Zavarivanje visokolegiranog čelika praškom punjenim žicama

Pakrac, Juraj

Master's thesis / Diplomski rad

2008

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:235:639578

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-06**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor

Dr.sc. Branko Bauer **Juraj Pakrac**

Zagreb, 2008

SAŽETAK

Ovim radom opisuje se FCAW (eng. flux cored arc welding) postupak, obje njegove vrste, karakteristike, prednosti i nedostaci.

Ukratko je iznesena povijest razvoja FCAW postupka, podjela ostalih postupaka zavarivanja, oprema za zavarivanje, dodatni materijal (žica), osnovni materijal sa osvrtom na nehrđajući austenitni CrNi čelik, zaštitni plinovi i mješavine, mogućnost poluautomatizacije ili automatizacije postupka.

Opisani bitni parametri pri zavarivanju (struja zavarivanja, napon električnog luka,...), priprema spoja kod osnovnog materijala i tolerancije pripreme koje postupak može prevladati bez utjecaja na kvalitetu zavara.

Navedeni su praktični primjeri kod kojih se koristi FCAW postupak i savjeti u kojim primjenama bi se mogao koristiti prema prednostima koje posjeduje, također su nabrojane dodatne mogućnosti koje bi mogle usmjeriti primjenu ovog postupka u bliskoj budućnosti.

Kraj teoretskog dijela sadrži najčešće nepravilnosti zavarenog spoja koje se mogu pojaviti kada se primjenjuje FCAW postupak, greške koje se mogu pojaviti kao i mogućnost njihova ispravka, te sigurnosno-zdravstvene i korozijske probleme koje treba uzeti u obzir pri svakom postupku zavarivanja.

Eksperimentalni dio uključuje opis korištene opreme pri zavarivanju, tablice mehaničkih svojstava i kemijskog sastava korištenog osnovnog i dodatnog materijala.

Prema zadanim uvjetima (zavarivanje čeličnih ploča čelika 304 uz korištenje PPŽ čelika 316) odabrana je tehnika i postupak zavarivanja metala kao što je opisano. Prema aktualnim normama i zadanom postupku zavarivanja odabrana je priprema sučeljenog spoja i izvedeni su pokusni zavari i navari. Naknadno korištena keramička podloga omogućila je uvid u dodatne mogućnosti MIG i FCAW postupka kao međusobno suprostavljenih postupaka zavarivanja, a ukratko je i izveden izračun unosa topline za oba postupka.

Korozijsko ispitivanje na jamičastu koroziju i prikaz makro izbrusaka pojedinih uzoraka zavarenih MIG i FCAW postupkom je opisano na samom kraju. Izmjereni su i bitni parametri makro izbrusaka, te su međusobno dijagramski uspoređeni.

Svaki dio rada je popračen je tablicama i slikama, osobito eksperimentalni dio.

Nadodan je popis aktualnih i primjenjenih normi koje se koriste pri zavarivanju FCAW postupkom kao i pri ispitivanju ovog postupka.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA V
POPIS TABLICA X
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA XI
POPIS FORMULA XII
POPIS KRATICA XIII

TEORETSKI DIO

1. UVOD 1
1.1. POVIJEST I RAZVOJ ELEKTROLUČNIH POSTUPAKA ZAVARIVANJA 1
1.2. ELEKTROLUČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA 2
1.2.1. POSTUPCI ZAVARIVANJA SA TALJIVIM ELEKTRODAMA 2
1.2.2. POSTUPCI ZAVARIVANJA SA NETALJIVIM ELEKTRODAMA 4
2. OSNOVE FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA 5
2.1. VRSTE FCAW POSTUPAKA ZAVARIVANJA 5
2.1.1. FCAW-S POSTUPCI ZAVARIVANJA 6
2.1.2. FCAW-G POSTUPCI ZAVARIVANJA 7
2.2. PREDNOSTI FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA 8
2.3. NEDOSTACI FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA 11
3. DIJELOVI I OPREMA FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA 13
3.1. ELEKTRODA ILI DODATNI MATERIJAL (ŽICA) 13
3.1.1. ODABIR PPŽ ZA ZAVARIVANJE 16
3.1.2. KEMIJSKI SASTAV PPŽ – IZVOR I DJELOVANJE POJEDINIH ELEMENATA U PRAŠKU 16
3.1.3. VRSTE PRAŠKOM PUNJENJA ŽICA 17
3.1.3.1. SAMOZAŠTITNE PPŽ OD NEHRĐAJUĆEG ČELIKA 17
3.1.3.2. METALOM PUNJENE ŽICE 18
3.2. OSNOVNI METAL 18
3.2.1. VISOKOLEGIRANI KONSTRUKCIJSKI ČELICI – NEHRĐAJUĆI AUSTENITNI CRNI ČELICI 19
3.3. ZAŠTITNI PLINOVI I MJEŠAVINE 21
3.3.1. UGLJIK-DIOKSID (CO_2) 21
3.3.2. ARGON (Ar) 23

3.3.3. HELIJ (He) 24
3.3.4. KISIK (O_2) 24
3.3.5. VODIK (H_2) 25
3.3.6. DUŠIK (N_2) 25
3.3.7. ZAŠTITNE PLINSKE MJEŠAVINE 25
3.3.7.1. ZAŠTITNE PLINSKE MJEŠAVINE ZA ZAVARIVANJE UGLJIČNOG ČELIKA 26
3.3.7.2. ZAŠTITNE PLINSKE MJEŠAVINE ZA ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA 27
3.4. POLUAUTOMATSKA OPREMA ZA FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA 27
3.5. AUTOMATSKA OPREMA ZA FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA 30
3.6. IZVORI STRUJE ZAVARIVANJA 31
3.7. ODVOĐENJE PARA POMOĆU SUSTAVA VENTILACIJE 33
4. ZAHTJEVI PRIPREME NA POSTUPAK ZAVARIVANJA 34
4.1. VAŽNI PARAMETRI DODATNOG MATERIJALA PRI FCAW POSTUPKU ZAVARIVANJA 34
4.1.1. STRUJA ZAVARIVANJA 35
4.1.2. NAPON ELEKTRIČNOG LUKA 35
4.1.3. SLOBODNI KRAJ ŽICE 35
4.1.4. BRZINA ZAVARIVANJA 36
4.1.5. PROTOK ZAŠTITNOG PLINA ILI MJEŠAVINE 37
4.1.6. KOLIČINA NATALJENOG METALA I KOEFICIJENT ISKORIŠTENJA 38
4.1.7. NAGIB ELEKTRODE 39
4.2. VAŽNI PARAMETRI OSNOVNOG METALA 40
4.2.1. KONSTRUKCIJA SPOJA I POSTUPAK ZAVARIVANJA 40
4.2.2. PRIPREMA RUBOVA I TOLERANCIJE PRIPREME SPOJA 41
4.3. DODATNI ZAHTJEVI FCAW POSTUPKA 42
4.4. ZAHTJEVI KVALITETE ZAVARA 42
5. PRIMJENA FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA 44
5.1. PRAKTIČNI PRIMJERI FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA 45
5.1.1. FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA – SAVJETI SA TERENA 45
5.1.2. FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA U ZATVORENOM PROSTORU 45
5.1.3. PRAKTIČNI PRIMJER DVOSTRUKOG DODAVAČA PPŽ 46
5.1.3.1. DVOSTRUKI DODAVAČ PPŽ U RADU 47
5.2. POVEĆANA PROIZVODNOST UZ FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA 48
5.3. PRAKTIČNI PRIMJERI UPOTREBE PPŽ 49
6. PROBLEMI I NEPRAVILNOSTI PRI ZAVARIVANJU FCAW POSTUPKOM 52
6.1. SIGURNOSNO-ZDRAVSTVENI PROBLEMI 52

6.2. KOROZIJSKI PROBLEMI 52
6.3. NEPRAVILNOSTI SPOJA ZAVARENOG FCAW POSTUPKOM 53
6.4. PROBLEMI, UZROCI I OTKLANJANJE NEPRAVILNOSTI KOD FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA 55

EKSPERIMENTALNI DIO

7. DIJELOVI POSTUPAKA ZAVARIVANJA 57
7.1. MEHANIČKA SVOJSTVA I KEMIJSKI SASTAV OSNOVNOG I DODATNOG MATERIJALA ZA ZAVARIVANJE 61
7.2. POSTUPAK I TEHNIKA ZAVARIVANJA 63
7.3. PRIPREMA PLOČA I POKUSNI ZAVARI/NAVARI 64
8. PRIPREMA I ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆEG ČELIKA SUČELJENIM V SPOJEM 70
8.1. UVOD 70
8.1.1. KERAMIČKE PODLOGE 70
8.2. ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆEG ČELIKA 71
8.2.1. UNOS TOPLINE PRI ZAVARIVANJU 77
8.3. ISPITIVANJE ZAVARENIH UZORAKA NA JAMIČASTU KOROZIJU I IZGLED MAKRO IZBRUSAKA 77
8.3.1. UVOD 77
8.3.2. ISPITIVANJE JAMIČASTE KOROZIJE 78
8.3.3. MAKRO IZBRUSAK ZAVARENIH/NAVARENIH UZORAKA 87
8.4. USPOREDBA VELIČINA ZAJEDNIČKIH GEOMETRIJSKIH PARAMETARA ZAVARA/NAVARA I DIJAGRAMSKI PRIKAZ 91

9. ZAKLJUČAK 95

LITERATURA 97

DODATAK

POPIS NORMI VEZANIH UZ FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA 99

POPIS SLIKA

Slika broj	Opis	Strana
1.1.	Izgled zavara dobivenog MIG/MAG postupkom.	3
2.1.	Izgled zavara dobivenog FCAW postupkom.	5
2.2.	Dijelovi FCAW-S postupka zavarivanja.	7
2.3.	Prikaz i dijelovi FCAW-G postupka zavarivanja.	8
2.4.	Prednost FCAW postupka naprema svim ostalim postupcima zavarivanja. Dobivene duljine zavara uz isti vremenski period zavarivanja.	9
2.5.	Ukupna ušteda troškova zavarivanja FCAW-om.	9
2.6.	Postignute brzine zavarivanja konkurentnih postupaka.	10
3.1.	Poprečni presjek elektrode koji pokazuje vrste spojeva pri izradi žice za zavarivanje.	13
3.2.	Shema izrade praškom punjenih žica.	14
3.3.	Presjek zavara dobivenog punom žicom promjera 1.2 mm (lijevo) i zavara dobivenih FCAW postupkom uz žicu promjera 1.2 mm (sredina i desno).	15
3.4.	Primjer samoskidajuće troske zavara.	16
3.5.	Izgled profila zavara dobiven pri korištenju CO_2 kao zaštitnog plina, CO_2 daje veliku dubinu penetracije i širinu samog zavara.	23
3.6.	Izgled profila zavara dobiven pri korištenju Ar kao zaštitnog plina; Ar daje veliku i usku dubinu penetracije poznatu po obliku kao “prstenasta” ili penetracija u obliku čavla.	23
3.7.	Izgled profila zavara dobiven pri korištenju He kao zaštitnog plina, He daje malu dubinu penetracije i veliku širinu samog zavara.	24
3.8.	Izgled profila zavara dobiven pri korištenju zaštitne mješavine plina Ar/CO_2, ova vrsta mješavine daje dubinu penetracije ovisnu o udijelu CO_2 u mješavini, a na taj način se dubina penetracije može i prilagođavati ovisno o potrebi.	26
3.9.	Izgled profila zavara dobiven pri korištenju zaštitne mješavine plina Ar/O_2, ova vrsta mješavine daje vrlo veliku dubinu penetracije, ali i uži profil zavara.	27
3.10.	Vrste pištolja za zavarivanje i vrste sapnica za dovođenje zaštitnog plina.	28
3.11.	Dijelovi poluautomatske opreme za FCAW zavarivanje.	29
3.12.	Uređaj za dodavanje žice.	30
3.13.	Dijelovi automatske opreme za FCAW zavarivanje.	31
3.14.	Dijagramska shema rada izvora struje uz U = konst.	32
3.15.	Prikaz upravljačke ploče na izvoru struje zavarivanja.	33
4.1.	Raspon parametara za vrstu i promjer žice.	34
4.2.	Ovisnost brzine žice o struji zavarivanja kod FCAW-G postupka zavarivanja.	36
4.3.	Ovisnost brzine žice o duljini slobodnog kraja i struji zavarivanja kod FCAW-S postupka zavarivanja.	37
4.4.	Ovisnost struje zavarivanja o učinku taljenja kod FCAW-G postupka zavarivanja.	38

4.5. Ovisnost struje zavarivanja o učinku taljenja kod FCAW-S postupka zavarivanja. 39
4.6. Geometrija poprečnog presjeka zavara. 40
4.7. Prikaz pripreme spoja kod različitih postupaka zavarivanja i ušteda u nataljenom metalu, a sve uz iste zahtjeve nosivosti zavara. 41
4.8. Makroizbrusak zavara izvedenog FCAW postupkom. 43
5.1. Primjer zavarivanja raznorodnih metala FCAW-om. 45
5.2. Zavarivanje konstrukcije od dupleks čelika debljine 30-40 mm. 46
5.3. Više elektrodni sustav za navarivanje. 47
5.4. Učinak taljenja pojedinih vrsta žica. 50
6.1 Usporedba oksidacije zavara pri zavarivanju FCAW-om (gornji zavar) i MIG/MAG-om (donji zavar). 53
6.2. Nepravilnosti pri zavarivanju (pukotine) i njihov izgled pri poprečnom presjeku zavara. 54
6.3. Nepravilnosti pri zavarivanju (ulegnuće i nepotpuna penetracija spoja) i njihov izgled pri poprečnom presjeku zavara. 54
6.4. Nepravilnosti pri zavarivanju (ugorina i nepotpuno staljivanje) i njihov izgled pri poprečnom presjeku zavara. 55
7.1. Kolut austenitne nehrđajuće PPŽ Lincoln Electric Cor-A-Rosta P316L (ukupna masa koluta 12.5 kg). 57
7.2. Izvora struje za zavarivanje MIG/MAG/FCAW postupkom sa dodavačem žice Fronius Trans Puls Synergic 3200. 58
7.3. Kontrolna ploča uređaja za zavarivanje omogućava odabir i namještanje parametara zavarivanja. 58
7.4. Uređaj automatskog posmaka pri zavarivanju, model Bug-5100, proizvođača Bug-O Systems; omogućava odabir brzine zavarivanja i njezino mijenjanje pri samom zavarivanju, kao i dodatne mogućnosti pri zavarivanju npr. njihanje zavarivačkog pištolja, odabir smjera zavarivanja,... 59
7.5. Prihvat zavarivačkog pištolja na uređaju Bug-O Systems Bug-5100. Omogućava odabir i mijenjanje kutova postavljanja zavarivačkog pištolja, udaljenost sapnice od radnog komada,... 59
7.6. Manometar (lijevi indikator), protokomjer (desni indikator), regulator protoka (donji desni crni ventil) i ventil za otvaranje/zatvarenje plinske boce (gornji lijevi srebrni ventil) proizvođača Messer-Griesheim. Protok plina se određuje prema plinu koji ima veći udio u mješavini. 60
7.7. Pomična (gornja) i šablonska (donja) mjerka za kontrolu debljine kutnog zavara. 60
7.8. Kutevi pod kojima je postavljen zavarivački pištolj pri zavarivanju sučeljenog V spoja. 63
7.9. Kut pod kojim je postavljen zavarivački pištolj pri zavarivanju kutnog T spoja. 63
7.10. Pripremljen i na krajevima učvršćen T spoj kutnog zavara čelika 316Ti (W.Nr. 1.4671). 65
7.11. T spoj kutnog zavara čelika 316Ti (W.Nr. 1.4671) zavaren MIG postupkom uz punu žicu. 65
7.12. Automatski proces navarivanja gusjenica PPŽ i punom žicom na čeličnu ploču konstrukcijskog čelika Č.0361. 67
7.13. Navarena gusjenica PPŽ na sebi ima lako skidajuću trosku koja će se odstraniti (I_z = 235 A). 67

7.14. Izgled navarene gusjenice PPŽ nakon skidanja troske (I_z = 235 A). 67
7.15. Izgled navarene gusjenice PPŽ sa troskom, donja gusjenica (I_z = 180 A). 68
7.16. Izgled navarene gusjenice PPŽ nakon skidanja troske, donja gusjenica (I_z = 180 A). 68
7.17. Izgled navarene gusjenice pune žice, najdonja gusjenica (I_z = 180 A). 68
7.18. Izgled navarenih gusjenica, najdonja gusjenica je navarena uz punu žicu (I_z = 235 A). 69
8.1. Prikaz keramičke podloge kakva se koristila pri zavarivanju sučeljenih spojeva PPŽ i punom žicom uz nehrđajući čelik kao osnovni metal. 71
8.2. Priprema sučeljenog spoja i V žljeba sa razmakom u korijenu uz korištenje keramičke podloge naljepljene aluminijskom trakom. 72
8.3. Predhodno prikazani sučeljeni spoj nehrđajuće čelične ploče sa keramičkom podlogom u položaju za zavarivanje. 72
8.4. Proces automatskog zavarivanja sučeljenog spoja uz V žljeb. 73
8.5. Prvi prolaz (korijenski) pri zavarivanju FCAW-G postupkom uz PPŽ i razmak u korijenu od 3 mm. Rezultat je zadovoljavajući, ali nema potrebnog nadvišenja zavara u korijenu, a prolaz zavara u donjem je dijelu procurio svakih par centimetara. Gornji dio (lice) zavara je vrlo dobro i slično u oba postupka (kako je prikazano na sljedećim slikama). Vidi se potrošena i skinuta keramička podloška. 74
8.6. Prvi prolaz (korijenski) pri zavarivanju MIG postupkom uz punu žicu i razmak u korijenu od 1 mm. Rezultat je vrlo dobar izgled lica zavara i vrlo je sličan onome dobijenom pri zavarivanju uz FCAW-G postupak. 75
8.7. Drugi prolaz (popuna) pri zavarivanju MIG postupkom uz punu žicu i razmak u korijenu od 1 mm dao je vrlo dobro nadvišenje lica zavara i dobru popunu. 76
8.8. Prvi prolaz (korijenski) pri zavarivanju MIG postupkom uz punu žicu i razmak u korijenu od 1 mm. Rezultat je vrlo dobar izgled i nadvišenje korijena zavara. Rezultat je bolji nego u slučaju zavarivanja FCAW-G postupkom. 76
8.9. Prikaz odmašćenih, vodom ispranih i osušenih uzoraka koji će se bajcati. Crta okomito na zavar/navar dijeli uzorke na lijevi i desni dio, odnosno na očišćeni i neočišćeni dio. Do uzoraka se nalazi otopina za bajcanje u bijeloj plastičnoj posudi. 79
8.10. Uzorci nakon bajcanja su stavljeni u plastičnu posudu u kojoj će biti izloženi djelovanju otopine tokom 72 sata. 79
8.11. Navarene gusjenice oznake C i D (gornja je oznake C, a donja oznake D) izvedene na čeličnoj ploči uz struju zavarivanja I_z = 180 A; 235 A. Lijevi dio uzorka nije odmašćen i bajcan dok su ti postupci čišćenja izvedeni na desnom dijelu, kao što se i vidi. 80
8.12. Navarene gusjenice oznake E i F (gornja je oznake E, a donja oznake F) izvedene na čeličnoj ploči uz struju zavarivanja I_z = 180 A; 235 A. Kao i kod predhodnih uzoraka vidi se da je desni dio odmašćen i bajcan. 81
8.13. Uzorak G je sučeljeni spoj izveden FCAW-G postupkom uz PPŽ. 81
8.14. Uzorak H je sučeljeni spoj izveden FCAW-G postupkom uz PPŽ; razlika naprema G uzorku je u pripremi spoja. 82
8.15. Uzorak I je sučeljeni spoj izveden MIG postupkom uz punu žicu. 82
8.16. Pripremljena otopina prema sjevernoameričkoj normi ASTM G48-99a koja se koristi za ispitivanje jamičaste korozije. 83
8.17. Uzorci uronjeni u otopinu u kojoj će ostati slijedećih 72 sata. 83

8.18. Prve naznake jamičaste korozije vidljive su već nakon 2 sata, a jasno se i vidi promjena boje otopine. 84
8.19. Navari izvedeni MIG postupkom uz punu žicu, odnosno uzorci C i D. Jamičasta korozija je zahvatila ZUT i osnovni metal koji je manje plemenit od dodatnog metala. 84
8.20. Navari izvedeni FCAW-G postupkom uz PPŽ, odnosno uzorci E i F. Jamičasta korozija je također zahvatila ZUT i osnovni metal koji je manje plemenit od dodatnog metala, a veličina i učestalost su vrlo slične kao i kod predhodnog uzorka. 85
8.21. Zavar sučeljenog spoja dobiven FCAW-G postupkom uz PPŽ kod uzorka G i razmak u korijenu od 1 mm manje je zahvaćen jamičastom korozijom od predhodna dva primjera. Osnovni metal je ploča manje plemenitog čelika (čelik 304; dodatni metal je čelik 316), dok je vidljiv razvoj rupičaste korozije uz liniju spoja metala zavara i ZUT-a. Mogući uzrok je samo naljepljivanje zavara, bez provara u korijenu. 85
8.22. Zavar sučeljenog spoja dobiven FCAW-G postupkom uz PPŽ kod uzorka H i razmak u korijenu od 3 mm. Vidljiv je razvoj rupičaste korozije uz liniju spoja metala zavara i ZUT-a, ali u manjem obimu nego kod predhodnog primjera. Kod ovog uzoraka je došlo do prihvatljivog provara korijena. 86
8.23. Zavar sučeljenog spoja dobiven MIG postupkom uz punu žicu kod uzorka H i razmak u korijenu od 1 mm. Vidljiv je razvoj rupičaste korozije uz liniju spoja metala zavara i ZUT-a, većeg obima zbog moguće većeg unosa topline. Kod ovog uzorka je došlo do vrlo dobrog provara korijena. 86
8.24. Najzorniji prikaz jamičaste korozije dobiven je na I uzorku. Linija spoja metala zavara i ZUT-a je najviše zahvačena. 87
8.25. Prikaz makro izbruska broj 1, uzoraka E i F prikazuje navare dobijene FCAW-G postupkom uz PPŽ i različite struje navarivanja. Dobiveni navari su široki, ali dubina penetracije je mala. Vidi se oblik navara na kojeg znatno utječe zaštitni plin. 88
8.26. Prikaz makro izbruska broj 2, uzoraka C i D, prikazuje navare dobijene MIG postupkom uz punu žicu i različite struje navarivanja. Dobiveni navari su uži, ali dubina penetracije je nešto veća i prstenastog je oblika. Također se vidi oblik navara na kojeg znatno utječe zaštitna mješavina (mješavina Ar/O_2) koja daje tipičan oblik čavla. 88
8.27. Prikaz makro izbruska broj 3, uzoraka A i B, prikazuje zavare kutnog T spoja dobijene FCAW-G postupkom uz PPŽ (lijevi zavar na slici) i MIG postupkom uz punu žicu (desni zavar na slici). Zavar dobiven uz FCAW-G postupak ima veću dubinu penetracije i nešto je širi uz bolju simetriju. 89
8.28. Prikaz makro izbruska broj 4, uzorka G, prikazuje zavar dobiven FCAW-G postupkom uz PPŽ i V žljeb kuta 60° uz razmak u korijenu od 1 mm i korištenje keramičke podloge. Ovako izveden zavar sadrži u korijenu zaostalu trosku vjerojatno zbog premalenog otvora korijena. 89
8.29. Prikaz makro izbruska broj 5, uzorka I, prikazuje zavar dobiven MIG postupkom uz punu žicu i V žljeb kuta 60° uz razmak u korijenu od 1 mm i korištenje keramičke podloge. Ovako izveden zavar ima dobru dubinu penetracije i dobar profil zavara, korijen je protaljen, a lice zavara ima nadvišenje. 90

8.30. Prikaz makro izbruska broj 6, uzorka H, prikazuje zavar dobiven FCAW-G postupkom uz PPŽ i V žljeb kuta 60° uz razmak u korijenu od 3 mm i korištenje keramičke podloge. Ovako izveden zavar ima prolazno protaljen korijen kao i prolazno nadvišenje lica zavara. Vidi se razlika oblika profila zavara po visini u odnosu na predhodnu sliku i MIG postupak. 90
8.31. Zajednički geometrijski parametri pokusnih zavara i navara. 91
8.32. Usporedba zajedničkih parametara (b) PPŽ i pune žice uzoraka A i B u dijagramskom prikazu. 91
8.33. Usporedba zajedničkih parametara (h) PPŽ i pune žice uzoraka A i B u dijagramskom prikazu. 91
8.34. Usporedba zajedničkog parametra (A) PPŽ i pune žice uzoraka A i B u dijagramskom prikazu. 92
8.35. Usporedba zajedničkih parametara (b) PPŽ i pune žice uzoraka C i E u dijagramskom prikazu. 92
8.36. Usporedba zajedničkih parametara (h) PPŽ i pune žice uzoraka C i E u dijagramskom prikazu. 92
8.37. Usporedba zajedničkih parametara (h1) PPŽ i pune žice uzoraka C i E u dijagramskom prikazu. 93
8.38. Usporedba zajedničkih parametara (h2) PPŽ i pune žice uzoraka C i E u dijagramskom prikazu. 93
8.39. Usporedba zajedničkog parametra (A) PPŽ i pune žice uzoraka C i E u dijagramskom prikazu. 93
8.40. Usporedba zajedničkih parametara (b) PPŽ i pune žice uzoraka D i F u dijagramskom prikazu. 93
8.41. Usporedba zajedničkih parametara (h) PPŽ i pune žice uzoraka D i F u dijagramskom prikazu. 93
8.42. Usporedba zajedničkih parametara (h1) PPŽ i pune žice uzoraka D i F u dijagramskom prikazu. 93
8.43. Usporedba zajedničkih parametara (h2) PPŽ i pune žice uzoraka D i F u dijagramskom prikazu. 93
8.44. Usporedba zajedničkog parametra (A) PPŽ i pune žice uzoraka D i F u dijagramskom prikazu. 94
8.45. Usporedba zajedničkih parametara (b) PPŽ i pune žice uzoraka H i I u dijagramskom prikazu. 94
8.46. Usporedba zajedničkih parametara (h) PPŽ i pune žice uzoraka H i I u dijagramskom prikazu. 94
8.47. Usporedba zajedničkih parametara (h1) PPŽ i pune žice uzoraka H i I u dijagramskom prikazu. 94
8.48. Usporedba zajedničkih parametara (h2) PPŽ i pune žice uzoraka H i I u dijagramskom prikazu. 94
8.49. Usporedba zajedničkog parametra (A) PPŽ i pune žice uzoraka H i I u dijagramskom prikazu. 94

POPIS TABLICA

Tablica broj	Opis	Strana
3.1.	Prikaz ovisnosti svojstava zavara o vrsti troske.	15
3.2.	Najčešći elementi praška kod PPŽ, njihov oblik prisutnosti i djelovanje.	17
5.1.	Prikaz učinka taljenja pojedinih elektroda proizvođača Lincoln Electric.	48
6.1.	Problemi, uzroci i otklanjanje grešaka kod FCAW zavarivanja.	56
7.1.	Prikaz mehaničkih svojstava i kemijskog sastava čelika EN X5CrNi18-10.	61
7.2.	Prikaz mehaničkih svojstava i kemijskog sastava PPŽ za zavarivanje Lincoln Electric Cor-A-Rosta P316L Ø1.2 mm.	62
7.3.	Kemijski sastav osnovnog metala T spoja.	64
7.4.	Prikaz parametara i njihovih iznosa kod zavarivanja kutnog T spoja ovisno o vrsti žice.	66
7.5.	Kemijski sastav osnovnog materijala (ploče) na koju se navaruju gusjenice.	66
7.6.	Prikaz radnih parametara pri navarivanju gusjenica.	69
8.1.	Podaci i parametri zavarivanja PPŽ V žljeba uz 1 mm razmaka u korijenu.	73
8.2.	Podaci i parametri zavarivanja PPŽ V žljeba uz 3 mm razmaka u korijenu.	74
8.3.	Podaci i parametri zavarivanja punom žicom V žljeba uz 1 mm razmaka u korijenu.	75
8.4.	Unosi topline pri zavarivanju kutnog T spoja i sučeljenog V spoja.	77
8.5.	Veličine zajedničkih parametara svih makro uzoraka.	92

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

LATINSKE OZNAKE

Oznaka	Opis	Jedinica
-	Taloženje u jedinici vremena	kg/h
Ø	Promjer (obično elektrodne žice)	mm
-	Taloženje po jedinici dužine	kg/m
v_d	Brzina dodavanja žice	mm/s
I	Veličina struje	A
U	Veličina napona	V
v_p	Putna brzina	mm/min
-	Gustoća struje	A/mm^2
R_m	Vlačna čvrstoća	N/mm^2
q_f	Protok fluida	l/min
Q_z	Unos topline pri zavarivanju	kJ/cm
-	Funta po kvadratnom inču	psi
-	Difuzija vodika	ml vodika/100g metala zavara

POPIS FORMULA

KEMIJSKE FORMULE

Formula	Opis
CaF_2	Kalcij-fluorid
$CaCO_3$	Kalcij-karbonat
MnS	Manganov-sulfid
$2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$	Zagrijavanje ugljičnog-dioksida na visoke temperature dovodi do njegove disocijacije
$Fe + CO_2 \leftrightarrow FeO + CO$	Reakcija rastaljenog željeza i ugljik-dioksida je reverzibilna
$2CO \rightarrow 2C + O_2$	Disocijacija ugljik-monoksida pri temperaturi crvenog usijanja
MnO	Manganov-oksid
SiO_2	Silicij-dioksid
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	Hidratizirani željezni-klorid
$Mn + FeO \rightarrow MnO + Fe$	Reakcija mangana i željeznog-oksida
$Si + 2FeO \rightarrow SiO_2 + Fe$	Reakcija silicija i željeznog-oksida

FIZIKALNE FORMULE

Formula	Opis
$Q_z = \frac{60}{1000} \cdot \frac{U_z \cdot I_z}{v_z} \cdot \eta_{el}$	Unos topline pri zavarivanju

POPIS KRATICA

Kratica	Opis
AC	Izmjenična struja (eng. Alternating current)
ANSI	Američki institut nacionalnih standarda (eng. American National Standards Institute)
ASME	Američko društvo strojarskih inžinjera (eng. American Society of Mechanical Engineers)
ASTM	Američko društvo za testiranje materijala (eng. The American Society for Testing Materials)
AWS	Američko društvo zavarivača (eng. American Welding Society)
CC	Stalna struja (eng. Constant current)
CV	Stalni napon (eng. Constant voltage)
DC	Istosmjerna struja (eng. Direct current)
DC-	Istosmjerna struja negativnog polariteta
DC+	Istosmjerna struja pozitivnog polariteta
DM	Dodatni materijal (elektrodna žica)
EN	Europske norme (eng. European norm)
EPP	Elektro lučno zavarivanje pod praškom (eng. SAW - Submerged arc welding)
EPT	Elektro lučno zavarivanje pod troskom (eng. ESW – Electro slag welding)
EPZ	Elektro plinsko zavarivanje (eng. EGW – Electro gas welding)
EXXXT-1	Oznaka dodatnog materijala (elektrode); X predstavlja oznaku ovisnu o vrsti elektrode
FCAW-G	Zavarivanje praškom punjenom žicom u zaštitni plin (eng. Flux cored arc welding – gas shielded)
FCAW-S	Zavarivanje praškom punjenom žicom uz zaštitnu atmosferu plinova iz praška (eng. Flux cored arc welding – self shielded)
ISO	Međunarodna udruženje za norme (eng. International Organization for Standardization)
MAG	Elektro lučno zavarivanje uz zaštitu aktivnih plinova (eng. Metal active gas ili GMAW – Gas metal arc welding)
MIG	Elektro lučno zavarivanje uz zaštitu inetrnih plinova (eng. Metal inert gas ili GMAW – Gas metal arc welding)
OM	Osnovni metal
PPŽ	Praškom punjene žice
PTFE	Politetrafluoroetilen (teflon)
REL	Ručno elektro lučno zavarivanje (eng. SMAW – Shielded metal arc welding ili MMAW – Manual metal arc welding)
SMAW/MMA	REL postupak zavarivanja
STAW	TIG postupak zavarivanja
TIG	Elektro lučno zavarivanje uz volfram elektrodu i zaštitu inetrnih plinova (eng. Tungsten inert gas ili STAW – Shielded tungsten arc welding)
TX-1,…,5	Oznaka dodatnog materijala (elektrode); brojevi od 1 do 5 ovise o vrsti elektrode
UV-zrake	Ultra ljubičaste zrake
X-zrake	X ili rendgen zrake pri radijaciji

ZPPŽ	Zavarivanje praškom punjenom žicom (eng. FCAW – Flux cored arc welding)
ZUT	Zona utjecaja topline (eng. HAZ – Heat affected zone)

ZAHVALA

Ovom prilikom se zahvaljujem:

- dr.sc. Branku Baueru, na korisnim savjetima i vodstvu tijekom izrade ovog diplomskog rada,
- prof.dr.sc. Ivanu Juragi, na pomoći pruženoj pri izradi eksperimentalnog dijela diplomskog rada,
- majstorima Kreši, Mati i Zdenku, na svesrdnoj pomoći,
- tvrtkama TREA TRADE d.o.o. i ELIMP d.o.o. na doniranoj praškom punjenoj žici, te VODOTEHNICI d.o.o. na doniranim čeličnim pločama,
- pokojnom stricu Josipu Pakracu (1949.-2007.), na materijalnoj pomoći tijekom studija,
- roditeljima, mami Ani Pakrac i pokojnom ocu Slavku Pakracu (1952.-2006.),
- mojoj Heleni.

