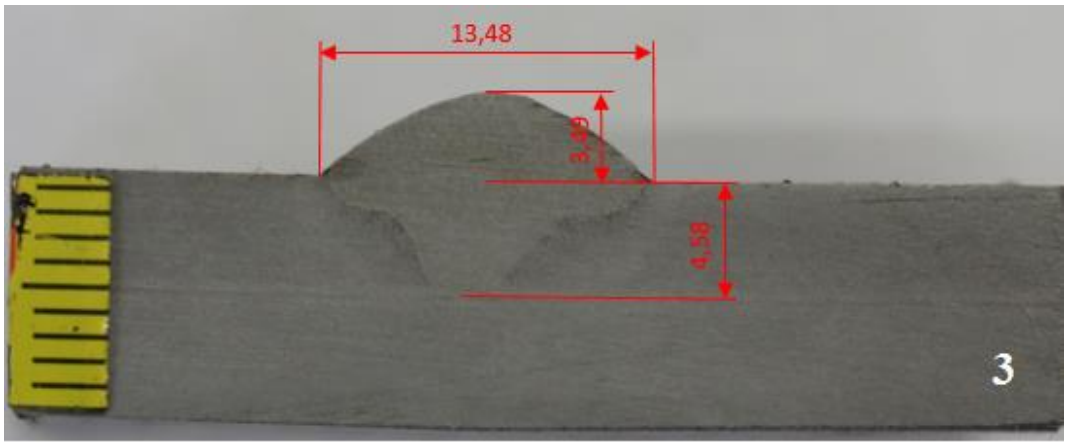
Na sljedećim slikama su prikazani makroizbrusci navarenih uzoraka.



