Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima

Brumec, Gašpar

Undergraduate thesis / Završni rad

2010

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:853780

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

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

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Gašpar Brumec

ZAGREB, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVARIVANJE CJEVOVODA MAG POSTUPCIMA

ZAVRŠNI RAD

Gašpar Brumec

ZAGREB, 2010.

Zagreb, 16.12. 2010.

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradio samostalno koristeći se znanjem stečenim na fakultetu, kao i navedenom literaturom.

Gašpar Brumec

_____

Zahvala

Srdačno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu i asistentu dr.sc. Ivici Garašiću na savjetima i podršci pruženim tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarene konstrukcije i Laboratorija za zaštitu materijala na pomoći pri izvođenju eksperimentalnog dijela rada.

Sadržaj

Sadržaj I

SAŽETAK RADA VI

1. Uvod 1

2.MAG postupak zavarivanja 2

2.1. Osnove postupka 3

2.2. Načini prijenosa metala 7

2.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima 7

2.2.2. Prijenos metala mješovitim lukom 9

2.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom 10

3. STT Postupak zavarivanja 11

3.1. Karakteristike STT postupka zavarivanja 13

3.2. Parametri zavarivanja kod STT postupka 14

3.3. Princip rada STT postupka zavarivanja 16

4. FastRoot postupak zavarivanja 20

4.1. Karakteristike FastRoot postupka zavarivanja 21

4.2. Parametri zavarivanja kod FastRoot postupka 23

4.3. Princip rada FastRoot postupka zavarivanja 25

5. Usporedba STT i FastRoot postupka zavarivanja 29

6. Automatski postupak za orbitalno zavarivanje cijevi velikih promjera 32

6.1. Oprema za zavarivanje- sustav Pipeliner II 35

6.2. Izvor struje za zavarivanje Magnatech MPS 4000 38

6.2.1. Specifikacije uređaja za zavarivanje MPS 4000 41

6.3. Područja primjene automatskog sustava za orbitalno zavarivanje 42

7. Eksperimentalni rad 44

7.1. Plan pokusa 44

7.2 Osnovni materijal 47
7.3 Dodatni materijali 49
7.3.1. Zaštitna plinska mješavina 51
7.4. Zavarivanje korijenskog prolaza 52
7.5. Zavarivanje popune i završnog sloja 56
7.6. Vizualna kontrola izvedenih zavara 58
7.6. Izrezivanje i priprema epruveta 60
7.7. Savijanje epruveta 62
7.7.1. Analiza rezultata ispitivanja savijanjem 64
7.8. Analiza makroizbrusaka 66
7.9. Analiza vremena zavarivanja korijenskog prolaza 69
8. Zaključak 70
9. Literatura 72
10. Prilozi 74

POPIS SLIKA

Opis slike

Slika 2.1 Presjek pištolja u radu kod MIG/MAG postupaka zavarivanja [1] 4
Slika 2.2 Automatski MIG/MAG sustav za zavarivanje [2] 5
Slika 2.3 Djelovanje sila na kapljicu metala u električnom luku [3] 6
Slika 2.4 Prijenos dodatnog metala kratkim spojevima: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [4],[5] 8
Slika 2.5 Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [4],[5] 9
Slika 2.6 Prijenos metala štrcajućim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [4],[5] 10
Slika 3.1 Prikaz STT uređaja za zavarivanje sa sustavom za automatsko dodavanje žice [7] 12
Slika 3.2 Utjecaj vršne struje na geometriju zavara [8] 14
Slika 3.3 Utjecaj pozadinske struje na geometriju zavara [8] 15
Slika 3.4 Prikaz dinamičke karakteristike U,I =f(t),odvajanje kapljice rastaljenog materijala [9] 16
Slika 3.5 Prikaz upravljačke ploče STT uređaja za zavarivanje [7] 19
Slika 4.1 Prikaz FastMig uređaja za zavarivanje sa FastRoot funkcijom zavarivanja [10] ... 22
Slika 4.2 Utjecaj osnovne struje zavarivanja na geometriju zavarenog spoja [11] 23
Slika 4.3 Utjecaj razine drugog uzlaznog stanja (FPu razina) na geometriju zavarenog spoja [11] 24
Slika 4.4 Prikaz odvajanja kapljice rastaljenog materijala u kupku [11] 25
Slika 4.5 Prikaz OWC programa za generiranje synergic krivulja [10] 26
Slika 4.6 Prikaz upravljačke ploče SF 53 MLS sa FastRoot funkcijom [10] 27
Slika 5.1 Prikaz dijagrama struje i napona za FastRoot i STT postupak zavarivanja [17] 31
Slika 6.1 Dijagram količine rastaljenog materijala [12] 34
Slika 6.2 Automatska glava za zavarivanje model 609 [12] 35
Slika 6.3 Gabariti automatske glave za zavarivanje [12] 37
Slika 6.4 Promjena duljine slobodnog kraja žice ($l_{skž}$) uslijed loše pripreme zavarenog spoja [13] 38
Slika 6.5 Zaslon upravljačke ploče MPS 4000 [13] 39
Slika 6.6 Višekanalni programator MPS 4000 MULTILEVEL CONTROL 40
Slika 6.7 Zavarivanje cjevovoda sustavom Pipeliner II [13] 43

Slika 6.8 Zavarivanje plinovoda promjera 760 mm [13] 43
Slika 6.9 Zavarivanje cjevovoda promjera 1200 mm [13] 43
Slika 7.1 Dijagram tijeka pokusa 44
Slika 7.2 Skica pripreme zavarenog spoja 46
Slika 7.3 Dijagram količine rastaljenog materijala u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja [6] 49
Slika 7.4 Rezanje cijevi automatskom plinskom rezačicom 52
Slika 7.5 Priprema spoja brušenjem 53
Slika 7.6 a) Zavarivanje STT postupkom-12sati 54
Slika 7.6 b) Zavarivanje STT postupkom- 3 sata 54
Slika 7.6 c) Zavarivanje STT postupkom- 6sati 54
Slika 7.7 a) Korijenski zavar s unutarnje strane cijevi- mjesto prijelaza 55
Slika7.7 b) Brušenje pri nastavljanju zavarenog spoja 55
Slika 7.8 Početna pozicija zavarivanja za orbitalno zavarivanje Pipeliner II 57
Slika 7.9 Zavarivanje Pipeliner II automatskim orbitalnim postupkom zavarivanja 57
Slika 7.10 Smaknuće uzrokovano lošim pozicioniranjem cijevi 58
Slika 7.11 Korijen s unutarnje strane cijevi 59
Slika 7.12 Prikaz završnog sloja zavara 59
Slika 7.13 Izrezivanje epruveta 60
Slika 7.14 Rezanje epruveta 61
Slika 7.15 Epruvete za savijanje prije i nakon brušenja zavara 61
Slika 7.16 Skica dimenzija ispitnih valjaka prema HRN EN 910 [15] 62
Slika 7.17 Ispitivanje savijanjem po HRN EN 910 63
Slika 7.18 Epruveta zavarena STT postupkom zavarivanja nakon ispitivanja savijanjem 64
Slika 7.19 Epruveta zavarena FastRoot-om nakon ispitivanja savijanjem 65
Slika 7.20 Makroizbrusak uzorka zavarenog STT postupkom zavarivanja 66
Slika 7.21 Makroizbrusak uzorka zavarenog FastRoot-om 67

POPIS TABLICA

Opis tablice

Tablica 5.1 Usporedba STT i FastRoot postupka zavarivanja 30
Tablica 6.1 Specifikacije automatske glave za zavarivanje model 609 [12]..... 36
Tablica 6.2 Dimenzije automatske glave za zavarivanje [12] 37
Tablica 6.3 Specifikacije uređaja za zavarivanje MPS 4000 [13] 41
Tablica 7.1 Parametri zavarivanja STT postupka zavarivanja 45
Tablica 7.2 Parametri zavarivanja FastRoot postupka zavarivanja 45
Tablica 7.3 Parametri zavarivanja popune i završnog sloja 45
Tablica 7.4 Klasifikacija čelika prema normi API 5L [6] 47
Tablica 7.5 Sadržaj kemijskih elemenata u osnovnom materijalu čelične cijevi X 70 47
Tablica 7.6 Vrijeme zavarivanja korijenskog prolaza..... 69

SAŽETAK RADA

U ovom radu obrađeni su moderni MAG postupci koji se primjenjuju pri zavarivanju cjevovoda velikih promjera koji se koriste za transport nafte ili plina.

U uvodnom dijelu navedeni su motivi za rad, opisana svojstva osnovnog te dodatnih materijala, istaknuto je kada se i gdje načešće koriste navedeni postupci te je objašnjen MAG postupak zavarivanja. Navedene su i opisane metode prijenosa dodatnog metala te su predočene metalurške reakcije kod MAG zavarivanja konstrukcijskih čelika.

Eksperimentalni dio rada izveden je u Laboratoriju za zavarene konstrukcije i u tvrtki Monter- strojarske montaže d.d.

Osnovni materijal bila je cijev X70 promjera DN500 (Ø 508mm) debljine stijenke 8,7mm. Dodatni materijal za korijenski zavar je VAC 60 Jesenice promjera $d_ž$ 1,0mm, dok je za popunu i završni sloj korištena praškom punjena žica Ti70PIPE-FD promjera $d_ž$ 1,2mm.

POPIS OZNAKA

Simboli

Oznaka	**opis**	**jedinica**
F_g	sila gravitacije	N
F_{em}	elektromagnetna sila	N
F_{pn}	sila površinske napetosti	N
F_{pl}	sila strujanja i pritiska plazme	N
F_e	sila eksplozije u kapljicama metala	N
F_r	sila reaktivnog djelovanja	N
R_m	vlačna čvrstoća	N/mm^2
R_{eH}	granica razvlačenja	N/mm^2
A_5	istezljivost	%
K_v	udarna radnja loma	J
t	debljina uzoraka	mm
v_z	brzina zavarivanja	cm/min
I	jakost struje	A
$d_{\check{z}}$	promjer žice dodatnog materijala	mm
d_k	promjer kapljice rastaljenog metala	mm
d_s	promjer električnog luka na vrhu kapljice	mm
d_p	promjer suženja žice dodatnog materijala	mm
Q	protok plina	l/min
$l_{skž}$	duljina slobodnog kraja žice	mm
U	napon	V
$v_{\check{z}}$	brzina dobave žice	m/min
E	unos topline	kJ/cm
η	iskoristivost topline električnog luka	
x	udio plina u zaštitnoj mješavini	%
α	nagib pištolja	º
L	induktivitet	H
$Ø$	promjer cijevi	mm

Popis kratica

MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
FCAW	Elektrolučno zavarivanje taljivom praškom punjenom elektrodom u zaštiti plina
MAGC	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti ugljičnog dioksida

1. Uvod

U zavarivanju cjevovoda velikih promjera i velikih debljina stijenki koriste se elektrolučni postupci zavarivanja. Široku primjenu kod zavarivanja cjevovoda ima REL postupak zavarivanja zbog širokog izbora dodatnih materijala i zbog otpornosti na atmosferske utjecaje prilikom rada na terenu. Alternativa REL postupku zavarivanja je MAG zavarivanje, ali je ono zbog osjetljivosti zaštitne plinske atmosfere pri radu na otvorenom donedavno bilo manje primjenjivano prilikom zavarivanja cjevovoda. Problem osjetljivosti plinske zaštite može se eliminirati upotrebom zaštitnih kabina koje umanjuju utjecaj puhanja vjetra pri radu na otvorenom.

Razlog upotrebe MIG/MAG zavarivanja pri zavarivanju cjevovoda je u tome što kod MAG postupka zavarivanja dolazi do stvaranja veće količine rastaljenog materijala pa se samim time smanjuje vrijeme zavarivanja i povećava produktivnost.

STT postupak, kao i FastRoot postupak su poboljšane verzije MIG/MAG postupka koje imaju mogućnost podešenja većeg broja parametara, ali i praćenja promjena koje se događaju u električnom luku uslijed poremećaja. Zbog mikroprocesorskog upravljanja, do izražaja dolazi regulacija struje i napona koja se događa u vrlo kratkim vremenskim intervalima. To rezultira manjim unosom topline, smanjenim prskanjem te većom produktivnosti kod zavarivanja. Smanjenjem unosa topline omogućava se zavarivanje korijena cijevi koje je brže od zavarivanja korijena cijevi REL postupkom zavarivanja.

Upotrebom automatskog orbitalnog zavarivanja uz primjenu praškom punjene žice omogućava se brzo i kvalitetno zavarivanje popune i završnog sloja. Zavarivanje praškom punjenom žicom koristi se kako bi se višestruko povećala brzina zavarivanja, a istovremeno se zavaruje velikom preciznošću sa smanjenim brojem zavarivačkih grešaka u odnosu na REL zavarivanje. Upotrebom praškom punjene žice povećava se stabilnost električnog luka te se omogućava zavarivanje u prisilnim položajima.

2.MAG postupak zavarivanja

MAG zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina. Kod ovog postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive elektrode u obliku žice koja se kontinuirano dobavlja.

Uređaj za MIG/MAG zavarivanje je isti i za MAG kao i za MIG postupak zavarivanja, pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Kod MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice promjera od 0,6mm do 2,4mm, a žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane zbog boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Površina žice mora biti glatka, dimenzija vrlo točna te mora bit pravilno namotana na kolut kako bi se osigurala konstantna dobava žice.

Parametri kod MAG zavarivanja:

- jakost struje I (A) – razmjerna s brzinom dobave žice $v_ž$-m/min,
- napon električnog luka U(V) – razmjeran s visinom električnog luka,
- brzina zavarivanja v_z (mm/min),
- slobodni kraj žice $l_{skž}$ (mm),
- protok plina Q (l/min) i vrsta plina,
- induktivitet L (H),
- promjer žice $d_ž$ (mm),
- nagib pištolja α (°).

Prednosti MAG zavarivanja:

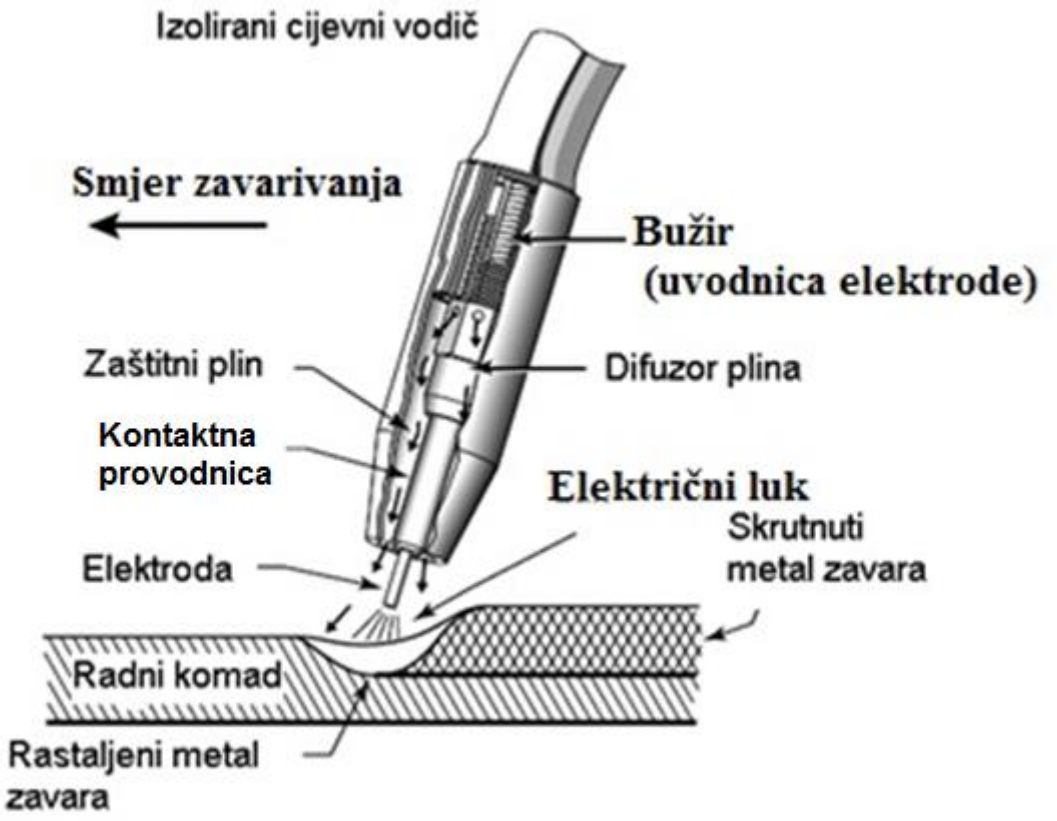
- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala,
- zavarivanje u svim položajima,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjene žice,
- široki raspon debljina osnovnog materijala,
- visoka učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju.

Nedostaci MAG zavarivanja:

- kod rada na terenu moguće greške (vjetar može otpuhivati zaštitni plin),
- problemi kod dovođenja žice (pogotovo ako je duljina polikabela veća od 3m),
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potrebna naknadna obrada zavarenog spoja),
- složeniji uređaji (automatsko dovođenje žice, regulacija visine električnog luka, mikroprocesorsko upravljanje).

2.1. Osnove postupka

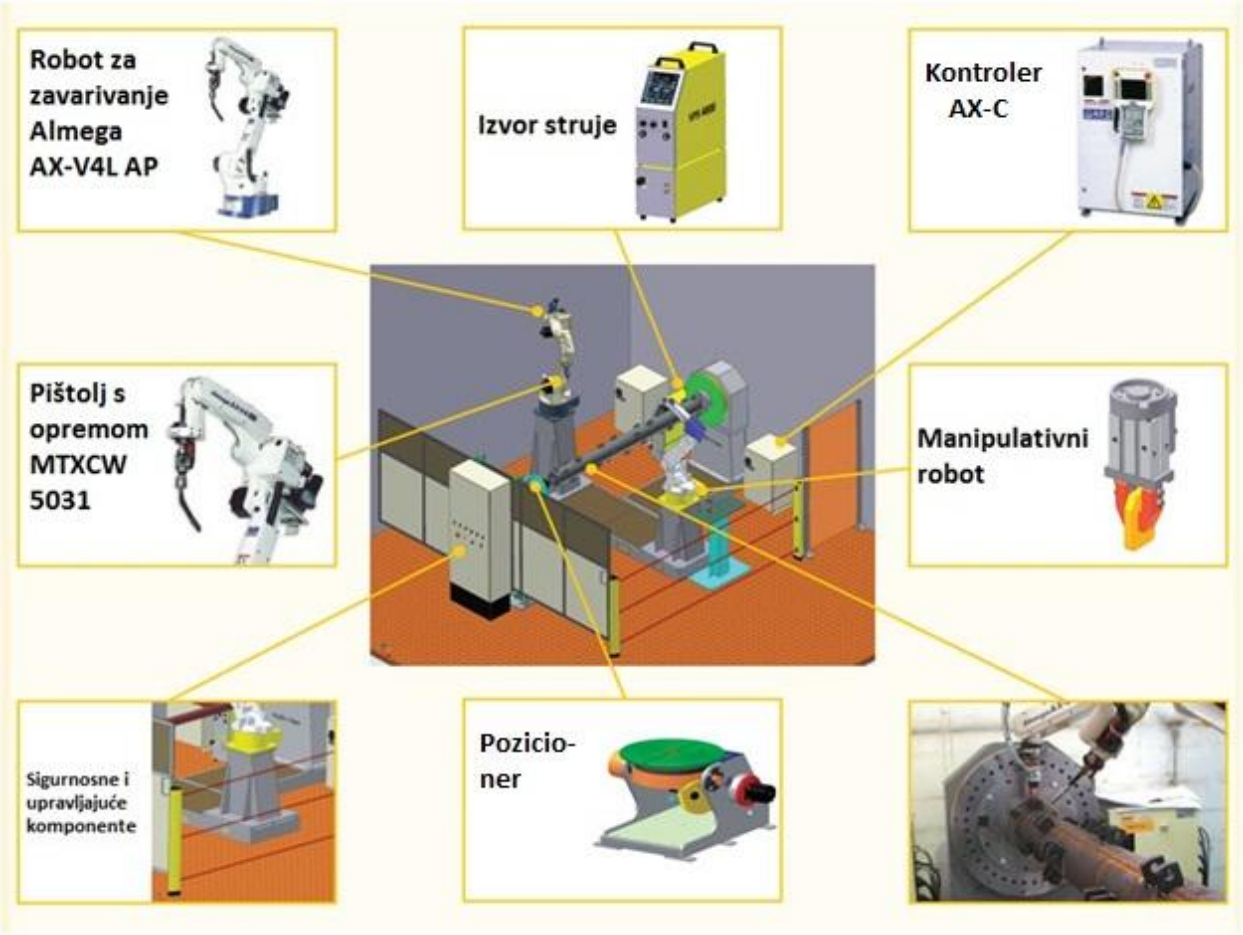
MAG ili Metal Active Gas i MIG ili Metal Inert Gas postupci su zavarivanja kod kojih do taljenja metala dolazi djelovanjem topline električnog luka uspostavljenog između konstantno dobavljane elektrode kao dodatnog materijala i radnog komada. Procesi se vrše u zaštitnoj atmosferi aktivnih ili inertnih plinova odnosno plinskih mješavina koje struje kroz sapnicu. U okviru MAG zavarivanja razlikuju se MAGC (Metal Active Gas Carbon) i MAGM (Metal Active Gas Mixture) postupci. Kod MAGC, kao zaštitni plin, koristi se čisti CO_2, a kod MAGM, plinske mješavine sa značajnim udjelom aktivnog plina. Na slici 2.1 prikazana je skica procesa zavarivanja s presjekom pištolja.



Slika 2.1 Presjek pištolja u radu kod MIG/MAG postupaka zavarivanja [1]

Osnovnu opremu industrijskog, automatskog MAG sustava čine (slika 2.2):

- izvor struje,
- oprema za dovod žice (kolut za namatanje žice, elektromotor i pogonski kotačići),
- plinska boca s pokazateljem tlaka i regulatorom protoka zaštitnog plina,
- spremnik sredstva za hlađenje pištolja,
- izolirani polikabel (žica dodatnog materijala, bakreni vodič za struju, crijevo za zaštitni plin, crijevo za rashladno sredstvo),
- pištolj za zavarivanje,
- sustav za automatsko pomicanje pištolja (robot ili automat)
- zaštitna oprema za djelatnike.

