

Primjeri modificiranih i visokoučinskih postupaka zavarivanja

Sermek, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:659566>

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

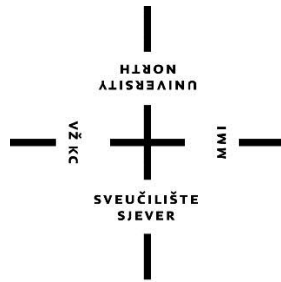
Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





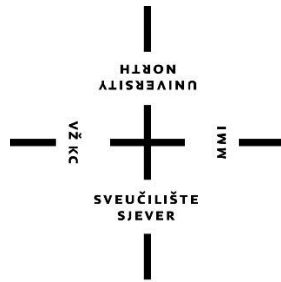
**Sveučilište
Sjever**

Završni rad br. 301/PS/2019

**Primjeri modificiranih i visokoučinskih postupaka
zavarivanja**

Marko Sermek, 1515/336

Varaždin, rujan 2019. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 301/PS/2019

Primjeri modificiranih i visokoučinskih postupaka zavarivanja

Student

Marko Sermek, 1515/336

Mentor

Marko Horvat, dipl.ing.stro.

Varaždin, rujan 2019. godine

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Marko Sermek

MATIČNI BROJ 1515/336

DATUM 16.09.2019.

KOLEGIJ Tehnologija III

NASLOV RADA Primjeri modificiranih i visokoučinskih postupaka zavarivanja

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Examples of modified and high-performance welding processes

MENTOR Marko Horvat, dipl. ing.

ZVANJE predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. dr. sc. Zlatko Botak, viši predavač
2. Marko Horvat, dipl.ing., predavač
3. Katarina Pisačić, dipl.ing., viši predavač
4. Veljko Kondić, mag. ing. mech., predavač
- 5.

Zadatak završnog rada

BROJ 301/PS/2019

OPIS

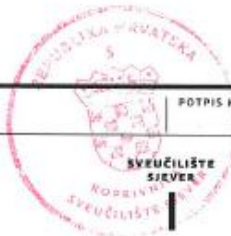
U Završnom radu je potrebno obraditi sljedeća područja:

- navesti ulogu i povijest zavarivanja kao tehnologije spajanja materijala
- prikazati razloge i važnost razvoja modificiranih i visokoučinskih postupaka zavarivanja
- prikazati značajne postupke zavarivanja kroz teorijske osnove
- za odabrane konvencionalne postupke zavarivanja prikazati njihove modificirane ili visokoučinkovite izvedbe
- u zaključku dati osvrt na temu Završnog rada

ZADATAK URUČEN

17.09.2019

POTPIS MENTORA



Predgovor

Zahvaljujem se mentoru dipl.ing.stro. Marku Horvatu na iskazanom povjerenju, vodstvu i korisnim diskusijama tijekom izrade ovog rada.

Također bih se zahvalio svojoj obitelji i djevojci Klari na strpljenju i moralnoj podršci koje su mi ukazali tokom studija.

Sažetak

Uz sve veću primjenu materijala visokih performansi u proizvodnji i njihov nagli razvoj, od velikog je značaja istraživanje i razvoj naprednih postupaka zavarivanja s karakteristikama visoke učinkovitosti, visoke produktivnosti, visoke kvalitete, niske cijene i zaštite okoliša. U ovom radu su navedeni i opisani modificirani i visokoučinski postupci zavarivanja koji zadovoljavaju gore navedene zahtjeve. Opisane su glavne značajke i karakteristike MIG/MAG i TIG postupka zavarivanja i njihove modificirane varijante, plazma zavarivanja i laserskog zavarivanja.

Ključne riječi: modificirani MIG/MAG i TIG postupci zavarivanja, visokoučinski postupci zavarivanja, plazma zavarivanje, lasersko zavarivanje

Summary

With the increasing use of high performance materials in production and their rapid development, research and development of advanced welding processes with the characteristics of high efficiency, high productivity, high quality, low cost and environmental protection is of great importance. This paper describes modified and high-performance welding processes that satisfy the above listed requirements. The main features and characteristics of the MIG/MAG and TIG welding process and their modified variants, plasma welding and laser welding are listed and described.

Keywords: modified MIG / MAG and TIG welding processes, high-efficiency welding processes, plasma welding, laser weld

Pregled korištenih oznaka i kratica

Oznaka	Opis	Jedinica
d	debljina materijala	mm
m	masa	kg
ρ	gustoća	kg/m ³
ρ_e	gustoća energije	KW/cm ²
I_z	jakost struje zavarivanja	A
U	napon	V
Q	protok	m ³ /s
v_z	brzina zavarivanja	mm/min
t_z	vrijeme zavarivanja	s
Q	ukupna toplina	kJ/mm
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina	
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljenjem u aktivnom zaštitnom plinu	
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina	
TIP	Tehnologija inženjera Placha	
REL	Ručni elektrolučni postupak zavarivanja	
STT	Surface Tension Transfer postupak zavarivanja	
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom	
AVC	Automatska kontrola napona	
PAW	Plazma zavarivanje	
Al	Aluminij	
Cu	Bakar	
Ni	Nikal	
C	Ugljik	
O	Kisik	
Ti	Titan	
Ar	Argon	
He	Helij	
Cr	Krom	
Si	Silicij	

Sadržaj

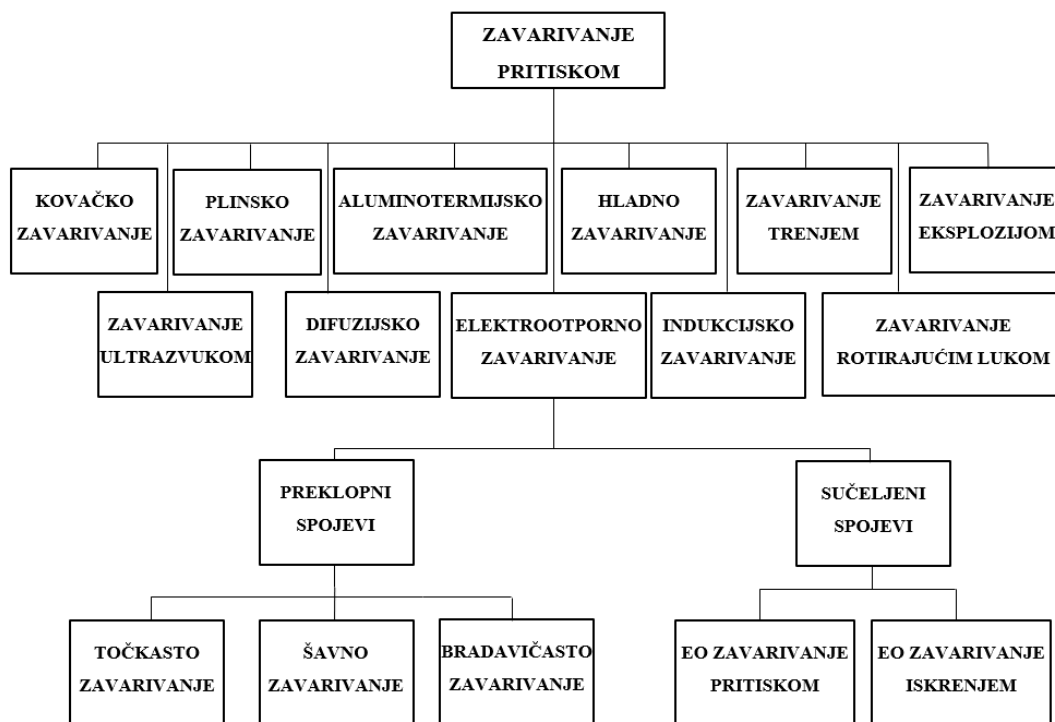
1.	Uvod.....	7
2.	Povijest zavarivanja	9
3.	Modificirani i visokoučinski postupci zavarivanja	10
4.	MIG/MAG postupak zavarivanja	12
4.1.	Prijenos metala kratkim spojevima	14
4.2.	Prijenos metala štrcajućim lukom	16
4.3.	Prijenos metala mješovitim lukom	17
4.4.	Prijenos metala pulsirajućim lukom	18
4.5.	Prijenos metala strujama visoke gustoće.....	19
5.	Modificirani postupci kod MIG/MAG zavarivanja	22
5.1.	STT (Surface Tension Transfer) postupak	22
5.2.	FastROOT postupak zavarivanja	25
5.3.	CMT postupak zavarivanja	27
5.4.	RMT postupak zavarivanja	28
5.5.	AC MIG.....	29
5.6.	MAG ForceArc	29
5.7.	„D-Arc“ postupak zavarivanja	31
5.8.	Tandem zavarivanje	33
6.	TIG postupak zavarivanja	36
7.	Modificirani postupci TIG zavarivanja.....	40
7.1.	Automatizirano TIP TIG zavarivanje.....	40
7.2.	TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom A-TIG	42
7.3.	K-TIG - visoko penetracijski postupak	45
7.4.	Orbitalno TIG zavarivanje.....	46
8.	Plazma zavarivanje	51
8.1.	„Keyhole“ plazma zavarivanje.....	54
9.	Lasersko zavarivanje.....	60
9.1.	Laser MIG „hybrid“ zavarivanje.....	61
10.	Zaključak.....	64
11.	Literatura.....	65
	Popis slika	68

1. Uvod

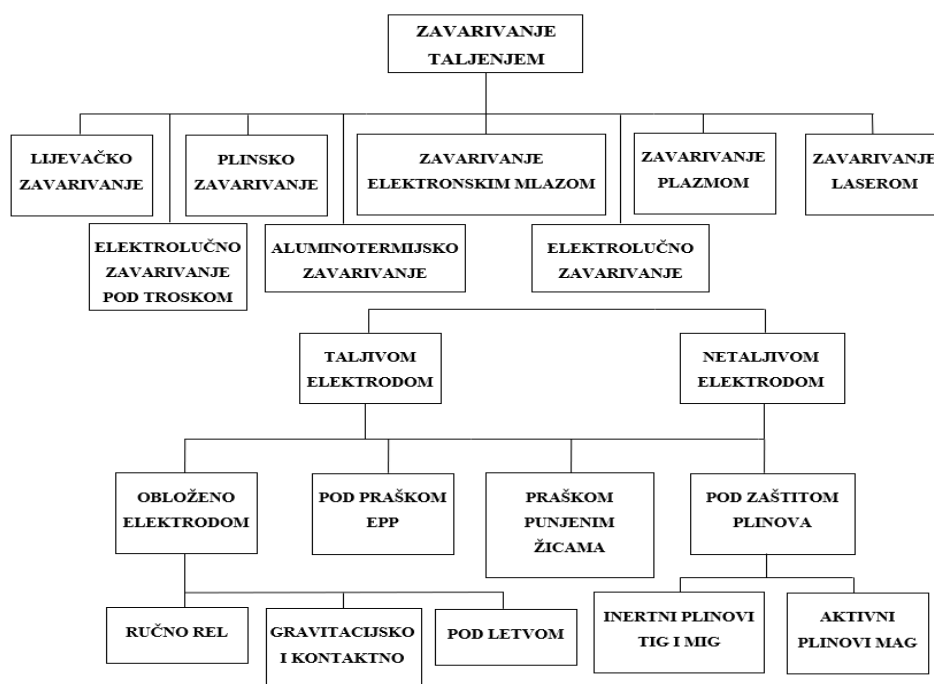
Zavarivanje je postupak spajanja materijala pri kojem se dijelovi koje treba spojiti zavarivanjem (zavarivani dijelovi) na spojnom mjestu obično zagriju do omekšalog, plastičnog stanja ili se rastale, a spajaju se staljivanjem, uz dodavanje ili bez dodavanja materijala. Zavareni spoj sastoji se od zavara (dio materijala koji je prilikom zavarivanja bio rastaljen) i susjedne zone u kojoj zbog povišene temperature nastaju strukturne promjene. Kvaliteta i svojstvo zavarenoga spoja ovise o brzini zavarivanja, količini i gibanju taline, miješanju osnovnoga i dodatnoga materijala, plinovima koji pri višim temperaturama ulaze u rastaljeni materijal, raspodjeli temperature na mjestu zavarivanja i dr.[1]

Prema načinu spajanja metode zavarivanja se dijele u dvije velike grupe:[2]

- Zavarivanje taljenjem, zavarivanje materijala u rastaljenom stanju na mjestu spoja, uz dodatni materijal ili bez njega.
- Zavarivanje pritiskom, zavarivanje materijala u čvrstom ili omekšanom stanju na mjestu spoja s pomoću pritiska ili udara.



Slika 1.1. Podjela postupka zavarivanja pritiskom.[2]



Slika 1.2. Podjela postupka zavarivanja taljenjem.[2]

Prednosti zavarivanja su mogućnost izrade lakših konstrukcija od lijevanih i zakovanih te uštede koje se mogu postići smanjenjem mase materijala ili utroška goriva. Novi izvori energije, kao što su elektronski snop i laser, ubrzali su razvoj novih postupaka zavarivanja i omogućili zavarivanje dosad nezavarljivih materijala.[1]

Prilikom projektiranja zavarenih konstrukcija pred tehnologa zavarivanja se postavljaju različiti kriteriji. Neki od bitnijih zahtjeva su kvaliteta i pouzdanost (sigurnost) zavarenih spojeva na konstrukciji, minimalni troškovi izrade, minimalan utrošak materijala i energije te minimalno onečišćenje ljudske okoline. Jedan od načina kako zadovoljit ove zahtjeve je upotrebom visokoučinskih i modificiranih postupaka zavarivanja. O ovom radu spomenuti su neki od ovih postupaka koji su zanimljivi sa stajališta povećanja produktivnosti, količine depozita i smanjenja troškova i vremena izrade zavarenih proizvoda.[3]

Da bi se postigli navedeni zahtjevi za zavareni spoj, potrebno je:[3]

- primjeniti modernu opremu za zavarivanje (invertori, impulsne struje zavarivanja, naprave, mehanizacija, automatizacija i robotizacija zavarivanja, ...),
- osigurati visoku ponovljivost zavarivanja,
- koristiti suvremene metode i opremu za kontrolu metodama sa i bez razaranja,
- primjeniti suvremene materijale za gradnju lakših, trajnijih, ekonomičnijih i pouzdanijih zavarenih konstrukcija.

2. Povijest zavarivanja

Povijest spajanja metala započela je u brončanom i željeznom dobu, na području današnje Europe i Bliskog istoka. Razvilo se kao sastavni dio vještina kovača, zlatara i ljevača pri izradi oruđa za rad, oružja, posuda, nakita i građevina. Jedan od najstarijih načina zavarivanja je kovačko zavarivanje gdje su se na mač od niskougličnog čelika kovački zavarile oštrice od visokougličnog čelika (1,0 – 2,1 %C) čime je postignuta bolja kvaliteta, trajnost, tvrdoća i čvrstoća mača. Zavarivanje i srodni postupci doživjeli su nagli razvoj tek u posljednjih stotinjak godina kada se kao izvor topline počeo primjenjivati električni luk.[5]

U prvoj polovici 20. stoljeća, usporedno s razvojem industrije, tehnologija zavarivanja intenzivno se razvila i koristila u brodogradnji, mostogradnji, vojnoj industriji, građevinarstvu i energetici. Razvijali su se mnogobrojni postupci zavarivanja, od kojih su najvažniji postupci elektrolučnoga zavarivanja pod zaštitnim praškom (EPP zavarivanje), netaljivom elektrodom u zaštiti inertnoga plina (TIG zavarivanje), taljivom žicom u atmosferi inertnoga plina (MIG zavarivanje) te postupak elektrolučnoga zavarivanja koji umjesto inertnoga plina rabi aktivni ugljikov dioksid (MAG zavarivanje). U drugoj polovici 20. stoljeća razvijeni su i unaprijeđeni mnogobrojni postupci poput plazma zavarivanja i rezanja, zavarivanja elektronskim snopom, zavarivanja i rezanja laserima, rotacijskoga zavarivanja trenjem i dr.[4]

Razvoj računalne i digitalne tehnike intenzivno djeluje i na razvoj opreme za zavarivanje. Razvija se računalno upravljana digitalna oprema programirana za zavarivanje najrazličitijih zavarenih spojeva nužnih za pojedina specifična područja proizvodnje. Otvorene su nove mogućnosti kombiniranja različitih postupaka zavarivanja (tzv. hibridni postupci), a postignuto je i donedavno neostvarivo upravljanje parametrima zavarivanja i fizikalnim silama koje djeluju u električnome luku i upravljaju prijenosom metalnih kapljica.[4]

Iako je razvijen velik broj postupaka zavarivanja, danas se u najvećoj mjeri koriste REL (ručno elektrolučno zavarivanje taljivim elektrodama), MIG/MAG (zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova ili mješavina plinova), TIG (zavarivanje netaljivom elektrodom volframa u zaštitnoj atmosferi argona ili helija), EPP (zavarivanje pod praškom) i EO (elektrootporno zavarivanje). Ostali postupci zavarivanja se koriste u manjoj mjeri i za specifične uvjete zavarivanja. Gore navedeni postupci se i dalje razvijaju kako bi pridonjeli da zavar bude kvalitetniji, jeftiniji, brže napravljen, sigurniji i pouzdaniji.[5]

3. Modificirani i visokoučinski postupci zavarivanja

U proteklih desetak godina kontinuirano se na tržištu i u industrijskoj primjeni javljaju „novi“ postupci zavarivanja koji su nastali na temelju sljedećih zahtjeva:[6]

- povećanje produktivnosti,
- zavarivanje specifičnih vrsta materijala (visokočvrsti čelici, dupleks čelici, pocinčani limovi itd.),
- smanjenje deformacija,
- kontrolirani unos topline,
- bolja mehanička svojstva zavarenog spoja,
- korozijska postojanost zavarenog spoja,
- smanjenje prskanja,
- povezivanje s robotskim stanicama.

Ovi zahtjevi rezultirali su pojavom više varijanti MIG/MAG i TIG zavarivanja, koji se vrlo često deklariraju kao posebni postupci zavarivanja iako se u osnovi radi o modificiranim inačicama konvencionalnog zavarivanja. Kako bi se ispunili navedeni zahtjevi sve više se razvijaju i primjenjuju tehnologije plazma i laserskog zavarivanja.[6]

Novim izvorima struje i razvojem opreme omogućena su razna poboljšanja MIG/MAG postupka zavarivanja zbog mogućnosti vrlo preciznog i detaljnog upravljanja prijenosom metala u električnom luku. Ovi suvremeni postupci koriste se modificiranim načinima prijenosa metala u području niskog unosa topline kod kojih je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući luk i impulsna struja. Modifikacija prijenosa metala postiže se kontinuiranim upravljanjem i regulacijom struje, napona zavarivanja, samom indirektnom kontrolom drugih sila koje sudjeluju u prijenosu, kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u jednom ciklusu i uvođenjem mehaničkog upravljanja odvajanjem same kapljice. Razvojem digitalne tehnologije omogućena je kontrola ovih parametara u svakom trenutku.[6,7]

TIG postupak zavarivanja doživljava stalne napretke na način da su razvijeni uređaji samo za ovaj postupak koji imaju mogućnost kontrole impulsa struje. Razvijeni su sustavi hlađenja na bazi vode i zraka za gorionike. Legirni aktivni elementi koji se dodaju elektrodi povećavaju emisivnost što utječe povoljno na uspostavljanje luka, stabilnost luka i vijek elektrode. Razvijaju se i plinovi za zavarivanje kojima se poboljšavaju performanse zavarivanja. Koriste se aktivatori i praškom

punjene žice kao dodatni materijali kojima se povećava penetracija kod zavarivanja i olakšava sam postupak zavarivanja. Razvoj ovog postupka zavarivanja orijentiran je u pravcu razvoja automatske kontrole, opreme, parametara, kvalitete zavara, sigurnosnih zahtjeva i dr.[8]

Plazma postupak zavarivanja razvio se iz TIG zavarivanja te na neki način predstavlja njegov visokoučinski razvoj. Ovaj postupak zavarivanja pogodan je za automatizaciju i robotizaciju zbog svog velikog područja rada. Razvojem modernih izvora struje i opreme korištene kod plazma zavarivanja ovaj proces se može automatizirati te time bitno utjecati na produktivnost i samu kvalitetu zavarenog spoja.[8]