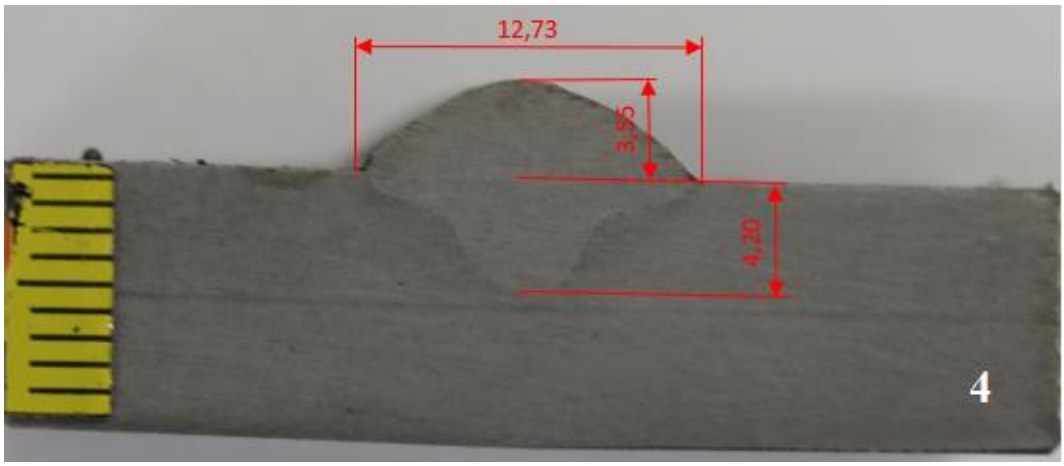
Slika 60. Makroizbrusak 1



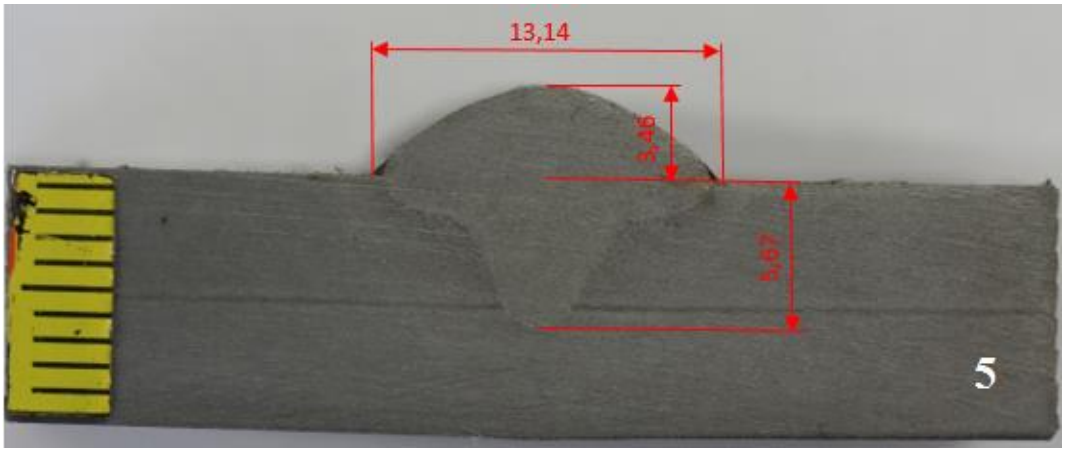
Slika 61. Makroizbrusak 2



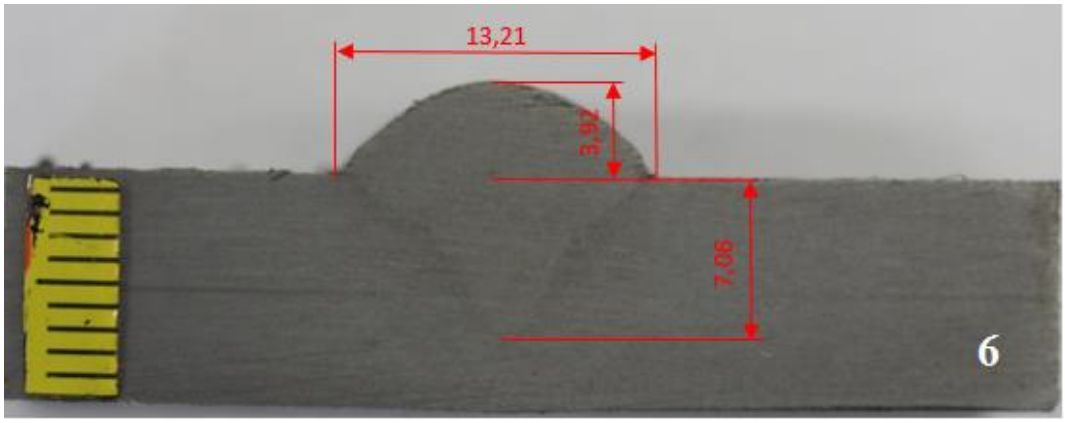
Slika 62. Makroizbrusak 3



Slika 63. Makroizbrusak 4



Slika 64. Makroizbrusak 5



Slika 65. Makroizbrusak 6

Izmjerene vrijednosti geometrije navarenih uzoraka objedinjene su u tablici 8.

Tablica 8. Izmjerene vrijednosti geometrije navarenih uzoraka

Oznaka uzorka	Širina navara, mm	Nadvišenje navara, mm	Dubina penetracije, mm
1	13,09	3,77	4,63
2	12,92	3,53	4,45
3	13,48	3,49	4,58
4	12,73	3,55	4,2
5	13,14	3,46	5,67
6	13,21	3,92	7,06

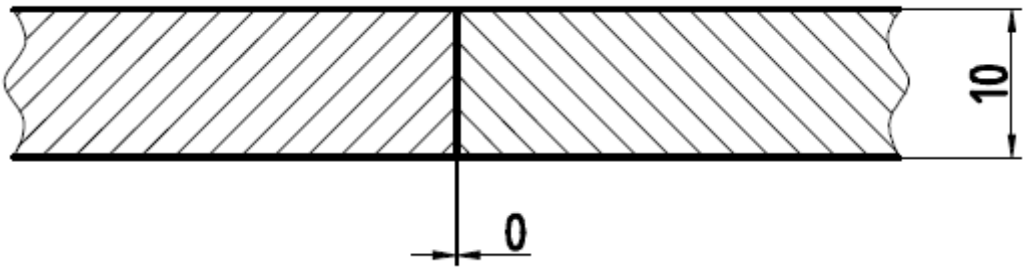
Nakon provedenih mjerenja širine, nadvišenja i dubine penetracije navarenih uzoraka, za pokus zavarivanja sučeljenoga spoja odabrani su parametri uzorka 1 i uzorka 5. Kod uzorka 5 ostvarena je veća dubina penetracije (5,67 mm) u odnosu na uzorak 1 (4,63 mm), što je prvi kriterij odabira. Drugi kriterij odabira je razlika u strujama navarivanja između uzorka 1 i uzorka 5 koja iznosi 22 A. Dakle, cilj je da se ostvari veća dubina penetracije forceArc prijenosom metala u odnosu na prijenos metala impulsnim lukom pri što manjoj razlici u parametrima zavarivanja. Iz toga razloga nisu odabrani parametri uzorka 4 i uzorka 6 kojima su ostvareni ekstremi po gledištu dubine penetracije, ali ne smatraju se reprezentativnima za nastavak pokusa jer je kod njih zabilježena razlika u strujama navarivanja od 61 A.

4.6. Zavarivanje uzoraka

Provedeno je zavarivanje dvije vrste spojeva, sučeljenoga I – spoja i spoja u uskome žlijebu. Sučeljeni I – spoj je zavaren s dva načina prijenosa metala, impulsnim MAG prijenosom metala i forceArc puls prijenosom metala, dok je spoj u uskome žlijebu zavaren samo forceArc načinom prijenosa metala pri čemu su otvori žlijeba iznosili 35° i 45°. Korišten je osnovni materijal čelik S235, debljina ploča za svaki spoj je bila ista i iznosila je 10 mm.

4.6.1. Zavarivanje sučeljenoga I – spoja

Za odabrani sučeljeni I – spoj izvršeno je zavarivanje prema parametrima definiranima za navarivanje uzoraka 1 i 5. Zavareni spoj je izveden u dva prolaza koji su povučeni s gornje i donje strane ploče. Kod I – spoja nije bilo razmaka između ploča, kako je prikazano slikom 66.



Slika 66. I – priprema spoja za zavarivanje [69]

Postupak zavarivanja sučeljenih spojeva izvršen je neutralnom tehnikom rada, slika 67.



Slika 67. Prikaz položaja pištolja tijekom zavarivanja sučeljenog spoja

Parametri zavarivanja koji se postavljaju kod uzoraka A i B odgovaraju parametrima navarivanja uzoraka 1 i 5. Za oba prolaza podešeni su parametri bili jednaki. Tijekom izvođenja svakoga prolaza bilježene su stvarne vrijednosti struje i napona zavarivanja. U tablicama 9 i 10 prikazani su stvarni parametri zavarivanja uzoraka A i B te vrijednosti unosa topline za svaki prolaz.