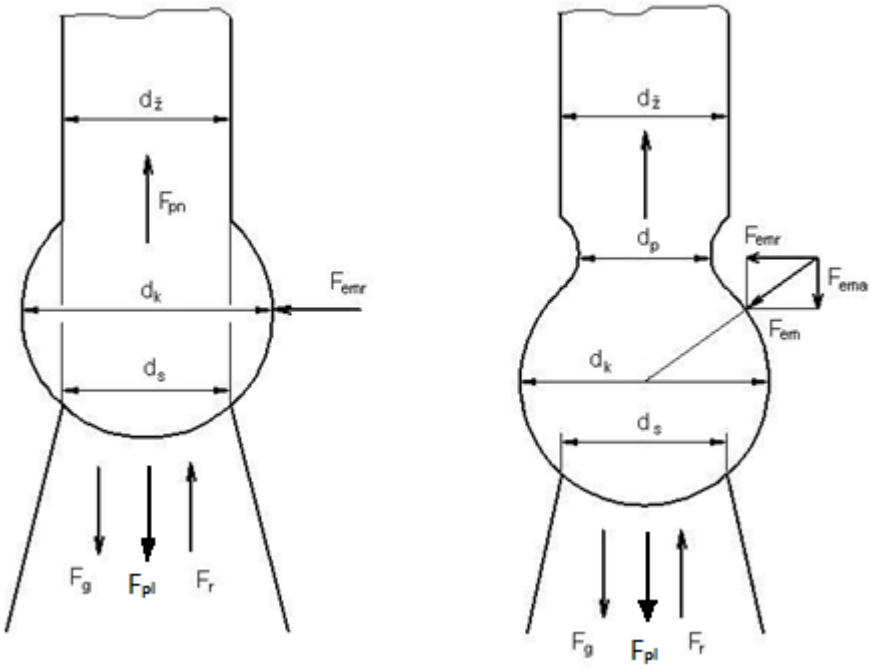


Slika 2.2 Automatski MIG/MAG sustav za zavarivanje [2]

Sustav na slici 2.2 prikazuje robotizirano MIG/MAG zavarivanje. Sustav je potpuno automatski zbog toga što je duljina električnog luka automatski regulirana, što je uvjetovano karakteristikom izvora struje za zavarivanje, a vođenje pištolja za zavarivanje je robotizirano. Ovakav sustav za zavarivanje tipičan je primjer potpuno automatskog postupka zavarivanja pri čemu se osigurava optimalno vođenje pištolja u svim uvjetima čime se osigurava ponovljivost kvalitete zavarenog spoja.

Na prijenos metala kod MAG postupka zavarivanja djeluju sljedeće sile [4]:

- sila gravitacije – F_g,
- elektromagnetska sila – F_{em},
- sila površinske napetosti – F_{pn},
- sila strujanja i pritiska plazme luka – F_{pl},
- sila eksplozije u kapljicama metala – F_e,
- sila reaktivnog djelovanja – F_r.



Slika 2.3 Djelovanje sila na kapljicu metala u električnom luku [3]

Neke od gornjih sila djeluju na način da pomažu prijenosu metala dok se neke opiru prijelazu kapljice u kupku taline, prema izrazu (2.1) :

$$F = F_g + F_{pn} + F_{em} + F_r + F_{pl} + F_e \tag{2.1}$$

Od navedenih sila koje djeluju u električnom luku najveći utjecaj ima elektromagnetska sila. Omjerom radijalne i aksijalne komponente elektromagnetske sile stvaraju se uvjeti za tzv. „Pinch“ efekt koji doprinosi odvajanju kapljice rastaljenog metala u zavarivačku kupku.

2.2. Načini prijenosa metala

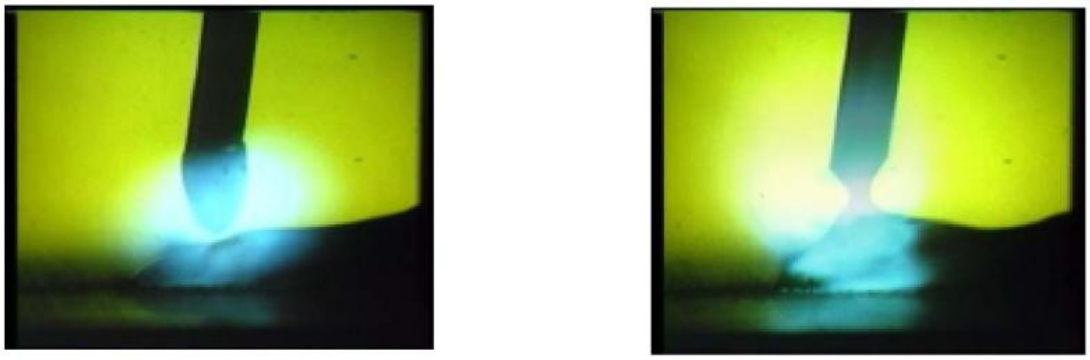
Metode prijenosa metala ovise o jakosti struje, naponu električnog luka, vrsti dodatnog materijala i promjeru žice, vrsti zaštitnog plina ili plinske mješavine, a dijelimo ih na:

- prijenos kratkim spojevima,
- prijenos mješovitim lukom,
- prijenos štrcajućim lukom.

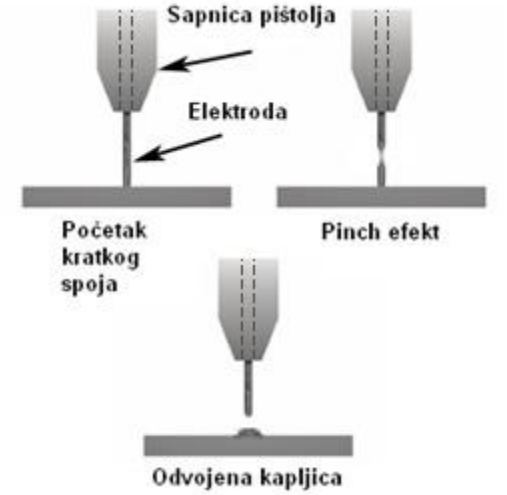
2.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Ovim načinom prijenosa metala dolazi do taljenja kontinuirano dobavljane žice pomoću kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Glavne značajke su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog metala vrši pri fizikalnom kontaktu elektrode i osnovnog materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spoja i fazu električnog luka. Do odvajanja kapljice dolazi u ovoj prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizikalnom kontaktu sa rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile, koja se javlja na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja, i steže kapljicu taline vrška žice (slika 2.4). Ova pojava je još poznata i kao „pinch effect“. Kapljica metala kod kratkih spojeva većeg je promjera od žice kojom se zavaruje.

a)



b)



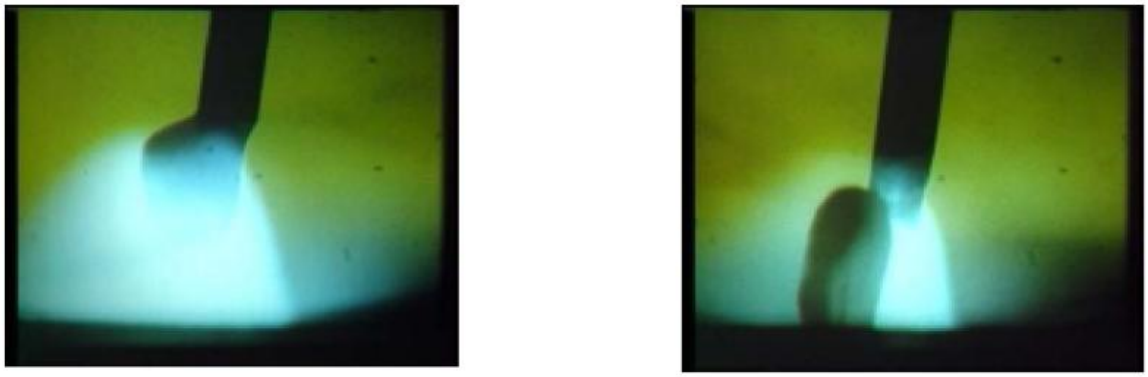
Slika 2.4 Prijenos dodatnog metala kratkim spojevima: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [4],[5]

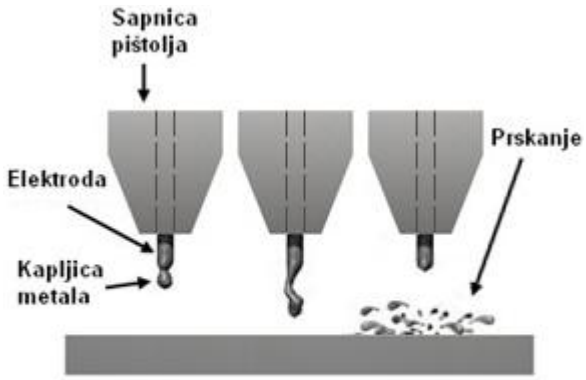
Ovaj prijenos metala u luku daje talinu malog volumena koja se brzo hladi pa je pogodan za zavarivanje tankih limova i korijena zavara kod debljih komada, a najčešće se vrši u zaštiti ugljičnog dioksida i njegovih mješavina.

2.2.2. Prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu žice elektrode koja se, zatim, pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja i pada u talinu bez kratkog spoja. Pojedine kapljice, ovisno o duljini električnog luka, gustoći i jakosti struje te naponu luka, mogu toliko narasti da u određenom trenutku dodirnu talinu čime nastupa kratki spoj (slika 2.5). Mješoviti luk se javlja u području jakosti struja i napona između vrijednosti prijenosa kratkim spojevima i štrcajućim lukom.

a)





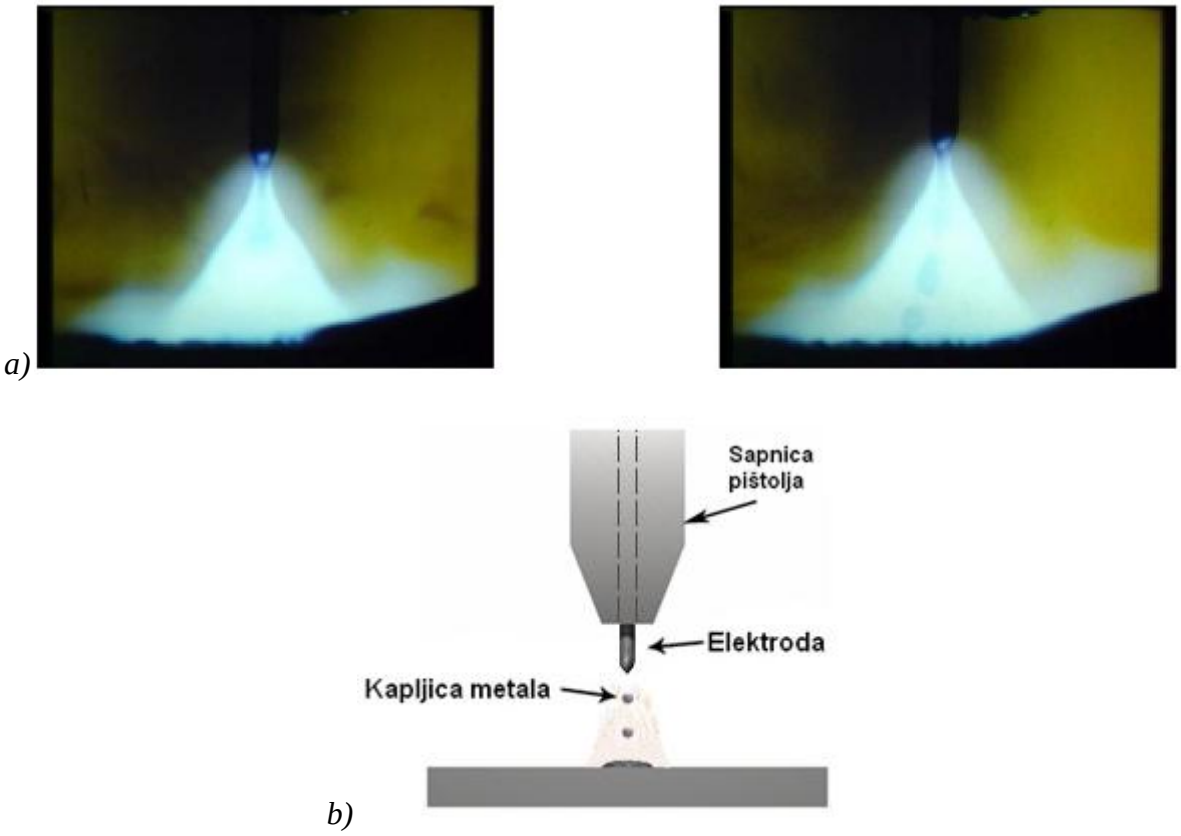
b)

Slika 2.5 Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [4],[5]

Promjer kapljice metala veći je od promjera žice kojom se zavaruje. Proces zavarivanja s prijenosom metala mješovitim lukom teško se kontrolira, javlja se intenzivno prskanje, slabije je kvašenje taline, što uzrokuje nepotpuno spajanje materijala, a površina zavara je izbrazdana i nepravilna. Ovaj prijenos metala posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti čistog ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem.

2.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Kod prijenosa metala štrcajućim lukom, kontinuirano dovođena žica elektrode se rastaljuje u području većeg napona i veće jakosti struje zavarivanja pri čemu se stvara mlaz malih kapi taline koje aksijalno putuju kroz električni luk te velikim brzinama uranjaju u rastaljeni osnovni materijal (slika 2.6).



Slika 2.6 Prijenos metala štrcajućim lukom: a) realni prikaz, b) shematski prikaz [4],[5]

Promjer kapljice je manji od promjera žice kojom se zavaruje. Veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala svojstveni su ovom prijenosu pa se primjenjuje kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Zaštitne plinske mješavine koje posebno podržavaju ovaj način prijenosa jesu one s pretežnim udjelom argona. [4]

3. STT Postupak zavarivanja

STT postupak zavarivanja unaprijeđeni je MAG postupak zavarivanja. Udruženjem invertorske tehnologije visoke frekvencije i naprednim sustavom upravljanja struje i napona, STT postupak zavarivanja omogućuje kvalitetno zavarivanje u uvjetima koji otežavaju rad klasičnom MAG zavarivanju. Ti uvjeti prvenstveno uključuju zavarivanje korijena zavara kod zavarivanja cijevi, ali i zavarivanje tankih limova gdje se zahtijeva smanjeni unos topline u zoni zavara.

Prednost STT postupka očituje se u jednostavnosti upotrebe. Zavarivači koji se koriste MAG postupkom zavarivanja u kratkom vremenskom periodu mogu savladati i STT postupak, koji je pogodan za zavarivanje različitih metala, od konstrukcijskog čelika do duplex nehrđajućih čelika. [9]

STT uređaj za zavarivanje vrlo je pouzdan kako u radionici tako i u terenskoj primjeni, što je posljedica robusnosti izrade.

Preciznim upravljanjem strujom na STT uređaju značajno se smanjuje količina plinova nastalih pri zavarivanju, prskanje te vrijeme brušenja, čime se povećava produktivnost te smanjuju troškovi zavarivanja. STT uređaj ima mogućnost nezavisnog upravljanja brzinom žice od jačine struje, a prikaz struje i napona zavarivanja omogućen je digitalnim voltmetrom i ampermetrom. Pogonski sustav žice u skladu je sa cijelim uređajem pa je tako za pogon žice zadužen sustav sa četiri valjka čime se osigurava kontinuirana dobava žice bez zastoja.

Prijenos metala površinskom napetošću (STT) je kontolirani prijenos metala kratkim spojevima koji prilagođuje oblik vala struje i napona fizici zavarivačkog luka i prijenosa metala u istom. Postupak smanjuje prskanje „odrezivanjem“ vršnih vrijednosti struje u trenutku prije nego što se tekući „most“ između žice i radnog komada odlomio u električni luk. „Most“ se lomi površinskom napetošću i teče mehaničkom inercijom pri niskim strujama.

Primjenom tehnologije upravljanja oblikom strujnog vala (engl. Waweform Control Technology) STT omogućuje promjenu veličine struje u žici unutar mikrosekundi, čime se značajno smanjuje ili čak i uklanja osnovna mana zavarivanja MAG postupkom kod prijenosa metala kratkim spojevima, a to je eksponencijalni uspon struje i nekontrolirano prskanje rastaljenog materijala.

Slika 3.1 prikazuje STT II uređaj za zavarivanje druge generacije sa poboljšanim izvorom i sustavom za upravljanje parametrima.



Slika 3.1 Prikaz STT uređaja za zavarivanje sa sustavom za automatsko dodavanje žice

[7]

3.1. Karakteristike STT postupka zavarivanja

STT izvor struje nema ni padajuću (CC) ni ravnu (CV) karakteristiku. Na osnovu trenutnih zahtjeva električnog luka, uređaj osigurava izlazne parametre koji omogućuju zavarivanje kratkim spojevima, a rastaljena kapljica se prenosi u žlijeb za zavarivanje pomoću sile površinske napetosti između kapljice i kupke. STT uređaj kontinuirano prati jakost struje u električnom luku te regulira istu, a optimalne karakteristike luka održavaju se i kod značajnijih promjena duljine slobodnog kraja žice. Uređaj je u sposobnosti regulirati struju zavarivanja u mikrosekundama, što je posljedica mikroprocesorskog upravljanja. Konstruiran je za poluautomatsku primjenu gdje se brzina zavarivanja i duljina slobodnog kraja žice konstantno mijenjaju pa zbog toga mikroprocesorska regulacija dolazi do posebnog izražaja. Moguća je uporaba različitih zaštitinih plinova te njihovih mješavina (CO_2; Ar82%-$CO_2$18%; Ar98%-$CO_2$2%...), ovisno o vrsti osnovnog materijala koji se zavaruje. [9]

Takav način rada uređaja olakšava posao zavarivaču zbog toga što dolazi do manje količine plinova koji nastaju pri zavarivanju, manja je emisija zračenja zbog manjeg unosa topline i nižih parametara zavarivanja, a smanjeno je i prskanje pa se potreba za naknadnim brušenjem zavarenog spoja uvelike smanjuje. Osim toga, zbog konstantne regulacije električnog luka zavarivaču je olakšan rad te je smanjen utjecaj promjene slobodnog kraja žice. Smanjeni unos topline smanjuje mogućnost nastajanja deformacija i zaostalih napetosti nastalih uslijed zavarivanja. Zbog tih karakteristika STT postupak najčešće se koristi za zavarivanje korijenskog zavara u grlu žljeba.

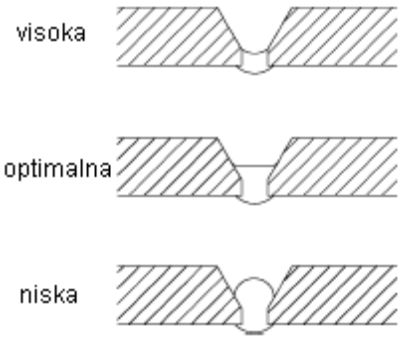
STT postupak je modificirani MAG postupak s prijenosom metala kratkim spojevima. To je sasvim nov, različit postupak zavarivanja sa definiranim izlaznim oblicima napona i struje tijekom trajanja procesa zavarivanja, a pri kojime se rastaljene kapljice prenose u rastaljenu kupku pomoću sila površinske napetosti. Proces zavarivanja odvija se ciklički, a postavljanjem ispravnih parametara osigurava se stabilnost električnog luka kao i stabilnost cjelokupnog procesa zavarivanja. Struja zavarivanja se regulira u mikrosekundama, ovisno o iznosu napona u električnom luku.

3.2. Parametri zavarivanja kod STT postupka

U odnosu na konvencionalni MAG postupak, STT pruža mogućnost podešavanja više parametara. Parametri zavarivanja usklađuju se uglavnom sa specifikacijama koje proizvođač isporučuje sa dodatnim i osnovnim materijalom. Kod zavarivanja cijevi zavarivanje se većinom izvodi odozgo prema dolje silaznom tehnikom rada.
Parametri koji se namještaju kod STT postupka su sljedeći:

1. Vršna struja (Peak current, I_{PC})

Vršna se struja koristi za definiranje duljine luka te poboljšava vezivanje i protaljivanje stijenki osnovnog materijala.
Slika 3.2 prikazuje utjecaj vršne struje na geometriju zavara.



Slika 3.2 Utjecaj vršne struje na geometriju zavara [8]

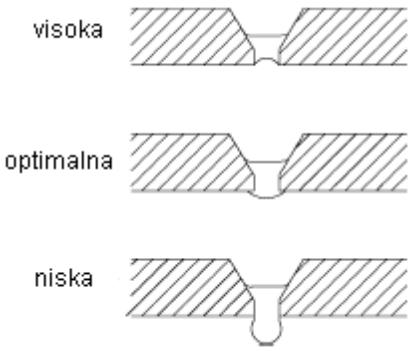
Visoka vrijednost vršne struje povećava duljinu elektičnog luka, a ako je njena vrijednost previsoka kapljice će imati globularni oblik i preveliki promjer što povećava mogućnost rasprskavanja. U suprotnom slučaju, ako je vrijednost vršne struje preniska, električni luk postaje nestabilan. Vrijednost vršne struje mora se prilagoditi tako da se postigne minimalno prskanje i „mirnoća“ kupke rastaljenog metala.

2. Pozadinska struja (Background current, I_{BC})

Pozadinska struja regulira unos topline u zavareni spoj.

Ovim se parametrom također utječe i na geometriju zavarenog spoja, gdje će prevelika vrijednost I_{BC} uzrokovati veći promjer kapljice i povećano prskanje taline. Ako je ta vrijednost niska električni luk je nestabilan i slabije je kvašenje na stranicama žljeba.

Slika 3.3 prikazuje utjecaj pozadinske strujue na geometriju zavara.



Slika 3.3 Utjecaj pozadinske struje na geometriju zavara [8]

3. Topli/vrući start (Hot Start)

Ovaj parametar kod STT postupka zavarivanja omogućava lakšu uspostavu električnog luka te povećava unos topline kod početka zavarivanja, zbog toga što je radni komad u tom trenutku hladan pa postoji mogućnost hladnog naljepljivanja.

4. Gradijent silazne struje (Tailout)

Osigurava dodatan unos topline a da kapljice rastaljenog materijala pritom nisu prevelike pri čemu ne dolazi do promjene duljine električnog luka. Povećanjem parametra poboljšava se kvašenje te se omogućuje veća brzina zavarivanja. Povećanjem vrijednosti *Tailout* parametra, vrijednosti vršne i pozadinske struje se smanjuju.

5. Brzina žice ($v_ž$)

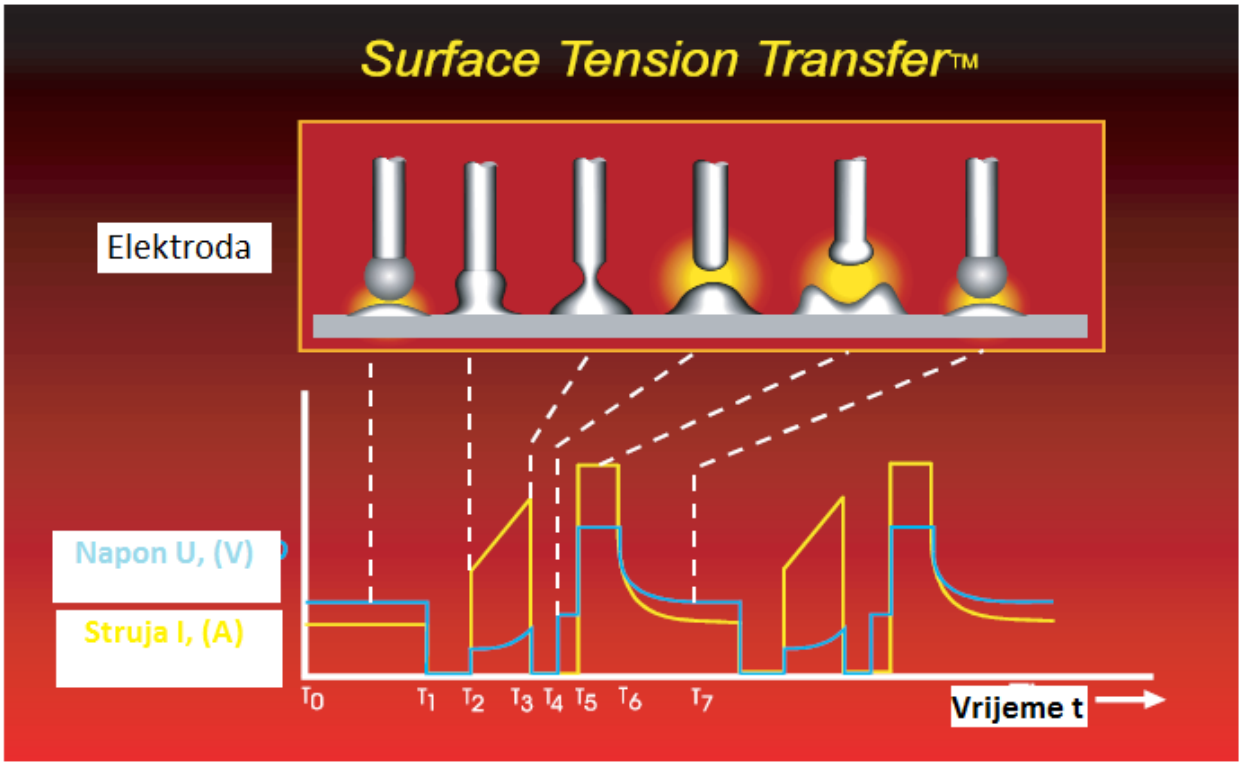
Ovaj parametar utječe na količinu rastaljenog materijala i jakost struje, ali je neovisan o vršnoj i pozadinskoj struji.

