

Usporedba konvencionalnog MIG/MAG i suvremenog STT postupka zavarivanja

Jakoplić, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:745927>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-30**



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
Karlovac University of Applied Sciences

Repository / Repozitorij:

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



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

HRVOJE JAKOPLIĆ

**USPOREDBA KONVENCIONALNOG
MIG/MAG I SUVREMENOG STT
POSTUPKA ZAVARIVANJA**

ZAVRŠNI RAD

Karlovac, 2016

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU
STROJARSKI ODJEL
STRUČNI STUDIJ STROJARSTVA

HRVOJE JAKOPLIĆ

**USPOREDBA KONVENCIONALNOG
MIG/MAG I SUVREMENOG STT
POSTUPKA ZAVARIVANJA**

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

dr.sc. Tanja Tomić

Karlovac, 2016

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

Ovom prilikom želio bih se zahvaliti svojoj mentorici dr.sc. Tanji Tomić, na ukazanoj stručnoj pomoći i savjetima.

Također želio bih se zahvaliti cijeloj svojoj obitelji, i djevojci Antoniji, na njihovom strpljenju, razumijevanju i podršci tijekom studija.

Hrvoje Jakoplić



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

Stručni studij strojarstva

Usmjerenje: Proizvodno Strojarstvo

Karlovac, 05.10.2016.

ZADATAK ZAVRŠNOG RADA

Student: **Hrvoje Jakoplić**

Matični broj: 0110613103

Naslov: **USPOREDBA KONVENCIONALNOG MIG/MAG I SUVREMENOG STT POSTUPKA ZAVARIVANJA**

Opis zadatka:

U radu je potrebno napraviti usporedbu konvencionalnog MIG/MAG postupka i suvremenog STT postupka zavarivanja sa stajališta prijenosa materijala, primjene postupka, opreme, te usporedbe prednosti modifikacije konvencionalnog postupka zavarivanja.

Student treba u radu objasniti:

- Općenito objasniti princip rada MIG/MAG i STT postupka zavarivanja
- Usporediti parametre zavarivanja kod MIG/MAG i STT postupka zavarivanja
- Objasniti načine prijenosa materijala i usporediti prijenos materijala kod MIG/MAG i STT postupka zavarivanja

Koristiti odgovarajuću dostupnu literaturu, priručnike i podatke.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

05.10.2016.

14.12.2016.

22.12.2016.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

Dr.sc. Tanja Tomić, dipl.ing.stroj., predavač

v.p. Marijan Brozović, dipl.ing

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| POPIS KRATICA | VIII |
| SAŽETAK..... | IX |
| SUMMARY | X |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA | 2 |
| 2.1. Općenito o MIG/MAG postupku zavarivanja | 2 |
| 2.2. Sile koje djeluju na prijenos metala tijekom postupka zavarivanja..... | 5 |
| 2.3. Načini prijenosa metala u električnom lukom..... | 9 |
| 2.3.1. <i>Prijenos metala kratkim spojevima</i> | 11 |
| 2.3.2. <i>Prijenos metala prijelaznim lukom</i> | 13 |
| 2.3.3. <i>Prijenos metala štrcajućim lukom</i> | 14 |
| 2.3.4. <i>Impulsni način prijenosa metala</i> | 15 |
| 2.4. Uloga i svojstva zaštitnih plinova..... | 16 |
| 2.4.1. <i>Vrste i svojstva zaštitnih plinova</i> | 20 |
| 2.4.2. <i>Mješavine zaštitnih plinova</i> | 23 |
| 3. STT POSTUPAK ZAVARIVANJA..... | 28 |
| 3.1. Općenito o STT postupku zavarivanja | 28 |
| 3.2. Izvor struje zavarivanja | 30 |
| 3.3. Karakteristika STT postupka zavarivanja..... | 31 |
| 3.4. Glavni parametri zavarivanja..... | 32 |
| 3.4.1. Online sustav za praćenje glavnih parametara zavarivanja..... | 36 |
| 3.5. Dinamička karakteristika STT postupka zavarivanja | 38 |
| 4. USPOREDBA MIG/MAG I STT POSTUPKAZAVARIVANJA | 42 |
| 5. PRIMJENA POLUAUTOMATSKOG STT POSTUPKA ZAVARIVANJA..... | 45 |
| 5.1. Priprema za zavarivanje..... | 45 |
| 5.2. Opis postupka zavarivanja..... | 47 |

| | |
|--------------------|----|
| 6. ZAKLJUČAK | 49 |
| LITERATURA..... | 50 |
| PRILOG | 52 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Shematski prikaz osnovnog sustava za MIG/MAG postupak zavarivanja [3] | 2 |
| Slika 2. Ravna statička karakteristika izvora struje zavarivanja za MIG/MAG postupak zavarivanja [3]..... | 3 |
| Slika 3. Djelovanje sila na kapljicu metala u električnom luku [4] | 6 |
| Slika 4. Osnovna podjela načina prijenosa metala u električnom luku prema načinu prijenosa kapljice metala u električnom luku | 10 |
| Slika 5. Ciklus prijenosa metala kratkim spojevima [3] | 12 |
| Slika 6. Shematski prikaz pojave "pinch" efekta [3]..... | 13 |
| Slika 7. Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [3]..... | 14 |
| Slika 8. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [3] | 15 |
| Slika 9. Ciklus prijenosa metala impulsnim načinom [3] | 16 |
| Slika 10. Toplinska vodljivost zaštitnih plinova u ovisnosti o temperaturi [5]..... | 19 |
| Slika 11. Utjecaj zaštitnih plinova na izgled zavara i prskanje rastaljenog metala [3] | 24 |
| Slika 12. Izbrusak korijenskog prolaza zavara; Zavarivanje je izvedeno STT postupkom zavarivanja [8]..... | 30 |
| Slika 13. Izvor struje zavarivanja za STT postupak zavarivanja; LINCOLN ELECTRIC INVERTEC STT II [9]..... | 31 |
| Slika 14. Podešavanje duljine električnog luka vršnom strujom zavarivanja [11] | 33 |
| Slika 15. Podešavanje oblika izgleda zavara osnovnom strujom zavarivanja [11]..... | 33 |
| Slika 16. Duljina slobodnog kraja žice od rastaljene metalne kupke [11] | 35 |
| Slika 17. Shematski prikaz Online sustava za praćenje glavnih parametara zavarivanja [13] | 36 |
| Slika 18. Distribucija srednjih vrijednosti struja zavarivanja tijekom postupka zavarivanja u trajanju od 97 sekundi [12]..... | 37 |
| Slika 19. Distribucija srednjih vrijednosti napona zavarivanja tijekom postupka zavarivanja u trajanju 97 sekundi [12]..... | 38 |
| Slika 20. Distribucija stvarnih vrijednosti napona i struje zavarivanja za proizvoljno odabrani interval zavarivanja u trajanju 0,012 sekundi [12]..... | 38 |
| Slika 21. Dinamička karakteristika $U, I = f(T)$ izvora struje zavarivanja tijekom STT postupka zavarivanja [12] | 39 |
| Slika 22. Prijenos kapljice metala tijekom STT postupka zavarivanja [7] | 39 |
| Slika 23. Prskanje rastaljenog metala kod MIG/MAG i STT postupka zavarivanja [8]..... | 42 |
| Slika 24. Upravljanje izvorom struje zavarivanja za STT postupak zavarivanja; LINCOLN ELECTRIC INVERTEC STT II [8]..... | 46 |

| | |
|---|----|
| Slika 25. Upravljanje dodavačem žice za zavarivanje; LINCOLN ELECTRIC INVERTEC STT 10 [8] | 46 |
| Slika 26. Uspostava električnog luka, zavarivanje od pozicije 12 sati do pozicije 1 sat [15].. | 47 |
| Slika 27. Zavarivanje od pozicije 1 sat do pozicije 5 sati [15]..... | 48 |
| Slika 28. Zavarivanje od pozicije 5 sati do pozicije 6 sati [15] | 48 |
| Slika 29. Prekid električnog luka, završetak zavarivanja na poziciji 6 sati [15]..... | 48 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Energija disociranja i ionizacijski potencijali zaštitnih plinova [5] | 18 |
| Tablica 2. Odabir zaštitnog plina ili mješavina zaštitnih plinova za MIG/MAG postupak zavarivanja [3]..... | 25 |
| Tablica 3. Usporedba MIG/MAG postupka zavarivanja s STT Postupkom zavarivanja | 43 |

POPIS OZNAKA

Latinske oznake

| <i>Oznaka</i> | <i>Opis</i> | <i>Mjerna jedinica</i> |
|---------------|---|------------------------|
| I | Jakost struje zavarivanja | A |
| U | Napon električnog luka | V |
| L | Induktivitet | H |
| v | Brzina zavarivanja | m/min |
| Q_P | Protok zaštitnog plina | l/min |
| $l_{skž}$ | Duljina slobodnog kraja žice za zavarivanje | m |
| F | Rezultantna sila | N |
| F_g | Sila gravitacije | N |
| F_{em} | Elektromagnetska sila | N |
| F_{pn} | Sila površinske napetosti | N |
| F_r | Sila reaktivnog djelovanja | N |
| F_{pl} | Sila plazme električnog luka | N |
| F_e | Sila zbog eksplozija u kapljicama metala | N |
| F_{ema} | Aksijalna komponenta elektromagnetske sile | N |
| F_{emr} | Radijalna komponenta elektromagnetske sile | N |
| M | Isparena masa metala | kg/s |
| C_d | Koeficijent strujanja fluida | – |
| v_f | Brzina taline metala zavara | m/s |
| v_r | Brzina strujanja para metala | m/s |
| g | Ubrzanje sile teže | m/s ² |
| r_k | Polumjer kapljice | m |
| r_s | Polumjer stupa električnog luka | m |

| <i>Oznaka</i> | <i>Opis</i> | <i>Mjerna jedinica</i> |
|---------------|--------------------------------------|------------------------|
| $r_{\dot{z}}$ | Polumjer vrata kapljice metala | m |
| I_{PC} | Jakost vršne struje zavarivanja | A |
| I_{BC} | Jakost osnovne struje zavarivanja | A |
| $v_{\dot{z}}$ | Brzina dodavanja žice za zavarivanje | m/min |
| T | Vrijeme | s |

Grčke oznake

| <i>Oznaka</i> | <i>Opis</i> | <i>Mjerna jedinica</i> |
|---------------|----------------------------------|------------------------|
| μ_0 | Magnetska permeabilnost vakuuma | H/m |
| σ | Koeficijent površinske napetosti | N/m |
| ρ | Gustoća dodatnog materijala | kg/m ³ |
| ρ_f | Gustoća taline metala zavara | kg/m ³ |
| π | Ludolfov broj | – |

POPIS KRATICA

| <i>Kratika</i> | <i>Opis</i> |
|----------------|--|
| STT | Zavarivanje prijenosom površinske napetosti (engl. Surface Tension Transfer) |
| MIG/MAG | Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog ili aktivnog plina (engl. Metal Inert Gas /Metal Active Gas) |
| REL | Ručno elektrolučno zavarivanje |
| TIG | Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (engl. Tungsten Inert Gas). |
| EPP | Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška |
| CV | Ravna statička karakteristika izvora struje zavarivanja (engl. Constant Voltage) |
| CBT | Controlled Bridge Transfer |
| CMT | Cold Metal Transfer |
| RMT | Rapid MIG/MAG Technology |

SAŽETAK

USPOREDBA KONVENCIONALNOG MIG/MAG I SUVREMENOG STT POSTUPKA ZAVARIVANJA

U ovom radu uspoređen je STT (engl. Surface Tension Transfer) postupak zavarivanja s konvencionalnim MIG/MAG postupkom zavarivanja. U radu su opisane osnovne značajke STT postupka zavarivanja u odnosu na MIG/MAG postupak zavarivanja, te su navedene prednosti i nedostaci primjene STT i konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja.

Ključne riječi: STT, MIG, MAG

SUMMARY

COMPARISON OF CONVENTIONAL MIG/MAG AND CONTEMPORARY STT WELDING PROCESS

This paper compares Surface Tension Transfer (STT) welding process to conventional MIG/MAG welding process. Basic features of STT welding process relating to GMAW welding process have been described, and advantages and disadvantages of STT implementation and conventional GMAW welding process have been pointed out.

Key words: STT, MIG, MAG

1. UVOD

Neki od najvećih izazova današnjeg doba u proizvodnoj industriji su pronalazak novih načina za povećanje kvalitete i produktivnosti, odnosno konkurentnosti na tržištu. Biti konkurentan posebice na globalnom tržištu, jedan je od ključnih razloga za uspjeh. A mogućnost biti korak ispred zahtijeva određenu količinu znanja, inovacija i stručnosti osoblja jedne tvrtke.

Stalnim razvojem postupaka zavarivanja danas se mogu uspješno zavariti gotovo svi metali ili njihove slitine. Njihova zavarljivost ovisi o pravilnom izboru odgovarajućeg postupka zavarivanja, dodatnog materijala, te o pravilnom odabiru parametara zavarivanja. Najčešće upotrebljavani postupci zavarivanja su: REL, MIG/MAG, TIG, i EPP. Svaki od ovih postupaka zavarivanja ima svoje prednosti i nedostatke, stoga se uglavnom primjenjuje kombinacija postupaka zavarivanja (npr. TIG+REL, TIG+REL+EPP,...). Iako su danas svi konvencionalni postupci zavarivanja jako napredni. Zbog stalne potrebe za povećanjem kvalitete i produktivnosti, to jest konkurentnosti, na tržištu se pojavljuju neki novi postupci zavarivanja kao npr. STT postupak zavarivanja.

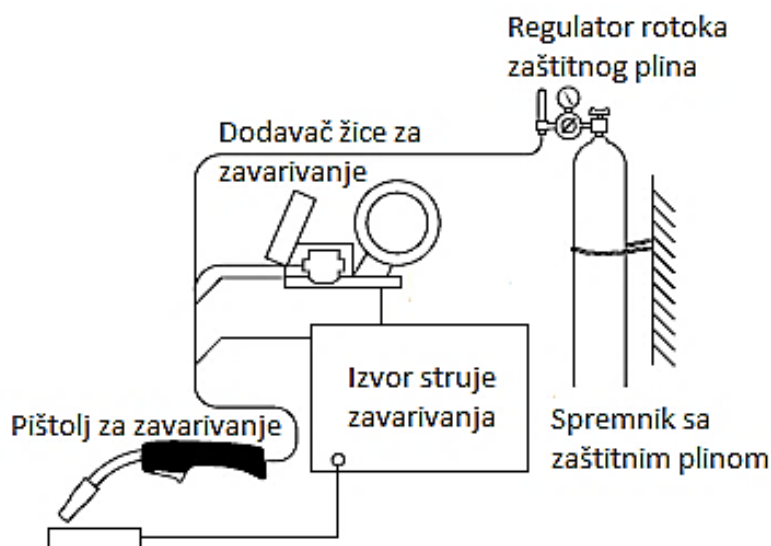
Zavarivanje prijenosom površinske napetosti (engl. Surface Tension Transfer, kraće STT) je suvremen postupak zavarivanja, koji predstavlja značajni napredak u području elektrolučnog MIG/MAG postupka zavarivanja taljivom elektrodom u atmosferi zaštitnog plina. STT postupak zavarivanja je visokoučinkovit, i visokokvalitetan postupak zavarivanja koji se primjenjuje za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu, i za zavarivanje tankostijenih limova. Izvorno STT postupak zavarivanja patentiran je 1988. godine od strane Lincoln Electric Company. Prvi komercijalan uređaj proizveden je i prodan 1994. godine. Lincoln Electric Company polaže prava na STT postupak zavarivanja, stoga je i jedini proizvođač opreme potrebne za izvođenje STT postupka zavarivanja.

STT postupak zavarivanja danas se većinom koristi većinom u naftnoj industriji kod spajanja (zavarivanja) cjevovoda, međutim ovaj postupak svoju primjenu nalazi kako u automobilskoj tako i u brodograđevnoj industriji, te u prehrambenoj i petrokemijskoj industrija

2. MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

2.1. Općenito o MIG/MAG postupku zavarivanja

MIG/MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog (MIG, engl. Metal Inert Gas) ili aktivnog (MAG, engl. Metal Active Gas) plina, ili mješavine inertnih i aktivnih plinova. [1] Pri zavarivanju MIG/MAG postupkom zavarivanja električni luk se uspostavlja i održava između osnovnog materijala i kontinuirane taljive elektrode u obliku žice, u pravilu spojene na pozitivni pol istosmjernog izvora struje. Elektroda je ujedno i dodatni materijal, čijim se taljenjem se popunjava žlijeb za zavarivanje. MIG/MAG sustav za zavarivanje sastoji se od izvora struje zavarivanja, dodavača žice za zavarivanje (pogonski sustav koji dodaje žicu konstantnom brzinom), polikabela, pištolja za zavarivanje (gorionika), spremnika zaštitnog plina (boce) sa regulatorom protoka zaštitnog plina.