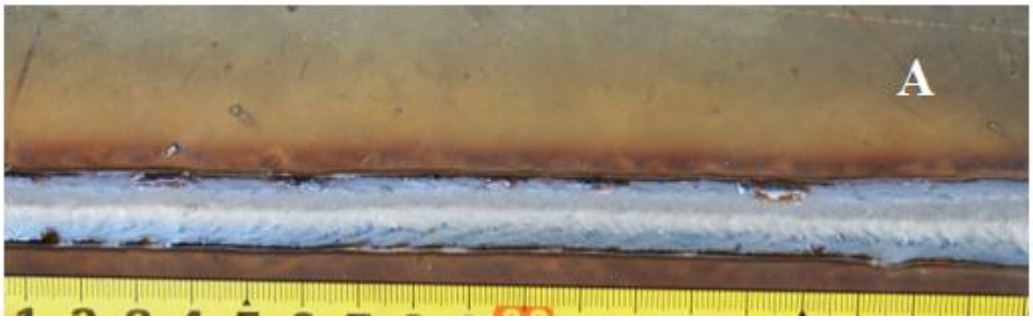
Tablica 9. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka A

Uzorak A - impulsno MAG				
Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm
1.	278	28,3	35	10,79
2.	280	28,2	35	10,83

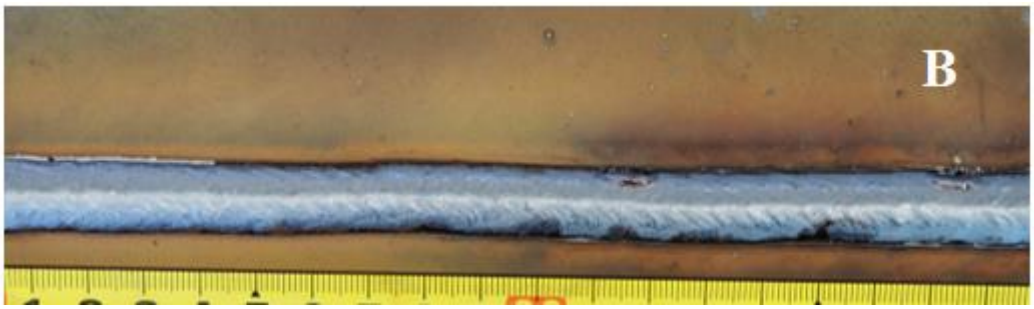
Tablica 10. Stvarne vrijednosti parametara zavarivanja uzorka B

Uzorak B – forceArc puls				
Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Unos topline, kJ/cm
1.	291	29,2	35	11,65
2.	297	29,1	35	11,85

Na slikama 68 i 69 prikazan je izgled zavarenog spoja A i B s gornje strane.



Slika 68. Zavareni spoj A

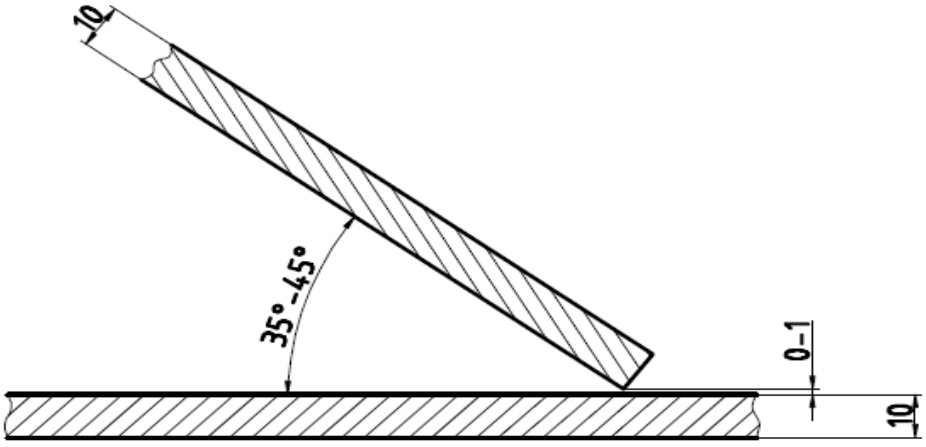


Slika 69. Zavareni spoj B

4.6.2. Zavarivanje spojeva u uskome žlijebu

Kao drugi spoj koji je zavaren u eksperimentu odabran je spoj u uskome žlijebu. Spoj je izabran na temelju brošure proizvođača strojeva i opreme za zavarivanje, tvrtke EWM. Cilj je bio ispitati karakteristike i mogućnosti forceArc prijenosa metala prilikom zavarivanja sa većim iznosima slobodnoga kraja žice. Zavarena su dva spoja u uskome žlijebu, jedan pod kutom od 35°, a drugi pod kutom od 45°. Oba spoja su izvedena forceArc prijenosom metala. Za izradu ovih spojeva nisu korišteni parametri navarivanja uzorka 1 i uzorka 5, već su definirani novi parametri. Zavarivanje je provedeno ručnim postupkom jer na automatu za zavarivanje nije bilo moguće pozicionirati pištolj za ovu vrstu spoja i raditi sa duljinama slobodnoga kraja žice od 20 mm i 40 mm. Zavarivanje je izvršeno u jednome prolazu.

Na slici 70 prikazana je priprema spoja za zavarivanje.



Slika 70. Priprema spoja za zavarivanje [50]

Prilikom zavarivanja spojeva u uskome žlijebu korištena je blaga desna tehnika rada.

Na slikama 71 i 72 prikazan je položaj pištolja u žlijebu s kutom od 35° i u žlijebu s kutom od 45°.



Slika 71. Položaj pištolja u žlijebu s kutom od 35°



Slika 72. Položaj pištolja u žlijebu s kutom od 45°

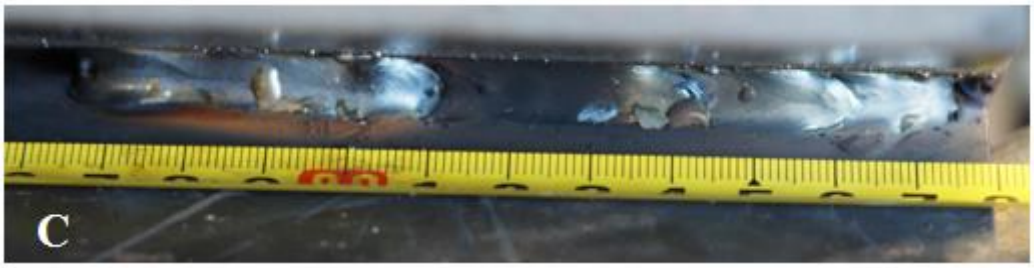
Za zavarivanje uzoraka C i D definiraju se parametri s obzirom na pripremu spoja, utjecaj slobodnoga kraja žice te mogućnosti izvora struje za zavarivanje. Otvor žlijeba kod uzorka C iznosio je 35°, a kod uzorka D bio je 45°. Oba uzorka su zavarena forceArc načinom prijenosa metala. S obzirom da je duljina slobodnoga kraja žice kod uzorka C iznosila 40 mm, a kod uzorka D 20 mm, za obadva slučaja na uređaju se podešava maksimalni mogući iznos struje od 349 A. Zavarivanje je provedeno ručnim postupkom u jednome prolazu. Protok zaštitnoga plina iznosio je 18 l/min.