IZJAVA STUDENTA

Izjavljujem pod punom odgovornošću da sam diplomski rad izradio samostalno, koristeći znanja sakupljena tijekom studija, te raspoloživu literaturu.

Juraj Pakrac

1. UVOD

Zavarivanje praškom punjenim žicama - FCAW (eng. flux cored arc welding) je postupak koji se može primijeniti kao zamjena za postupke REL-a, MIG/MAG-a i EPP. Prednosti FCAW postupka su visokokvalitetan nataljeni metal (depozit), odličan izgled zavara i veliki učinak taljenja. Proces ima veliku brzinu zavarivanja, te ga je lako automatizirati.
Postoje dvije vrste FCAW postupka; samozaštitni FCAW postupak je pogodan za terensku upotrebu na otvorenom prostoru, dok je plinom štićeni FCAW postupak pogodan za zatvorene prostore. Oba postupka mogu se koristiti za profesionalne i hobi/rekreativne primjene. Dodatna prednost FCAW postupka je ta što je oprema vrlo slična opremi za MIG/MAG postupak; uz neke ne toliko skupe izmjene oprema je pogodna za rad sa oba postupka.
U tekstu je opisan FCAW postupak s osvrtom na mogućnosti daljnjeg razvoja i primjene.

1.1. POVIJEST I RAZVOJ ELEKTROLUČNIH POSTUPAKA ZAVARIVANJA

Počeci kovačkog zavarivanja sežu u brončano i željezno doba, a elektrolučno zavarivanje se javlja oko 1800.g., kada je H. Davy otkrio električni luk. Nakon toga je N.G.Slavianoff izumio metalnu elektrodu, a C.L.Coffin kasne 1800.g. elektrolučno zavarivanje ugljičnom elektrodom. Oko 1900.g. A.P. Strohmenger je načinio obloženu metalnu elektrodu za stabilniji luk, a 1919.g. C.J.Holslag je izmislio zavarivanje izmjeničnom strujom. Obložene su elektrode stabilizirale luk i štitile osnovni materijal od onečišćenja.
Tijekom I. svjetskog rata Britanci i Amerikanci koriste zavarivanje za popravke brodova. Zavarivanje se koristilo tijekom II. svjetskog rata i za zrakoplove. Tijekom 1920. pojavilo se automatsko zavarivanje (stalna dobava elektrode); znanstvenici su razvijali zaštitne plinove zbog lošeg utjecaja kisika i dušika na zavar. Poroznost i krhkost su bile problem i stoga su korišteni helij i argon kao zaštitni plinovi. Elektrolučno zavarivanje prvotno se koristilo za zavarivanje čelika, a daljnjim razvojem omogućeno je zavarivanje aluminija i magnezija.
Tijekom 1930. je izumljeno EPP zavarivanje, 1941. je došao TIG, a 1948. MIG/MAG za neželjezne metale koji trebaju skupe zaštitne plinove. MIG/MAG je brzo prihvaćen uz CO_2 kao zaštitni plin. Oko 1950. godine zaštita sa CO_2 se kombinira uz praškom punjene žice koje

su već bile prevladale prve nedostatke. Operativne karakteristike su poboljšane dodatkom jezgrenih materijala, a kvaliteta zavara je poboljšana isključenjem atmosferskog onečišćenja. Proces je predstavljen 1954. godine. Elektrode i oprema su poboljšani na približno današnju razinu još 1957. godine, kada se pojavilo zavarivanje praškom punjenim žicama, gdje se žica „sama štitila“ (parama koje se razvijaju pri taljenju žice) u automatiziranom procesu, omogućivši tako velike brzine zavarivanja. Također, 1957.g. je izumljeno plazma zavarivanje, 1958.g. EPT i elektroplinsko zavarivanje.
Proces se stalno poboljšava; izvori energije su pojednostavljeni , dodavači žice pouzdaniji od prethodnih, pištolji su laganiji. Najnovija dostignuća su visokolegirane elektrode i elektrode malih promjera (Ø0.9 mm). [1]

1.2. ELEKTROLUČNI POSTUPCI ZAVARIVANJA

Elektrolučno zavarivanje koristi izvore struje za dobivanje električnog luka koji tali metal pri mjestu zavarivanja. Izvor struje koja se koristi može biti izmjenična - AC (eng. Alternating current) ili istosmjerna - DC (eng. Direct Current), dok su elektrode taljive ili netaljive. Zona zavarivanja, ovisno o vrsti postupka se može zaštititi sa inertnim ili aktivnim zaštitnim plinom i/ili parama koje se stvaraju pri isparavanju dodatnog materijala. Elektrolučno zavarivanje se često koristi zbog niskih početnih troškova i niskih troškova održavanja. [1]

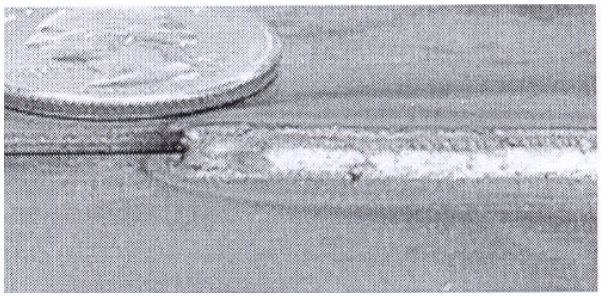
1.2.1. POSTUPCI ZAVARIVANJA SA TALJIVIM ELEKTRODAMA

REL postupak (eng. shielded metal arc welding/manual metal arc - SMAW/MMA) jedan je od najčešćih; električna struja daje luk između osnovnog metala i taljive (štapne) elektrode. Teži se tome da jezgra taljive elektrode ima sastav što sličniji metalu koji se zavaruje. Obloga (eng. flux) koja štiti zavar od oksidacije i onečišćenja, stvara CO_2 koji štiti zavar tijekom procesa zavarivanja. Nedostaci ovog postupka su sporost zavarivanja zbog česte izmjene elektrode i čišćenja skrutnute troske, te ograničeno područje upotrebe (samo za materijale na bazi željeza, iako se može zavarivati i lijevano željezo, nikl, krom, aluminij, bakar i ostali). Prednost ovog postupka je mogućnost upotrebe u gotovo svim položajima zavarivanja. Ne zahtijeva puno znanja i vježbe, oprema nije skupa, te se zbog toga često koristi kod popravaka i konstrukcija.

MIG/MAG postupak (eng. gas metal arc welding - GMAW) je poluautomatski ili automatski postupak zavarivanja koji se koristi kontinuiranom, taljivom elektrodom (žicom) te inertnim (MIG postupak), odnosno aktivnim (MAG postupak) plinom koji štiti zavar od onečišćenja. Kod ovih postupaka obično se koristi istosmjerna struja konstantnog napona, ali se može koristiti i izmjenična struja. Prijenos metala u električnom luku može biti u kapljicama, kratkim spojevima, štrcajući ili impulsno. MIG/MAG postupak je prvotno razvijen za zavarivanje aluminija i neželjeznih metala, ali se počinje primjenjivati i kod čelika zbog velike brzine zavarivanja. Prednosti postupka su svestranost i mogućnost postupka da se lako robotizira, a primarno je zastupljen u automobilskoj industriji. Rijetko se koristi na otvorenom (glavna prednost FCAW postupka naprema MIG/MAG-u) zbog osjetljivosti zaštitnog plina na strujanje zraka.

Oprema koja se koristi kod ovog postupka sastoji se od: pištolja za zavarivanje, dodavača žice, izvora struje, elektrode (žice) i sustava zaštitnog plina. Pri primjeni ovog postupka bitni su slijdeći parametri položaj pištolja (kutevi nagiba, lijeva/desna tehnika zavarivanja) i duljina slobodnog kraja žice. Kao i kod svakog postupka zavarivanja treba poštivati mjere sigurnosti na radu. ***Slika 1.1.***, prikazuje izgled zavara dobiven MIG/MAG postupkom.

Sličan postupak je zavarivanje praškom punjenim žicama (eng. flux cored arc welding - FCAW) koji koristi sličnu opremu, ali ima žicu cjevastog poprečnog presjeka dok je unutar žice prašak. Ova je žica skuplja od obične čelične žice, ali stvara dodatni zaštitni plin i/ili trosku, te omogućava veću brzinu zavarivanja i veću dubinu penetracije.



Slika 1.1. *Izgled zavara dobivenog MIG/MAG postupkom. [1]*

EPP postupak (eng. submerged arc welding - SAW) je visokoproduktivni automatski zavarivački postupak kod kojeg električni luk nastaje ispod pokrivnog sloja praška, čime se povećava kvaliteta luka, jer su onečišćivači atmosfere izolirani praškom. Troska stvorena na zavaru obično sama otpada. Stalna dobava žice omogućuje vrlo veliku brzinu zavarivanja i

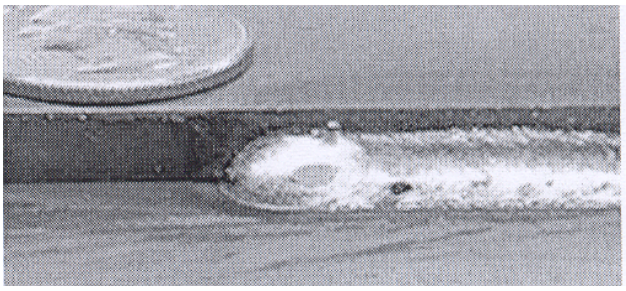
postizanje visokog učinka taljenja. Radni uvjeti su poboljšani u odnosu na ostale lučne postupke zbog skrivenosti luka i zbog toga što nema dima. Postupak se koristi u industriji, kod zavarivanja materijala velikog presjeka. [1]

1.2.2. POSTUPCI ZAVARIVANJA S NETALJIVIM ELEKTRODAMA

TIG (eng. shielded tungsten arc welding - STAW) je ručni postupak s netaljivom elektrodom od volframa i s inertnom zaštitnom mješavinom uz posebno dodavani dodatni metal ili bez dodatnog metala. Posebno je koristan kod tankih materijala zbog stabilnog luka i kvalitetnog zavara, ali zahtjeva iskusnog zavarivača, a proces zavarivanja je spor. Koristi se za sve zavarljive metale, ali najviše za nehrđajuće čelike i lake metale. Koristi se kod zavara koji zahtjevaju visoku kvalitetu, kao kod biciklističkih zavara, zrakoplovnih i pomorskih primjena. Sličan proces je i lučno zavarivanje plazmom, gdje se kao elektroda koristi volfram, a plin plazme električnog luka ima koncentriraniji tok energije. Zbog stalne struje postupak se može primijeniti za širi raspon debljine presjeka materijala od TIG postupka i uz to postiže veće brzine zavarivanja. Koristi se za zavarivanje svih metala kao i TIG postupak, osim magnezija, a najčešće se koristi za automatsko zavarivanje nehrđajućeg čelika. [1]

2. OSNOVE FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA

FCAW je postupak elektrolučnog zavarivanja kod kojeg se elektroda pomoću električnog luka tali i tvori zavar. Zaštitni plinovi i pare stvoreni su taljenjem praška koji se nalazi u cjevastoj elektrodi, a može se koristiti i dodatna zaštita od vanjsko dovedenog zaštitnog plina. Postupak je nastao kao zamjena za REL, jer je upotreba kontaktnih štapnih elektroda nespretna, a prevladani su mnogi nedostaci REL-a. Izgled zavara dobivenog FCAW postupkom prikazuje ***slika 2.1.***



Slika 2.1. *Izgled zavara dobivenog FCAW postupkom. [1]*

Praškom punjena žica je sastavljena od metalne obloge i jezgre raznih materijala u prahu. Tijekom zavarivanja stvara se troska na zavarenom spoju. Žica ispunjena praškom automatski se dovod. Oprema je slična kao kod MIG/MAG postupka, ali uz neke razlike (pogonski valjčići, zaštitni plin, vodilica, kontaktni vrh).
Zaštitni plin također se dovodi kroz cijevi zavarivačkog pištolja štiteći talinu zavara od oksidacije pri zavarivanju. Prašak unutar žice štiti zavar od atmosfere pomoću troske koja pokriva zavar.

2.1. VRSTE FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA

Postoje dvije vrste FCAW postupaka:

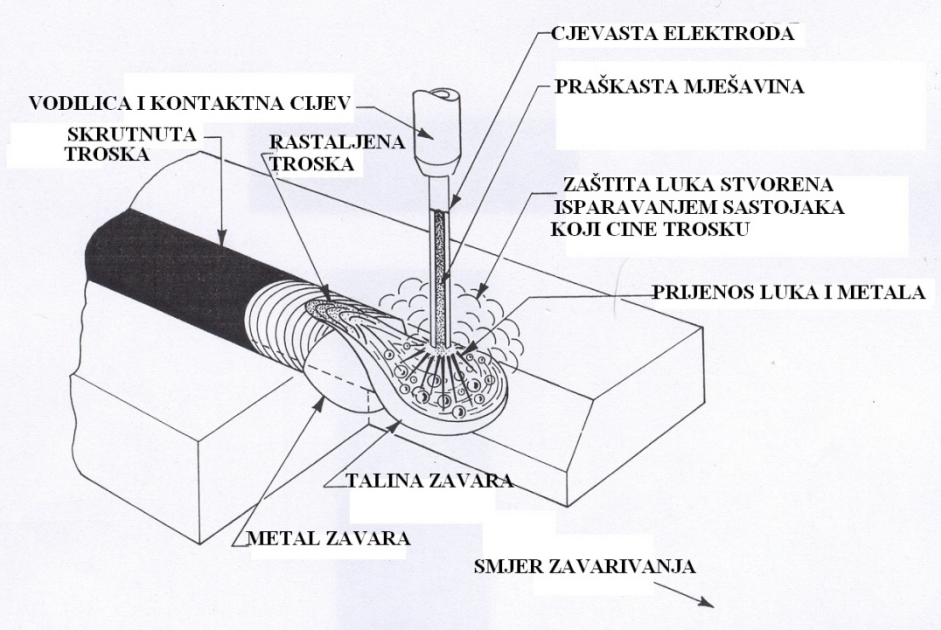
- FCAW-S vrsta koja ne zahtjeva zaštitni plin, zbog praška u jezgri unutar cjevčice potrošne elektrode. Jezgra sadrži prašak raznog sastava i sastojaka koji podvrgnuti

visokoj temperaturi stvaraju zaštitni plin radi zaštite luka. Ova vrsta FCAW postupka se preporučuje jer ima mogućnost prijenosa i korištenja na otvorenom (terenskom) radu, također ima odličnu dubinu penetracije u metal i ne šteti joj strujanje zraka,

- FCAW-G vrsta koja koristi zaštitni plin koji se dobavlja izvana, primarno se koristila za zavarivanje čelika, a neki je smatraju kombinacijom MIG/MAG-a i FCAW-a. Ova vrsta se preporuča za metale debljeg presjeka i kod položaja zavarivanja koji nisu prisilni (eng. out of position). Stvorena troska se lakše skida, ali ne može se koristiti kod vjetrovitog vremena, jer gubitak zaštitnog plina stvara poroznost (male kratere) na površini zavara. [2]

2.1.1. FCAW-S POSTUPAK ZAVARIVANJA

Žica sa praškastom jezgrom se tali toplinom električnog luka, stvara zaštitni plin i praškaste agense radi dobivanja kvalitetnog zavara bez vanjskog zaštitnog plina. Taj „štit“ može izdržati jaki povjetarac. Nakon završenog procesa zavarivanja sa zavara treba maknuti trosku.
Bitne parametre čine nagib zavarivačkog pištolja koji je propisan i poboljšava preglednost pri zavarivanju i parametri dodavača žice; netočna tehnika daje uvećane greške. Ovaj postupak obično se koristi za zavarivanje niskougljičnog čelika koji se koristi na otvorenom, budući da je moguće popraviti poljoprivrednu i građevinsku mehanizaciju u vrlo kratkom vremenskom periodu. Također, slobodni kraj elektrode je još jedna varijabla koja utječe na konstrukciju spoja. Kod dugih slobodnih krajeva pri vodoravnom zavarivanju bez podloške treba planirati propisnu dubinu penetracije korijena. Zavarivanje prvog prolaza je možda najbolje uz REL radi bolje kontrole zone taljenja i dubine penetracije. Slično, kod zavara sa podloškomrazmak u korijenu mora biti dovoljan da omogući potpuno staljivanje uz prijenos metala u kapljicama. Struja zavarivanja i napon mogu varirati ovisno o vrsti, promjeru elektrode i proizvođaču. Ovisno o razmaku među pločama spoja i upotrijebljenoj tehnici za korijenski prolaz, nekada su potrebni žljebovi ili zavarivanje sa druge straneu slučajevima kada nema podloške.



Slika 2.2. *Dijelovi FCAW-S postupka zavarivanja. [2]*

Kod 115 V aparata, koristi se elektroda Lincoln Innershield Ø 0.9 mm NR-211-MP, a kod 230 V aparata elektroda je Lincoln Innershield Ø 1.14 mm NR-211-MP. Kod FCAW-S postupka priprema spoja za niskougljične čelike osnovne konstrukcije je vrlo slična kao i za REL i FCAW-G postupak. Oblici spojeva su slični REL-u, a može biti razlike u dimenzijama. Razlike postoje zbog veće količine rastaljenog metala (depozita) i manje dubine penetracije FCAW-S elektrode. Glavni dijelovi FCAW-S postupka su prikazani na ***slici 2.2.*** [3]

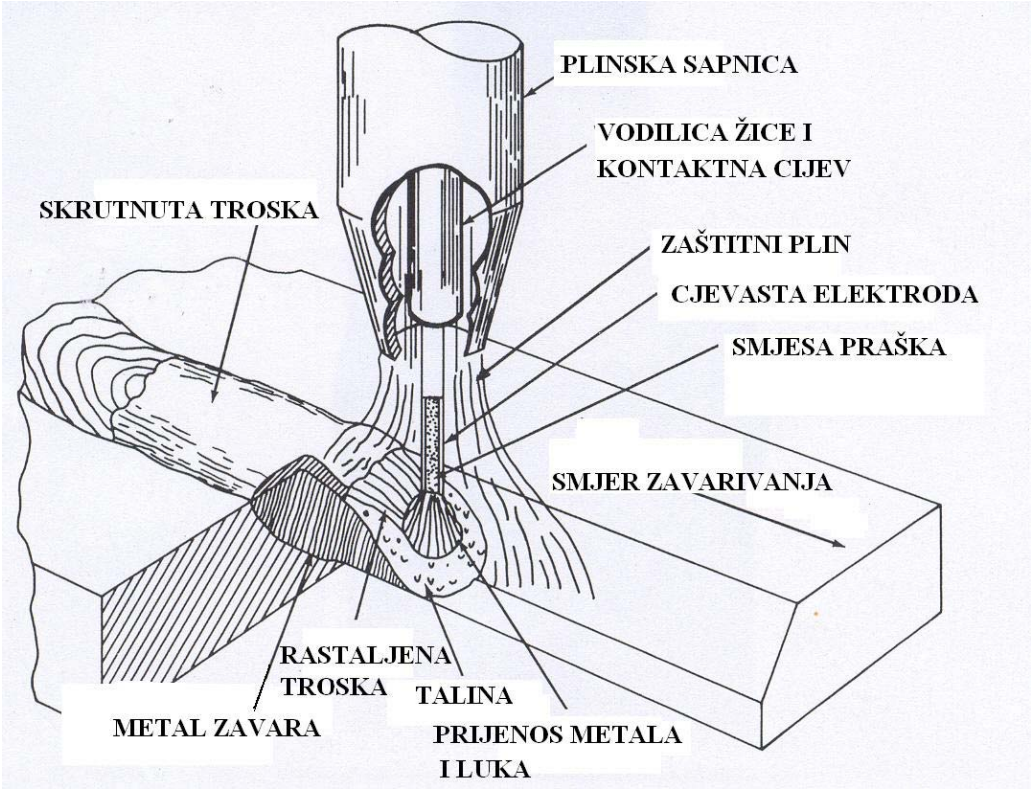
2.1.2. FCAW-G POSTUPAK ZAVARIVANJA

Spojevi su općenito konstruirani da iskoriste dubinu penetracije postignute uz visoku gustoću izvora energije. Priprema spoja za FCAW-G postupak vrlo je slična pripremi spoja za REL postupak. Za osnovne konstrukcije sučeljenih spojeva treba razmotriti slijedeće:

- konstrukcija spoja treba biti takva da stalni slobodni kraj žice bude iste dužine i kada se zavaruje po nekoliko prolaza u spoju,
- spoj u korijenu treba biti pristupačan i svaka dodatna operacija žicom tijekom zavarivanja treba biti omogućena.

Kutovi žljebova kod pripreme spoja raznih metala moraju biti propisno konstruirani kako bi omogućili pristup plinskoj sapnici pištolja i slobodnom kraju žice. Sapnice pokraj pištolja za automatsko zavarivanje omogućavaju lakši pristup uskim dijelovima spoja i omogućavaju

manje kutove pri pripremi spoja od aksijalnih sapnica. Uz pravilno izvedeni postupak zavarivanja postižu se kvalitetni zavari. Parametri struje i napona zavarivanja također mogu varirati ovisno o izvoru elektrode. ***Slika 2.3.*** daje prikaz glavnih dijelova FCAW-G postupka.



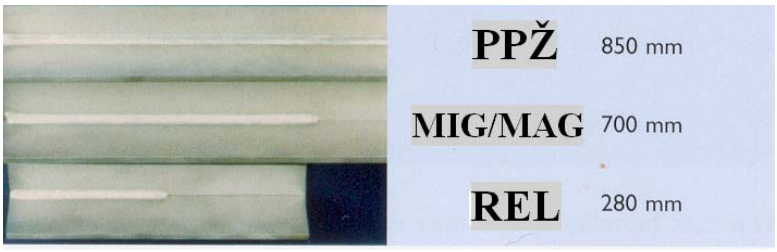
Slika 2.3. *Prikaz i dijelovi FCAW-G postupka zavarivanja. [2]*

Za dobivanje kvalitetnog zavara potrebna je pripadajuća plinska zaštita, a protok ovisi o veličini sapnice, slobodnom kraju žice i uvjetima zavarivanja. Zavarivanje uz mirnu struju zraka traži 14-19 l/min plina, a kod gibanja zraka ili dužeg slobodnog kraja 26 l/min zaštitnog plina. Protok bočnih sapnica općenito je isti ili veći od protoka aksijalnih sapnica. Otvor sapnice mora se čistiti zbog kapljica koje se lijepe tokom procesa zavarivanja uslijed štrcanju. Ako postoji jače strujanje zraka u području zavarivanja, npr. pri zavarivanju na otvorenom, treba koristiti zastore za štićenje zone zavarivanja i sprečavanje gubitka plinske zaštite. [2]

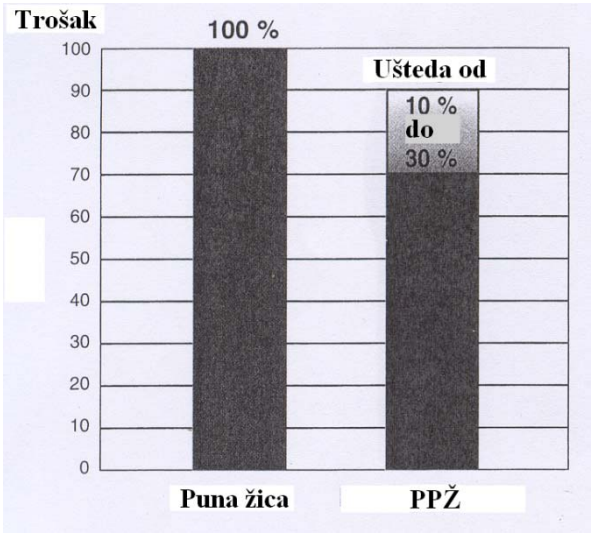
2.2. PREDNOSTI FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA

FCAW postupak ima brojne prednosti u odnosu na druge postupke; osigurava visokokvalitetan zavar uz niže troškove, manje je zahtjevan spram zavarivača od REL-a,

dopušta veća odstupanja parametara zavarivanja od MIG/MAG-a, te je fleksibilniji i bolje prilagodljiv od EPP-a. Zavarivač ne treba stati s radom i mijenjati štapnu elektrodu kao kod REL-a, što omogućava duži zavar uz samo nekoliko ponovnih početaka zavara, više nataljenog metala zavara, veliku produktivnost i manju mogućnost pogreške u počecima zavara. Prednost PPŽ (praškom punjenih žica) je slikovito prikazana na ***slici 2.4.*** gdje se uz PPŽ dobiva veća duljina zavara uz isti vremenski period zavarivanja.



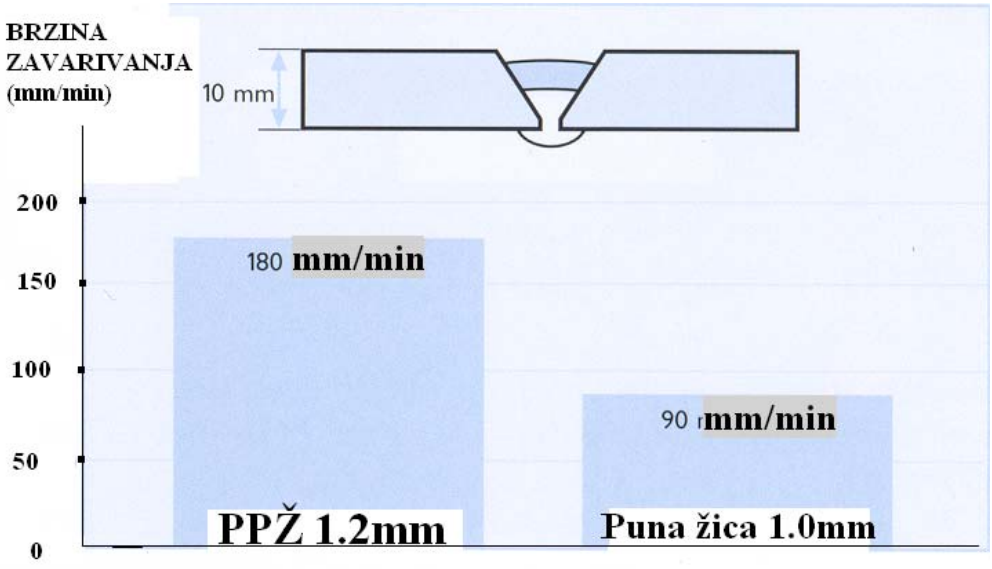
Slika 2.4. *Prednost FCAW postupka naprema svim ostalim postupcima zavarivanja. Dobivene duljine zavara uz isti vremenski period zavarivanja. [4]*



Slika 2.5. *Ukupna ušteda troškova zavarivanja FCAW-om. [4]*

Slika 2.5. grafički prikazuje moguću uštedu u troškovima zavarivanja uz primjenu PPŽ. Ako se koristi elektroda spojena na istosmjernu struju pozitivnog polariteta dobija se duboka penetracija uz dobar izgled zavara, a žice malog promjera mogu se koristiti za sve položaje zavarivanja.