6. Slobodni kraj žice ($l_{skž}$)

Ovaj parametar utječe na geometriju zavarenog spoja. Ako je vrijednost slobodnog kraja žice velika, lice zavara je konkavno i uže, a veća je i visina zavara. Za manju duljinu slobodnog kraja žice zavar je širi, ima manju visinu, tanak je, a povećava se i prskanje rastaljenog materijala.

3.3. Princip rada STT postupka zavarivanja

Princip rada STT postupka zavarivanja moguće je opisati pomoću dijagrama koji prikazuje promjene struje i napona u vremenu te pomoću slika odvajanja kapljice metala sa rastaljene žice u talinu metala. Slika 3.3 opisuje promjene koje se događaju unutar jednog ciklusa te dijeli vremensku domenu ciklusa u šest karakterističnih faza.



Slika 3.4 Prikaz dinamičke karakteristike U,I =f(t),odvajanje kapljice rastaljenog materijala [9]

Sljedećih šest koraka (slika 3.3) opisuju karakteristične trenutke u fizici procesa STT postupka zavarivanja. [9]

1. Pozadinska struja (I_{BC}) T_0-T_1:

Iznos struje u električnom luku prije nego što dođe do kratkog spoja između elektrode i osnovnog materijala. Radi se o struji u stanju mirovanja koja iznosi od 50A do 100A, a u periodu T_0-T_1 žica prilazi radnom komadu.

2. Ball time (stvaranje neodvojene kapljice metala)T_1-T_2:

Trenutak u kojem žica još nije ušla u kratki spoj. Zbog djelovanja elekričnog luka došlo je do stvaranja taline na vrhu elektrode u obliku kapljice koja se još nije odvojila od elektrode. Iznos struje još je uvijek jednak iznosu pozadinske struje I_{BC}. Nakon što uređaj očita nagli pad napona u električnom luku dolazi do smanjenja iznosa struje. (Kod konvencionalnog MAG postupka došlo bi do kratkog spoja i naglog te intenzivnog povećanja struje.) Pozadinska struja smanjuje se na vrijednost od otprilike 10A na period od 0.75 milisekundi.

3. Pinch efekt T_2-T_3:

Brzina žice je kontinuirana iako je došlo do naglog smanjenja iznosa struje zbog čega dolazi do spajanja rastaljene kapljice metala sa vrha elektrode i kupke rastaljenog metala. Kako bi došlo do daljnjeg taljenja elektrode mora se povisiti iznos struje. Iznos struje povećava se kontinuirano, a elektroda je u kratkom spoju s radnim komadom. Kako je došlo do povećanog unosa energije povećanjem struje, tako se ubrzava odvajanje rastaljene kapljice u kupku rastaljenog metala. Volumen kapljice se povećava, a presjek koji spaja kapljicu sa elektrodom $d_{ž}$ se smanjuje pa je radijalna komponenta elektromagnetske sile sve veća. Dolazi do pojave pinch efekta i drastičnog smanjenja $d_{ž}$ sve do trenutka T_3 . (tijekom perioda T_2-T_3 napon u električnom luku nije 0, a razlog tome je visoki otpor čelika pri točki taljenja od 1550ºC) U trenutku T_3 dolazi do stvaranja suženja između rastaljene kapljice i elektrode.

4. Derivacija *dv/dt* T_2-T_3:

Derivacija funkcije služi za indikaciju trenutka u kojem dolazi do potpunog odvajanja kapljice rastaljenog metala od elektrode. Riječ je o prvoj derivaciji brzine promjene napona kratkog spoja po vremenu. U trenutku kad vrijednost prve derivacije spomenute funkcije postigne otprije zadanu vrijednost dolazi do ponovnog smanjenja struje na vrijednost od 50A u nekoliko mikrosekundi. Time se spriječava naglo odvajanje kapljice metala koje bi uzrokovalo prskanje taline po radnom komadu. U trenutku T_4 dolazi do odvajanja rastaljene kapljice (zbog površinske napetosti) u kupku rastaljenog metala, ali pri niskoj vrijednosti struje zavarivanja.

5. Odvajanje kapljice metala T_3-T_4:

Iznos struje jednak je vrijednosti pozadinske struje. U trenutku T4 dolazi do odvajanja kapljice metala, ali pri niskoj vrijednosti struje.

6. Impuls struje T_5-T_6:

Dolazi do ponovnog naglog, ali kontroliranog povećanja struje, a kao posljedica toga stvara se zavareni spoj uz vrlo malo prskanja. U ovom periodu ciklusa dolazi do brzog taljenja elektrode nakon što je kapljica u prošlom periodu odvojena. U ovom trenutku oblik rastaljene elektrode vrlo je nepravilan.

7. Smanjenje intenziteta struje T_6-T_7:

Struja se smanjuje sa visoke vrijednosti na vrijednost pozadinske struje. Karakteristično za ovaj period je da promjena struje nije skokovita, odnosno ne dešava se u kratkom periodu vremena. Zbog toga se taj period naziva „tail-out“. Nakon tog perioda dolazi do ponavljanja cijelog ciklusa, a vrijeme potrebno za jedan ciklus iznosi od 25 do 35 milisekundi.

Slika 3.5 prikazuje upravljačku ploču STT uređaja za zavarivanje.



Slika 3.5 Prikaz upravljačke ploče STT uređaja za zavarivanje [7]

4. FastRoot postupak zavarivanja

FastRoot je modificirani postupak zavarivanja kratkim spojevima, uz digitalno upravljanje postupkom zavarivanja. Digitalno se upravlja parametarima struje i napona. FastRoot postupak zavarivanja namijenjen je za zavarivanje korijena zavarenog spoja, te za zavarivanje tankih limova, konstrukcijskih i nehrđajućih čelika. Moguće je zavarivanje u svim položajima rezultirajući željenom vrijednosti penetracije bez prskanja.

Razvoj digitalnih izvora za zavarivanje pruža nove načine mogućnosti upravljanja prijenosom metala u električnom luku. Digitalni sustavi poboljšavaju vrijeme odaziva sustava na parametre zavarivanja. Ovo je jedan od razloga zašto se novi modificirani postupci zavarivanja nalaze na tržištu. U postupku MIG/MAG zavarivanja kontroliranim upravljanjem vrijednostima napona i struje kratkog luka postiže se prijenos rastaljenog metala bez štrcanja i luk stabilnih karakteristika. Pri zavarivanju korjenskog prolaza kontrola štrcanja i penetracije predstavljaju najveći problem.[11]

Prednosti FastRoot postupka su jednostavnost uporabe i fleksibilnost. Pod uvjetom da je zavarivač koristio klasični MAG postupak, vrijeme privikavanja na opremu i postupak FastRoot zavarivanja je minimalno. FastRoot postupak omogućava zavarivanje raznih metala, od konstrukcijskih čelika, do nehrđajućih duplex čelika.

Najveća prednost FastRoot postupka zavarivanja je mogućnost zavarivanja korijena i mogućnost zavarivanja popune i završnog sloja. Korištenjem istog izvora struje, dodavača žice i pištolja za zavarivanje, moguće je zavariti sva tri prolaza, ukoliko se radi o zavarivanju cijevi. Naravno, potrebno je podesiti parametre zavarivanja te dodatni materijal.

4.1. Karakteristike FastRoot postupka zavarivanja

FastRoot izvor struje nema određenu karakteristiku struje. Na osnovu trenutnih zahtjeva koji se određuju neposredno iz stanja električnog luka, uređaj osigurava parametre koji omogućuju zavarivanje kratkim spojevima, a rastaljena kapljica metala se prenosi sa vrha elektrode u kupku metala bez prskanja. Sve to omogućuje softwerski upravljani izvor struje koji regulira struju i napon zavarivanja.

Posebnost FastRoot izvora struje je ta što su krivulje struje i napona uprogramirane u sam uređaj pa zavarivač mora odrediti osnovni i dodatni materijal koji se koriste te zaštitni plin. Nakon unosa tih podataka uređaj sam generira vrijednosti struje i napona te brzinu žice. Postoji i naknadna mogućnost finog podešanja tih programiranih vrijednosti, ukoliko za tim postoji potreba.

Takav način podešavanja vrijednosti struje i napona naziva se „Synergic“ sustav. Sinergijsko podešavanje parametara omogućeno je digitalnim načinom upravljanja parametrima struje i napona. Nadalje, sama memorija FastRoot uređaja za zavarivanje u sebi sadrži parametre za niz kombinacija osnovnog i dodatnog materijala te zaštitnog plina. Prednost digitalnog sustava upravljanja i sinergijskog podešavanja parametara očituje se u daljnjem razvoju dodatnih materijala i zaštitinih plinova. Ukoliko se pojavi potreba za razvojem novih synergic krivulja struje i napona zavarivanja, to ne predstavlja problem, zbog toga što se na sučelju upravljačke ploče nalazi ulaz koji omogućuje programiranje tih krivulja.

Unatoč sinergijskom određivanju parametara i digitalnom upravljanju procesom, FastRoot postupak nije MAG postupak s impulsnim načinom prijenosa metala. Riječ je o modificiranom MAG postupku sa prijenosom metala kratkim spojevima. Proces zavarivanja odvija se tako da uređaj prati vrijednosti struje i napona u električnom luku te upravlja vremenskim usklađivanjem prijenosa kapljice rastaljenog materijala od elektrode do kupke rastaljenog metala.

Slika 4.1 prikazuje FastMig uređaj za zavarivanje sa FastRoot funkcijom zavarivanja.



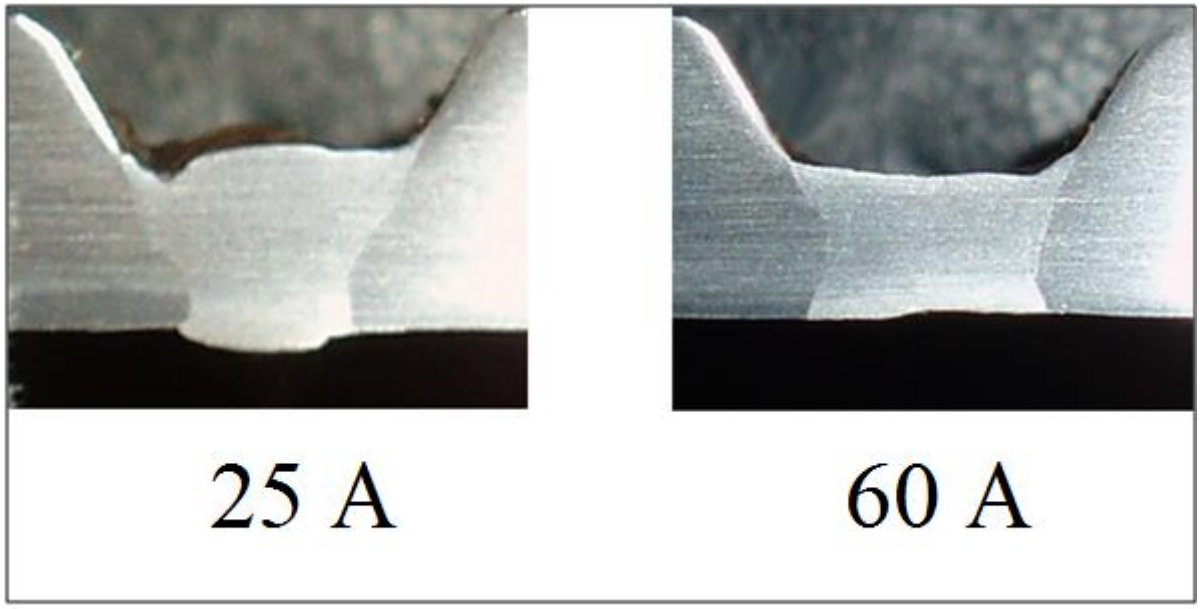
Slika 4.1 Prikaz FastMig uređaja za zavarivanje sa FastRoot funkcijom zavarivanja [10]

4.2. Parametri zavarivanja kod FastRoot postupka

Kod FastRoot postupka zavarivanja omogućeno je podešavanje većeg broja parametara nego kod klasičnog MAG zavarivanja. Parametri zavarivanja usklađuju se sa specifikacijom koju proizvođač isporučuje sa osnovnim, odnosno dodatnim materijalom. Sinergijsko definiranje parametara uvelike olakšava uporabu FastRoot postupka zavarivanja zbog toga što su struja i napon zavarivanja, kao i brzina žice unaprijed određeni samim programom uređaja. Parametri čija se vrijednost može mijenjati bez obzira na unaprijed određene vrijednosti programa su brzina dobave žice, razina drugog uzlaznog stanja (FPu razina struje) i razina osnovne struje.
Parametri koji se namještaju kod FastRoot postupka su sljedeći:

1. Osnovna struja zavarivanja

Prevelika vrijednost osnovne struje zavarivanja rezultirati će nedovoljnim provarivanjem korijena zavara.(slika 4.2)



Slika 4.2 Utjecaj osnovne struje zavarivanja na geometriju zavarenog spoja [11]

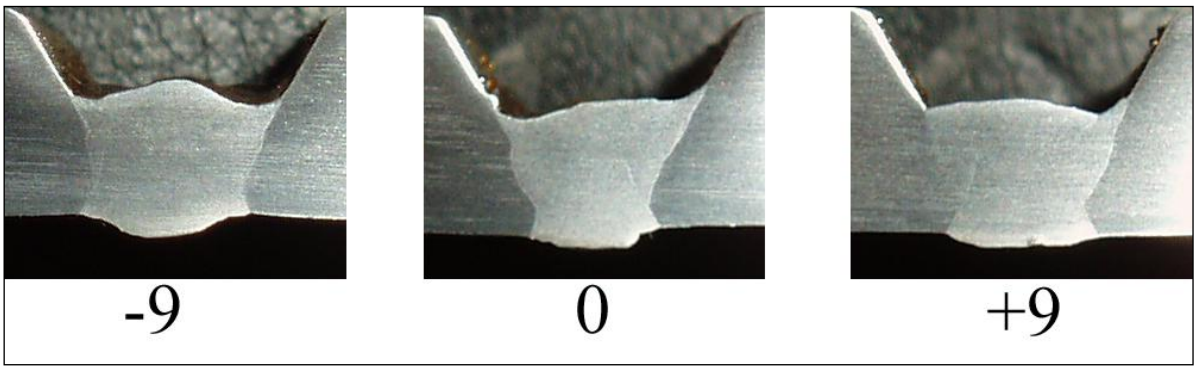
2. Razina drugog uzlaznog stanja (FPu razina struje)

Raspon u kojem se FPu parametar može podešavati poprima vrijednosti od -9 do +9. Riječ je o bezdimenzijskom parametru čija tvornička vrijednost iznosi 0. FPu razina struje neposredno utječe na geometriju zavarenog spoja, a njen utjecaj prikazan je na slici 4.2.

Podešavanjem FPu razine struje utječe se na stabilnost električnog luka i količinu štrcanja. Vrijednosti od -1 do -9 dati će mekši luk i smanjenje količine štrcanja, dok će vrijednosti od +1 do +9 rezultirati tvrđim lukom povećane stabilnosti.

Također, vrijednosti FPu razine struje od +1 do +9 koriste se pri zavarivanju čelika u zaštitnoj atmosferi 100% CO_2 te za zavarivanje tankih limova ugljičnih konstrukcijskih čelika.

Slika 4.3 prikazuje utjecaj razine drugog uzlaznog stanja na geometriju zavarenog spoja.



Slika 4.3 Utjecaj razine drugog uzlaznog stanja (FPu razina) na geometriju zavarenog spoja [11]

3. Vrući start (Hot Start)

Omogućuje lakšu uspostavu električnog luka povećanjem unosa topline kod početka zavarivanja zbog toga što je radni komad u tom trenutku hladan pa postoji mogućnost hladnog naljepljivanja.

4. Brzina žice ($v_ž$)

Utječe na količinu rastaljenog materijala, a ovisna je o osnovnoj struji zavarivanja. Dakle povećanjem brzine žice dolazi do povećanja osnovne struje zavarivanja.

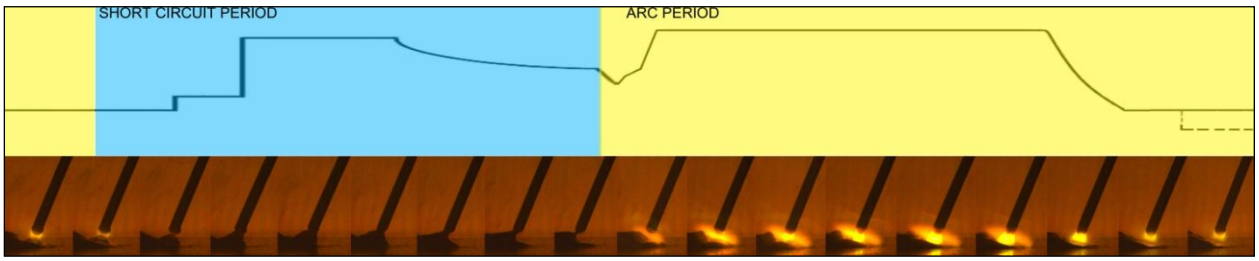
5. Slobodni kraj žice

Utječe na geometriju zavarenog spoja. Ako je vrijednost slobodnog kraja žice velika, naličje zavara je konkavno i uže, a veća je i visina zavara. Za manju duljinu slobodnog kraja žice zavar je širi, ima manju visinu, tanak je, a povećava se i prskanje rastaljenog materijala.

4.3. Princip rada FastRoot postupka zavarivanja

Princip rada FastRoot postupka temeljen je na dva uzajamno različita oblika struje zavarivanja. Ovi oblici se odnose na kratke spojeve i uzlaznu struju električnog luka (Slika 4.3). FastRoot postupak je modificirani postupak MAG zavarivanja kratkim spojevima i ne smije ga se zamijeniti sa impulsnim zavarivanjem. U prvom uzlaznom stanju, dodatni materijal se prenosi u rastaljenu kupku kratkim spojem, za to vrijeme struja električnog luka se iznenadno pojačava za vrijeme drugog uspona (FPu) i podržava na željenoj razini. Prije prvog uzlaznog stanja, postoji kratki strujni maksimum za vrijeme kojeg žica dodatnog materijala dodiruje rastaljenu kupku. Za vrijeme prvog uzlaznog stanja, brzo povećanje struje na željenu razinu omogućava „pinch“ efekt, koji dozvoljava kapljici da se odvoji od vrha dodatnog materijala. Odvajanje se osigurava sporim povećanjem struje. Jednom kad je kapljica prenešena do rastaljene kupke, počinje drugo uzlazno stanje struje (FPu) kad se inicira električni luk. Praćenje parametara zavarivanja odvija se kroz električni luk, a na temelju dobivenih informacija uređaj regulira parametre u kratkom vremenskom intervalu. Vremensko usklađivanje povećenja i smanjenja struje spriječava štrcanje pri prijelazu od kratkog na slobodni luk. Tzv. drugo uzlazno stanje (FPu) oblikuje rastaljenu kupku i osigurava dovoljnu penetraciju korjenskog prolaza. Ova dva uzlazna stanja slijede jedan iza drugog, nakon kojih se struja reducira do željene razine osnovne struje. Specificirana osnovna struja osigurava da slijedeća kap bude prenesena u slijedećem kratkom spoju.

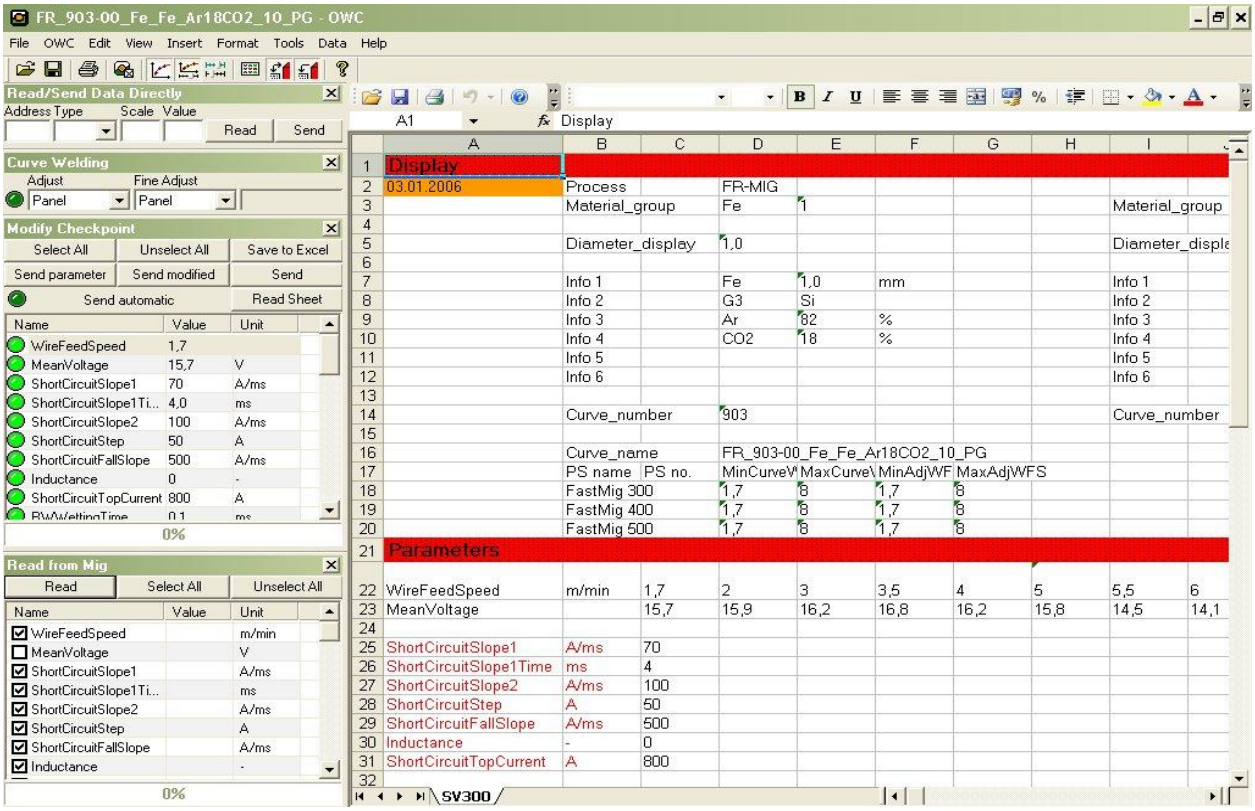
Brzo i vremenski usklađeno upravljanje izvorom kombinirano s ispravnim oblikom krivulje struje (Synergic krivulje) u postupku dozvoljava neometano odvajanje kapljice bez štrcanja u rastaljenu kupku. Tako se zadržava stabilan električni luk i omogućava jednostavno upravljanje postupkom zavarivanja.