Parametri zavarivanja uzoraka C i D prikazani su tablicom 11.

Tablica 11. Parametri zavarivanja uzoraka C i D

Oznaka uzorka		Uzorak C	Uzorak D
Način prijenosa metala		forceArc	forceArc
Jakost struje, A	Podešena	349	349
	Očitana	250	302
Napon, V	Podešeni	30,4	30,4
	Očitani	28,9	31,2
Brzina dodavanja žice, m/min		12	12
Protok zaštitnog plina, l/min		18	18
Slobodni kraj žice, mm		40	20

Na slikama 73 i 74 prikazan je izgled uzoraka C i D s prednje strane.



Slika 73. Uzorak C s prednje strane



Slika 74. Uzorak D s prednje strane

Na slikama 75 i 76 prikazan je izgled uzoraka C i D sa stražnje strane.



Slika 75. Uzorak C sa stražnje strane



Slika 76. Uzorak D sa stražnje strane

Nakon zavarivanja uzoraka C i D vizualnom kontrolom se zaključuje kako nije ostvarena dovoljna penetracija u osnovni materijal. Zavareni spojevi C i D kao takvi nisu prihvatljivi za daljnju analizu makrostrukture te će izrada makroizbrusaka biti izvršena samo za uzorke A i B.

4.7. Izrada makroizbrusaka

Nakon provedenoga postupka zavarivanja pristupljeno je izradi makroizbrusaka sučeljenih spojeva A i B. Izrada makroizbrusaka izvršena je u Laboratoriju za zavarivanje sljedećim redoslijedom:

1) piljenjem uzoraka na tračnoj pili
2) brušenjem na tračnoj brusilici granulata trake P100
3) ručnim brušenjem brusnim papirima granulacija P180, P240, P320 i P500.

Nakon brušenja provedeno je nagrizanje makroizbrusaka u 3 % - tnoj otopini nitala u vremenskom razdoblju od 15 s. Poslije nagrizanja ista je površina isprana mlazom vode.

Na slikama 77 i 78 prikazani su dobiveni makroizbrusci uzoraka A i B.



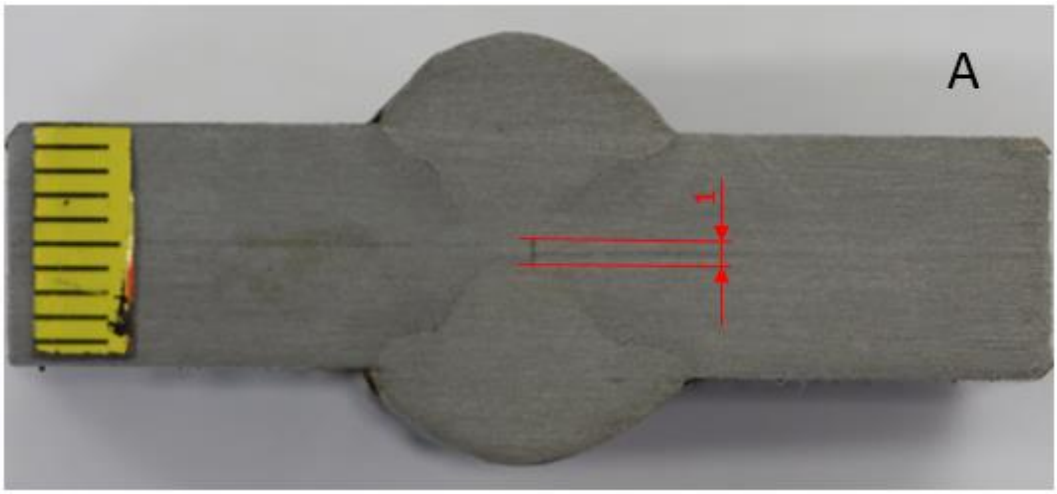
Slika 77. Makroizbrusak uzorka A



Slika 78. Makroizbrusak uzorka B

Kod makroizbruska A jasno se vidi kako nije ostvaren potpuni provar, dok je kod makroizbruska B isti ostvaren.

Duljina koja dijeli uzorak A od ostvarenja potpunoga provara iznosi 1 mm, a izmjerena je u programu ImageJ (slika 79).