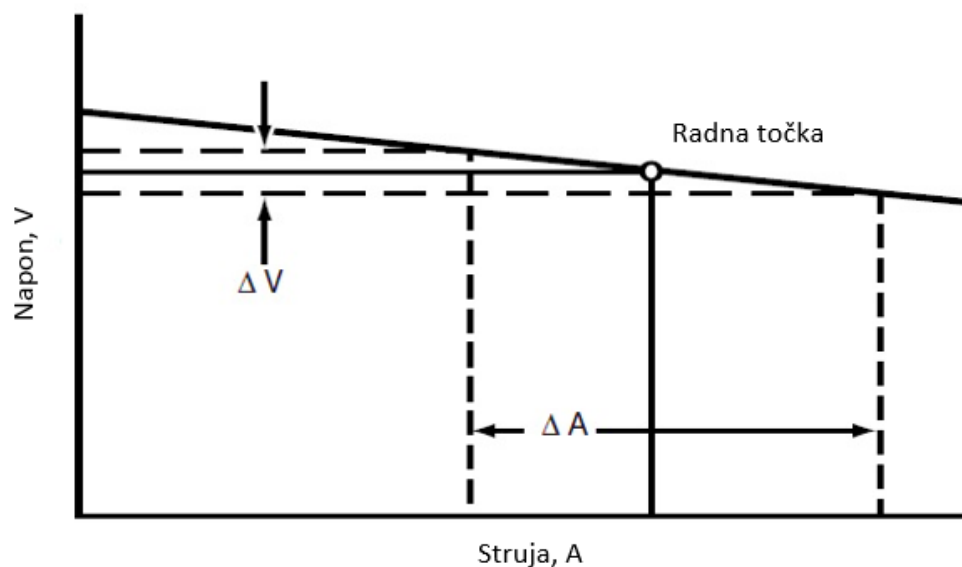
Slika 1. Shematski prikaz osnovnog sustava za MIG/MAG postupak zavarivanja [3]

Kod zavarivanja MIG/MAG postupkom zavarivanja na kvalitetu i izgled zavara najviše utječu vrijednosti parametara zavarivanja. Odabir vrijednosti parametara zavarivanja kod MIG/MAG postupka zavarivanja ovisi o vrsti i debljini osnovnog materijala, promjeru i vrsti žice za zavarivanje (dodatni materijal), tehnološkim zahtjevima, uvjetima u kojima se postupak

zavarivanje odvija, položaju zavarivanja, opremi koju imamo na raspolaganju, stupnju mehanizacije, iskustvu zavarivača i itd. Osnovni parametri zavarivanja kod MIG/MAG postupka zavarivanja su slijedeći:

- Struja zavarivanja, I
- Napon električnog luka, U
- Induktivitet, L
- Brzina zavarivanja, v
- Protok zaštitnog plina, Q_P
- Duljina slobodnog kraja žice za zavarivanje, $l_{skž}$

Kod MIG/MAG postupka zavarivanja najčešće se koriste inverterski izvori struje zavarivanja sa ravnom statičkom karakteristikom (CV, engl. Constant Volatage). Danas su to najrašireniji izvori struje zavarivanja za MIG/MAG postupak zavarivanja. Izvori struje zavarivanja sa ravnom statičkom karakteristikom (CV) omogućuju da kod promjene duljine slobodnog kraja žice dolazi promjene vrijednosti struje zavarivanja. Povećanjem duljine slobodnog kraja žice za zavarivanje smanjuje se struja zavarivanja, a smanjenjem duljine slobodnog kraja žice za zavarivanje povećava se struja zavarivanja. U oba slučaj napon električnog luka i duljina električnog luka ostaje konstantna.



Slika 2. Ravna statička karakteristika izvora struje zavarivanja za MIG/MAG postupak zavarivanja [3]

MIG/MAG postupak zavarivanja primjenjuje se za zavarivanje svih vrsta ugljičnih čelika, nehrđajućih i duplex nehrđajućih čelika, aluminijskih i drugih obojenih metala. MIG/MAG postupak zavarivanja može biti poluautomatski (automatsko dodavanje žice za zavarivanje, a ručno vođenje pištolja za zavarivanje), automatski (automatsko dodavanje žice za zavarivanje i automatsko vođenje pištolja za zavarivanje), ili robotizirani postupak zavarivanja.

Prednosti primjene MIG / MAG postupka zavarivanja su:

- Mogućnost zavarivanja materijala različitih debljina i vrsta,
- Zavarivanje je moguće u svim položajima zavarivanja,
- Jednostavna obuka, i smanjen utjecaj zavarivača na postupak zavarivanja,
- Širok raspon parametara zavarivanja i načina prijenosa metala,
- Zavarivanje u zatvorenom i na otvorenom prostoru,
- Mogućnost primjene raznih plinskih mješavina,
- Mogućnost primjene praškom punjene žice,
- Mogućnost primjene i za lemljenje,
- Visok stupanj iskoristivosti dodatnog materijala (žice za zavarivanje),
- Smanjen unos vodika u metal zavara tijekom postupka zavarivanja
- Odličan izgled zavara,
- Velika učinkovitost i proizvodnost,
- Jednostavna automatizacija ili robotizacija.

Nedostaci primjene MIG / MAG postupka zavarivanja su:

- Mogućnost pojave grešaka zbog okolišnog utjecaja kod zavarivanja na otvorenom prostoru,
- Mogući problemi dovođenja dodatnog materijala (žice za zavarivanje) kod zavarivanja aluminijskih materijala,
- Zbog smanjenog unosa topline pri načinu prijenosa metala kratkim spojevima moguće je zavarivati samo tanje materijale,
- Zbog povećanog unosa topline pri načinu prijenosa metala štrcajućim lukom moguće je zavarivati samo deblje materijale,
- Zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima nije moguće načinom prijenosa metala štrcajućim lukom,
- Upotreba skupih mješavina zaštitnih plinova kod načina prijenosa metala štrcajućim lukom.

2.2. Sile koje djeluju na prijenos metala tijekom postupka zavarivanja

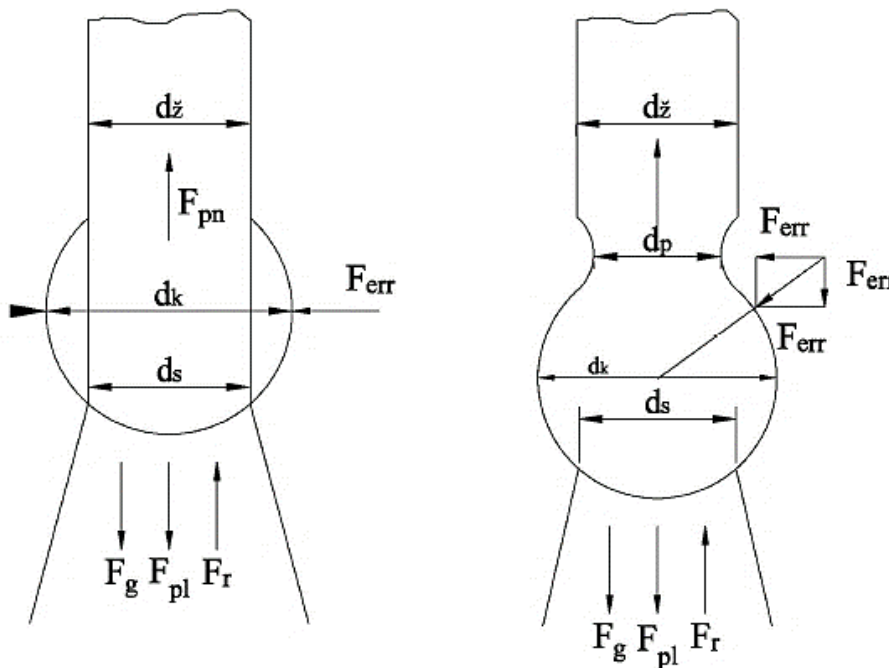
Kod MIG/MAG postupka zavarivanja kontinuirano dovođena žica za zavarivanje se tali, te dolazi do stvaranja kapljica metala na vrhu žice za zavarivanje i njihovog prijenosa prema osnovnom materijalu (talini metala zavara). Prijenos kapljica metala omogućuju sile i pojave koje se javljaju u električnom luku. Poznavanjem nastanka i djelovanja sila, te pojava u električnom luku, moguće je upravljanje načinom prijenosa rastaljene kapljice metala, te otklanjanja ili smanjivanja nepovoljnih utjecaja. Najvažnije sile koje se javljaju tijekom prijenosa kapljice metala su:

- Sila gravitacije, F_g
- Elektromagnetska sila, F_{em}
- Sila površinske napetosti, F_{pn}
- Sila reaktivnog djelovanja, F_r
- Sila plazme električnog luka, F_{pl}
- Sila zbog eksplozija u kapljicama metala, F_e

Neke sile djeluju pozitivno, a neke djeluju negativno, odnosno neke sile pridonose prijenosu kapljica metala, a neke djeluju suprotno od smjera prijenosa kapljica metala. U svakom trenutku postupka zavarivanja na kapljicu metala djeluje rezultantna sila: Iznos rezultantne sile na kapljicu metala dan je izrazom:

$$F = F_g + F_{em} + F_{pn} + F_r + F_{pl} + F_e, \text{ gdje je}$$

Na slici 2. prikazani su smjerovi i djelovanje sile na prijenos kapljice metala, gdje je d_z – promjer žice za zavarivanje, d_k – promjer kapljice metala, d_s – promjer stupa električnog luka, d_v – promjer vrata kapljice metala, F_g – sila gravitacije, F_r – sila reaktivnog djelovanja, F_{em} – elektromagnetska sila, F_{emr} – radijalna komponenta elektromagnetske sile, F_{ema} – aksijalna komponenta elektromagnetske sile, F_{pn} – sila površinske napetosti.



Slika 3. Djelovanje sile na kapljicu metala u električnom luku [4]

Sila gravitacije uvijek djeluje kod prijenosa materijala i njeno djelovanje se ne može izbjeći. Tijekom postupka zavarivanja u vodoravnom položaju, kada se prijenos kapljica metala odvija u pravcu gravitacijske sile, djelovanje gravitacijske sile je pozitivno, dok u ostalim položajima zavarivanja djelovanje gravitacijske sile je negativno. U slučaju zavarivanja u nadglavnom

položaju, zbog veće mase kapljica, a ostale sile koje djeluju na prijenos kapljica metala su premale, uopće nije moguće ostvariti prijenos kapljica metala. Iznos djelovanja sile gravitacije za kapljicu kuglastog oblika dan je izrazom:

$$F_g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_k^3 \cdot \rho \cdot g, \text{ gdje je}$$

F_g – sila gravitacije, r_k – polumjer kapljice, ρ – gustoća dodatnog materijala, g – ubrzanje sile teže.

Elektromagnetska sila (Lorentzova sila) imaju najveći utjecaj na prijenos kapljice metala u električnom luku. Oko žice za zavarivanje kroz koju teče električna struja javlja se magnetsko polje, koncentrično raspoređenih magnetskih silnica. Elektromagnetska sila djeluju okomito na os žice za zavarivanje. U slučaju kada linije toka električne struje divergiraju, u stupu električnog luka ili u kapljici metala na samom vrhu žice za zavarivanje, djelovanje elektromagnetske sile je usmjereno okomito na liniju toka električne struje. S obzirom na os žice za zavarivanja elektromagnetska sila se rastavljaju na dvije komponente: radijalnu komponentu (F_{emr}) i aksijalnu komponentu (F_{ema}).

Radijalna komponenta elektromagnetske sile svojim djelovanjem uzrokuje lokalno suženje presjeka na rastaljenom vrhu žice za zavarivanje uzrokujući tzv. "pinch efekt". Iznos radijalne komponente elektromagnetske sile dan je izrazom:

$$F_{emr} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{8 \cdot \pi}, \text{ gdje je}$$

F_{emr} – radijalna komponenta elektromagnetske sile, μ_0 – permeabilnost zraka, I – jakost električne struje zavarivanja.

Aksijalna komponenta elektromagnetske sile odvaja kapljicu metala i usmjeruje je prema osnovnom materijalu (talini metala zavara). Iznos aksijalne komponente elektromagnetske dan je izrazom:

$$F_{ema} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{r_s}{r_z}, \text{ gdje je}$$

F_{ema} – aksijalna komponenta elektromagnetske sile, μ_0 – magnetska permeabilnost vakuma, r_s – polumjer stupa električnog luka, r_z – polumjer žice za zavarivanje.

Ukoliko se oblikuje vrat kapljice koji ima manji promjer od promjera žice za zavarivanje, iznos aksijalne komponente elektromagnetske sile dan je izrazom:

$$F_{ema} = \frac{\mu_0 \cdot I^2}{4 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{r_s}{r_v}, \text{ gdje je}$$

F_{ema} – aksijalna komponenta elektromagnetske sile, μ_0 – permeabilnost zraka, r_s – polumjer stupa električnog luka, r_v – polumjer vrata kapljice metala.

Ovisno o odnosima između radijalne i aksijalne komponente elektromagnetske sile, vrsti zaštitnog plina i djelovanju ostalih sila, mogu se pojaviti razni utjecaji ovih sila, a ponekad iznos elektromagnetske sile može bit nedovoljan da osigura odvajanje kapljice metala.

Sila površinske napetosti je sila koja djeluje suprotno od smjera prijenosa kapljice metala, kada se kapljica metala nalazi na vrhu žice za zavarivanje. Kod načina prijenosu kapljica metala slobodnim letom, sila površinske napetosti djeluje na način da protivi odvajanju kapljice metala, a kada je riječ o načinu prijenosa premošćivanjem, sila površinske napetosti je glavna sila koja privlači kapljice metala prema osnovnom materijalu (talini metala zavara). Iznos sile površinske napetosti dan je izrazom:

$$F_{pn} = 2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \frac{r_z^2}{r_k}, \text{ gdje je}$$

F_{pn} – sila površinske napetosti, σ – koeficijent površinske napetosti, r_z – polumjer žice za zavarivanje, r_k – polumjer kapljice metala.

Sila reaktivnog djelovanja nastaje zbog isparavanja metala na žici za zavarivanje, uslijed visokih temperatura pri postupku zavarivanja. Zbog gibanja metalnih para sila reaktivnog djelovanja djeluje suprotno od smjera prijenosa metala, i uzrokuje otežano odvajanje kapljice metala od vrha žice za zavarivanje. Isparavanje je najveće u aktivnim točkama elektroda i proporcionalno kvadratu struje zavarivanja. Iznos sile reaktivnog djelovanja dan je izrazom:

$$F_r = M \cdot v_r, \text{ gdje je}$$

M – isparena masa metala i v_r – brzina strujanja para metala

Sila uzrokovana strujanjem plazme električnog luka ne djeluje na odvajanje kapljice s vrha žice za zavarivanje, već na gibanje i usmjeravanje kapljice metala, i to samo kada se kapljica giba u električnom luku od vrha žice za zavarivanje prema osnovnom materijalu (taline metala zavara). U plazmenom stupu električnog luka (blizu vrha žice za zavarivanje) vlada veći tlak. Budući da se isti volumen plina plazme širi uslijed promjene dimenzija električnog luka, u blizini osnovnog materijala (taline metala zavara) vlada manji tlak. Zbog strujanja plazme od područja višeg prema području nižeg tlaka vrši se pritisak na kapljicu metala koja prolazi kroz električni luk te se tako podržava i usmjerava njeno gibanje, olakšavajući time prijenos metala. Iznos sile plazme električnog luka dan je izrazom:

$$F_{pl} = C_d \cdot \frac{\rho_f v_f^2}{2}, \text{ gdje je}$$

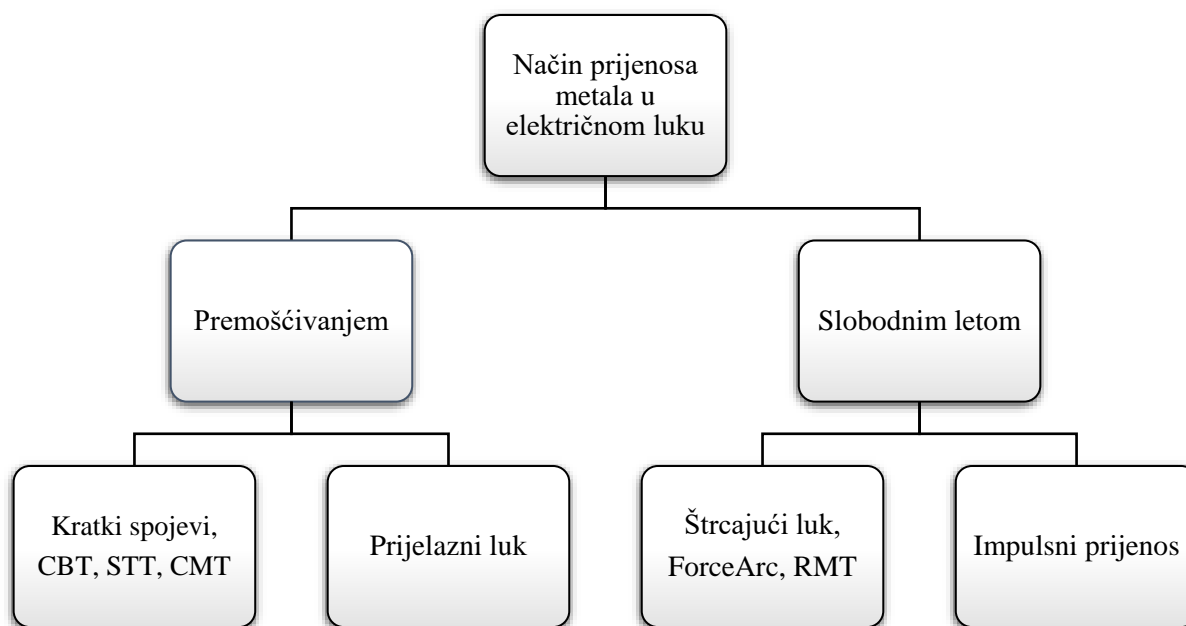
F_{pl} – sila plazme električnog luka, C_d – koeficijent strujanja, ρ_f – gustoća taline metala zavara, v_f – brzina taline metala zavara.