Kada se koristi zaštitni plin CO_2, koji je vrlo jeftin (ili ostali 75/25 plinovi), i prašak koji sadrži oksidatore osnovni metal zahtjeva malo čišćenja prije zavarivanja, a nakon zavarivanja čišćenje je brzo i jednostavno. Brzina zavarivanja PPŽ je oko dva puta veća od brzine zavarivanja uz punu žicu, ***slika 2.6.***



Slika 2.6. *Postignute brzine zavarivanja konkurentnih postupaka. [4]*

FCAW postupak zahtijeva manje čišćenja nego MIG/MAG postupak, ali stanje osnovnog metala utječe na kvalitetu zavara, tako da se mora izbjeći prekomjerna kontaminacija osnovnog metala

Dodatne prednosti FCAW postupka su:

- visokokvalitetni metal zavara,
- odlična estetika zavara – gladak, jednolik zavar,
- izvrsna kontura vodoravnih kutnih zavara,
- zavarljivost različitih vrsta čelika uz širok raspon poprečnih presjeka metala,
- proces je lako mehanizirati,
- velika količina nataljenog metala– velika gustoća toka energije,
- relativno visok učinak taljenja žice,
- niski troškovi pripreme spoja,
- puno vidljiviji električni luk zbog dužeg slobodnog kraja žice,
- zahtjeva manje čišćenja prije zavarivanja,

- smanjena mogućnost utjecaja vanjskih faktora na proces zavarivanja,
- upotreba samozaštitnih žica (FCAW-G postupak) isključuje potrebu rukovanja praškom za plinsku zaštitu,
- manja osjetljivost na onečišćivače koji mogu prouzročiti pucanje zavara,
- otpornost na pukotine u zavaru,
- mogućnost korištenja u svim položajima zavarivanja uz odgovarajući dodatni materijal,
- mogućnost postizanja velike brzine zavarivanja (kod automatskog postupka),
- metalurške prednosti zbog praška,
- nije potrebno veliko iskustvo zavarivača,
- proces je primjereniji za materijale većeg poprečnog presjeka i manje je podložan hladnom naljepljivanju,
- strojno kontrolirani proces daje jednoliku kvalitetu zavara i smanjen broj grešaka,
- distorzija je manja pri malom unosu topline i većoj brzini.

2.3. NEDOSTACI FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA

FCAW postupak stvara puno para. Ako se koristi u zatvorenom prostoru, potrebno je imati vrlo jak pokretni ventilacijski sustav na samom mjestu zavarivanja. Kod ovog procesa prisutne su nepravilnosti kao i kod ostalih zavarenih spojeva: greške vezivanja, nemetalni uključci troske i pukotine u zavaru. Dodatno, nedostatke čine i:

- rastaljeni kontaktni vrh,
- diskontinuirano dodavanje žice – mehanički problem,
- poroznost zbog plinova, osobito iz praška u jezgri (plinovi koji ne izađu iz zavarenog područja dok se metal ne ohladi ostavljaju pore u zavaru),
- manje je povoljan za primjene naknadnog lakiranja metala, kao kod automobilskih karoserija,
- složena optimizacija FCAW parametara u procesu,
- podešavanje zavarivačkih parametara i odabir tehnike,
- zavarivački problemi i nepravilnosti kao npr. ugorine, naljepljivanje ili greške vezivanja, pretjerano taljenje, nepravilno pripremljen spoj, poroznost, uključci troske,
- postupak nije preporučljiv za materijale malog presjeka (ispod 1.6 mm),

- mala promjena parametara aparata uzrokuje velike promjene električnog luka, uz to položaj pištolja je ključan jer se mora držati jednoliko, uz određeni nagib da se dobije kvalitetan zavar,
- stvara štrcanje i trosku koji se moraju očistiti prije bojanja ili površinske obrade,
- proces je za sada ograničen na zavarivanje željeznih metala i legura na bazi nikla,
- skuplji po jedinici težine od punih elektroda, osim kod nekih visokolegiranih čelika,
- skuplja oprema od REL-a, iako veća proizvodnost to nadoknađuje,
- dodavač žice i izvor energije moraju biti blizu mjesta zavarivanja,
- plinom štićene žice su osjetljive na vjetar,
- složena oprema i zahtjevnije održavanje,
- stvara više dima i para od MIG/MAG-a ili EPP-a.

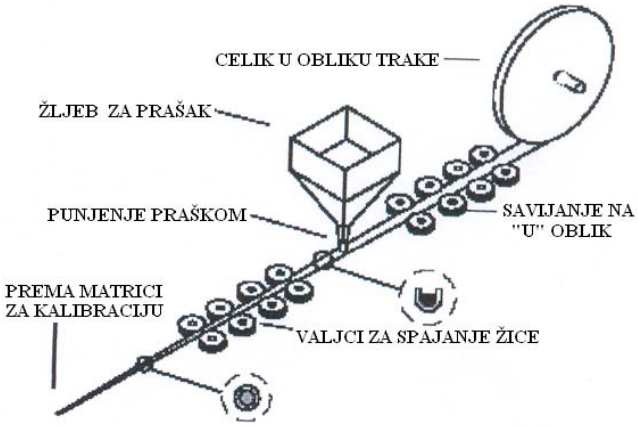
3. DIJELOVI I OPREMA FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA

3.1. ELEKTRODA ILI DODATNI MATERIJAL (ŽICA)

Slika 3.1. *Poprečni presjek elektrode koji pokazuje vrste spojeva pri izradi žice za zavarivanje. [5]*

PPŽ uzduž osi mogu biti spojene raznim spojevima što se vidi iz poprečnog presjeka na ***slici 3.1.*** Žica je obično od niskougljičnog čelika ili legiranog čelika koji čini plašt oko jezgre praškastih i legirajućih elemenata. Kompozicija praška jezgre ovisi o vrsti i proizvođaču žice. Proizvođači općenito smatraju da je točan sastav praškom punjenih elektroda njihova zakonom zaštićena informacija.

Većina praškom punjenih žica se izrađuje prolazom čelične trake kroz valjke koji traku oblikuju u „U“ oblik poprečnog presjeka, zatim se traka puni određenom količinom granula i materijala jezgre (legirajući i praškasti elementi) i nakon toga se zatvara valjcima koji okružuju traku i čvrsto je pritišću da stvore spoj. Takva okrugla žica se provlači kroz matrice ili valjke koji joj smanjuju promjer i daljnje stišću jezgru. Žica se pri konačnoj veličini namata u kolute. Shema postupka izrade PPŽ je vidljiva na ***slici 3.2.***



Slika 3.2. *Shema izrade praškom punjenih žica. [5]*

Dobar odabir sastojaka jezgre u kombinaciji sa sastavom omotača omogućuje:

- kvalitetne zavarivačke karakteristike (veliki učinak taljenja u vodoravnom položaju, propisno vezivanje i oblik prolaza u nadglavnom položaju),
- različite vrste samozaštitnih i plinom štićenih elektroda,
- različite legirne sastave metala zavara (od niskougljičnog čelika do visokolegiranih nehrđajućih čelika).

Glavni zadaci sastojaka praškaste jezgre su:

- osigurati mehanička, metalurška i korozijski postojana svojstva metala zavara,
- dobiti kvalitetan i čvrst metal zavara, štiteći talinu od kisika i duška u zraku,
- odstraniti nečistoće iz taline uz pomoć reakcija izazvanih praškom jezgre,
- stvoriti pokrivnu trosku koja pri hlađenju štiti metal zavara od zraka i kontrolira oblik i izgled prijelaza u raznim položajima zavarivanja za koje je elektroda predviđena,
- stabilizirati električni luk, da bi se smanjilo štrcanje i olakšalo taljenje, te dobio prolaz propisanih dimenzija i homogenosti.

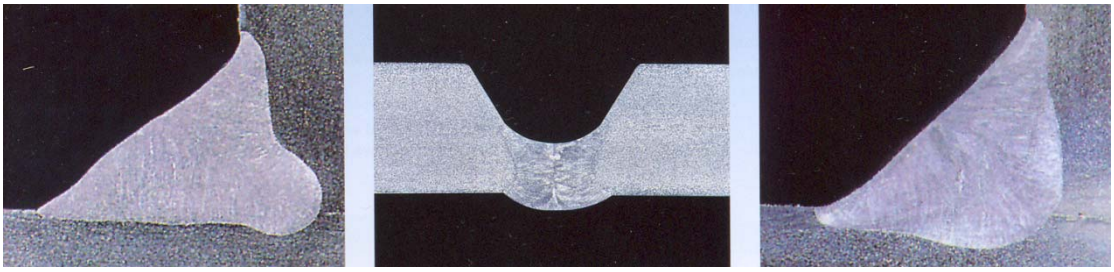
Troska može biti:

- rutilna,
- kisela,
- bazična. [5]

Vrsta troske	*Zavarljivost*	*Mehanička svojstva*
Kisela	*Odlična*	*Dobra*
Bazična	*Dobra*	*Odlična*
Rutilna	*Odlična*	*Odlična*

Tablica 3.1. *Prikaz ovisnosti svojstava zavara o vrsti troske. [5]*

Tablica 3.1. opisuje zavarljivost i mehanička svojstva PPŽ na temelju vrste troske koja se koristi. Pri zavarivanju prašak stvara trosku koja prekriva talinu koja hlađenjem očvršćuje i sprečava ulazak nečistoća u zavar. Metoda se zadnjih godina brzo razvijala. Oblik poprečnog presjeka zavara dobivenih FCAW postupkom je jednolik i pravilan, a usporedba sa zavarom dobivenog MIG/MAG postupkom se vidi iz ***slike 3.3.***



Slika 3.3. *Presjek zavara dobivenog punom žicom promjera 1.2 mm (lijevo) i zavara dobivenih FCAW postupkom uz žicu promjera 1.2 mm (sredina i desno). [4]*

Kod elektroda za niskolegirani čelik propisani udio dezoksidatora i elemenata za denitrifikaciju (samozaštitnih elektroda) treba poštovati kako bi se osigurao kvalitetan zavar uz zadovoljavajuću tvrdoću i žilavost. Dezoksidatori, kao silicij i magnezij, kombiniraju se s kisikom radi stvaranja stabilnih oksida. To olakšava kontrolu legirajućih elemenata kroz oksidaciju i formiranje CO koji bi inače stvorio poroznost. Elementi za denitrifikaciju, kao aluminij, kombiniraju se sa dušikom i stvaraju stabilne nitride sprječavajući poroznost i stvaranje ostalih nitrida koji mogu biti opasni. Troska koja štiti zavar od vanjskih utjecaja obično je samoskidajuća kao na ***slici 3.4.***

Slika 3.4. *Primjer samoskidajuće troske zavara. [4]*

3.1.1. ODABIR PPŽ ZA ZAVARIVANJE

Još jedan problem kod neiskusnog zavarivača, može biti odabir PPŽ za zavarivanje. Valjani promjer elektrode je povezan sa poprečnim presjekom ploče i aparatom za zavarivanje. 110 V aparat FCAW-a koristi Ø 0.9 mm žicu, kao npr. Lincoln Innershield NR-211-MP, zato što je to najmanji promjer PPŽ i jedini koji aparat može koristiti. FCAW aparat od 230 V obično koristi Ø 1.14 mm PPŽ Lincoln Innershield NR-211-MP za ploče poprečnog presjeka do 12.7 mm. PPŽ za proizvodno zavarivanje, navarivanje sloja otpornog na trošenje i specijalne PPŽ nadilaze mogućnosti ovih aparata. Treba biti oprezan da se podudare izlazni napon aparata i napon žice sa prikladnim promjerom žice i brzinom dodavanja žice, da bi se osigurala kompatibilnost sustava. [3]

3.1.2. KEMIJSKI SASTAV PPŽ – IZVOR I DJELOVANJE POJEDINIH ELEMENATA U PRAŠKU

Tablica 3.2. prikazuje najčešće elemente korištene u prašku FCAW žice, oblike u kojem su ti elementi prisutni i njihovo djelovanje.

ELEMENT	PRISUTAN KAO	DJELOVANJE
Aluminij	Metalni prašak	Dezoksidator, element za denitrifikaciju
Cirkonij	Oksid ili metalni prašak	Dezoksidator, element za denitrifikaciju, oblikuje trosku
Kalcij	Minerali kao CaF2 i CaCO3	Osigurava zaštitu i oblik troske
Kalij	Minerali sa silikatima, glinenci,…	Stabilizira električni luk i oblikuje trosku
Krom	Ferolegura ili željezni prašak	Poboljšava otpor na puzanje, tvrdoću, čvrstoću i korozijsku otpornost
Mangan	Ferolegura (feromangan) ili metalni prašak	Dezoksidator, spaja se sa sumporom (MnS), povećava tvrdoću i čvrstoću, oblikuje trosku
Molibden	Ferolegura	Povećava tvrdoću, čvrstoću, a kod austenitnih nehrđajućih čelika povećava otpor rupičastoj koroziji
Natrij	Minerali, glinenci,…	Stabilizira električni luk i oblikuje trosku
Nikl	Metalni prašak	Povećava tvrdoću, čvrstoću, žilavost i korozijsku otpornost
Silicij	Ferosilicij/ferolegura ili silicij-mangan, minerali silicija	Dezoksidator, oblikuje trosku
Titan	Ferotitan, minerali, rutilni	Dezoksidator, element za denitrifikaciju, oblikuje trosku, stabilizira ugljik kod nekih nehrđajućih čelika
Ugljik	Element ferolegura, kao feromangan	Povećava tvrdoću i čvrstoću
Vanadij	Oksid ili metalni prašak	Povećava čvrstoću
Željezo	Ferolegura ili željezni prašak	Legirajuća matrica depozita na bazi željeza, legura kod baze nikla i ostalih neželjeznih taloga

Tablica 3.2. *Najčešći elementi praška kod PPŽ, njihov oblik prisutnosti i djelovanje. [2]*

3.1.3. VRSTE PRAŠKOM PUNJENIH ŽICA

3.1.3.1. SAMOZAŠTITNE PPŽ OD NEHRĐAJUĆEG ČELIKA

Ove žice su za sada razvijene samo za zavarivanje sučeljenih i kutnih spojeva i za navarivanje u vodoravnom položaju.

Za zavarivanje nehrđajućih čelika u ostalim položajima koriste se EXXXT-1 elektrode namijenjene za sve položaje.

3.1.3.2. METALOM PUNJENE ŽICE

Ukoliko je proizvodnost nedovoljna čak i uz FCAW postupak zavarivanja, treba razmotriti primjenu metalom punjenih žica. Metalom punjene žice sastoje se od metalnog plašta i jezgre od metalnog praška, ponekad miješanog sa oksidima. Takve žice ne stvaraju trosku, ne štrcaju i stvaraju vrlo malo silicijskih otočića, te mogu smanjiti količinu para i dima koje stvara FCAW. Koriste se u proizvodnji auto, željezničke i pomorske industrije, za konstrukcije, poljoprivredne strojeve, robote i obalne konstrukcije.
Kod elektroda punjenih metalom treba razlikovati kompenzaciju i pripremu. Kod FCAW zavarivanja, skidanje troske je priprema za sljedeći postupak obrade. To je ustvari kompenzacija FCAW-a, odnosno dodatni korak. Kod metalom punjenih žica dio je već pripremljen za sljedeći proces obrade, npr. bojenje, jer nema potrebe za čišćenjem troske. Uz sve ovo smanjuje se ili isključuje dodatni rad, koji je također kompenzacijska aktivnost. Ove žice mogu premostiti rupe na dijelovima i zavarivati materijal uz veće iznose struje, dva najčešća dodatna rada. Stoga se radno mjesto za popravke i dodatni rad može ukloniti, odnosno smanjiti broj radnih mjesta. [5]

3.2. OSNOVNI METAL

Većina čelika i ostalih metala koji se zavaruju REL-om, MIG/MAG-om i EPP-om se zavaruju i FCAW postupkom, to su slijedeći metali:

- niskolegirani čelik – konstrukcijski čelik i čelik za tlačne posude,
- čelik postojan pri radu na povišenim temperaturama,
- čelik postojan pri radu na nižim temperaturama,
- nehrđajući čelik,
- visokolegirani nehrđajući čelik,
- aluminij i njegove legure,
- bakar i njegove legure,
- sivi lijev.

3.2.1. VISOKOLEGIRANI KONSTRUKCIJSKI ČELICI - NEHRĐAJUĆI AUSTENITNI CrNi ČELICI

Koriste se kao metali za izradu konstrukcija izloženih posebnim eksploatacijskim uvjetima.
Ovu grupu čelika čine Cr, CrNi, CrNiMo čelici, a dijele se na tri grupe:

- čelici otporni na koroziju i agresivne medije,
- vatrootporni čelici,
- niskotemperaturni čelici.

Po strukturi su:

- austenitni,
- feritni,
- martenzitni,

uz to mogu biti kombinacija austenitno-feritnih, austenitno-martenzitnih i feritno-martenzitnih.
Austenitni CrNi čelici su najotporniji na koroziju (zbog visokog sadržaja Ni, Cr i niskog sadržaja C), nemagnetični, plastični pri hladnoj obradi i dobro se zavaruju.
Problemi koji se mogu javiti pri zavarivanju ovim čelicima su:

- sklonost toplim pukotinama,
- zaostala naprezanja kod debljih materijala,
- velike deformacije kod tankih materijala,
- izlučivanje krom-karbida na granicama zrna kod austenita (ako je udio C > 0.04%) i sklonost zavarenog spoja interkristalnoj koroziji.

Sklonost toplim pukotinama pri zavarivanju smanjuje se ukoliko su osnovni i dodatni materijal od austenitnog CrNi čelika, koji će osigurati metal zavara sa 2-10% δ_{Fe} (delta ferita).
Izlučivanje krom-karbida pri zavarivanju može se pojaviti uslijed predugog zadržavanja u temperaturnom području od 500 do 800ºC (rubne zone granice austenitnog zrna su siromašne Cr), a moguće rješenje je izbor osnovnog metala sa niskim sadržajem ugljika (0.03% C), legiranjem stabilizatorima (Ti, Nb) i što manjim unosom topline pri zavarivanju.
Zaostala naprezanja ne predstavljaju velik problem, za razliku od deformacija. Deformacije se smanjuju ukrućivanjem zavarivačkog mjesta i određenim redoslijedom zavarivanja.
Austenitno-feritni čelik sa 10% ferita je prikladniji za zavarivanje od austenitnog čelika, jer je manje sklon toplim pukotinama. Danas imamo i dupleks (austenitno-feritne) čelike koji su posebno legirani i toplinski obrađeni, a imaju vrlo dobra svojstva, osim pri visokim

temperaturama (maksimalna radna temperatura iznosi 280ºC). Dvofazna struktura dupleks čelika uz približno jednake udjele austenita i ferita može biti narušena prevelikim ili premalim unosom topline pri zavarivanju (ispravan unos topline kod dupleks čelika iznosi 5-15 kJ/cm, a kod CrNi i CrNiMo čelika 10-18 kJ/cm). Ako je potrebno na unos topline se može utjecati i tehnikom zavarivanja (desna tehnika daje manji unos topline od lijeve tehnike zavarivanja).
Svi konstrukcijski visokolegirani čelici (Cr, CrNi, CrNiMo) austenitno i austenitno-feritne (dupleks) strukture mogu se zavarivati svim postupcima.
Pažnju treba posvetiti:

- izboru dodatnog materijala (Schäfflerov dijagram, preporuka proizvođača),
- održavanju čistoće mjesta zavarivanja i glatke površine osnovnog materijala,
- zavarivanju po određenom redoslijedu,
- pripremi spoja i korijena koja se izvodi samo brušenjem, odnosno brušenjem nakon toplinskog postupka pripreme spoja (npr. plinsko rezanje),
- odstranjivanju metalnih kapljica, troske i drugih nakupina nakon zavarivanja jer utječu na korozijsku postojanost konstrukcije,
- glatkoći površine zavara, bez velikih nadvišenja (najbolje ukoliko je površina obrušena, polirana i pasivirana),
- alatima koji se koriste za ove čelike; trebaju biti od istog materijala kao i sami čelici, dok brusne ploče trebaju biti od Al-oksida,
- ponekad treba izvesti kiselinsko čišćenje i pasivizaciju zavara kemijskom obradom,
- zavareno mjesto treba biti po kemijskom sastavu jednako osnovnom materijalu, zbog otpornosti na koroziju i visoku ili nisku temperaturu. [6]

Ukoliko dođe do oksidacije (pojava pri temperaturama iznad 250ºC) pojavljuju se deblji, vidljivi, oksidni, obojani slojevi koji propuštaju korozivne medije i ugrožavaju korozijsku postojanost.
Ovakve pojave uklanjaju se:

1. četkanjem,
2. brušenjem (voditi računa o snazi pritiska),
3. kombinacijom bajcanja i pjeskarenja. [7]

3.3. ZAŠTITNI PLINOVI I MJEŠAVINE

FCAW-G postupak zahtijeva uz unutarnju zaštitu praškom i zaštitni plin koji se dovodi iz boca ili spremnika koji su spojeni sa zavarivačkom stanicom, a regulatori tlaka i protokomjeri kontroliraju tlak i veličinu protoka zaštitnog plina.

Svrha zaštitnog plina je zaštita taline zavara pri skrućivanju u postupku zavarivanja. Sastav zaštitnog plina i njegov protok pri zavarivanju ovise o vrsti postupka. Zaštitni plinovi mogu se primijeniti za sve vrste prijenosa metala električnim lukom i sva područja snage izvora. [7]

Odabiru zaštitnog plina se često ne posvećuje dovoljno pažnje; pravilan odabir može povećati brzinu zavarivanja, količinu depozita i udio legirnih elemenata.

Kao zaštitni plin koriste se čisti plinovi (Ar ili He ili CO_2) i mješavine (dva i više plina) koji mogu biti inertni (Ar, He) ili aktivni (CO_2). Svaki plin ima prednosti i nedostatke koji utječu na postupak pri zavarivanju, a njihovom kombinacijom (miješanjem) nastoji se dobiti „idealan“ zaštitni plin za svaki postupak, odnosno metal koji se zavaruje. Najčešći plinovi koji se pojavljuju su Ar, He, CO_2, H_2, N_2, O_2.

Kod zavarivanja se zahtjeva određeni nivo čistoće plina, jer mali postotak vlage može prouzročiti poroznost ili adsorpciju vodika u metalu zavara. Točka rosišta zaštitnog plina treba biti ispod -40ºC. Ne treba zaboraviti ni sustav dovođenja zaštitnog plina (boce, ventili, crijeva) koji treba održavati da bi se dobio kvalitetan zavar.

Zbog mogućnosti smrzavanja regulatora pri brzom dovodu CO_2 plina iz tanka spremnika, mogu se koristiti i grijači da se spriječe moguće greške. [8]

3.3.1. UGLJIK-DIOKSID (CO_2)

Najčešći plin za FCAW-G metodu, a prednosti su niska cijena i duboka penetracija zavara. Obično omogućava prijenos metala u kapljicama, a neke kombinacije sa praškom omogućavaju i štrcajući prijenos metala uz CO_2. Ugljik-dioksid je većinom neaktivan/inertan pri sobnoj temperaturi, a pri zagrijavanju na visoke temperature električnim lukom CO_2 disocira na CO i O_2.

$$2\ CO_2 \rightarrow 2\ CO_2 + O_2$$

Zbog ttoga atmosfera električnog luka sadrži dosta kisika koji može reagirati sa elementima taline. Težnja oksidiranju kod CO_2 plina je uviđena pri razvoju FCAW žica, pa se dodaju dezoksidatori u jezgru elektrode da bi se kompenzirao oksidirajući efekt plina. Nadalje,

rastaljeno željezo reagira sa CO_2 tvoreći željezni-oksid i ugljik-monoksid u reverzibilnoj reakciji.

$$Fe+CO_2 \rightarrow FeO+CO$$

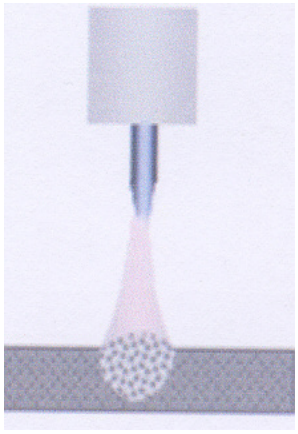
Pri temperaturi crvenog usijanja jedan dio CO disocira na ugljik i kisik.

$$2\,CO \rightarrow 2C+O_2$$

Učinak CO_2 zaštite na udio ugljika kod niskougljičnih i niskolegiranih čelika u metalu zavara ovisi o početnom sadržaju ugljika osnovnog metala i elektrode, CO_2 atmosfera se ponaša kao karbonizacijski ili dekarbonizacijski medij. Da li će udio ugljika u metalu zavara biti povećan ili smanjen, ovisi o udijelu ugljika u sastavu osnovnog metala i elektrode. Ako je udio ugljika u metalu zavara ispod 0.05%, talina zavara nastoji „uzeti“ ugljik iz zaštitne atmosfere CO_2, ali ako je udio ugljika veći od 0.1%, talina zavara može „izgubiti“ dio ugljika. Gubitak ugljika se pripisuje stvaranju CO zbog oksidirajuće karakteristike CO_2 zaštitnog plina pri višim temperaturama.

Kada dođe do ove reakcije CO može ostati zarobljen u metalu zavara kao poroznost. Ovu pojavu može umanjiti određeni udio dezoksidirajućih elemenata u jezgri elektrode. Kisik će reagirati sa dezoksidirajućim elementima, a reakcija će rezultirati stvaranjem čvrstih oksidnih smjesa koje plutaju na površini taline zavara gdje tvore dio pokrovne troske.

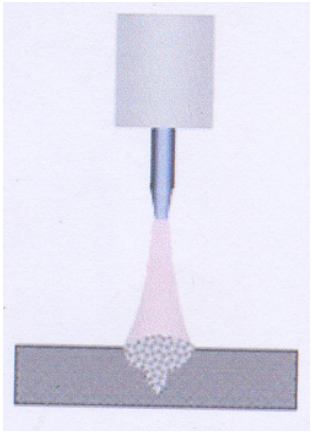
Ugljik-dioksid se najčešće koristi kada se zahtjeva prijenos metala u kratkim spojevima tokom zavarivanja MIG/MAG i FCAW postupkom. U reakciji CO_2 disocira na CO i O_2, a temperature te reakcije su određene temperaturom električnog luka. Ovime dolazi do oksidacije osnovnog metala i „gubljenja“ legirajućih elemenata taline zavara ili prolaza. CO_2 uz O_2 daje široki profil i duboku penetraciju zavara, kao što prikazuje ***slika 3.5.***, dok nizak potencijal ionizacije i niska toplinska vodljivost stvaraju vrlo visoke temperature u središtu (jezgre) električnog luka. Visoke temperature jezgre tako utječu na ukupan zavar dajući mu jednolik profil dubine penetracije i širine zavara. Uz 100%-tni CO_2 kao zaštitni plin ne može se ostvariti štrcajući prijenos metala kod MIG/MAG postupka, a potiče se i prijenos metala u kapljicama i mnogo štrcanja prilikom zavarivanja. Povećanjem udjela ugljik-dioksida raste i potrebni napon električnog luka koji tada postaje nemiran, a povećava se i štrcanje, prednost je minimalno stvaranje troske. [7]



Slika 3.5. *Izgled profila zavara dobiven pri korištenju CO_2 kao zaštitnog plina, CO_2 daje veliku dubinu penetracije i širinu samog zavara.* [8]

3.3.2. ARGON (Ar)

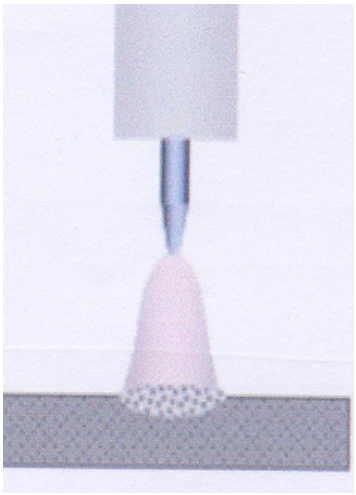
Argon je jednoatomni plin koji se često koristi za zavarivanja neželjeznih metala MIG/MAG postupkom; kemijski je inertan, te je podoban za zavarivanje metala postojanih pri povišenim temperaturama. Ima nisku toplinsku vodljivost i nizak potencijal ionizacije, pa dolazi do male vodljivosti topline u vanjsko područje električnog luka. Zbog toga se stvara uski električni luk koji uzrokuje dubok i uzak profil zavara, kako prikazuje ***slika 3.6.*** Kod MIG/MAG postupka uzrokuje neke zavarivačke greške zbog nedostatka topline u vanjskim područjima električnog luka. Argon kao zaštitni plin uz MIG/MAG postupak potiče štrcajući prijenos metala u električnom luku. [8]



Slika 3.6. *Izgled profila zavara dobiven pri korištenju Ar kao zaštitnog plina; Ar daje veliku i usku dubinu penetracije poznatu po obliku kao "prstenasta" ili penetracija u obliku čavla.* [8]

3.3.3. HELIJ (He)

Helij povećava toplinsku bilancu, a u mješavini sa CO_2 koristi se za zavarivanje debljih presjeka metala i postizanje većih brzina zavarivanja. Helij je također jednoatomni, inertni plin (često korišten kod TIG postupka zavarivanja neželjeznih metala). Ima visoku toplinsku vodljivost i visoki potencijal ionizacije. Zavar je širokog profila i dobrog kvašenja na krajevima prolaza, kako prikazuje ***slika 3.7.***, a dobiva se uz veći unos topline nego kod Ar. Visoki potencijal ionizacije otežava uspostavljanje električnog luka, dok se zahtjeva veći protok He jer je lakši od zraka, slijedeći nedostatak je što čisti He kao zaštitni plin pospješuje prijenos metala u kapima. [8]



Slika 3.7. *Izgled profila zavara dobiven pri korištenju He kao zaštitnog plina, He daje malu dubinu penetracije i veliku širinu samog zavara.* [8]

3.3.4. KISIK (O_2)

Kisik kao dvoatomni, aktivni zaštitni plin se kod MIG/MAG postupka miješa sa ostalim plinovima, uz udio O_2 od maksimalno 10%. Kisik ima potencijal unosa topline zbog svoje energije ioniziranja i energije električnog luka, oslobođene razdvajanjem molekula na atome. Profil zavara, uz kisik kao zaštitni plin, je dosta širok i plitak. Veći unos topline smanjuje površinsku napetost taline, te olakšava štrcajući prijenos metala i daje dobro kvašenje zavara. Mješavina Ar/O_2 najčešća je kod zavarivanja ugljičnog čelika, a dobiva se profil zavara sličan čavlu (u gornjoj površini je širi, a prema dubini se značajno sužava). Kada se O_2 miješa sa Ar

i CO_2, do izražaja dolaze dobro kvašenje zavara i štrcajući prijenos metala u električnom luku. [8]

3.3.5. VODIK (H_2)

Vodik je dvoatomni aktivni plin, a koristi se u zaštitnim mješavinama uz maksimalni udio od 10%. Najčešće se koristi za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika kako bi se olakšalo izdvajanje oksida i povećao unos topline. Profil zavara je kao i kod svih dvoatomnih plinova, širok i povećane dubine penetracije. H_2 se ne preporuča za zavarivanje feritnih i martenzitnih čelika zbog mogućih pojava pukotina. Veći postotak H_2 (30-40%) koristi se kod rezanja plazmom, da se poveća brzina rezanja i smanji količina troske kod nehrđajućeg čelika. [8]

3.3.6. DUŠIK (N_2)

Dušik se najmanje koristi u zaštitnim plinovima/mješavinama. Najčešće se koristi pri zavarivanju austenitnih čelika i radi poboljšanja korozijske postojanosti dupleks i superdupleks čelika. [8]

3.3.7. ZAŠTITNE PLINSKE MJEŠAVINE

Njihovim kombiniranjem kod FCAW-G metode mogu se dobiti prednosti dva i više plinova. Uz viši postotak inertnih plinova sa smjesom CO_2 ili O_2 viša je i efikasnost prijenosa dezoksidatora iz jezgre. Argon može zaštititi talinu zavara pri svim temperaturama zavarivanja, a njegova prisutnost u određenim količinama kod zaštitnih smjesa plinova rezultira manjom oksidacijom nego pri 100%-nom CO_2 plinu.
Obično se koristi smjesa 75% Ar i 25% CO_2, tako da metal zavara nataljen uz ovu smjesu pri zavarivanju ima višu vlačnu i dopuštenu čvrstoću od metala zavara uz 100%-ni CO_2. Kod zavarivanja ovom smjesom postiže se prijenos štrcanjem. Ova smjesa se koristi za zavarivanje u prisilnim položajima i ima bolju karakteristiku luka od 100%-og CO_2 zaštitnog plina. Kombinacija zaštitnih mješavina uz visok postotak inertnih plinova i žica namijenjenih zavarivanju uz CO_2 plin može prouzročiti pretjerano naslagivanje mangana, silicija i ostalih dezoksidirajućih elemenata u metalu zavara i tako promijeniti mehanička svojstva, stoga se treba savjetovati sa proizvođačem elektroda u vezi sa mehaničkim svojstvima metala zavara

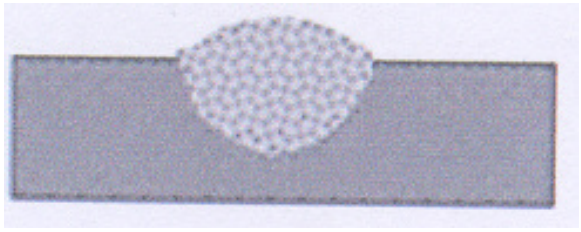
koji se dobivaju uz određene zaštitne mješavine. Ako podaci nisu dostupni treba izvršiti testove da se utvrde mehanička svojstva.