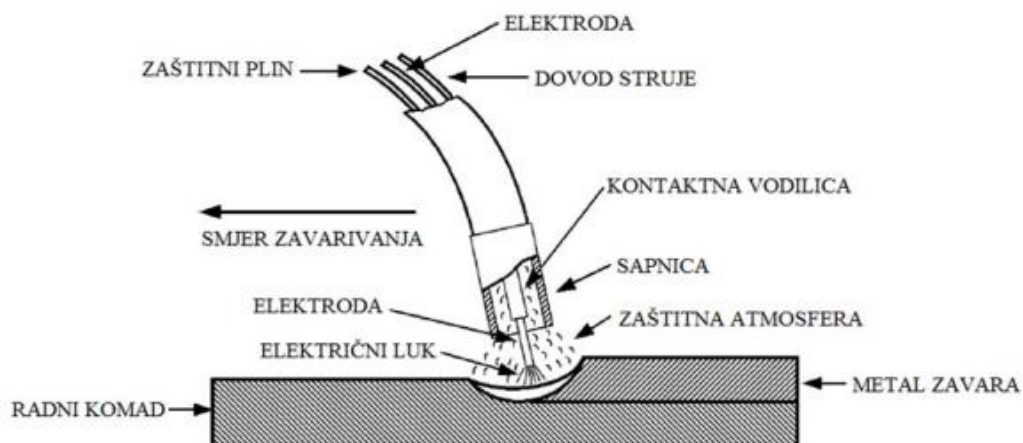
Lasersko zavarivanje u industrijskoj proizvodnji u stalnom je porastu. U gotovo svim granama industrije, od mikroelektronike do brodogradnje, a posebno u automobilskoj industriji gdje se mogu iskoristiti glavne prednosti ove tehnologije poput velike brzine zavarivanja, visoke kvalitete spoja, malog unosa topline, malih deformacija i visoke fleksibilnosti. Glavni nedostaci poput visokih investicijskih troškova i povećanih troškova pripreme spoja mogu se nadoknaditi velikom brzinom zavarivanja i nepotrebnom naknadnom obradom spoja.[9]

4. MIG/MAG postupak zavarivanja

MIG/MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. Električni luk se uspostavlja između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice i radnog komada, koja je u pravilu spojena na plus pol istosmjernog izvora struje za zavarivanje. Proces zavarivanja odvija se u zaštitnoj atmosferi plinova koju osiguravaju inertni plinovi Ar i He (MIG proces) ili aktivni plin CO_2 i plinske mješavine (MAG postupak). Ovaj je postupak zavarivanja prvenstveno bio namijenjen za zavarivanje aluminijskih legura na bazi aluminijskih te ostalih obojenih metala, no razvojem aktivnih plinova i mješavina plinova koje su znatno smanjile cijenu zavarivanja, omogućena je sve veća primjena kod zavarivanja čelika. [10,11]

Razvoj ovog postupka zavarivanja povezan je sa razvojem izvora struja za zavarivanje i plinskih mješavina koje direktno utječu na prijenos metala i na konačan oblik zavarenog spoja. Mogućnost podešavanja većeg broja parametara, uz uvjet pravilnog odabira, omogućava razvoj novih poboljšanja ovog postupka čiji je cilj veća kvaliteta zavarenog spoja, visoka produktivnost i ekonomičnost. Sam razvoj ovog postupka potaknut je zbog veće brzine zavarivanja, veće količine rastaljenog materijala u jedinici vremena, jednostavnog rukovanja ili automatizacije, zbog čega je i danas jedan od najčešće korištenih postupaka u zavarivačkoj industriji. [10]

Prijenos metala s elektrode (žice) u talinu na radnom komadu obavlja se diskretnim komadićima metala ili metalnim kapljicama. Sam prijenos odvija se na način da se rastaljene kapljice s vrha elektrode slobodnim letom kroz električni luk prenesu na osnovni materijal ili na način da metalna kapljica dođe u fizički kontakt s osnovnim materijalom (radnim komadom) prilikom čega nastaje kratki spoj. Prijenos se može izvesti i na kombinirani način, odnosno da se dio metala prenese na jedan način, a dio metala na drugi način. [11]



Slika 4.1. Shema MIG/MAG postupka zavarivanja. [7]

Prednosti MIG/MAG postupka zavarivanja su:[7]

- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina, ali i vrsta,
- jednostavna i lako dostupna oprema za zavarivanje,
- zavarivanje u svim položajima,
- visoka iskoristivost dodatnog materijala,
- visoka učinkovitost postupka zavarivanja u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima,
- odličan izgled zavarenih spojeva,
- relativno jednostavna obuka zavarivača,
- manji utjecaj operatera (zavarivača) na proces zavarivanja,
- manji unos topline u usporedbi s drugim zavarivačkim postupcima,
- stvaranje manje količine zavarivačkih plinova u usporedbi s REL postupkom,
- lako i brzo čišćenje zavarenih spojeva, minimalno prskanje,
- nizak unos vodika u metal zavara,
- manja deformacija osnovnih materijala u slučajevima primjene suvremenih MIG/MAG postupaka,
- jednostavna automatizacija procesa,
- niža cijena dodatnih materijala i općenito niža cijena zavara po jedinici dužine u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima,
- mogućnost primjene različitih plinski mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjene žice,
- mogućnost primjene i za lemljenje.

Nedostatci MIG/MAG postupka zavarivanja su:[7]

- manji toplinski input kod prijenosa metala kratkim spojevima - zavarivanje samo tanjih materijala,
- veći toplinski input kod prijenosa metala štrcajućim lukom - zavarivanje samo debljih materijala,

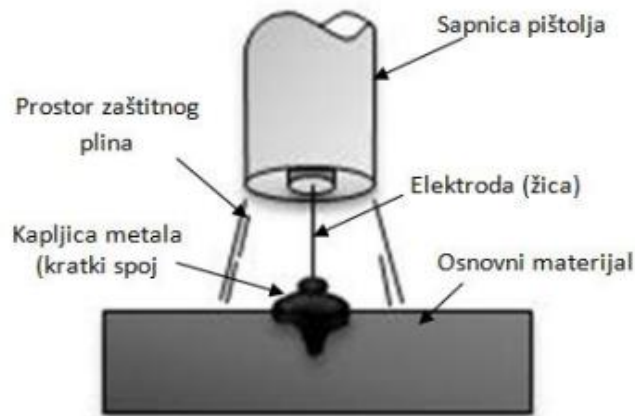
- nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom,
- potreba za primjenom skupljih zaštitnih plinova kod prijenosa metala štrcajućim lukom (mješavine zaštitnih plinova na bazi Ar, osjetno su skuplje od čistog CO₂),
- mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima kod terenskih radova zbog vanjskih utjecaja,
- problemi kod dovođenja dodatnog materijala (žice) kod zavarivanja aluminijskih legura,
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja,
- prskanje kod prijenosa metala kratkim spojevima, gubitak istog i potreba za dodatnim čišćenjem,
- opasnost od grešaka u početku zavarivanja,

Upravo način prijenosa metala (prijenos rastaljene kapljice u talinu radnog komada) koji dijelimo na prienos metala kratkim spojevima, prienos štrcajućim lukom, prienos mješovitim lukom i prienos impulsnim lukom te razvoj izvora struje za zavarivanje omogućava modifikaciju konvencionalnog postupka zavarivanja u svrhu bolje kvalitete zavarenih spojeva, veće produktivnosti i optimizacije troškova.[10]

4.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima jest postupak kod kojeg kontinuirano dovođena puna ili praškom punjena žica stvara metal zavara uslijed uspostave kontinuiranih kratkih spojeva. Kod ovog načina prijenosa metala, ovisno o promjeru žice, kratki spojevi se ostvaruju upotrebom malih jačina struje (od 50 A do 170 A) i niskih napona (od 13 V do 21 V). Sav prienos materijala odvija se kod fizičkog kontakta elektrode i osnovnog materijala. Tad nastaje kratki spoj, uslijed čega dolazi do prekida luka, napon trenutačno pada na nulu, a jakost struje se naglo povećava. Presjek žice se smanji, kapljica se otkida i ponovno se uspostavlja električni luk. Kod ovog načina prijenosa metala unos topline na mjesto zavara je najmanji u odnosu na ostale konvencionalne postupke. Proces prijenosa metala najviše ovisi o promjeru žice (dodatnog materijala), vrsti zaštitnog plina te osnovnim parametrima zavarivanja, a događa se između 20 i 200 puta u sekundi. [11,12,13]

Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spajanja i fazu električnog luka. U prvoj fazi, u kojoj dolazi do odvajanja kapljice, se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile koja pritiska kapljicu taline i vrh žice, a javlja se na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja. Takvu pojavu nazivamo „pinch effect“.[12]



Slika 4.1.1. Shema prijenosa metala kratkim spojem.[11]

Ovakav način prijenosa metala pogodan je za spajanje tankih limova jer se dobivaju zavari malog presjeka koji se brzo hlade. Također se koristi i za spajanje korijena zavora kod debljih materijala i spojeve kod kojih se zahtijeva što manja deformacija.[7]

Prednosti prijenosa metala kratkim spojem su:[7]

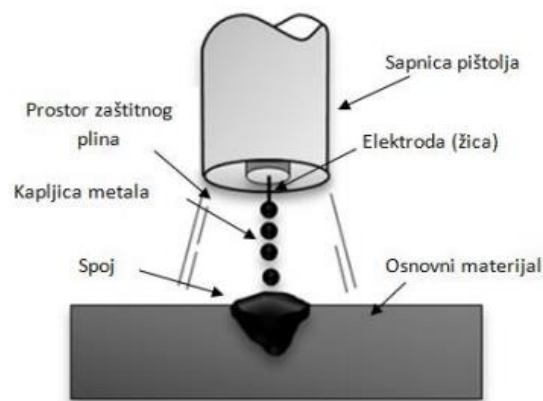
- primjena u svim zavarivačkim položajima,
- primjena na cijevnim pozicijama,
- manje deformacije uslijed manjeg unosa topline,
- jednostavno rukovanje,
- iskoristivost elektrode 90% i više.

Nedostatci prijenosa metala kratkim spojem su:[7]

- ograničenje primjene postupka radi debljine materijala,
- ograničenje primjene postupka radi pripreme spoja,
- lošija mogućnost kontrole procesa,
- povećana mogućnost gubitka zaštitnog plina, vanjski utjecaji (rad na otvorenom).

4.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

Osnovna karakteristika prijenosa metala štrcajućim lukom je da se prijenos metala (rastaljene kapljice) s vrha elektrode odvija slobodnim letom kroz atmosferu električnog luka. Prijenos metala karakterizira tanki mlaz sitnih kapljica metala pri čemu elektroda ni u jednom trenutku ne dolazi u dodir s talinom. Ovim postupkom se prijenos metala ostvaruje uz jaku struju (200-600 A) i velike napone (25-40 V) električnog luka što rezultira velikom penetracijom i unosom topline. Povećanje jakosti struje rezultira većim zagrijavanjem i povećanjem "pinch-efekta", odnosno dolazi do smanjenje sila koje nepovoljno djeluju na odvajanje rastaljenih kapljica (sile površinske napetosti, reaktivne sile itd.). Jedan od uvjeta za prijenos metala štrcajućim lukom je i primjena plinskih mješavina kod kojih je maksimalna koncentracija aktivnih plinova 18%. Primjenom mješavina sa manjim postotcima drugih plinova može se direktno utjecati na geometriju zavarenog spoja (npr. kisik utječe na dubinu penetracije – penetracija je uža i dublja, dok upotreba CO₂ daje blažu i zaobljeniju penetraciju).[11]



Slika 4.2.1. Shema prijenosa metala štrcajućim lukom.[11]

Prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom su:[7]

- velika količina rastaljenog materijala,
- velika iskoristivost dodatnog materijala,
- moguće primijeniti širok spektar dodatnog materijala,
- jednostavno izvođenje zavarivanja,
- malo okolno štrcanje i manji troškovi naknadnog čišćenja.

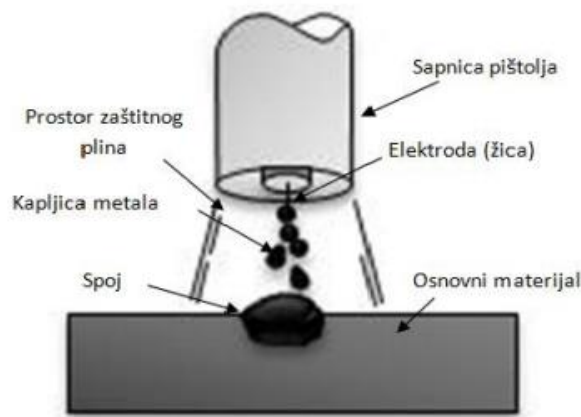
Nedostatci prijenosa metala štrcajućim lukom su:[7]

- povećana koncentracija plinova nastalih u procesu zavarivanja,

- povećana mogućnost gubitaka zaštitnog plina uslijed vanjskih utjecaja,
- povećano zračenje što iziskuje bolju zaštitu zavarivača i okoline,
- obavezna upotreba skupljih plinskih mješavina.

4.3. Prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom je kombinacija štrcajućeg i kratkog luka sa krupnijim kapljicama. Najčešće se odvija uz upotrebu CO₂ kao zaštitnog plina ili plinskih mješavina sa velikim udjelom CO₂. Izmjena i redosljed mehanizama prijenosa između prijenosa metala štrcajućim lukom i kratkim spojevima je slučajna pojava. Ovaj način prijenosa metala se izbjegava zbog neregularnosti samih pojedinih procesa, većim razlikama u samim promjerima odvojenih kapljica koje definiraju geometriju zavarenog spoja, povećanog prskanja i neaksijalnog prijenosa kapljica.[11,13]



Slika 4.3.1. Shema prijenosa metala mješovitim lukom.[11]

Prednosti prijenosa metala mješovitim lukom su:[7]

- mogućnost korištenja jeftinih zaštitnih plinova (mješavine sa visokim udjelima CO₂),
- sposobnost zavarivanja visokim brzinama,
- niska cijena izvora struje za zavarivanje,
- niska cijena dodatnog materijala.

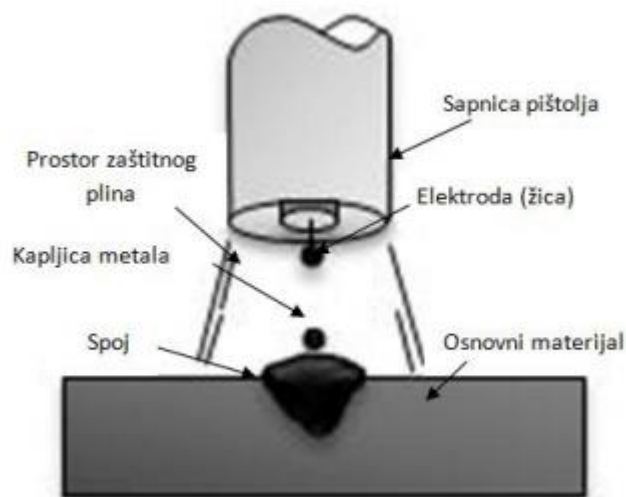
Nedostatci prijenosa metala mješovitim lukom su:[7]

- povećana vjerojatnost nastajanja nepotpune fuzije u zavarenom spoju,
- značajno povećanje prskanja,

- niska iskoristivost elektrode (87-93 %),
- razlika u promjeru odvojenih kapljica (neregularnost).

4.4. Prijenos metala pulsirajućim lukom

Prijenos metala pulsirajućim lukom (implusnim strujama) je oblik prijenosa metala štrcajućim lukom kod kojeg je iznos prosječne struje zavarivanja manji od minimalne vrijednosti struje kod prijenosa metala štrcajućim lukom. To je omogućeno promjenom iznosa struje zavarivanja između osnovne i maksimalne struje. Osnovna vrijednost struje zavarivanja je minimalna vrijednost koja je potrebna za održavanje električnog luka, dok je maksimalna vrijednost struje, struja impulsa, ona vrijednost koja omogućuje prijenos metala bez uspostave kratkog spoja (prijenos metala štrcajućim lukom). Struja impulsa omogućuje da se dodatni materijal (žica) rastali, a u idealnom slučaju, vremenski interval trajanja maksimalne struje je minimalno vrijeme potrebno za formiranje i odvajanje jedne kapljice rastaljenog materijala po impulsu.[11]



Slika 4.4.1. Shema prijenosa metala pulsirajućim lukom.[11]

Prednosti prijenosa materijala pulsirajućim lukom:[7]

- vrlo malo prskanje,
- odličan izgled zavara,
- mala količina nastalih zavarivačkih plinova,
- manje deformacije koje su posljedica unosa topline,
- niska koncentracija otopljenog vodika u zavarenom spoju,

- pogodan za automatizirane i robotizirane procese,
- velika brzina zavarivanja,
- širok raspon debljina materijala koje se zavaruju.

Nedostatci prijenosa materijala pulsirajućim lukom:[7]

- veća cijena uređaja i opreme za zavarivanje,
- složeniji postupak zavarivanja (parametri),
- otežana primjena na otvorenim gradilištima,
- potreba za korištenjem skupih plinskih mješavina.

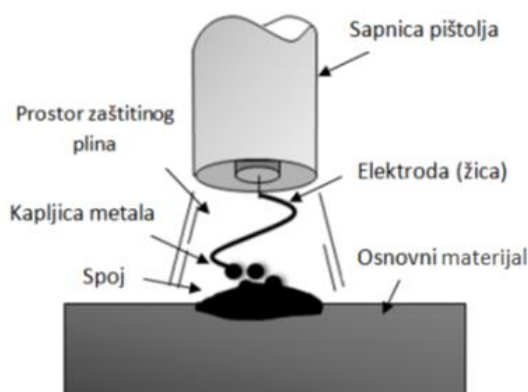
4.5. Prijenos metala strujama visoke gustoće

Prijenos metala strujama visoke gustoće je naziv za MIG/MAG postupke zavarivanja kod kojih je glavna karakteristika velika količina rastaljenog metala zbog čega ih se svrstava u grupu visokoučinskih postupaka zavarivanja. Ova skupina prijenosa metala se dijeli na prijenos metala rotirajućim i nerotirajućim lukom. Ovakvi postupci zavarivanja temelje se na specifičnim karakteristikama koje se javljaju kao posljedica podešavanja više parametara poput:[7]

- brzina dodavanja žice,
- smjesa zaštitnih plinova,
- duljina slobodnog kraja žice,
- jakost struje i napon električnog luka.

Glavna karakteristika prijenosa metala rotirajućim lukom je rotacijski prijenos rastaljenog kraja žice. Količina rastaljenog dodatnog materijala kod ovog načina prijenosa se kreće do 25 kg/h dok se kod konvencionalnog štrcajućeg luka kreće od 4 do 6 kg/h. Vrh žice se kod rotirajućeg luka tali zbog velikog slobodnog kraja žice i visoke struje zavarivanja. Kako ne bi došlo do pada struje zavarivanja kao posljedice velikog slobodnog kraja žice i time se smanjila penetracija, povećana je brzina dodavanja žice čime se struja održava konstantnom. Kod ovog načina prijenosa metala koriste se plinske mješavine argona i ugljičnog dioksida ili argona i kisika koje djeluju snažno na smanjenje površinske napetosti taline sprečavanjem odvajanja više sitnih kapljica metala. Najprije se na kraju žice stvara rastaljeni metal nalik na gusjenicu koji se zatim odvaja u sitne kapljice. Upravo te

mješavine plinova potiskuju nestabilan štrcajući luk te omogućuju izravan prijelaz iz stabilnog konvencionalnog štrcajućeg luka u rotirajući luk.[7]



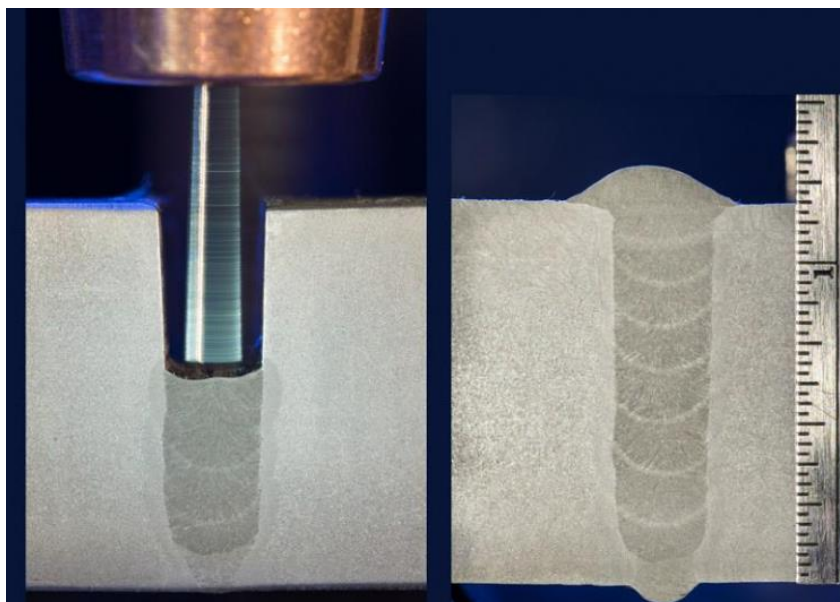
Slika 4.5.1. Shema prijenosa metala rotirajućim lukom.[11]



Slika 4.5.2. Izgled rotacije žice kod zavarivanja rotirajućim lukom.[14]