Sila zbog eksplozija u kapljicama metala nastaje zbog reakcija koje se javljaju uslijed djelovanja plinova u kapljici metala prilikom njezinog prijenosa prema osnovnom materijalu (talini metala zavara). Naime, u kapljici metala mogu postojati plinovi koji tijekom postupka zavarivanja ekspandiraju i dovode do eksplozije kapljice. Mjesto na kapljici metala gdje dolazi do eksplozije, najčešće se nalazi na suprotnoj strani od smjera prijenosa kapljice kroz električni luk, zbog toga što je na toj strani kapljica metala toplija. Sila zbog eksplozija u kapljicama metala nema jedinstven smjer djelovanja zbog stohastičke naravi.

2.3. Načini prijenosa metala u električnom lukom

Prijenos metala u električnom luku predstavlja način prijenosa kapljice metala od vrha žice za zavarivanje, kroz atmosferu električnog luka do osnovnog materijala ili taline metala zavara. Kod MIG/MAG zavarivanja odabirom parametara zavarivanja moguće je odrediti odgovarajući prijenos metala u električnom luku. Parametri zavarivanja koji utječu na način prijenosa metala u električnom luku su: vrijednost struje zavarivanja i njen polaritet, vrijednost napona električnog luka, promjer i vrsta žice za zavarivanje, te vrsta zaštitnog plina ili mješavine zaštitnih plinova. Odabir načina prijenosa metala u električnom luku vrlo je bitan kako bi se

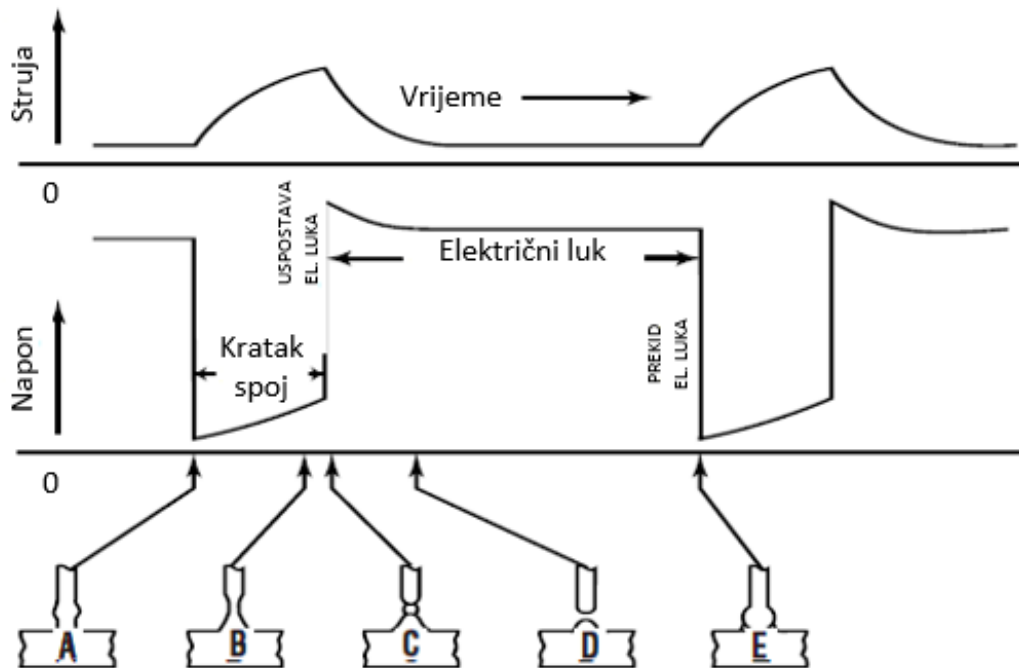
postigla visoka kvaliteta zavara i produktivnost postupka zavarivanja. Pri MIG/MAG postupku zavarivanju postoje dva osnovna načina prijenosa metala u električnom luku, a to su prijenos metala slobodnim letom i prijenos metala premoščivanjem. Prijenos metala premoščivanjem se ostvaruje kratkim spojevima i prijelaznim lukom, a prijenos metala slobodnim letom može se ostvariti štrcajućim lukom ili impulsnim načinom prijenosa metala. Načini prijenosa metala kratkim spojevima, prijelaznim i štrcajućim lukom spadaju u prirodan prijenos metala, dok impulsni način prijenosa metala spada u kontrolirani prijenos metala. Trenutno najzastupljeniji je impulsni načina prijenosa metala. Osim navedenih vrsta prijenosa metala, postoje još i razne vrste modificiranih načina prijenosa metala: CBT – engl. Controlled Bridge Transfer, STT – engl. Surface Tension Transfer, CMT – engl. Cold Metal Transfer, ForceArc, RMT – engl. Rapid MIG/MAG Technology i itd.



Slika 4. Osnovna podjela načina prijenosa metala u električnom luku prema načinu prijenosa kapljice metala u električnom luku

2.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima

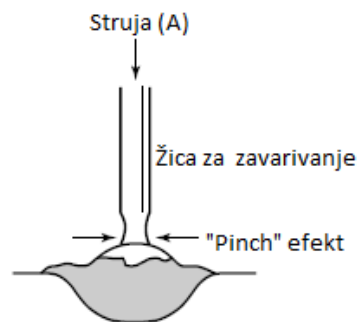
Prijenos metala kratkim spojevima (engl. Short Circuit Metal Transfer) je način prijenosa metala u električnom luku kod kojeg se kontinuirano dovodena puna ili praškom punjena žica tali uslijed kontinuiranih kratkih spojeva. Pri prijenosu metala kratkim spojevima ciklus odvajanja jedne kapljice metala dijeli se na fazu kratkog spoja i fazu električnog luka. Do odvajanja kapljice dolazi tijekom kratkog spoja, kada žica za zavarivanje dodirne osnovni materijal ili talinu metala zavara. Tijekom kratkog spoja dolazi do prekida električnog luka i porasta vrijednosti struje zavarivanja. Porast vrijednosti struje zavarivanja u kratkom spoju uzrokuje porast djelovanja sila na vrhu žice za zavarivanje koje odvajaju kapljicu metala. Nakon odvajanja kapljice metala električni luk se ponovno uspostavlja električni luk, i ciklus odvajanja kapljice se ponavlja. Kod prijenosa metala kratkim spojevima vrijednost struje zavarivanja je od 50 A do 170 A, dok je vrijednost napona električnog luka od 13V do 21 V. Za prijenos metala kratkim spojevima koriste se žice za zavarivanje malog promjera i to od 0,6 mm do 1,1 mm. Kod zavarivanja prijenosom metala štreajućim lukom moguća je upotreba zaštitnog plina sa 100% CO₂, ili mješavina zaštitnih plinova od 75 % do 80 % Ar + od 20 % do 25% CO₂. Prijenos metala kratkim spojevima karakterizira mali unos topline tijekom postupka zavarivanja, te je pogodan za zavarivanja tanjih materijala debljine od 0,6 mm do 5,0 mm. Zavarivanje načinom prijenosa metala najčešće se zavaruje korijen zavara u otvorenom žlijebu. Prednosti zavarivanja načinom prijenosa metala kratkim spojevima su: mogućnost zavarivanja u svim položajima, manja deformacije zavara zbog malog unosa topline, visoka iskoristivost žice za zavarivanje (93 % i veća). Nedostaci zavarivanja načinom prijenosa metala kratkim spojevima su: povećano prskanje, mala količina nataljenog metala taljenja, mogućnost pojave hladnog naljepljivanja.



Slika 5. Ciklus prijenosa metala kratkim spojevima [3]

Na slici 4. su prikazane su sve faze prijenosa metala kratkim spojevima. U Fazi A prikazan je dodir, odnosno kratak spoj kontinuirano dovodene pune ili praškom punjene žice za zavarivanje sa osnovnim materijal ili talinom metala zavara. U trenutku kratkog spoja prekida se električni luk (vrijednost napona električnog luka pada prema 0), a vrijednost struje zavarivanja eksponencijalno raste (porast struje zavarivanja u kratkom spoju uzrokuje taljenje vrha žice za zavarivanje, uslijed kojeg nastaje kapljica metala). Faza B prikazuje pojavu pinch efekta. Pinch efekt je pojava suženja presjeka rastaljenog vrha žice za zavarivanje, nastaje djelovanjem elektromagnetskih sila, uslijed porasta truje zavarivanja. U ovoj fazi struja zavarivanja raste prema vršnoj vrijednosti, uz lagani porast napona električnog luka. Faza C prikazuje odvajanje kapljice metala od vrha žice za zavarivanje, uslijed djelovanja sila površinske napetosti koje privlače kapljicu metala prema osnovnom materijalu ili talini metala zavara. U ovoj fazi vrijednost struje zavarivanja je maksimalna (vrijednost vršne struje zavarivanja). U fazi D žica za zavarivanje odvaja se od taline metala, uz ponovnu uspostavu električnog luka (nagli porast vrijednosti napona električnog luka). U ovoj fazi vrijednost struje zavarivanja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost (vrijednost

osnovne struje zavarivanja). Ova faza ujedno predstavlja završetak jednog ciklusa i početak sljedećeg ciklusa odvajanja kapljice metala. Nakon smanjenja struje zavarivanja na početnu vrijednost, ciklus odvajanja rastaljene kapljice se ponavlja. U Fazi E počinje novi ciklus odvajanja kapljice metala. Frekvencija ciklusa odvajanja kapljice metala je od 20 do 200 puta u sekundi.

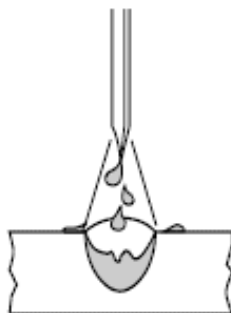


Slika 6. Shematski prikaz pojave "pinch" efekta [3]

2.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom (engl. Globular Transfer) je način prijenosa metala u električnom luku kod kojeg se kontinuirano dovođena puna ili praškom punjena žica tali, kombinacijom prijenosa metala štrcajućim lukom i kratkim spojevima. Kod prijenosa metala prijelaznim lukom dolazi do stvaranja krupnih kapljica metala na vrhu žice za zavarivanje koje se nepravilno odvajaju uz djelovanje sila u električnom luku, te prenose slobodnim letom kroz atmosferu električnog luka od vrha žice za zavarivanje prema osnovnom materijalu ili talini, bez kratkih spojeva žice za zavarivanje sa osnovnim materijalom. Pojedine kapljice, ovisno o duljini i naponu električnog luka, te vrijednosti struje zavarivanja, mogu toliko narasti da u određenom trenutku dodirnu talinu čime nastupa kratki spoj. Kod prijenosa metala prijelaznim lukom vrijednost struje zavarivanja je od 170 A do 235 A, dok je vrijednost napona električnog luka od 22 V do 25 V. Kod zavarivanja prijenosom metala štrcajućim lukom moguća je upotreba zaštitnog plina sa 100% CO₂, ili mješavina zaštitnih plinova CO₂ + Ar . Nedostaci zavarivanjem prijenosom metala prijelaznim lukom su: povećano prskanje, neregularnost prijenosa metala (pojava kratkih spojeva je slučajna i izaziva nepredvidivo prskanje metala), primjena samo u horizontalnom položaju zavarivanja, lošije kvašenje taline metala zavara,

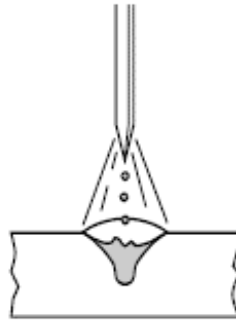
zavar je izbrazdan i nepravilan, mala iskoristivost žice za zavarivanje (od 87% do 93%). Zbog brojnih nedostataka zavarivanje prijenosom metala prijelaznim lukom se izbjegava te se upotrebljavaju napredniji postupci zavarivanja.



Slika 7. Shematski prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom [3]

2.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

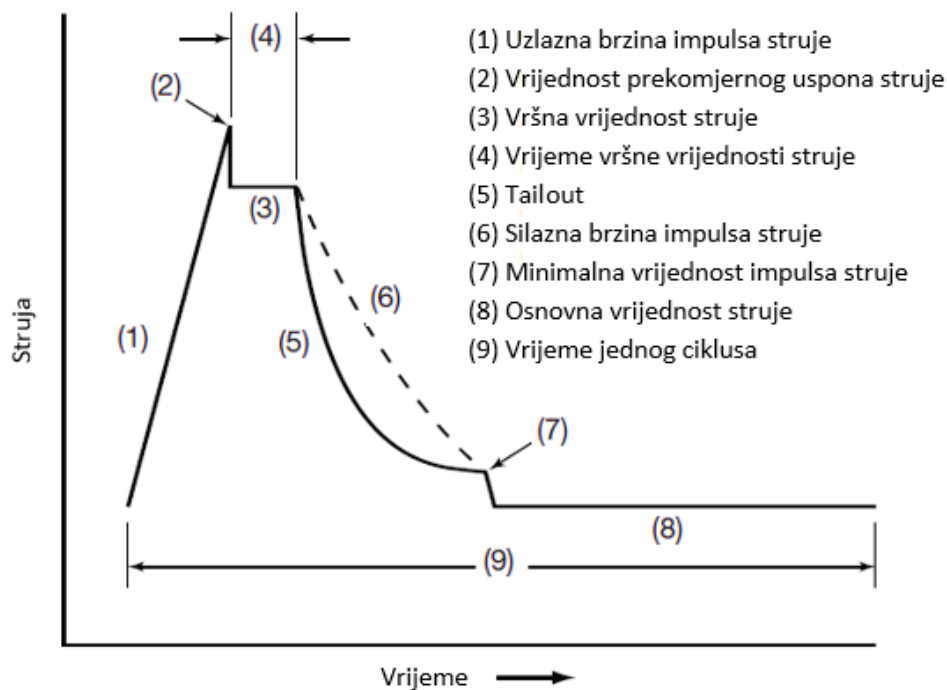
Prijenos metala štrcajućim lukom (engl. Axial Spray Transfer) je način prijenosa metala u električnom luku kod kojeg se kontinuirano dovođena puna ili praškom punjena žica tali, te se sitne kapljice metala odvajaju uz djelovanje sila u električnom luku, i prenose aksijalno slobodnim letom kroz atmosferu električnog luka od vrha žice za zavarivanje prema osnovnom materijalu, a žica za zavarivanje niti u jednom trenutku ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom ili talinom metala zavara (nema kratkih spojeva). Kod prijenosa metala štrcajućim lukom vrijednost struje zavarivanja je od 200 A do 600 A, dok je vrijednost napona električnog luka od 25V do 40 V. Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira veliki unos topline. Za zavarivanje prijenosom metala štrcajućim lukom potrebna je upotreba mješavina zaštitnog plina s većinskim udjelom Ar, a udjel CO₂ mora biti manji od 18 %. Prednosti zavarivanja prijenosom metala štrcajućim lukom su: velika količina nataljenog metala, visoka iskoristivost žice za zavarivanje (98 %), nema prskanje metala, mogućnost korištenja većih promjera žica za zavarivanje, primjena u automatskim sustavima za zavarivanje, lijep izgled zavara, velika penetracija, dobro kvašenje taline. Nedostatci zavarivanja prijenosom metala štrcajućim lukom su: moguće zavarivanje samo debljih materijala, primjena samo u horizontalnom položaju zavarivanja, primjena skupljih mješavina zaštitnog plina, veća količina proizvedenih dimnih plinova.