Sastav plinskih mješavina ovisi o postupku zavarivanja i metalu koji se zavaruje. Kod FCAW postupka za ugljične ili nehrđajuće čelike koriste se mješavine Ar/CO_2, $Ar/He/ CO_2$ ili čisti CO_2 plin. Kod MIG/MAG postupka izbor plinova je još veći (CO_2, Ar, O_2, He), a njihovo međusobno kombiniranje je šire.

Zavarivanje ugljičnog i nehrđajućeg čelika FCAW postupkom najčešće koristi mješavine Ar/CO_2 (oko 20-25% CO_2). Mješavina osigurava dobar električni luk, CO_2 utječe na duboku penetraciju i dobro oblikovanje troske, a Ar smanjuje količinu para i dima pri zavarivanju. Udio CO_2 može se smanjiti radi uvođenja He koji dodatno smanjuje količinu razvijenih para. [8]

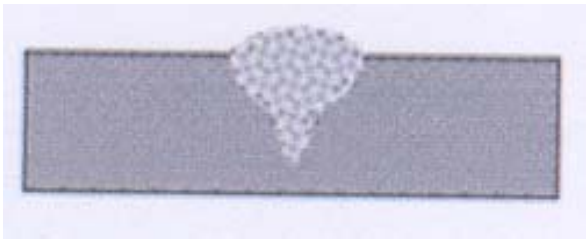
3.3.7.1. ZAŠTITNE PLINSKE MJEŠAVINE ZA ZAVARIVANJE UGLJIČNIH ČELIKA

Koriste se mješavine Ar/CO_2 (uz 5-25% CO_2) radi poticanja štrcajućeg prijenosa metala. Ako se želi smanjiti unos topline i dobiti mala dubina penetracije kod tankih metala koristi se mali udio CO_2 Visoki udio CO_2 daje prijenos metala uz kratke spojeve i veliku dubinu penetracije, kao na ***slici 3.8.***, ali može prouzročiti osiromašenje udijela legirajućih elemenata u metalu.



Slika 3.8. *Izgled profila zavara dobiven pri korištenju zaštitne mješavine plina Ar/CO_2, ova vrsta mješavine daje dubinu penetracije ovisnu o udijelu CO_2 u mješavini, a na taj način se dubina penetracije može i prilagođavati ovisno o potrebi.* [8]

Mješavine Ar/O_2 (uz udio O_2 od 2-5%) se obično koriste za štrcajući prijenos metala. Kod konstrukcijskih čelika mješavina Ar/O_2 dopušta zavarivanje uz blago oksidirajući osnovni metal. Mješavine koje sadrže O_2 treba koristiti sa oprezom zbog osiromašenja legiranih elemenata koje raste uz povećanje udjela kisika. ***Slika 3.9.*** prikazuje profil zavara dobiven korištenjem zaštitne mješavine Ar/O_2.



Slika 3.9. *Izgled profila zavara dobiven pri korištenju zaštitne mješavine plina Ar/O_2, ova vrsta mješavine daje vrlo veliku dubinu penetracije, ali i uži profil zavara.* [8]

Udio O_2 i CO_2, u mješavini sa tri plina, iznosi 2-8%. Ova mješavina potiče prijenos metala uz kratke spojeve ili štrcajući prijenos, a koristi se za skoro sve veličine poprečnih presjeka metala. Kisik pri niskom naponu potiče štrcajući prijenos metala, dok CO_2 ostvaruje duboku penetraciju. Mješavine $Ar/CO_2/O_2$ potiču štrcajući prijenos metala na nižem naponu od mješavine Ar/CO_2. [8]

3.3.7.2. ZAŠTITNE PLINSKE MJEŠAVINE ZA ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Najčešće korištene mješavine su Ar/O_2, Ar/CO_2/He. Mješavine Ar/O_2 (sadrže oko 2% O_2) koriste se za štrcajući prijenos metala. Trojne mješavine uz pretežni udio He (oko 90%) koriste se za prijenos metala kratkim spojevima, a uključuju Ar radi stabilnosti električnog luka i CO_2 radi dubine penetracije. Trojne mješavine uz pretežni udio Ar (oko 80%) sadrže oko 1-2% CO_2 dok ostalo čini He. Koriste se za štrcajući prijenos metala jer udio Ar to dopušta na niskom naponu, dok He daje dobro kvašenje i jednolik profil prolaza. [8]

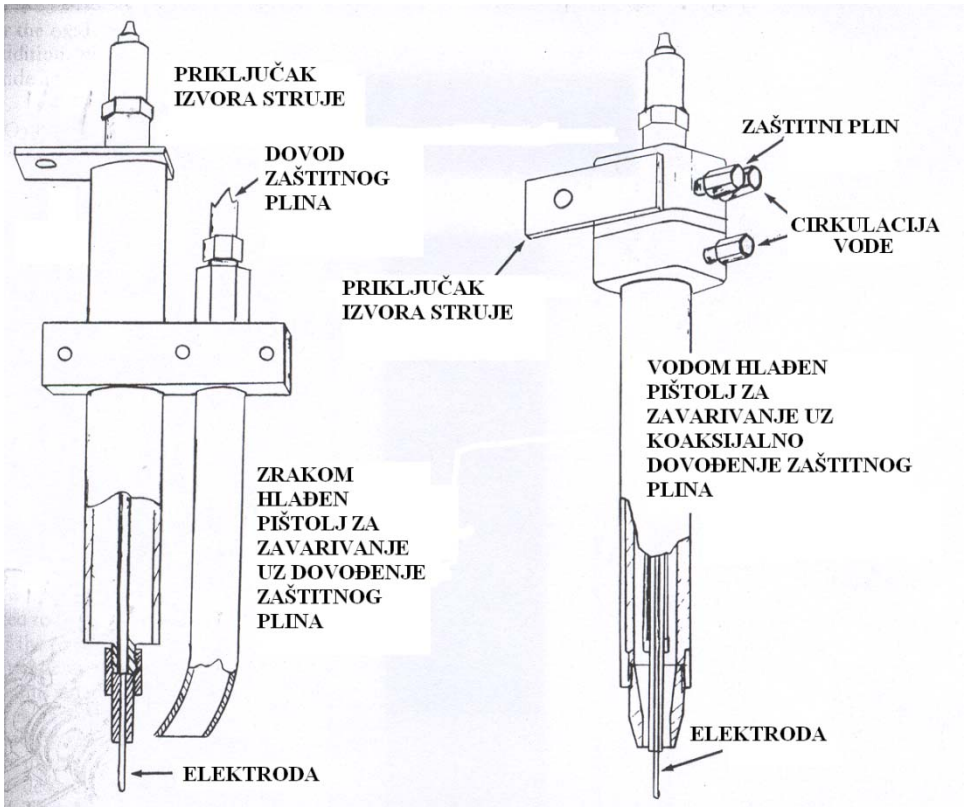
3.4. POLUAUTOMATSKA OPREMA ZA FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA

Osnovna oprema FCAW-G i FCAW-S postupka je slična; razlika je što se zaštitni plin treba dovoditi do FCAW-G elektrode.

Preporučuje se istosmjeran izvor struje uz stalan napon. Većina poluautomatskih primjena zahtjeva do 500 A, dok regulator napona treba omogućiti reguliranje napona po jedan volt ili manje.

Dodavač žice treba dovoditi žicu električnom luku uz stalnu, unaprijed određenu veličinu, a brzinu dodavanja žice određuje struja zavarivanja. Ako je veličina dodavanja žice promijenjena, zavarivački stroj se automatski prilagođava radi održavanja unaprijed postavljenog napona luka. Brzina dodavanja žice se može podešavati elektronički ili mehanički.

Proces zahtijeva uporabu pogonskih valjčića koji neće izravnati ili drugačije naštetiti cjevastoj elektrodi. Koriste se razni užljebljeni i izbočeni pogonski valjčići za dodavanje žice. Neki dobavljači žice imaju jedan par pogonskih valjčića, a drugi imaju dva para sa najmanje jednim pogonskim parom. Kada su oba para pogonska, žica je pogonjena manjim pritiskom na valjcima.

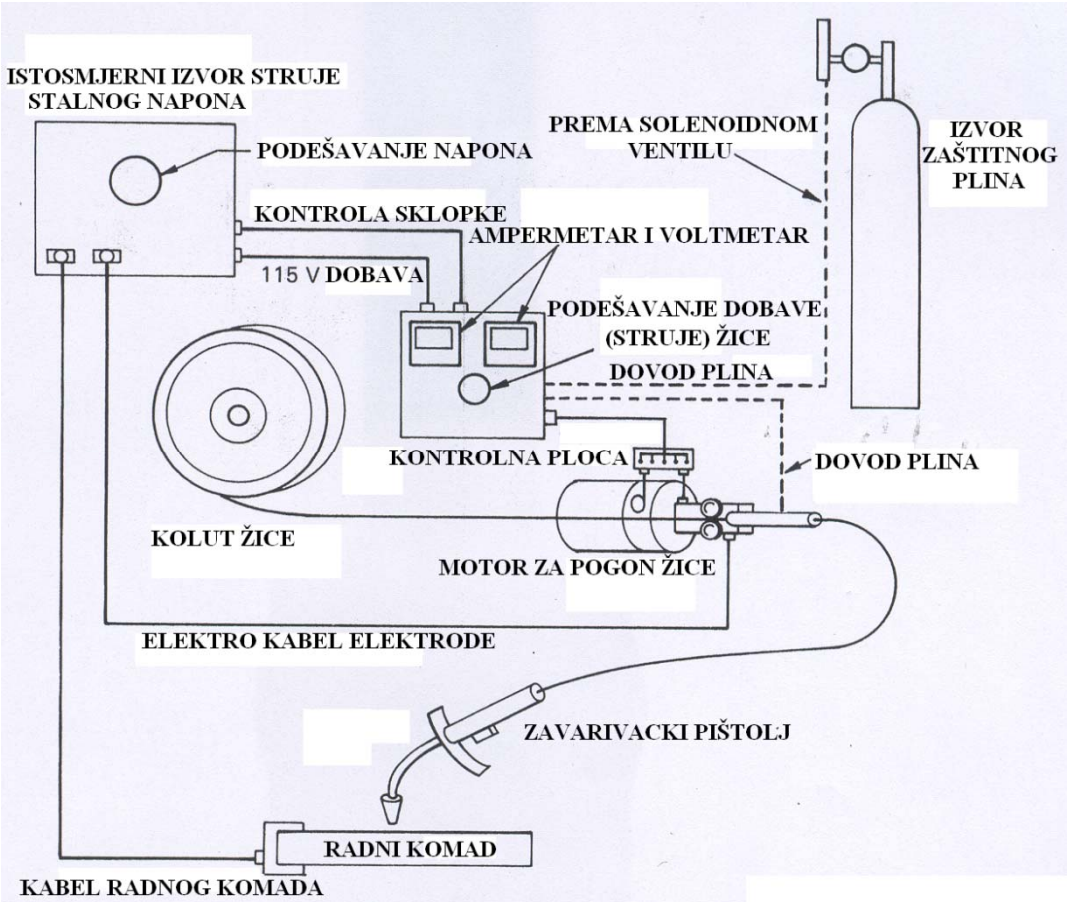


Slika 3.10. *Vrste pištolja za zavarivanje i vrste sapnica za dovođenje zaštitnog plina. [2]*

Pištolji za zavarivanje i vrste sapnica za zaštitni plin prikazani su na ***slici 3.10.*** Pištolj za poluautomatsko zavarivanje konstruiran je tako da omogući lagano korištenje pri ručnoj uporabi, da bude lagan za manipulaciju i izdržljiv. Pištolj omogućava kontakt sa žicom da bi se provela struja zavarivanja, a struja zavarivanja i dodavanje žice se uključuju prekidačem na pištolju. Pištolji za zavarivanje su zrakom hlađeni ili vodeno hlađeni. Zrakom hlađeni su

preporučljiviji jer ne zahtjevaju dobavu vode, ali vodom hlađeni su kompaktniji, lakši i zahtijevaju manje održavanja. Vodom hlađeni pištolji obično imaju više nazivne struje zavarivanja. Maksimalna struja zavarivanja koju pištolj podnosi doseže 600 A uz 100%-tnu intermitenciju.

Pištolji mogu imati ravne ili zakrivljene sapnice koje variraju od 40º do 60º; zakrivljene sapnice poboljšavaju fleksibilnost i lakoću manipulacije elektrodom. ***Slika 3.11.*** prikazuje sve dijelove opreme poluautomatskog FCAW postupka zavarivanja.



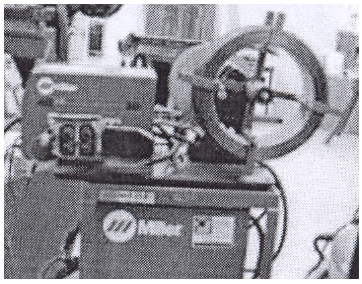
Slika 3.11. *Dijelovi poluautomatske opreme za FCAW zavarivanje. [2]*

Pojedine FCAW-S elektrode zahtjevaju određeni minimum dužine slobodnog kraja da bi razvile potrebnu zaštitu. Zavarivački pištolji za takve elektrode obično imaju cijevi za vođenje sa izoliranim nastavkom da podupru elektrodu i osiguraju minimalnu dužinu slobodnog kraja žice. [2]

3.5. AUTOMATSKA OPREMA ZA FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA

Kod automatskog procesa istosmjerni izvor struje treba imati 100%-tnu intermitenciju, dok nazivnu veličinu izvora struje određuje njegova primjena.

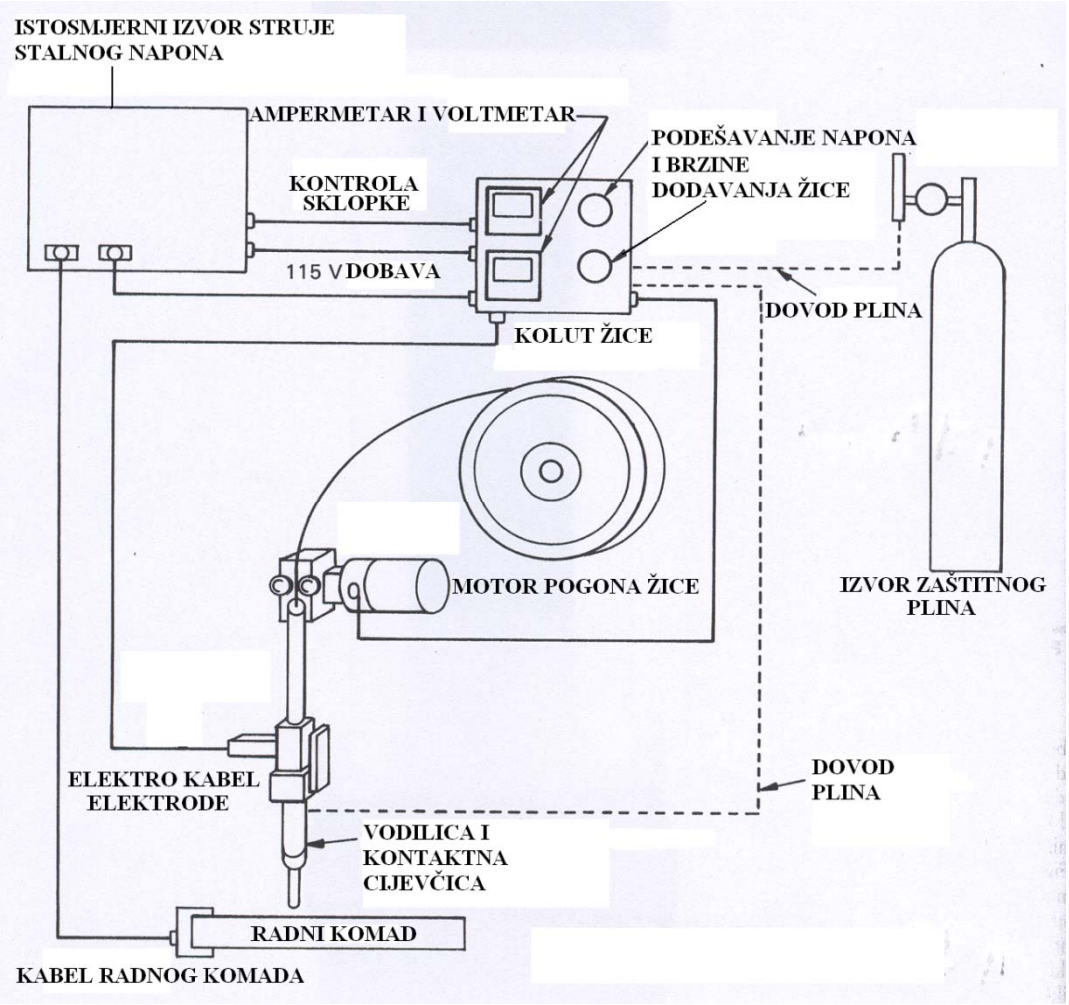
Za razliku od poluautomatske opreme automatska oprema zbog dugih elektroda, velikih brzina dodavanja žice i dugog perioda zavarivanja zahtijeva dodavače žica s visokokapacitetnim pogonskim motorima. Dodavač žice za FCAW postupak je prikazan na ***slici 3.12.***



Slika 3.12. *Uređaj za dodavanje žice. [1]*

Sapnica zaštitnog plina može biti postavljena sa strane ili aksijalno oko elektrode. Bočno štićenje plinom je povoljno u slučaju uskih i dubokih žljebova pripremljenog spoja, te smanjuje naslage od štrcanja na sapnici. Također, sapnice mogu biti hlađene vodom ili zrakom. Zrakom hlađene sapnice se koriste za struje zavarivanja do 600 A, a vodom hlađene iznad 600 A.

Ukoliko se nameće potreba za većom količinom rastaljenog metala FCAW-G postupak može se koristiti uz tandem metodu zavarivanja, a kod navarivanja velikih površina povećana proizvodnja može se ostvariti automatskom opremom s više žica. Takve instalacije mogu uključivati manipulator na traci koji podržava glavu za zavarivanje sa zasebnim dodavačem žica i linijski pogonjen okretni valjak, dodatni izvor energije, elektroničku kontrolu i sustav dobave elektroda. Svi dijelovi automatske opreme kod FCAW postupka su na ***slici 3.13.*** [2]



Slika 3.13. *Dijelovi automatske opreme za FCAW zavarivanje. [2]*

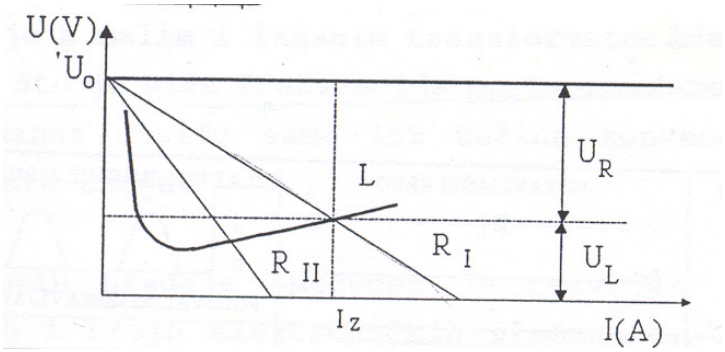
3.6. IZVORI STRUJE ZAVARIVANJA

Najčešća podjela je na izvore stalne veličine struje i stalne veličine napona. Elektrolučno zavarivanje karakterizira napon ovisan o duljini luka, dok je struja ovisna o dozvoljenom unosu topline.

Izvori stalne veličine struje često se koriste kod ručnog zavarivanja TIG-om, jer održavaju približno istu struju pri variranju napona koji je teško održavati stalnim (ruka zavarivača nije idealno mirna).

Izvori stalnog napona, na ***slici 3.14.*** je dijagramski shema rada uz U = konst., dopuštaju variranje struje i koriste se za automatizirane postupke zavarivanja MIG/MAG-om, FCAW-om, EPP-om. Kod ovih postupaka duljina luka je stalna, a svaka promjena duljine električnog luka ispravlja se velikom promjenom veličine struje zavarivanja (ako se žica i osnovni metal

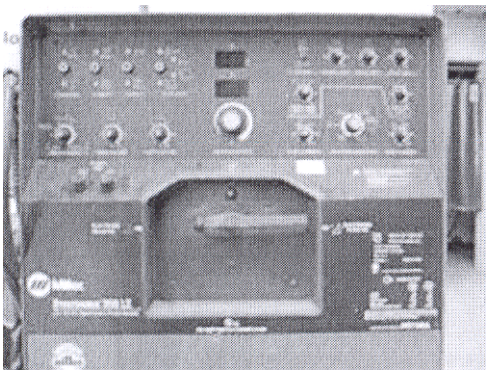
približe, struja se poveća, kao i toplina vrška žice koja se tali i tako se vrh žice vraća u početni položaj).



Slika 3.14. *Dijagramska shema rada izvora struje uz U = konst. [9]*

Vrsta i polaritet struje zavarivanja imaju važnu ulogu pri zavarivanju; taljive žice MIG/MAG postupka obično koriste istosmjernu struju. Zato promjena polarizacije žice utječe na svojstva zavara; ukoliko je žica pozitivnog polariteta – anoda (+), imati će veću koncentraciju topline, žica se brže tali i ima veću penetraciju, a daje i veću brzinu zavarivanja. Žica negativnog polariteta – katoda (-) dati će pliće zavare.

Netaljive elektrode, kao kod TIG postupka, mogu koristiti izmjeničnu, istosmjernu struju pozitivnog polariteta ili istosmjernu struju negativnog polariteta. Uz istosmjernu struju, netaljive elektrode, samo stvaraju električni luk, ali ne služe kao dodatni materijal. Elektrode koje koriste istosmjernu struju pozitivnog polariteta daju plitak zavar, dok elektrode sa istosmjernom strujom negativnog polariteta imaju veću dubinu penetracije. Izmjenična struja daje kombinaciju dva prehodna slučaja. Nedostatak izmjenične struje je to što se električni luk svaki put ponovno uspostavlja pri prolaska kroz nulu. Ovo je riješeno pomoću specijalnih izvora pravokutnih valova umjesto uobičajenih sinusnih, te se tako eliminira niskonaponsko vrijeme poslije prolaza nule. Upravljačka ploča modernih izvora struje zavarivanja sadrži brojne mogućnosti podešavanja parametara, ***slika 3.15.*** [2]



Slika 3.15. *Prikaz upravljačke ploče na izvoru struje zavarivanja. [1]*

3.7. ODVOĐENJE PARA POMOĆU SUSTAVA VENTILACIJE

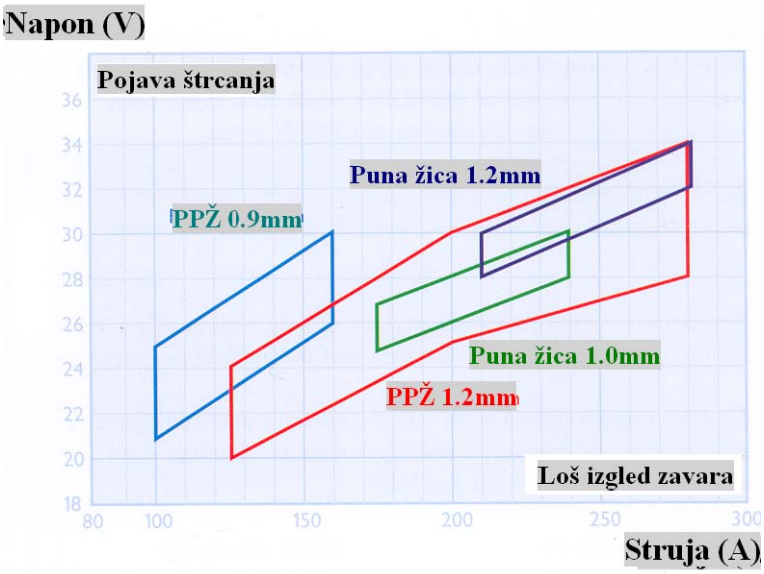
Zbog sigurnosti i zdravlja kontrolira se zagađenje zraka. Postoji nekoliko pištolja za zavarivanje sa ugrađenim sustavom odvođenja para.

Sustav odvođenja para čini usisna sapnica koja okružuje sapnicu pištolja, a postavljena je na dovoljnoj udaljenosti od vrha pištolja da bi se mogle uvući nastale pare bez poremećaja toka zaštitnog plina. Sapnica odvodi pare do filter sustava i ispušne pumpe. Glavna prednost je ujedno i nedostatak; sustav odvođenja para je u neposrednoj blizini izvora para, gdje god se pištolj koristi, ali zahtjeva prebacivanje glave za odvođenje para pri svakoj značajnijoj promjeni lokacije zavarivanja.

Slijedeći nedostatak sustava odvođenja para je povećanje težine i brojnosti opreme, tako da poluautomatsko zavarivanje postaje teže za zavarivača. Ukoliko se odvod para propisno ne postavi i održava, mogu nastati problemi vezani uz kvalitetu plinske zaštite. Kod dobro ventiliranih zavarivačkih prostora, kombinacija pištolj-odvod nekada nije potrebna. [8]

4. ZAHTJEVI PRIPREME NA POSTUPAK ZAVARIVANJA

4.1. VAŽNI PARAMETRI DODATNOG MATERIJALA PRI FCAW POSTUPKU ZAVARIVANJA



Slika 4.1. *Raspon parametara za vrstu i promjer žice. [4]*

Raspon radnih parametara za razne vrste i promjere žice vidi se iz ***slike 4.1.*** Čine ih slijedeći elementi:

- brzina žice,
- napon luka,
- duljina slobodnog kraja žice,
- brzina zavarivanja,
- nagib elektrode,
- vrsta žice,
- sastav zaštitnog plina. [2]

4.1.1. STRUJA ZAVARIVANJA

Struja zavarivanja je proporcionalna brzini žice za određeni promjer elektrode. Također ovisi o kemijskom sastavu i slobodnom kraju žice. Ako se ostali parametri drže stalnima promjena struje zavarivanja ima sljedeće učinke:

- povećanje struje povećava količinu nataljenog metala,
- povećanje struje povećava penetraciju,
- pretjerana struja stvara ispupčeni prijelaz zavara, lošeg izgleda,
- nedovoljna struja daje prijenos u velikim kapima i pretjerano štrcanje,
- nedovoljna struja dovodi do pretjeranog otapanja dušika i poroznosti metala zavara kod samozaštitnih elektroda.

Kako se struja zavarivanja povećava/smanjuje promjenom brzine žice, izlazni napon izvora struje se mijenja kako bi se zadržao optimalan odnos napona luka i struje. Uz određenu brzinu žice, struja zavarivanja varira, ovisno o slobodnom kraju žice (kako se on povećava, struja pada i obrnuto). [2]

4.1.2. NAPON ELEKTRIČNOG LUKA

Napon luka je usko povezan sa duljinom luka; napon na uređaju zavarivačkog izvora struje je zbroj padova napona kroz zavarivački krug. To uključuje pad napona kroz zavarivački kabel, slobodni kraj žice, električni luk, radni komad i kabel radnog komada.

Napon luka FCAW žice može utjecati na izgled, čvrstoću i svojstva zavara. Preveliki napon luka (predugi luk) može uzrokovati pretjerano štrcanje, širok i nepravilan oblik prolaza zavara. Premali napon luka (prekratki luk) daje uski izbočeni prijelaz uz štrcanje i malu penetraciju.