Slika 79. Iznos duljine koji dijeli uzorak A od potpunoga provara

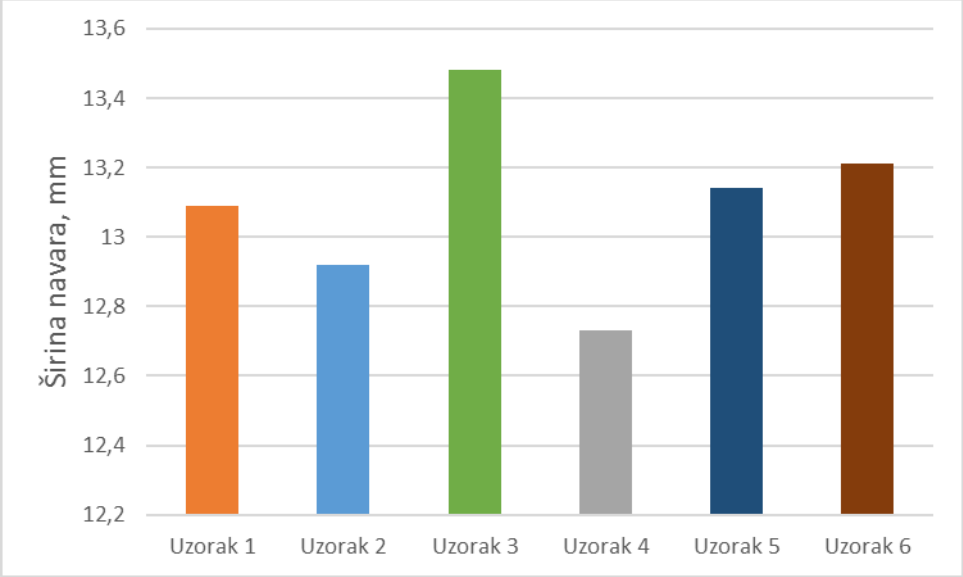
Na slici 80 pobliže je prikazan nepotpuni provar uzorka A. Na makroizbrusku uzorka B nisu primijećene pogreške.



Slika 80. Nepotpuni provar uzorka A

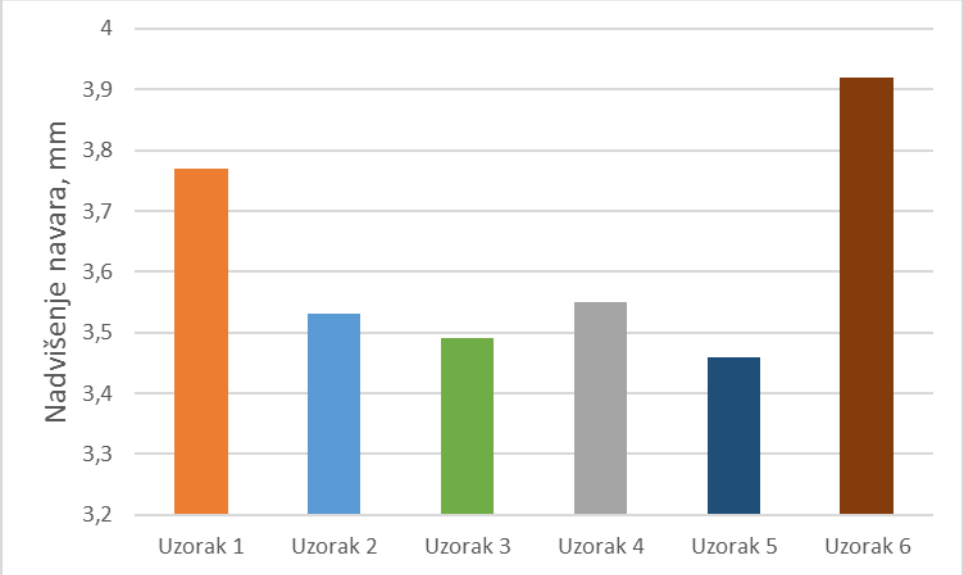
4.8. Analiza rezultata

Analiza širine šest navarenih uzoraka ukazuje na odstupanja vrijednosti uzoraka 3 (13,48 mm) i 4 (12,73 mm) u odnosu na ostale uzorke. Najniža vrijednost širine, tj. vrijednost širine uzorka 4, posljedica je najmanjega unosa topline (9,67 kJ/cm) u usporedbi s drugim uzorcima. Slikom 81 prikazana je usporedba širine navara između uzoraka.



Slika 81. Usporedba širina navarenih uzoraka

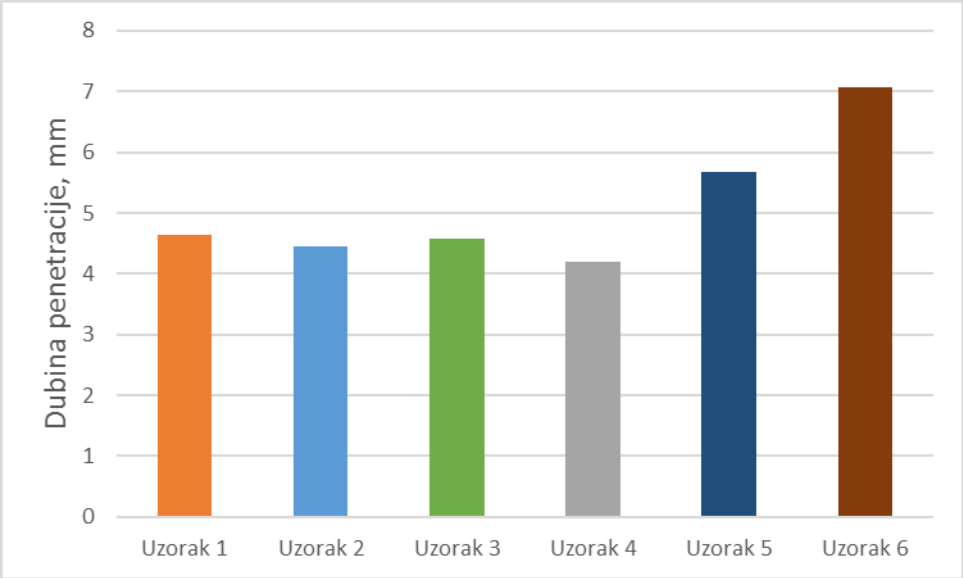
Na slici 82 prikazana je usporedba nadvišenja navarenih uzoraka.



Slika 82. Usporedba nadvišenja navarenih uzoraka

Izmjerene vrijednosti nadvišenja su približno jednake za sve uzorke. Maksimalno nadvišenje je ostvareno kod uzorka 6 (3,92 mm), kojega karakterizira najveći unos topline (13,35 kJ/cm).