Slika 4.4 Prikaz odvajanja kapljice rastaljenog materijala u kupku [11]

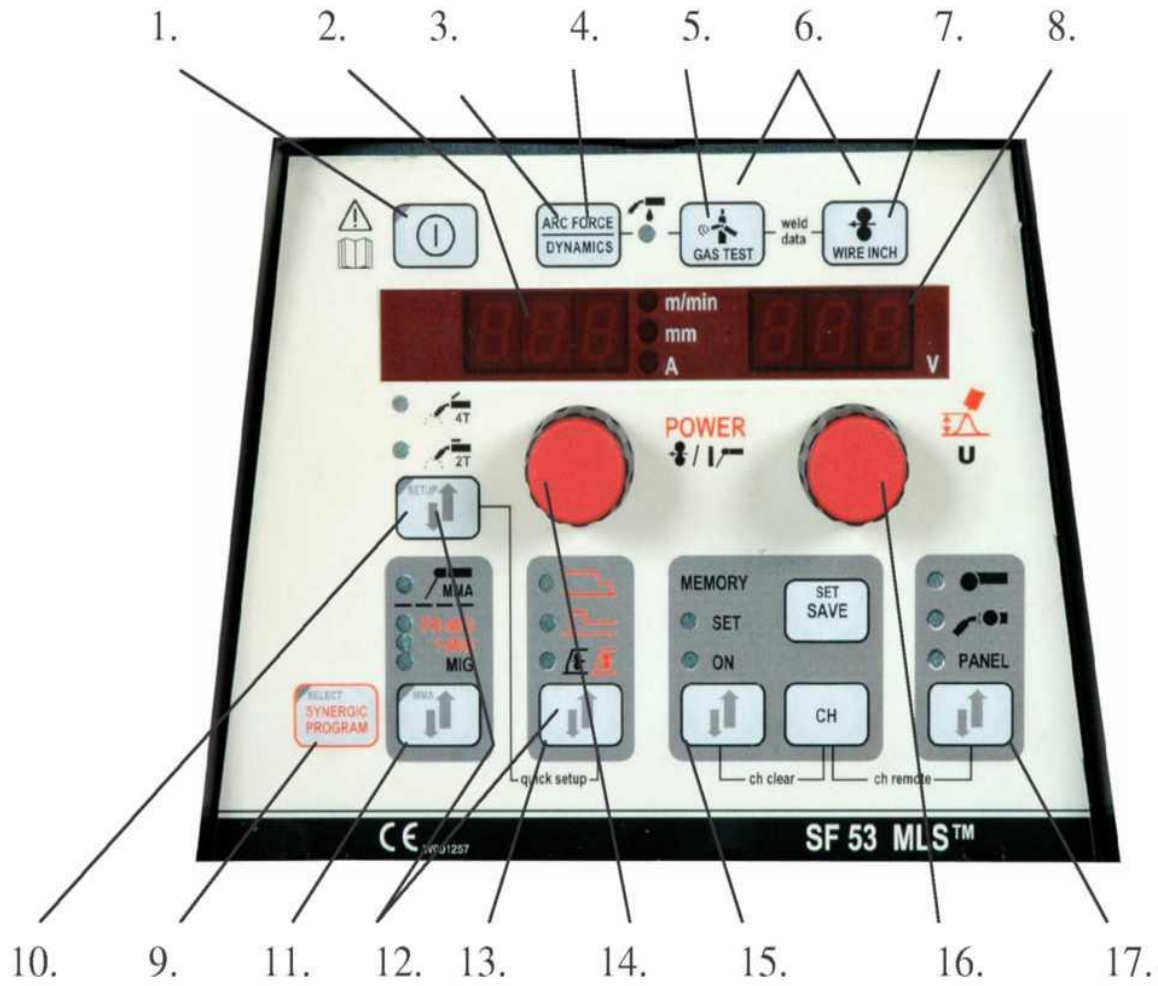
Kako su vrijednosti struje i napona električnog luka tokom zavarivanja kod FastRoot postupka digitalno regulirane, na slici 4.5 prikazano je sučelje programa koji se koristi za generiranje synergic krivulja. Nakon što se definiraju vrijednosti struje i napona, postoji mogućnost spajanja računala sa uređajem za zavarivanje preko serijskog kabela te učitavanjem novih synergic krivulja.

Parametri na osnovu kojih se generiraju synergic krivulje su vrsta osnovnog materijala, vrsta i promjer dodatnog materijala te zaštitni plin. Dakle, ako dođe do potrebe za razvijanjem novih synergic krivulja zbog razvoja dodatnih materijala i zaštitnih plinova, postoji mogućnost za učitavanje tih krivulja u uređaj za zavarivanje, što je prednost uređaja za FastRoot zavarivanje.



Slika 4.5 Prikaz OWC programa za generiranje synergic krivulja [10]

Slika 4.6 prikazuje upravljačku ploču SF 53 MLS sa FastRoot funkcijom zavarivanja.



Slika 4.6 Prikaz upravljačke ploče SF 53 MLS sa FastRoot funkcijom [10]

1. *Prekidač - Stand by*
2. *a) Prikaz Brzine žice/Struje zavarivanja/Debljine lima b)Pokazivanje odabranog parametra za podešavanje*
3. *Aktiviranje podešavanja dinamike zavarivanja (FPu, drugo uzlazno stanje struje)*
4. *Odabir načina hlađenja pištolja (plin ili rashladna tekućina) istovremenim pritiskom na gumb broj 4 i 5*
5. *Test protoka plina*
6. *Istovremenim pritiskom na gumb 5 i 7 zadnje korišteni parametri prikazuju se na ekranu*
7. *Gumb za uvlačenje žice u polikabel pištolja*
8. *a) Pokazivanje napona zavarivanja*
   b) Pokazivanje vrijednosti odabranog podesivog parametra
9. *Provjera odabira i aktiviranje izbora programa*
10. *a) Odabir funkcije prekidača pištolja 2T ili 4T*
    b) Promjena osnovnih parametara uređaja, SETUP (dužim pritiskom, > od 3 sec.)

11. *Odabir postupka zavarivanja MIG,1-MIG, REL, FR-MIG[1])*
12. *Aktiviranje dodatnih MIG funkcija, podešavanje parametara (brzi setup)*
13. *Odabir dodatnih MIG funkcija (meki, vrući start, završna struja)*
14. *a) Podešavanje brzine žice*
    b) Podešavanje snage zavarivanja (1-MIG)
    c) Podešavanje struje zavarivanja za REL postupak
    d) Odabir SETUP parametara
    e) Odabir materijala
15. *Memorijski kanali, spremanje MIG parametara*
16. *Odabir*
    a) Prikaz napona zavarivanja b) Podešavanje dužine luka zavarivanja (1-MIG) c) Podešavanje MIG dinamike d) Podešavanje SETUP parametara e) Odabir programa
17. *Odabir načina upravljanja, preko panela ili daljinskog upravljanja*

[1] FastRoot postupak zavarivanja

5. Usporedba STT i FastRoot postupka zavarivanja

Iako su oba postupka pogodna za zavarivanje korijenskih zavara cijevi i tankih limova, razlike su vidljive i u samoj konstrukciji uređaja za zavarivanje. Dok je STT postupak zavarivanja razvijen samo za zavarivanje korijena i tankih limova, FastRoot postupak moguće je koristiti i za zavarivanje korijena, ali i za zavarivanje popune i završnog sloja.

Dok se uređaj za STT zavarivanje može koristiti samo za zavarivanje korijena, izvor struje koji se koristi za FastRoot postupak zavarivanja može se koristiti i za klasični MIG/MAG postupak, kao i za REL zavarivanje. Dakle, glavna prednost uređaja za FastRoot postupak zavarivanja je fleksibilnost i primjenjivost za više postupaka zavarivanja.

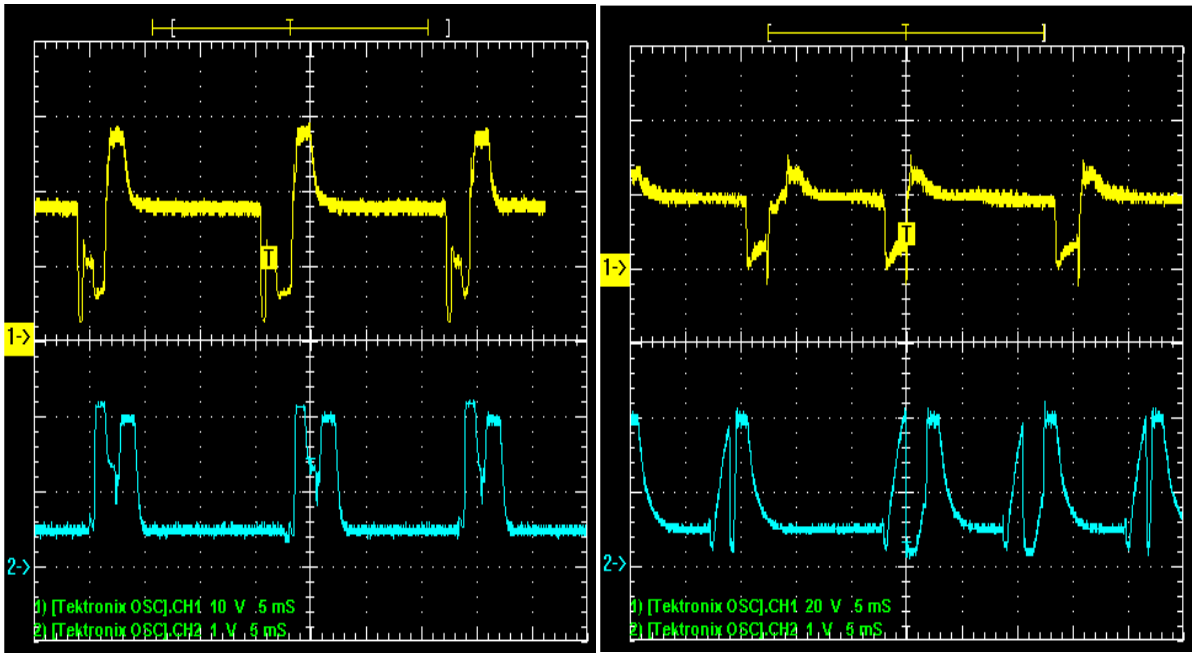
Iako je glavna prednost FastRoot postupka fleksibilnost, kao glavnu prednost STT postupka zavarivanja valja istaknuti pouzdanost. Uzrok pouzdanosti STT-a leži u tome što je STT razvijan i konstruiran kao postupak koji će se koristiti isključivo za zavarivanje korijena zavara i za zavarivanje tankih limova, gdje je povećan zahtjev za smanjenim unosom topline, ali bez posljedica na depozit dodatnog materijala. Zbog toga se i regulacija struje i napona STT-a bitno razlikuje od regulacije struje i napona kod FastRoot postupka zavarivanja. Dok je kod FastRoot-a mjerenje vrijednosti struje i napona osigurano preko električnog luka, kod STT-a postoji dodatni senzor koji preko radnog komada mjeri struju i napon te preko vodiča šalje signal u digitalni pretvarač(A/D konverter). Tako pretvoreni digitalni signal moguće je brže obraditi u mikroprocesoru, a to omogućava bolju i pouzdaniju regulaciju.

Prednosti i nedostaci STT i FastRoot postupka zavarivanja dani su u tablici 5.1.

Tablica 5.1 Usporedba STT i FastRoot postupka zavarivanja

Postupak zavarivanja	**STT**	**FastRoot**
Prijenos materijala	modificirani prijenos kratkim lukom	modificirani prijenos kratkim lukom
Struja zavarivanja	-vršna struja (0A do 450A) -pozadinska struja (0A do 125A)	- osnovna struja (0A do 300A) - FPu (-9 do+9)
Napon zavarivanja	16V do 22V	16V do 22V
Položaji zavarivanja	Svi	Svi
Debljina žice	Tipično (0,85mm do 1,2mm)	Tipično (0,85mm do 1,2mm)
Zaštitni plin	100% CO_2; 100% Ar; mješavine Ar-CO_2	100% CO_2; 100% Ar; mješavine Ar-CO_2
Osnovni materijal	-ugljični i niskolegirani čelici -galvanizirani i pocinčani čelici -nehrđajući čelici i niklove legure -silikonska bronca i legure bakra	-ugljični i niskolegirani čelici -galvanizirani i pocinčani čelici -nehrđajući čelici i niklove legure -silikonska bronca i legure bakra
Primjena u industriji	-automobilska industrija -cjevovodi i posude pod tlakom (samo zavarivanje korijena) -prehrambena i petrokemijska industrija -tanji limovi	-automobilska industrija -cjevovodi i posude pod tlakom (zavarivanje korijena i popune) -prehrambena i petrokemijska industrija -zavarivanje limova svih debljina
Prednosti	-robusnija izvedba izvora struje -jednostavnost korištenja -kvalitetnija regulacija parametara zavarivanja -pouzdanost	-fleksibilnost -mogućnost zavarivanja popune i završnog sloja -mogućnost REL zavarivanja -lakše manipuliranje zbog manjih dimenzija uređaja -cijena
Nedostaci	-ograničenost na zavarivanje korijenskog prolaza i tanjih limova -potpuno iskorištenje potencijala tek uz automatizirane postupke zavarivanja za popunu i završni sloj -cijena	-složenost korištenja upravljačke ploče -praćenje parametara preko električnog luka -osjetljivost opreme zbog digitalnog upravljanja

Slika 5.1 prikazuje dijagrame struje i napona za STT i FastRoot postupke zavarivanja.
Krivulja žute boje predstavlja promjenu napona u ovisnosti o vremenu, dok plava krivulja predstavlja promjenu struje u ovisnosti o vremenu.
Na slici je vidljivo da postoje izvjesne razlike u dijagramima struje i napona za navedene postupke. Ipak, vidljivo je i da se u svakom ciklusu pojavljuju dva nagla povećanja struje i kod STT i kod FastRoot postupka zavarivanja. Dok su ta nagla povećanja kod FastRooT postupka ujednačena, kod dijagrama struje za STT postupak vidljivo je da se prvo povećanje struje događa postepeno, dok je drugo povećanje struje naglo, a iza njega slijedi polagano smanjenje struje zavarivanja.
Dijagrami struje i napona za STT i FastRoot postupak zavarivanja snimljeni u Laboratoriju za zavarene konstrukcije upavo su potvrdili ono što je ranije u radu objašnjeno. Kod dijagrama struje za FastRoot postupak vidljivo je vrijeme kratkog spoja i vrijeme elekričnog luka, dok je kod dijagrama struje za STT postupak vidljivo vrijeme vršne i pozadinske struje te „tail-out“.



FastRoot postupak zavarivanja *STT postupak zavarivanja*

Slika 5.1 Prikaz dijagrama struje i napona za FastRoot i STT postupak zavarivanja [17]

6. Automatski postupak za orbitalno zavarivanje cijevi velikih promjera

Razvoj orbitalnih postupaka za zavarivanje cijevi i fitinga počeo je prije više od trideset godina kao odgovor na sve zahtijevnije standarde u zavarivanju cijevi. Takvi zahtijevi najprije su se javili u razvoju svemirske tehnologije i u nuklearnoj industriji.

Postupak zavarivanja koji se tada razvio bilo je orbitalno TIG zavarivanje.Razvojem orbitalnog TIG zavarivanja, omogućilo se brže i kvalitetnije zavarivanje simetričnih dijelova koji nisu bili pogodni za rotiranje oko vlastite osi rotacije.

Danas se automatske glave za zavarivanje koriste u cijelom svijetu, a za razliku od prije 30-tak godina kada je takva oprema bila izrazito skupa, cijena automatskih sustava za zavarivanje bitno je manja. Ipak, investiranje u automatski sustav za zavarivanje bitno ovisi o tome kolika će biti iskoristivost takvog sustava.

Razvoj automatskih glava za orbitalno zavarivanje bio je potaknut razvojem industrije, koja je imala sve veće zahtjeve za kvalitetom zavarenih spojeva. Osim toga, došlo je do deficita kvalitetnih zavarivača pa je i vrijeme potrebno za izvođenje projekata bilo povećano. Samim time je i cijena rada porasla te je daljnji razvoj automatskih sustava za orbitalno zavarivanje bio neupitan.

Razlozi zbog kojih je došlo do razvoja automatskih sustava za orbitalno zavarivanje su sljedeći:

- nedostatak kvalitetnih zavarivača,
- povećanje zahtjeva za kvalitetom zavarenih spojeva,
- potreba za smanjenjem cijene rada,
- razvoj osnovnih materijala čime je uzrokovana potreba za boljim kontroliranjem parametara zavarivanja kako bi se dobila željena metalurška svojstva.

Zbog razvoja osnovnih materijala koji su posebice osjetljivi na nepravilnu tehniku zavarivanja te zbog izrazito visokih zahtjeva na kvalitetu zavarenih spojeva, u nekim se industrijama ručno zavarivanje vrlo malo koristi. Neke od tih industrija su: farmaceutska, proizvodnja poluvodiča, biotehnološka industrija itd.

Razvojem orbitalnog TIG zavarivanja povećala se kvaliteta zavarenih spojeva i smanjilo vrijeme zavarivanja, ali samo za male promjere cijevi. Glavno ograničenje orbitalnog TIG postupka zavarivanja je mala količina depozita.

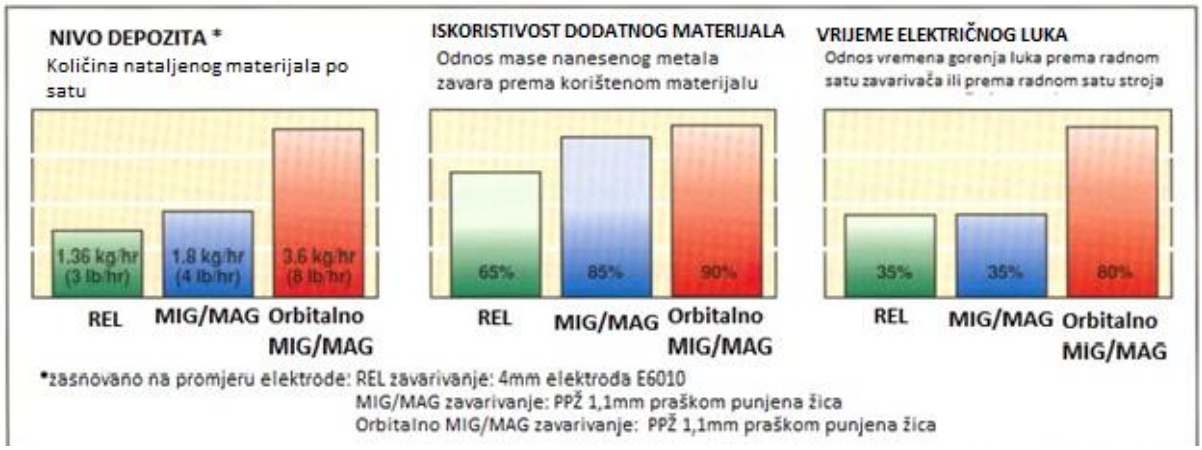
Kod orbitalnog TIG zavarivanja količina rastaljenog materijala iznosi cca. 0,45 kg/h. Količina rastaljenog materijala može se povećati korištenjem orbitalnog TIG zavarivanja sa vrućom žicom te ona tada doseže vrijednost od cca. 1,4 kg po satu. Naravno, kod TIG zavarivanja sa vrućom žicom povećava se kompleksnost opreme za zavarivanje.

Razvojem osnovnih materijala, javila se potreba za postupkom zavarivanja koji će omogućiti veću količinu rastaljenog materijala, uz istu razinu kvalitete orbitalnog TIG postupka zavarivanja. Kako su automatske glave za orbitalno TIG zavarivanje već bile razvijene, sljedeći logičan korak u razvoju automatskih sustava za orbitalno zavarivanje bio je razvoj automatskog sustava za orbitalno MIG/MAG zavarivanje.

Razvojem orbitalnog MIG/MAG sustava za zavarivanje, povećala se količina rastaljenog metala te se uveliko smanjilo vrijeme zavarivanja, a potreba za iskusnim zavarivačima se smanjila zbog toga što je iskustvo i vještina potrebna za operatera koji upravlja procesom kod orbitalnog MIG/MAG zavarivanja daleko manja nego kod ručnog zavarivanja.

Upotrebom praškom punjene žice promjera 1,1mm količina rastaljenog materijala za orbitalno MIG/MAG zavarivanje iznosi cca. 3,6 kg/h. Osim toga, ovim se postupkom zavarivanja mogu zavarivati i cijevi većih debljina stijenki, zbog toga što je unos topline u odnosu na TIG zavarivanje puno veći pa dolazi do fuzije stijenki cijevi sa kupkom.

Slika 6.1 prikazuje dijagram koji uspoređuje količinu rastaljenog materijala, intermitenciju te efikasnost depozita za REL, poluautomatsko MIG/MAG zavarivanje te orbitalno MIG/MAG zavarivanje automatskom glavom.



Slika 6.1 Dijagram količine rastaljenog materijala [12]

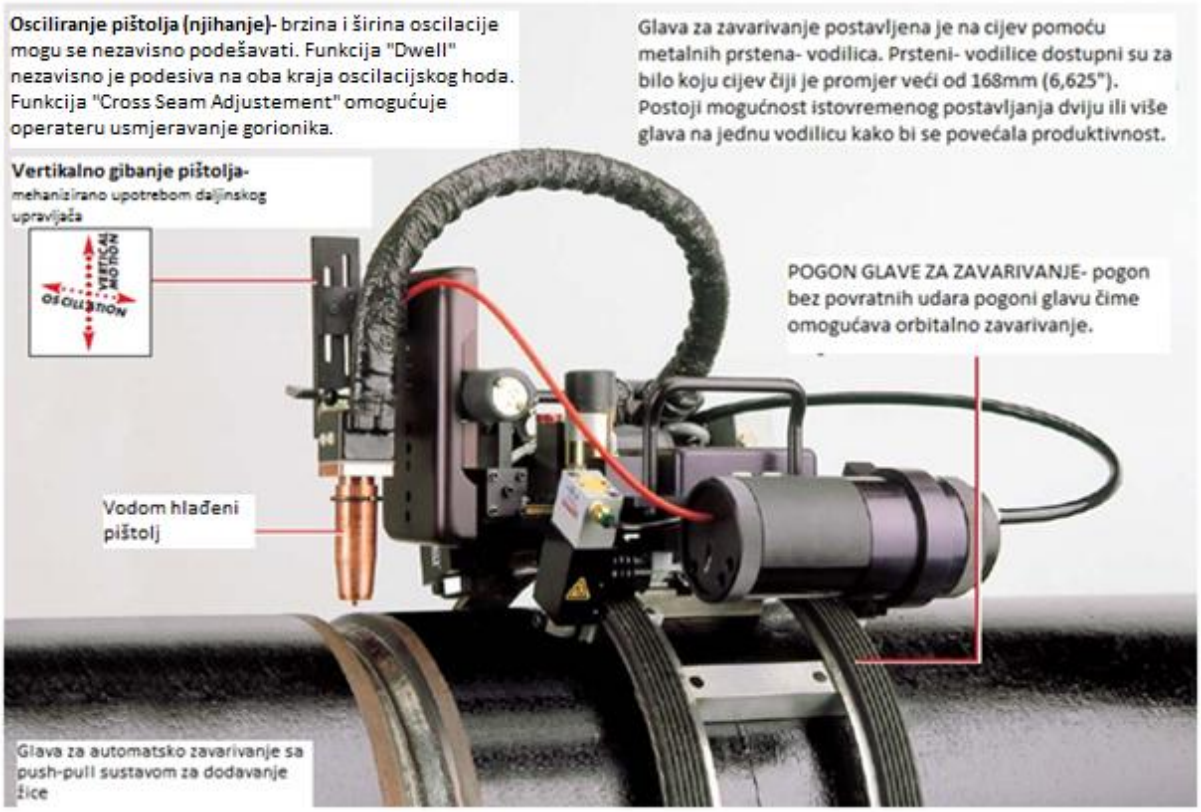
Iz slike 6.1 jasno su vidljive prednosti automatskog orbitalnog sustava za zavarivanje . Kao posljedica povećanja količine rastaljenog materijala za 100% u odnosu na poluautomatsko MIG/MAG zavarivanje, dolazi do smanjenja vremena zavarivanja. Time se direktno utječe na cijenu zavarivanja.