Kod samozaštitnih žica preveliki napon luka utječe na pretjeranu topivost vodika u zavaru. Kod elektroda za niskougljični čelik može doći do poroznosti, a kod elektroda za nehrđajući čelik smanjuje se postotak delta ferita metala zavara i to može prouzročiti tople pukotine. [2]

4.1.3. SLOBODNI KRAJ ŽICE

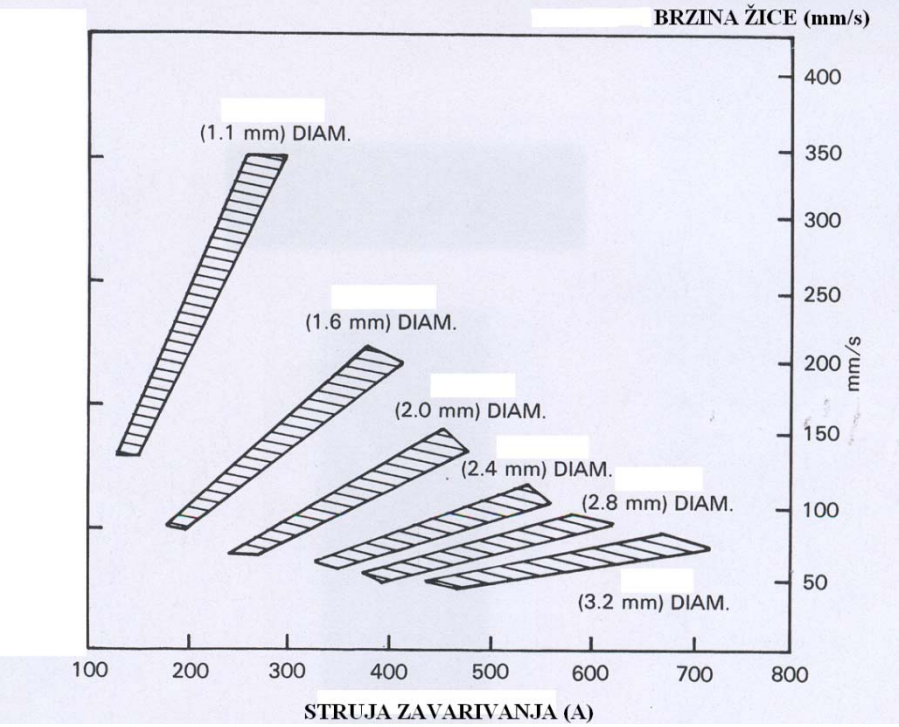
Slobodni kraj žice se grije toplinom uslijed otpora koji je proporcionalan njegovoj duljini. Temperatura elektrode utječe na energiju luka, količinu nataljenog metala i penetraciju,

također utječe na čvrstoću zavara i stabilnost luka. Predugi slobodni kraj daje nestabilan luk uz štrcanje, a prekratki kraj daje veliki luk.

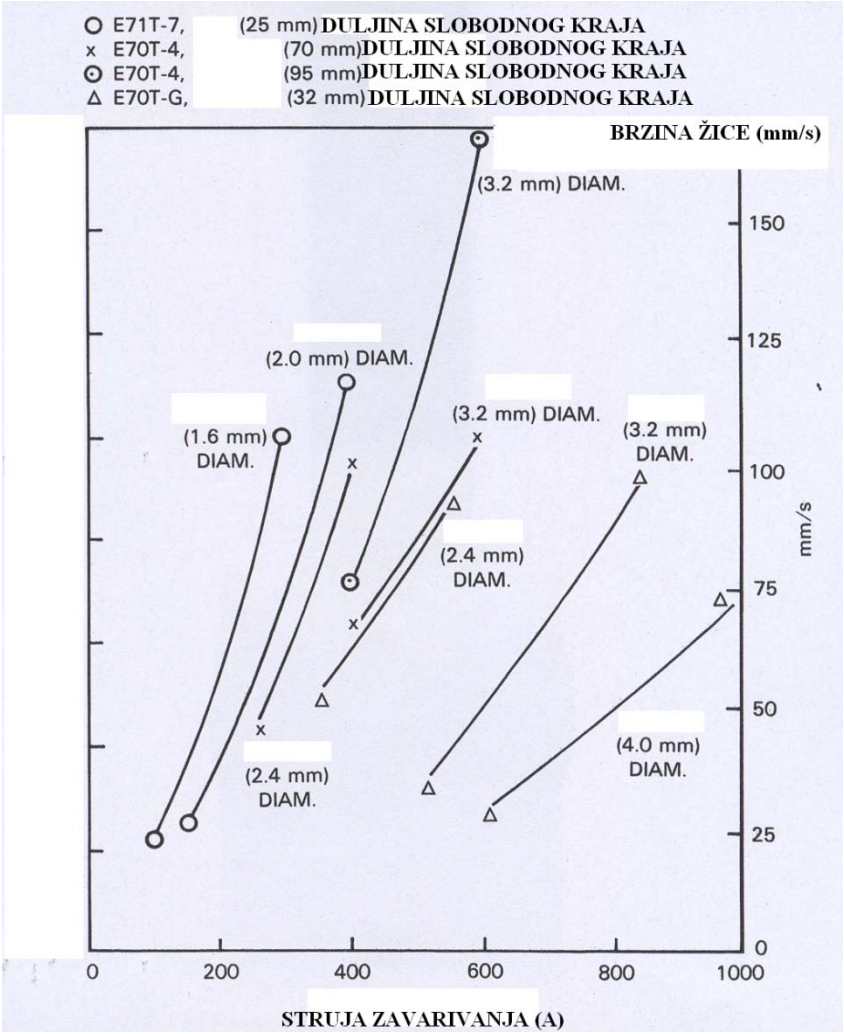
Kod plinom štićenih žica dolazi do prevelikog štrcanja koje ostaje na sapnici i ometa protok plina, a slaba plinska zaštita može uzrokovati poroznost i oksidaciju metala zavara. Većina proizvođača preporuča slobodni kraj duljine 19-38 mm kod FCAW-G postupka i 19-95 mm kod FCAW-S postupka, ovisno o primjeni. [2]

4.1.4. BRZINA ZAVARIVANJA

Brzina zavarivanja utječe na penetraciju i oblik poprečnog presjeka zavara. Penetracija pri malim brzinama je veća i obrnuto. Niske brzine zavarivanja uz visoku struju mogu pregrijati metal zavara i dati grub izgled uz mogućnost mehaničkog zarobljavanja troske ili procurivanja kroz osnovni metal. Visoke brzine zavarivanja teže nepropisno zavarenom i naljepljenom prolazu. Ovisnost brzine žice o struji zavarivanja kod FCAW-G i FCAW-S postupka je grafički prikazana ***slikama 4.2. i 4.3.*** [2]



Slika 4.2. *Ovisnost brzine žice o struji zavarivanja kod FCAW-G postupka zavarivanja. [2]*

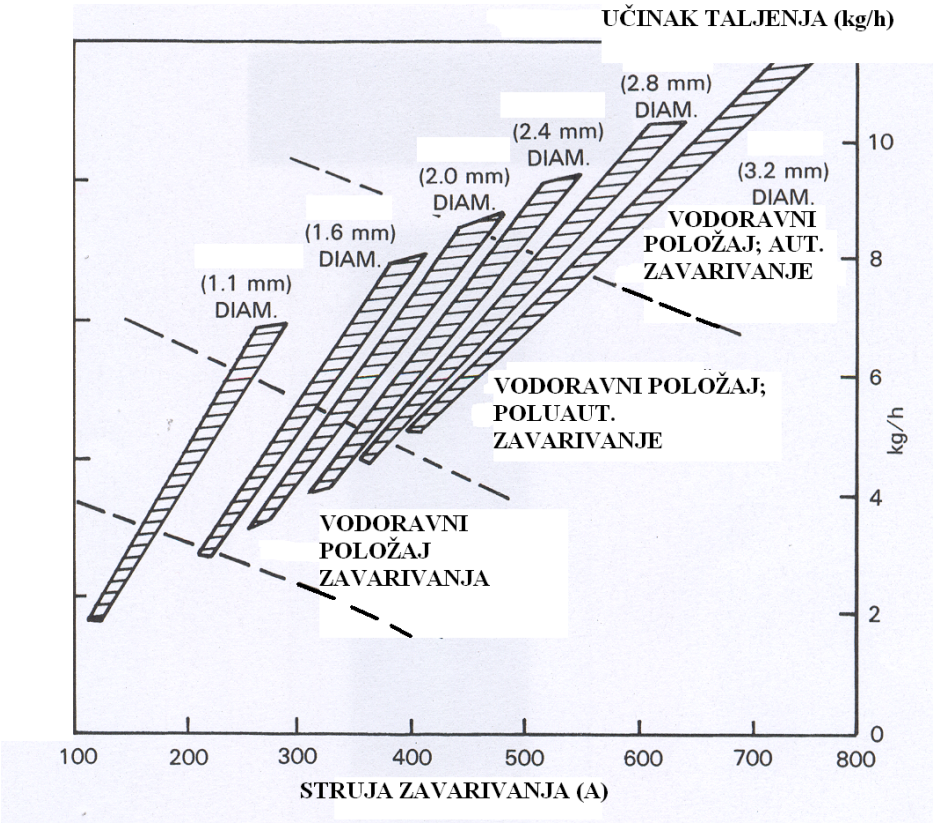


Slika 4.3. *Ovisnost brzine žice o duljini slobodnog kraja i struji zavarivanja kod FCAW-S postupka zavarivanja. [2]*

4.1.5. PROTOK ZAŠTITNOG PLINA ILI MJEŠAVINE

Kod FCAW-G postupka žica predstavlja varijablu koja utječe na kvalitetu zavara; nepravilan protok daje slabu zaštitu taline, poroznost i oksidaciju, dok previše plina može izazvati turbulencije i miješanje sa zrakom, a učinak na kvalitetu zavara je isti kao kod nepropisnog protoka. Bilo koji ekstrem povećava nečistoće u metalu zavara. Pravilan protok ovisi o vrsti i promjeru sapnice pištolja, udaljenosti sapnice od radnog komada i strujanju zraka u području zavarivanja. [2]

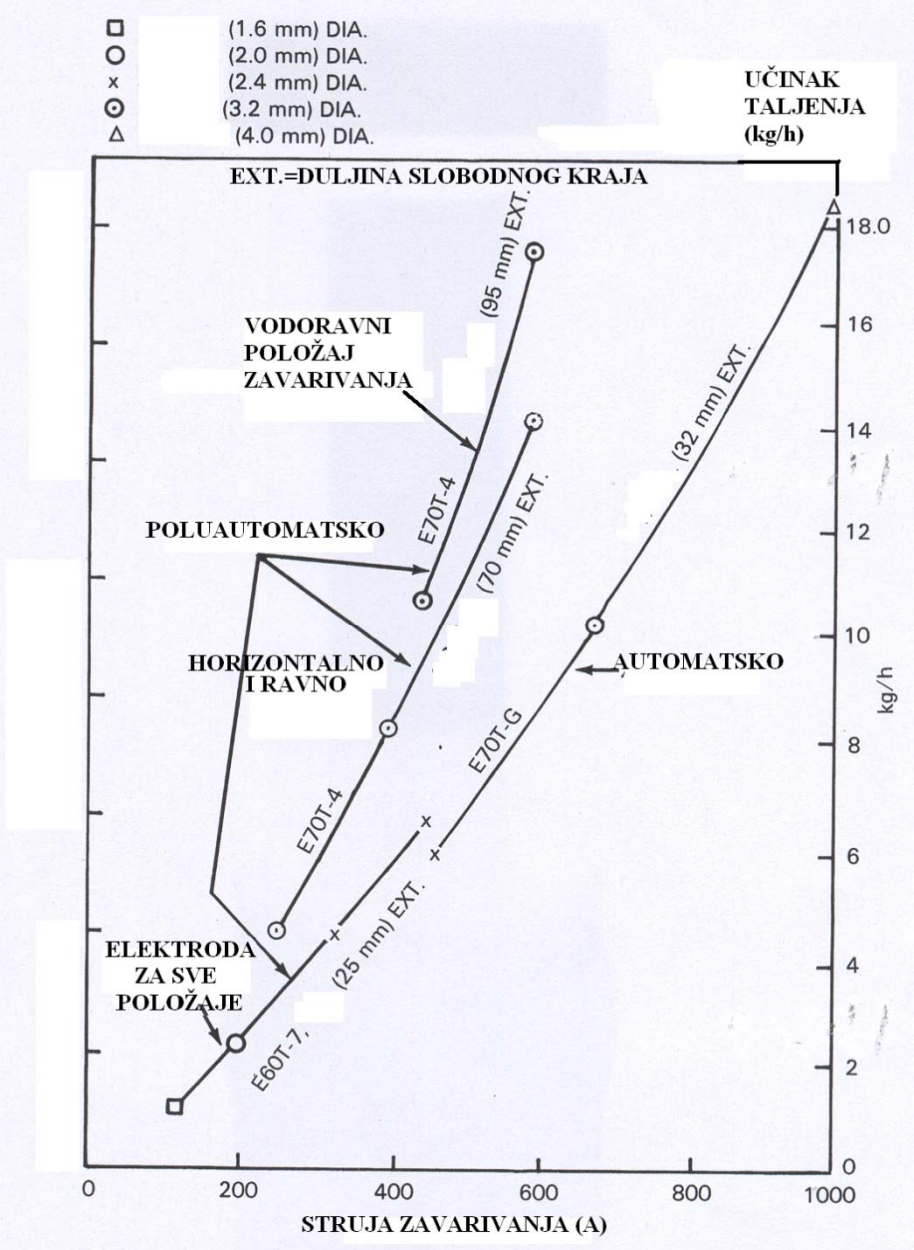
4.1.6. KOLIČINA NATALJENOG METALA I KOEFICIJENT ISKORIŠTENJA



Slika 4.4. *Ovisnost struje zavarivanja o učinku taljenja kod FCAW-G postupka zavarivanja. [2]*

Učinak taljenja kod zavarivanja je težina metala nataložena u jedinici vremena, a ovisi o zavarivačkim varijablama kao što su promjer i kemijski sastav elektrode, duljina slobodnog kraja žice i struja zavarivanja. ***Slike 4.4. i 4.5.*** prikazuju ovisnost struje zavarivanja o veličini učinka taljenja kod FCAW-G i FCAW-S postupka.

Koeficijent korisnosti iznosi 80-90% za FCAW-G postupak i 78-87% za FCAW-S postupak, a predstavlja omjer mase nataljenog metala i mase potrošene žice. [2]



Slika 4.5. *Ovisnost struje zavarivanja o učinku taljenja kod FCAW-S postupka zavarivanja. [2]*

4.1.7. NAGIB ELEKTRODE

Kut pod kojim se elektroda drži pri zavarivanju određuje smjer u kojem sile električnog luka djeluju na talinu zavara. Kada su parametri zavarivanja pravilno podešeni za određenu primjenu, sila električnog luka može biti iskorištena za suprotstavljanje učinku gravitacije. Kod REL i FCAW postupka sila električnog luka koristi se za oblikovanje željenog prolaza zavara i za spriječavanje zarobljavanja troske u metalu zavara.

Pri zavarivanju u vodoravnom položaju gravitacija prisiljava talinu da se giba ispred zavara; kako bi se to spriječilo elektroda se drži pod kutom tako da vrh elektrode bude usmjeren unatrag prema zavaru, suprotno smjeru zavarivanja. Ovaj kut se zove kut povlačenja i mjeri se od vertikalne osi zavara.

Propisani kut povlačenja ovisi o FCAW postupku, poprečnom presjeku osnovnog metala i položaju zavarivanja. Kod FCAW-S postupka on je sličan kao i kod REL-a; kod vodoravnih položaja iznosi 20º-45º. Veći je kod tanjih metala, a s porastom debljine pada kako bi se povećala penetracija. Kod vertikalnog zavarivanja prema gore kut je 5º-10º.

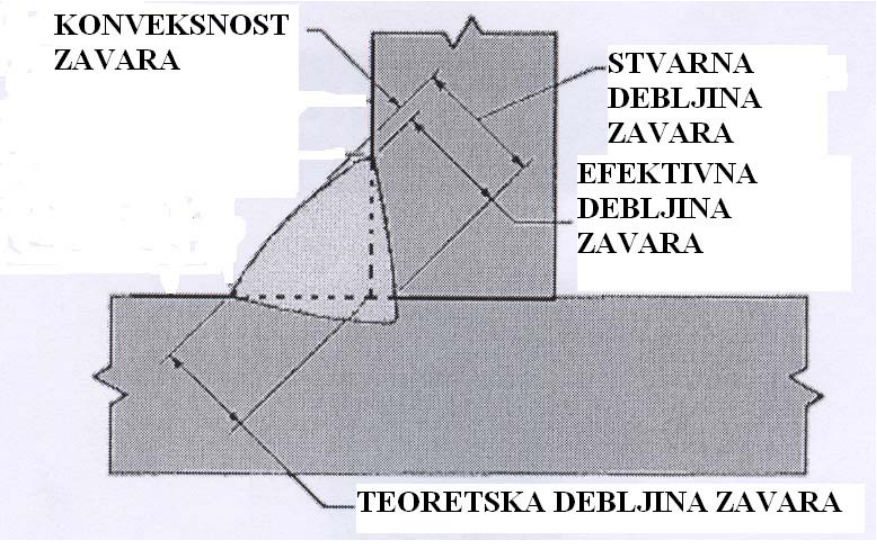
FCAW-G postupak ima male kutove od 2º-15º, maksimalno 25º; ako je kut prevelik gubi se učinak zaštitnog plina.

Pri kutnim zavarima u vodoravnom položaju, talina zavara teži širenju u oba smjera. Da bi se supriječilo širenje postrance, elektroda treba biti usmjerena prema donjoj ploči blizu kuta spoja. Uz kut povlačenja, elektroda treba imati radni kut od 40º-50º od vertikale.

Za vertikalno zavarivanje prema gore može se koristiti mali vodeći kut elektrode. [2]

4.2. VAŽNI PARAMETRI OSNOVNOG METALA

4.2.1. KONSTRUKCIJA SPOJA I POSTUPAK ZAVARIVANJA



Slika 4.6. *Geometrija poprečnog presjeka zavara. [10]*

Kod FCAW-a konstrukcija spoja i proces zavarivanja ovise o postupku koji se koristi, ali obično sve osnovne spojeve možemo zavariti s obje vrste postupka. ***Slika 4.6.*** prikazuje geometriju spoja u poprečnom presjeku. Svi osnovni zavari REL-a mogu se zavariti FCAW-G ili FCAW-S postupkom; može biti razlike u dimenzijama.

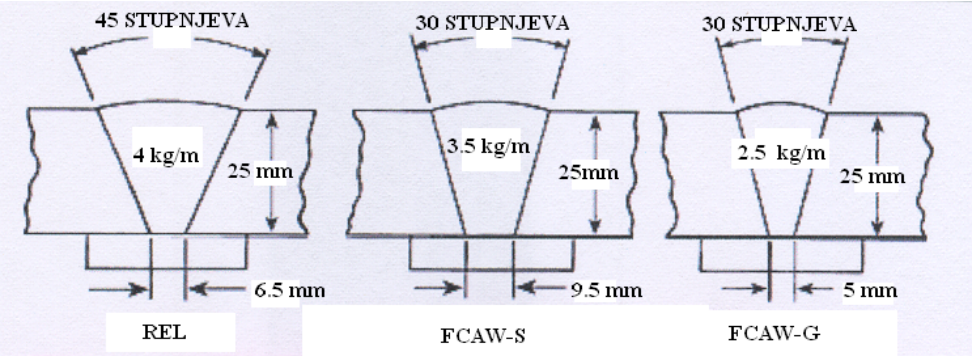
4.2.2. PRIPREMA RUBOVA I TOLERANCIJE PRIPREME SPOJA

Priprema rubova može se izvršiti rezanjem plinom, plazmom, air-arc razdvajanjem ili strojnom obradom, ovisno o osnovnom metalu i zahtjevanoj konstrukciji spoja. Najbolja radiografska kvaliteta dobiva se uklanjanjem nečistoća od rezanja, razdvajanja i svih strojnih maziva prije zavarivanja.

Tolerancije pripreme ovise o:

- ukupnoj toleranciji cijelog spoja,
- potrebnom nivou kvalitete spoja,
- vrsti postupka zavarivanja (FCAW-G, FCAW-S, poluautomatski ili automatski),
- debljini osnovnog metala,
- vrsti i dimenziji elektrode,
- položaju zavarivanja. [10]

Mehanizirani i automatski procesi zahtjevaju uske tolerancije pripreme spoja. Zavari koji se rade poluautomatskom opremom mogu podnijeti i šire tolerantno polje. ***Slika 4.7.*** prikazuje poprečni presjek pripreme spoja za zavarivanje uz razne postupke zavarivanja; vidi se da FCAW postupak zahtjeva manje nataljenog metala po jedinici duljine.



Slika 4.7. *Prikaz pripreme spoja kod različitih postupaka zavarivanja i ušteda u nataljenom metalu, a sve uz iste zahtjeve nosivosti zavara. [5]*

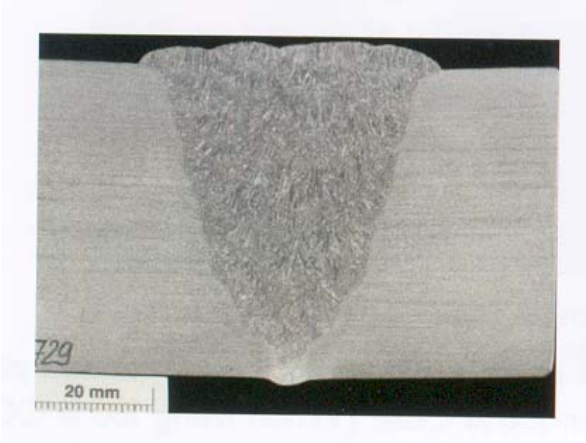
4.3. DODATNI ZAHTJEVI FCAW POSTUPKA

- radi dobivanja čvrste veze treba temeljito očistiti ili iščetkati površinu metala gdje se stavlja stezaljka; stezaljka treba biti čvrsto stegnuta da struja može lako „teći“ kroz radni komad i natrag do uređaja. Boja i hrđa su također izolatori, stoga ih treba skinuti; to je česta pogreška koja se previdi,
- aparat treba staviti na odvojeni prekidač kruga koji je propisno osiguran osiguračem,
- treba izbjegavati rupe gdje je god moguće kako bi se spriječili problemi propaljivanja, što je osobito važno kod tankog lima,
- kabel pištolja treba držati što je moguće ravnije za lagano dodavanje žice; ne smije se oštro savijati,
- osigurati da kontaktna cjevčica bude ispravna, dobrog izgleda (bez produljenja i taljenja vrha) i da je pričvršćena,
- žicu treba rezati pod kutem, da se pri startu usmjeri i lakše uspostavi električni luk,
- koristiti točnu duljinu slobodnog kraja žice i održavati je kao i pridržavati se propisane zavarivačke procedure,
- osigurati da pogonski valjčići lako vode žicu uz određenu napetost,
- opustiti se i držati pištolj mirno i lagano,
- proučiti i poštivati sve zavarivačke sigurnosne mjere; posebnu pozornost treba posvetiti mogućem električnom šoku, zrakama koje mogu opeći kožu i oči, požaru, eksploziji i odgovarajućoj ventilaciji. [5]

4.4. ZAHTJEVI KVALITETE ZAVARA

Kvaliteta zavara ovisna je o vrsti FCAW žice koja se koristi, vrsti postupka, stanju osnovnog metala, konstrukciji zavarenog spoja i zavarivačkim uvjetima. Treba posebno paziti na svaki faktor kako bi se dobio kvalitetan zavar uz poželjna mehanička svojstva.
Svojstva udarne radnje loma kod zavara od niskougljičnog čelika ovise o metodi zavarivanja. Neke samozaštitne elektrode su visoko dezoksidirajuće i kao takve mogu dati metal zavara niske tvrdoće. Zavari dobiveni uz FCAW-G i FCAW-S postupak ispituju se metodom Charpy-jevog bata uz „V“ urez kojim se određuju svojstva udarne radnje loma. Svojstva tvrdoće se trebaju uzeti u obzir prije odabira postupka i žice.

Neke FCAW žice od niskougljičnog čelika toleriraju određeni postotak nečistoća i hrđe na osnovnom metalu, ali tada treba očekivati pad kvalitete zavara, jer se zavaruje nečist materijal. Kada se ove elektrode koriste za višeslojno zavarivanje, može doći do pojave pukotina u metalu zavara zbog nakupljanja dezoksidirajućih elemenata. Zavarivanje u više slojeva i prolaza prikazan je ***slikom 4.8.***



Slika 4.8. *Makroizbrusak zavara izvedenog FCAW postupkom. [4]*

Kvalitetni zavari pomoću PPŽ od niskougljičnog ili niskolegiranog čelika mogu se dobiti uz poštivanje nekoliko konstrukcijskih propisa. Posebna pažnja mora se posvetiti svim faktorima koji utječu na kvalitetu zavara. Uz manje stroge zahtjeve mogu se postići veće brzine i veće jačine struje zavarivanja. [4]

5. PRIMJENA FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA

FCAW se preporuča za materijale poprečnog presjeka većeg od 1.6 mm; najbolji je za veće poprečne presjeke zavarene jednim prolazom, osobito ako se zavaruje na otvorenom.

Ako aparat za zavarivanje FCAW postupkom uz napon od 115 V koristi PPŽ Ø0.9 mm komercijalnog naziva Lincoln Innershield NR-211-MP koja može zavariti čelik poprečnog presjeka do 6.4 mm; to je zavar dva puta većeg presjeka od čelika zavarenog MIG aparatom uz napon od 115 V.

Uz odgovarajuću PPŽ i aparat, kao npr. PPŽ od Ø1.14 mm Lincoln Innershield NR-211-MP i aparat nazivnog napon od 230 V može se zavariti čelik do 12.7 mm debljine; žica Lincoln Innershield NR-211-MP zahtjeva istosmjernu struju uz negativan polaritet žice.

Upotreba raznih vrsta žica ovisi o dostupnosti, mehaničkim svojstvima zavarenih spojeva i o vrsti i pripremi spoja. FCAW-S metoda obično se koristi umjesto REL-a, a FCAW-G metoda umjesto MIG/MAG-a.

Veća proizvodnost FCAW postupka obično znači niže troškove po masi nataljenog metala kod spojeva koji dopuštaju neprekidno zavarivanje i lak pristup pištolja i opreme. Odlikuje se prednošću većeg učinka taljenja, veće brzine zavarivanja i veće mase nataljenog metala.

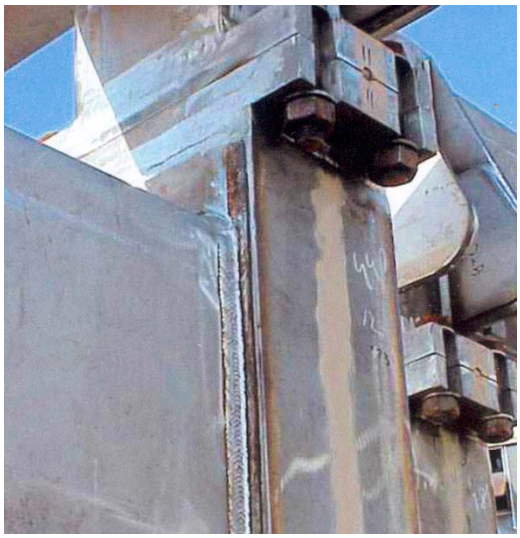
FCAW je našao široku primjenu kod prerade u radionicama, održavanju i terenskom radu na konstrukcijama, a koristi se i za zavare prema ASME propisima za kotlove i tlačne posude. Elektrode nehrđajućeg čelika kod FCAW-G ili FCAW-S metode koriste se u zavarivanju općenito, pri spajanju različitih metala, te kod održavanja i popravaka.

Glavni nedostatak prema REL-u su veći troškovi i relativna složenost opreme pri podešavanju i kontroli postupka zavarivanja, te ograničena operativna udaljenost dodavača žice. Također, može doći do stvaranja velikog volumena zavarivačkih para koje, osim kod otvorenog/terenskog rada zahtijevaju ventilacijsku opremu. Uspoređujući sa MIG/MAG-om kod kojeg nema pojave troske, skidanje troske sa prolaza zahtjeva dodatne troškove rada, osobito kod korijenskog prolaza zavara. [11]

5.1. PRAKTIČNI PRIMJERI FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA

FCAW postupak zavarivanja je fleksibilan, lako se uči i upotrebljava. Odličan je za hobi i stručnu primjenu kod konstrukcijskih zavara. Vrlo je efikasan proces u svim uvjetima rada i okoline.

5.1.1. FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA - SAVJETI SA TERENA



Slika 5.1. *Primjer zavarivanja raznorodnih metala FCAW-om. [4]*

Zavarivanje nosivih konstrukcija od raznorodnih metala moguće je uz FCAW postupak, prikaz na ***slici 5.1.*** Zavarivanje dimenzijski velikih spremnika REL postupkom je previše dugotrajan proces i zahtijeva previše ponovnih uspostavljanja električnog luka pri zavarivanju, što povećava mogućnost greške. Uz zavarivanje FCAW postupkom zavarivač sjedi u košari na jednoj strani spremnika, dok drugi zavaruje suprotnu stranu, što stvara istu količinu topline na obje strane i sprečava nepravilnosti. Dobiva se kvalitetan, jednolik zavar, uz mali gubitak vremena.

5.1.2. FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA U ZATVORENOM PROSTORU

Primjena FCAW postupka unutar zatvorenog prostora je pogodna za hobi zavarivanje (zavarivanje malih kućanskih aparata, umjetnina,...); aparati su danas povoljni i dostupni.