Slika 83 prikazuje ostvarene dubine penetracije kod navarenih uzoraka. Vrijednosti dubina penetracije kod prva tri uzorka su približno jednake. Kod uzorka 4 se bilježi najmanji iznos dubine penetracije, što je također posljedica najnižega unosa topline (9,67 kJ/cm). Donekle veća vrijednost dubine penetracije u odnosu na prva četiri uzorka ostvarena je kod uzorka 5 (5,67 mm). Najveća dubina penetracije izmjerena je kod uzorka 6 i iznosi 7,06 mm.



Slika 83. Usporedba dubina penetracije navarenih uzoraka

Na makroizbrusku uzorka A koji je izveden prijenosom metala impulsnim lukom uočeno je kako nije ostvaren potpuni provar. Duljina neprovarenoga dijela spoja iznosi 1 mm. Penetracijski profil uzorka A veće je širine i poprima konični oblik približavajući se svojemu završetku, za razliku od profila penetracije uzorka B.

Uzorak B je zavaren forceArc puls prijenosom metala. Na slici 78 jasno se vidi kako je kod ovoga spoja ostvarena potpuna penetracija. Profil penetracije kod uzorka B postaje značajno uži kako napreduje u dubinu osnovnoga materijala. Na makroizbrusku uzorka B ne primjećuju se greške.

S obzirom da su uzorak A i uzorak B zavareni u približno jednakome rasponu parametara zavarivanja i upotrebom identične, I – pripreme spoja, jedini utjecajni faktor na krajnje rezultate predstavlja korištenje različitoga načina prijenosa metala pri zavarivanju istih.

Kod uzorka C izvršeno je zavarivanje forceArc prijenosom metala u uskome žlijebu, gdje je kut žlijeba iznosio 35°. Zavareni spoj koji je izveden u jednome prolazu karakterizira nepotpuna penetracija i slabo protaljivanje stranica žlijeba. Takav rezultat posljedica je upotrebe slobodnoga kraja žice od 40 mm, uslijed čega raste otpor protoku struje i dolazi do pada podešene vrijednosti jakosti struje od 349 A na vrijednost od 250 A tijekom rada. Također, prilikom pripreme spoja nije ostvaren isti razmak između ploča na čitavoj duljini pa je dio taline protekao na drugu stranu spoja (slika 75).

Kod uzorka D, također izvedenoga forceArc načinom prijenosa metala, otvor žlijeba je iznosio 45°. Povećanjem kuta žlijeba omogućeno je zavarivanje manjim iznosom slobodnoga kraja žice, u ovome slučaju 20 mm. Međutim, kao i kod uzorka C, rezultat je bila nepotpuna penetracija i nedovoljno protaljivanje stranica žlijeba. Iako je u ovome slučaju pad definirane vrijednosti jakosti struje bio skoro pa dvostruko manji (sa podešene vrijednosti od 349 A na operativnu vrijednost od 302 A), nije napravljen pomak u odnosu na rezultat uzorka C. Isto tako, razmak između ploča nije bio jednak po cijeloj duljini spoja te mjestimično dolazi do protjecanja taline na drugu stranu spoja (slika 76).

5. ZAKLJUČAK

Iskustva u današnjoj primjeni tehnologije zavarivanja u industriji ukazuju na najveću zastupljenost MAG postupka zavarivanja. Kao i kod svake druge proizvodne tehnologije, ono što se zahtijeva od MAG postupka su veća učinkovitost, niži troškovi i veće brzine zavarivanja, a da se pri tome zadrži visoka kvaliteta zavarenih spojeva. Ostali industrijski zahtjevi koji se postavljaju su primjerice, zavarivanje u nadglavnome i vertikalnome položaju, mogućnost premošćivanja većih zračnosti korijena spoja te veća količina nataljenoga materijala u jedinici vremena. Također, javlja se i potreba za primjenom MAG postupka u domeni TIG postupka zavarivanja, npr. za zavarivanje tankih limova, obojenih metala, heterogenih spojeva itd.

Istraživanja i razvoj na polju suvremene elektronike dovode do skokovitih poboljšanja uređaja za MAG zavarivanje. Integracijom takvih komponenti u postojeće jedinice za zavarivanje i digitalizacijom sustava značajno se povećava upravljivost struje i napona zavarivanja, što rezultira stabilnijim prijenosom metala u električnome luku. Potaknuti time i željom za minimizacijom ili potpunim otklanjanjem nedostataka konvencionalnih načina prijenosa metala, proizvođači strojeva i opreme razvijaju mnoge modificirane varijante MAG zavarivanja kojima je osnova kratki spoj ili štrcajući luk. Glavni prioritet modifikacija u području parametara kratkih spojeva je mogućnost zavarivanja tankih limova uz manji unos topline i smanjeno rasprskavanje, dok se kod modificiranoga štrcajućega luka pažnja usmjerila na ostvarenje većih dubina penetracije i većih brzina zavarivanja.

Osim toga, sa ekonomskoga gledišta ostvaruju se uštede u ukupnim troškovima, a koje su rezultat smanjenoga utroška energije, količine zaštitnoga plina, dodatnoga materijala, revidirane pripreme spoja, nepotrebne naknadne obrade itd. Međutim, koliko god prednosti pružaju modificirane varijante nad konvencionalnim MAG zavarivanjem, važno je istaknuti kako njihova upotreba mora biti opravdana prikladnim područjem primjene, gdje će njihove napredne značajke doći do izražaja, a time i isplativost ulaganja u složenu i skupu opremu koju zahtijevaju.

U eksperimentalnome dijelu rada provedeno je zavarivanje sučeljenoga I – spoja impulsnim MAG načinom prijenosa metala i modificiranim, forceArc prijenosom metala. Uz to, ispitana

je i mogućnost upotrebe forceArc prijenosa metala kod zavarivanja u uskim žlijebovima sa većim duljinama slobodnoga kraja žice.