Automatskim sustavom za orbitalno zavarivanje moguće je proizvesti visokokvalitetne zavare u svim položajima zavarivanja. Time je sustav za orbitalno zavarivanje idealan za zavarivanje cjevovoda namijenjenih za transport nafte i plina.

6.1. Oprema za zavarivanje- sustav Pipeliner II

Svojstva Pipeliner II automatske glave za zavarivanje odnose se na model 609. Isti je model korišten u eksperimentalnom dijelu završnoga rada za zavarivanje popune i završnog sloja cijevi DN500 (Ø 508mm) materijala X70.

Slika 6.2 prikazuje automatsku glavu sa push-pull sustavom dodavanja žice. Takvim se sustavom dodavanja žice omogućava veća udaljenost između izvora struje za zavarivanje i automatske glave za zavarivanje.



Slika 6.2 Automatska glava za zavarivanje model 609 [12]

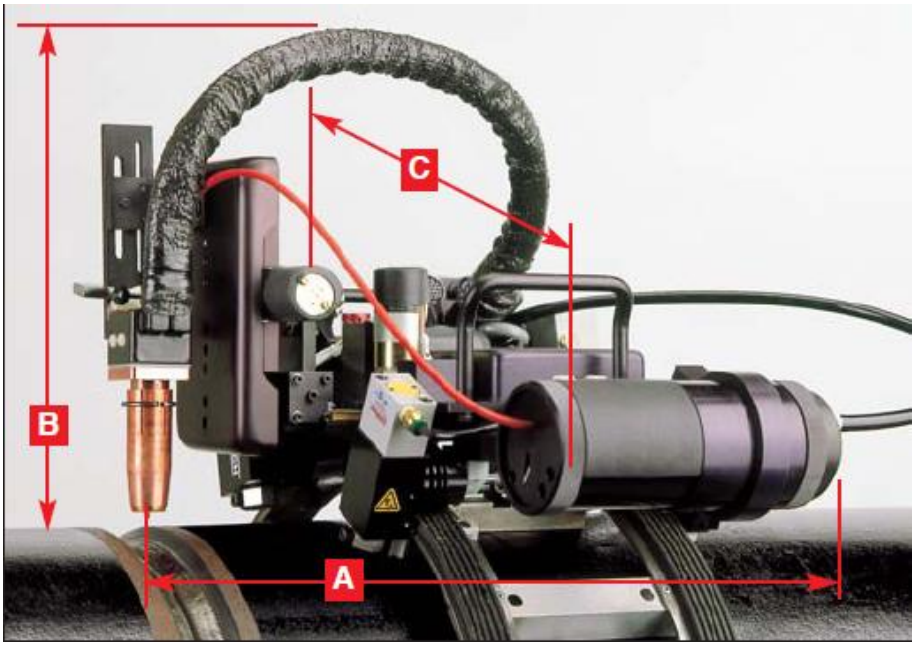
Specifikacije automatske glave za zavarivanje model 609 prikazane su u tablici 6.1.

Tablica 6.1 Specifikacije automatske glave za zavarivanje model 609 [12]

Primjena	**Promjer cijevi- 168mm(6,625“) i veće** **Debljina stijenke cijevi- neograničena**	
Oscilacijski modul (linearni) **Amplituda oscilacije** **Brzina oscilacije** **Zadržavanje u položaju oscilacije** **Podešavanje križnog suporta**	 0- 5,1 cm (2“) 0- 254 cm/min 0-1 s, nezavisno podesivo u oba krajnja položaja njihanja ± 2,5 cm (1,0“)	
Oscilacijski modul (s daljinskim upravljačem) **Kutna brzina oscilacije** **Brzina oscilacije** **Podešavanje križnog suporta**	 0- 15º 0- 2,5 Hz max. 0- 1 s, nezavisno podesiva u oba krajnja položaja njihanja ± 20º	
Modul za okomito pomicanje pištolja	Pomak: 6,6 cm (motorni pogon) Brzina: 152 cm/min; max.	
Modul traktora **mogućnost brzina** **smjer kretanja**	Poly- Track ® pomicanje (patentirano) 0- 76,2 cm/min, mogućnost ugradnje motora s većim brzinama Odabir prekidačem na glavi za zavarivanje	
Žica za zavarivanje	Promjer žice	0,8- 1,6 mm
	Brzina žice	0,5- 22 m/min
	Veličina koluta žice	15 kg WFOF, WFPP; 5 kg WFOH[2]
Tekućinom hlađeni pištolj	Protok struje	300 A trajno, koristi standardne dijelove
Dužine polikabela	WFOH WFPP WFOF	15 m, standardno 8 m, standardno 4,6 m, standardno
Mogućnosti podešavanja pištolja	Pištolj naprijed- nazad Nagib pištolja Nagib nosača (opcija)	± 15º ručno ± 10º ručno ± 45º ručno

[2] WFOF- dodavač žice na podu, WFPP- push-pull sustav za dodavanje žice, WFOH- dodavač žice na glavi za zavarivanje

Slika 6.3 prikazuje dimenzije automatske glave za zavarivanje sa dodavačem žice na glavi. Tablica 6.2 pokraj slike 6.3 sadrži dimenzije sva tri tipa automatskih glava za zavarivanje (WFOF, WFOH, WFPP).



Slika 6.3 Gabariti automatske glave za zavarivanje [12]

Tablica 6.2 Dimenzije automatske glave za zavarivanje [12]

Model	Aksijalna dužina A*	Najmanja radijalna dužina B**	Dužina preko svega C	Masa***
609 WFOF	38,7 cm	24,8 cm	30,5 cm	9,8 kg
609 WFPP	37,5 cm	24,1 cm	41,3 cm	11,6 kg
609 WFOH	66,7 cm	26,7 cm	36,8 cm	14,4 kg

* središnji oscilacijski hod
** središte okomitog hoda
***masa bez koluta sa žicom (WFOH). Uključuje 1,6 kg mase polikabela gorionika (djelomično).

6.2. Izvor struje za zavarivanje Magnatech MPS 4000

Pipeliner II sustav za orbitalno MIG/MAG zavarivanje koristi digitalni izvor MPS 4000 za zavarivanje koji ima tvornički programirane synergic krivulje za vrlo veliki broj legura, zaštitnih plinova te promjera i vrsta žica za zavarivanje.

Ipak, ako se javi potreba za unošenjem novih synergic krivulja u sam uređaj za zavarivanje (razvoj novih vrsta osnovnih i dodatnih materijala te plinskih mješavina), to je omogućeno preko posebnog sučelja.

Sinergijsko upravljanje brzinom žice i jačinom struje zavarivanja uvelike olakšava podešavanje parametara. Operater mora na kontrolnoj ploči uređaja odabrati odgovarajući osnovni i dodatni materijal te zaštitni plin, a digitalni upravljani uređaj sugerira idealne parametre za određene ulazne podatke. Ukoliko operater promijeni brzinu žice, automatski dolazi do promjene jačine struje zavarivanja te napona.

Kao i kod konvencionalnog MIG/MAG zavarivanja, regulacija napona električnog luka je automatska, a samim time regulira se i visina električnog luka. Dakle, promjena duljine slobodnog kraja žice, do koje može doći uslijed loše pripreme spoja, kompenzira se automatskom regulacijom duljine električnog luka. Vrijeme regulacije napona električnog luka mjeri se u milisekundama. Kao posljedica kvalitetne regulacije duljine električnog luka, dolazi do smanjenja prskanja, što direktno utječe na troškove naknadnog brušenja te na ukupno vrijeme zavarivanja. Slika 6.4 prikazuje automatsku regulaciju duljine električnog luka.



Slika 6.4 Promjena duljine slobodnog kraja žice ($l_{skž}$) uslijed loše pripreme zavarenog spoja [13]

Upravljačka ploča uređaja za zavarivanje MPS 4000 sadrži sve potrebne informacije o parametrima zavarivanja koji su prikazani digitalnim ampermetrom i voltmetrom te su određeni sinergijskim programom na temelju ulaznih podataka. Uspostavom električnog luka, na zaslonu se pojavljuju trenutne vrijednosti struje i napona električnog luka. Slika 6.5 prikazuje zaslon upravljačke ploče MPS 4000 uređaja za zavarivanje.



Slika 6.5 Zaslon upravljačke ploče MPS 4000 [13]

Upotrebom daljinskog upravljača, operater može korigirati vrijednosti struje i napona te duljine i brzine njihanja, kao i brzinu zavarivanja. Navedene vrijednosti moguće je korigirati u rasponu od ±10%.

Uz MPS 4000 izvor za zavarivanje, moguće je uskladiti i višekanalni programator koji je moguće programirati za četiri različita prolaza kod višeslojnog zavarivanja cijevi. Programator se fiksira na sam uređaj za zavarivanje te se nakon programiranja parametara zavarivačke glave vrata višekanalnog programatora mogu mehanički osigurati i spriječiti neovlaštenu promjenu parametara.

Slika 6.6 prikazuje višekanalni programator.



Slika 6.6 Višekanalni programator MPS 4000 MULTILEVEL CONTROL

6.2.1. Specifikacije uređaja za zavarivanje MPS 4000

Tablica 6.3 prikazuje tehničke podatke uređaja za zavarivanje MPS 4000.

Tablica 6.3 Specifikacije uređaja za zavarivanje MPS 4000 [13]

	Struja zavarivanja	**Max. napon otvorenog kruga**	**cosφ/ učinkovitost izvora**	**Napajanje**	**Tip hlađenja**
MPS 4000 izvor struje	400A pri 50% intermitencije 320 A pri 100% intermitencije	70 V	0.99/ 88%	200/230/400/460V 35A; 12,7kVA ~50/60Hz	Prisilno zrakom

	Tip pumpe	**Kapacitet hlađenja**	**Max. dobava/tlak**	**Volumen rashladne tekućine**
MPS 4000R jedinica za hlađenje vodom	Centrifugalna	2000-2300W (pri 20º C)	3,5 l/min pri 4,2 bar	5,54 l

	Tip pogona	**Promjer žice**	**Brzina žice**
MPS 4000 dodavač žice	4 kotačića (različite dimenzije ovisno o tipu žice)	0,8 mm- 1,6 mm	0,5 m/min- 22 m/ min

DIMENZIJE I MASA	**MPS 4000 izvor struje**	**MPS 4000R Jedinica za hlađenje vodom**	**MPS 4000 dodavač žice**
Duljina	72,5 cm	72,5 cm	65 cm
Širina	29 cm	29 cm	29 cm
Visina	47 cm	23 cm	41 cm
Masa	35 kg	13 kg	16 kg

6.3. Područja primjene automatskog sustava za orbitalno zavarivanje

Zbog svojih karakteristika sustav za automatsko orbitalno zavarivanje Pipeliner II koristi se i u zatvorenom prostoru i na terenu. Kod rada na terenu potrebno je obratiti pažnju na osiguravanje područja oko mjesta zavarivanja kako bi se spriječilo pojavljivanje pora u metalu zavara (vjetar može otpuhati zaštitnu plinsku mješavinu).

Sustav Pipeliner II koristi se u proizvodnji opreme za generatore pare i za izradu dijelova u energetskoj industriji te za terensko spajanje predfabriciranih dijelova.

Pipeliner II sustav za zavarivanje moguće je koristiti za zavarivanje magistralnih cjevovoda. Moguće ga je koristiti za zavarivanje naftovoda, plinovoda, vodovoda te cjevovoda koji se koriste za transport pare. Zahtjevi koji se javljaju kod transporta kapljevina (veći protoci), uvjetovali su povećanje promjera cjevovoda, ali i povećanje tlakova. Kao posljedica povećanja tlakova koji se javljaju kod magistralnih cjevovoda, dolazi do povećanja debljine stijenke istih. Kod zavarivanja cijevi velikih promjera i velikih debljina stijenki, potrebno je unijeti dovoljan iznos topline kako bi došlo do protaljivanja stijenki cijevi u zavareni spoj.

Nadalje, sustav Pipeliner II koristi se u granama industrije gdje postoji povećani zahtjev za kvalitetom zavarenih spojeva. Uspješno se koristi za zavarivanje tlačnih cjevovoda u izgradnji nuklearnih postrojenja.

Kod proizvodnje posuda velikih promjera (2 m), upotrebom Pipeliner II sustava za zavarivanje umjesto TIG postupka zavarivanja, vrijeme zavarivanja smanjilo se šest puta. [13]

Slike 6.7, 6.8 i 6.9 prikazuju neke od projekata na kojima se koristio Pipeliner II sustav za orbitalno zavarivanje.



Slika 6.7 Zavarivanje cjevovoda sustavom Pipeliner II [13]



Slika 6.8 Zavarivanje plinovoda promjera 760 mm [13]

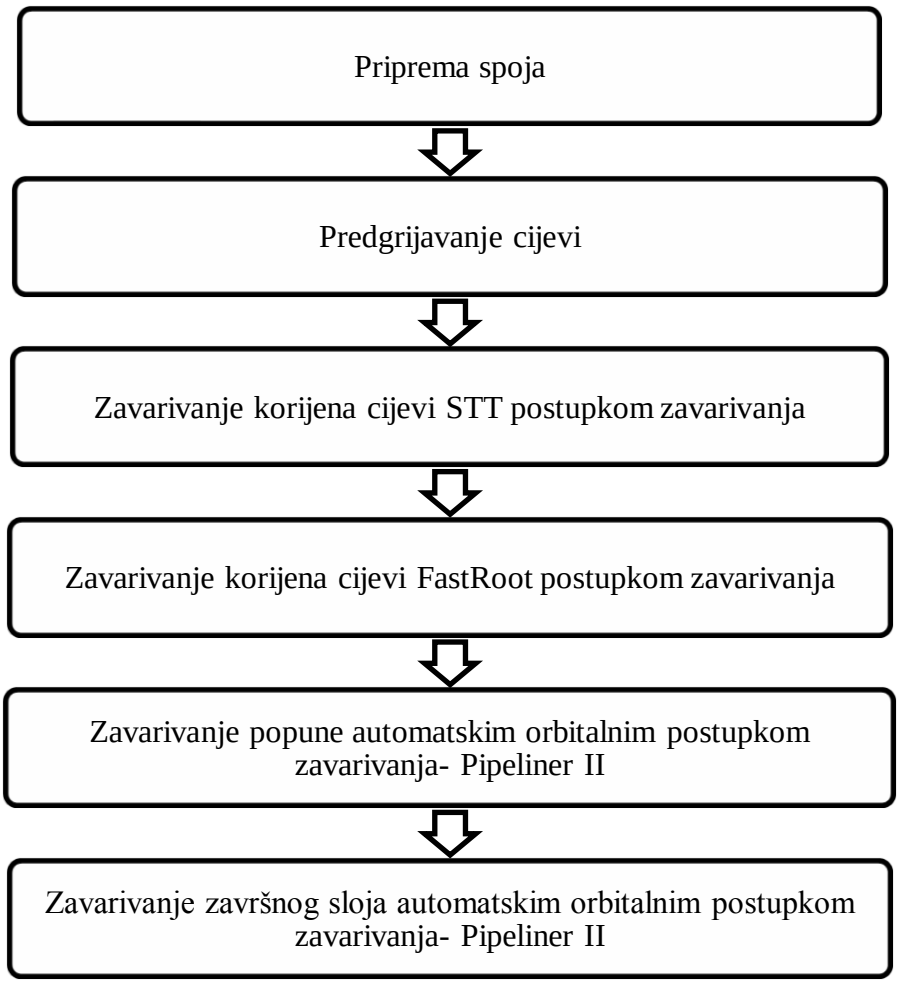


Slika 6.9 Zavarivanje cjevovoda promjera 1200 mm [13]

7. Eksperimentalni rad

7.1. Plan pokusa

Zavarivanje cijevi izvedeno je u radionici tvrtke Monter-strojarske montaže d.d., a ispitivanja su provedena u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Osnovni materijal bila je cijev X70 promjera DN500 (Ø 508mm) debljine stijenke 8,7mm. Dodatni materijal za korijenski zavar je VAC 60 Jesenice promjera $d_ž$ 1,0mm, dok je za popunu i završni sloj korištena praškom punjena žica Ti70PIPE-FD promjera $d_ž$ 1,2mm..
Pokus je podijeljen u faze koje su uvjetovane primjenjenim postupcima zavarivanja i dimenzijama te svojstvima korištenih materijala. Faze pokusa prikazane su dijagramom na slici 7.1.



Slika 7.1 Dijagram tijeka pokusa

Priprema spoja kao i parametri za zavarivanje postupaka korištenih u eksperimentu određeni su na temelju proučene literature. Parametri zavarivanja za tri korištena postupka zavarivanja prikazani su u tablicama 7.1, 7.2 i 7.3.

Tablica 7.1 Parametri zavarivanja STT postupka zavarivanja

Postupak zavarivanja	**I_{PC} A**	**I_{BC} A**	**I_{st} A**	**U V**	**$V_Ž$ m/min**	**Q l/min**	**V_Z mm/min**
STT	285	45	80	16,6	3,0	15	75-85

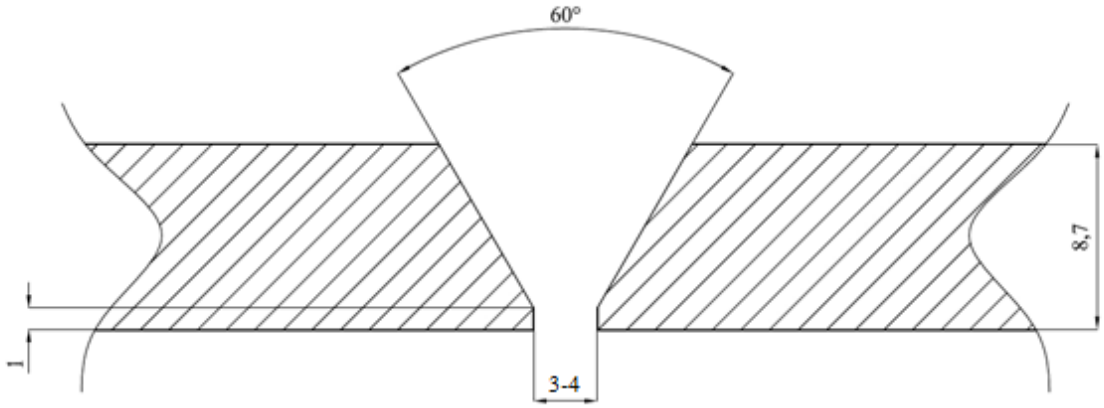
Tablica 7.2 Parametri zavarivanja FastRoot postupka zavarivanja

Postupak zavarivanja	**I A**	**FP**	**U V**	**$V_Ž$ m/min**	**Q l/min**	**V_Z mm/min**	**Synergic program**
Fast Root	78	+5	16	3,0	15	75-85	903

Tablica 7.3 Parametri zavarivanja popune i završnog sloja

Pipeliner II	**I A**	**U V**	**v_z mm/min**	**Q l/min**	**Širina osciliranja mm**	**Brzina osciliranja mm/min**	**DWELL**	
							Lijevo	Desno
Popuna	155	18	100	18	130	930	3,5	3,5
Završni sloj	150	18	80	18	220	915	3,5	3,5

Debljina stijenke cijevi uvjetovala je da zavareni spoj bude izveden u tri prolaza. Priprema je izvedena kao V- spoj pod kutem od 60º. Razmak između cijevi iznosi 3mm, dok visina nosa iznosi 1mm. Dobra priprema spoja nužna je za ostvarenje kvalitetnog zavarenog spoja. Naime, ako zbog loše pripreme spoja dođe do prevelikog smaknuća ili razmaka između cijevi, korijenski zavar može biti loše izveden. Samim time upitna je i kvaliteta cijelog zavarenog spoja zbog toga što popuna i završni sloj ovise o dobro izvedenom korijenskom zavaru. Skica pripreme spoja prikazana je slikom 7.2.



Slika 7.2 Skica pripreme zavarenog spoja

7.2 Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u ovom pokusu koristila se cijev DN500 (Ø 508mm), a materijal cijevi je čelik X 70 prema normi API 5L.

Tablica 7.4 prikazuje vrijednosti vlačne čvrstoće i granice razvlačenja prema normi API 5L.

Tablica 7.4 Klasifikacija čelika prema normi API 5L [6]

Oznaka	Granica razvlačenja (N/mm^2)	Vlačna čvrstoća (N/mm^2)
A25	172	310
A	207	331
B	241	413
X42	289	413
X46	317	434
X52	358	455
X56	386	489
X60	413	517
X65	448	530
X70	482	565
X80	551	90-120

U tablici 7.5 prikazan je kemijski sastav čelika X 70 koji je korišten u eksperimentu. U prilogu je dan atest osnovnog materijala koji prikazuje kemijski sastav.

Tablica 7.5 Sadržaj kemijskih elemenata u osnovnom materijalu čelične cijevi X 70(broj šarže 57195)

Kemijski element	C	Si	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Al
Maseni udio (%)	0,07	0,392	1,447	0,03	0,014	0,023	0,004	0,063	0,017	0,048	0,05

Iz podataka prikazanih tablicom 7.5 izračunata je potrebna temperatura predgrijavanja. Za određivanje temperature predgrijavanja korištena je metoda *Ito-Bessyo*. Razlog odabira te metode je preporuka korištenja za mikrolegirane čelike. Prema toj metodi, temperatura predgrijavanja ovisi o kemijskom sastavu materijala te o debljini stijenke. Minimalna temperatura predgrijavanja T_o za čelik X 70 prema metodi *Ito-Bessyo* izračunata je izrazom (7.1):

$$T_{o\ min} = 1440 \cdot P_w - 392,\ ℃ \tag{7.1}$$

gdje je P_w parametar pucanja i izračunava se pomoću izraza (7.2)

$$P_w = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B + \frac{\delta}{600} + \frac{H}{60}, \% \tag{7.2}$$

δ.....debljina osnovnog materijala, mm

H....sadržaj difuzijskog vodika, ml/100g metala zavara

Uvrštavanjem podataka iz tablice 7.5 u izraze (7.1) i (7.2), dobivena je temperatura predgrijavanja za korišteni osnovni materijal.