Povećanjem parametara jakosti struje (preko 450 A) i napona (iznad 35 V) luk počinje rotirati. Radikalna komponenta sile magnetskog polja upravlja rastaljenom gusjenicom te je pomiče iz simetrale i rotira, električni luk se konusno proširuje, a rastaljeni metal ulazi u sitnim kapljicama u talinu zavara. Ovaj proces ima visoko stabilan električni luk koji zahtijeva duljinu slobodnog kraja žice od 25 mm do 35 mm. Kako bi ovaj proces bio visokoučinkovit potrebno je koristiti pune žice promjera 1 do 1,2 mm jer žice manjeg promjera imaju manju stabilnost pri višim brzinama zavarivanja, dok se kod debljih žica ne može ostvariti potrebno zagrijavanje slobodnog kraja žice. [7,15]

Rotirajući luk se koristi kod zavarivanja materijala srednjih i velikih debljina u proizvodnji i kod izrade različitih čeličnih konstrukcija u strojogradnji, kotlogradnji i dr. Zavari dobiveni metodom rotirajućeg luka su pravilnog profila, s dobro protaljenim rubovima što ovaj način prijenosa metala u električnom luku čini pogodnim za dinamički opterećene zavarene spojeve.[7,15]



Slika 4.5.3. Izgled zavara dobivenog rotirajućim lukom.[14]

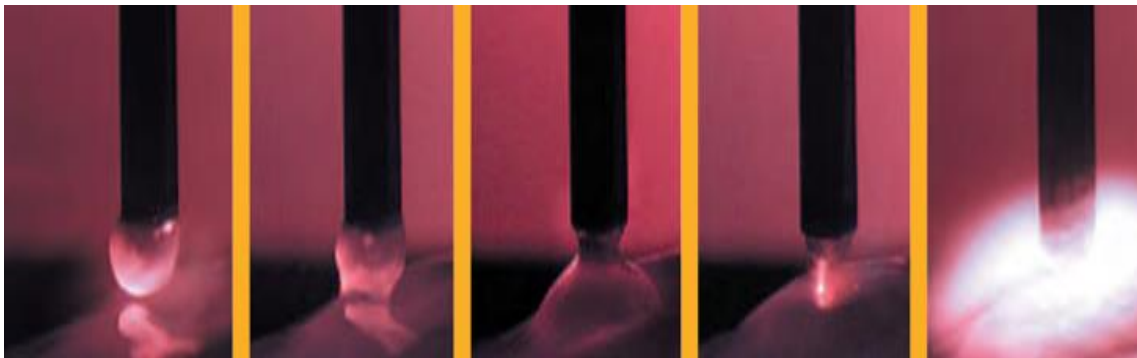
Kod prijenosa metala nerotirajućim lukom nema rotacije rastaljenog kraja žice nego je prijenos metala aksijalan. Iz tog razloga se javlja povećana toplinska vodljivost smjese zaštitnih plinova i veće površinske napetosti rastaljenog kraja žice zbog povećane koncentracije ugljičnog dioksida i helija. Količina rastaljenog materijala kod ovakvog načina prijenosa kreće se između 5 i 15 kg/h. Električni luk je koncentriraniji te izgledom nalikuje na prijenos metala običnim štrcajućim lukom. U odnosu na rotirajući luk postiže se veća penetracija pri istim vrijednostima struje zavarivanja.[7]

5. Modificirani postupci kod MIG/MAG zavarivanja

5.1. STT (Surface Tension Transfer) postupak

STT postupak zavarivanja razvila je tvrtka Lincoln Electric. Predstavlja suvremeni i učinkovit postupak zavarivanja koji za finu regulaciju odvajanja rastaljene kapljice koristi mehanizme površinske napetosti, a temelji se na prijenosu materijala kratkim spojevima. Najčešće se primjenjuje za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu (u jednom prolazu). Pogodan je za zavarivanje čelika, visokočvrstih čelika, nehrđajućih i duplex nehrđajućih čelika, legura nikla i dr. Ovaj postupak se primjenjuje iz razloga što je količina unesene topline tijekom postupka zavarivanja manja i nudi mogućnost upravljanja većim brojem parametara u odnosu na konvencionalan MIG/MAG postupak zavarivanja.[10]

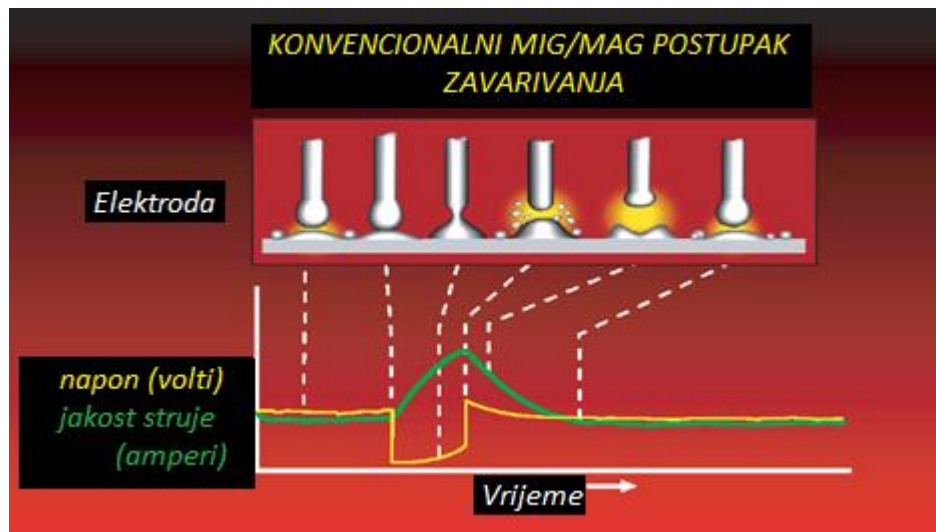
Kao što je ranije spomenuto STT postupak zavarivanja za prijenos kapljice koristi mehanizam površinske napetosti. Kada žica za zavarivanje dođe u dodir s osnovnim materijalom, ili talinom metala zavara, zatvara se strujni krug, odnosno dolazi do kratkog spoja i porasta struje. Porast struje u kratkom 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 kapljice, počinje ponovo naglo povećavanje jakosti struje koje zagrijava vrh elektrode i na taj način priprema za novo odvajanje kapljice.[16]



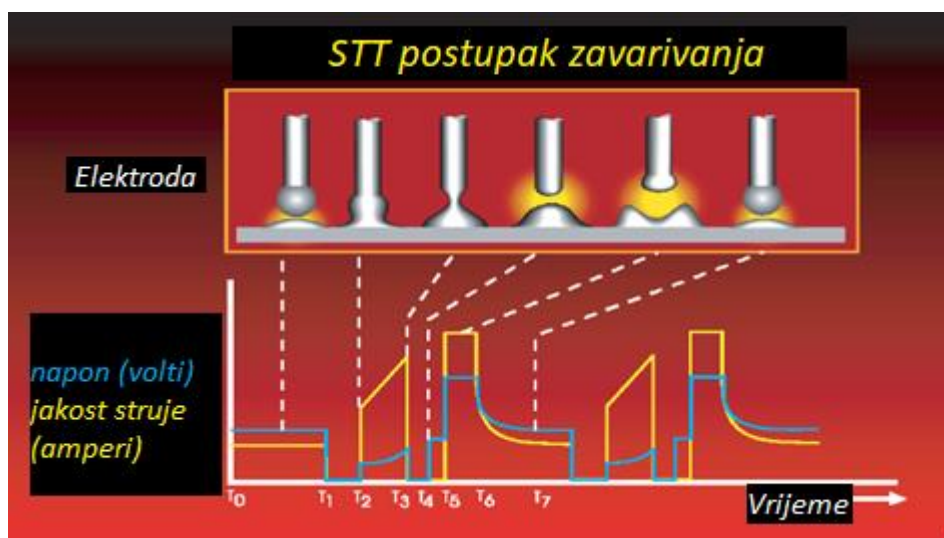
Slika 5.1.1. Prijenos kapljice metala tijekom STT postupka zavarivanja.[17]

STT postupak zavarivanja odvija se ciklički. Stabilnost električnog luka, odnosno stabilnost i ponovljivost cjelokupnog postupka zavarivanja osigurava se ispravnim odabirom parametara zavarivanja. Trajanje promjene vrijednosti struje zavarivanja, ovisno o vrijednosti napona zavarivanja je reda veličine mikrosekunde.[16] Na slikama 5.1.2. i 5.1.3. dana je usporedba

dinamičke karakteristike izvora struje konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja i STT postupka zavarivanja.



Slika 5.1.2. Dinamička karakteristika struje kod konvencionalnog MIG/MAG postupka.[18]



Slika 5.1.3. Dinamička karakteristika struje kod STT postupka.[18]

- **Vremenski interval od T_0 do T_1**

Predstavlja vrijeme trajanja osnovne struje zavarivanja. Osnovna struja zavarivanja je početna vrijednost struje prije uspostavljanja električnog luka i ima stalnu vrijednost koja iznosi od 50 A do 100 A.

- **Vremenski interval od T_1 do T_2**

Predstavlja vrijeme potrebno za stvaranje kapljice metala. U ovom intervalu dolazi do kratkog spoja žice i osnovnog materijala te se vrijednost struje zavarivanja smanji sa 75 A na 10 A, a sama promjena vrijednosti struje traje 0,75 ms.

- **Vremenski interval od T₂ do T₃**

Predstavlja vrijeme potrebno za prijenos kapljice metala. Kako bi se omogućio prijenos kapljice potrebno je povećati struju zavarivanja. Kontroliranim povećanjem struje zavarivanja, prijenos kapljice metala se ubrzava. Zatim se kapljica metala uz pomoć djelovanja elektromagnetskih sila i sila površinske napetosti uvlači u talinu. Kod odvajanja kapljice javlja se karakteristična pojava „pinch“ efekta odnosno elektromagnetska sila svojim djelovanjem uzrokuje lokalno suženje presjeka na rastaljenom vrhu žice za zavarivanje.

- **Vremenski interval od T₃ do T₄**

Predstavlja brzinu prekida električnoga luka u ovisnosti o vremenu, odnosno trenutak u kojem dolazi do odvajanja rastaljene kapljice metala od žice. U točki T₃ struja zavarivanja se smanjuje na vrijednost od 50 A u trajanju od nekoliko mikrosekundi. Ovo smanjenje odvija se prije nego što se kapljica metala potpuno odvojila od žice. Na taj način je spriječeno naglo odvajanje kapljice metala, odnosno prskanje rastaljenog metala. U točki T₄ kapljica metala se odvojila od žice, ali pri manjoj struji zavarivanja.

- **Vremenski interval od T₅ do T₆**

Predstavlja vrijeme trajanja vršne struje. Nakon što se kapljica metala prenese u rastaljenu kupku metala vrijednost struje zavarivanja se naglo poveća. Takvim naglim povećanjem struje zavarivanja dolazi do brzog taljenja žice i nastajanja kapljice metala.

- **Vremenski interval od T₆ do T₇**

Predstavlja vrijeme trajanja brzine pada struje odnosno „tailouta“, a također i označava završetak jednog ciklusa i početak sljedećeg ciklusa odvajanja rastaljene kapljice metala. Vršna struja se smanjuje 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 25-35 ms.

Osnovne prednosti STT postupka zavarivanja su:[10]

- odvajanje kapljice bez prskanja,
- manji unos topline,
- nizak udio difundiranog vodika,
- lako rukovanje,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- veća brzina zavarivanja u odnosu na konvencionalni MIG/MAG postupak,
- mogućnost korištenja 100% CO₂ kod zavarivanja ugljičnih čelika,

- odlično za izvođenje korijenskih zavora u otvorenom žlijebu (zamjena za izvođenje korijenskih zavora REL postupkom celuloznim elektrodama ili izvođenje korijenskih prolaza TIG postupkom),
- laka automatizacija postupka zavarivanja.

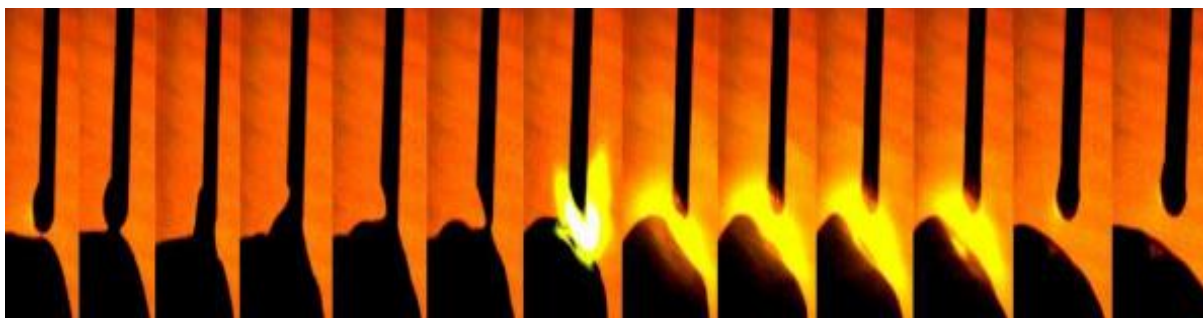
Nedostaci primjene STT postupka zavarivanja su:[7]

- visoka cijena opreme za STT postupak zavarivanja,
- ograničena primjena STT postupka zavarivanja, koristi se za zavarivanje korijena zavora.

5.2. FastROOT postupak zavarivanja

FastROOT postupak zavarivanja razvila je tvrtka Kemppi. Ovaj postupak zavarivanja zasniva se na digitalnom upravljanju osnovnih parametara zavarivanja, odnosno struji i naponu. Osnovni koncept ovog postupka je modificirani prijenos metala kratkim spojevima što rezultira niskim unosom energije. Ovaj postupak zavarivanja pogodan je za zavarivanje tankih limova (najčešće konstrukcijskih i nehrđajućih čelika) i korijenskih prolaza.[10]

Kod ovog postupka zavarivanja javljaju se dva različita oblika struje: struja kratkog spoja i sekundarni strujni puls. U prvom dijelu procesa dolazi do prijenosa metala u kratkom spoju, odnosno odvajanja kapljice u rastaljenu kupku. Zatim dolazi do drugog strujnog intervala koji zagrijava osnovni materijal i vrh žice te ga priprema za novi ciklus. Ovim sekundarnim strujnim pulsom dovodi se značajna količina topline kojom se utječe na oblikovanje zavarenog spoja. Nakon povećanja struje zavarivanja kod ovih dvaju procesa ona pada na minimalnu vrijednost čime je osigurana stabilnost cjelokupnog procesa. Kako bi se ovaj proces realizirao potrebna je izrazito brza regulacija jačine struje i napona u svakom trenutku odvajanja kapljice, time se postiže prijenos metala bez prskanja uz što manji unos topline.[10,19]



Slika 5.2.1. Proces odvajanja kapljice kod FastROOT postupka.[21]

Parametri koji se javljaju kod ovog postupka zavarivanja su:[7]

1. Osnovna struja zavarivanja

- prevelika osnovna struja rezultirat će nedovoljnim provarivanjem korijena zavora.

2. Vrući start (Hot Start)

- omogućuje lakše uspostavljanje električnog luka, zbog hladnog osnovnog materijala.

3. Razina drugog ulaznog stanja (sekundarni impuls)

- bezdimenzijski parametar koji se može podešavati od -9 do +9,
- utječe na geometriju zavora,
- pravilnim podešavanjem se postiže stabilnost električnog luka i regulira količina štrcanja,
- Vrijednost od:
 - -1 do -9 daje mekši luk uz smanjeno štrcanje,
 - +1 do +9 daje tvrdi luk s većom stabilnošću.

Prednosti FastROOT postupka zavarivanja:[16]

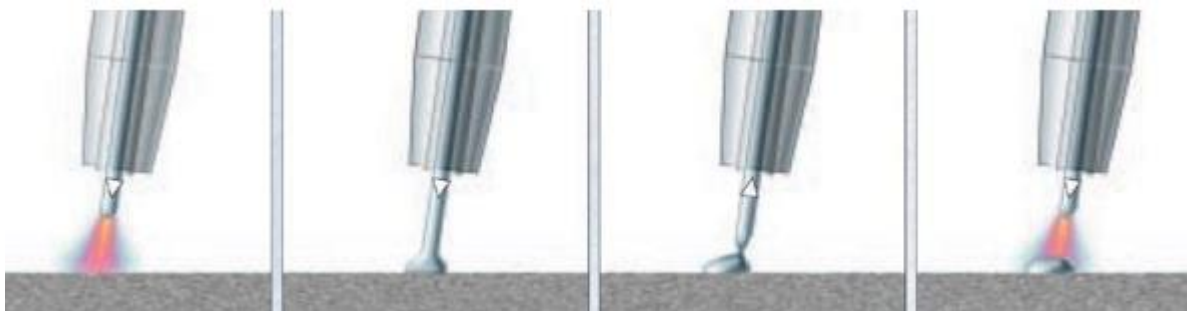
- niski unos energije,
- zavarivanje tankih limova,
- mogućnost zavarivanja korijenskih prolaza,
- veća produktivnost (veća brzina zavarivanja),
- olakšan rad zavarivača.

Nedostatci FastROOT postupka zavarivanja:[7]

- složenost korištenja upravljačke ploče,
- praćenje parametara preko električnog luka,
- osjetljivost opreme zbog digitalnog upravljanja.

5.3. CMT postupak zavarivanja

CMT (Cold Metal Transfer) postupak zavarivanja koristi modificirani način prijenosa metala kratkim spojevima uz primjenu povratnog gibanja žice. Postupak je razvila tvrtka Fronius International GmbH. Ovaj postupak karakterizira odvajanje kapljice u uvjetima jako niskog unosa topline koji kod klasičnog prijenosa kratkim spojevima jednostavno ne bi bio dovoljan. Povratno gibanje žice kompenzira nedostatak toplinske energije i elektromagnetske sile jer se prijenos metala odvija pri niskoj jačini struje. Digitalnom tehnologijom omogućeno je precizno upravljanje žicom, a specifična je i vrlo precizna regulacija duljine električnog luka pomoću mehaničkog gibanja. Žica se giba prema radnom komadu do trenutka koji je potreban da se uspostavi električni luk, kada se električni luk uspostavi između žice i osnovnog komada oslobađa se toplinska energija koja tali žicu te dolazi do odvajanja kapljice. Nakon što se kapljica odvoji žica se vraća natrag te je time završen jedan ciklus. Kad se žica vrati gore, natrag u početno stanje, započinje drugi ciklus. Brzina dobave žice nije konstantna te se određuje tokom samog procesa, a broj ciklusa varira ovisno o samom tijeku procesa.[7,8]



Slika 5.3.1. Shema povratnog gibanja žice kod CMT postupka.[7]

Ovaj postupak zavarivanja primjenjuje se na premošćivanju velikih zazora između materijala, MIG tvrdog lemljenja, zavarivanja tankih limova (aluminija, nelegiranih i nehrđajućih čelika), spajanju aluminija i pocinčanog lima.[7]

Prednosti CMT postupka zavarivanja su:[7]

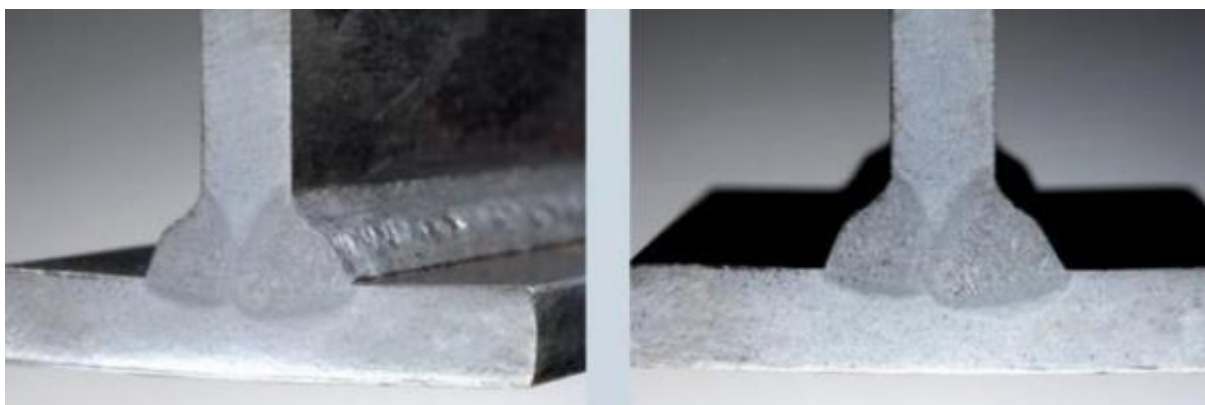
- manje prskanje nego kod običnih postupaka zbog male struje strujnog kruga,
- smanjenje troškova naknadne obrade zbog malog prskanja,
- povećanje produktivnosti,
- premošćivanje velikog zazora,
- zavarivanje aluminija i čelika zajedno,
- sučeono zavarivanje tankih limova.

Nedostatci CMT postupka zavarivanja su:[7]

- ograničenje na zavarivanje tankih limova (3 - 4 mm debljine),
- sama veličina ručnog pištolja (ugrađen AC servo motor).