Slika 8. Shematski prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom [3]

2.3.4. Impulsni način prijenosa metala

Impulsni način prijenosa metala (engl. Pulsed Spray Transfer) je način prijenosa metala u električnom luku sličan prijenosu metala štrcajućim lukom. Kod zavarivanja prijenosom metala impulsnim lukom izvor struje generira promjenjiv oblik struje zavarivanja tj. impuls. Vrijednost struje zavarivanja varira između vršne struje zavarivanja od 250 A do 650 A, i manje osnovne struje zavarivanja od 20 A do 50 A. Prosječna vrijednost struje zavarivanja manja je od vrijednosti struje zavarivanja kod prijenosa metala štrcajućim lukom. Tijekom jednog impulsa, pri vrijednosti vršne struje zavarivanja, odvaja se samo jedna kapljica metala koja se odvaja uz djelovanje sila u električnom luku, te slobodno leti kroz atmosferu električnog luka od vrha žice za zavarivanje prema osnovnom materijalu ili talini metala zavora, bez kratkih spojeva. Nakon toga vrijednost struja zavarivanja pada s vrijednosti vršne na vrijednost osnovne struje zavarivanja, koja stabilizira električni luk. Količina prijenosa metala određena je promjerom žice za zavarivanje i brojem impulsa tj. frekvencijom impulsa od 20 Hz do 300 Hz. Frekvencija impulsa proporcionalna je brzini dodavanja žice za zavarivanje. Za zavarivanje prijenosom metala impulsnim lukom upotrebljavaju se iste mješavine zaštitnog plina kao i kod zavarivanja prijenosom metala štrcajućim lukom. Zavarivanjem prijenosom metala impulsnim lukom zadržavaju se prednosti, a otklanjaju nedostaci kod zavarivanja prijenosom metala štrcajućim lukom.



Slika 9. Ciklus prijenosa metala impulsnim načinom [3]

2.4. Uloga i svojstva zaštitnih plinova

Primarna uloga zaštitnog plina kod MIG/MAG postupka zavarivanja je stvaranja zaštitne atmosfere oko mjesta zavora. Stvaranje zaštitne atmosfere je nužno kako bi se kapljice metala za vrijeme leta kroz električni luk i talina metala zavora zaštitila od negativnih atmosferskih utjecaja. Osim što služi kao zaštitna atmosfera oko mjesta zavora, zaštitni plin svojim djelovanjem utječe na način prijenosa metala u električnom luku, stabilnost električnog luka, kvalitetu i izgled zavora, te na učinkovitost postupka zavarivanja. Za pravilan odabir vrste zaštitnog plina i njegov utjecaj na postupak zavarivanja, potrebno je razumijevanje osnovnih fizikalnih i kemijskih svojstava plinova. Najvažnija fizikalna svojstva plinova koja imaju utjecaj na postupak zavarivanja su: gustoća plina, energija disocijacije, ionizacijski potencijal, toplinska vodljivost, kemijska reaktivnost.

Gustoća plina utječe na učinkovitost zaštite taline metala zavora, bez obzira radi li se o inertnim ili aktivnim plinovima. Plinovi teži od zraka imaju tendenciju padanja uz stup električnog luka,

što pospješuje učinak zaštite taline metala zavara kod zavarivanja u horizontalnom položaju. Molekularni plinovi povećavaju zaštitu taline metala zavara povećanjem volumena uz stup električnog luka zbog pojave disocijacije. Kako bi se osigurala ispravna zaštita taline metala zavara, odabirom zaštitnog plina koji je teži od zraka (argon, ugljični dioksid), treba podesiti manji protok zaštitnog plina pri postupku zavarivanja, nego kod primjene lakšeg zaštitnog plina (helij). Ovisno o tome koji se materijal zavaruje, i kojim postupkom zavarivanja, vrlo male količine nečistoća u zaštitnome plinu mogu značajno utjecati na brzinu zavarivanja, izgled površine zavara, skrućivanje zavara i poroznost zavara. Iz tog razloga je vrlo bitno kontrolirati koji plin se koristi prilikom zavarivanja te da li zadovoljava normama propisanu minimalnu čistoću.

Energija disocijacije je ona količina energije koju je potrebno dovesti dvoatomnoj ili višeatomnoj molekuli plina da dođe do disocijacije tj. do odvajanja jednog atoma. Prilikom postupka zavarivanja u električnom luku kod vrlo visokih temperatura u električnog luka (oko 10 000 °C), dolazi do razlaganja tj. disocijacije molekularnih zaštitnih plinova na atome. Atomi su nakon toga djelomično ionizirani, čime se poboljšava električna vodljivost zaštitne atmosfere. U trenutku kontakta toplog disociranog plina i hladne površine osnovnog materijala, dolazi do rekombinacije, odnosno ponovnog vezanja atoma u molekule što rezultira oslobađanjem velike količine energije. Zbog oslobođene velike količine energije nastale rekombinacijom višeatomni plinovi postižu efekt jednoatomnih plinova s višom toplinskom vodljivošću, te je zbog toga moguće pri istoj temperaturi električnog luka postići veće zagrijavanje osnovnog materijala plinovima poput npr. ugljičnog dioksida u usporedbi s argonom ili helijem. Upotrebom argona, helija, ili njihovih mješavina kao zaštitnog plina nemože doći do disocijacije i rekombinacije, zato što su argon i helij jednoatomni plinovi.

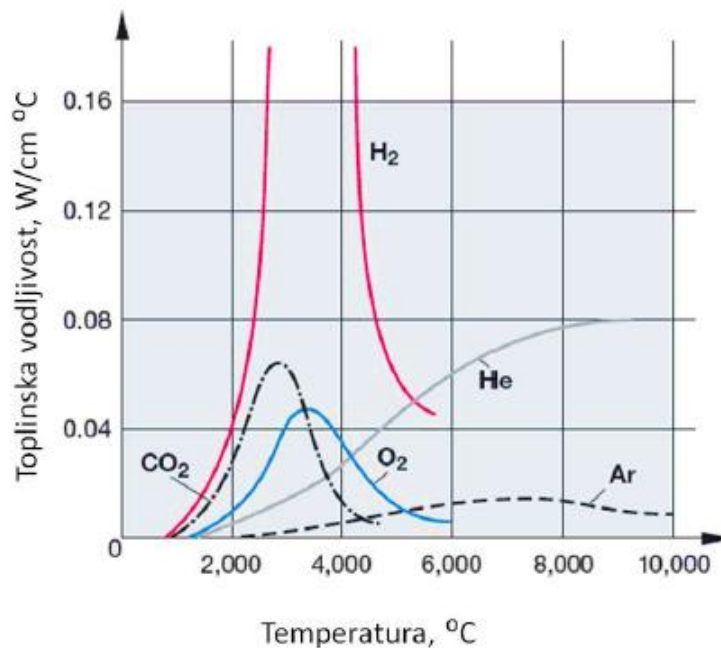
Ionizacijski potencijal je energija koju je potrebno dovesti nekom atomu plina da bi došlo do izbijanja jednog atoma iz njegova elektronskog omotača. Dvoatomni plinovi najprije disociraju u atomno stanje, a zatim ioniziraju (ovisno o vrsti plina). Zbroj energija disocijacije i ionizacijskog potencijala predstavlja koliko je minimalno energije potrebno dovesti plinu da bi došlo do ionizacije plina. Pri konstantnim parametrima plina manji ionizacijski potencijal imaju plinovi s većom molekulskom tj. atomskom masom plina. Uspostava i održavanje električnog

luka uvelike ovisi o ionizacijskom potencijalu zaštitnog plina. Zaštitni plinovi s relativno nižim vrijednostima ionizacijskog potencijala olakšavaju uspostavu i održavanje električnog luka i povećavaju stabilnost postupka zavarivanja.

Tablica 1. Energija disocijanja i ionizacijski potencijali zaštitnih plinova [5]

| Vrsta zaštitnog plina | Energija disocijacije (eV) | Ionizacijski potencijal (eV) |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Vodik (H ₂) | 4,5 | 12,6 |
| Kisik (O ₂) | 5,1 | 12,6 |
| Dušik (N ₂) | 9,7 | 14,5 |
| Ugljični dioksid (CO ₂) | 5,3 | 14,4 |
| Helij (He) | – | 26,4 |
| Argon (Ar) | – | 15,8 |

Toplinska vodljivost plina je svojstvo, odnosno sposobnost plina da provodi toplinu. Toplinska vodljivost govori u kolikoj mjeri dolazi do rasipanja topline udaljavanjem od stupa električnog luka. Pri korištenju argona kao zaštitnog plina koji ima relativno nisku toplinsku vodljivost, dolazi do uspostavljanja električnog luka kojeg čine dvije zone: uska, vruća jezgra i znatno hladnija vanjska zona, što rezultira penetracijskim profilom zavara s uskim korijenom i širim licem zavara. Ukoliko se koriste zaštitni plinovi s većom toplinskom vodljivošću, koji provode veću količinu topline u vanjsku zonu zavara, stvaraju širi električni luk s ravnomjernijom temperaturnom raspodjelom čime se postiže širi penetracijski profil zavara.



Slika 10. Toplinska vodljivost zaštitnih plinova u ovisnosti o temperaturi [5]

Kemijska reaktivnost (kemijska inertnost) je sklonost zaštitnog da pri visokim temperaturama u električnom luku reagira s drugim elementima prisutnim u talini metala zavara. Argon i helij spadaju u skupinu inertnih plinova i kemijski ne utječu na sam postupak zavarivanja. Dušik pri sobnoj temperaturi spada u skupinu inertnih plinova, ali pri visokim temperaturama u električnom luku postaje reaktivan (kemijski aktivan), te može imati nepoželjan utjecaj na kemijski sastav metala zavara. U skupinu reaktivnih plinova spadaju i ugljični dioksid i kisik. Ovi plinovi reagiraju s rastaljenim metalom u električnom luku i u kupki stvarajući pri tome okside, a nerijetko i otpadne plinove. Vodik spada u skupinu reaktivnih plinova iako je po prirodi reducirajući plin jer reagira s oksidacijskim sredstvima i na taj način sprečava stvaranje oksida u talini. Vodik u većim količinama je izuzetno štetan, jer uzrokuje pojavu hladnih pukotina i poroznosti u zavaru.

2.4.1. Vrste i svojstva zaštitnih plinova

Zaštitni plinovi koji se koriste kao zaštitna atmosfera kod MIG/MAG postupka zavarivanja mogu biti jednokomponentni ili dvokomponentne, trokomponentne i četverokomponentne plinske mješavine. Plinovi koji se upotrebljavaju u višekomponentnim zaštitnim plinskim mješavinama su: argon, helij, ugljični dioksid, kisik, vodik i/ili dušik. Kao jednokomponentni zaštitni plin mogu se koristiti samo argon, helij i ugljični dioksid. Dok se kisik, vodik i dušik koriste samo u višekomponentnim zaštitnim plinskim mješavinama sa malim volumnim udjelima radi negativnih utjecaja. Vrste zaštitnih plinova definirane su normom HRN EN ISO 14175 - Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke (ISO 14175:2008; EN ISO 14175:2008).

Argon (Ar) je jednoatomni, kemijski inertni plin bez boje, mirisa, i okusa, neotrovan, nezapaljiv, i ne topi se u talini metala zavora. Za upotrebu argona kao zaštitnog plina u postupku zavarivanja, potrebna čistoća argona mora biti veća ili jednaka 99,99 %. Argon ima približno 1,4 puta veću gustoću od zraka, a dobiva se postupkom ukapljivanja ili destilacije zraka. Inertnost i velika gustoća čine ga izrazito povoljnim za upotrebu u obliku zaštite od negativnih atmosferskih utjecaja, pa se intenzivno koristi kao zaštitni plin pri zavarivanju metala na bazi željeza, kao i za zavarivanje neželjeznih metala i legura poput nikla, bakra, aluminijskih, magnezijjskih i titanijskih legura, i sl. Osim kao jednokomponentan zaštitni plin, argon se koristi i u dvokomponentnim i višekomponentnim plinskim mješavinama, radi postizanja veće stabilnosti električnog luka, i što veće kvalitete zavora traženih mehaničkih svojstava. Argon kao jednokomponentan zaštitni plin koristi se za zavarivanje neželjeznih metala i legura, a argon u dvokomponentnim ili višekomponentnim mješavinama zaštitnog plina koristi se za zavarivanje metala na bazi željeza. Kod dvokomponentnih ili višekomponentnih mješavina zaštitnog plina, ovisno o vrsti mješavine zaštitnog plina, argon se miješa zajedno sa kisikom, helijem, ugljičnim dioksidom, vodikom i/ili dušikom. Nizak ionizacijski potencijal argona doprinosi uspostavljanju i stabilnosti električnog luka, uz veliku gustoću struje zavarivanja. Mješavine zaštitnih plinova s visokim udjelima argona podržavaju sve načine prijenosa metala. Argon je najčešće uporabljivi inertni plin. Zbog visoke cijene argon se najčešće koristi u višekomponentnim mješavinama zaštitnog plina.

Helij (He) je jednoatomni inertni plin, male atomske mase i male gustoće (otprilike 14 % gustoće zraka). Cijena mu je mnogo veća nego argona zbog čega se gotovo i ne koristi kao jednokomponentni zaštitni plin, nego se koristi samo u višekomponentnim mješavinama zaštitnog plina. Zbog malog volumnog udjela u atmosferi dobiva se separacijom iz prirodnog plina u kojem se smatra nečistoćom. Koristi se kod zavarivanja gdje je potreban veliki unos topline tijekom postupka zavarivanja, čime se dobiva veća žitkost taline metala zavara, veći je penetracijski profil zavara, te je veća brzina zavarivanja. Također ima veću toplinsku vodljivost od argona te širi stup električnog luka. Izrazito je pogodan kod zavarivanja aluminija i magnezija koji su netolerantni na uključke oksida. Primjenjuje se u mješavinama zaštitnog plina mješavinama za zavarivanje korozijski postojanih čelika. Ima izrazito stabilan električni luk te se primjenjuje kod zavarivanja visokim gustoćama struje.

Ugljični dioksid (CO_2) je reaktivan plin, molekula ugljičnog dioksida sastoji se od jednog atoma ugljika i dva atoma kiska u masenim odnosima 27,3 % ugljika i 72,7 % kiska. Ugljični dioksid je plin bez boje, mirisa, i okusa, neotrovan i nezapaljiv. Za upotrebu ugljičnog dioksida kao zaštitnog plina u postupku zavarivanja, potrebna čistoća ugljičnog dioksida mora biti veća ili jednaka 99,5 %. Ugljični dioksid je inertan (nije kemijski reaktivan) plin pri sobnoj temperaturi ali kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi koja sadrži ugljični dioksid, između taline metala zavara i ugljičnog dioksida dolazi do disocijacije što ga svrstava u kategoriju aktivnih zaštitnih plinova. Molekula ugljičnog dioksida potaknuta velikom energijom plazme, se u anodnom području luka disocira na ugljični monoksid i kisik. Slobodni elementi nastali disocijacijom miješaju se sa talinom metala zavara ili se u hladnijem, katodnom području rekombiniraju pri čemu ponovno nastaje ugljični dioksid, te se oslobađa velika količina topline. Slobodni kisik nastao disocijacijom može reagirati s kemijskim elementima koji putuju lukom tvoreći okside. To se može spriječiti dodavanjem dezoksidanata poput silicija, mangana i titana u dodatni materijal, koji vežu kisik na sebe i potom se izlučuju na vrhu taline metala zavara u obliku troske. Veće količine ugljičnog dioksida povećavaju oksidacijski potencijal, a time je i veća količina troske na površini zavara. U suprotnom slučaju došlo bi do većeg stupnja legiranja zavara silicijem, manganom i sličnim. Ugljični dioksid kao zaštitni plin se najčešće koristi kod zavarivanju načinom

prijenosa metala kratkim spojevima. Upotrebom ugljičnog dioksida kao zaštitnog plina dobiva se dubok i širok profil penetracije zavara, dok nizak ionizacijski potencijal i niska toplinska vodljivost stvaraju vrlo visoke temperature u središtu električnog luka. Cijena ugljičnog dioksida kao zaštitnog plina je relativno niska, no nakon postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi ugljičnog dioksida potrebna je naknadna obrada zavara, radi čišćenja površine od produkata prskanja kapljica. Mala količina nataljenog metala, povećano prskanje, veća količina dimnih plinova, povećava troškove kod postupka zavarivanja u zaštitnoj atmosferi ugljičnog dioksida. Zbog poboljšanja operativnih karakteristika, ugljični dioksid se miješa s argonom.