Temperatura predgrijavanja prema metodi *Ito-Bessyo* za čelik X 70, debljine stijenke 8,7 mm i sadržaja difuzijskog vodika H=3,5ml/100g metala zavara iznosi 150 ºC.

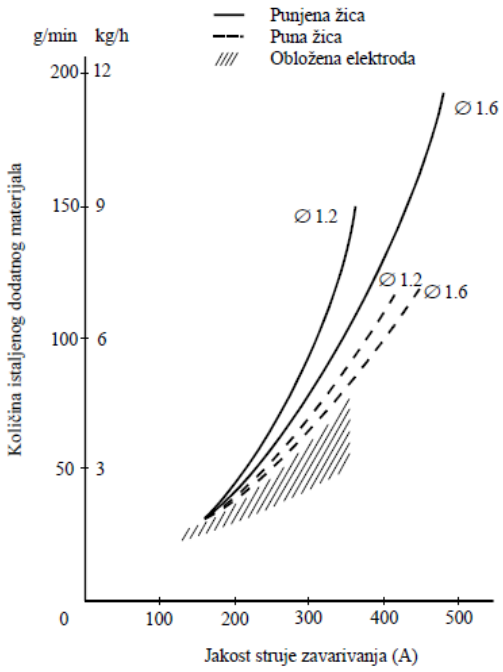
Predgrijavanje je trajalo sve dok se nije postigla temperatura čelika od 150 ºC , kao što je izaručunato izrazom (7.1). Temperatura cijevi ispitivala se termokredom.

7.3 Dodatni materijali

Dodatni materijal korišten za zavarivanje korijena je žica promjera 1,0 mm VAC 60- Jesenice. Specifikacije žice dane su u prilogu. Navedena žica koristila se kod zavarivanja korijena STT postupkom, kao i kod zavarivanja FastRoot postupkom. Korištenjem istog dodatnog materijala osiguravaju se uvjeti za objektivnu usporedbu dva postupka za zavarivanje korijena cijevi.

Žica korištena za zavarivanje popune i završnog sloja automatskim orbitalnim postupkom zavarivanja Pipeliner II je rutilnim praškom punjena žica Ti 70 Pipe-FD proizvođača Böhler. Specifikacije žice Ti 70 Pipe- FD dane su u prilogu tablicom 9.2. Rutilni prašak u procesu zavarivanja ima istu ulogu kao i obloga elektrode kod REL zavarivanja, a osim toga, poboljšava mogućnost zavarivanja u svim položajima, osigurava mogućnost većeg strujnog opterećenja i legiranjem poboljšava svojstva metala zavara.

Slika 7.3 prikazuje dijagram količine rastaljenog materijala u ovisnosti o jačini struje zavarivanja. U dijagramu se uspoređuju vrijednosti za elektrodu za REL zavarivanje promjera 1,6mm, te punu žicu i praškom punjenu žicu promjera 1,2mm. Vidljivo je da praškom punjena žica daje bolje rezultate.



Slika 7.3 Dijagram količine rastaljenog materijala u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja [6]

Komponente jezgre žice punjene rutilnim mineralnim praškom koje tvore trosku sastavljene su od rutila, aluminosilikata, kalcijevog oksida, fluorida i potrebnih dezoksidanata (najčešće se koriste FeMn, Al,TiO_2).

Jezgra rutilnih punjenih žica sadrži više od 50 % rutila (TiO_2), koji je vrlo dobar ionizator i stabilizator električnog luka. Kod rutilnih punjenih žica koje se primjenjuju za zavarivanje u vodoravnom položaju, sadržaj TiO_2 doseže i do 65 %. Mehanička svojstva zavarenih spojeva izvedenih žicom punjenom rutilnim mineralnim praškom vrlo su dobra. Čelici zavarivani takvom žicom imaju zadovoljavajuću žilavost i pri temperaturi od -20 ^{o}C.[19]

Kod zavarivanja legiranih čelika nužno je uporabiti žicu punjenu rutilnim mineralnim praškom legiranu sa 2,5 % nikla (Ni), koji povećava žilavost.

Osnovne karakteristike pri zavarivanju žicama punjenim rutilnim mineralnim praškom su:

- vrlo lako namještanje parametara zavarivanja,
- brzo skrućivanje troske koja se lako skida, te je pogodna za zavarivanje u prinudnom položaju,
- zavar ima lijepu i glatku površinu,
- stabilan i miran električni luk,
- kvalitetno provarivanje korijena zavara bez primjene podloge.

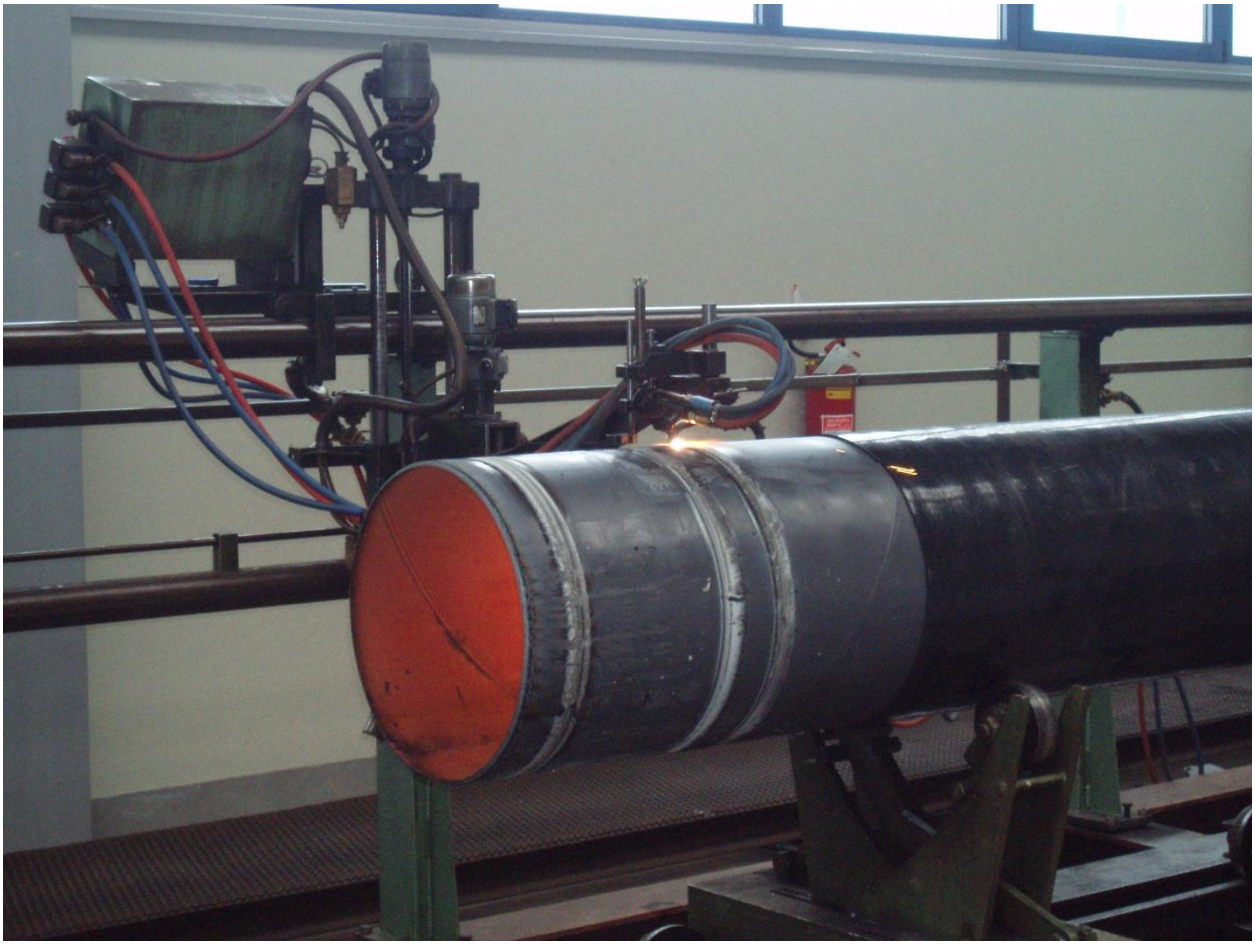
Najčešće korištene žice punjene rutilnim mineralnim praškom su promjera od 1,2 do 2,4 mm i njihovom uporabom se postiže količina rastaljenog materijala od 10 do 12 kg/h.[19]

7.3.1. Zaštitna plinska mješavina

Kod oba postupka korištena za zavarivanje korijena korištena je plinska mješavina Ar-CO_2 82%-18%, trgovačkog naziva Ferromix C18 (M21 po HRN EN ISO 14175). Navedena mješavina se primjenjuje i kod zavarivanja kratkim spojevima, ali i kod STT i FastRoot postupaka zavarivanja. Disociranjem CO_2 u električnom luku oslobađa se kisik koji daje talini dodatnu žitkost i doprinosi stabilizaciji luka. Svojom toplinskim vodljivošću CO_2 također utječe i na veću širinu provara. Štrcajući prijenos metala ostvaruje se u atmosferi od 25% CO_2. Porastom njegova udjela raste unos topline, a time i opasnost od progaranja. Ar / CO_2 mješavine do 18 % CO_2 podržavaju također i impulsni način prijenosa metala. Prijenos metala kratkim spojevima je metoda prijenosa metala s niskim unosom topline te se za nju koriste mješavine ili čisti CO_2.

7.4. Zavarivanje korijenskog prolaza

Zavarivanje korijena zavarenog spoja zahtijeva vrlo dobru pripremu. Kako je duljina zavarivanih uzoraka iznosila 500mm, prvi korak bio je rezanje uzoraka. Rezanje je izvedeno automatskom plinskom rezačicom kao što je prikazano na slici 7.4.



Slika 7.4 Rezanje cijevi automatskom plinskom rezačicom

Nakon rezanja na željenu dužinu, zavarivač kutnom brusilicom priprema stijenke cijevi prema skici prikazanoj na slici 7.2, a područje oko mjesta zavarivanja brusi zbog otklanjanja nečistoća i produkata oksidacije. Pripremanje spoja prikazano je na slici 7.5.



Slika 7.5 Priprema spoja brušenjem

Nakon što su izvršene operacije potrebne za izvođenje korijenskog zavara, cijevi se pozicioniraju na radni stol. Osigurava se pravilan razmak između cijevi, a smjer zavarivanja je odozgora prema dolje. Nakon zavarivanja polovice zavarenog spoja STT postupkom, zavarivač prelazi na drugu stranu cijevi. Smjer zavarivanja je također odozgora prema dolje, a zavarivanje se sada izvodi FastRoot postupkom zavarivanja. Slike 7.6 a), 7.6 b) i 7.6 c) prikazuju zavarivača tijekom zavarivanja cijevi STT postupkom zavarivanja.



Slika 7.6 a) Zavarivanje STT postupkom- 12sati



Slika 7.6 b) Zavarivanje STT postupkom- 3 sata

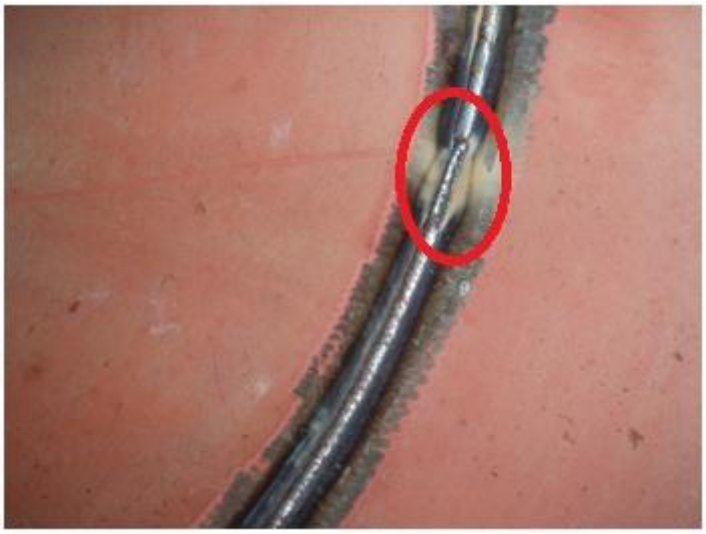


Slika 7.6 c) Zavarivanje STT postupkom- 6sati

Kao što je prikazano na slikama 7.6 a), 7.6 b) i 7.6 c), zavarivanje na radnom stolu u radionici simulira uvjete na terenu. To je zbog toga što je cijev fiksirana, a zavarivač prolazi kroz sve položaje zavarivanja. Na taj način se dolazi do vjerodostojnih rezultata ispitivanja koja su kasnije izvedena na uzorcima zavarenog spoja.

Zavarivanje korijena STT postupkom, kao i FastRoot postupkom zavarivanja, izvedeno je bez prekida, čime su umanjene pogreške pri zavarivanju koje su učestalije ako u zavarenom spoju postoje mjesta nastavljanja zavara. Osim toga, ukupno vrijeme zavarivanja smanjuje se ako nema prekidanja u zavarivanju, zbog toga što se prije svakog nastavljanja zavarivanja završetak prethodnog zavara mora izbrusiti kako bi se izbjegli neželjeni uključci u metalu zavara.

Slika 7.7 a) prikazuje korijenski zavar s unutarnje strane cijevi. Vidljivo je mjesto na kojem se spajaju zavareni spoj izveden STT postupkom i zavareni spoj izveden FastRoot postupkom zavarivanja. Slika 7.7 b) prikazuje brušenje završetka zavara prije nastavljanja zavarivanja.



Slika 7.7a) Korijenski zavar s unutarnje strane cijevi- mjesto prijelaza



Slika7.7b) Brušenje pri nastavljanju zavarenog spoja

Prilikom zavarivanja korijenskog zavara, uvjeti zavarivanja za oba postupka zavarivanja su bili isti. Mjesto izvođenja, zavarivač, plinska mješavina i dodatni materijal bili su konstantni tijekom zavarivanja. Pripema spoja bila je ujednačena, a zavarivač je koristio istu tehniku rada pri korištenju oba postupka zavarivanja. Na taj su se način osigurali uvjeti za objektivnu usporedbu STT i FastRoot postupaka zavarivanja.

Slika 7.8 prikazuje početnu poziciju zavarivanja za orbitalno zavarivanje, a slika 7.9 prikazuje zavarivanje Pipeliner II automatskim orbitalnim postupkom zavarivanja.

7.5. Zavarivanje popune i završnog sloja

Zavarivanje popune i završnog sloja izvedeno je u radionici tvrtke Monter-strojarske montaže d.d. iz Zagreba. Ista je tvrtka omogućila korištenje opreme Pipeliner II, a zavarivanje je izvedeno pod nadzorom operatera koji su atestirani za postupak zavarivanja.

Zaštitna plinska mješavina korištena za ovaj postupak zavarivanja ista je koja se koristila i za korijenski zavar. Riječ je o mješavini Ar-CO_2 u omjeru 82%-18% trgovačkog naziva Ferromix C18 (M21 po HRN EN ISO 14175).

Dodatni materijal korišten za zavarivanje popune i završnog sloja je praškom (rutilnim) punjena žica Ti 70 Pipe-FD proizvođača Böhler. Specifikacije navedene žice dane su u prilogu.

Parametri zavarivanja popune i završnog sloja dobiveni su proučavanjem literature dostupne za automatske orbitalne postupke zavarivanja. Osim toga, kako su operteri koji su nadgledali zavarivanje već otprije upoznati s opremom te osnovnim i dodatnim materijalom, okvirne vrijednosti parametara za zavarivanje bile su poznate. Parametri za zavarivanje popune i završnog sloja Pipeliner II postupkom zavarivanja prikazani su u tablici 7.3.

Funkcija „Dwell“ parametra kod zavarivanja cijevi većih debljina stijenki pomaže boljoj fuziji osnovnog metala sa rastaljenom kupkom. „PowerBoost“ funkcija povećava struju zavarivanja kada se električni luk nalazi na stijenkama cijevi. Sinkronizacijom dva nivoa jakosti struje zavarivanja s oscilatornim pokretima gorionika povećava se unos topline na stijenkama cijevi kako bi došlo do intenzivnijeg taljenja osnovnog materijala. Smanjenjem struje zavarivanja kada električni luk prelazi preko rastaljene kupke spriječava se progorijevanje materijala. „Dwell“ parametar je bezdimenzijska vrijednost kojom se određuje vrijeme zadržavanja električnog luka na stijenkama osnovnog materijala.

Nakon podešavanja parametara za zavarivanje, potrebno je postaviti vodilice automatske glave za zavarivanje. Model korišten za zavarivanje prikazan na slici 7.8 opremljen je pneumatskim sustavom prihvata vodilice, što uvelike olakšava montiranje glave na vodilice. Za razliku od zavarivanja korijenskog zavara kada je smjer zavarivanja bio odozgora prema dolje, kod zavarivanja popune i završnog sloja smjer zavarivanja je odozdola prema gore. Na taj se način umanjuje mogućnost za naljepljivanjem, zbog toga što se smanjuje utjecaj gravitacijske sile na kretanje taline ispred električnog luka. Zbog toga što je smjer zavarivanja odozdola prema gore, početna pozicija glave za zavarivanje je 6sati kao što je vidljivo na slici 7.8.



Slika 7.8 Početna pozicija zavarivanja za orbitalno zavarivanje Pipeliner II

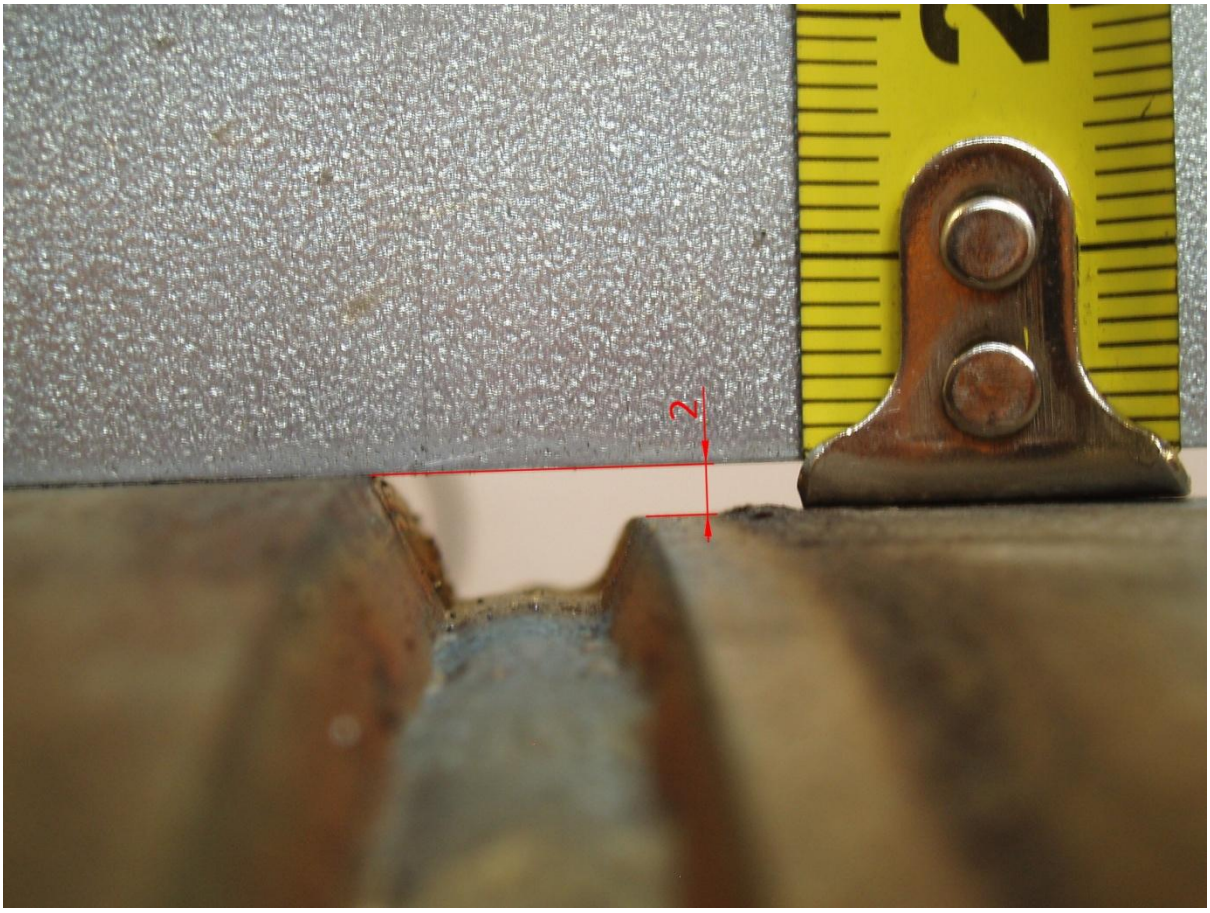


Slika 7.9 Zavarivanje Pipeliner II automatskim orbitalnim postupkom zavarivanja

Kao što je vidljivo na slici 7.9 operater prati električni luk, a ukoliko su potrebne korekcije parametara zavarivanja, može ih mijenjati daljinskim upravljačem u rasponu od ± 10%. Uloga operatera iznimno je bitna zbog toga što se njegovom pravovremenom reakcijom izbjegavaju skupi popravci grešaka. Operateri koji rade automatskim orbitalnim postupkom zavarivanja u pravilu su vješti MAG zavarivači sa dugogodišnjim iskustvom.

7.6. Vizualna kontrola izvedenih zavara

Slika 7.10 prikazuje površinski izgled korijena zavarenog spoja. Vidljivo je smaknuće dviju cijevi od 2 mm koje će kasnije otežati kvalitetno zavarivanje popune i završnog sloja. Primjer sa slike 7.10 prikazuje tipičnu situaciju koja se može dogoditi na terenu. Uzrok smaknuća može biti odstupanje od kružnosti dviju cijevi koje se zavaruju, ali i loše pozicioniranje cijevi pomoću naprave za pozicioniranje. Kod ovakvih slučajeva potrebna je vještina operatera koji nadziru zavarivanje. Upravo će operater reguliranjem brzne žice i brzine zavarivanja, kao i „Dwell“ funkcije, kompenzirati smaknuće cijevi.



Slika 7.10 Smaknuće uzrokovano lošim pozicioniranjem cijevi

Slika 7.11 prikazuje korijen zavara. Vidljivo je peveliko nadvišenje korijena do kojega je došlo zbog loše tehnike rada. Zbog premale brzine zavarivanja dolazi do velikog unosa topline na malom području te dolazi do protaljivanja. Ovakva greška mora se izbrusiti zbog toga što bi zbog nagomilanog zavara poput primjera sa slike 7.11 došlo do povećanog lokalnog naprezanja. Takvo nagomilavanje materijala s unutarnje cijevi povećava mogućnost turbulentnog strujanja medija što je izrazito nepovoljno, pogotovo kod cjevovoda s visokim tlakom.