5.4. RMT postupak zavarivanja

RMT (Rapid MIG/MAG Technology) postupak zavarivanja razvila je tvrtka ESS Schweisstechnik. Ovaj postupak zavarivanja temelji se na štrcajućem luku. Za razliku od klasičnog štrcajućeg luka, koji ovisi o karakteristikama dodatnog materijala i o zaštitnom plinu, kod RMT postupka prijenos materijala se odvija u jako sitnim kapljicama pri čemu je frekvencija prijenosa oko 2-3 kHz. RMT postupak zavarivanja teži skraćivanju električnog luka, što uzrokuje pad napona i povećanje koncentracije unesene energije. Na taj način se sužava jezgra luka, energija električnog luka djeluje na manjoj površini i dobiva se veća penetracija. Za razliku od klasičnog štrcajućeg luka postižu se veće brzine zavarivanja što rezultira nižim unosom topline. Zbog spomenutih karakteristika ovaj postupak zavarivanja se primjenjuje za zavarivanje debljih pozicija dok se kutni zavareni spojevi debljine do 8 mm mogu zavarivati bez posebne pripreme spoja.[10,8]

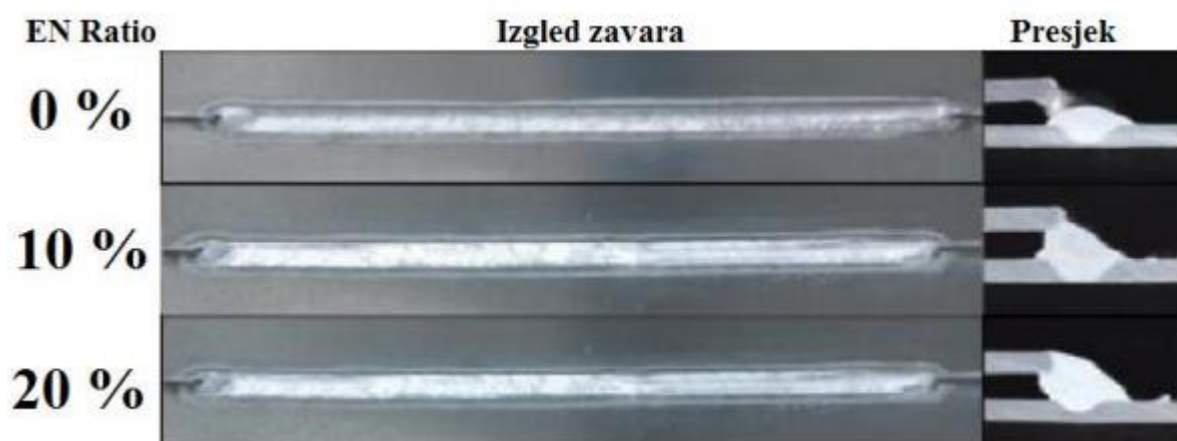


Slika 5.4.1. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom na materijalu ST 37 debljine 8 mm.[10]

Kod ovog postupka je unos energije zbog veće penetracije u odnosu na konvencionalan MIG/MAG postupak smanjen, kao i potreban broj prolaza. To rezultira boljim spojem, manjim deformacijama (manji broj prolaza), većom brzinom zavarivanja (velika gustoća električnog luka) i znatno manjim vremenom pripreme spoja.[10]

5.5. AC MIG

AC MIG (Alternating Current MIG) postupak zavarivanja primjenjuje promjeniv polaritet žice. Izmjenom negativnih i pozitivnih ciklusa omogućena je bolja kontrola procesa i premošćivanja većih zazora kod tanjih materijala. Kod klasičnog MAG postupka se pretežito primjenjuje pozitivan polaritet na žici i to kod konvencionalnih i modernih postupaka. Primjenom negativnog polariteta kod MAG zavarivanja postiže se veća brzina taljenja i veći depozit uz manju penetraciju, ali je ponašanje električnog luka na negativnoj elektrodi nepravilno i ima dosta prskanja. Izmjenom polariteta, odnosno balansom pozitivnog i negativnog pola na elektrodi i radom komadu, postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku. Takvom primjenom zamjene polariteta mogu se premostiti veći zazori kod tanjih materijala, ali ovisno o samoj primjeni negativnog polariteta na žici (EN ratio) koji će promijeniti oblik penetracije i mogućnost premošćivanja pri zavarivanju tankih limova. Treba napomenuti da su izvori struje za AC MIG zavarivanje vrlo složeni i skupi.[7,8]

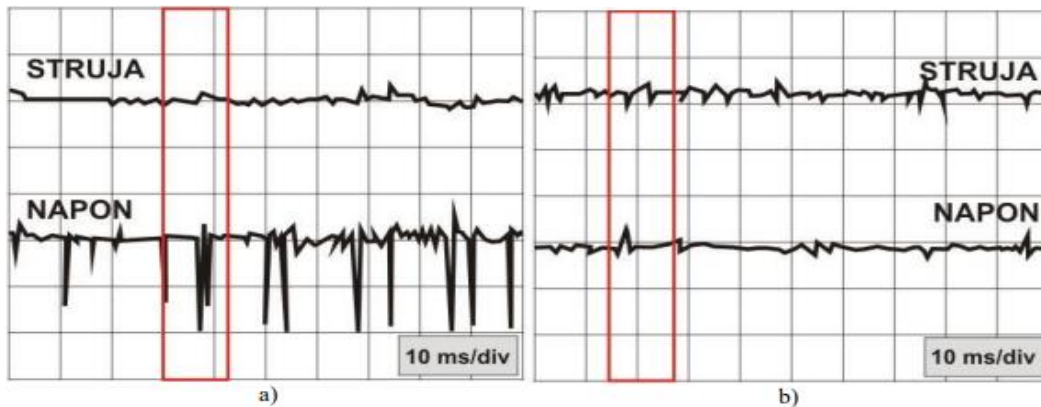


Slika 5.5.1. Utjecaj negativnog polariteta pri spajanju aluminijske legure (AC MIG).[7]

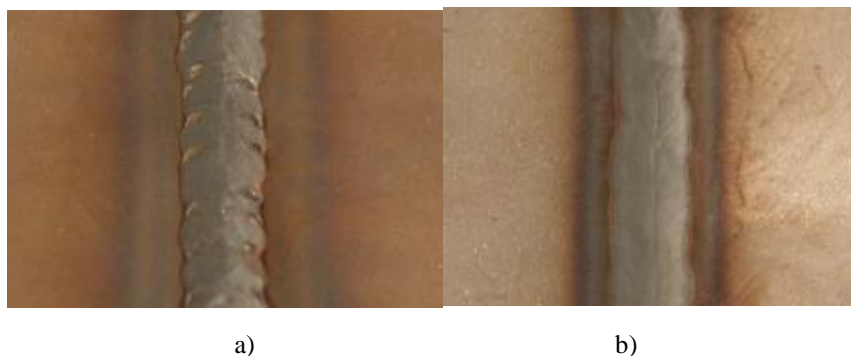
5.6. MAG ForceArc

ForceArc tehnologija temelji se na modifikaciji prijenosa materijala štrcajućim lukom. Princip rada se zasniva na dodatnom skraćivanju električnog luka smanjenjem napona istog kroz dinamičku kontrolu od strane izvora struje. Prijenos metala se odvija u obliku sitnih rastaljenih kapljica čija je brzina povećana djelovanjem plazme električnog luka. Ovakav način prijenosa omogućen je razvojem inverterskih izvora struje i digitalne kontrole parametara zavarivanja koji sprečavaju spajanje sitnih kapljica te nastajanja „lanca“ rastaljenog materijala koji može uzrokovati kratki spoj. Time bi došlo do spajanja osnovnog i dodatnog materijala, odnosno do neželjenog prskanja. Kod ForceArc postupka kontrola procesa zavarivanja omogućena je

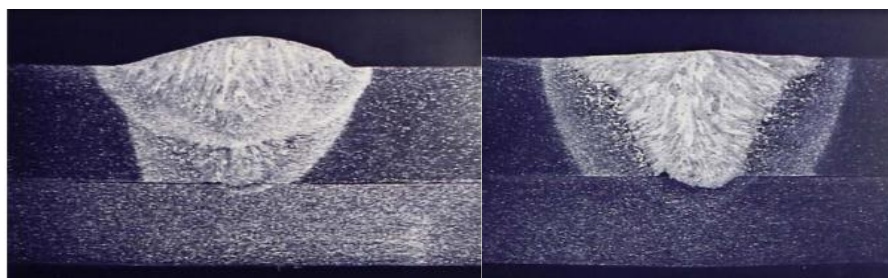
kontinuiranim mjerenjem napona električnog luka i njegovom brzom regulacijom. Ovakav način kontrole procesa zavarivanja EWM Group, proizvođač izvora struje za zavarivanje ForceArc metodom naziva još i visokodinamičkom regulacijom stvarnih vrijednosti parametara zavarivanja.[11]



Slika 5.6.1. Usporedba dinamičke karakteristike (a) kratkog spoja i (b) ForceArc-a.[11]



Slika 5.6.2. Izgled zavara (navara) kod konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja (a) i ForceArc postupkom zavarivanja (b).[20]



Slika 5.6.3. Rendgenska snimka zavara kod konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja (lijevo) i ForceArc postupkom zavarivanja (desno).[20]

Ovakva brza dinamička kontrola procesa omogućuje zavarivanje s duljim slobodnim krajem žice što pogoduje za zavarivanje spojeva zahtjevne geometrije (ograničenih prostorom, izvođenje korijenskih prolaza itd.), ali i kod izvođenja klasičnih spojeva zbog ekonomičnije pripreme žljebova ili potpune eliminacije pripreme spojeva i prednamještanja zazora. ForceArc, tj. prijenos

metala "skraćenim" štrcajućim lukom, bez obzira na jednostavnost modifikacije konvencionalnog prijenosa metala daje značajne prednosti korištenja, prvenstveno u vidu kvalitete zavarenog spoja, ali i ekonomičnosti postupka i jednostavnosti primjene.[11]

Osnovne prednosti ForceArc postupka zavarivanja su:[11]

- odlična fuzija i značajno povećanje penetracije spoja,
- stabilnost luka i lako izvođenje neautomatiziranog zavarivanja,
- smanjena zona utjecaja topline i općenito manji unos topline u osnovni materijal,
- smanjena mogućnost od nastanka pora i zajeda,
- ekonomska isplativost (povećana brzina zavarivanja).

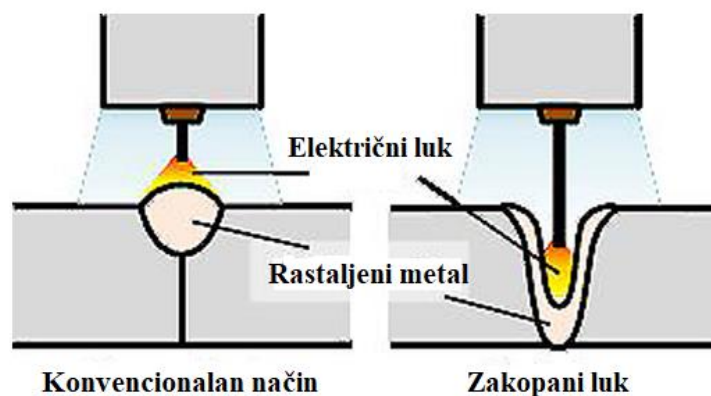
5.7. D-Arc postupak zavarivanja

D-Arc postupak zavarivanja koristi fenomen zakopanog luka odnosno električni luk je zajedno sa vrhom rastaljene žice postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara. Na taj način je izvor topline postavljen dublje u odnosu na konvencionalan način zavarivanja električnim lukom što za rezultat daje bolju penetraciju. Iz tog razloga je ovaj postupak zavarivanja prikladan za zavarivanje debljih limova kod kojih MAG postupak zavarivanja nije dovoljno učinkovit iz sljedećih razloga:[23]

- potrebno je zavarivanje u više prolaza,
- potrebna je velika količina dodatnog materijala (zbog pripreme),
- deformacije komada su jako velike.



Slika 5.7.1. Prikaz metode zakopanog luka.[23]



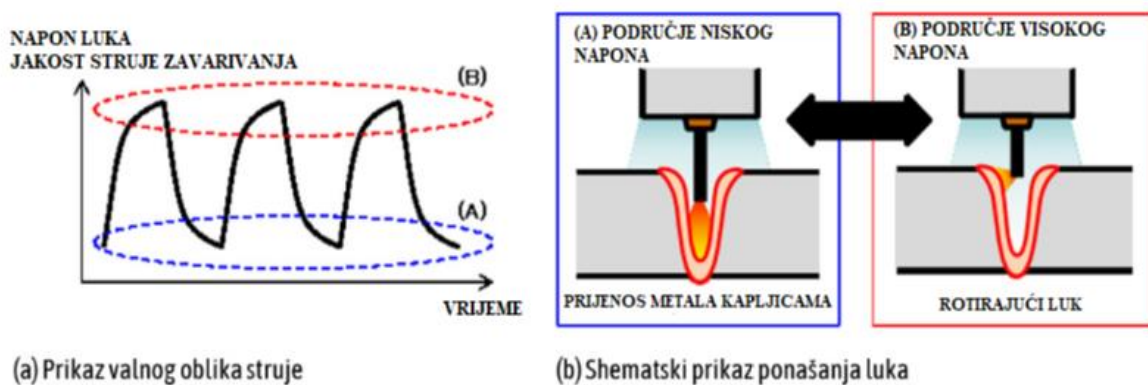
Slika 5.7.2. Shematski prikaz usporedbe konvencionalnog načina zavarivanja i metode zakopanog luka.[23]

Kako bi se zavarili deblji limovi kod MAG zavarivanja potrebno je povećati količinu rastaljenog metala po prolazu ili smanjiti kut otvora žlijeba. Na taj način nije riješen problem „plitke“ penetracije iz tog razloga priprema spoja mora biti po čitavoj debljini materijala uz povećani kut otvora žlijeba. Posljedice ovakvog načina zavarivanja su povećana potrošnja žice i veće deformacije. Spomenuti nedostaci mogu se eliminirati primjenom metode zakopanog luka kod MAG postupka zavarivanja čime se postiže učinkovit proces i kvalitetan zavareni spoj.[23]

oblik žlijeba		
presjek zavarenog spoja		
broj prolaza	6 prolaza	1 prolaz
površina žlijeba	123.5 mm²	38.5 mm²
kutna izobličenja	7°	1°
	Konvencionalno MAG zavarivanje	D-Arc metoda

Slika 5.7.3. Shematski prikaz usporedbe konvencionalnog MAG zavarivanja i metode zakopanog luka (D-Arc).[23]

Glavni nedostatak kod ovog načina zavarivanja je nestabilno ponašanje zakopanog luka i povremena pojava kratkog spoja. Iz tog razloga je stabilizacija samog procesa vrlo zahtjevna posebno u području jakih struja. Primjena zakopanog luka pri MAG zavarivanju u zaštiti 100% CO₂ uz primjenu pune žice omogućeno je uz korištenje novorazvijenog valnog oblika struje za stabilizaciju procesa kod sustava za visokoučinsko zavarivanje D-Arc. U cilju stabilizacije zakopanog električnog luka razvijen je valni oblik struje koji kontinuirano pridržava rastaljeni zid zakopanog prostora uz cikličko ponavljanje vrijednosti struje i napona. Takav valni oblik je u biti niskofrekventno modulirana kontrola napona kojim se periodično mijenja oblik izlaznog napona. [23]



Slika 5.7.4. . Mehanizam stabilizacije zakopanog luka pomoću niskofrekventno modulirane kontrole napona.[23]

Glavne karakteristike D-Arc sustava za zavarivanje su:[23]

- novorazvijena niskofrekventno modulirana kontrola napona postiže stabilan zakopani luk sa dobrim izgledom zavara i dubokom penetracijom,
- omogućuje zavarivanje nelegiranih čelika debljine 19 mm u jednom prolazu,
- moguće su razne primjene poput postizanja pune penetracije prilikom obostranog zavarivanja na limu 35 mm i na T spoju debljine 16 mm.

5.8. Tandem zavarivanje

Kod tandem postupka zavarivanje se vrši s dvije žice u istoj sapnici, ali odvojenog električnog luka u istoj kupki taline. Preporučljivo je da se izvodi sa više odvojenih elektroda kako bi se osigurala stabilnost procesa i smanjila potreba za sinkronizacijom. Kod ovog postupka zavarivanja koriste se dva izvora energije pomoću kojih se jakost struje kod svake žice može posebno regulirati. Proces zavarivanja se odvija na način da se obje žice postavljaju jedna poslije druge u

istu kupku taline. Prva žica (vodeća žica) je većeg promjera i ostvaruje određenu dubinu penetracije dok druga žica (prateća žica) ispunjava kupku taline. Izgled i oblik zavarenog spoja ovisi o drugoj žici te se ona opterećuje s manjom jakosti struje kako bi se moglo kontrolirati topljenje žice. Način prijenosa metala kod ovog postupka je kombinacija štrcajućeg i pulsirajućeg prijenosa metala i to sljedećim kombinacijama:[7]

- štrcajući + pulsirajući
- pulsirajući + pulsirajući
- štrcajući + štrcajući

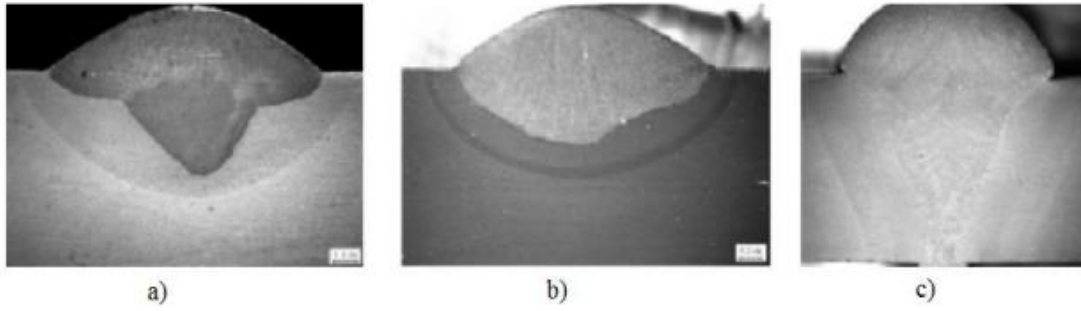
Glavni parametri ovog procesa su:

- Konfiguracija pištolja za zavarivanje (razmak elektroda i uglovi),
- Mogućnosti izvora snage za postizanje željenog podešavanja spoja / sinkronizacije.



Slika 5.8.1. Realni prikaz prijenosa metala kod tandem zavarivanja.[7]

Položaj elektroda kod ovog načina zavarivanja ima jak utjecaj na rezultate zavarivanja te se razlikuju dva različita tipa tandem MIG/MAG zavarivanja. Prvi tip ima veću zavarivačku kupku stvorenu većim razmakom elektroda, približno 15-20 mm i pogodan je za duboko uvarivanje ili visokoučinkovito zavarivanje. Drugi tip ima manju zavarivačku kupku, stvorenu manjim razmakom elektroda, približno 6-8 mm i pogodniji je za zavarivanje sa manjim unosom topline ili za zavarivanje u nepovoljnim položajima. Oba tipa imaju velike pogodnosti u odnosu na zavarivanje sa jednom žicom, preko velikog povećanja produktivnosti i dobre kvalitete zavarenog spoja. Sistemi sa manjim razmakom elektroda imaju više parametara koje treba podesiti i zahtijevaju unaprijedene sisteme kontrole za upravljanje inetrakcijom luka. Kod sistema sa većim razmakom elektroda postoji manji broj parametara dok manja turbulentnost luka omogućava da se podese nezavisno.[24]



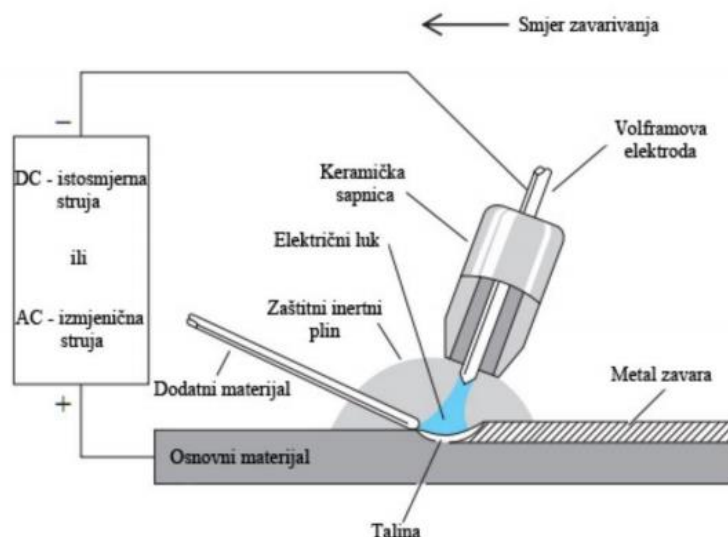
Slika 5.8.2. Utjecaj razmaka žice na zavar: a) i b) isto podešeni parametri zavara, ali različiti razmaci žice, c) optimalno podešeni parametri za maksimalno uvarivanje.[24]

Neke od značajki tandem zavarivanja su:[7]

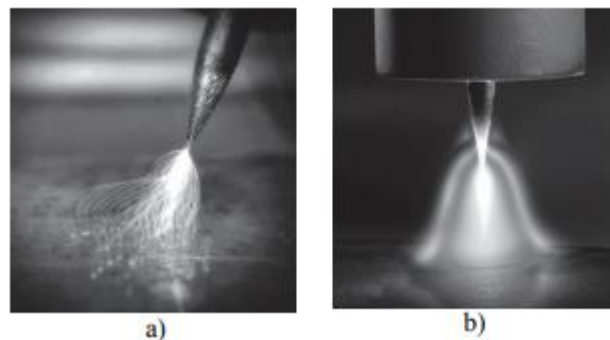
- brže zavarivanje negoli kod konvencionalnih načina MIG/MAG zavarivanja,
- manja razina prskanja u odnosu na druge procese i načine prijenosa metala kod MIG/MAG,
- manje taloženja vodika.