Kisik (O_2) je dvoatomni plin koji u volumnom udjelu zauzima 50 % zemljine kore i 21 % atmosfere. Dobiva se ukapljivanjem i destilacijom zraka. Reaktivan je s gotovo svim elementima izuzev rijetkih i inertnih plinova. Kisik je plin bez boje, mirisa, i okusa, neotrovan i nezapaljiv, ali podržava gorenje. Primjena kisika kod zavarivanja povećava stabilnost električnog luka, smanjuje površinsku napetost i povećava žitkost taline metala zavara. Kisik se koristi samo u plinskim mješavinama, u malim postotcima. Kisik u plinskim zaštitnim mješavinama koristi u vrlo malim udjelima, otprilike 1 % do 5 %, čime se smanjuje se promjer kapljica metala, poboljšava se kvašenje taline metala zavara, a površina zavara znatno je ravnija. Kisik se primjenjuje u plinskim mješavinama zajedno s argonom kod zavarivanja ugljičnih, niskolegiranih i nehrđajućih čelika. Međutim prisutnost kisika pri zavarivanju ima značajan utjecaj na mikrostrukturu materijala zavara a time i na njegova osnovna mehanička svojstva, posebno na udarni rad loma. Stoga se u zavarivanju uvodi pojam ekvivalenta kisika radi procjene utjecaja zaštitnog plina na svojstva zavara.

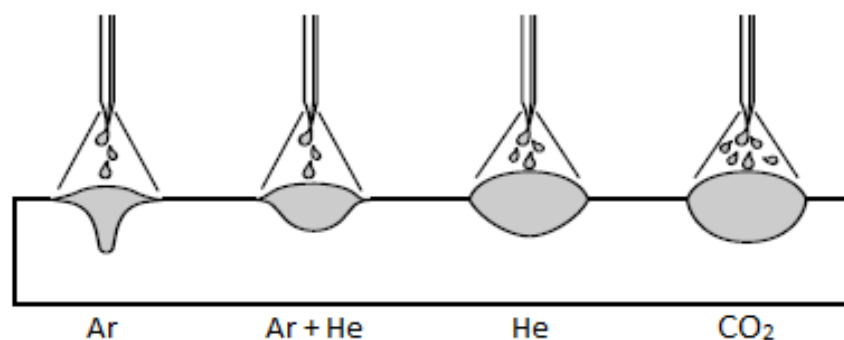
Vodik (H_2) je jednoatomni plin, kemijski aktivan te iznimno zapaljiv plin. Temperatura zapaljenja iznosi $560^{\circ}C$, a u određenim koncentracijama pomiješan s kisikom, zrakom ili drugim oksidacijskim sredstvima je i eksplozivan. Vodik je najlakši od svih plinova, dobiva se reforming katalitičkim procesima (eng. Steam Reforming) i kloroalkalnom elektrolizom. Vodik se u plinskim zaštitnim mješavinama koristi u vrlo malim udjelima, otprilike 1 % do 5 %. Visoka toplinska vodljivost vodika omogućuje veću žitkost taline metala zavara, veće kvašenje taline metala zavara na rubovima žlijeba za zavarivanje, te je veća brzina zavarivanja. Često se dodaje argonu radi zaštite pri zavarivanju korozijski postojanih čelika i legura na bazi nikla.

Dušik (N_2) je jednoatomni plin bez boje, mirisa i okusa, neotrovan, koji u volumnom udjelu zauzima oko 78 % zraka. Dušik je lakši od zraka, ne izgara, i ne podržava gorenje, a dobiva se postupkom ukapljivanja zraka. Kemijski nije aktivan, ali pri visokim temperaturama u električnom luku reagira s metalima poput aluminijsa, magnezija i titana. Zaštitne mješavine plinova koje sadrže dušik koriste se za zavarivanje ugljičnih čelika. Najčešća primjena dušik je za zaštitu korijena zavara od onečišćenja iz okolišne atmosfere. Kod zavarivanja nehrđajućih čelika zahtijeva se opreznost, jer dušik može reducirati količinu ferita. Dušik se u mješavini zaštitnih plinova koristi u vrlo malim udjelima, otprilike do 3% dušika dodaje se argonu kod zavarivanje duplex nehrđajućih čelika.

2.4.2. Mješavine zaštitnih plinova

Za zavarivanje MIG/MAG postupkom zavarivanja najčešće se koriste dvokomponentne i trokomponentne mješavine zaštitnih plinova. Kod MIG/MAG postupkom zavarivanja najčešće se koriste dvokomponentne mješavine zaštitnih plinova $Ar + CO_2$, $Ar + O_2$, i $Ar + He$. Dvokomponentna mješavina zaštitnih plinova $Ar + CO_2$ koristi se za zavarivanje ugljičnih čelika. Ova mješavina zaštitnih plinova podržava sve načine prijenosa metala. Način prijenosa metala štrcajući lukom i impulsni način prijenosa metala zahtijeva da u zaštitnoj plinskoj mješavini $Ar + CO_2$, udjel CO_2 bude manji od 18 %. Povećanjem udjela CO_2 povećan je unos topline tijekom postupka zavarivanja, a time i opasnost od progaranja. Prijenos metala kratkim spojevima je način prijenosa metala s malim unosom topline te je moguća upotreba mješavine zaštitnih plinova $Ar + CO_2$, s udjelom od 75 % do 80% Ar i udjelom od 20 % do 25 % CO_2 . Kod prijenosa metala kratkim spojevima zahtijeva se opreznost, ukoliko se upotrebljava mješavina zaštitnih plinova $Ar + CO_2$ sa povećanim udjelom Ar . Najpopularnija dvokomponentna mješavina zaštitnih plinova za zavarivanje je mješavina 82 % $Ar + 18$ % CO_2 . Dvokomponentna mješavina zaštitnih plinova $Ar + O_2$ koristi se za zavarivanje ugljičnih i nehrđajućih čelika. Ova plinska mješavina koristi se kod zavarivanja načinom prijenosa metala štrcajućim lukom., kapljice metala su manje, veća je žitkost taline metala zavara.

Uporaba ove mješavine zaštitnih plinova pokazala se vrlo korisnom pri brzom zavarivanju tankostijenih materijala. Dvokomponentna mješavina zaštitnih plinova Ar + He koristi se za zavarivanje aluminijskih i legura nikla. Ova mješavina zaštitnih plinova podržava način prijenosa metala štrcajućim lukom i impulsni način prijenosa metala. Povećanjem udjela He povećan je unos toplote tijekom postupka zavarivanja, a veća je i žitkost taline metala zavara. Uporabom mješavine zaštitnih plinova s udjelom He veća je brzina zavarivanja, i ravniji je izgled zavara. Kod zavarivanja aluminijskih upotrebom mješavine zaštitnih plinova s povećanim udjelom He, smanjuje se dubina penetracijskog profila i poroznost zavara. Trokomponentne mješavine zaštitnih plinova kod MIG/MAG postupka zavarivanja najčešće se koriste za zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika, a u rijetkim slučajevima koriste se i za zavarivanje legura nikla. Kod MIG/MAG postupka zavarivanja najčešće se koristi trokomponentna mješavina zaštitnih plinova Ar + CO₂ + He. Mješavine zaštitnih plinova Ar + CO₂ + He, sa udjelom 40 % He, zavarivanjem, ugljičnih čelika načinom prijenosa metala kratkim spojevima dolazi do šireg profila penetracije zavara. Pri zavarivanju načinom prijenosa metala kratkim spojevima, upotrebom He u trokomponentnoj mješavini zaštitnih plinova postiže se veća toplinska vodljivost kod zavarivanja ugljičnih i nehrđajućih čelika, širi profil penetracije zavara, te bolje kvašenje taline metala zavara. Kod zavarivanja načinom prijenosa metala kratkim spojevima u mješavini zaštitnih plinova Ar + CO₂ + He, udjel He je od 55 % do 90 %, a udjel CO₂ je 2,5 %. Upotrebom trokomponentne mješavine zaštitnih plinova smanjeno je prskanje, veća je žitkost taline metala zavara, te ravniji i položeniiji izgled zavara.



Slika 11. Utjecaj zaštitnih plinova na izgled zavara i prskanje rastaljenog metala [3]

Tablica 2. Odabir zaštitnog plina ili mješavina zaštitnih plinova za MIG/MAG postupak zavarivanja [3]

| Vrsta materijala | Način prijenosa metala u električnom luku | Mješavina zaštitnog plina |
|----------------------|---|--|
| Ugljični čelici | Kratkim spojevima ili STT | 100 % CO ₂ 75 – 90 % Ar + 10 – 25 % CO ₂ |
| | Štrcajući luk ili impulsni prijenos | 82 – 98 % Ar + 2 – 18 % CO ₂ 95 – 98 % Ar + 2 – 5 % O ₂ 90 % Ar + 7,5% CO ₂ + 2,5 % O ₂ |
| Niskolegirani čelici | Kratkim spojevima ili STT | 100 % CO ₂ 75 – 80 % Ar + 20 – 25 % CO ₂ |
| | Štrcajući luk ili impulsni prijenos | 95 % Ar + 5 % CO ₂ 95 – 98 % Ar + 2 – 5 % O ₂ |
| Aluminij | Štrcajući luk ili impulsni prijenos | 100 % Ar 75 % He + 25 % Ar 75 % Ar + 25 % He |
| Nehrđajući čelici | Kratkim spojevima ili STT | 98 – 99 % Ar + 1 – 2 % O ₂ 90 % He + 7,5 % Ar + 2,5 % CO ₂ 55 % He + 42,5 % Ar + 2,5 % CO ₂ |
| | Štrcajući luk ili impulsni prijenos | 98 – 99 % Ar + 1-2% O ₂ 98 % Ar + 2 % CO ₂ 97 – 99 % Ar + 1 – 3 % H 55 % He + 42,5% Ar + 2,5% CO ₂ |

Nastavak tablice 2.

| Vrsta materijala | Način prijenosa metala u električnom luku | Zaštitna plinska mješavina |
|--------------------------|---|--|
| Legure nikla | Kratkim spojevima ili STT | 90 % He + 7,5% Ar + 2,5% CO ₂ 89 % Ar + 10,5% He + 0,5% CO ₂ 66,1% Ar + 33% He + 0,9% CO ₂ 75 % Ar + 25% He 75 % He + 25 % Ar |
| | Štrcajući luk ili Impulsni prijenos | 100 % Ar 89 % Ar + 10,5 % He + 0,5 % CO ₂ 66,1 % Ar + 33 % He + 0.9 % CO ₂ 75 % He + 25 % Ar 75 % Ar + 25 % He 97 – 99 % Ar + 1-3 % H |
| Duplex nehrđajući čelici | Kratkim spojevima ili STT | 66,1 % Ar + 33 % He + 0,9 % CO ₂ 90 % He + 7,5 % Ar + 2,5 % CO ₂ 98 – 99 % Ar + 1-2 % O ₂ 98 % Ar + 2 % CO ₂ |
| | Štrcajući luk ili Impulsni prijenos | 75 % Ar + 25 % He 75 % He + 25 % Ar 100 % Ar 100 % He 66,1% Ar + 33% He + 0,9 % CO ₂ |

Nastavak tablice 2.

| Vrsta materijala | Način prijenosa metala u električnom luku | Zaštitna plinska mješavina |
|--|---|--|
| 90 / 10 Legure bakra i nikla | Štrcajući luk ili Impulsni prijenos | 100 % Ar 75 % Ar + 25 % He 75 % He + 25 % Ar |
| Legure bakra | Štrcajući luk ili Impulsni prijenos | 100 % Ar 75 % Ar + 25 % He 75 % He + 25 % Ar |
| Silicijska bronca Legure bakra i cinka (Mesing) | Kratkim spojevima ili STT, Štrcajući luk ili impulsni prijenos | 100 % Ar |
| Aluminijska bronca | Štrcajući luk ili Impulsni prijenos (Kratkim spojevima) | 100 % Ar |

3. STT POSTUPAK ZAVARIVANJA

3.1. Općenito o STT postupku zavarivanja

STT (engl. Surface Tension Transfer) postupak zavarivanja je napredni MIG/MAG postupak zavarivanja taljivom elektrodom u atmosferi zaštitnog plina, koji koristi unaprijeđen način prijenosa metala kratkim spojevima, a odvajanje kapljice metala vrši se silama površinske napetosti. STT postupak zavarivanja razvila je, i patentirala tvrtka Lincoln Electric. STT postupak zavarivanja predstavlja suvremeni i visokoučinkovit postupak zavarivanja, te se koristi prvenstveno za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu, te za zavarivanje tankostijenih limova. Razlog primjene STT postupka zavarivanja je mala količina unesene topline tijekom postupka zavarivanja i mogućnosti upravljanja većim brojem parametara u odnosu na konvencionalan MIG/MAG postupak zavarivanja. STT postupak zavarivanja je visokokvalitetan i visokoučinkovit postupak zavarivanja, te se koristi za zavarivanje ugljičnih čelika, nehrđajućih i duplex nehrđajućih čelika, legura nikla, i itd. STT postupak zavarivanja lako je u usvojiv svim MIG/MAG zavarivačima, uz tek prosječnu potrebnu vještinu. S prskanjem rastaljenog metala svedenim na minimum (čak i kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi 100 % CO₂), s manje proizvedenih dimnih plinova, manjim zračenjem i isijavanjem STT postupak zavarivanja omogućava lakši rad zavarivača. STT postupak zavarivanja može biti poluautomatski, automatski, ili robotizirani postupak zavarivanja

Prednosti primjene STT postupka zavarivanja su:

- Visokoučinkovit postupak zavarivanja; Velika je brzina zavarivanja a time i veća produktivnost u usporedbi sa ostalim postupcima zavarivanja, STT postupak zavarivanja dva puta je brži u odnosu na REL, a četiri puta u odnosu na TIG postupak zavarivanja,
- Visokokvalitetan postupak zavarivanja; Dobivena kvaliteta zavara je usporediva sa kvalitetom zavara zavarivanjem istih visokokvalitetnim TIG postupkom zavarivanja; Visoka razina kvalitete zavara može se postići u svim položajima zavarivanja; Mali broj prekida postupka zavarivanja, a time i manja mogućnost pojave grešaka,

- Mogućnost zavarivanja različitih materijala; ugljičnih čelika, nehrđajućih čelika i duplex nehrđajućih čelika, legura nikla, i itd.,
- Smanjeno prskanjem rastaljenog metala; a time je i skraćeno je vrijeme potrebno za čišćenje zavara,
- Zavarivanje moguće u svim položajima zavarivanja,
- Povoljni uvjeti za rad zavarivača i utjecaj na okolinu; Smanjeno zračenje i isijavanje uz manju količinu proizvedenih dimnih plinova,
- Potrebna minimalna obuka zavarivača, uz tek prosječna potrebnu vještinu,
- Mogućnost upotrebe različitih mješavina zaštitnih plinova (tablica 2.),
- Mogućnost izbora žica većih promjera (1,0 mm ili 1,2 mm) smanjuje cijenu dodatnog materijala,
- Smanjena mogućnost hladnog naljepljivanja rastaljenog metala na osnovni materijal
- Mala količina difundiranog vodika u zavaru,
- Mogućnost upotrebe praškom punjenih žica za zavarivanje; Upotreba praškom punjenih žica za zavarivanje umanjuje rizik od pojave hladnih pukotina,
- Precizno upravljanje količinom unesene topline, smanjuju se deformacije i progorijevanja prilikom postupka zavarivanja,
- Precizno upravljanje strujom zavarivanja neovisno o brzino dodavanja žice; Pozadinska struja upravlja oblikom izgleda zavara i ukupnim unosom topline; Vršna struja upravlja duljinom el. luka i predstavlja dobro kvašenje rastaljenog metala,
- Kompenzacija napona el. izvora; Održava se stalnost parametara zavarivanja pri promjenama napona el. izvora od $\pm 10\%$.

Nedostaci primjene STT postupka zavarivanja su:

- Visoka cijena opreme za STT postupak zavarivanja,
- Prednost STT postupka zavarivanja dolazi do punog izražaja u kombinaciji s ostalim visokoučinskim postupcima zavarivanja npr. STT + REL +EPP,
- Ograničena primjena STT postupka zavarivanja, koristi se za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu, te za zavarivanje tankostijenih limova.