Slika 7.11 Korijen s unutarnje strane cijevi

Slika 7.12 prikazuje završni sloj zavarenog spoja. Vidljivo je da je širina zavarenog spoja konstantna po cijeloj dužini spoja što je uzrokovano istom širinom njihanja. Ovakav izgled površine zavarenog spoja ne može se postići ručnim postupcima zavarivanja. Iz slike 7.12 vidljivo je da na površini spoja nema pora niti pukotina.



Slika 7.12 Prikaz završnog sloja zavara

7.6. Izrezivanje i priprema epruveta

Nakon što je cijev potpuno zavarena, izrezane su epruvete kako bi se na njima moglo izvršiti savijanje. Ovom razornom metodom ispitivanja utvrđuje se kvaliteta zavarenog spoja. Izrezivanje epruveta, kao i postupak savijanja izvedeni su u skladu s normom HRN EN 910.

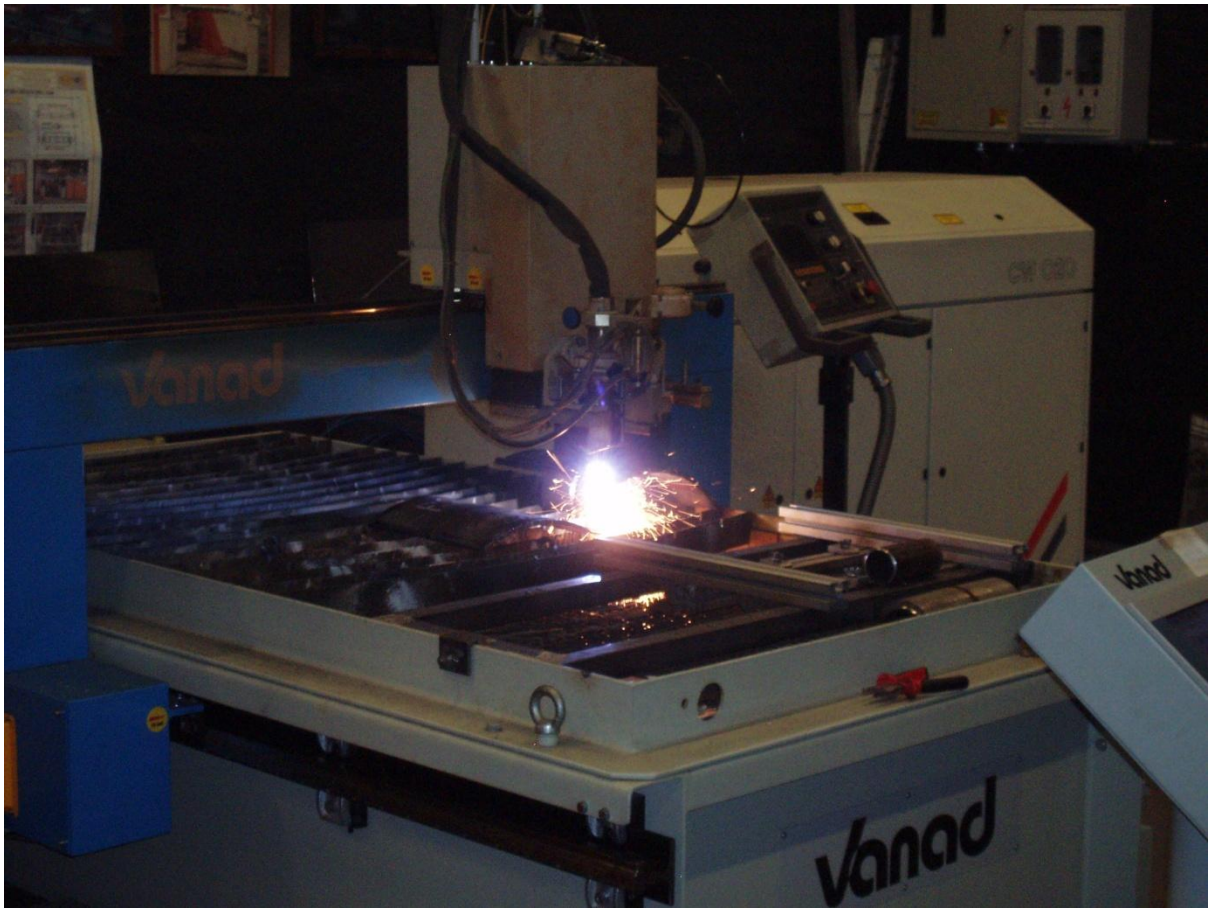


Slika 7.13 Izrezivanje epruveta

Dijelovi cijevi najprije su izrezani ručno, gorionikom za rezanje pomoću plinskog rezanja. Postupak rezanja plašta cijevi prikazan je slikom 7.13. Nakon toga epruvete su izrezane na konačnu dimenziju plazma rezačicom, brzinom rezanja od 0,4 m/min, strujom rezanja 75 A i promjerom sapnice 1,1 mm.(slika 7.14). Nakon hlađenja uzoraka na svakom je trebalo provesti naknadno brušenje srhova nastalih plazma rezanjem.

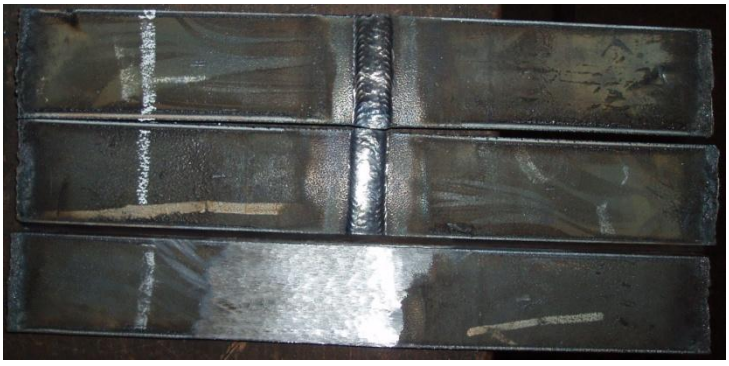
Dio uzoraka predviđen za ispitivanje savijanjem naknadno se brusio. Izbrušeni su lice i naličje zavara kako bi se moglo provesti ispitivanje. Slika 7.15 prikazuje epruvete prije i nakon brušenja naličja zavara.

Epruvete su označene žigom kako ne bi došlo do zamijene između epruveta čiji je korijen zavaren STT-om i epruveta gdje je korijen zavaren FastRoot-om.



Slika 7.14 Rezanje epruveta

Uzorci predviđeni za makroizbruske brušeni su brusnim papirom na ravnoj podlozi. Brušenje se izvodilo brusnim papirom manje gradacije prema brusnom papiru veće gradacije. Gradacija brusnog papira bila je sljedeća: 150, 180, 240, 320, 400, 500 i na kraju 600. Nakon brušenja uzoraka izvodi se nagrizanje da bi se vidjela makrostruktura i izgled zavara. Nagrizanje je obavljeno u Laboratoriju za zaštitu materijala otopinom „Nital“ koja sadrži 5% HNO_3 i 95% metanola. Svaki je uzorak uronjen u otopinu nekoliko minuta, zatim je ispran destiliranom vodom i osušen fenom. Kao rezultat dobiveni su uzorci na kojima se jasno vide sva tri prolaza i spoj s osnovnim materijalom.



Slika 7.15 Epruvete za savijanje prije i nakon brušenja zavara

7.7. Savijanje epruveta

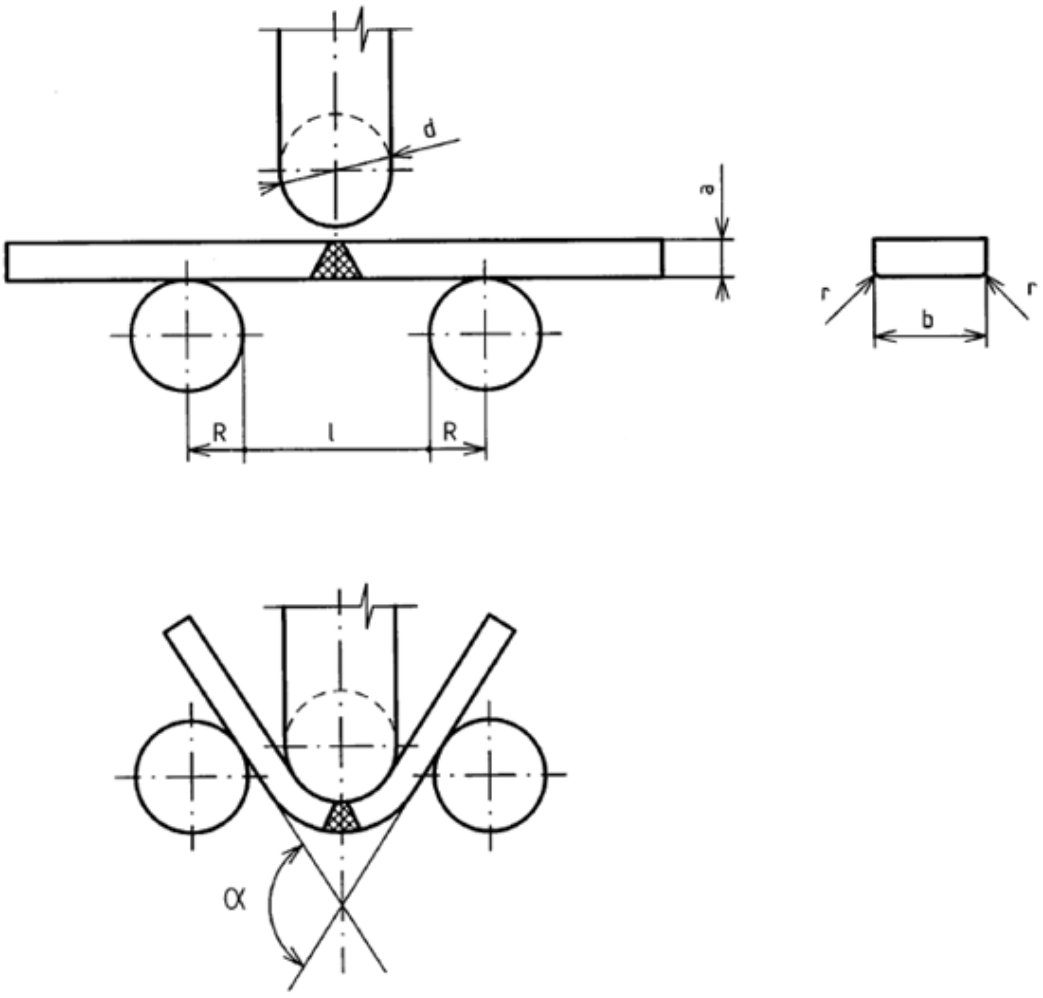
Ispitivanje je provedeno u skladu sa normom HRN EN 910. Polumjer valjaka *R*, promjer trna *d* kao i razmak l između oslonaca određen je izrazom (7.3):

$$d + 2a < l \leq d + 3a \tag{7.3}$$

Slika 7.16 prikazuje odnose između dimenzija potpornih valjaka i epruvete koja se ispituje.

Popis oznaka prikazanih slikom 7.16:

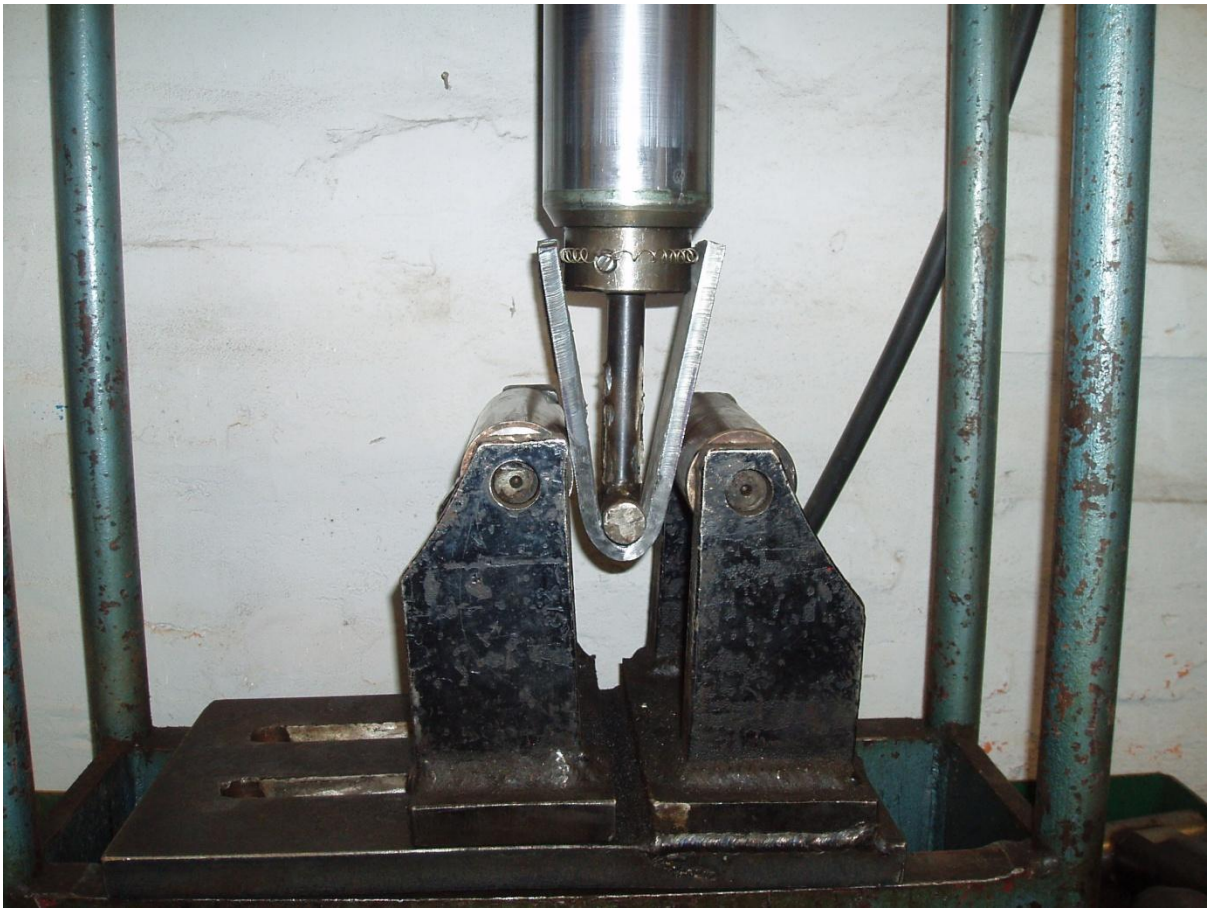
- d- promjer trna
- R- polumjer potpornog valjka
- a- debljina epruvete
- b- širina epruvete
- r- radijus zaobljenja epruvete
- α- kut savijanja epruvete



Slika 7.16 Skica dimenzija ispitnih valjaka prema HRN EN 910 [15]

Kut α označen na slici 7.16 označava stupanj ispitivanja. Što je kut α veći, to je ispitivanje strože zbog toga što se materijal podvrgava većim naprezanjima. Cilj ovog ispitivanja je plastično deformirati ispitni uzorak u zoni zavarenog spoja. Zavareni spoj zadovoljava ispitivanje ako se ne pojave pukotine, bilo u zoni zavarenog spoja ili u zoni utjecaja topline.

Ispitivanje savijanja na epruvetama izrađenima u svrhu završnoga rada izvršeno je pod kutem α = 180º, što je najstrože ispitivanje. Slika 7.17 prikazuje ispitivanje savijanjem s trnom u najnižoj točki.

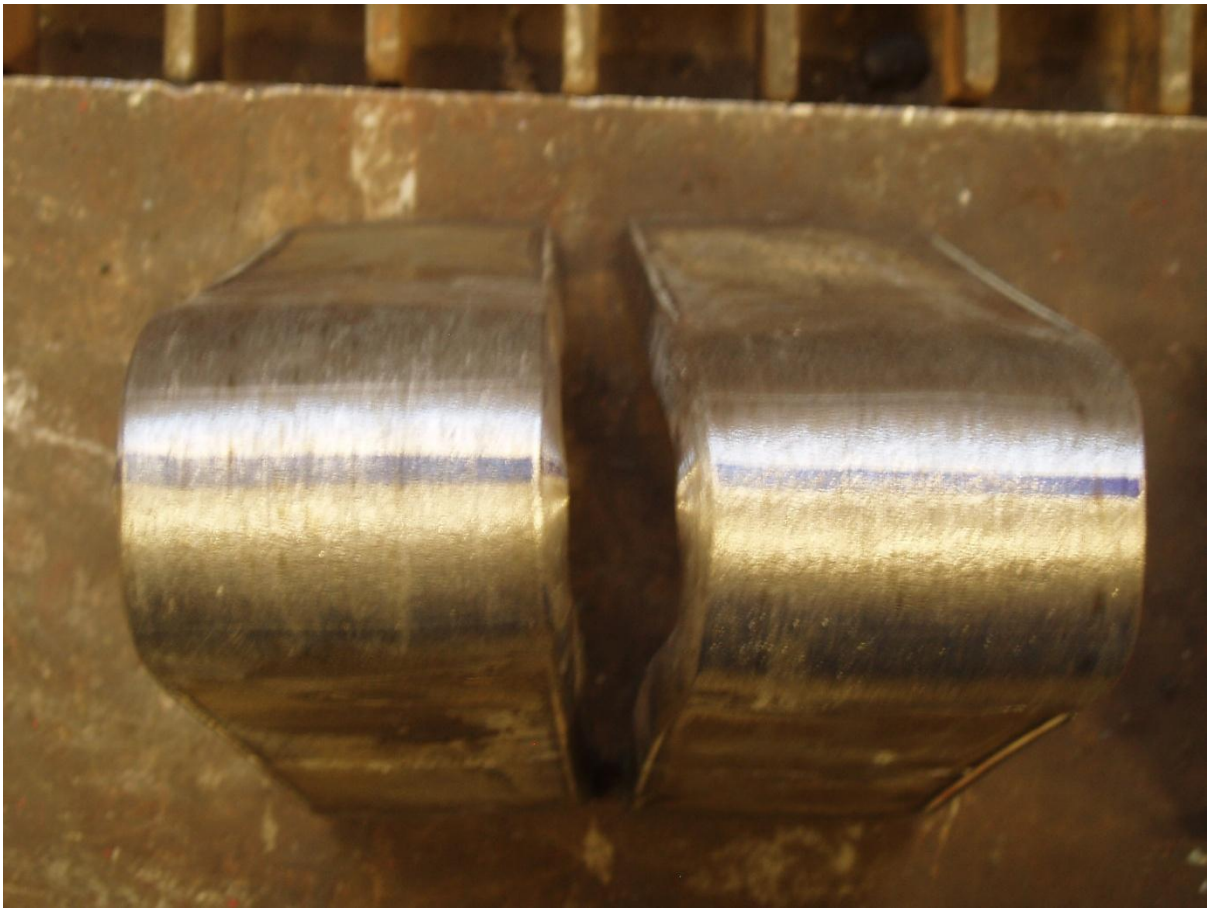


Slika 7.17 Ispitivanje savijanjem po HRN EN ISO 910

Ovom metodom ispitivanja ispitane su četiri epruvete, po dvije epruvete za STT postupak zavarivanja i FastRoot postupak zavarivanja. Za svaki od navedenih postupaka savijale su se epruvete sa strane lica zavara kao i sa korijenske strane.

7.7.1. Analiza rezultata ispitivanja savijanjem

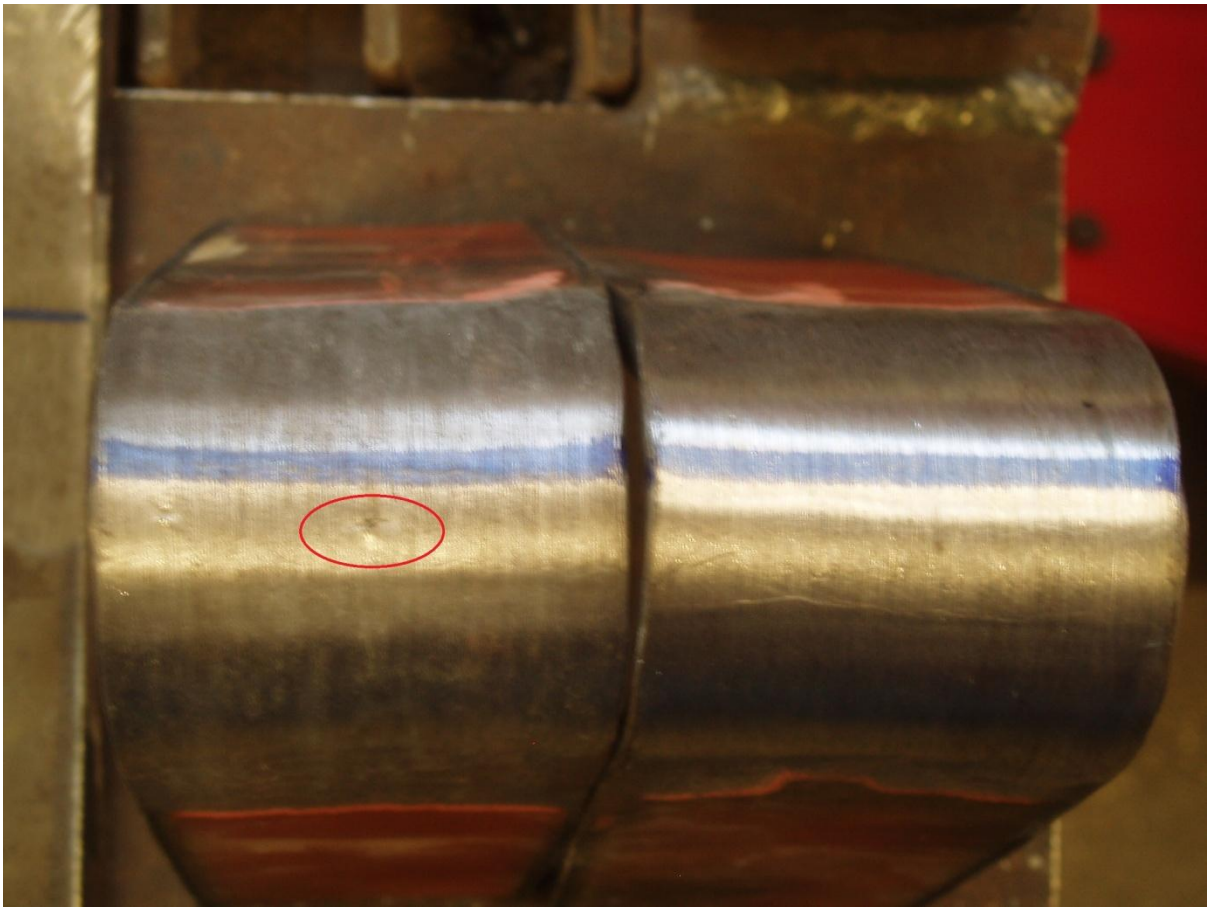
Na uzorcima koji su bili zavareni STT postupkom zavarivanja nema pukotina na površini epruvete. Prema normi HRN EN 910, uzorci su zadovoljili najstrožu inačicu ispitivanja prema kojoj se epruveta savija pod 180º. Slika 7.18 prikazuje površinu epruvete koja je zavarena STT postupkom zavarivanja.



Slika 7.18 Epruveta zavarena STT postupkom zavarivanja nakon ispitivanja savijanjem

Lijeva epruveta na slici savijena je sa korijenske strane, dok je desna savijena sa strane lica zavara. Plava linija označava mjesto zavarenog spoja. Kako nema pojave pukotina ni na jednoj od prikazanih epruveta zavareni spoj je zadovoljavajući prema kriterijima ispitivanja.