6. TIG postupak zavarivanja

TIG (eng. Tungsten Inert Gas) je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog (Ar i He) ili rjeđe smjesi plinova. Električni se luk uspostavlja između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Proces se izvodi s dodatnim materijalom ili bez njega (pretaljivanje). Dodatni materijal najčešće u obliku šipke ili žice dodaje se u prednji rub kupke rastaljenog metala. Volframova netaljiva elektroda služi samo za uspostavu električnog luka između gorionika i radnog komada, a do njezinog trošenja dolazi zbog termičkih opterećenja ili mehaničkih oštećenja. Netaljiva elektroda svojom geometrijom bitno utječe na karakteristiku električnog luka. Povećanim zahtjevima za uspostavom i stabilnošću električnog luka danas se upotrebljavaju elektrode koje nisu od čistog volframa već se legiraju kako bi se poboljšale njezine radne karakteristike. Do uspostave električnog luka dolazi kontaktno (neposredno ili posredno) ili preko visokofrekventnog generatora, sklopa intergriranog sa upravljanjem i izvorom struje za zavarivanje.[25]

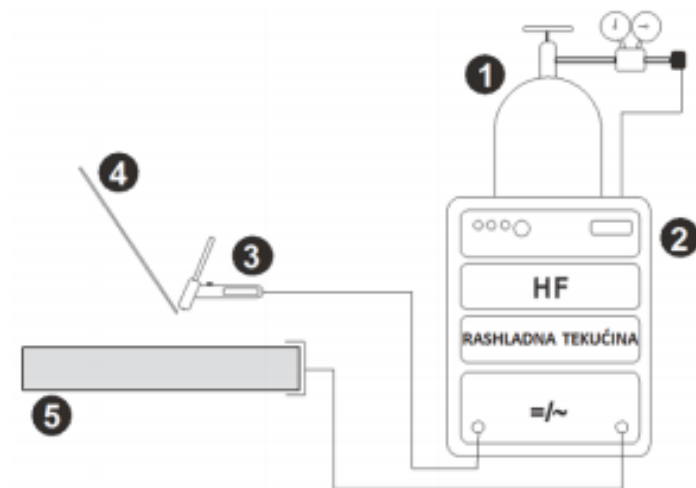


Slika 6.1. Shema TIG postupka zavarivanja.[26]



Slika 6.2. a) Uspostava električnog luka visokofrekventnim generatorom; b) Električni luk.

[27]

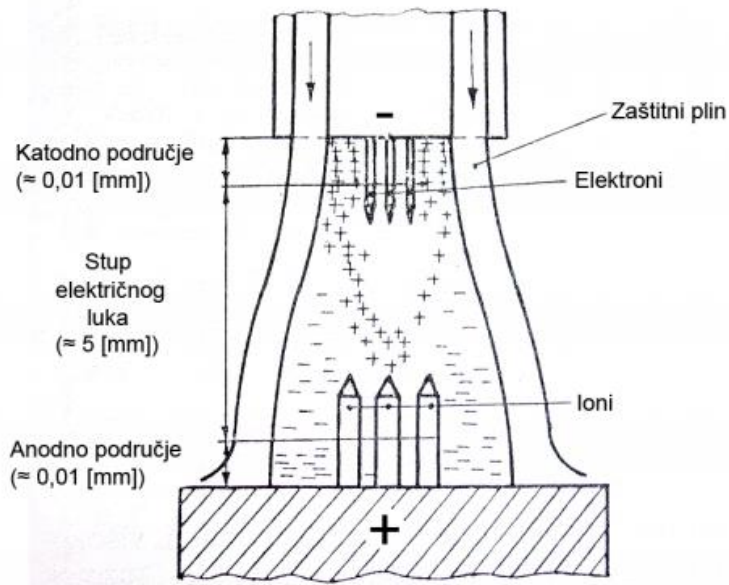


Slika 6.3. Shematski prikaz standardne opreme za TIG zavarivanje.[25]

Na slici 6.3. prikazana je shema standardne opreme za TIG zavarivanje koja se sastoji od:

1. zaštitnog plina,
2. izvora struje za zavarivanje,
3. gorionika,
4. dodatnog materijala,
5. osnovnog materijala.

Električni luk se kod TIG postupka zavarivanja sastoji od tri područja: katodnog (područje minus pola), anodnog (područje plus pola) i područja stupa električnog luka (slika 6.4.). Anodno i katodno područje su malih duljina, a sastoje se od oblaka iona koji udaraju u anodu tj. katodu i na taj način oslobađaju određenu toplinu. Duljina područja stupa električnog luka ovisi o naponu električnog luka, a najčešće je jednaka promjeru netaljive elektrode. Uspostava i stabilnost električnog luka ovisi o zaštitnom plinu koji je ujedno i glavni nosilac ionizacije kod ovog postupka zavarivanja.[25]



Slika 6.4. Shematski prikaz procesa u električnom luku kod TIG zavarivanja.[28]

TIG postupak zavarivanja se primjenjuje kod proizvodnih zavarivanja, navarivanja i reperaturnog zavarivanja aluminijskih legura i ostalih nehrđajućih materijala i legura. Koristi se za zavarivanje limova i cijevi debljine do 6 mm. Ovaj postupak zavarivanja daje visoku kvalitetu zavarenog spoja što je najveća prednost ovog postupka zavarivanja. U usporedbi s ostalim postupcima zavarivanja ovaj je postupak relativno spor dok je izobrazba za TIG zavarivača i automatizacija kompleksnija u odnosu na ostale postupke zavarivanja.[29]



Slika 6.5. Izgled zavara aluminija TIG postupkom zavarivanja.[30]

TIG postupak zavarivanja je visoko kvalitetan postupak koji ima mnoge prednosti pred ostalim postupcima, ali ga njegova sporost, mali depozit i viša cijena opreme sprečava da se koristi u puno većoj mjeri. TIG zavarivanje vrućom žicom predstavlja daljnji razvoj konvencionalnog TIG

zavarivanja gdje se postižu visoke stope depozita uz visoku kvalitetu zavara. Ovaj postupak zavarivanja koristi prethodno zagrijanu žicu za zavarivanje koja se dodaje u metalnu kupku zavara što znači da se metalna kupka slabije hladi i kao rezultat nudi veću brzinu zavarivanja uz manje razrjeđivanje s osnovnim metalom. Budući da je gotovo sva energija zavarivačkog luka dostupna za prodiranje ili stvaranje metalne kupke, ostvaruje se dva do tri puta veća brzina zavarivanja.[25]

Osnovne prednosti TIG postupka su:[25]

- koncentriranost električnog luka, smanjena zona utjecaja topline,
- nema prskanja, nema troske,
- minimalna količina štetnih plinova,
- zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura,
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala,
- mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima,
- mogućnost zavarivanja pozicija male debljine,
- pogodno za izvođenje reparaturnih radova,
- pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom,
- odličan izgled zavarenog spoja.

Osnovni nedostaci TIG postupka su:[25]

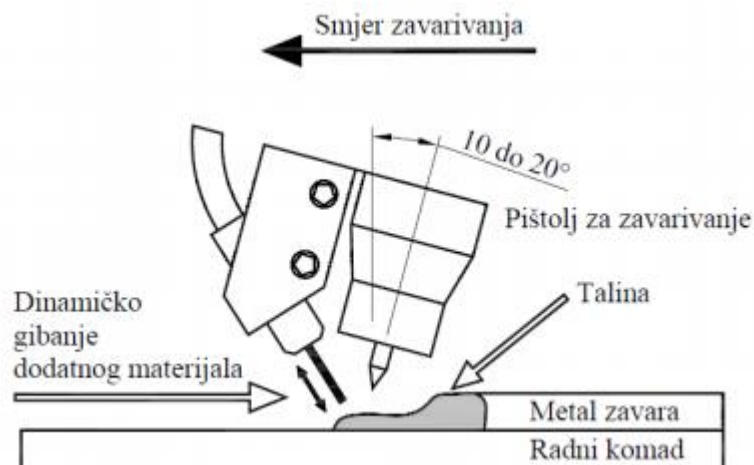
- mala brzina zavarivanja,
- mali depozit dodatnog materijala,
- neekonomičnost u zavarivanju debljih pozicija (iznad 6mm),
- zahtjeva se precizna priprema zavarenog spoja,
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova,
- zahtjevnost izvođenja ručnog TIG zavarivanja, duža izobrazba zavarivača,
- otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima,
- potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod izvođenja zavarivanja u skućenim prostorima.

7. Modificirani postupci TIG zavarivanja

7.1. Automatizirano TIP TIG zavarivanje

TIP TIG zavarivanje je modernizirana varijanta TIG postupka zavarivanja uz primjenu automatskog dodavanja žice tj. dodatnog materijala. Žica za zavarivanje se primarno giba kontinuirano prema naprijed u smjeru zavora (kao kod MIG/MAG postupka) te se na to gibanje integrira sekundarno linearno gibanje „naprijed-nazad“ koje proizvodi dodavač žice preko mehaničkog sustava. Kinetička energija tog dinamičkog gibanja umanjuje utjecaj površinske napetosti taline što omogućava bolje spajanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala, dok se nečistoćama i plinovima omogućava izlaz iz rastaljenog metala. Depozit dodatnog materijala može se povećati i do 50% kad se radi o varijanti s vrućom tj. predgrijanom žicom. Dinamički efekti gibanja žice osiguravaju stabilan i upravljiv zavarivački proces. Brzina žice i oscilatorno gibanje naprijed-nazad su kontinuirano podesivi i njima je moguće nezavisno upravljati. Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja mogu se vrlo efikasno zavarivati konstrukcijski čelici, nehrđajući čelici (feritni, austenitni i austenitno-feritni), aluminij i njegove legure, titan itd.[31]

Slika 7.1.1. Prikazuje najčešće primjenjivanu tehniku rada kod TIP TIG zavarivanja. Pištolj za zavarivanje je nagnut unazad za 10 do 20°, a dodatni materijal se dodaje u prednji rub taline.

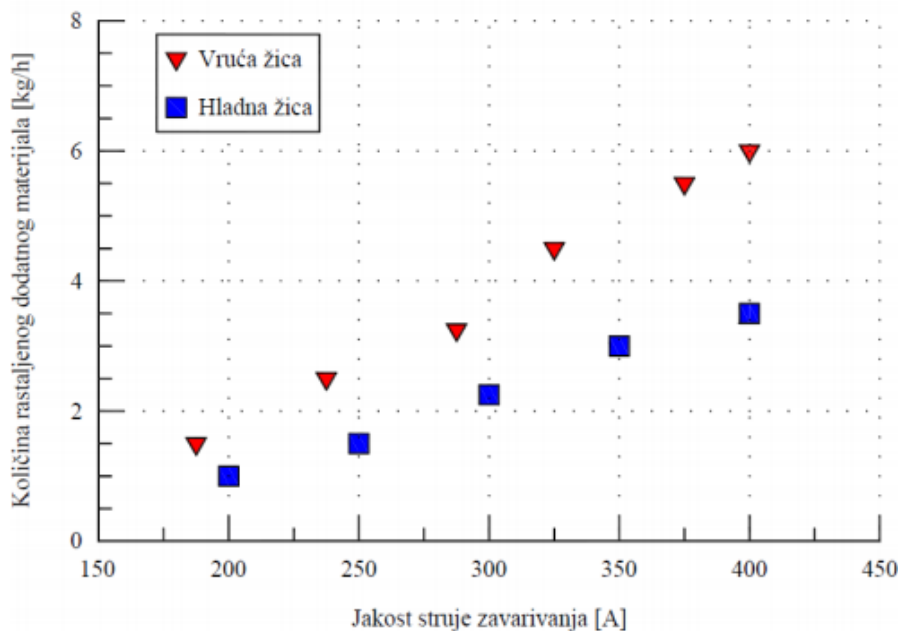


Slika 7.1.1. Princip rada TIP TIG zavarivanja.[8]

Zavarivanje s hladnom žicom je jednostavnija varijanta TIP TIG postupka. Energija unosa tj. količina unešene topline u zavareni spoj je niža nego u usporedbi s varijantom koja koristi predgrijavanje žice pa je i efikasnost i brzina postupka manja. Osnovna razlika između TIP TIG postupka sa vrućom žicom i TIG TIG postupka sa hladnom žicom je u predgrijavanju žice. Kao

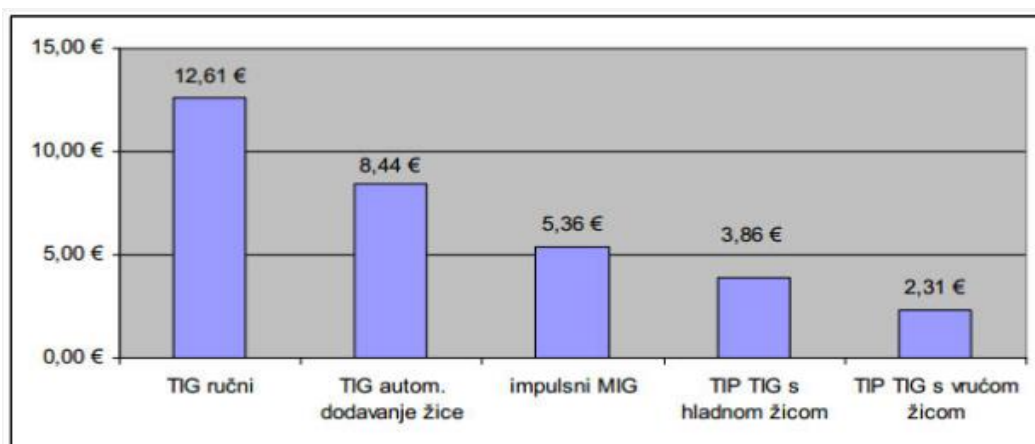
posljedica predgrijavanja žica koja ulazi u talinu zavara treba manje energije električnog luka za taljenje. Tu se uviđa značajno povećanje depozicije (taloženja) materijala.[31]

Upotrebom TIG zavarivanja s vrućom žicom, u odnosu na hladnu žicu, količina nataljenog dodatnog materijala povećava se za 50 do 100%. Količina rastaljenog materijala kod zavarivanja s hladnom žicom, pri određenoj jakosti struje zavarivanja i određenoj brzini dobave žice je konstantna dok se kod zavarivanja s vrućom žicom količina nataljenog materijala može mijenjati promjenom jakosti struje predgrijavanja žice.[31]



Slika 7.1.2. Usporedba TIP TIG postupka s vrućom i hladnom žicom.[8]

Slika 7.1.3. okvirno prikazuje ukupne troškove zavarivanja jednog metra zavara postupkom TIP TIG i srodnim postupcima uz uračunatu satnicu zavarivača 30 €.



Slika 7.1.3. Usporedba okvirnih ukupnih troškova za 1 m zavara za TIP TIG i srodne postupke.[31]

Evidentno je da su troškovi zavarivanja TIP TIG postupkom s vrućom žicom višestruko manji od svih konvencionalnih postupaka. Uz druge prednosti TIP TIG-a kao što su velika brzina zavarivanja, velika depozicija i izvrsna kvaliteta ovaj postupak u užem je izboru tehnologija za širi raspon primjena.[31]

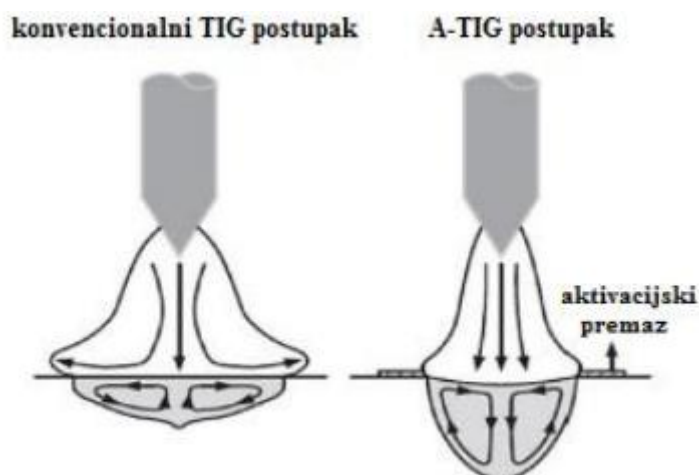
Osnovne značajke i prednosti TIP TIG postupka u odnosu na konvencionalne postupke zavarivanja za navedene primjene su:[31]

- postiže depoziciju materijala impulsnog MIG-a i kvalitetu TIG zavarivanja,
- lako se automatizira, a efikasnost raste uporabom varijante s vrućom žicom,
- daje “kozmetički” izgled zavara bez potrebe naknadne obrade,
- daje zavar odličnih metalurških i mehaničkih svojstava za sve materijale,
- niski unos topline,
- nema prskanja odnosno nema naknadnog brušenja,
- često je dovoljna manja priprema mjesta zavara nego kod drugih postupaka što smanjuje troškove,
- smanjen fizički i mentalni napor kod zavarivanja jer se može koristiti samo jedna ruka kod zavarivanja. Druga ruka se može koristiti za stabilizaciju zavarivačkog pištolja što pridonosi estetici i kvaliteti zavarivanja,

7.2. TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom A-TIG

Ova varijanta postupka uspostavljena je s ciljem povećanja efikasnosti penetracije kod procesa TIG zavarivanja. Kod ovog modificiranog načina TIG zavarivanja koristi se aktivirajući prašak, odakle je i sam naziv (A-TIG Active Flux TIG). A-TIG postupak zavarivanja je postupak u kojem se tanki sloj premaza aktivnog talila nanese na osnovni materijal i to samo na područje koje će se zavarivati. Aktivno talilo naziva se još i aktivacijski premaz. Aktivacijski premazi znatno povećavaju penetraciju kod TIG zavarivanja. Popularno nazvana A-TIG talila omogućuju znatno povećanje produktivnosti procesa zavarivanja. Glavni razlog istraživanja i primjene tih premaza u zavarivanju je postizanje što veće penetracije naspram konvencionalnog TIG postupka, a veća penetracija omogućuje manji broj prolaza i na taj način povećava se produktivnost zavarivanja. Adekvatnom primjenom aktivacijskog premaza moguće je kod TIG postupka postići potpunu protaljenost u jednom prolazu materijala debljine čak do 12 mm.[8]

Na slici 7.2.1. prikazana je usporedba dubine protaljivanja kod konvecionalnog i aktivacijskog TIG postupka zavarivanja. Iz slike je vidljivo da konvencionalan TIG postupak daje slabiju protaljenost od A-TIG postupka.



Slika 7.2.1. Usporedba dubine protaljivanja kod konvecionalnog TIG postupka (lijevo) i aktivacijskog TIG postupka zavarivanja (desno).[32]

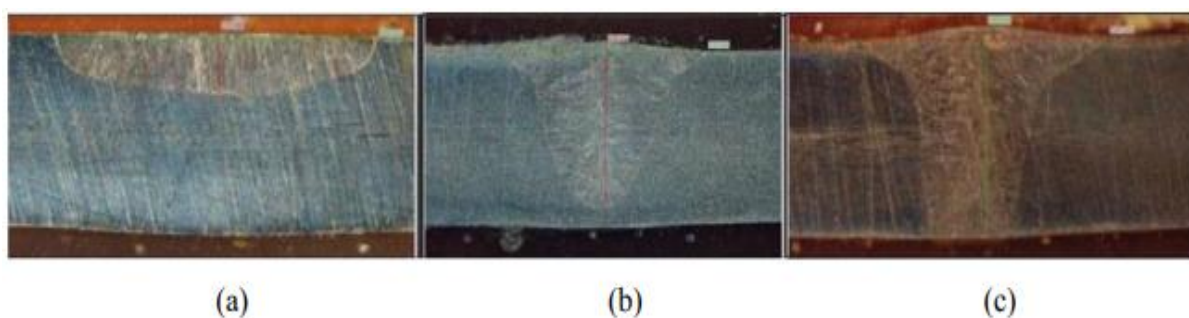
Ovisno o kemijskom, mehaničkom i toplinskom ponašanju materijala, aktivacijski premaz može se prilagoditi, odnosno mijenjati. To znači da takav premaz ima dobru sposobnost kvašenja površine što utječe na oblik taline, a sastav premaza se mijenja ovisno o površini na kojoj se primjenjuje. Istraživanja još nisu u potpunosti razjasnila na koji način kvašenje površine ima utjecaj na učinkovitost da zaštiti površinu taline. Kako bi premaz utjecao na povećanje gustoće energije u električnom luku te samim time na povećanje penetracije, mora sadržavati velike elektrone poput oksida, halida i fluorida. Aktivacijski premaz sastoji se od različitih komponenata u prahu koje se naknadno miješaju s acetonom ili etanolom.[33]

Komponente koje mogu činiti sastav aktivnog talila za zavarivanje nehrđajućih čelika su:[33]

- titanijev (IV) oksid (TiO_2),
- silicijev (IV) oksid (SiO_2),
- kromov (III) oksid (Cr_2O_3),
- niklov (II) oksid (NiO),
- bakrov (II) oksid (CuO).