Slika 12. Izbrusak korijenskog prolaza zavara; Zavarivanje je izvedeno STT postupkom zavarivanja [8]

3.2. Izvor struje zavarivanja

Izvor struje zavarivanja za STT postupak zavarivanja je inverterski izvor struje zavarivanja, to je uređaj koji udružuje tehnologiju visoke frekvencije upravljanja strujom zavarivanja, s naprednom tehnologijom upravljanja oblikom električnog luka (engl. *Waveform Control Technology*). Waveform Control Technology je napredna tehnologija, tvrtke Lincoln Electric, koja omogućava izradu željenog oblika izlazne (dinamičke) karakteristike STT postupka zavarivanja MIG. Ova tehnologija omogućava izbor programa, optimizaciju i upravljanje parametrima postupka zavarivanja ovisno o načinu primjene. STT uređaj ima mogućnost podešavanja parametara uz pomoć sinergijskih krivulja. STT uređaj za zavarivanje je izvor električne struje zavarivanja koji nema ni padajuću (CC) niti ravnu karakteristiku (CV). STT uređaj za zavarivanje upravlja strujom zavarivanja u svakom trenutku STT postupka zavarivanja, trajanje promjene struje zavarivanja je reda veličine mikrosekunde. Optimalne karakteristike električnog luka održavaju se i kod značajnijih promjena duljine slobodnog kraja žice za zavarivanje. STT uređaj za zavarivanje omogućuje neovisno upravljanje brzinom dodavanja žice za zavarivanje, od upravljanja strujom zavarivanja. STT uređaj za zavarivanje prvenstveno je namijenjen za poluautomatsku primjenu, gdje se brzinom dodavanja žice za zavarivanje upravlja uređajem za dodavanje žice za zavarivanje, a brzinom zavarivanja se upravlja ručno, ali najveća prednost dolazi do izražaja u automatskim i robotskim sustavima za zavarivanje STT postupkom zavarivanja. STT uređaj za zavarivanje dokazao se kao izuzetno pouzdan uređaj, s malom količinom kvarova i malim troškovima održavanja.



Slika 13. Izvor struje zavarivanja za STT postupak zavarivanja; LINCOLN ELECTRIC INVERTEC STT II [9]

3.3. Karakteristika STT postupka zavarivanja

STT postupak zavarivanja je postupak zavarivanja načinom prijenosa metala kratkim spojevima. Dobio je naziv prema mehanizmu prijenosa površinske napetosti koji upravlja odvajanjem kapljice metala. STT postupak zavarivanja karakterizira kratki električni luk. Postupak zavarivanja kratkim električnim lukom odabire se, prvenstveno gdje je potrebno smanjiti količinu unesene topline tijekom postupka zavarivanja, čime se smanjuju deformacije i zaostale napetosti uslijed postupka zavarivanja. Postupak zavarivanja kratkim električnim

lukom karakterizira nepoželjno intenzivno prskanje rastaljenog metala.. Kod zavarivanjem STT postupkom zavarivanja taj nedostatak se bitno smanjuje ili uklanja u potpunosti. Tijekom zavarivanja STT postupkom zavarivanja kada žica za zavarivanje dođe u dodir s osnovnim materijalom, ili talinom metala zavara, zatvara se strujni krug, odnosno dolazi do kratkog spoja i porasta struje. Porast struje u kratkom spoju se zaustavlja kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala uz djelovanje sila površinske napetosti. Nadzorom uvjeta za prijenos rastaljenog metala spriječen je porast struje koji uzrokuje rasprskavanje kapljica metala. Istovremeno se maksimalizira utjecaj sila površinske napetosti, uz pomoć kojih se kapljice metala uvlače u talinu metala zavara. Nakon odvajanja žice od taline metala zavara, odnosno prekida strujnog kruga, slijedi strujni impuls koji priprema i zagrijava vrh žice za novi ciklus odvajanja kapljice metala.

3.4. Glavni parametri zavarivanja

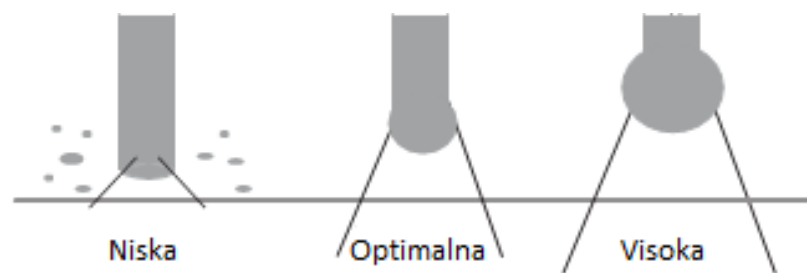
Odabir vrijednosti glavnih parametara zavarivanja kod STT postupka zavarivanja ovisi o vrsti materijala, promjeru i vrsti žice za zavarivanje (dodatni materijal). Parametri zavarivanja usklađuju prema uputama proizvođača, ili se pronalaze iskustvena rješenja za pojedine situacije nastale pri postupku zavarivanja. Glavni parametri zavarivanja mogu se pratiti i zabilježiti uz pomoć Online sustava za praćenje glavnih parametara zavarivanja.

Karakteristični glavni parametri zavarivanja pri STT postupku zavarivanja su:

- **Vršna struja zavarivanja (engl. Peak current, I_{PC})**

Vršna struja određuje duljinu električnog luka, poboljšava vezivanje, tj. kvašenje rastaljenog metala sa stjenkama osnovnog materijala. Visoka vrijednost vršne uzrokuje trenutno širenje i povećanje duljine električnog luka (ako je kraća duljina električnog luka veća je brzina zavarivanja). Ako je vrijednost vršne struje previsoka dolazi do načina prijenosa rastaljenog metala prijelaznim lukom. Preniska vrijednost vršne struje uzrokuje nestabilnost električnog luka, te dolazi do udaranja žice za zavarivanje u talinu metala zavara. Prilikom postupka zavarivanja potrebno je podesiti vrijednost vršne struje na optimalnu vrijednost, zbog manjeg prskanja i mirnoće rastaljene metalne kupke. Vrijednošću vršne struje se upravlja od 0 A do 450 A.

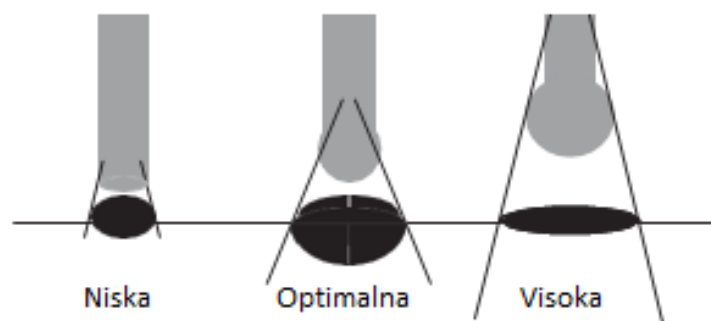
Prilikom upotrebe zaštitnog plina sa stopostotnim udjelom CO₂, kako bi se smanjilo prskanje, vrijednost vršne struje mora biti veća nego kod korištenja zaštitnog plina sa visokim udjelom Ar.



Slika 14. Podešavanje duljine električnog luka vršnom strujom zavarivanja [11]

- **Osnovna struja zavarivanja (engl. Background current, I_{BC})**

Osnovna struja zavarivanja omogućava kontrolu unosa topline u zavareni spoj, te upravlja oblikom izgleda zavara (penetracijski profil zavara). Previsoka vrijednost pozadinske struje uzrokovat će povećano prskanje, zbog stvaranja velikih kapljica metala, i pojavu načina prijenosa metala prijelaznim el. lukom. Preniska vrijednost pozadinske struje uzrokuje udaranje žice za zavarivanje talinu metala zavara, te slabije kvašenje rastaljenog metala. Vrijednošću pozadinske struje se upravlja od 0 A do 125 A. Vrijednost pozadinske struje prilikom upotrebe zaštitnog plina sa udjelom 100 % CO₂, niža je nego kod korištenja Ar kao zaštitnog plina. Razlog tomu je oslobađanje veće topline prilikom upotrebe CO₂ kao zaštitnog plina.



Slika 15. Podešavanje oblika izgleda zavara osnovnom strujom zavarivanja [11]

- **Vrući start (engl. Hot start)**

Vrući start olakšava uspostavljanje električnog luka, njime se povećava unos topline prilikom početka postupka zavarivanja, odnosno upravlja se vremenom prilikom kojeg je povećana početna vrijednost osnovne struje zavarivanja. Time je izbjegnuto naljepljivanje rastaljenog metala na hladan osnovni materijal. Upravljanje vrijednošću vrućeg starta je u rasponu od 0 do 10, gdje 0 odgovara vrijednosti bez vrućeg starta, a vrijednost 10 je najveća vrijednost pri kojoj vrući start traje oko 4 s, te je početna struja zavarivanja (osnovna struja zavarivanja) veća za oko 50%.

- **Tailout**

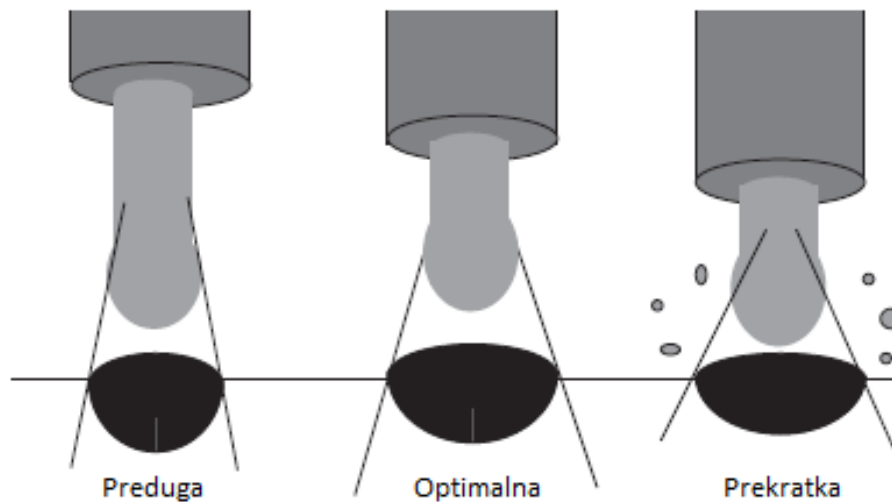
Tailout omogućava dodatan unos topline, a da pritom rastaljene kapljice metala ne postanu prevelike. Povećanjem vrijednosti tailouta veća je brzina zavarivanja, veće je i kvašenje taline metala zavara, a duljina električnog luka ostaje nepromijenjena. Povećanjem vrijednosti tailouta vrijednost vršne struje se povećava, a vrijednost osnovne struje se smanjuje, te je električni luk usmjereniji. Smanjenjem vrijednosti tailouta vrijednost vršne struje se smanjuje, a osnovna vrijednost struje se povećava, električni luk je stabilniji uz mirniji prijenos rastaljenog metala.

- **Brzina dodavanja žice za zavarivanje (engl. Wire feed speed, v_z)**

Brzina dodavanja žice za zavarivanje utječe na količinu rastaljenog metala, neovisna je veličina i i promjena njezine vrijednosti ne utječe na vrijednost vršne i osnovne struje zavarivanja

- **Duljina slobodnog kraja žice za zavarivanje (engl. Contact tip length, $l_{skž}$)**

Slobodni kraj žice za zavarivanje utječe na izgled zavara. Veća duljina slobodnog kraja žice za zavarivanje uzrokuje visoki i usku profil zavara. Manja duljina slobodnog kraja žice za zavarivanje uzrokuje nižu i širi profil zavara, a povećano je i prskanje rastaljenog metala.



Slika 16. Duljina slobodnog kraja žice od rastaljene metalne kupke [11]

- **Vrsta i promjer žice za zavarivanje**

Promjer žice za zavarivanje utječe na gustoću struje zavarivanja, tako što ista vrijednost struje zavarivanja i manji promjer žice za zavarivanje daju veću gustoću struje zavarivanja, koja uzrokuje veću dubinu profila penetracije zavara, uži je oblik zavara i veća je brzina dovođenja žice za zavarivanje. Vrste i promjera žice određuje se prema vrsti i debljini materijala, obliku zavarenog spoja i položaju zavarivanja. Promjeri žice za zavarivanje koji se koriste za STT postupak zavarivanja za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu su od 0,8 mm do 1,2 mm.

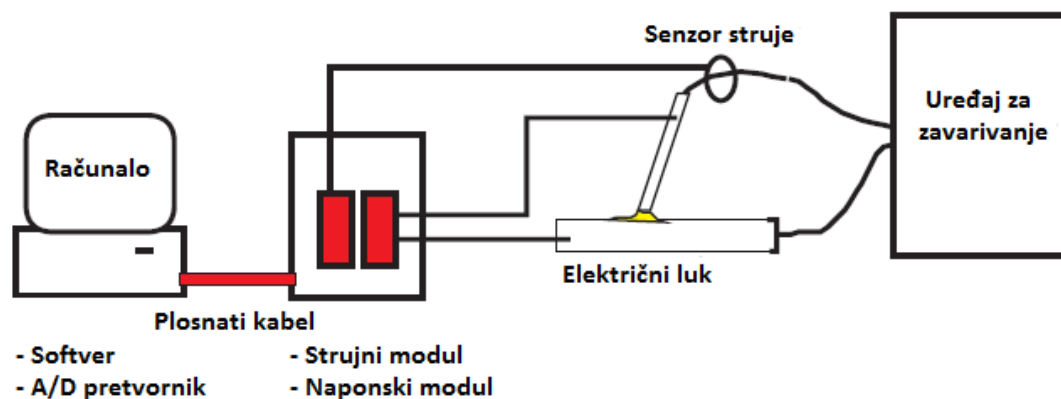
- **Protok zaštitnog plina (Q_p)**

Količina protoka zaštitnog plina određuje se prema vrijednosti struje zavarivanja, promjeru žice za zavarivanje, obliku zavarenog spoja, položaju zavarivanja, te uvjetima rada. Tijekom postupka zavarivanja treba voditi računa o količini protoka zaštitnog plina jer ona ima direktan utjecaj na kvalitetu zavara. Premala količina protoka zaštitnog plina ne stvara dovoljnu zaštitu mjesta zavara, a prevelika uzrokuje jako strujanje i pojavu vrtloženja plina, što izravno odražava na kvalitetu zavarenog spoja, na način da povećava vjerojatnost pojave niza grešaka, ponajviše poroznosti. Orijehtacijske vrijednosti količine protoka zaštitnog plina kod STT postupka zavarivanja za niske vrijednosti struje zavarivanja kreću se oko 12 l/min, za srednje

vrijednosti struje oko 15 l/min, dok se kod viših vrijednosti struje zavarivanja kreću oko 20 l/min. Otežani uvjeti, kao što je npr. rad na otvorenom prostoru uz povećano strujanje zraka, zahtijevaju veću količina zaštitnog plina.

3.4.1. Online sustav za praćenje glavnih parametara zavarivanja

Online sustav za praćenje glavnih parametara zavarivanja primjenjuje se za praćenje, prikupljanje i obradu glavnih parametara zavarivanja pri upotrebi različitih postupaka zavarivanja. Razlozi primjene ovog sustava su: kalibracija i kategorizacija uređaja za zavarivanje, odabir optimalnog dodatnog materijala ispunje tj. žice za zavarivanje, određivanje optimalnih parametara zavarivanja, precizno određivanje količine unesene topline tijekom postupka zavarivanja, upravljanje parametrima zavarivanja pri automatskom postupku zavarivanja. Sustav Online praćenja glavnih parametara zavarivanja se sastoji od: strujnog i naponskog modula, Analogno/Digitalnog pretvornika, senzora struje (Hallova sonda), plosnatog kabela, računala sa softverom za praćenje snimanje i obradu parametara zavarivanja. Dalje u poglavlju opisan je primjer korištenja online sustava praćenja glavnih parametara zavarivanja tijekom STT postupka zavarivanja.



Slika 17. Shematski prikaz Online sustava za praćenje glavnih parametara zavarivanja [13]

Online sustav za praćenje glavnih parametara zavarivanja korišten je za praćenje, prikupljanje i obradu izlaznih parametara zavarivanja (distribucija vrijednosti napona i struje zavarivanja), tijekom STT postupka zavarivanja. STT postupak zavarivanja korišten je za zavarivanja korijena zavora u otvorenom žlijebu, kod izrade cijevne komore.