Na jednom od uzoraka kod kojih je korijen zavaren FastRoot postupkom zavarivanja došlo je do stvaranja pukotine duljine 2mm na epruveti koja je savijana s korijenske strane. Pojavljivanje takve pukotine u zoni zavarenog spoja znači da se u metalu zavarenog spoja nalazi greška. Pojavljivanje greške u zavarenom spoju ne mora nužno značiti da je ona prouzrokovana lošim postupkom zavarivanja. Naprotiv, vrlo je izgledna greška zbog pogrešne tehnike zavarivanja ili naljepljivanja prilikom nastavljanja zavarivanja. Slika 7.19 prikazuje epruvete koje su zavarene FastRoot postupkom zavarivanja. Lijeva epruveta savijana je sa strane korijena, a desna sa strane lica zavarenog spoja.

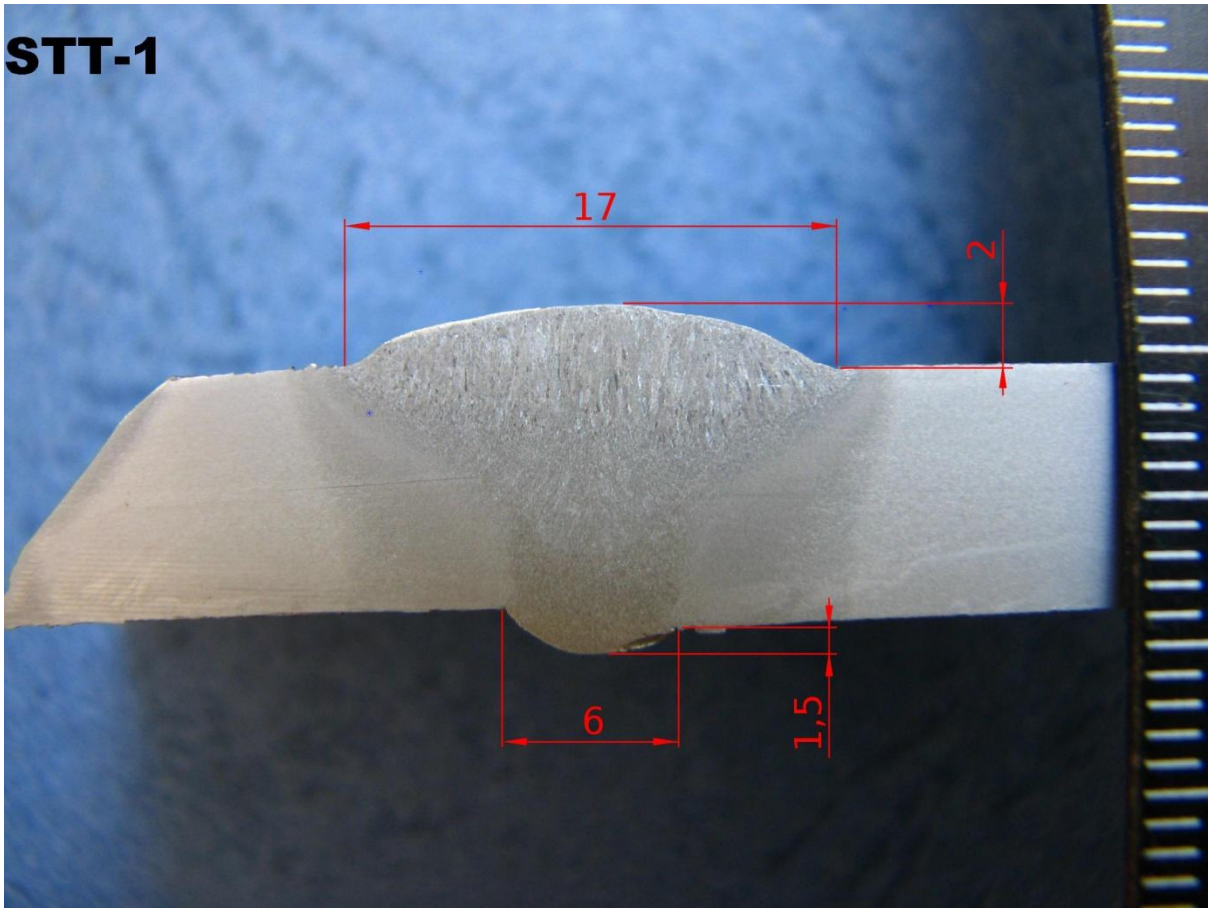


Slika 7.19 Epruveta zavarena FastRoot-om nakon ispitivanja savijanjem

Plava linija označava područje zavarenog spoja zavara. Crveno polje označava područje u kojem se pojavila pukotina.

7.8. Analiza makroizbrusaka

Izradom makroizbrusaka dobiva se uvid u geometriju zavarenog spoja, zonu taljenja materijala te intenzitet taljenja osnovnog materijala. Kod zavarivanja cijevi velikih debljini stijenke, kao što je slučaj u eksperimentalnom dijelu ovog rada, protaljivanje metala zavara sa osnovnim metalom izrazito je bitno. Kako su uzorci koji su ispitani savijanjem potvrdili kvalitetu zavara sa stanovišta mehaničkih svojstava, makroizbruscima je analizirana geometrija zavarenog spoja.

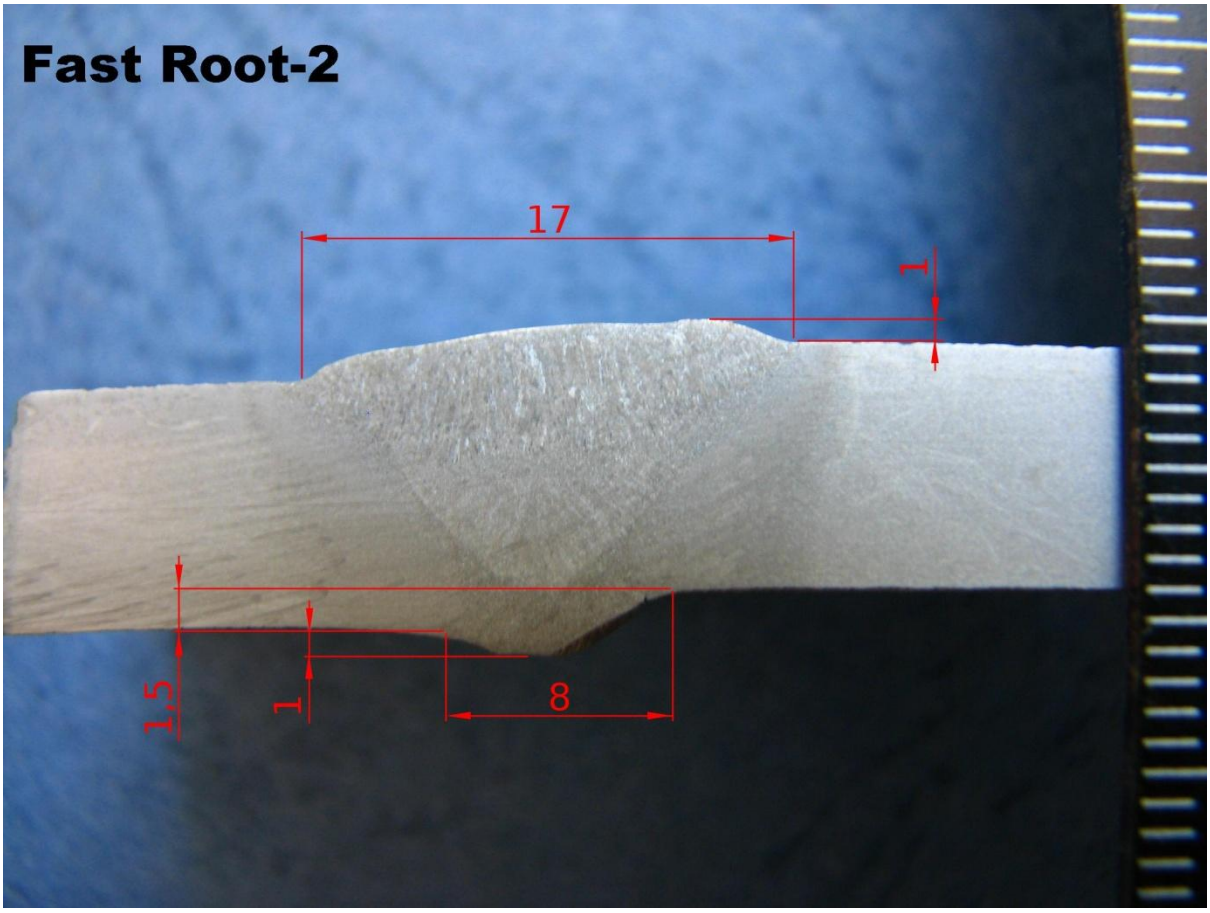


Slika 7.20 Makroizbrusak uzorka zavarenog STT postupkom zavarivanja

Kao što je vidljivo na slici 7.20, prilikom zavarivanja cijevi došlo je do smaknuća. Zavar je zadovoljio ispitivanje savijanjem te se iz toga može zaključiti da je STT pogodan za zavarivanje korijena čak i kada uvjeti nisu idealni. U metalu zavara nema pora, pukotina ni uključaka. Miješanje dodatnog i osnovnog materijala na zadovoljavajućoj je razini.
Širina i nadvišenje korijena zavarenih STT postupkom zavarivanja zadovoljavajući su.

Preveliko nadvišenje završnog prolaza od 2 mm prikazano slikom 7.20 uzrokovano je lošim parametrima zavarivanja. Zbog premale brzine zavarivanja dolazi do prevelike količine rastaljenog materijala koji se nagomilava na površini zavara. Ovakvo nadvišenje je nepovoljno zbog toga što uzrokuje koncentraciju naprezanja u zoni prijelaza između nadvišenja zavarenog spoja i osnovnog materijala.

Slika 7.21 prikazuje makroizbrusak uzorka koji je zavaren FastRoot postupkom zavarivanja.



Slika 7.21 Makroizbrusak uzorka zavarenog FastRoot-om

Iz slike 7.21 jasno je vidljivo da je smaknuće kod uzorka zavarenog FastRoot postupkom zavarivanja još veće nego ono kod uzorka zavarenog STT-om. Smaknuće od 1,5 mm kod cijevi debljine stijenke 8,7 mm zahtijeva dobru regulaciju parametara zavarivanja.

To potvrđuje činjenicu da je FastRoot postupak za zavarivanje korijena u mogućnosti proizvesti kvalitetan zavareni spoj čak i kada su uvjeti (priprema spoja) daleko od idealnih. Širina završnog prolaza od 17 mm prikazana na slici 7.21 je identična širini završnog prolaza sa slike 7.20. Razlog tome je korištenje Pipeliner II orbitalnog sustava za zavarivanje čime se postiže ujednačenost zavarenog spoja.

Važno je naglasiti da se unatoč primjene automatskog orbitalnog postupka zavarivanja postupak zavarivanja mora nadgledati. Zbog nesavršenosti pripreme spoja dolazi do promjene geometrije spoja pa se samim time moraju mijenjati parametri zavarivanja tijekom zavarivanja. Preveliko nadvišenje prikazano slikom 7.20 uzrokovano je lošom tehnikom zavarivanja, odnosno lošim nadgledanjem. Operater je mogao utjecati na nadvišenje zavara promjenom brzine zavarivanja. Povećanjem brzine zavarivanja kompenziarala bi se povećana količina rastaljenog materijala, a nadvišenje zavara ne bi bilo preveliko.

7.9. Analiza vremena zavarivanja korijenskog prolaza

Tablicom 7.6 prikazano je vrijeme zavarivanja korijena cijevi. Vrijeme zavarivanja STT-om i FastRoot-om mjereno je na duljini zavara od 200 mm. Ukupno vrijeme zavarivanja izvedeno je na temelju opsega cijevi. Izrazom (7.4) određen je ukupni opseg cijevi. Ukupni opseg cijevi iznosi 1570 mm pa je prema tome duljina korijenskog zavara za STT i FastRoot postupke zavarivanja 785 mm. Uvjeti su bili isti za oba postupka zavarivanja.

Opseg je izračunat formulom:

$$O = 2 \cdot R \cdot \pi \tag{7.4}$$

$$R = 250\ mm$$

Tablica 7.6 Vrijeme zavarivanja korijenskog prolaza

Postupak	**Vrijeme zavarivanja na 200 mm zavara**	**Ukupno vrijeme zavarivanja**
STT	1min 53s	7min 23s
FastRoot	2min 7s	8min 18s

Iz tablice 7.6 vidljivo je da ja vrijeme zavarivanja STT postupkom manje pa se može zaključiti da je brzina zavarivanja bila veća. Ukupno vrijeme zavarivanja STT postupkom zavarivanja manje je za 55s u odnosu na FastRoot postupak zavarivanja, što je smanjenje vremena zavarivanja od 11%. Takva razlika u vremenu zavarivanja omogućuje veći broj zavara zbog toga što se tempo zavarivanja cjevovoda određuje tempom zavarivanja korijena cijevi, čime se povećava produktivnost.

8. Zaključak

Nakon provedenog eksperimentalnog dijela utvrđeno je slijedeće:

1. STT i FastRoot postupci pogodni su za zavarivanje korijena cjevovoda. Fast Root postupak zavarivanja pruža dodatnu fleksibilnost zbog mogućnosti zavarivanja popune i završnog sloja. Eksperiment je dokazao da je vrijeme zavarivanja STT postupkom u odnosu na FastRoot postupak za 11% manje (tablica 7.6), uz višu cijenu uređaja za zavarivanje. (tablica 5.1).
2. Automatsko zavarivanje uvelike pridonosi kvaliteti zavarenog spoja, kao i produktivnosti. Prednosti korištenja automata za zavarivanje su mnogo kraće vrijeme zavarivanja te manji troškovi zavarivanja. Korištenjem praškom punjene žice povećava se količina rastaljenog materijala i omogućava se zavarivanje u prisilnim položajima. Nedostatak takvog sutava za orbitalno zavarivanje su visoki investicijski troškovi. Takvi visoki investicijski troškovi mogu se opravdati mogućnošću izvođenja velikog broja zavara u radnom vijeku opreme. Postizanje takvih uvjeta moguće je kod zavarivanja magistralnih cjevovoda na kojima se izvodi i po nekoliko tisuća istih zavara. U takvim se uvjetima visoka početna ulaganja brzo isplate pa je nabava Pipeliner II uređaja za orbitalno zavarivanje opravdana.
3. Ispitivanja savijanjem dokazala su da su zavareni spojevi izvedeni kombinacijom STT i FastRoot MAG postupcima zavarivanja korijena cijevi te MAG automatskim orbitalnim zavarivanjem popune završnog sloja rezultirala zadovoljavajućim zavarima s gledišta mehaničkih svojstava i geometrije spoja.
4. Subjektivna ocjena zavarivača bila je da je namještanje parametara na STT uređaju lakše nego na FastRoot uređaju zbog jednostavnije upravljačke ploče.
5. Analizom geometrije zavarenog spoja vidljivo je da su oba postupka primjenjiva za zavarivanje korijena.Također, sa oba postupka moguće je proizvesti kvalitetan zavareni spoj čak i kada postoji smaknuće, što povećava fleksibilnost u terenskim uvjetima.

Zbog niže cijene i mogućnosti zavarivanja MAG i REL postupkom zavarivanja, čime se povećava fleksibilnost, Kemppi FastMig uređaj za zavarivanje idealan je za korištenje u uvjetima kada je broj zavarivanja korijena cijevi i tankih limova manji u odnosu na zavarivanje popune i debljih limova.

STT uređaj za zavarivanje većom nabavnom cijenom i smanjenom fleksibilnošću nalazi primjenu kod terenskog rada na velikim projektima gdje se veći investicijski troškovi mogu isplatiti zbog kraćeg vremena zavarivanja (Tablica 7.6).

9. Literatura

[1] …….; „Lincoln Electric“, http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/c4200.pdf, 20.04.2010.

[2] .....; „Varstroj“, http://www.varstroj.si/varstroj_files/pc2/avtomatizacija_varjenja.jpg , 12.06.2010.

[3] K. Grubić; Physical relationship between the shielding gas and process stability at MAG welding, EUROJIN 3, 759-767, Bern, 30.03-01.04.2000.

[4] …….;“LindeGas“, http://www.lindegas.de/International/web/lg/de/like35lgde.nsf/repositorybyalias/schweißschutzgaseprospekt/$file/Schutzgasschweissen_0805.pdf, 06.04.2010.

[5] I. Juraga, K. Ljubić, M. Živčić; Pogreške u zavarenim spojevima, treće izdanje, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2007.

[6] W. Lucas, D. Lordachescu, V. Ponomarev,: Classification of metal transfer modes in GMAW, Universitatea Dunarea de Jos din Galati, Romania; Paton Welding Institute, Ukraine;TWI, UK 2003, IIW Doc. No XII-1859-2-05

[7] …….; „Lincoln Electric Europe“: STT II i LF 30, http://www.agrolim.hr/assets/pdf/lincoln/lincoln invertec30.pdf , 21.11.2009.

[8] …….;“The Lincoln Electric Company“: Surface Tension Transfer – WaveformControl Technology, http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx310.pdf , 21.11.2009.

[9] Mr. B. DeRuntz; Journal Of Indutrial Technology, Volume 19- number 4; August 2003 to October 2003

[10] …….; „Kemppi Hrvatska“ http://www.cromatec.hr/fastmigsynergic.php , 10.06.2010.

[11] Modificirani process kratkog luka – Novi način zavarivanja korjenskog prolaza J. Uusitalo; Welding technology, Kemppi Oy, Lahti, Finland

[12] …….; „Magnatech Orbital weldin systems“ http://www.magnatech-lp.com/pdfs/pipeliner.pdf , 10.06.2010.

[13] …….; „Magnatech orbital welding systems“ http://www.magnatech-lp.com/power/controller_712.htm , 10.06.2010.

[14]http://www.ram-rijeka.com/ProductDetails/2266/lang/Croatian/Termokreda-za-mjerenje-povrsinske-temperature-THERMOMELT---Ram-Rijeka.wshtml, 17.06.2010.

[15] HRN EN 910, Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala- Ispitivanje savijanjem

[16] I. Samardžić; Zavarivanje čeličnih plinovodnih cijevi; Strojarski Fakultet u Slavonskom Brodu; Slavonski Brod; 2005.

[17] Laboratorij za zavarivanje; Katedra za zavarene konstrukcije; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Sveučilište u Zagrebu

[18] Böhler welding guide; Technical Handbook of Böhler welding products; 06/2009

[19] …….; „Strojarski fakultet Slavonski Brod“, http://brod.sfsb.hr/kth/zavar1/9_1_diplomski_radovi_files/9_1_dipl/mb_dipl1/toc3/tocka3.pdf

10. Prilozi

elektrode jesenice d.o.o.

VAC 60
*TIG VAC 60

Klasifikacija:

EN 440	G3Si1
EN 1668	WSG2
DIN 8559	SG - 2
W.Nr	1.5125
AWS A5.18	ER 70 S-6
ISO	-

Lastnosti in uporabnost:

Pobakrena varilna žica oz palica za varjenje po MAG / TIG postopku. Primerna je za varjenje nelegiranih jekel ter nizko legiranih jekel trdnosti do 530 N/mm^2. Uporablja se za varjenje kotlovske pločevine, cevi, jekel za ladjedelništvo, mikrolegiranih jekel ter jeklenih litin. VAC 60 je testirana po CTOD metodi. TIG VAC 60 se večkrat uporablja za varjenje korenskih varkov.

Osnovni materiali

	DIN
Nelegirana jekla	St 33 do St 60.2
Fino-zrnata jekla	St E 255 do St E 355
	W St E 255 do W St E 355
Kotlovska pločevina	H I, H II, 17Mn4, 19Mn5
Jekla za cevi	St 35 do St 52.4
	E St E 210.7 do St E 360.7
Jekla za ladjedelništvo	A, B, D, E, AH, DH, EH
Jeklena litina	GS 38 do GS 52

Kemična analiza varilne žice (%):

C	Si	Mn	P	S
0.08	0.90	1.50	<0.025	<0.025

Mehanske lastnosti čistega vara:

Meja tečenja	Rp 0.2 %:	>410	* > 410	N/mm2
Trdnost	Rm:	510 - 590	* 540 – 640	N/mm2
Raztezek	A5:	>22	* > 22	%
Žilavost	Av :	>47	* > 47	J (-40°C)

Zaščitni plini: MAG-postopek 100% CO_2, Ar + 18% CO_2, CO_2 + Ar + O_2 (C1, M21, M22 - M33 po EN 439)
TIG-postopek Ar (I1 po EN 439)

Dimenzije varilne žice: 0.6 ; 0.8 ; 0.9 ; 1.0 ; 1.2 ; 1.6 (ϕ mm)
Dimenzije varilnih palic: 1.6; 2 ; 2.5; 3 (ϕ mm) dolžina: 1000 mm

Pakiranje: Varilna žica navita na kolutih – kovinski ali plastični, (po standardu AWS A5. 18 in DIN 8559), navitje je prosto ali ovoj-do-ovoja.

Varilne palice pakirane v papirnati karton, teža 25 kg.

Priznanja: TÜV, DB, CR, ABS, BV, GL, LR, DNV,SŽ, UDT (za VAC 60)
TÜV, UDT (za TIG VAC 60)

REF. SI / CJ Datum: 2005-02-28 **S 3**

EN ISO 18276-A:2006: T 55 4 Mn1Ni P M 1 H5
EN ISO 18276-B:2006: T624T1-1MA-N2M1-UH5
AWS A5.29-05: E91T1-K2MH4
AWS A5.29M-05: E621T1-K2MH4

BÖHLER Ti 70 Pipe-FD

GMAW flux cored wire,
for automatic pipeline welding, rutile type

Description

Tubular rutile micro alloyed flux cored wire for single or multipass welding of carbon-manganese steels and high strength steels with Ar-CO_2 shielding gas. Main features: excellent weldability in all positions, excellent bead appearance, no spatter; fast freezing and easy removeable slag. The exceptional mechanical properties of this wire even at the low temperature (-40°C) as well as the low content of diffusible hydrogen make it especially suitable for pipeline applications.

Further applications are to be seen in the off-shore industry, ship building and structures built with high strength steels.

Typical Composition of All-weld Metal

	C	Si	Mn	Ni
wt-%	**0.07**	**0.4**	**1.5**	**1.0**

Mechanical Properties of All-weld Metal

		u
yield strength R_e N/mm² (MPa):		**≥550**
tensile strength R_m N/mm² (MPa):		**640-820**
elongation A (L_0=5d_0) %:		**≥18**
impact work ISO-V KV J	-40°C:	**≥47**

u untreated, as-welded – shielding gas Ar + 15 - 25% CO_2

Operating Data



re-drying:
possible 150°C/24h
but in general not necessary
shielding gases:
Argon/ CO_2 (EN 439: M21)
14-20 l/min
Welding with standard GMAW-facilities possible.

ø mm	amps A	voltage V
1.2	180-280	22-30

=+

Base Materials

pipe steels and fine-grained steels
S460 – S500N, S460NL – S500NL, S500NC – S550NC, L450MB – L485MB (L555MB)
API Spec: 5L: X65 **X70** (X80)

Approvals and Certificates

TÜV-D (11109.), CE