Na temelju usporedbe makroizbrusaka uzoraka A i B vidi se kako je kod uzorka B, koji je zavaren forceArc načinom prijenosa metala, ostvarena potpuna penetracija i nije bilo pojave grešaka, dok je kod uzorka A zabilježen nepotpuni provar. Razlika je uočena i u profilu penetracije uzoraka, pri čemu je penetracija uzorka B uža od one uzorka A. Prema tome, zaključuje se da forceArc prijenos metala u usporedbi s konvencionalnim načinom prijenosa metala u području jednakih parametara zavarivanja predstavlja pogodniju varijantu za zavarivanje debelostjenih konstrukcija.

Usporedbom dobivenih rezultata zavarivanja uzoraka C i D nisu utvrđene nikakve razlike između istih. Oba uzorka obilježava nepotpuna penetracija i slabo protaljivanje stranica žlijeba. Naime, povećanjem kuta žlijeba sa 35° na 45° te s time povezanim smanjenjem duljine slobodnoga kraja žice sa 40 mm na 20 mm, nije ostvaren značajniji napredak u vidu kvalitete zavarenoga uzorka D u odnosu na uzorak C. Na osnovi toga zaključuje se kako je potrebno dodatno optimirati parametre forceArc varijante MAG postupka te provesti automatizaciju zavarivanja za cjelovitu analizu ovoga područja primjene. Daljnja ispitivanja forceArc varijante prilikom zavarivanja u uskim žlijebovima trebalo bi izvesti s uređajima iz iste generacije, Titan XQ, nazivnih iznosa struje zavarivanja od 400 A, 500 A i 600 A.

LITERATURA

[1] Horvat, M., Kondić, V.: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Tehnički glasnik, Vol. 6 (2012), pp. 137 – 140

[2] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[3] https://www.dtwd.wa.gov.au/sites/default/files/teachingproducts/AUT032_CCBY.PDF (pristupljeno 16. 01. 2019.)

[4] Jeffus, L.: Welding: Principles and Applications, 7th Edition, Cengage Learning, USA, 2011.

[5] Ahmed, N.: New Developments in Advanced Welding, 1st Edition, Woodhead Publishing, UK, 2005.

[6] http://soldacentro.com/docs/MIG-MAG-Welding.pdf (pristupljeno 21. 01. 2019.)

[7] Garašić, I.: MIG/MAG postupak zavarivanja – prezentacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[8] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, Vol. 8 (2014), pp. 288 – 294

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

[10] https://m.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcLA-90/c4200.pdf (pristupljeno 24. 01. 2019.)

[11] Mikulić, I.: Visokoučinski postupci MAG zavarivanja, Završni rad, Strojarski fakultet u Slavonskome Brodu, Slavonski Brod, 2016.

[12] Kožuh, Z., Garašić, I.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[13] https://education.lincolnelectric.com/wp-content/uploads/2017/07/ULINC-Curriculum-Sample-Lesson-Plan.pdf (pristupljeno 29. 01. 2019.)

[14] Rudan, M.: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4. seminar – Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 2007.

[15] Garašić, I., Kralj, S., Kožuh, Z.: Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja, Zavarivanje, 54 (2011), pp. 61 – 67

[16] https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/shielding-gas-selection-for-controlled-dip-transfer-short-arc-welding (pristupljeno 05. 02. 2019.)

[17] https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mig-mag-developments-in-low-heat-input-transfer-modes-133 (pristupljeno 05. 02. 2019.)

[18] Era, T., Ide, A., Uezono, T., Ueyama, T.: Spatter reduction of steel sheets welding using controlled bridge transfer (CBT) GMA process, Materials science forum, Volumes 580 – 582 (2008), pp. 303 – 306

[19] Garašić, I., Kožuh, Z., Remenar, M.: Analiza prijenosa metala pri MAG CBT zavarivanju, Zavarivanje, 57 (2014), pp. 85 – 92

[20] Era, T., Ide, A., Uezono, T., Ueyama, T., Hirata, Y.: Controlled bridge transfer (CBT) gas metal arc process for steel sheets joining, Science and technology of welding and joining, Volume 14 (2009), pp. 493 – 499

[21] Bilandžija, J.: Značajke modernih izvora struje za MAG zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[22] Furukawa, K.: New CMT arc welding process – welding of steel to aluminium dissimilar metals and welding of super – thin aluminium sheets, Welding international, Volume 20 (2006), pp. 440 – 445

[23] Himmelbauer, K.: CMT postupak – revolucija u tehnologiji zavarivanja, Zavarivanje, 51 (2008), pp. 115 – 121

[24] Grzybicki, M., Jakubowski, J.: Comparative tests of steel car body sheet welds made using CMT and MIG/MAG methods, Welding international, Volume 27 (2013), pp. 610 – 615

[25] https://www.yumpu.com/en/document/read/6884603/fastroot-kemppi (pristupljeno 13. 02. 2019.)

[26] Kah, P.: Welding of sheet metal using modified short arc MIG/MAG welding process, Master thesis, Lappeenranta university of technology, Finland, 2007.

[27] https://static.lorch.eu/Service/Downloads/FactSheets/Factsheet-SpeedCold-en.pdf (pristupljeno 15. 02. 2019.)

[28] http://www.lorch.biz/masters-of-speed-eu/PDFs/SpeedCold_EN.pdf (pristupljeno 15. 02. 2019.)

[29] Milošević, N., Popović, O., Prokić Cvetković, R.: Surface Tension Transfer (STT) Welding, Proceedings of the 20th International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“, TMT 2016., Mediterranean Sea Cruising, 24th September – 1st October, 2016.