Za 500 $ se može dobiti potpuni MIG/MAG/FCAW aparat koji se može priključiti na običnu strujnu mrežu, uz neke dodatne osigurače. Važno je poštivati sve sigurnosne mjere, da se ne izazove požar. FCAW ima široku mogućnost upotrebe, a mogu ga upotrebljavati profesionalci i hobisti. [8]

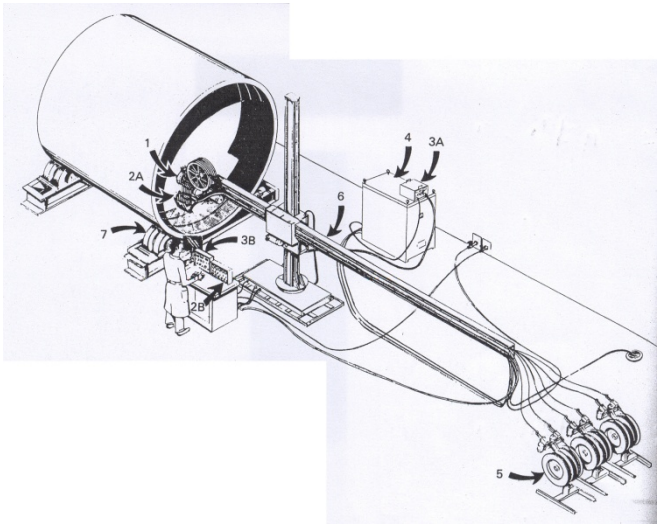
Primjer zavarivanja u zatvorenom prostoru je zavarivanje cijevnog razvodnika od dupleks čelika, kao na ***slici 5.2.***

Slika 5.2. *Zavarivanje konstrukcije od dupleks čelika debljine 30-40 mm. [4]*

5.1.3. PRAKTIČNI PRIMJER DVOSTRUKOG DODAVAČA PPŽ

Ako to zahtjeva postupak, može se koristiti i dvostruki dodavač sa dva koluta žice, dva cjevovoda zaštitnog plina i dva pištolja. Dvostruki dodavač može zavarivati sa žicama od Ø1.13 mm i Ø1.6 mm u svim položajima.

Više elektrodni sustav za navarivanje unutarnje površine cijevi je opisan na ***slici 5.3.***



Slika 5.3. *Više elektrodni sustav za navarivanje. [2]*

Dijelovi sustava: 1) dodavač žice i sklop oscilatora, 2A) sklop kontaktne cijevi, 2B) pneumatska kontrolna ploča, 3A) elektronički kontrolni sustav, 3B) elektronička operativna stanica, 4) izvor struje zavarivanja, 5) pomoćni sustav za upravljanje elektrodom, 6) manipulator glave zavarivanja, 7) valjkasti okretači radnog komada

Postoji i četverostruki dodavač žice za povećanu proizvodnost, a danas imamo i sustave dvostruke kontrole napetosti žice koji omogućavaju fino podešavanje pritiska na elektrodi, neovisno o vrsti elektrode.
Napredne tehnologije danas omogućavaju da dvostruki dodavači žica imaju digitalne mjerače duljine koji omogućavaju precizan odabir zavarivačkih parametara.
Većina dodavača žice ima dvostruki raspored programa koji omogućava prebacivanje između dva prisutna parametra zavarivanja, npr. prebacivanje iz parametara sa visokim unosom topline u parametre sa niskim unosom topline pri zavarivanju. Neki dvostruki modeli imaju i četiri zavarivačka programa po kolutu žice. [2]

5.1.3.1. DVOSTRUKI DODAVAČ PPŽ U RADU

Konstruiranje vlaka u zabavnom parku zahtijevalo je nekoliko mjeseci planiranja i izvođenja zavara pune penetracije. Kako se radilo o većim poprečnim presjecima puna penetracija zavara zahtijevala je skošenje rubova i zavarivanje korijena sa MIG/MAG-om uz kratke spojeve i mali unos topline. FCAW postupak bi propalio spoj, tako je nakon korijenskog

zavara FCAW korišten za popunu. Da se izbaci neproduktivno vrijeme pripreme u slučaju jedne žice, korišten je dvostruki dodavač žice. Kako se zavarivalo materijale različitih poprečnih presjeka, dva različita postupka omogućila su da se koristi jedan aparat za sve poprečne presjeke i spojeve.

Postojale su još samo dvije mogućnosti:

- imati zavarivača za MIG/MAG zavarivanje i poslije njega drugog zavarivača za FCAW zavarivanje,
- imati zavarivača za MIG/MAG koji nakon zavarenog spoja mijenja žicu, sapnicu pištolja, kolut žice, zaštitni plin i napokon ponovo sve zavario FCAW-om.

Prva mogućnost znači proizvodnost ovisnu o brzini zavarivača, dok druga mogućnost zahtjeva 15-20 minuta za izmjenu opreme. Mišljenje je da sustavi sa jednom žicom kompromitiraju kvalitetu, jer su operateri skloni varanju da uštede vrijeme i tako rade kratke FCAW zavare umjesto MIG/MAG zavara i obrnuto. [2]

5.2. POVEĆANA PROIZVODNOST UZ FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA

FCAW-G je poznat po velikom depozitu pri zavarivanju u prinudnim položajima, ali kao i uvijek, industrija se opire promjenama i ima povjerenje u sadašnju FCAW opremu i postupke. Takvo razmišljanje smanjuje konkurentnost i proizvodnost. Povećanje proizvodnje i kvalitete je moguće čak i uz smanjenje troškova, ali samo uz upotrebu novih vrsta žica, dodavača žice, izvora struje i zavarivačkih postupaka. ***Tablica 3.*** daje prikaz raznih vrsta FCAW elektroda i njihovih promjera kao i njihovu veličinu taloženja u vodoravnom položaju zavarivanja.

Elektroda	Položaj	Promjer	Napon/Struja	Taloženje
E71T-1	Vodoravno	1.15mm	27V/250A	4.5 kg/h
E71T-1	Vodoravno	1.32mm	28V/300A	4.8 kg/h
E71T-1	Vodoravno	1.6mm	29V/350A	6 kg/h
E70T-1	Vodoravno	2.0mm	29V/400A	6.5 kg/h
E70T-1	Vodoravno	2.4mm	31V/450A	7.6 kg/h

Tablica 5.1. *Prikaz učinka taljenja pojedinih elektroda proizvođača Lincoln Electric. [12]*

FCAW postupak kombinacijom slijedećih svojstava postiže prednosti u procesu zavarivanja:

- proizvodnost zavarivanja kontinuiranom elektrodom,

- metalurške prednosti dobivene upotrebom praška,
- troska oblikuje i podržava zavar.

Jednostavan primjer načina povećanja proizvodnje je provjeriti promjer i vrstu žice, npr. većina proizvođača zavaruje 12.7 mm ploču sa žicom Ø1.13 mm jer su tako uvijek radili ili je tako preporučeno, ali ako se zavaruje sa žicom Ø1.6 mm ili žicom Ø2.4 mm u vodoravnom položaju, povećava se nataljivanje i brzina zavarivanja, bez propaljivanja materijala.

Vrsta elektrode također utječe na proizvodnost; PPŽ E71T-1 je popularna zbog svoje primjene kod prinudnih položaja zavarivanja, ali to ne znači da je najbolja za vodoravne položaje zavarivanja, tako da je PPŽ E70T-1 napravljena posebno za vodoravne položaje zavarivanja i tada je najproduktivnija. [3]

5.3. PRAKTIČNI PRIMJERI UPOTREBA PPŽ

Praškom punjena žica ima optimizirana svojstva koja ne može postići puna žica; ona je bolja i brža kod okomitih položaja zavarivanja prema gore, vodoravnog zavarivanja, zavarivanja galvaniziranih čelika ili teško zavarljivih čelika.

Dodavanje raznih materijala u jezgru žice omogućava poboljšanja svojstava zavara. Željezni prah povećava veličinu depozita, legirni prašak stvara niskougljični depozit za poboljšanje mehaničkih svojstava, dok elementi oksidacije i prašci rafiniraju metal zavara.

Kod poluautomatskog zavarivanja u prinudnim položajima žica E71T-1 omogućava najbolja svojstva zavara, brzoskrućujuća rutilna troska omogućava visok učinak taljenja pri okomitom položaju zavarivanja prema gore (do ~3.5 kg/h), te daje vrlo jednolik električni luk uz minimalno prskanje, čak i uz 100% CO_2 kao zaštitni plin.

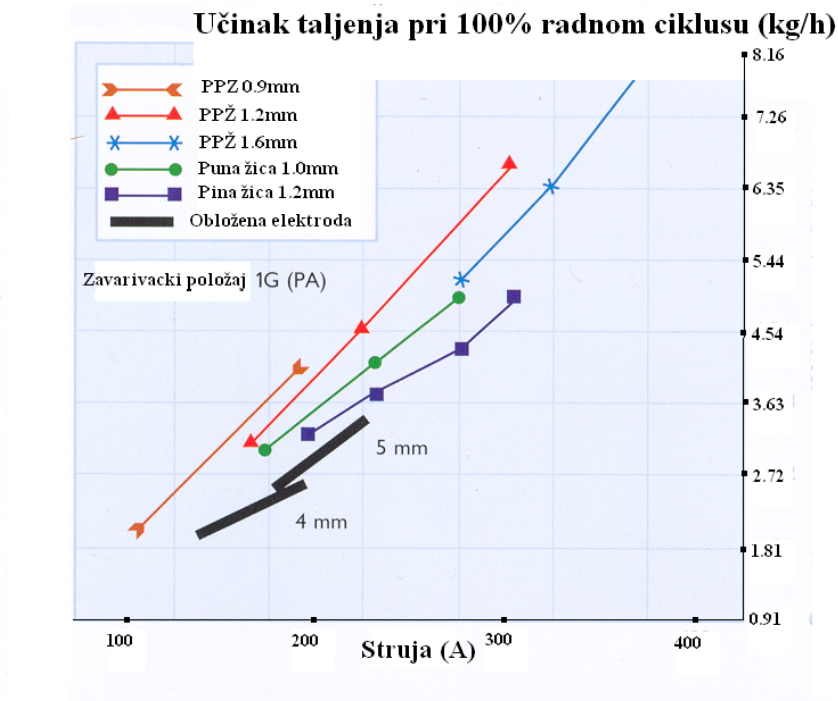
Praškom punjena žica Lincoln Electric E71T-1 i zaštitna mješavina Ar/CO_2 omogućavaju „miran“ električni luk i najbolja svojstva u prinudnim položajima. Ova kombinacija PPŽ i zaštitne mješavine se koristi kao prvi izbor pri zavarivanju u brodogradnji..

Poluautomatsko zavarivanje u vodoravnom položaju najbrže spaja čelične ploče velikog poprečnog presjeka. Ova vrsta zavarivanja najbolje se ostvaruje uz PPŽ Lincoln Electric E70T-4 koja daje najveći učinak taljenja (do ~20 kg/h) u vodoravnom položaju, a koristi se za čelične ploče velikog poprečnog presjeka koje ne zahtjevaju svojstva udarne radnje loma Charpy-jevim batom.

Najveći učinak taljenja od plinom zaštićenih PPŽ ostvaruje Lincoln Electric E70T-1 (uspoređujući je sa E70T-4 daje manji učinak taljenja od oko 15 kg/h), ali ima mirniji luk i

bolja svojstva udarne radnje loma. Svejedno ima veći depozit od MIG/MAG-a, nije osjetljiva na nečistoću osnovnog materijala i koristi jeftiniji 100% CO_2 zaštitni plin. Često se koristi u radionicama za čelične konstrukcije.

Zavarivanje prevučenih i galvaniziranih čeličnih ploča koristi samozaštitnu Lincoln Electric E71T-14 PPŽ. Rezultat je visokokvalitetni zavar uz veliku brzinu zavarivanja, a koristi se u auto industriji za zavarivanje galvaniziranih čelika. Ovisnost učinka taljenja o struji zavarivanja i vrsti žice prikazano je na ***slici 5.4.***



Slika 5.4. *Učinak taljenja pojedinih vrsta žica. [7]*

Plinom štićena PPŽ Lincoln Electric E70T-5 se koristi kao najbrži način zavarivanja teško zavarljivih čelika, nudi odličnu otpornost na pukotine. Sustav troske ove PPŽ otklanja fosfor i sumpor (elementi koji uzrokuju pukotine, poroznost i nisku čvrstoću zavara)iz metala zavara. Ova elektroda ima odlična svojstva udarne radnje loma-Charpy-jevim batom i najniži nivo difuzije vodika od svih PPŽ, te time djeluje na otpornost spram zakašnjelih vodikovih pukotina.

Ukratko, najvažnija svojstva najčešćih PPŽ proizvođača Lincoln Electric-a:

- E71T-1 FCAW-G - najveći učinak taljenja u prinudnim položajima zavarivanja,
- E71T-8 FCAW-S - najveći učinak taljenja u prinudnim položajima zavarivanja bez zaštitnog plina,

- E70T-4 FCAW-S - najveći učinak taljenja u vodoravnom položaju zavarivanja,
- E70T-1 FCAW-G - najveći učinak taljenja u vodoravnom položaju zavarivanja uz propisana svojstva udarne radnje loma,
- E71T-14 FCAW-S - najveća brzina zavarivanja za galvanizirane i prevučene čelike,
- E70T-5 FCAW-G - najveća brzina zavarivanja teško zavarljivih čelika. [3]

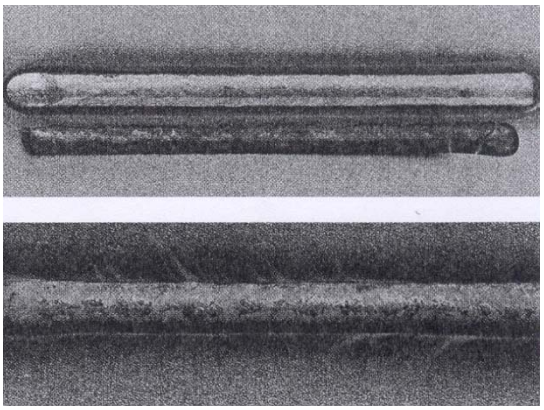
6. PROBLEMI I NEPRAVILNOSTI PRI ZAVARIVANJU FCAW POSTUPKOM

6.1. SIGURNOSNO-ZDRAVSTVENI PROBLEMI

Zavarivanje je opasno i nezdravo bez pravih protumjera, ali uz nove tehnologije i zaštitu rizik se može smanjiti. Rizik opeklina ipak postoji, zbog otvorenog električnog luka ili plamena.
Da bi se spriječile opekline, zbog izloženosti toplini, plamenu i parama koristi se zaštitna zavarivačka oprema (teške kožne rukavice, jakne dugih rukava).
Svjetloća zavara dovodi do problema oka gdje UV-svjetlost uzrokuje upalu rožnice i opeklinu mrežnice oka. Naočale i kacige tamnih stakala sprečavaju izlaganje UV-svjetlu. Danas postoje i naočale senzibilne na UV-svjetlo.
Na mjesto zavarivanja se stavlja zastor radi mogućih promatrača/prolaznika; zastor je od polivinil-klorid plastičnog filma, te štiti okolinu od UV-zraka.
Zavarivači su često izloženi opasnim plinovima i česticama, pogotovo kod FCAW i REL postupka, tijekom kojeg nastaje dim sa česticama raznih oksida, koje utječu na toksičnost para. Obično svi postupci zavarivanja stvaraju CO_2, ozon i neke druge plinove, koji postaju opasni bez potrebne ventilacije.
Upotreba stlačenih plinova i plamena može uzrokovati eksploziju i požar, pa se ograničava postotak kisika u zraku, a zapaljive materijale drži se dalje od radnog mjesta.

6.2. KOROZIJSKI PROBLEMI

Zavar dobiven FCAW postupkom je otporniji na oksidaciju od zavara dobivenog MIG/MAG postupkom, ***slika 6.1.*** Visokočvrsti čelici, aluminijske i titan legure su podložne vodikovoj krhkosti, pa elektrode za zavarivanje koje sadrže vlagu treba sušiti.
Voda koja ispari uslijed topline električnog luka i oslobođeni vodik ulaze u rešetku materijala i uzrokuju krhkost. Elektrode za te materijale imaju specijalne prevlake s malim udjelom vodika, a dobavljaju se u zatvorenim paketima otpornim na vlagu; isto je i sa prašcima.



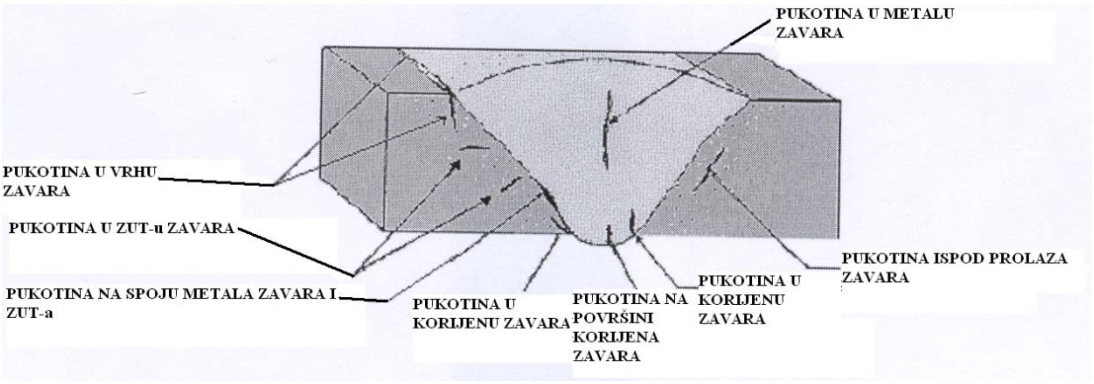
Slika 6.1. *Usporedba oksidacije zavara pri zavarivanju FCAW-om (gornji zavar) i MIG/MAG-om (donji zavar). [4]*

Austenitne legure nehrđajućeg čelika i legure na bazi nikla podložne su intergranularnoj koroziji. Pri temperaturi od 700ºC, uz dugi vremenski period, krom reagira sa ugljikom u metalu tvoreći krom-karbid, crpeći kristalne rubove kroma i slabeći korozijsku otpornost tijekom procesa sensitizacije (eng. sensitisation - stvaranje krom-karbida u ZUT-u ili metalu zavara). Takav čelik korodira u područjima blizu zavara. To se često zove propadanje zavara.
Korozija noža (eng. knife line attack - KLA) je još jedna vrsta korozije zavara koja zahvaća čelik percipitiran niobijem, koji se zajedno sa svojim karbidom raspada pri visokim temperaturama. Pri nekim režimima hlađenja niobij-karbid ne percipitira i čelik se ponaša kao nepercipitirani čelik koji stvara krom-karbid. To utječe na usko područje od nekoliko milimetara blizu zavara, što je teško zamjetiti, a povećava brzinu korozije.
Konstrukcije od čelika koje su zahvačene ovom korozijom zagrijavaju se u cijelosti da se krom-karbid raspadne, a stvori niobij-karbid. Nakon ovog procesa hlađenje nije potrebno.
Kada elektroda nije dobro odabrana zavar može postati osjetljiv na koroziju zbog vanjskih uvjeta. Također može doći do galvanske korozije ako je sastav elektrode različit od materijala za zavarivanje.
Korozija može biti velika čak i kod razlike u nivou legiranja istih nehrđajućih čelika na bazi nikla, unatoč tome što oni rijetko galvanski korodiraju kada su mehanički spajani. [4]

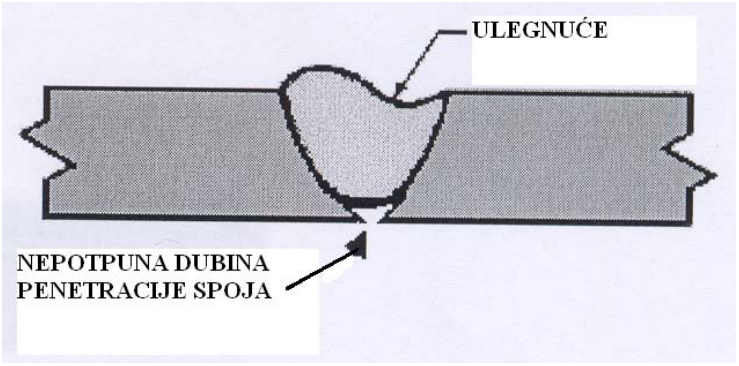
6.3. NEPRAVILNOSTI SPOJA ZAVARENOG FCAW POSTUPKOM

Zbog loše procedure ili izvedbe može doći do pojave nekoliko vrsta nepravilnosti; većina njih je bezazlena i ima jedino loš utjecaj na izgled zavara. Neke zavarivačke nepravilnosti i njihov

izgled u poprečnom presjeku (pukotine, ulegnuće i nepotpuna penetracija spoja) prikazuju ***slike 6.2. i 6.3.***



Slika 6.2. *Nepravilnosti pri zavarivanju (pukotine) i njihov izgled pri poprečnom presjeku zavara. [10]*



Slika 6.3. *Nepravilnosti pri zavarivanju (ulegnuće i nepotpuna penetracija spoja) i njihov izgled pri poprečnom presjeku zavara. [10]*

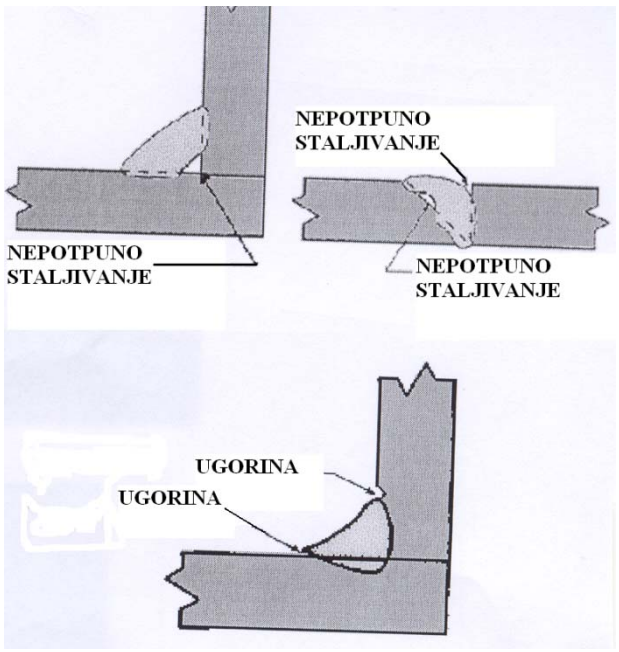
Procjena nepotpunosti ili norma procjenjuje da li je to nepravilnost ili prihvatljivo stanje.

A) Zavarivačke nepotpunosti:

- nepotpuno staljivanje – zavarivačka nepravilnost gdje se staljivanje nije javilo između metala zavara i lica staljivanja ili pri spajanju zavarivačkog prijelaza,
- ugorina - ulegnuće u osnovnom metalu pri vrhu ili korijenu zavara, stršanje metala zavara van vrha ili korijena zavara,
- nepotpuno ulegnuće – stanje pri kojem se lice zavara ili površina korijena prostire ispod granične površine osnovnog metala,

- nepotpuna penetracija – stanje spoja u korijenu zavara gdje metal zavara ne prelazi kroz cijeli poprečni presjek spoja, često se javlja kod nisko opterećenih konstrukcija,
- djelomična penetracija – djelomična penetracija bez nepravilnosti je prihvatljiva u nekim slučajevima, inžinjer treba odlučiti koja vrsta je zadovoljavajuća za određenu primjenu, kao i da li djelomična penetracija zadovoljava traženu punu penetraciju.

Ostale česte zavarivačke nepravilnosti i njihov izgled u poprečnom presjeku se vide iz ***slike 6.4.***



Slika 6.4. *Nepravilnosti pri zavarivanju (ugorina i nepotpuno staljivanje) i njihov izgled pri poprečnom presjeku zavara. [10]*

B) Postoji nekoliko različitih vrsta zavarivačkih pukotina: pukotina u metalu zavara, pukotina ispod prolaza zavara, pukotina u korijenu zavara, pukotina površini korijena zavara, pukotina na spoju metala zavara i ZUT-a, pukotina u ZUT-u, pukotina u vrhu zavara.
C) Zavarivačke nepravilnosti čine: estetski loš izgled zavara, poroznost, naljepljivanje, uključci troske, ugorine, pukotine. [10]

6.4. PROBLEMI, UZROCI I OTKLANJANJE NEPRAVILNOSTI KOD FCAW POSTUPKA ZAVARIVANJA

Najčešći problemi, uzroci i otklanjanje nepravilnosti kod FCAW postupka se vide iz ***tablice 4.***

PROBLEM	MOGUĆI UZROK	NAČINI ISPRAVLJANJA
Poroznost	Mali protok plina	Povećati protok plina, očistiti sapnicu od štrcanja
	Veliki protok plina	Smanjiti protok da se otkloni turbulencija
	Pretjerano strujanje	Štititi zonu zavarivanja od strujanja vjetra
	Onečišćen plin	Provjeriti izvor plina i eventualno curenje na spoju ili crijevu
	Onečišćen osnovni metal	Očistiti lice spoja zavara
	Onečišćen dodatni metal	Maknuti crtaću smjesu sa žice, očistiti ulje na valjčićima, izbjeći nečistoće u radioni, zagrijati dodatnu žicu
	Nedovoljno praška u jezgri	Promjeniti elektrodu
	Predugi slobodni kraj žice	Podesiti slobodni kraj žice, odrediti struju
	Prekratki slobodni kraj žice	Podesiti slobodni kraj žice, odrediti struju
	Prevelika brzina zavarivanja	Podesiti brzinu
Nepotpuno staljivanje ili penetracija	Nepropisno rukovanje	Usmjeriti elektrodu na korijen spoja
	Neprikladni parametri	Povećati struju, smanjiti brzinu zavarivanja, smanjiti slobodni kraj žice, smanjiti promjer žice
	Nepropisan oblik spoja	Povećati razmak korjena
Pukotine	Pretjerano zaostalo naprezanje spoja	Smanjiti zaostala naprezanja, predgrijavati, sačmariti/pjeskariti
	Neprikladna elektroda ili nedovoljno dezoksidanata ili nepotpuna smjesa praška u jezgri	Provjeriti sastav i sadržaj praška
Pogon žice	Pretjerano trošenje kontaktnog vrha	Smanjiti pritisak sa pogona valjčića
	Rastaljen ili zaglavljen kontaktni vrh	Smanjiti napon, prilagoditi kontrolu pretpaljenja, izmjeniti potrošenu vodilicu
	Prljava vodilica žice unutar kabela	Promjeniti vodilicu žice, očistiti je zrakom pod pritiskom

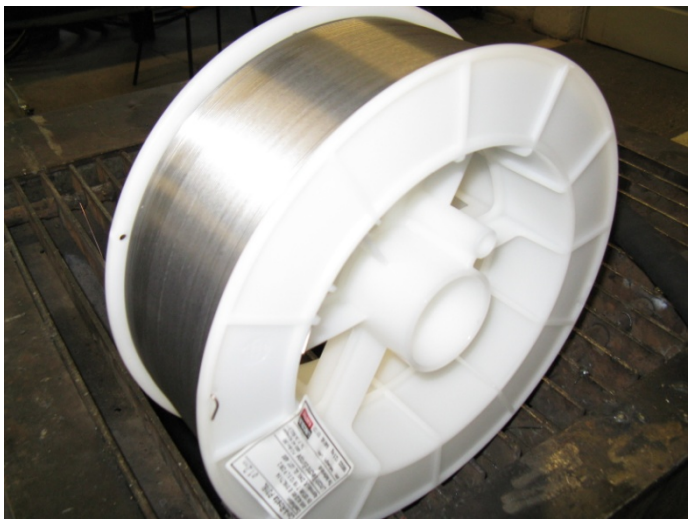
Tablica 6.1. *Problemi, uzroci i otklanjanje grešaka kod FCAW zavarivanja. [10]*

7. DIJELOVI POSTUPKA ZAVARIVANJA

Dijelovi procesa zavarivanja i navarivanja PPŽ i punih žica na niskougljični konstrukcijski i nehrđajući austenitni čelik:

- kolut pune CrNi žice (za MIG postupak) i praškom punjene žice (za FCAW postupak) proizvođača Lincoln Electric Cor-A-Rosta P316L,
- osnovni metal (čelične ploče) za zavarivanje proizvođača Avesta,
- izvor struje zavarivanja i dodavač žice proizvođača Fronius Trans Puls Synergic 3200,
- sustav automatskog pomicanja zavarivačkog pištolja proizvođača Bug-O Systems Bug-5100,
- sustav zaštitnog plina (protokomjer, manometar i plinska boca) proizvođač Messer Croatia Inoxmix X1 i Ferromix C18,
- keramičke podloge i ljepljiva aluminijska folija Jugokeramika,
- ostalo (maska za zavarivanje, zaštitna odjeća, čekić, turpije,uređaji za rezanje i pripremu čeličnih ploča, pomične mjerke, brusni papir).

Neki od dijelova procesa su prikazani sljedećim slikama, od ***slike 7.1. do slike 7.7.***

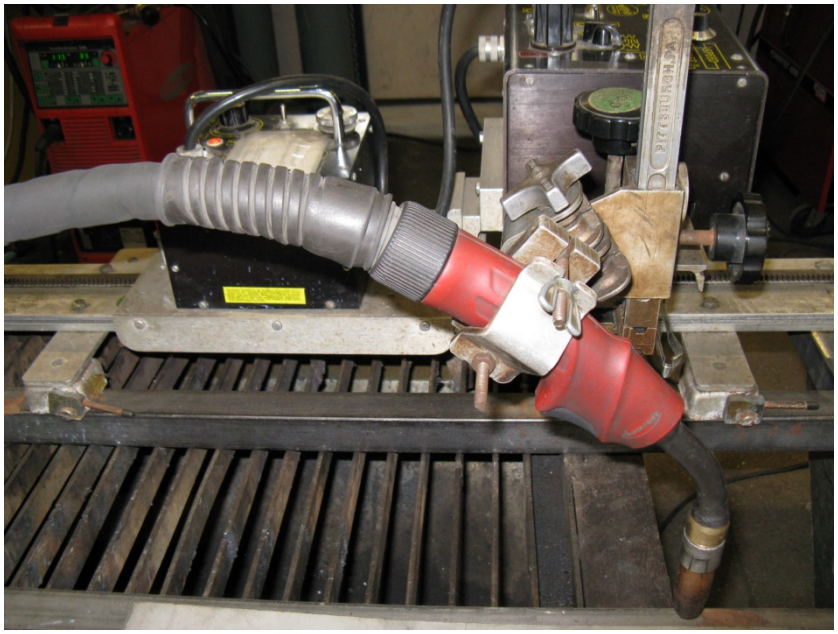


Slika 7.1. *Kolut austenitne nehrđajuće PPŽ Lincoln Electric Cor-A-Rosta P316L (ukupna masa koluta 12.5 kg).*

Slika 7.2. *Izvora struje za zavarivanje MIG/MAG/FCAW postupkom sa dodavačem žice Fronius Trans Puls Synergic 3200.*

Slika 7.3. *Kontrolna ploča uređaja za zavarivanje omogućava odabir i namještanje parametara zavarivanja.*

Slika 7.4. *Uređaj automatskog posmaka pri zavarivanju, model Bug-5100, proizvođača Bug-O Systems; omogućava odabir brzine zavarivanja i njezino mijenjanje pri samom zavarivanju, kao i dodatne mogućnosti pri zavarivanju npr. njihanje zavarivačkog pištolja, odabir smjera zavarivanja,...*



Slika 7.5. *Prihvat zavarivačkog pištolja na uređaju Bug-O Systems Bug-5100. Omogućava odabir i mijenjanje kutova postavljanja zavarivačkog pištolja, udaljenost sapnice od radnog komada,...*

Slika 7.6. *Manometar (lijevi indikator), protokomjer (desni indikator), regulator protoka (donji desni crni ventil) i ventil za otvaranje/zatvarenje plinske boce (gornji lijevi srebrni ventil) proizvođača Messer-Griesheim. Protok plina se određuje prema plinu koji ima veći udio u mješavini.*

Slika 7.7. *Pomična (gornja) i šablonska (donja) mjerka za kontrolu debljine kutnog zavara.*

7.1. MEHANIČKA SVOJSTVA I KEMIJSKI SASTAV OSNOVNOG I DODATNOG MATERIJALA ZA ZAVARIVANJE

Osnovni i dodatni materijal kod zavarivanja u ovom slučaju čine čelična ploča i žica za zavarivanje (puna i praškom punjena žica). Iz ***tablica 7.1. i 7.2.*** su vidljiva bitna svojstva i sastav čelične ploče i PPŽ.