Za dodatni materijal odabrana je DMO-IG žica promjera 1,0 mm, za zaštitni plin upotrijebljena je mješavina plinova KRYVAL18 (Ar – 82% + CO₂ – 18%). Za zavarivanje korišten je uređaj Lincoln Electric INVERTEC STT II, u kombinaciji sa Lincoln Electric LF 30 dodavačem žice zavarivanja. Za ovaj postupak zavarivanja podešeni su sljedeći parametri zavarivanja:

$$I_{PC} = 265 \text{ A, (vršna struja)}$$

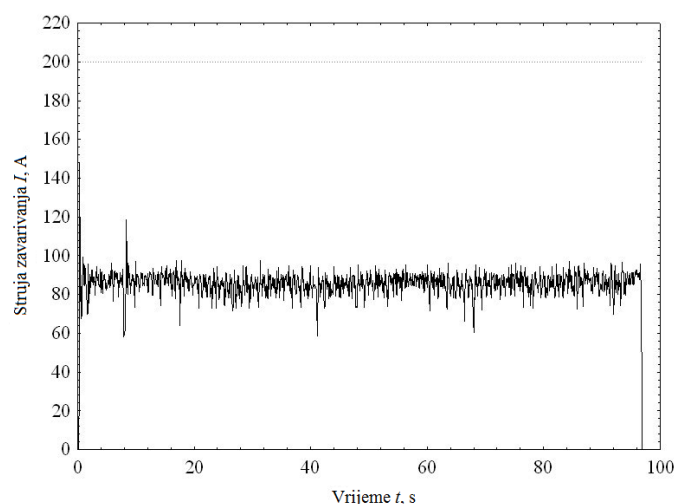
$$I_{BC} = 65 \text{ A, (pozadinska struja)}$$

$$v_z = 3 \text{ m/min, (brzina dodavanje žice za zavarivanje)}$$

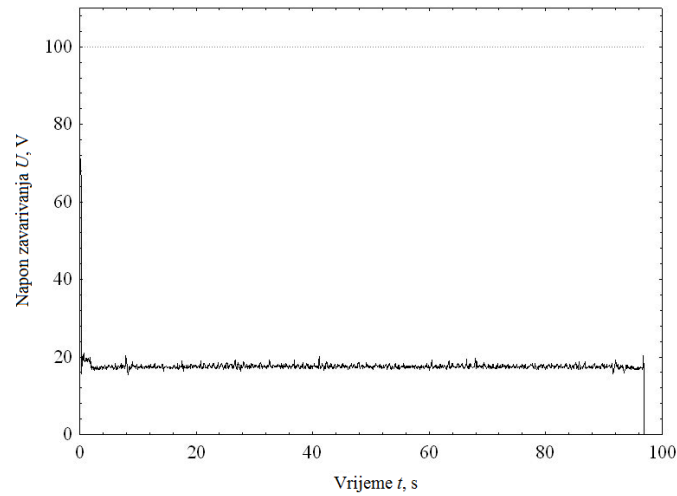
$$v = 150 \text{ mm/min, (brzina zavarivanja)}$$

$$Q_P = 15 \text{ l/min (protok zaštitnog plina) [12]}$$

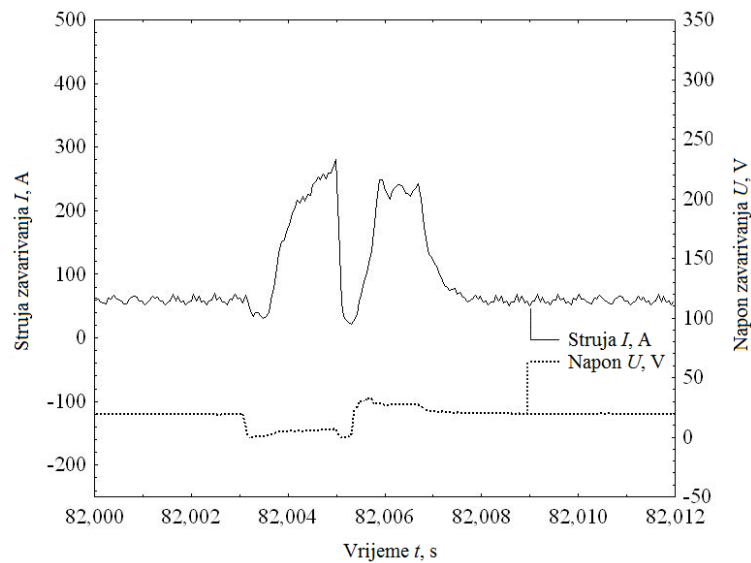
Tijekom STT postupka zavarivanja, brzina rotacije cijevi je bila konstantna, a zavarivač je održavao električni luk u području između 12 i 2 sata, zavarujući tehnikom zavarivanja silazno dolje. Tijekom postupka zavarivanja praćena je i zabilježena distribucija srednjih vrijednosti napona i jakosti struje zavarivanja, distribucija stvarnih vrijednosti napona i jakosti struje zavarivanja za proizvoljno odabrani interval zavarivanja. Frekvencija uzorkovanja iznosila je 20 kHz, za svaki kanal mjerenja. Srednja vrijednost aritmetičkih sredina napona i jakosti struje zavarivanja izračunavala se za svakih tisuću podataka. S obzirom na frekvenciju uzorkovanja, dobilo se dvadeset točaka u sekundi koje su opisivale distribuciju aritmetičkih sredina tijekom trajanja postupka zavarivanja. [12]



Slika 18. Distribucija srednjih vrijednosti struja zavarivanja tijekom postupka zavarivanja u trajanju od 97 sekundi [12]



Slika 19. Distribucija srednjih vrijednosti napona zavarivanja tijekom postupka zavarivanja u trajanju 97 sekundi [12]

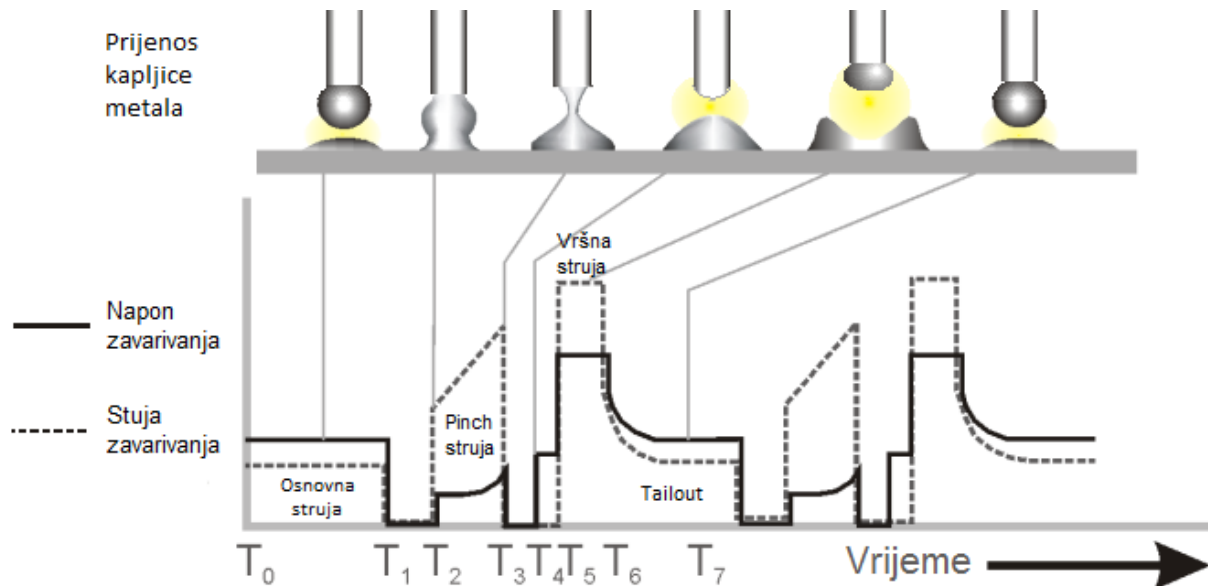


Slika 20. Distribucija stvarnih vrijednosti napona i struje zavarivanja za proizvoljno odabrani interval zavarivanja u trajanju 0,012 sekundi [12]

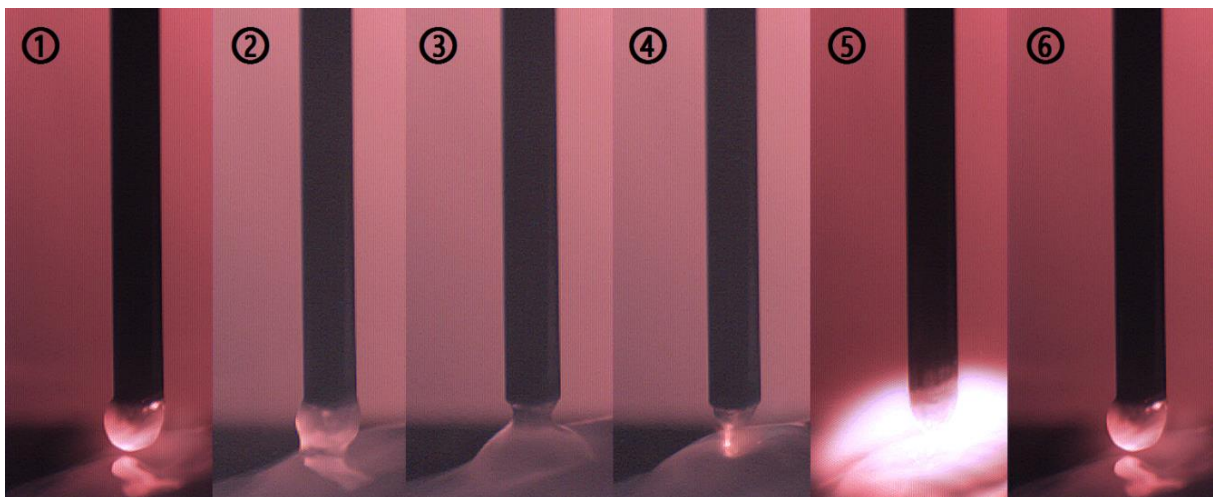
3.5. Dinamička karakteristika STT postupka zavarivanja

STT postupak zavarivanja odvija se ciklički. Ispravnim odabirom parametara zavarivanja osigurava se stabilnost električnog luka, odnosno stabilnost cjelokupnog postupka zavarivanja, te ponovljivost postupka zavarivanja. Trajanje promjene vrijednosti struje zavarivanja, ovisno o vrijednosti napona zavarivanja je reda veličine mikrosekunde.

Na slici 21. grafički je prikazana dinamička karakteristika STT postupka zavarivanja, te je shematski prikazan prijenos kapljice metala tijekom STT postupka zavarivanja. Na slici 22. je realno prikazan prijenos rastaljene kapljice metala tijekom STT postupka zavarivanja.



Slika 21. Dinamička karakteristika $U, I = f(T)$ izvora struje zavarivanja tijekom STT postupka zavarivanja [12]



Slika 22. Prijenos kapljice metala tijekom STT postupka zavarivanja [7]

- **Vremenski interval od T_0 do T_1 , ①**

Predstavlja vrijeme trajanja osnovne struje zavarivanja. Osnovna struja zavarivanja predstavlja početnu vrijednost struje zavarivanja prije uspostavljanja električnog luka, odnosno prije kratkog spoja između kapljice metala i osnovnog materijala (ili taline metala zavara). Osnovna struja zavarivanja ima stalnu vrijednost i iznosi od 50 A do 100 A. U ovom intervalu žica za zavarivanje prilazi osnovnom materijalu.

- **Vremenski interval od T_1 do T_2 , ②**

Predstavlja vrijeme potrebno za stvaranje kapljice metala. Prilikom kratkog spoja žice i osnovnog materijala, senzor za praćenje vrijednosti napona električnog luka zabilježi pad napona, te se vrijednost pozadinske struje zavarivanja smanji sa 75 A na 10 A. Trajanje promjene vrijednosti osnovne struje zavarivanja iznosi 0,75 ms. U ovom intervalu stvara se kapljica metala.

- **Vremenski interval od T_2 do T_3 , ③**

Predstavlja vrijeme potrebno za prijenos kapljice metala. Da bi se omogućio prijenos kapljice metala, mora se povećati struja zavarivanja. Kontroliranim povećanjem struje zavarivanja, prijenos kapljice metala se ubrzava. Kapljica metala se uvlači u talinu metala zavara uz pomoć djelovanja elektromagnetskih sila i sila površinske napetosti. Kod odvajanja kapljice metala dolazi do karakteristične pojave "pinch" efekta (elektromagnetske sile svojim djelovanjem uzrokuje lokalno suženje presjeka na rastaljenom vrhu žice za zavarivanje). Vrijednost napona zavarivanja nije jednaka nuli, zbog toga što se pri temperaturi taljenja metala od 1550 °C javlja velik el. otpor.

- **Vremenski interval od T_3 do T_4 , ④**

Predstavlja brzinu prekida el. luka u ovisnosti o vremenu, dv/dt (derivacija brzine promjene napona zavarivanja dv po vremenu dt), odnosno trenutak odvajanja rastaljene kapljice metala od žice. U točki T_3 kada dv/dt dostigne određenu vrijednost, struja zavarivanja se smanjuje na vrijednost od 50 A. Smanjenje struje zavarivanja na vrijednost od 50 A traje nekoliko mikrosekundi. Smanjenje struje zavarivanja se odvija prije nego što se kapljica metala potpuno odvojila od žice. Time je spriječeno naglo

odvajanje kapljice metala koje izaziva prskanje rastaljenog metala. U točki T₄ kapljica metala se odvojila od žice, ali pri manjoj struji zavarivanja.

- **Vremenski interval od T₅ do T₆, ⑤**

Predstavlja vrijeme trajanja vršne struje. Nakon prijenosa rastaljene kapljice metala u rastaljenu kupku metala, odnosno nakon odvajanja žice od rastaljene kupke metala, vrijednost struje zavarivanja se naglo povećá. Naglim povećanjem struje zavarivanja dolazi do brzog taljenja žice i nastajanja rastaljene kapljice metala.

- **Vremenski interval od T₆ do T₇, ⑥**

Predstavlja vrijeme trajanja tailouta (brzine pada struje), ujedno predstavlja završetak jednog ciklusa i početak sljedećeg ciklusa odvajanja rastaljene kapljice metala. Struja zavarivanja smanjuje se s vršne vrijednosti na početnu vrijednost osnovne struje zavarivanja. Nakon smanjenja struje zavarivanja na početnu vrijednost, ciklus odvajanja rastaljene kapljice se ponavlja. Vrijeme trajanja jednog ciklusa iznosi između 25 ms i 35 ms.

4. USPOREDBA MIG/MAG I STT POSTUPKAZAVARIVANJA

Razmatrajući prednosti i nedostatke STT postupka zavarivanja u usporedbi s MAG postupkom zavarivanja može se zaključiti da STT postupak zavarivanja ima određene prednosti primjene u odnosu na MAG postupak zavarivanja. Osnovne prednosti STT postupka zavarivanja u odnosu na MAG postupak su u poboljšanoj kvaliteti zavara, nižim operativnim troškovima, prvenstveno kroz uštedu električne energije i vremenu izvođenja postupka zavarivanja. Visoka razina kvalitete zavara može se postići u svim položajima zavarivanja, zbog preciznog upravljanja strujom zavarivanja neovisno o brzini dodavanja žice za zavarivanje tijekom cijelog postupka zavarivanja. Preciznim upravljanjem strujom zavarivanja smanjuje se prskanje rastaljenog metala. Uvjeti izvođenja postupka zavarivanja također su poboljšani, jer je smanjeno prskanja rastaljenog metala, stupanj zračenja i isijavanja električnog luka, uz manju količinu proizvedenih dimnih plinova. Time je postignuto sigurnije i zdravije okruženje za rad zavarivača, što izravno utječe na kvalitetu izvođenja postupka zavarivanja. Potrebno je napomenuti da STT postupak zavarivanja zahtijeva dodatno osposobljavanje zavarivača, te da je njegova primjena ograničena na zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu, te na zavarivanje tankostijenih limova.

Na slici 23. prikazano je prskanje rastaljenog metala tijekom STT i MIG/MAG postupka zavarivanja. Lijevo je prikazan MIG/MAG postupak zavarivanja, a desno STT postupak zavarivanja. Primjenom STT postupka zavarivanja prskanje rastaljenog metala je minimalno, a primjenom MIG/MAG postupka zavarivanja prskanje rastaljenog metala je znatno veće.