Jedan od zahtjeva za efektivnost aktivacijskog premaza je da talište bude približno slično talištu osnovnog materijala. Također, premaz ne smije tvoriti stabilne čvrste faze s talinom zavara jer bi u tom slučaju naštetilo izgledu zavara i svojstvima zavarenog spoja.[33]

Na slici 7.2.2. prikazana su tri slučaja zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika TIG postupkom sa 100 % argona pri istoj struji i brzini zavarivanja. Prvi slučaj predstavlja konvencionalno TIG zavarivanje bez upotrebe aktivirajućeg praška (a). U drugom slučaju (b) upotrebljen je aktivirajući prašak sljedećeg kemijskog sastava: titan, silicij, te krom-trioksid. Lice zavara je nešto suženo dok je penetracija povećana čak tri puta za iste parametre. Treći slučaj (c) primjena je aktivirajućeg praška i visokofrekventnog TIG postupka s impulsnim strujama čime je smanjena duljina luka što je uzrokovalo još malo uži zavar, ali i daljnje protaljšivanje. Kako je protaljšivanje A-TIG postupkom veće tri puta, to se može za iste parametre iskoristiti za povećanje brzine za oko tri puta.[8]



Slika 7.2.2. Utjecaj aktivirajućeg praška na protaljšivanje kod TIG zavarivanja.[8]

Primjena A-TIG postupka zavarivanja garancija je za dobivanje zavarenih spojeva visoke čvrstoće i pouzdanosti, s dugim vijekom trajanja i to na čelicima različitih klasa. Metal zavara tako zavarenog spoja je sitnozrnate strukture koja ima povećanu otpornost prema formiranju toplih i hladnih pukotina jer se povećava vrijednost kritične brzine deformacije, odnosno hlađenja, pri kojoj dolazi do nastanka navedenih pukotina. Primjenom A-TIG postupka zavarivanja postižu se zavareni spojevi koji se po kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima gotovo ne razlikuju od osnovnog materijala. Postiže se kvalitetan zavareni spoj s manjim vrijednostima jakosti struje zavarivanja, manjim vremenom zavarivanja po jednom prolazu i sa tri do pet prolaza manje po zavarenom spoju u odnosu na konvencionalan TIG postupak zavarivanja.[33]

Još neke od prednosti ovakvog načina zavarivanja su:[33]

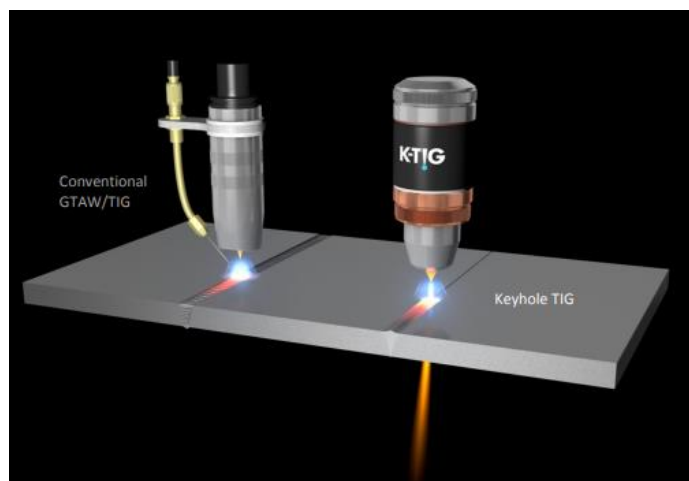
- kod A - TIG postupka zavarivanja ne koristi se dodatni materijal i postupak se realizira samo kretanjem, odnosno vođenjem gorionika za zavarivanje duž linije spoja,
- postupak je mnogo lakši za izvođenje, pogodan za težu pristupačnost zavarenih spojeva u montažnim uvjetima, pogotovo kada se radi o termoenergetskim, tj. kotlovskim postrojenjima,

- postupak je lakši za mehanizaciju, odnosno automatizaciju što je posebno važno pri zavarivanju cijevi,
- u zoni zavarivanja, dolazi do kontrakcije električnog luka uz istovremeno smanjenje otpora rastaljenog metala njegovoj penetraciji, a bez povećanja jačine struje zavarivanja i bez dodatne potrošnje zaštitnog plina,
- povećanje dubine protaljivanja,
- kvalitetan i pouzdan zavareni spoj u jednom prolazu do 12 mm debljine (jednostrano zavarivanje) i u dva prolaza do 24 mm debljine pri obostranom zavarivanju,
- zahvaljujući visokoj penetracijskoj sposobnosti moguće je naknadno otklanjanje grešaka u zavarenom spoju ponovnim protaljivanjem tih mjesta,
- osigurava dugotrajne zavarene spojeve čelika bez skošavanja i bez zazora stranica žljeba i to: sučeonih, kutnih i preklopnih spojeva,
- omogućuje veće brzine zavarivanja.

7.3. K-TIG - visoko penetracijski postupak

K-TIG je automatizirani visokobrzinski, jednoprolazni proces s punom penetracijom koji eliminira potrebu za dodatnim materijalom, pripremom rubova ili vještinama zavarivača. Ovim postupkom proizvode se zavari bez greške brzinama većim i do sto puta u odnosu na konvencionalni TIG postupak za materijale debljine do 16 mm. K u nazivu označava „keyhole“, odnosno ključanicu, pa bi se ovaj postupak zavarivanja također mogao nazvati TIG zavarivanje ključanicom. K-TIG je visokoučinska varijanta TIG postupka zavarivanja bez dodatnog materijala, dakle proizveden zavar se sastoji samo od osnovnog materijala eliminirajući mogućnost uključaka, poroznosti te drugih grešaka. Kod ovog postupka zavarivanja nije potrebna naknadna obrada korijena ili lica zavara, kao i čišćenje ili brušenje.[8]

Ključanica je veoma stabilna tako da nema potrebe za balansiranjem između sila električnog luka i površinske napetosti. Ključanica se zbog prirode procesa sama korigira. Struktura luka i ključanica se razvijaju spontano, a za njihovo održavanje koristi se automatski kontrolni sustav što čini ovaj postupak za zavarivanje veoma jednostavnim za uporabu. Upravo zbog svoje jednostavnosti niski su troškovi održavanja, a sam sustav je izdržljiv i veoma pouzdan. U procesu zavarivanja koristi se samo jedan zaštitni plin čiji protok nije kritičan te nema potrebe za optikom, mlaznicama itd. Sustav se sastoji od kontrolnog sustava, izvora struje, sustava za hlađenje vodom, dodavača žice i gorionika.[34]



Slika 7.3.1. Usporedni prikaz konvencionalnog TIG (lijevo) i K-TIG postupka (desno).[34]

Postupak koristi izvor struje od 1000 A, što je znatno više nego što je potrebno za bilo koji proces ključanicom, a intermitencija je 100% dok je kod plazme oko 60% prema podacima proizvođača. Brzine zavarivanja za materijale debljine 3 mm su do 1000 mm/min, dok su kod materijala s debljinom 16 mm brzine do 200 mm/min. Zavarivanje u TIG-u od 6 sati moguće je izvesti K-TIG postupkom za manje od 3 minute što iznosi samo 1% uobičajenog vremena. Prosječna ušteda troškova K-TIG načinom zavarivanje kreće se između 80 i 95 posto.[34]

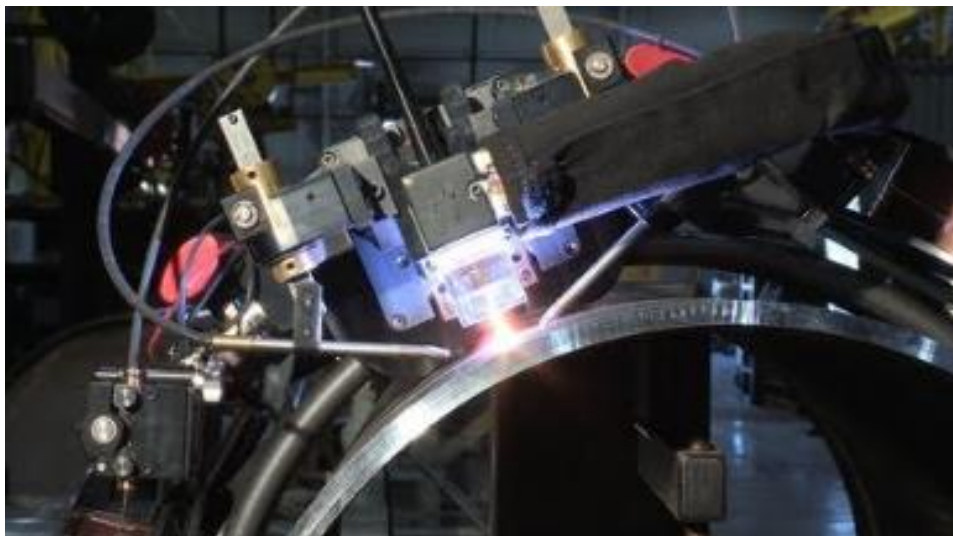
K-TIG postupak zavarivanja u jednom prolazu može se primjeniti za široku paletu materijala, uključujući:[34]

- titan debljine do 16 mm,
- nehrđajući čelik debljine do 13 mm,
- duplex i duper duplex debljine do 13 mm,
- niklove legure debljine do 13 mm,
- kvalitetni ugljični čelik debljine do 6 mm.

7.4. Orbitalno TIG zavarivanje

Orbitalno zavarivanje je proces kod kojeg električni luk putuje oko radnog komada opisujući kružnicu, odnosno električni luk putuje minimalno 360 stupnjeva oko radnog komada bez prekida. Orbitalno zavarivanje se koristi kada su zahtjevi za kvalitetu zavarenog spoja visoki u metalurškom i geometrijskom smislu. Zavareni spoj dobiven orbitalnim zavarivanjem ima dobar

estetski izgled i antikorozivna svojstva. Glavni razlozi zbog kojih se koristi upravo ovaj način zavarivanja su ravan, jednolik i homogen korjenski zavar.[36]



Sika 7.4.1. Orbitalno TIG zavarivanje.[35]

Kod orbitalnog zavarivanja javlja se potreba za dobrom kontrolom taline zavara. Iz tog razloga se koristi najčešće u kombinaciji s TIG postupkom zavarivanja hladnom žicom ili bez dodatnog materijala uz poštivanje svih pravila TIG postupka zavarivanja odabirom plina za zavarivanje, čistoće i pripreme spoja. Rotaciju oko radnog komada obavlja dio opreme za orbitalno zavarivanje koji nazivamo orbitalnim glavama za zavarivanje. Orbitalna glava za zavarivanje se sastoji od fiksnog dijela čija je uloga fiksiranje glave na radni komad i dijela koji rotira i na sebi nosi gorionik koji služi za zavarivanje. Ovim načinom gorionik za zavarivanje može svojom kretnjom opisivati kružnicu oko radnog komada. Primjena orbitalnog zavarivanja je široka pa su time i mogućnosti korištenja ogromne, no one su limitirane kako u financijskom smislu zbog visoke cijene opreme, tako i o debljini i vrsti materijala, pristupačnosti spoju za zavarivanje i mogućnostima pripreme. Zbog specifičnosti orbitalnog zavarivanja elementi koji se spajaju ovim načinom zavarivanja su kružnog oblika (cijevi, lukovi, koljena, T-komadi, prirubnice, razni cijevni priključci i slični spojevi).[3]

Oprema za orbitalno zavarivanje sastoji se prvenstveno od izvora struje za zavarivanje i glava za orbitalno zavarivanje. Suvremeni izvori struje za orbitalno TIG zavarivanje imaju sposobnost upravljanja i kontrole strujama za zavarivanje, brzinama rotacije glava za zavarivanje, kontrole dodavanja dodatnog materijala, kontrole protoka plina za zavarivanje i zaštitu korijena, kontrole hlađenja rashladnom tekućinom glava za zavarivanje itd. Također omogućuju praćenje bitnih parametara za zavarivanje koji direktno utječu na krajnji rezultat kvalitete zavarenog spoja, te

njihov ispis putem internog ili vanjskog tiskača, prijenos podataka na računalo radi obrade istih, memoriranje programa, autoprogramiranje, poruke upozorenja itd.[36]

Zatvorene glave za orbitalno zavarivanje koriste se kada je proces potrebno izvesti u potpuno zatvorenom komornom sistemu. Komorni (zatvoreni) dio glave se prije zavarivanja napuni zaštitnim plinom za zavarivanje tako da je cijeli zavareni spoj tokom procesa zavarivanja potpuno zaštićen od utjecaja atmosfere. Na taj način omogućuju zaštitu površine (lica i korijena) zavarenog spoja od oksidacije. Iz tog razloga se koriste za zavarivanje nehrđajućih čelika i titana.[36]



Slika 7.4.2. Zatvorena glava za orbitalno zavarivanje.[37]

Otvorene glave za orbitalno zavarivanje se koriste kada je potrebno iz tehnoloških razloga izvršiti zavarivanje uz uporabu dodatnog materijala, za debljine stijenki iznad 3 mm i za višeslojno zavarivanje. Kod višeslojnog zavarivanja potrebno je ostvariti njihanje i automatsku kontrolu udaljenosti netaljive volfram elektrode od radnog komada. U ovom slučaju gorionik za zavarivanje montira se na motorizirani križni support. Prilikom izrade programa za zavarivanje osim standardnih parametara potrebno je zadati i širinu njihanja, frekvencije njihanja, zadržavanje u određenim položajima, ali se visina tj. udaljenost netaljive volfram elektrode od radnog komada mora održavati elektronski, odnosno mora postojati automatska kontrola napona zavarivanja (AVC).[36]



Slika 7.4.3. Otvorena glava sa AVC kontrolom (lijevo) i bez AVC kontrole (desno).[36]

Orbitalne glave za zavarivanje cijevi u cjevne stjene se koriste za izradu i reparaturu izmjenjivača topline različitih izvedbi i namjena. Uobičajno je da cjevne stjene posjeduju više stotina do desetak tisuća cijevi koje se moraju zavariti (cijevni snop). Ukoliko bi se to odrađivalo ručno za zavarivače bi to predstavljalo izuzetan napor, dok i sama veličina cijevi, mali razmak između njih i slično uvelike otežavaju rad. Zavarivač koji posjeduje najbolju vještinu i volju ne može u ovom slučaju dati jednoliku kvalitetu i visoku produktivnost. Kako su svi zavareni spojevi jednaki, operater mora samo poštovati pravila rada koji će davati konstantnu kvalitetu i visoku produktivnost.[36]



Slika 7.4.4. Glava za orbitalno zavarivanje cijev-cijevna stjena.[38]

Bitna je činjenica da kroz korištenje sistema za orbitalno zavarivanje lako se može postići sposobnost izrade zavarenih spojeva visoke kvalitete uz besprijekornu ponovljivost te kvalitete. Ona se može postići samo ako održavamo konstantnima sve ulazne parametre.[36]

Uobičajeni parametri zavarivanja koji se programski određuju su:[36]

- plin prije i poslije,
- struja paljenja i zagrijavanja,
- impulsna i osnovna struja,
- brzina zavarivanja,
- brzina i način dodavanja dodatnog materijala,
- vrijednost AVC kontrole,
- parametri njihanja,
- sva pripadajuća vremena.

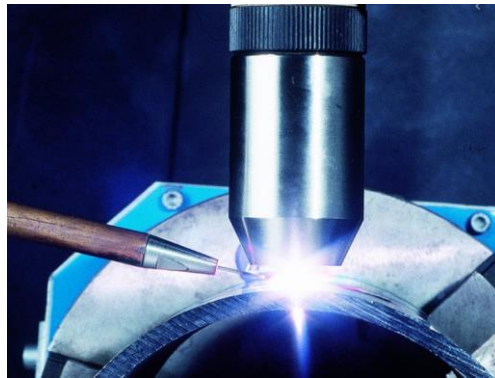
Pravila korištenja orbitalne opreme za zavarivanje i način rada nikada se ne smiju kršiti, mjenjati ili oblikovati po volji tijekom rada. Takvim načinom rada neće se postići željeni rezultati, a oprema za orbitalno zavarivanje bit će potpuno bez svrhe.[36]

Ukratko, više je razloga za uporabu opreme za orbitalno zavarivanje:[36]

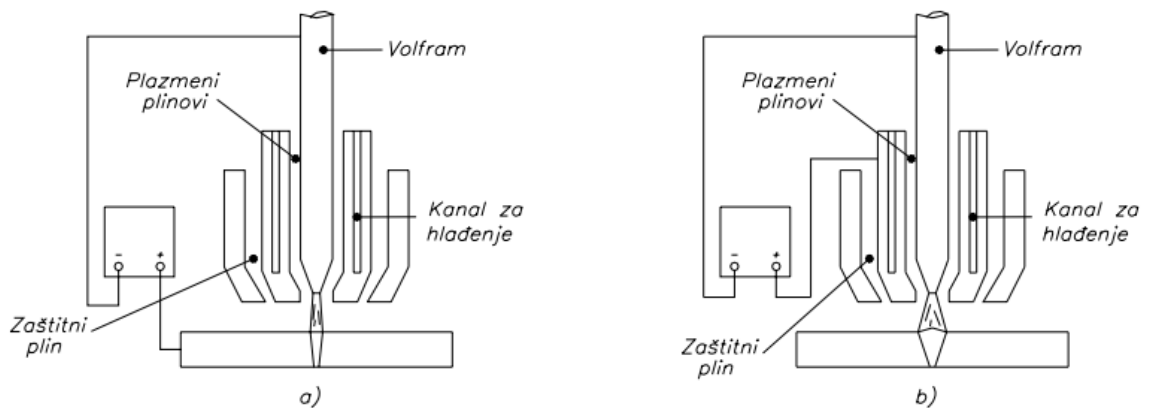
- produktivnost,
- kvaliteta i ponovljivost,
- ulaganje u nivo zavarivačkih znanja i vještina,
- fleksibilnost.