ČELIK **DIN/EN/ASTM-AISI/UNS 1.4301/X5CrNi18-10/304/S30400 (ploča debljine 10 mm)** – proizvođač Avesta							
Pri zavarivanju ovog austenitnog čelika valja obratiti pažnju na unos topline pri zavarivanju i mogućnost nastanka toplih pukotina, treba omogućiti pojavu ferita u depozitu.							
KEMIJSKI SASTAV (% TEŽINE U UKUPNOM METALU)							
Cr	Ni	Mn	N	S	C	Si	P
18-20%	8-12%	max. 2%	max. 0.10%	max. 0.03%	max. 0.08%	max. 0.75%	max. 0.045%
MEHANIČKA, FIZIKALNA I PROCESNA SVOJSTVA							
Tvrdoća po Rockwell B metodi	82 HRB						
Vlačna čvrstoća	621 MPa						
Konvencionalna granica razvlačenja (0.2%)	290 MPa						
Istezljivost	55%						
Modul elastičnosti pri vlaku	193 GPa						
Modul elastičnosti pri uvijanju	78 GPa						
Gustoća	8.03 g/cm3						
Temperatura taljenja	1399-1454ºC						

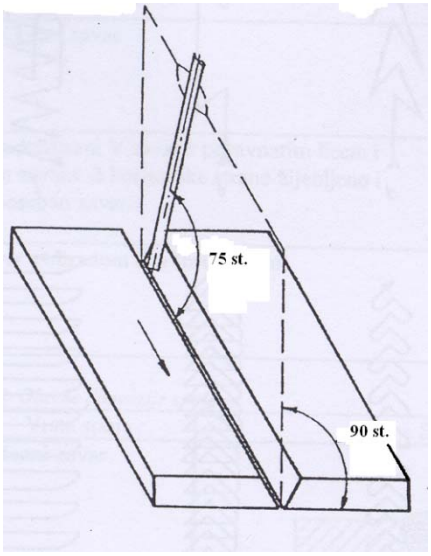
Tablica 7.1. *Prikaz mehaničkih svojstava i kemijskog sastava čelika EN X5CrNi18-10. [13]*

DODATNI MATERIJAL (FCAW ŽICA) COR-A-ROSTA P316L Ø1.2 mm					
Nehrđajuća rutilna praškom punjena žica za prinudne položaje zavarivanja uz stabilan luk, malo štrcanja i trosku koja se lako skida, te sjajan izgled metala zavara.					
Mogući položaji zavarivanja (ISO)			PA, PB, PC, PF, PE		
Vrsta i polaritet struje			Istosmjerna, pozitivnog polariteta (DC+)		
Zaštitni plin			Ar + 5-25%CO2 ili 100%CO2 (15-25 l/min)		
KEMIJSKI SASTAV METALA ZAVARA (% TEŽINE U UKUPNOM METALU ZAVARA) uz zadane zaštitne plinove					
C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0.03%	1.3%	0.6%	18.3%	12.5%	2.8%
MEHANIČKA SVOJSTVA METALA ZAVARA uz zadane zaštitne plinove					
Mehaničko svojstvo			Minimalna vrijednost		Postignuta vrijednost
Dopuštena granica razvlačenja (N/mm2)			320		415
Vlačna čvrstoća (N/mm2)			510		560
Istezljivost (%)			25		41
Udarna radnja loma ISO-V pri -20ºC (J)			/		45
RASPON STRUJE ZAVARIVANJA PREMA POLOŽAJU ZAVARIVANJA					
Položaj zavarivanja			Raspon struje		
PA			100-250 A		
PB			100-250 A		
PC			100-200 A		
PF			100-200 A		

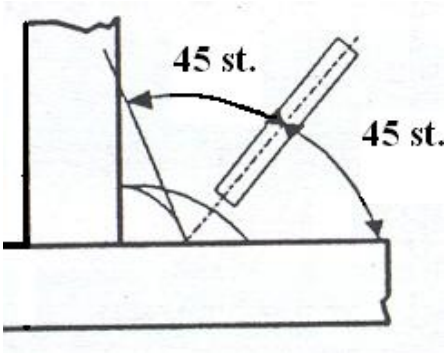
Tablica 7.2. *Prikaz mehaničkih svojstava i kemijskog sastava PPŽ za zavarivanje Lincoln Electric Cor-A-Rosta P316L Ø1.2 mm. [3]*

7.2. POSTUPAK I TEHNIKA ZAVARIVANJA

Korišteni su MIG i FCAW-G postupci zavarivanja čeličnih ploča u dva prolaza (korijen i popuna), dok je odabrana desna tehnika zavarivanja zbog manjeg unosa topline. Zavarivački pištolj pri navarivanju i zavarivanju sučeljenog V spoja je postavljen pod bočnim kutem od 90º u odnosu na osnovni material i nakošen za 15º u smjeru zavarivanja, a kod kutnog T spoja još je i bočno nagnut za 45°, kako pokazuju ***slike 7.8. i 7.9.*** Nakon svakog prolaza pri zavarivanju pristupa se četkanju (CrNi četka), kod FCAW-G postupka se prije četkanja skida pokrovni sloj troske.



Slika 7.8. *Kutevi pod kojima je postavljen zavarivački pištolj pri zavarivanju sučeljenog V spoja. [14]*



Slika 7.9. *Kut pod kojim je postavljen zavarivački pištolj pri zavarivanju kutnog T spoja. [14]*

7.3. PRIPREMA PLOČA I POKUSNI ZAVARI/NAVARI

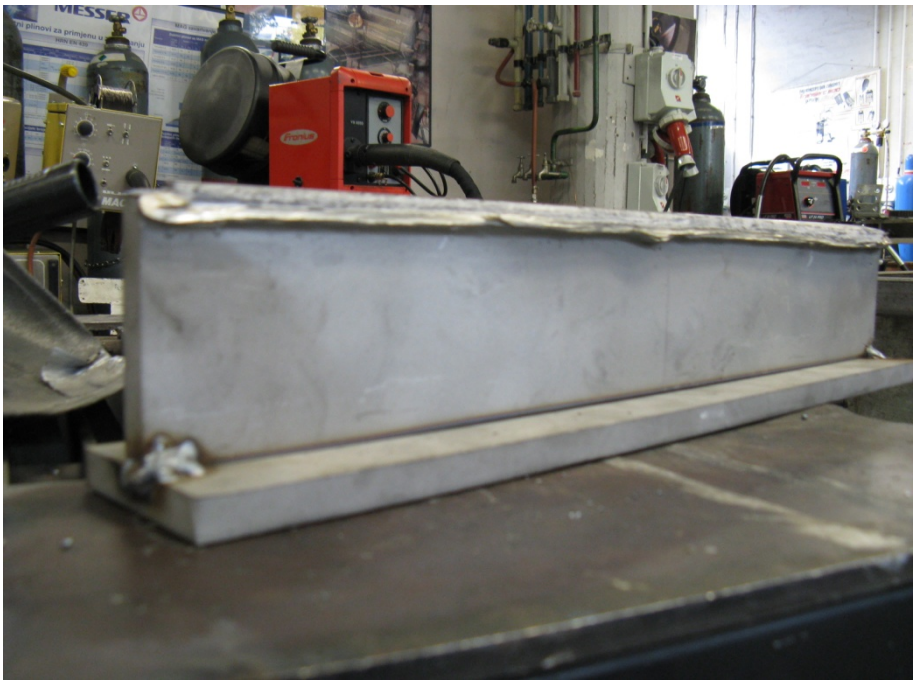
Kod pokusnih zavara i navara napravljeni su slijedeći uzorci:

- kutni zavar
- navarene gusjenice

Kutni zavar je T spoj dvije ploče postavljene pod kut od 90º i učvršćene na krajevima. Izveden je kao i svi ostali pokusni zavari na nehrđajućem čeliku desnom tehnikom uz bočni kut zavarivačkog pištolja od 45º naprema osnovnom materijalu i 15º nagiba sapnice zavarivačkog pištolja u smjeru zavarivanja. Osnovni metal pokusnih kutnih zavara je čelik 316Ti proizvođača Avesta i kemijskog sastava prema ***tablici 7.3.***, debljine 12 mm, a po jedan prolaz je zavaren FCAW i MIG postupkom sa svake strane kutnog spoja. Parametri zavarivanja kutnog zavara PPŽ i punom žicom su prikazani u ***tablicama 7.4.***, dok ***slike 7.10. i 7.11.*** prikazuju pripremljeni kutni T spoj pred samo zavarivanje i prvi zavar načinjen MIG postupkom.

ČELIK DIN/ASTM-AISI 1.4671/316Ti (ploča debljine 12 mm), proizvođač Avesta - Outo Kumpu						
KEMIJSKI SASTAV (% TEŽINE U UKUPNOM METALU)						
Cr	Ni	Mn	N	S	C	Si
16.8%	10.6%	max.1.49%	max.0.15%	max.0.002%	max.0.045%	max.0.44%
Mo	Ti	Nb	Cu	Co	B	P
2.02%	0.45%	0.006%	0.45%	0.12%	0.0003%	max.0.027%

Tablica 7.3. *Kemijski sastav osnovnog metala T spoja. [15]*



Slika 7.10. *Pripremljen i na krajevima učvršćen T spoj kutnog zavara čelika 316Ti (W.Nr. 1.4671).*

Slika 7.11. *T spoj kutnog zavara čelika 316Ti (W.Nr. 1.4671) zavaren MIG postupkom uz punu žicu.*

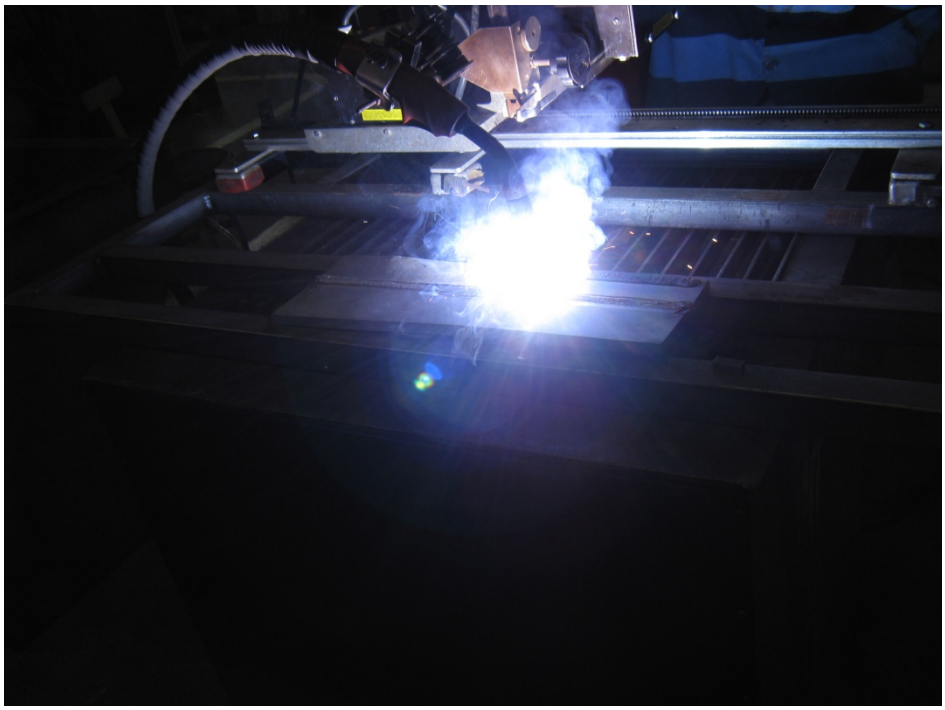
PARAMETRI ZAVARIVANJA	IZNOSI PARAMETARA ZAVARIVANJA	
	PPŽ	Puna žica
Struja zavarivanja	250 A	251 A
Napon zavarivanja	26,5 V	25 V
Debljina zavara koja bi trebala biti postignuta	6,3 mm	5,1 mm
Brzina dodavanja žice	12,2 m/min	8,2 m/min
Debljina ploče koja bi trebala biti zavarena	11,1 mm	6,0 mm
Brzina zavarivanja	31 cm/min	31 cm/min
Protok zaštitnog plina	18 l/min	18 l/min
Naziv i sastav plina	Messer Ferromix C18; 18% ugljika-dioksida, ostalo Argon	Messer Inoxmix X1; 1% kisika, ostalo Argon
Slobodni kraj žice	12-15 mm	12-15 mm
Udaljenost sapnice	12 mm	12 mm
Polaritet žice	DC+	DC+

Tablica 7.4. *Prikaz parametara i njihovih iznosa kod zavarivanja kutnog T spoja ovisno o vrsti žice.*

Navarene gusjenice na čeliku Č.0361, kemijskog sastava prikazanog u ***tablici 7.5.***, debljine 10 mm izvedene su uz struju zavarivanja od I_z = 180 A; 235 A, a dodatni materijal čine PPŽ i puna žica. Redoslijed i izgled navara gusjenica vidi se na ***slikama od 7.12. do 7.18.***, a parametri zavarivanja, dobivena širina navara i visina nadvišenja mogu se iščitati iz ***tablice 7.6.***

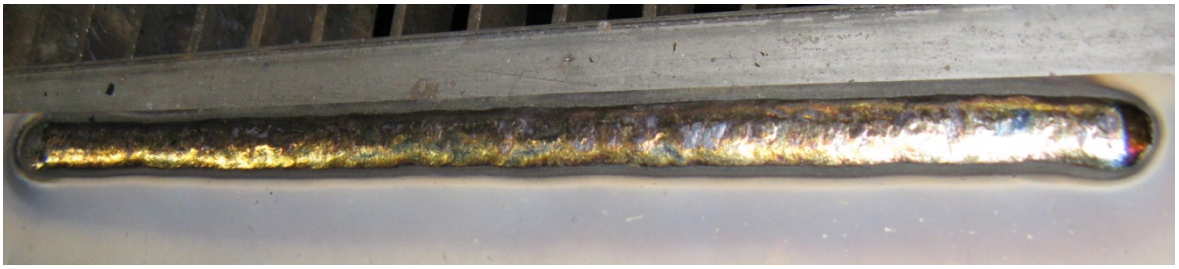
KONSTRUKCIJSKI ČELIK Č.0361			
KEMIJSKI SASTAV			
C	Mn	P	S
0.17%	1.4%	≤0.045%	≤0.045%

Tablica 7.5. *Kemijski sastav osnovnog materijala (ploče) na koju se navaruju gusjenice.*



Slika 7.12. *Automatski proces navarivanja gusjenica PPŽ i punom žicom na čeličnu ploču konstrukcijskog čelika Č.0361.*

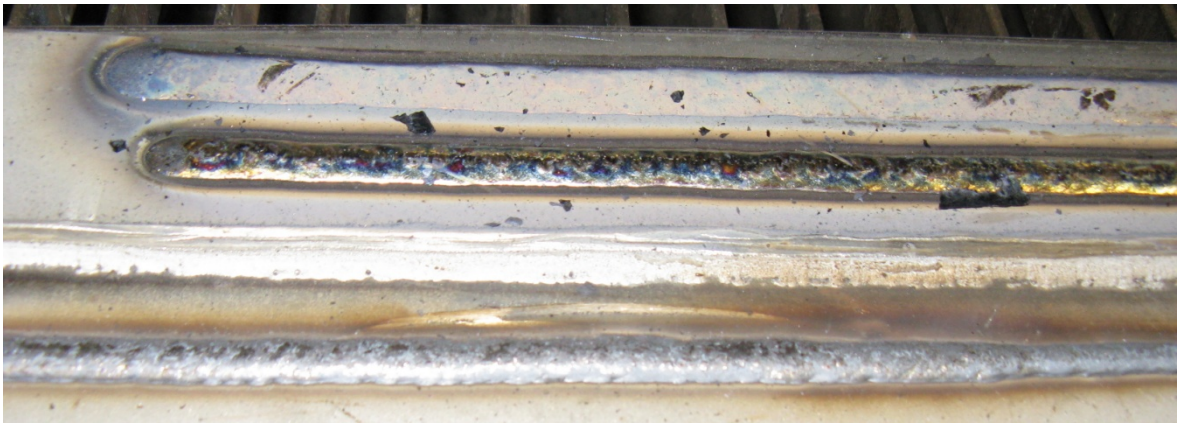
Slika 7.13. *Navarena gusjenica PPŽ na sebi ima lako skidajuću trosku koja će se odstraniti (I_z = 235 A).*



Slika 7.14*. Izgled navarene gusjenice PPŽ nakon skidanja troske (I_z = 235 A).*

Slika 7.15. *Izgled navarene gusjenice PPŽ sa troskom, donja gusjenica (I_z = 180 A).*

Slika 7.16. *Izgled navarene gusjenice PPŽ nakon skidanja troske, donja gusjenica (I_z = 180 A).*



Slika 7.17. *Izgled navarene gusjenice pune žice, najdonja gusjenica (I_z = 180 A).*

Slika 7.18. *Izgled navarenih gusjenica, najdonja gusjenica je navarena uz punu žicu (I_z = 235 A).*

PARAMETRI ZAVARIVANJA	IZNOSI PARAMETARA ZAVARIVANJA	
	PPŽ	Puna žica
Struja zavarivanja	235 A	235 A
Širina navara (b)	15,3 mm	12,2 mm
Visina nadvišenja (h)	2,9 mm	2,8 mm
Protok zaštitnog plina	18 l/min	18 l/min
Naziv i sastav plina	Messer Ferromix C18; 18% ugljik-dioksida, ostalo Argon	Messer Inoxmix X1; 1% kisika, ostalo Argon
Slobodni kraj žice	12-15 mm	12-15 mm
Udaljenost sapnice	12 mm	12 mm
Polaritet žice	DC+	DC+

Tablica 7.6. *Prikaz radnih parametara pri navarivanju gusjenica.*

8. PRIPREMA I ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆEG ČELIKA SUČELJENIM V SPOJEM

8.1. UVOD

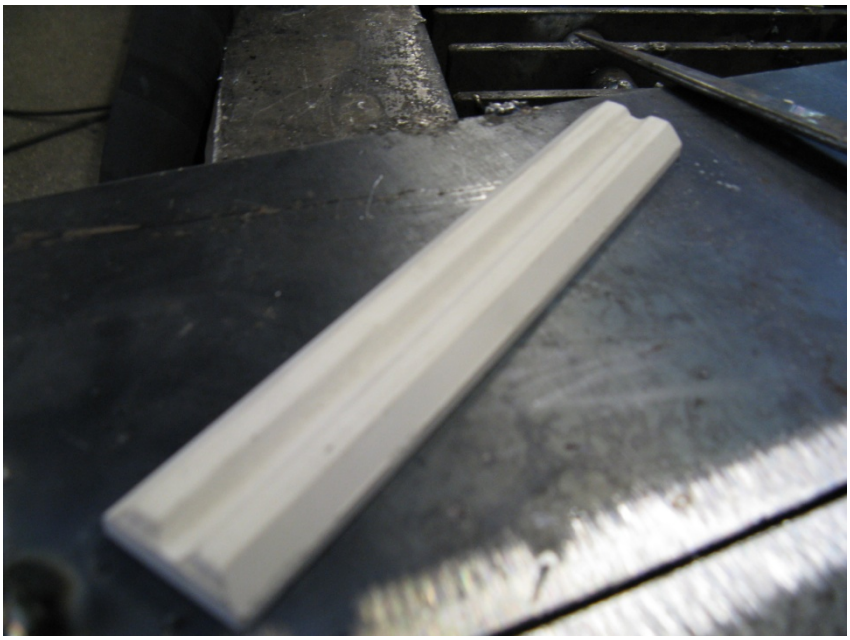
Zavarivanje čelika 304 kao osnovnog materijala uz PPŽ i FCAW-G postupak i punu žicu te MIG postupak i čelik 316 kao dodatni materijal u oba slučaja je izvedeno uz pripremu sučeljenog spoja prema normi EN 29692. Ploče koje se zavaruju su debljine 10 mm, a prema normi uz korištene postupke zavarivanja (FCAW-G i MIG) sučeljeni V spoj kuta 60° zahtjeva razmak u korjenu spoja od 1 do 3 mm kao što je i primijenjeno.

8.1.1. KERAMIČKE PODLOGE

Keramičke podloge pri zavarivanju najviše služe povećanju produktivnosti i pojednostavljenju procesa zavarivanja. Prednosti primjene keramičkih podloga:

- kvalitetan zavareni spoj bez žljebljenja korijenskog zavara,
- zavarivanje korijenskog zavara jačim strujama i većim brzinama zavarivanja,
- kvalitetan zavar neovisno o pripremi,
- lako skidanje podloge.

Primjena je vrlo široka; koristi se kod raznih metala, spojeva, položaja i postupaka zavarivanja, u radionicama i na terenu. ***Slika 8.1.*** prikazuje keramičku podlogu.



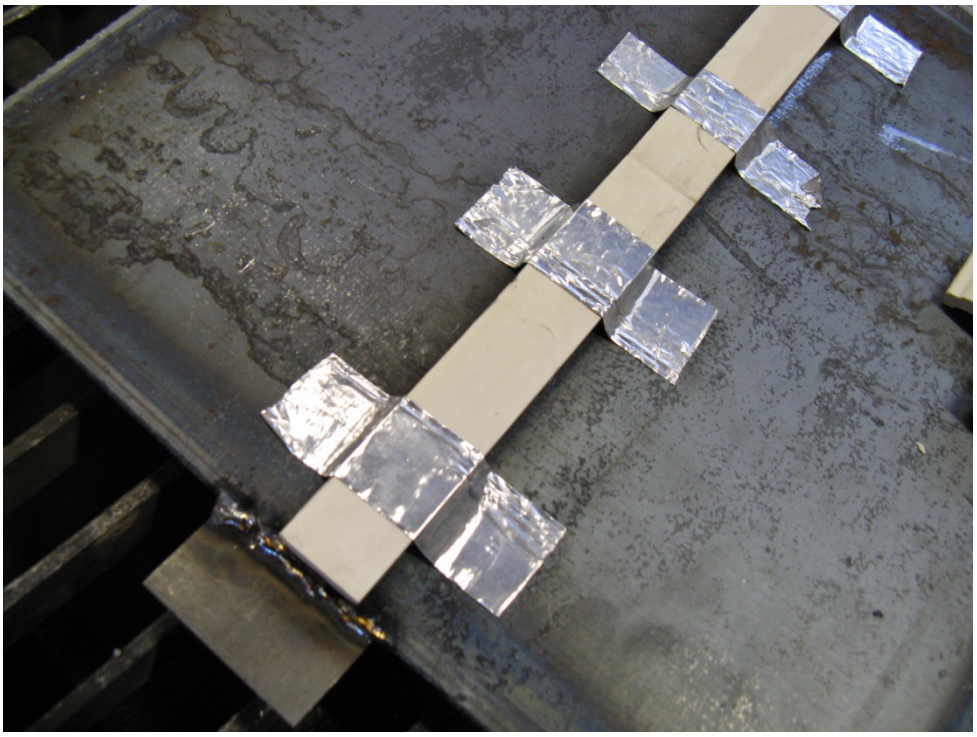
Slika 8.1. *Prikaz keramičke podloge kakva se koristila pri zavarivanju sučeljenih spojeva PPŽ i punom žicom uz nehrđajući čelik kao osnovni metal.*

8.2. ZAVARIVANJE NEHRĐAJUĆEG ČELIKA

Zavarivanje čelika 304 debljine 10 mm uz PPŽ FCAW-G postupkom i V žljeb kuta 60°, te razmaka u korijenu od 1 mm i korištenjem keramičke podloge. Spoj je pripremljen kao što pokazuju ***slike 8.2. i 8.3.*** Korištenje podloge nije dalo dobre rezultate, jer nije došlo do potpune penetracije zavara; troska PPŽ se zadržala u korijenu spoja. Parametri korišteni u ovom slučaju zavarivanja su prikazani ***tablicom 8.1.***

Uz tražene uvjete zavarivanja PPŽ (osnovni metal je čelik 304, a zaštitni plin Ar/CO_2 82%/18%) zahtjevani protok zaštitnog plina iznosi:

- 10-12 l/min pri zavarivanju kratkim lukom,
- 15-20 l/min pri zavarivanju štrcajućim i impulsnim lukom. [7]



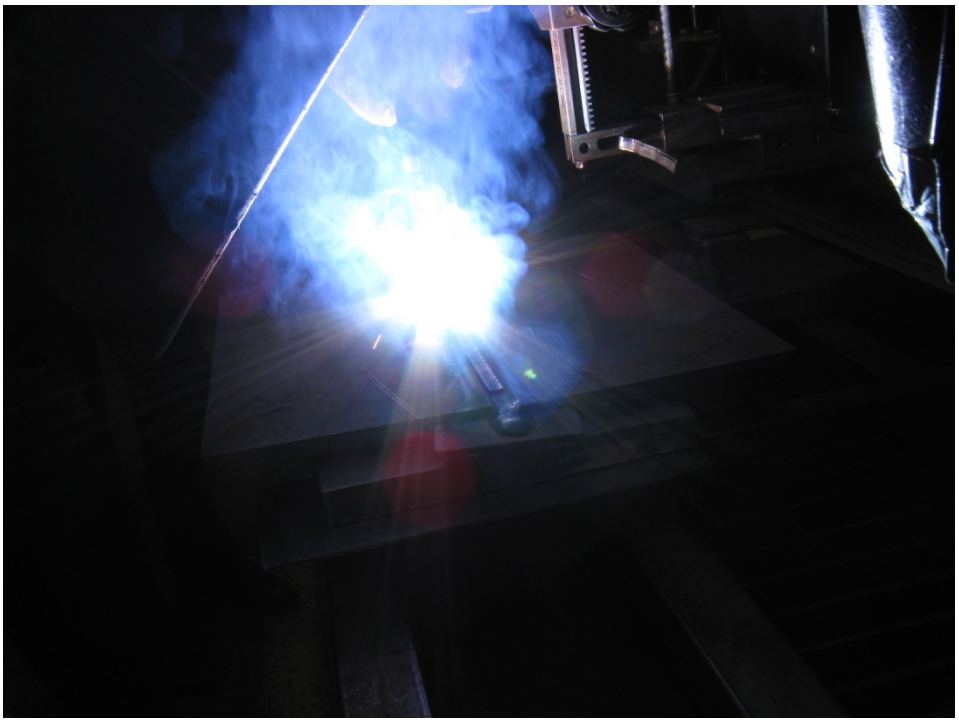
Slika 8.2. *Priprema sučeljenog spoja i V žljeba sa razmakom u korijenu uz korištenje keramičke podloge naljepljene aluminijskom trakom.*

Slika 8.3. *Predhodno prikazani sučeljeni spoj nehrđajuće čelične ploče sa keramičkom podlogom u položaju za zavarivanje.*

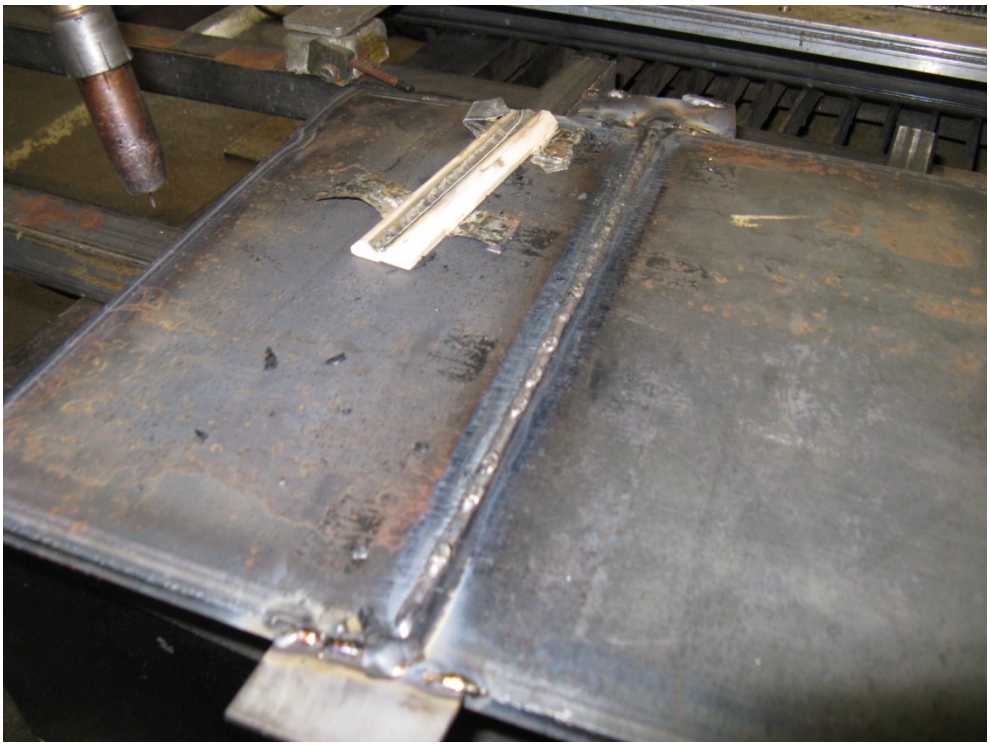
PARAMETRI ZAVARIVANJA	1.Prolaz (korijen)	2.Prolaz
Struja zavarivanja	225 A	225 A
Napon zavarivanja	25,5 V	28 V
Brzina zavarivanja	25 cm/min	22,5 cm/min
Zaštitni plin	Messer Ferromix C18, 18% ugljik-dioksida, ostalo argon	
Protok zaštitnog plina	18 l/min	
Debljina ploče	10 mm	
Kut pripreme V žljeba	60°	
Razmak u korijenu spoja	1 mm	

Tablica 8.1. *Podaci i parametri zavarivanja PPŽ V žljeba uz 1 mm razmaka u korijenu.*

Pri zavarivanju jednako pripremljenog spoja, ***slika 8.4.,*** uz isti postupak zavarivanja i razmak u korijenu od 3 mm dobiveni su zadovoljavajući rezultati i potpuno protaljivanje, ali bez nadvišenja u korijenu, kao što je i prikazano na ***slici 8.5.*** Keramička podloga je uz trosku dodatno pridržavala metal zavara. Parametri korišteni pri ovom zavarivanju su prikazani ***tablicom 8.2.*** Kod oba zavarivanja PPŽ koristio se FCAW CrNi program zavarivanja.