Slika 23. Prskanje rastaljenog metala kod MIG/MAG i STT postupka zavarivanja [8]

Tablica 3. Usporedba MIG/MAG postupka zavarivanja s STT Postupkom zavarivanja

| | MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA | STT POSTUPAK ZAVARIVANJA |
|---|--|--|
| Način prijenosa metala | <ul style="list-style-type: none"> prijenos metala kratkim spojevima | <ul style="list-style-type: none"> modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima, STT |
| Vrijednost napona električnog luka | od 10 V do 28 V | od 19 V do 33 V |
| Vrijednost struje zavarivanja | Od 30 A do 300 A | Dvije vrijednosti struje zavarivanja: <ul style="list-style-type: none"> Vršna struja od 0 A do 450 A Osnovna struja od 0 A do 125 A |
| Promjer žice za zavarivanje | od 0,60 mm do 1,10 mm | od 0,80 mm do 1,20 mm |
| Vrste zaštitnih plinova | <ul style="list-style-type: none"> 100 % CO₂ podržan širok raspon mješavina zaštitnih plinova | <ul style="list-style-type: none"> 100 % CO₂ podržan širok raspon mješavina zaštitnih plinova |
| Prednosti | <ul style="list-style-type: none"> Mogućnost zavarivanja u svim položajima Niža cijena opreme za zavarivanje | <ul style="list-style-type: none"> Visoka kvaliteta zavara Precizno upravljanje vrijednosti struje zavarivanja neovisno o brzini dodavanja žice za zavarivanje Najmanji unos topline tijekom postupka zavarivanja Upravljanje unosom topline tijekom postupka zavarivanja Smanjeno prskanje rastaljenog metala Smanjeno zračenje i isijavanje, uz manju količinu proizvedenih dimnih plinova Dobro kvašenje rastaljenog metala Mogućnost upotrebe različitih mješavina zaštitnih plinova |

Nastavak tablice 3.

| | MIG/MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA | STT POSTUPAK ZAVARIVANJA |
|-------------------------------------|--|--|
| Nedostaci | <ul style="list-style-type: none"> • Veće prskanje rastaljenog metala • Mogućnost pojave hladnog naljepljivanja • Zavarivanje samo tanjih materijala | <ul style="list-style-type: none"> • Visoka cijena opreme za zavarivanja • Ograničena primjena na zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu i zavarivanje tankostijenih limova • Zahtijeva dodatnu obuku zavarivača |
| Cijena opreme za zavarivanje | ~ 2.500 \$ | ~ 15.500 \$ |
| Vrste materijala | <ul style="list-style-type: none"> • Ugljični čelici • Niskolegirani čelici • Nehrđajući čelici • Duplex nehrđajući čelici • Legure nikla • Silicijska bronca • Legure bakra i cinka (Mesing) | <ul style="list-style-type: none"> • Ugljični čelici • Niskolegirani čelici • Nehrđajući čelici • Duplex nehrđajući čelici • Legure nikla • Silicijska bronca • Legure bakra i cinka (Mesing) |
| Primjena u industriji | | <ul style="list-style-type: none"> • Naftna industrija • Automobilska industrija • Brodograđevna industrija • Prehrambena industrija • Petrokemijska industrija |

5. PRIMJENA POLUAUTOMATSKOG STT POSTUPKA ZAVARIVANJA

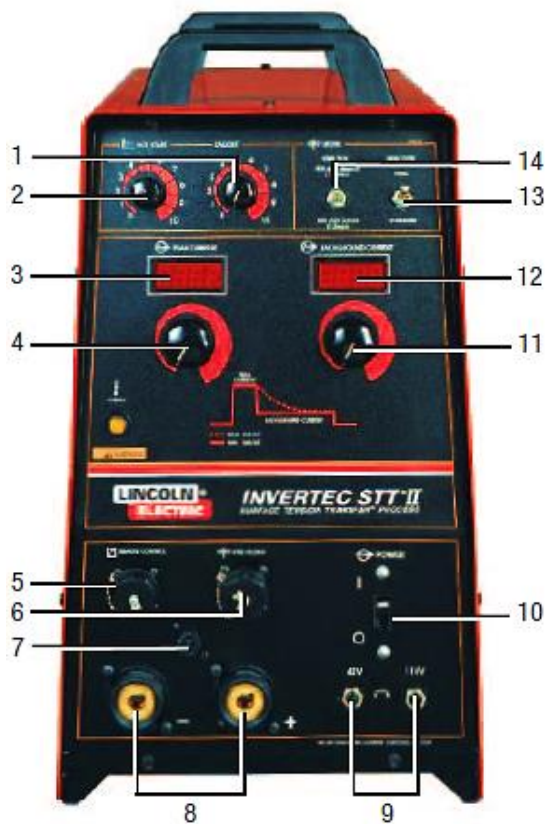
U ovom poglavlju bit će opisano zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu, pri spajanju cijevi, primjenom poluautomatskog STT postupka zavarivanja.

5.1. Priprema za zavarivanje

Prije početka postupka zavarivanja potrebno je pripremiti krajeve cijevi za zavarivanje. Priprema krajeva cijevi za zavarivanje vrši se toplinskim rezanjem i strojnom obradom. Pri upotrebi poluautomatskog STT postupka zavarivanja koristi se V (sa žlijebljenjem korijena zavara) ili Y (sa provarom korijena zavara) oblik žlijeba za zavarivanje. Preporučeni oblik i dimenzije žlijeba za zavarivanje, propisan je u uputama proizvođača uređaja za STT postupak zavarivanja. Nakon pripreme žlijeba za zavarivanje, cijevi se dovode u položaj za zavarivanje (cijevi se pozicioniraju i stežu). Položaj zavarivanja unaprijed je određen konceptom konstrukcije za zavarivanje, a STT postupak zavarivanja moguće je primijeniti u svim položajima zavarivanja. Nakon što su cijevi dovedene u položaj za zavarivanje, odabiremo parametre zavarivanja. Parametri zavarivanja se odabiru i usklađuju prema uputama proizvođača uređaja za STT postupak zavarivanja, ili se pronalaze iskustvena rješenja za pojedine situacije nastale tijekom postupka zavarivanja. Nakon odabira parametara zavarivanja, potrebno ih je podesiti na opremi za zavarivanje. Parametri zavarivanja koje je potrebno podesiti su slijedeći:

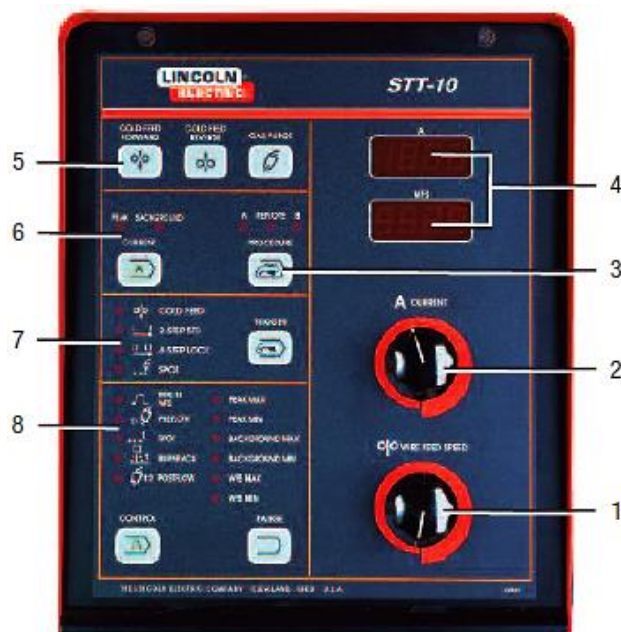
- Vršna struja zavarivanja
- Pozadinska struja zavarivanja
- Vrući start
- Tailout
- Vrsta i promjer žice za zavarivanje
- Brzina dodavanja žice
- Duljina slobodnog kraja žice
- Protok zaštitnog plina

Nakon podešavanja parametara zavarivanja, započinjemo s postupkom zavarivanja cijevi.



1. Potencijometar za upravljanje vrijednošću tailouta
2. Potencijometar za upravljanje vrijednošću toplog starta
3. Pokazivač vrijednosti vršne struje
4. Potencijometar za upravljanje vrijednošću vršne struje
5. Utičnica za daljinsko upravljanje vrijednostima struja zavarivanja
6. Utičnica za upravljanje dodavačem žice
7. Utičnica za spajanje senzora el. luka
8. Utičnice za spajanje izlaznih stezaljki
9. Automatski osigurači napajanja
10. Prekidač napajanja
11. Potencijometar za upravljanje vrijednošću pozadinske struje
12. Pokazivač vrijednosti pozadinske struje
13. Prekidač za odabir tipa žice za zavarivanje
14. Prekidač za odabir promjera žice za zavarivanje

Slika 24. Upravljanje izvorom struje zavarivanja za STT postupak zavarivanja; LINCOLN ELECTRIC INVERTEC STT II [8]



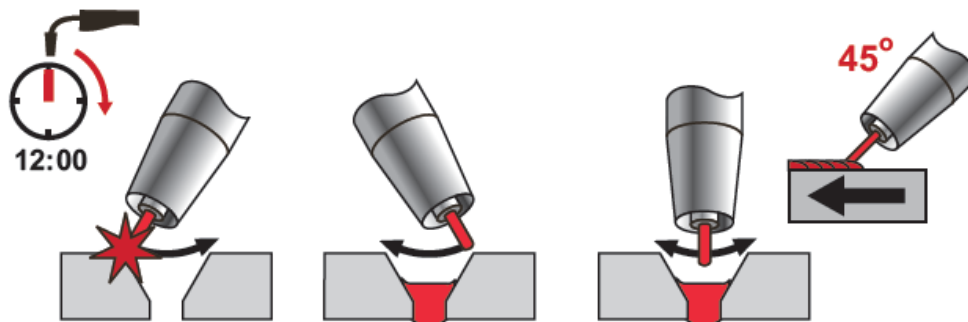
1. Potencijometar za upravljanje brzinom dodavanja žice za zavarivanje
2. Potencijometar za upravljanje vrijednošću odabrane struje zavarivanja
3. Odabir postupka zavarivanja
4. Pokazivači vrijednosti struje zavarivanja i brzine dodavanja žice za zavarivanje
5. Upravljanje brzinom dodavanja hladne žice za zavarivanje
6. Upravljanje vrijednošću vršne ili pozadinske struje
7. Odabir načina rada okidača pištolja za zavarivanje
8. Upravljanje vrijednošću tailouta ili toplog starta

Slika 25. Upravljanje dodavačem žice za zavarivanje; LINCOLN ELECTRIC INVERTEC STT 10 [8]

5.2. Opis postupka zavarivanja

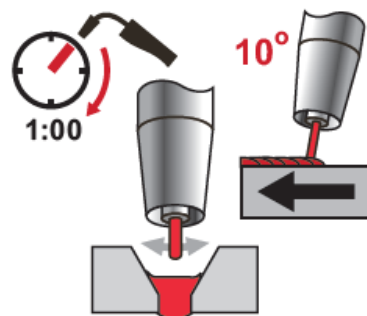
Primjer zavarivanja cijevi u položaju zavarivanja PJ, Y oblika žlijeba za zavarivanje.

Pistolj za zavarivanje postavljamo se na poziciju 12 sati, i držimo pod kutom od 45° suprotno od smjera zavarivanja. El. luk uspostavlja se dodiranjem slobodnog kraja žice za zavarivanje sa bočnom stranom žlijeba za zavarivanje. Nakon uspostave el. luka i stvaranja ustaljene kupke rastaljenog metala, održavamo el. luk ispred kupke rastaljenog metala pomicanjem pištolja za zavarivanje, pokretom oblika blagog polumjeseca, prema drugoj strani žlijeba za zavarivanje, prelazeći preko korijena žlijeba za zavarivanje. Zatim, pištolj za zavarivanje pomičemo nazad preko korijena žlijeba za zavarivanje, sa stalno uronjenim slobodnim krajem žice za zavarivanje u kupku rastaljenog metala. Prateći korijen žlijeba za zavarivanje, silazno pomičemo pištolj za zavarivanje do pozicije 1 sat., održavajući pokret oblika blagog polumjeseca (njihanje), prelazeći s lijeva na desno i obrnuto preko korijena žlijeba za zavarivanja.



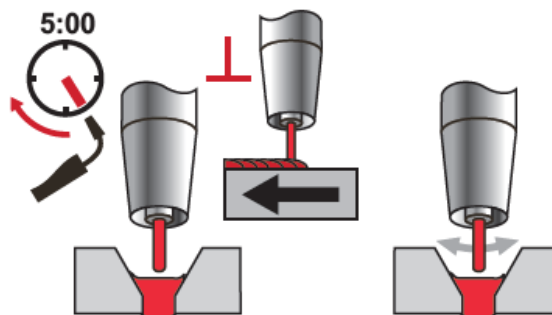
Slika 26. Uspostava električnog luka, zavarivanje od pozicije 12 sati do pozicije 1 sat [15]

Na poziciji 1 sat, prestajemo sa njihanjem pištolja za zavarivanje naprijed nazad, te dalje zavarujemo do pozicije 5 sati. Zavarujemo silaznim pomicanjem pištolja za zavarivanje kroz sredinu korijena žlijeba za zavarivanje, održavajući el. luk ispred kupke rastaljenog metala, držeći pištolj za zavarivanje pod kutom od 10° suprotno od smjera zavarivanja.



Slika 27. Zavarivanje od pozicije 1 sat do pozicije 5 sati [15]

Na poziciji 5 sati pištolj za zavarivanje postavljamo okomito u odnosu na smjer zavarivanja, te dalje zavarujemo do pozicije 6 sati. Ovisno o dimenzijama korijena žlijeba za zavarivanje, potrebno je ponovno njihanje pištolja za zavarivanje.



Slika 28. Zavarivanje od pozicije 5 sati do pozicije 6 sati [15]

Na poziciji 6 sati prestajemo sa zavarivanjem korijena žlijeba za zavarivanje, prekidajući el. luk na bočnoj strani žlijeba za zavarivanje, odvajanjem slobodnog kraja žice za zavarivanje od bočne strane žlijeba za zavarivanje.



Slika 29. Prekid električnog luka, završetak zavarivanja na poziciji 6 sati [15]

6. ZAKLJUČAK

STT postupak zavarivanja je suvremen visokoučinski postupak zavarivanja. U usporedbi s konvencionalnim MIG/MAG postupkom zavarivanja, glavna prednost primjene STT postupka zavarivanja je u najmanjem unosu topline tijekom postupka zavarivanja. Primjenom STT postupka zavarivanja može se postići visoka kvaliteta zavara u svim položajima zavarivanja, dozvoljene su veće i nejednolike zračnosti u korijenu zavara, niži su operativni troškovi, te su poboljšani uvjeti izvođenja postupka zavarivanja, čime se postiže sigurnije i zdravije okruženje za rad zavarivača. Zbog navedenih prednosti STT postupak zavarivanja svakako ima prednosti nad konvencionalnim MIG/MAG postupkom zavarivanja, ali je potrebno napomenuti da STT postupak zavarivanja zahtjeva dodatno osposobljavanje zavarivača. Također tehnološka primjena STT postupka zavarivanja dolazi do potpunog izražaja u kombinaciji s drugim visokoučinskim postupcima zavarivanja. STT postupak zavarivanja ima ograničenu primjenu, te se primjenjuje za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu, te za zavarivanje tankostijenih limova. U posljednje vrijeme STT postupak zavarivanja najčešće se primjenjuje kod spajanja (zavarivanja) cjevovoda u naftnoj industriji.

LITERATURA

- [1] http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt
(15.10.2016)
- [2] Kralj, Slobodan; Andrić, Šimun: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, str. 133 – 161, Zagreb, 1992.
- [3] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarcl-56/c4200.pdf (15.10.2016)
- [4] Jurica, Maja: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [5] Kolednjak, Davor: Utjecaj parametara zavarivanja na strukturu i svojstva čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [6] Lukeš, Jelena; Pavletić, Duško; Majurec, Ivan: Zavarivanje cijevi STT postupkom zavarivanja, Engineering review 25, str. 37 – 48, Sveučilište u Rijeci, 2005.
- [7] <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf> (31.10.2016)
- [8] <http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/k1525-1/e452.pdf>
(31.10.2016)
- [9] [http://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/Pages/product.aspx?product=k1525-1\(lincolnelectric\)](http://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/Pages/product.aspx?product=k1525-1(lincolnelectric)) (02.11.2016)
- [10] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465220879-0-strojviiopremazazavarivanje_prirucnik_rev.2016_final.pdf (03.11.2016)
- [11] <https://www.lincolnelectric.com/assets/servicenavigator-public/lincoln3/IM904.pdf>
(08.11.2016)
- [12] Despotović, Božo; Samardžić Ivan; Ivan; Marsenić, Tihomir; Brechelmacher, Branimir: Neki aspekti primjene STT postupka zavarivanja u kotlogradnji, 3rd International Conference, Mechanization, Automation And Robotization in Welding and Allied Processes, Zadar, 2005.
- [13] Siewert, Thomas; Samardžić, Ivan; Kolumbić, Zvonimir; Klarić, Štefanija: On-line monitoring system – an application for monitoring key welding parameters of different welding processes, Tehnički Vjesnik 15, str. 9 – 18, Sveučilište u Osijeku, 2008.

[14] Deruntz, Bruce: Assessing the Benefits of Surface Tension Transfer Welding to Industry, *Industrial Technology*, Volume 19, Number 4, 2003.

[15] <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/te12014.pdf> (17.11.2016.)

PRILOG

I. CD-R disk