8. Plazma zavarivanje

Plazma zavarivanje je jedan od novijih postupaka zavarivanja taljenjem. Ukratko rečeno plazma zavarivanje ili skraćenica PAW (eng. Plasma Arc Welding) je postupak zavarivanja zaštićenom volframovom elektrodom uz zaštitu plina koju karakterizira vrlo uzak plazmeni luk. Plazma zavarivanje samo po sebi vrlo je slično TIG-u. Osnovna razlika je u tome što je kod plazma zavarivanja netaljiva volframova elektroda uvučena u sapnicu. Plazma je plin koji je zagrijan do ekstremno visokih temperatura ($50\ 000^{\circ}\text{C}$) i ioniziran tako da postane električki vodljiv. Za potrebe zavarivanja plazma se dobiva tlačanjem plina kroz električni luk, a zatim se plazmeni plin vraća u stabilno stanje predajući zavarivanom dijelu toplinsku energiju preuzetu iz električnog luka. Električni luk se može uspostaviti između elektrode i zavarivanog dijela (preneseni luk) ili između elektrode i sapnice (nepreneseni luk).[39]



Slika 8.1. Izgled plazma zavarivanja u praksi.[40]

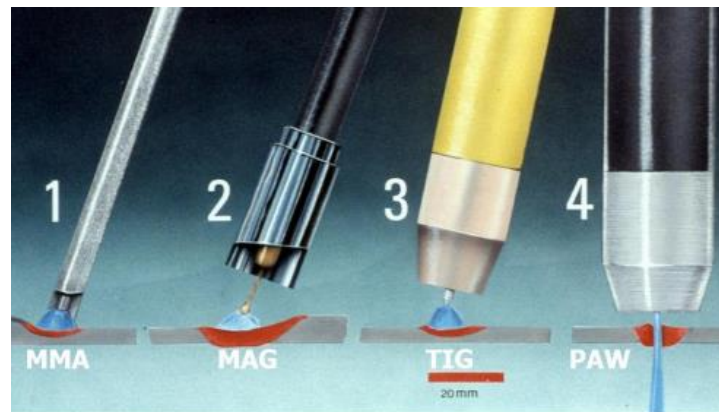


Slika 8.2. Shematski prikaz plazme sa prenesenim a) i neprenesenim lukom b) na osnovni materijal.[41]

Prvi način rada, pri kojem električni luk uspostavlja između elektrode i zavarivanog dijela, sličan je običnom zavarivanju netaljivom elektrodom, ali je njegova glavna prednost u tome što je luk mnogo uži, bolji je prijenos topline, veće je prodiranje i veća je brzina zavarivanja. Drugim

načinom rada, pri kojem se luk uspostavlja između elektrode i sapnice, toplina se na zavarivani dio prenosi samo plazmom, a velika mu je prednost što zavarivani dio nije uključen u strujni krug i ne mora biti električni vodič. Kao plazmeni plin najčešće se upotrebljava argon u količini od 0,5 do 2,5 L/min, a za zaštitu plazmenog mlaza i mjesta zavarivanja od okolne atmosfere najčešće služe inertni plinovi argon, helij ili njihova smjesa.[41]

Uređaj za plazma zavarivanje sastoji se od izvora struje, boca plazmenog i zaštitnog plina i plazma pištolja. Uglavnom se koristi istosmjerni izvor struje sa strmom padajućom statičkom karakteristikom i vrlo visokim naponom (100-400 V) potrebnim za namještanje električnog luka na povišenom tlaku. Sam plazma pištolj sličan je onome za TIG zavarivanje, ali je volframova elektroda pozicionirana unutar pištolja za zavarivanje, luk plazme je odvojen od zaštitnog plina i istisnut kroz bakrenu sapnicu koja oblikuje luk. Zahvaljujući uskoj sapnici, usmjereni plazmeni mlaz uži je od konvencionalnog TIG električnog luka. Zbog konstrukcije pištolja u kojem su zaštitni i plazma plin odvojeni, uređaj za plazma zavarivanje može se spajati i na izvor struje za TIG zavarivanje. Tijekom vodenog hlađenja stupa električnog luka u otvoru dolazi do suženja luka, što rezultira povećanjem gustoće snage mlaza plazme i temperatura poraste na 10 000-20 000 K. Koncentrirani mlaz vrućih plazmenih plinova zatim tali osnovni materijal i oblikuje talinu zavarenog spoja.[41] Na slici 8.3. prikazana je usporedba 4 konvencionalna postupka zavarivanja, može se primjetiti da se plazma postupkom može ostvariti najuži mlaz.



Slika 8.3. Usporedba 4 konvencionalna postupka zavarivanja.[39]

Iako se plazma rijetko koristi za zavarivanje ona je jako povoljna za automatizaciju i robotizaciju zbog svog velikog područja rada. Moderni izvori struje i pripadajuća oprema za plazma zavarivanje u kombinaciji sa odgovarajućim stupnjem automatizacije mogu bitno poboljšati produktivnost i samu kvalitetu zavarivanja. Napredak u tehnologiji plazma zavarivanja uglavnom se fokusira na dobivanje veće brzine zavarivanja i veće penetracije uz manje deformacije.[8]

Zavarivanje plazmom se još nažalost rijetko pojavljuje u praksi unatoč brojnim prednostima. Neke od prednosti plazma zavarivanja su:[42]

- manja opasnost od kontaminacije i dulji vijek trajanja.
- razmak između elektrode i osnovnog materijala nije kritična veličina kao kod TIG-a.
- daje kontinuiran i stabilan zavar bez potrebe za automatskom kontrolom luka.
- pogodno za zavarivanje tankih stijenki, žica i minijaturnih komponenata bez pojave iskri.
- zona utjecaja topline je uska s paralelnim rubovima što smanjuje kutne deformacije
- smanjuje „lutanje“ luka, zavaruje mjesto na koje je cilj.
- nakon starta upravljačkog luka gubi se potreba za VF uređajem koji može oštetiti okolne elektroničke uređaje.
- 3 puta gušći luk od onog kod TIG-a, bitno smanjuje distorziju, omogućava uže zavare i veću brzinu.
- izuzetno kratki i precizni zavari omogućuju zavarivanje finih žica, limova, itd.,
- dobra kontrola pozicioniranja luka na osnovnom materijalu.

Neki od nedostataka procesa plazma zavarivanja su sljedeći:[42]

- skuplja, kompleksnija i robusnija oprema (hlađenje), nemogućnost zavarivanja u tijesnim prostorima. Pištolji moraju imati vodeno hlađenje,
- na stabilnost također utječu plazmeni i zaštitni plin (argon) čija je potrošnja bitno veća u odnosu na druge postupke,
- uske tolerancije pripreme spoja,
- ukoliko je promjer sapnice preuzak, vijek trajanja joj se bitno smanjuje,
- iako se koristi samo za inicijaciju upravljačkog lika, nužan je visokofrekventni generator.

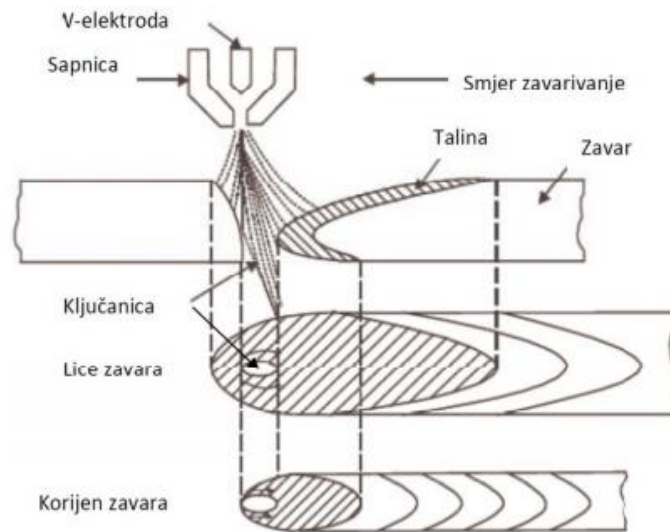
Ovisno o promjeru sapnice i protoku plina možemo razlikovati mikroplazma, plazma zavarivanje taljenjem i plazma zavarivanjem protaljivanjem tj. ključanicom. Osnovna razlika između ovih postupaka je raspon jakosti struje.

Mikroplazma zavarivanje primjenjuje se za zavarivanje vrlo tankih materijala od 0,05 mm do 1,6 mm, pretežno bez dodatnog materijala. Tu je i prednost koju mikroplazma ima pred TIG zavarivanjem, a to je mogućnost zavarivanja tanke folije s intenzitetom struje od svega nekoliko ampera, čak i manje od jednog ampera. Današnji izvori struje koji se koriste za TIG zavarivanje imaju padajuću vertikalnu karakteristiku pri niskim strujama. To znači da nema točnih sjecišta u radnoj točki, što rezultira nestabilnim lukom pri radu sa niskim strujama. Kod mikroplazma zavarivanja se ovaj problem ne javlja zbog upotrebe vrlo uskog plazmenog mlaza. Mikroplazma zavarivanje se uglavnom koristi za sitne popravke svih vrsta, a u industriji se posebice upotrebljuje za reparaturu alata i kalupa. Za precizna zavarivanja preferira se automatizirano vođenje pištolja jer je vrlo teško izvesti takav zavar ručno. Kod mikroplazma zavarivanja jakost struje kreće se u rasponu od 0,1 A do 15 A, u nekim slučajevim moguće je čak do 50 A.[39]

Kod plazma zavarivanja taljenjem raspon jakosti struje kreće se od 15 A do 100 A. Ovo područje zavarivanja je najbližije TIG-u. Ovim postupkom mogu se izvesti precizni i visoko kvalitetni zavari materijala debljine od 0,5 mm do 3,2 mm. Razlog tome je dobar prijenos i pouzdana stabilnost luka. Međutim, kvalitetan zavar kod plazma zavarivanja taljenjem može se ostvariti jedino s preciznom kontrolom jakosti struje i odgovarajućom širinom otvora unutarnje sapnice kako bi se izbjeglo pregrijavanje vrha sapnice. Dodavanje dodatnog materijala može biti ručno ili strojno.[39]

8.1. „Keyhole“ plazma zavarivanje

Kod plazma zavarivanjem protaljivanjem tj. „ključanicom“ radno područje se kreće od 100 A na više te zbog toga ima dvije prednosti koje se posebno daju iskoristiti, a to su visoka brzina zavarivanja i duboka penetracija. Upravo se zbog ovih karakteristika ovaj postupak zavarivanja može svrstati u visokoučinske postupke zavarivanja. Za zavarivanje metodom ključanice nije potrebno pripremiti spoj žljebljenjem zbog svojstva velike penetracije ovog postupka koja se dobiva potpunim protaljivanjem u jednom prolazu. Zbog karakteristike postupka (veća brzina, jaka struja) obavezno je mehanizirano vođenje.[39] Stvaranje tzv. ključanice, odnosno rupe na šavu tokom zavarivanja, postiže se uslijed djelovanja plazmenog mlaza, kao što je prikazano na slici 8.1.1.



Slika 8.1.1. Shematski prikaz plazma zavarivanja ključanicom.[39]

Površinska napetost prisiljava rastaljeni metal da teče oko plazmenog mlaza, stvarajući na taj način rupu u obliku ključanice i da se potom slijeva samostalno formirajući korijen žlijeba zavara. Na taj se način postižu izrazito visoke brzine s kvalitetnim zavarom. Energija se zbog stvaranja snažnog luka, koji je nalik laserskoj zruci, ne raspodjeljuje samo po površini već po čitavoj dubini metala. Zbog toga se na taj način mogu provariti debljine materijala od 1,5 mm do 12 mm, ovisno o materijalu koji se zavaruje. Ako se zavaruje samo u jednom prolazu običaj je ograničiti penetraciju na 6 mm. Ovim postupkom moguće je zavarivati sve vrste metala, no pretežito se upotrebljava za nehrđajuće čelike.[39]

Kod ove je tehnike potrebno obratiti izrazitu pozornost na parametre kako bi se održao efekt ključanice i stabilnost šava. Zbog toga je metoda ključanice primjerena samo u mehaniziranim uvjetima. Prilikom plazma zavarivanja postoji puno parametara koje je potrebno podesiti kako bi se osigurao stabilan proces što svakako zahtijeva dobro uvježbane operatere/zavarivače.[39]

Najvažniji parametri su sljedeći:[39]

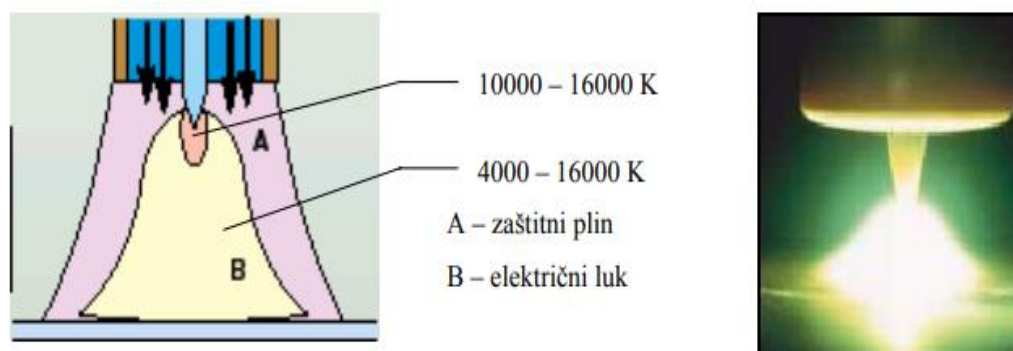
- promjer unutarnje sapnice (najčešće 0,4 mm do 0,6 mm),
- promjer vanjske sapnice (ovisno o obliku i primjeni),
- jakost struje zavarivanja,
- promjer volframove elektrode,
- protok plazmenog plina,
- protok i vrsta zaštitnog plina,

- brzina zavarivanja,
- nagib i udaljenost pištolja,
- frekvencija i jakost osnovne i vršne struje,
- predprotok i postprotok plina,
- početni i završni uspon struje,
- brzina dodavanja žice i intenzitet dodavanja praška.

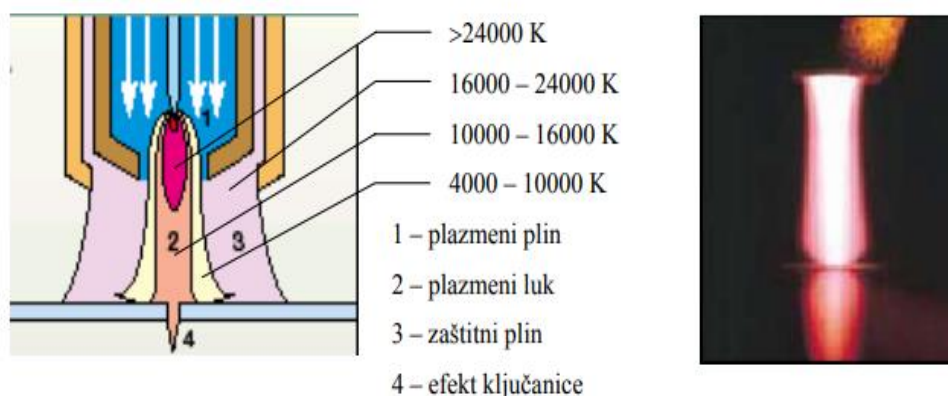
Ograničenja koja se javljaju pri plazma zavarivanju s efektom ključanice su:[39]

- postupak zavarivanja ima više parametara koji mogu imati uske radne tolerancije,
- potrebno je veće umijeće radnika prilikom ručnog zavarivanja debljih materijala,
- potrebno je voditi veću brigu o održavanju pištolja da bi se osiguralo kvalitetno zavarivanje.

Plazmeni luk kod plazma zavarivanja protaljivanjem karakteriziraju izrazito visoke temperature koje razvija, a energija koja se pri tome oslobađa djeluje u usko koncentriranom području na osnovnom materijalu (slika 8.1.3.). Za razliku od TIG postupka zavarivanja, kod kojeg je najviše temperaturno područje preblizu volframovoj elektrodi, a predaleko radnom komadu da bi moglo biti iskorišteno (slika 8.1.2.). Upravo zbog toga dolazi do povećanja produktivnosti jer ne dolazi do nepotrebnog rasipanja energije po cijelom zavarivanom komadu i vrijeme zavarivanja je bitno kraće.[41]

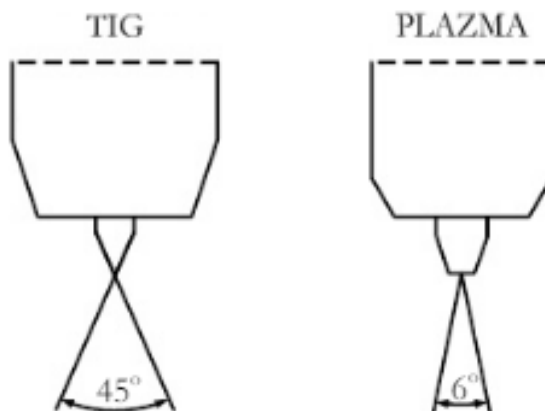


Slika 8.1.2. Djelovanje luka od 150 A i 14 V pri TIG zavarivanju na osnovni materijal.[41]



Slika 8.1.3. Djelovanje plazmenog luka od 150 A i 28 V na osnovni materijal.[41]

Za razliku od TIG-a kod kojega luk koji napušta mlaznicu ima čunjasti oblik (veći kut), kod plazma zavarivanja je taj oblik pravilniji, gušći i nalikuje stupu ili zruci (manji kut). Na slici 8.1.4. prikazana je usporedba širine luka kod TIG i „keyhole“ plazma postupka zavarivanja. Takva karakteristika luka dozvoljava veće varijacije u udaljenosti između pištolja i osnovnog materijala pa kod ručne upotrebe zavarivaču ostavlja više slobode za promatranje i kontroliranje zavara. Još jedna prednost uvučene elektrode je u tome što je zaštićena od kontaminacije i ima puno duži radni vijek od one kod TIG-a. Električni luk je formiran obilno hlađenom sapnicom izrađenom od bakra, tj. luk se ne oblikuje slobodno (za razliku od TIG postupka).[43]



Slika 8.1.4. Usporedba širine luka kod TIG i „keyhole“ plazma postupka zavarivanja.[43]

Lakše dodavanje dodatnog materijala je omogućeno zbog manje osjetljivosti na udaljenost elektrode od radnog komada, odnosno dužinu električnog luka. Tako je kod iste jakosti struje od 10 A, dužina električnog luka TIG postupka 1,5 mm, a plazme 6,4 mm. Slika 8.1.5. prikazuje usporedbu duljine električnog luka između TIG i plazma zavarivanja pri jakosti struje od 10 A. [43]

TIG**PLAZMA**

Slika 8.1.5. Usporedba duljine električnog luka (10 A).[43]

Kao što je već ranije spomenuto kod zavarivanja metodom ključanice nije potrebna priprema spoja žljebljenjem, brušenjem ili nekim drugim načinom pripreme spoja za zavarivanje. Time se minimalizirani troškovi koji su potrebni za pripremu spoja za zavarivanje i dodatni materijal. To je svojstvo velike penetracije ovog postupka koja se dobiva potpunim protaljivanjem u jednom prolazu. Budući da je sva energija koncentrirana na usko područje zavarenog spoja čime je i zona utjecaja topline uska, zanemarive su i deformacije uslijed zavarivanja. Osim toga zavari su estetski dotjerani, bez pogrešaka u zavarenom spoju. Na slici 8.1.6. prikazana je usporedba pripreme spoja za zavarivanje između plazme i konvencionalnih postupaka zavarivanja.[41]

Debljina OM	REL	TIG	PLAZMA
3 mm			
8 mm			
> 8 mm			

Slika 8.1.6. Prikaz pripreme spoja za zavarivanje pri različitim postupcima zavarivanja.[41]

Kao primjer usporedbe brzine zavarivanja možemo uzeti čelični lim debljine 5 mm, postupcima REL, TIG i plazma:[41]

- pri REL zavarivanju je potrebna priprema spoja za zavarivanje brušenjem (slika 8.1.6.), a samo zavarivanje je u dva prolaza, brzinom zavarivanja 15 do 20 cm/min,
- pri TIG zavarivanju također je potrebna priprema spoja za zavarivanje brušenjem (slika 8.1.6.), zavarivanje je u dva prolaza, brzinom zavarivanja 10 cm/min,
- pri plazma zavarivanju s efektom ključanice zavarivanje se izvodi bez pripreme spoja u jednom prolazu, brzinom zavarivanja 40 cm/min.

Još neke od prednosti postupka zavarivanja plazmom s efektom ključanice u odnosu na TIG postupak zavarivanja su:[39]

- plazmeni plinovi koji struje nad otvorenom ključanicom pomažu u uklanjanju plinova koji bi pod drugim okolnostima bili zarobljeni u rastaljenom metalu i uzrokovali poroznost,
- simetrična zona linije staljivanja zavarenog spoja umanjuje sklonost poprečnim deformacijama,
- veća dubina penetracije omogućuje smanjenje broja slojeva – vrlo često zavareni spoj može se izvesti u jednom prolazu,
- najčešće se koriste sučeljeni spojevi što znatno umanjuje troškove pripreme spoja.

9. Lasersko zavarivanje

LASER je skraćenica od skupa riječi Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation što u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. To je emisija fotona koju proizvodi atom ili molekula kada na njih djeluje drugi foton. U odnosu na druge izvore svjetlosti laserska svjetlost je koherentna, usmjerena i monokromatska. Iz tog razloga se laserska svjetlost može fokusirati na točku čiji je promjer izrazito malen ($\ll 1$ mm) što kao rezultat daje veliku gustoću unesene energije. Laseri za zavarivanje razlikuju se po vrsti aktivnog medija te samim time i valnoj duljini što ovisi o njihovoj primjeni u industriji. Danas je laser prisutan u svim granama industrije od mikroelektronike do brodogradnje. Ovom tehnikom moguće je zavarivati skoro sve vrste metala kao i plastične mase.[44]

Zavarivanje laserom nalazi primjenu kod:[44]

- laganih i tankostijenih dijelova i konstrukcija, ali i za dijelove većih debljina,
- dijelova osjetljivih na unos velike količine topline,
- dijelova obrađenih na mjeru bez naknadne obrade.

Na slici 9.1 prikazan je primjer laserskog zavarivanja.



Slika 9.1. Primjer laserskog zavarivanja.[45]

Tehnika laserskog zavarivanja je jednostavna i točna, lako je prilagodljiva i nema direktan kontakt sa obratkom. Postiže se kvalitetan zavar, visoka fleksibilnost i produktivnost te jednostavna automatizacija i robotizacija procesa. Zbog velike brzine ohlađivanja, kod zavarivanja čelika, dolazi do velikog porasta tvrdoće u području zavarenog spoja. To je posljedica uske zone

utjecaja topline, malih dimenzija zavara i sitnozrnate mikrostrukture. Time se lasersko zavarivanje značajno razlikuje od konvencionalnih postupaka zavarivanja.[44]

Glavne prednosti ovakve vrste zavarivanja su:[44]

- visoka gustoća snage odnosno mali unos topline,
- uska zona utjecaja topline,
- male deformacije radnog komada,
- velika brzina zavarivanja,
- visoka kvaliteta spoja,
- visoka fleksibilnost.