[30] DeRuntz, B.: Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer® Welding to Industry, Journal of Industrial Technology, Volume 19 (2003), pp. 55 – 62

[31] Despotović, B., Samardžić, I., Marsenić, T., Brechelmacher, B.: Neki aspekti primjene STT postupka zavarivanja u kotlogradnji; 3rd International Conference on Mechanization, Automation and Robotization in Welding and Allied Processes; Kožuh, Zoran (ur.). Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 2005., pp. 71 – 78

[32] https://www.lincolnelectric.com/assets/servicenavigator-public/lincoln3/IM904.pdf (pristupljeno 08. 03. 2019.)

[33] https://m.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/te12014.pdf (pristupljeno 08. 03. 2019.)

[34] Dunđer, M., Samardžić, I., Klarić, Š.: Monitoring of main Welding Parameters at STT Welding Process, Proceedings of the 9th International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“, TMT 2005., Turkey, September, 2005.

[35] https://docplayer.net/39858897-Wave-form-controlled-technology-gmaw-pulse-power-mode-rapid-arc-stt.html (pristupljeno 14. 03. 2019.)

[36] Huang, Yi: Control of Metal Transfer at Given Arc Variables, Doctoral Dissertation, University of Kentucky, USA, 2011.

[37] Schroepfer, D., Kromm, A., Kannengiesser, T.: Optimization of welding loads with narrow groove and application of modified spray arc process, Welding in the World, Volume 61 (2017), pp. 1077 – 1087

[38] Schaupp, T., Rhode, M., Kannengiesser, T.: Influence of welding parameters on diffusible hydrogen content in high – strength steel welds using modified spray arc process, Welding in the World, Volume 62 (2018), pp. 9 – 18

[39] https://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX260.pdf (pristupljeno 27. 03. 2019.)

[40] https://m.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_AluminumMIGGMAWWires-SuperGlaze-SuperGlaze5356TM/c8100.pdf (pristupljeno 27. 03. 2019.)

[41] https://www.red-d-arc.com/pdf/PowerWave355M%20Spec%20Sheet.pdf (pristupljeno 28. 03. 2019.)

[42] https://m.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/te12016.pdf (pristupljeno 28. 03. 2019.)

[43] http://www.lastechno.com/pdf/RMT-Rapid-MIG-MAG-Technology.pdf (pristupljeno 29. 03. 2019.)

[44] https://kem.industrie.de/werkstoffe-verfahren/verbindungstechnik/guter-einbrand-fuer-dicke-bleche/ (pristupljeno 30. 03. 2019.)

[45] https://www.yumpu.com/de/document/read/21238481/die-neue-rmt-ess-schweisstechnik (pristupljeno 30. 03. 2019.)

[46] http://www.lastechno.com/pdf/Brosura-modele-E4-2800-4200-5200.pdf (pristupljeno 30. 03. 2019.)

[47] Budig, B.: EWM – forceArc: Novi koncept prijenosa za MIG/MAG zavarivanje, Zavarivanje, 55 (2012), pp. 21 – 25

[48] https://reiz-schweisstechnik.de/media/PDF/wm037500dewmforcearcproduktinformation102006.pdf (pristupljeno 04. 04. 2019.)

[49] https://www.ewm-sales.com/upload/wm030100.pdf (pristupljeno 04. 04. 2019.)

[50] https://nst.no/dokumenter/produktinfo/WM073901.pdf (pristupljeno 05. 04. 2019.)

[51] https://www.ewm-group.com/titanflyer/EN_TWI_Weldingproceduretest_Info_2017.pdf (pristupljeno 05. 04. 2019.)

[52] http://www.schweisstechnik.lu/forcearc.pdf (pristupljeno 05. 04. 2019.)

[53] https://www.ewm-group.com/en/innovation-research/mig-mag-welding-procedure.html (pristupljeno 06. 04. 2019.)

[54] http://www.lorch.biz/masters-of-speed-eu/PDFs/LO_VorsprungdurchSpeed_EN.pdf (pristupljeno 08. 04. 2019.)

[55] https://www.lorch.eu/en/solutions/speed-processes/lorch-speedarc-xt/ (pristupljeno 08. 04. 2019.)

[56] http://www.radikalkaynak.com/dokumanlar/75_75_23959_.pdf (pristupljeno 08. 04. 2019.)

[57] https://www.steeltimesint.com/contentimages/features/Processing_Cloos.pdf (pristupljeno 09. 04. 2019.)

[58] https://www.cloos.de/public/processes/brochures/EN_Prozessbroschuere.pdf (pristupljeno 09. 04. 2019.)

[59] https://www.cloos.de/public/processes/brochures/D_GB_Rapid_Weld.pdf (pristupljeno 09. 04. 2019.)

[60] https://www.newcast.com/en/News/Archive_Business_News/Titan_XQ_puls_increases_efficiency_and_saves_money (pristupljeno 18. 06. 2019.)

[61] https://www.ewm-sales.com/upload/099-005560-EW501.pdf (pristupljeno 19. 06. 2019.)

[62] https://www.ewm-sales.com/upload/099-00L105-EW501.pdf (pristupljeno 19. 06. 2019.)

[63] https://www.red-d-arc.com/pdf/Bug-O%20Systems%20MDS%20Manual.pdf (pristupljeno 20. 06. 2019.)

[64] https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022 (pristupljeno 20. 06. 2019.)

[65] http://www.horex.hr/docs/tablica.mehanickih.svojstava.za.limove.i.profile.pdf (pristupljeno 20. 06. 2019.)

[66] http://www.ezg.hr/katalog.html (pristupljeno 20. 06. 2019.)

[67] https://www.messer.hr/plinovi-za-zavarivanje-i-rezanje (pristupljeno 20. 06. 2019.)

[68] HRN EN 1011 – 1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.

[69] HRN EN ISO 9692 – 1: 2004: Preporuke za pripremu spoja – 1. dio: Ručno elektrolučno zavarivanje, MIG/MAG zavarivanje, plinsko zavarivanje, TIG zavarivanje i zavarivanje elektronskim snopom, 2004.

PRILOZI

I. CD-R disc