Nedostaci su:[44]

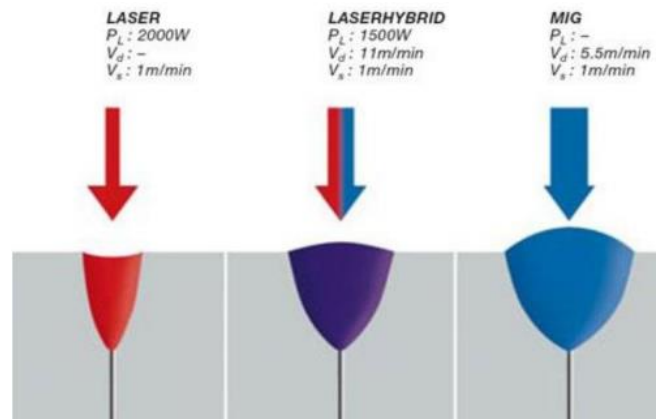
- visoki investicijski troškovi,
- složena tehnika stezanja radnih komada,
- posebni sigurnosni zahtjevi,
- laserski izvor nije prijenosan.

9.1. Laser MIG „hybrid“ zavarivanje

„Laser hybrid“ zavarivanje prvi put se javlja 1970-ih godina, ali je tek nedavno počela njegova komercijalna upotreba u raznim granama industrije. Postoje tri glavne vrste hibridnog zavarivanja, a razlika je u električnom luku koji koriste: TIG postupak, mlazom plazme i MIG postupak. Dok je laser-TIG postupak bio prvi koji je proučavan i pokušavao se upotrijebiti što bolje u industriji, ipak s druge strane je laser-MIG bio taj postupak koji je postao najčešće primjenjivani u zavarivanju. Hibridni postupci zavarivanja su takvi postupci koji imaju kombinaciju laserskog zavarivanja s nekim drugim procesom što znači da laserska zraka i električni luk djeluju istovremeno u jednoj zoni zavara te utječu jedan na drugog i međusobno su kompatibilni.[3]

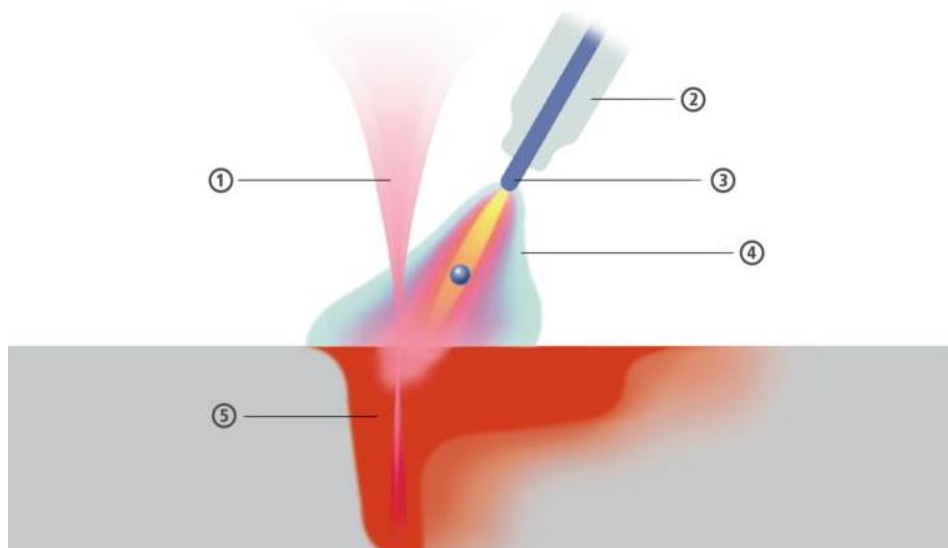
Dok je klasično lasersko zavarivanje svakako pogodno za vrlo visoke brzine zavarivanja, kao manu ima mali promjer zavara što znači da je upotreba i dalje vrlo ograničena. S druge strane, MIG postupak zavarivanja se odlikuje dobrim promjerom zavara, ali ne može dostići potrebne brzine. Laser MIG hybrid tehnologija zavarivanja objedinjava dobre osobine lasera i MIG postupka zavarivanja te ih iskorištava na najbolji mogući način. Laserskim zavarivanjem se postiže

izuzetno velika brzina zavarivanja i koncentracija energije na veoma maloj površini, dok MIG postupak omogućava kvalitetnu zavarivačku kupku i razlijevanje rastopljenog materijala. Ova kombinacija za rezultat ima veliku brzinu zavarivanja, izuzetnu penetraciju, smanjeni unos energije, manju zonu utjecaja topline, izvanredno pokrivanje spoja, malu potrošnju energije i visoku produktivnost cijelog procesa.[3]



Slika 9.1.1. Djelovanje laserskog snopa, MIG zavarivanja i kombinirano djelovanje na mjesto zavara.[3]

Kada laserska zraka pogađa površinu materijala, to mjesto se zagrijava na temperaturu isparavanja što rezultira dubokom i uskom penetracijom. U laser MIG hybrid procesu upotreba skupe laserske energije je ograničena upravo na duboku penetraciju dok se preostala potreba za energijom dobiva iz jeftinijeg MIG procesa. Iz razloga što oba procesa fokusiraju svoju energiju na istu zonu, dubina zavara i brzina zavarivanja su značajno povećane u odnosu na oba procesa odvojeno. Gustoća energije koju stvara zraka u svom protoku ima nešto više od 100 MW/cm^2 . [3]



Slika 9.1.2. Princip rada laser MIG hybrid zavarivanja: 1) laserska zraka, 2) mlaznica, 3) elektroda, 4) električni luk, 5) penetracija.[46]

Nedavne studije pokazale su da lasersko-MIG zavarivanje s kompozitnim izvorom topline ima očite prednosti kod srednjeg i teškog zavarivanja ploča. Podešavanjem relativnog položaja luka i lasera, metoda zavarivanja može učinkovito poboljšati sposobnost zavarivanja, poboljšati stvaranje zavara, a istodobno ulazna energija može prilagoditi brzinu hlađenja, time se poboljšava mikrostruktura. Pod interakcijom lasera i luka postupak zavarivanja postaje stabilniji, a brzina zavarivanja povećava se povećavajući penetraciju. Kod zavarivanja, ulaz topline je relativno malen, što znači niže napetosti i deformacije nakon zavarivanja. To također utječe i na smanjeno vrijeme stezanja, pozicioniranja, primjenu toplinskih obrada nakon zavarivanja i slično. Osim toga, istaknutija značajka ove metode je da može relativno stabilno ispuniti žicu, što olakšava poboljšanje metalurških svojstava i mikrostrukture zavarivanja.[47]

Ovakav način zavarivanja pogoduje za sektore u kojima se velika ulaganja mogu brzo povratiti. Tu spadaju automobilska industrija i njeni dobavljači, kao i proizvođači kontejnera, cjevovoda i slično. Pomoću ovog visokoučinskog postupka zavarivanja može se automatizirati spajanje različitih dijelova aluminijskih i čelika brzinom do osam metara u minuti. Ova tehnologija se posebno povoljno u aluminijskim primjenama, gdje su tolerancije komponenata velike i troškovi pripreme za lasersko zavarivanje visoki. Prednosti relativno niskog unosa topline posebno su vidljive kada se spajaju materijali visoke čvrstoće gdje ne dolazi do skoro pa nikakvog gubitka čvrstoće.[47]

10. Zaključak

Zavarivanje je jedan od najraširenijih i najčešće primjenjivanih postupaka spajanja materijala. Ljudi su kroz povijest tražili najlakši i najjednostavniji način spajanja metala, a razvijanje i potreba za novim boljim tehnologijama nastavlja se do danas. Iako konvencionalni postupci zavarivanja zbog svoje široke rasprostranjenosti, nižih cijena i same jednostavnosti korištenja još uvijek imaju značajnu ulogu u zavarivanju sve teže mogu konkurirati modernim postupcima zavarivanja u pogledu efikasnosti, fleksibilnosti, produktivnosti i kvalitete. Nerijetko povećanje produktivnosti dovodi do nedostatka kvalitete. Ubrzanim razvojem tehnologije i konstantnim poboljšanjima radi se na uklanjanju tih nedostataka. Iz tog razloga se na području zavarivanja javljaju visokoučinski i modificirani postupci zavarivanja čiji je cilj ispuniti zahtjeve za kvalitetu i pouzdanost zavarenog spoja uz prihvatljivu cijenu zavarene konstrukcije i povećanom produktivnosti.

U Varaždinu, 25.9.2019., _____

11. Literatura

- [1] http://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/zavarivanje_i_srodni_postupci.pdf, dostupno 24.06.2019.
- [2] Gojić M., Tehnike spajanja i razdvajanja, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, 2008.
- [3] I.Čorak: Visokoučinski postupci zavarivanja, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2015.
- [4] <http://tehnika.lzmk.hr/zavarivanje/>, Portal hrvatske tehničke baštine, dostupno 24.06.2019.
- [5] D.Ilić: Aluminotermijsko zavarivanje tračnica, Završni rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [6] B.Očko: Primjena robota za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Završni rad, FSB, Zagreb, 2018.
- [7] M.Klobučar: Teorijske i praktične osnove MIG/MAG postupka zavarivanja, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2016.
- [8] D.Delač: Klasifikacija postupaka zavarivanja prema HRN EN ISO 4063, Završni rad, FSB, Zagreb, 2014.
- [9] B.Bauer: Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje, Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2006.
- [10] M.Horvat, V.Kondić: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Tehnički glasnik, br. 6, veljača 2012, str. 137-140
- [11] M.Horvat, V.Kondić, D.Brezovečki: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, br. 8, ožujak 2014., str. 288-294
- [12] M.Jurica: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [13] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/6.pdf, dostupno 08.09.2019.
- [14] <https://www.thefabricator.com/article/arcwelding/a-new-spin-on-welding>, dostupno 18.09.2019.
- [15] J.Bilandžija: Značajke modernih izvora struje za MAG zavarivanje, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2016.
- [16] H.Jakoplić: Usporedba konvencionalog MIG/MAG i suvremenog STT postupka zavarivanja, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2016.
- [17] <https://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf> dostupno 08.09.2019.
- [18] <https://www.semanticscholar.org/paper/Assessing-the-Benefits-of-Surface-Tension-Transfer%20%AE-DeRuntz/88efa20d834c74b9fb9fde2d7a9204f699ee98d2> dostupno 08.09.2019.

- [19] M.Jović: RMT zavarivanje, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2017.
- [20] <https://reiz-schweisstechnik.de/media/PDF/wm037500dewmforcearcproduktinformation102006.pdf> dostupno 18.09.2019
- [21] I.Garašić, S. Kralj, Z. Kožuh: Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja, Strojevi i oprema za zavarivanje (podloga), FSB, Zagreb, 2013.
- [22] <http://www.smenco.com.au/aluminium-welding/mcf-seamweld-fronius/> dostupno 08.09.2019.
- [23] <https://servus.hr/strucni-clanci/razvoj-visokoucinskog-zavarivanja-celika-debele-limove-primjenom-zakopanog-elektricnog-luka-velike-struje/> dostupno 12.9.2019.
- [24] J. Hedegård, E. Tolf, J. Andersson: Tandem-MIG/MAG zavarivanje sa velikim uvarivanjem, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, siječanj 2012., str. 21-33
- [25] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Tehnički glasnik, br. 8, ožujak 2014., str. 426-432
- [26] <http://www.networkedblogs.com/blog/Engineeringhelp/> dostupno 08.09.2019.
- [27] <https://coursehorse.com/nyc/classes/art/metal-working/welding/tig-welding1> dostupno 08.09.2019.
- [28] http://repozitorij.fsb.hr/1246/1/10_02_2011_Zavrsni_rad_-_Dino_Branilovic.pdf dostupno 08.09.2019.
- [29] I. Samardžić, D. Bogovac, T. Jorgić, K. Kovačić: Primjena TIG postupka zavarivanja u spajanju pozicija, Tehnički glasnik, br. 9, veljača 2015., str. 202-208
- [30] <https://weldinghelmetpros.com/how-to-weld-aluminium> , dostupno 08.09.2019.
- [31] <https://servus.hr/strucni-clanci/tip-tig-postupak-zavarivanja/> , dostupno 6.7.2019.
- [32] https://ijetae.com/files/Volume4Issue8/IJETAE_0814_25.pdf , dostupno 6.7.2019.
- [33] D.Pongrac: Utjecaj aktivacijskog premaza na mehanička i korozivna svojstva zavarenog spoja , Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [34] <http://www.k-tig.com/what-is-k-tig> , dostupno 08.09.2019.
- [35] <https://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/orbital-systems/Pages/orbital-systems.aspx> , dostupno 08.09.2019.
- [36] D.Ćordaš: Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom, Seminarski rad, Pula, 2007.
- [37] <https://www.cromatec.hr/hr/kategorija-proizvoda/obrada-cijeve/orbitalno-zavarivanje>, dostupno 1.7.2019.
- [38] <https://www.cromatec.hr/hr/proizvod/orbitalum-tx-38p> , dostupno 5.7.2019.

- [39] I.Hajdu: Primjena aktivacijskog premaza pri plazma zavarivanju austenitnih čelika, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [40] <https://www.oerlikon-welding.com/processes/plasma-welding-process> dostupno 08.09.2019.
- [41] N.Dandić: Primjena CNC automata za zavarivanje čeličnih naplataka plazma postupkom, Diplomski rad, FSB, Zagreb
- [42] http://repositorij.fsb.hr/1724/1/13_02_2012_Zavrсни_rad_-_Marin_Corluka.pdf , dostupno 08.09.2019.
- [43] <https://www.scribd.com/doc/136640769/plazma-zav1>, dostupno 3.8.2019.
- [44] L.Cimera: Zavarivanje laserom, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2015.
- [45] <https://www.processindustrymatch.com/metals-mining/1202-welding-trumpf-laser-welding-technology-days> , dostupno 7.8.2019.
- [46] <https://www.fronius.com/en-in/india/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-high-performance/laserhybrid/laserhybrid> , dostupno 9.8.2019.
- [47] <http://hr.mrjlaser.com/info/mig-hybrid-welding-30568242.html> , dostupno 9.8.2019

Popis slika

Slika 1.1. Podjela postupka zavarivanja pritiskom.[2].	7
Slika 1.2. Podjela postupka zavarivanja taljenjem.[2].	8
Slika 4.1. Shema MIG/MAG postupka zavarivanja.[7]	12
Slika 4.1.1. Shema prijenosa metala kratkim spojem.[11].	15
Slika 4.2.1. Shema prijenosa metala štrcajućim lukom.[11]	16
Slika 4.3.1. Shema prijenosa metala mješovitim lukom.[11].	17
Slika 4.4.1. Shema prijenosa metala pulsirajućim lukom.[11].	18
Slika 4.5.1. Shema prijenosa metala rotirajućim lukom.[11]	20
Slika 4.5.2. Izgled rotacije žice kod zavarivanja rotirajućim lukom.[14].	20
Slika 4.5.3. Izgled zavara dobivenog rotirajućim lukom.[14]	21
Slika 5.1.1. Prijenos kapljice metala tijekom STT postupka zavarivanja.[17].	22
Slika 5.1.2. Dinamička karakteristika struje kod konvencionalnog MIG/MAG postupka.[18].	23
Slika 5.1.3. Dinamička karakteristika struje kod STT postupka.[18].	23
Slika 5.2.1. Proces odvajanja kapljice kod FastROOT postupka.[21]	25
Slika 5.3.1. Shema povratnog gibanja žice kod CMT postupka.[7].	27
Slika 5.4.1. Prikaz kutnog spoja izvedenog RMT postupkom na materijalu ST 37 debljine 8 mm.[10]	28
Slika 5.5.1. Utjecaj negativnog polariteta pri spajanju aluminijske legure (AC MIG).[7].	29
Slika 5.6.1. Usporedba dinamičke karakteristike (a) kratkog spoja i (b) ForceArc-a.[11]	30
Slika 5.6.2. Izgled zavara (navara) kod konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja (a) i ForceArc postupkom zavarivanja (b).[20].	30
Slika 5.6.3. Rendgenska snimka zavara kod konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja (lijevo) i ForceArc postupkom zavarivanja (desno).[20].	30
Slika 5.7.1. Prikaz metode zakopanog luka.[23]	31

Slika 5.7.2. Shematski prikaz usporedbe konvencionalnog načina zavarivanja i metode zakopanog luka. [23]	32
Slika 5.7.3. Shematski prikaz usporedbe konvencionalnog MAG zavarivanja i metode zakopanog luka (D-Arc).[23].....	32
Slika 5.7.4. . Mehanizam stabilizacije zakopanog luka pomoću niskofrekventno modulirane kontrole napona. [23].....	33
Slika 5.8.1. Realni prikaz prijenosa metala kod tandem zavarivanja. [7]	34
Slika 5.8.2. Utjecaj razmaka žice na zavar: a) i b) isto podešeni parametri zavara, ali različiti razmaci žice, c) optimalno podešeni parametri za maksimalno uvarivanje [24].....	35
Slika 6.1. Shema TIG postupka zavarivanja.[26]	36
Slika 6.2. a) Uspostava električnog luka visokofrekventnim generatorom; b) Električni luk.[27].....	36
Slika 6.3. Shematski prikaz standardne opreme za TIG zavarivanje.[25].....	37
Slika 6.4. Shematski prikaz procesa u električnom luku kod TIG zavarivanja.[28]	38
Slika 6.5. Izgled zavara aluminija TIG postupkom zavarivanja.[30].....	38
Slika 7.1.1. Princip rada TIP TIG zavarivanja.[8].....	40
Slika 7.1.2. Usporedba TIP TIG postupka s vrućom i hladnom žicom.[8]	41
Slika 7.1.3. Usporedba okvirnih ukupnih troškova za 1 m zavara za TIP TIG i srodne postupke.[31].....	41
Slika 7.2.1. Usporedba dubine protaljivanja kod konvencionalnog TIG postupka (lijevo) i aktivacijskog TIG postupka zavarivanja (desno).[32]	43
Slika 7.2.2. Utjecaj aktivirajućeg praška na protaljivanje kod TIG zavarivanja.[8].....	44
Slika 7.3.1. Usporedni prikaz konvencionalnog TIG (lijevo) i K-TIG postupka (desno).[34]	46
Slika 7.4.1. Orbitalno TIG zavarivanje.[35]	47
Slika 7.4.2. Zatvorena glava za orbitalno zavarivanje.[37]	48
Slika 7.4.3. Otvorena glava sa AVC kontrolom (lijevo) i bez AVC kontrole (desno).[36]	48
Slika 7.4.4. Glava za orbitalno zavarivanje cijev-cijevna stjena.[38]	49

Slika 8.1. Izgled plazma zavarivanja u praksi.[40].....	51
Slika 8.2. Shematski prikaz plazme sa prenesenim a) i neprenesenim lukom b) na osnovni materijal.[41]	51
Slika 8.3. Usporedba 4 konvencionalna postupka zavarivanja.[39].....	52
Slika 8.1.1. Shematski prikaz plazma zavarivanja ključanicom.[39].....	55
Slika 8.1.2. Djelovanje luka od 150 A i 14 V pri TIG zavarivanju na osnovni materijal.[41].....	56
Slika 8.1.3. Djelovanje plazmenog luka od 150 A i 28 V na osnovni materijal.[41].....	57
Slika 8.1.4. Usporedba širine luka kod TIG i „key hole“ plazma postupka zavarivanja.[43].....	57
Slika 8.1.5. Usporedba duljine električnog luka (10 A).[43]	58
Slika 8.1.6. Prikaz pripreme spoja za zavarivanje pri različitim postupcima zavarivanja.[41].....	58
Slika 9.1. Primjer laserskog zavarivanja.[45].....	60
Slika 9.1.1. Djelovanje laserskog snopa, MIG zavarivanja i kombinirano djelovanje na mjesto zavara.[3]	62
Slika 9.1.2. Princip rada laser MIG hybrid zavarivanja: 1) laserska zraka, 2) mlaznica, 3) elektroda, 4) električni luk, 5) penetracija.[46]	62

SVK

MARKO SERMEK

Sveučilište Sjever

SVK

MARKO
SERMEK

SVUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU I SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, **Marko Sermek** pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom **Primjeri modificiranih i visokoučinskih postupaka zavarivanja** te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Marko Sermek

Sermek
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, **Marko Sermek** neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom **Primjeri modificiranih i visokoučinskih postupaka zavarivanja** čiji sam autor.

Student:
Marko Sermek

Sermek
(vlastoručni potpis)