Slika 8.4. *Proces automatskog zavarivanja sučeljenog spoja uz V žljeb.*



Slika 8.5. *Prvi prolaz (korijenski) pri zavarivanju FCAW-G postupkom uz PPŽ i razmak u korijenu od 3 mm. Rezultat je zadovoljavajući, ali nema potrebnog nadvišenja zavara u korijenu, a prolaz zavara u donjem je dijelu procurio svakih par centimetara. Gornji dio (lice) zavara je vrlo dobro i slično u oba postupka (kako je prikazano na sljedećim slikama). Vidi se potrošena i skinuta keramička podloška.*

PARAMETRI ZAVARIVANJA	1.Prolaz (korijen)	2.Prolaz
Struja zavarivanja	225 A	225 A
Napon zavarivanja	25 V	25,5 V
Brzina zavarivanja	25 cm/min	
Zaštitni plin	Messer Ferromix C18, 18% ugljik-dioksida, ostalo argon	
Protok zaštitnog plina	18 l/min	
Debljina ploče	10 mm	
Kut pripreme V žljeba	60°	
Razmak u korijenu spoja	3 mm	

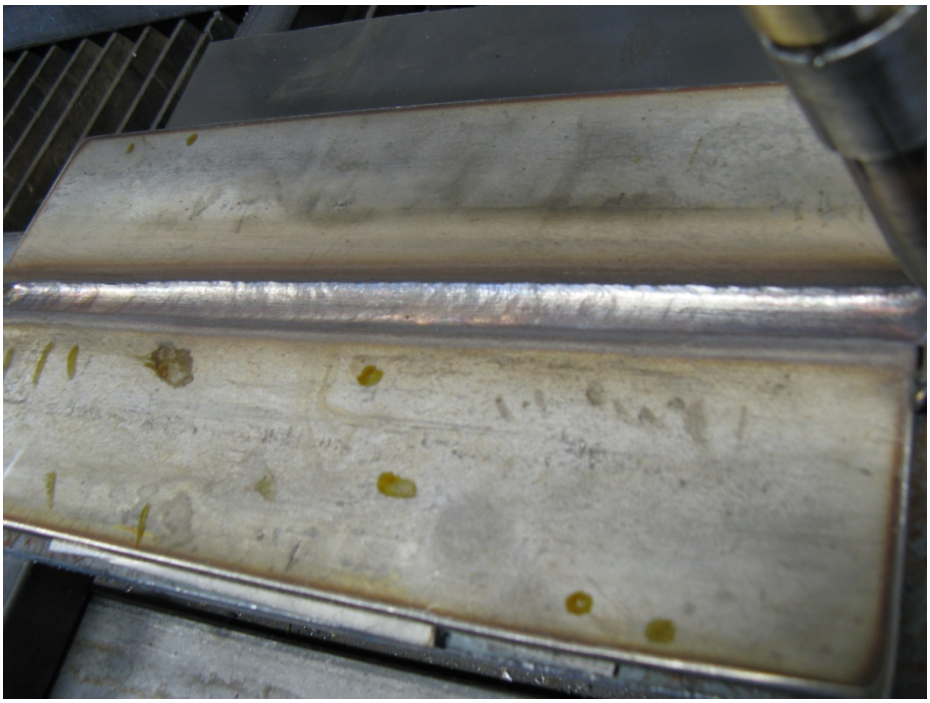
Tablica 8.2. *Podaci i parametri zavarivanja PPŽ V žljeba uz 3 mm razmaka u korijenu.*

Zavarivanje punom žicom i MIG postupkom je izvedeno također uz V žljeb kuta 60° i razmak u korijenu od 1 mm. Čelična ploča je iste debljine i kemijskog sastava kao i kod predhodna

dva zavarivanja. Parametri prikazaniani u ***tablici 8.3.*** i ovakva priprema spoja omogućili su vrlo dobar zavar kao što se vidi na ***slikama 8.6 do 8.8.***, a keramička podloga je pomogla oblikovanju metala zavara u korijenu. Kod pune žice i MIG postupka koristio se CrNi 19 9 program zavarivanja na zavarivačkom uređaju.

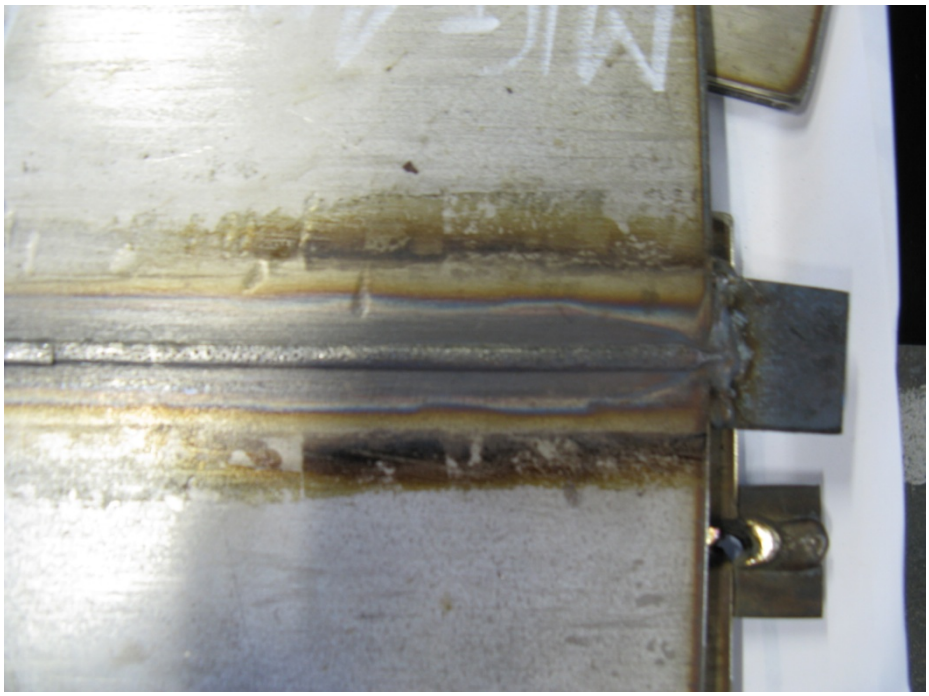
PARAMETRI ZAVARIVANJA	1.Prolaz (korijen)	2.Prolaz
Struja zavarivanja	240 A	225 A
Napon zavarivanja	24 V	25,5 V
Brzina zavarivanja	25 cm/min	22,5 cm/min
Zaštitni plin	Messer Inoxmix X1, 1% kisika, ostalo argon	
Protok zaštitnog plina	18 l/min	
Debljina ploče	10 mm	
Kut pripreme V žljeba	60°	
Razmak u korijenu spoja	1 mm	

Tablica 8.3. *Podaci i parametri zavarivanja punom žicom V žljeba uz 1 mm razmaka u korijenu.*



Slika 8.6. *Prvi prolaz (korijenski) pri zavarivanju MIG postupkom uz punu žicu i razmak u korijenu od 1 mm. Rezultat je vrlo dobar izgled lica zavara i vrlo je sličan onome dobijenom pri zavarivanju uz FCAW-G postupak.*

Slika 8.7. *Drugi prolaz (popuna) pri zavarivanju MIG postupkom uz punu žicu i razmak u korijenu od 1 mm dao je vrlo dobro nadvišenje lica zavara i dobru popunu.*



Slika 8.8. *Prvi prolaz (korijenski) pri zavarivanju MIG postupkom uz punu žicu i razmak u korijenu od 1 mm. Rezultat je vrlo dobar izgled i nadvišenje korijena zavara. Rezultat je bolji nego u slučaju zavarivanja FCAW-G postupkom.*

8.2.1. UNOS TOPLINE PRI ZAVARIVANJU

Unosi topline pri zavarivanju kutnog T i sučeljenog V spoja se mogu očitati iz ***tablice 8.4.***, razlika kod sučeljenog V spoja zavarenog PPŽ i punom žicom je u razmaku korijena.

$$Q_z = \frac{60}{1000} \cdot \frac{U_z \cdot I_z}{v_z} \cdot \eta_{el}$$ [kJ/cm] [14]

- napon zavarivanja, U_Z [V]
- struja zavarivanja, I_z [A]
- brzina zavarivanja, v_z [cm/min]
- koeficijent korisnog djelovanja električnog luka, η_{el}

ZAVAR	ŽICA		UNOS TOPLINE PRI ZAVARIVANJU
Kutni T spoj	PPŽ		10.9 kJ /cm
	Puna žica		9.1 kJ/cm
Sučeljeni V spoj	PPŽ*	1.prolaz	11.7 kJ/cm
		2.prolaz	14.28 kJ/cm
	Puna žica*	1.prolaz	11.5 kJ/cm
		2.prolaz	11.7 kJ/cm

*sučeljeni V spoj zavaren PPŽ uz razmak u korijenu od 3 mm; sučeljeni V spoj zavaren punom žicom uz razmak u korijenu od 1 mm

Tablica 8.4. *Unosi topline pri zavarivanju kutnog T spoja i sučeljenog V spoja.*

8.3. ISPITIVANJE ZAVARENIH UZORAKA NA JAMIČASTU KOROZIJU I IZGLED MAKRO IZBRUSAKA

8.3.1. UVOD

Korozija kao nenamjerno razaranje materijala može biti uzokovana fizikalnim, kemijskim, fizikalno-kemijskim i biološkim djelovanjem, pri čemu dolazi do trošenja materijala. Korozija započinje na površini metala, a kasnije se širi u dubinu, mijenjajući tako svojstva i sastav metala, pri čemu se masa metala smanjuje. Štete u privredi koje korozija uzrokuje su velike.

Skraćuje vijek trajanja, poskupljuje održavanje, a u najgorim slučajevima može uništiti postrojenja i biti uzrok nesreća na radu.

Jamičasta (eng. pitting) korozija predstavlja lokalnu koroziju u obliku malih jamica na metalu. Jamičastu koroziju uzrokuju ioni klorida, bromida i jodida uz nedostatak kisika, a dodatno potiče mirovanje fluida.

Na površini nehrđajućih čelika tanki pasivni sloj uzrokuje kemijsku pasivnost ovog metala, ali ukoliko se sloj prekine (nehomogena površina metala, mehaničko oštećenje itd.) nastaju rupice i dolazi do anodne reakcije.

Postoje tri načina nastajanja korozijkih rupica:

- prodiranje ili penetracija
- pucanje filma
- adsorpcija

Sklonost jamičastoj koroziji ovisi o kemijskom sastavu metala, mikrostrukturi (na koju utječe hlađenje pri zavarivanju), stanju površine (čistoća površine), osiromašenju legirnih elemenata metala i unosu topline.

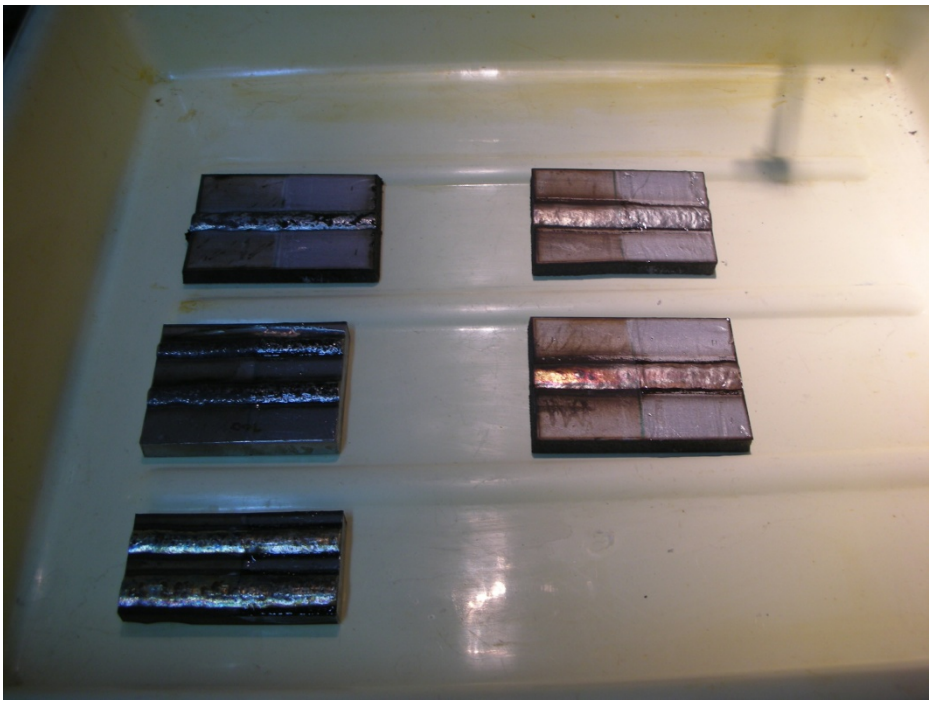
8.3.2. ISPITIVANJE JAMIČASTE KOROZIJE

Svaki se uzorak priprema za korozijsko ispitivanje tako da se predhodno izreže na duljinu 110 mm i širinu od 70 mm i podijeli na jednake površine lijevo i desno od središnje linije. Pola uzorka se odmašćuje i bajca dok druga polovica ostaje netaknuta (u stanju u kakvom je bila nakon zavarivanja). Postupak pripreme očišćenog dijela uzorka za ispitivanje jamičaste (eng. pitting) korozije:

1. odmašćivanje zavarenih/navarenih uzoraka otoplinom Avesta reinigungsflüssigkeit 401 (fosfatna kiselina),
2. ispiranje uzorka vodom i sušenje,
3. bajcanje uzoraka otopinom Pelox TS-K 2000 (kemijski spoj $HF+HNO_3$),
4. ponovno ispiranje uzorka vodom i sušenje,

kao što prikazuju ***slike 8.9. i 8.10.***

Slika 8.9. *Prikaz odmašćenih, vodom ispranih i osušenih uzoraka koji će se bajcati. Crta okomito na zavar/navar dijeli uzorke na lijevi i desni dio, odnosno na očišćeni i neočišćeni dio. Do uzoraka se nalazi otopina za bajcanje u bijeloj plastičnoj posudi.*



Slika 8.10. *Uzorci nakon bajcanja su stavljeni u plastičnu posudu u kojoj će biti izloženi djelovanju otopine tokom 72 sata.*

Oznake uzoraka pri ispitivanju otpornosti na jamičastu koroziju:

A) kutni T spoj zavaren uz PPŽ,

B) kutni T spoj zavaren uz punu žicu,

C) gusjenica navarena uz punu žicu i struju zavarivanja, I_z = 180 A,

D) gusjenica navarena uz punu žicu i struju zavarivanja, I_z = 235 A,

E) gusjenica navarena uz PPŽ i struju zavarivanja, I_z = 180 A,

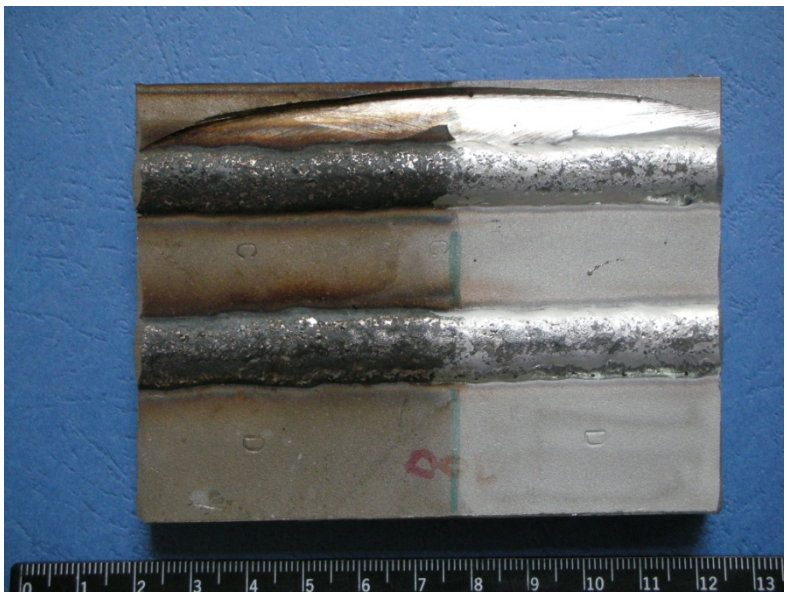
F) gusjenica navarena uz PPŽ i struju zavarivanja, I_z = 235 A,

G) sučeljeni spoj sa V žljebom uz kut od 60° i razmakom u korijenu od 1 mm zavaren uz PPŽ i korištenu keramičku podlogu u korijenu,

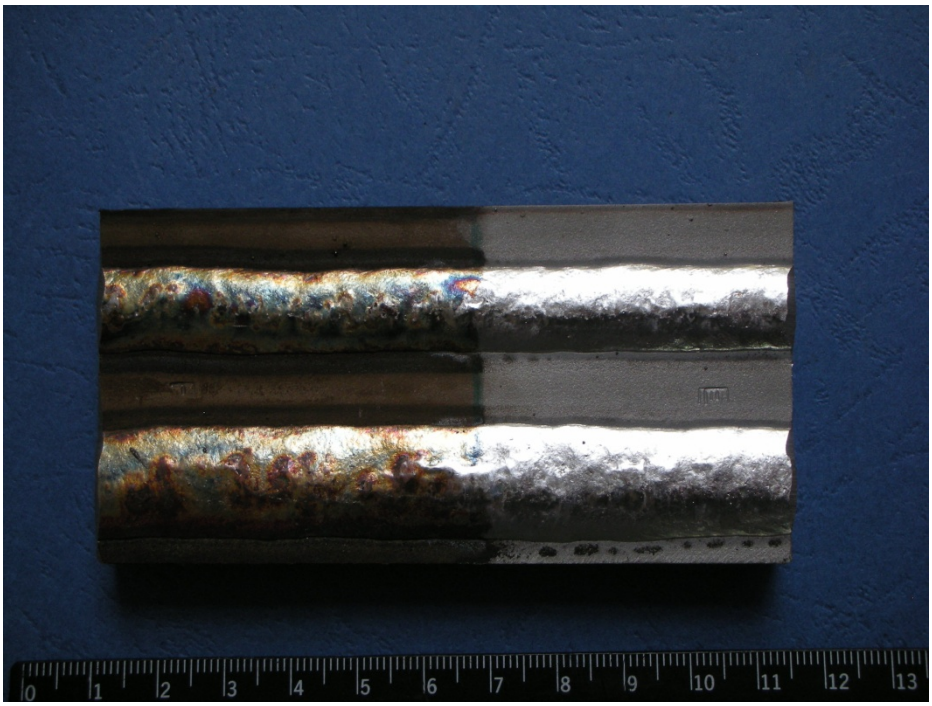
H) sučeljeni spoj sa V žljebom uz kut od 60° i razmakom u korijenu od 3 mm zavaren uz PPŽ i korištenu keramičku podlogu u korijenu,

I) sučeljeni spoj sa V žljebom uz kut od 60° i razmakom u korijenu od 1 mm zavaren uz punu žicu i korištenu keramičku podlogu u korijenu.

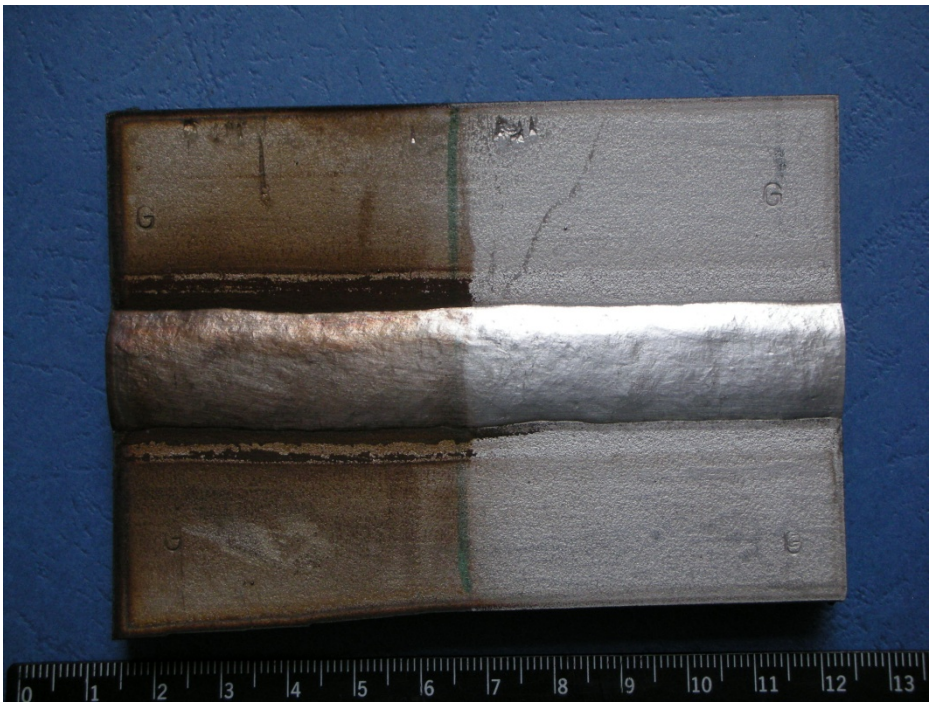
Uzorci **A, B, C, D, E, F** su pokusni zavari/navari izvedeni na čeličnim pločama čelika 316Ti i Č.0361, dok su uzorci **G, H, I**, zavari izvedeni na čeličnim pločama čelika 304. Svi uzorci koji su ispitivani na jamičastu koroziju su nakon odmašćivanja i bajcanja prikazani ***slikama 8.11. do 8.15.***



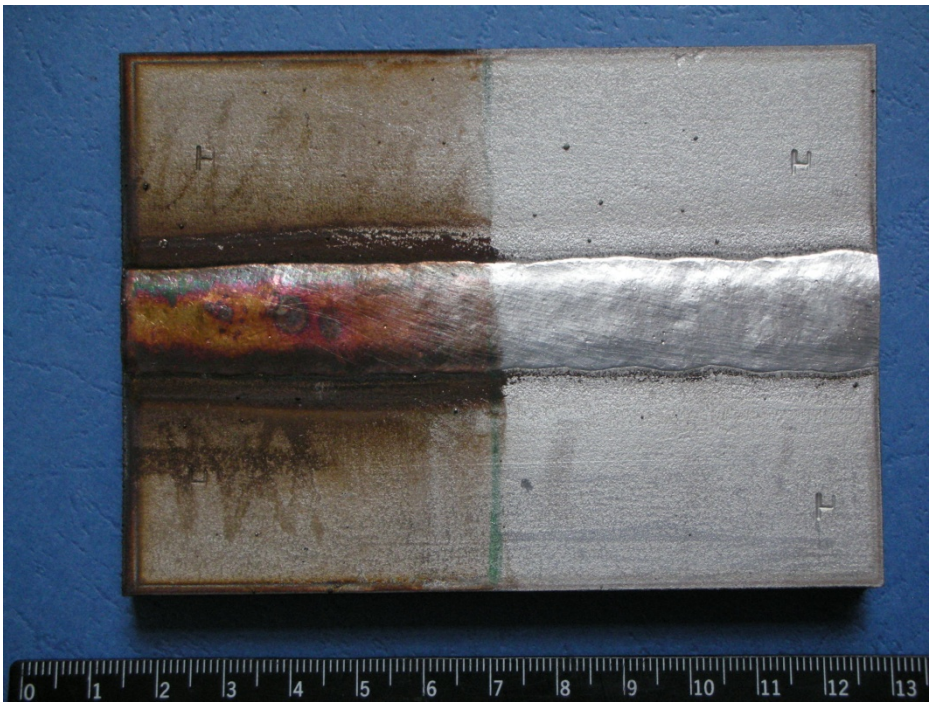
Slika 8.11. *Navarene gusjenice oznake C i D (gornja je oznake C, a donja oznake D) izvedene na čeličnoj ploči uz struju zavarivanja I_z = 180 A; 235 A. Lijevi dio uzorka nije odmašćen i bajcan dok su ti postupci čišćenja izvedeni na desnom dijelu, kao što se i vidi.*



Slika 8.12. *Navarene gusjenice oznake E i F (gornja je oznake E, a donja oznake F) izvedene na čeličnoj ploči uz struju zavarivanja I_z = 180 A; 235 A. Kao i kod predhodnih uzoraka vidi se da je desni dio odmašćen i bajcan.*



Slika 8.13. *Uzorak G je sučeljeni spoj izveden FCAW-G postupkom uz PPŽ.*



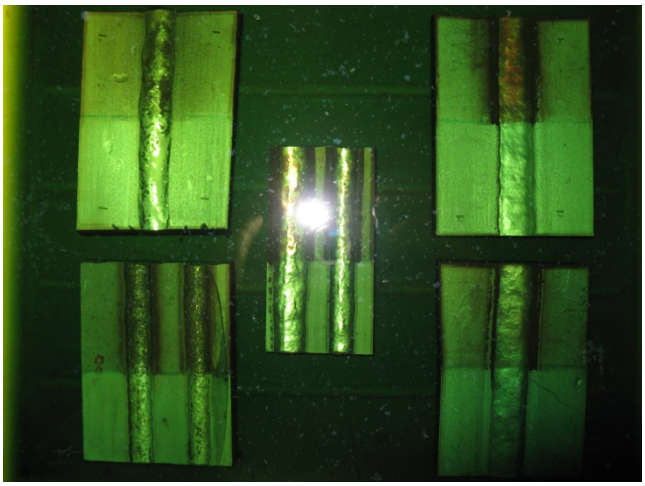
Slika 8.14. *Uzorak H je sučeljeni spoj izveden FCAW-G postupkom uz PPŽ; razlika naprema G uzorku je u pripremi spoja.*

Slika 8.15. *Uzorak I je sučeljeni spoj izveden MIG postupkom uz punu žicu.*

Slika 8.16. *Pripremljena otopina prema sjevernoameričkoj normi ASTM G48-99a koja se koristi za ispitivanje jamičaste korozije.*

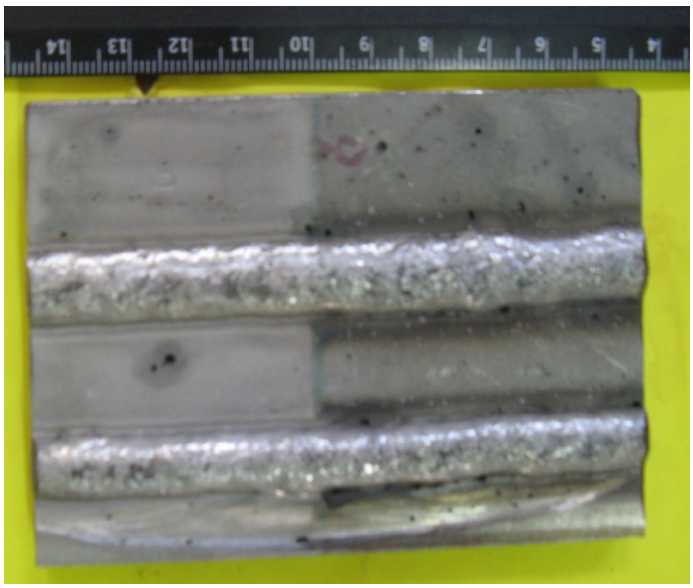
Ispitivanje na jamičastu koroziju izvodi se prema sjevernoameričkoj normi ASTM G48-99a, gdje se za otopinu u koju se uranja metal koristi 10%-tna otopina hidratiziranog željeznog-klorida ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$). Pripremljena otopina je prikazana na predhodnoj ***slici 8.16.*** Metal miruje potpuno uronjen u otopinu 72 sata, kao što je prikazano na ***slici 8.17..*** Počeci jamičaste korozije nastupaju odmah pri uranjanju u otopinu i nakon nekoliko sati mogu se vidjeti prve jamice i promjena boje otopine kao što prikazuje ***slika 8.18.***

Slika 8.17. *Uzorci uronjeni u otopinu u kojoj će ostati slijedećih 72 sata.*

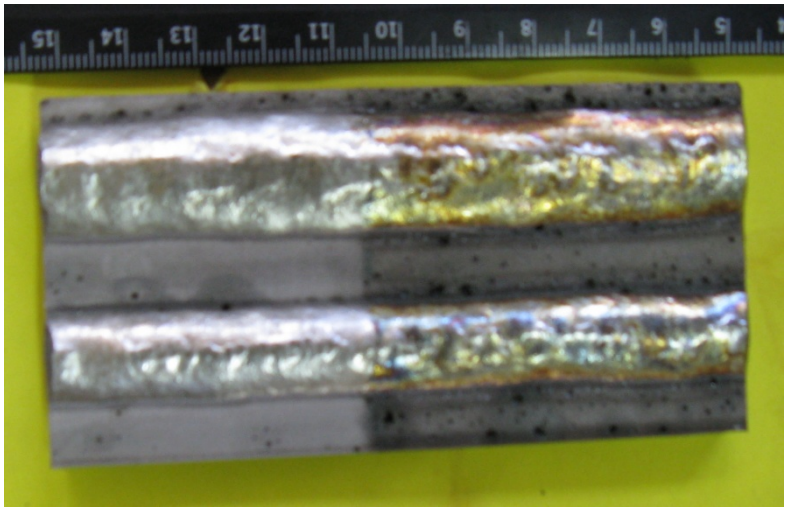


Slika 8.18. *Prve naznake jamičaste korozije vidljive su već nakon 2 sata, a jasno se i vidi promjena boje otopine.*

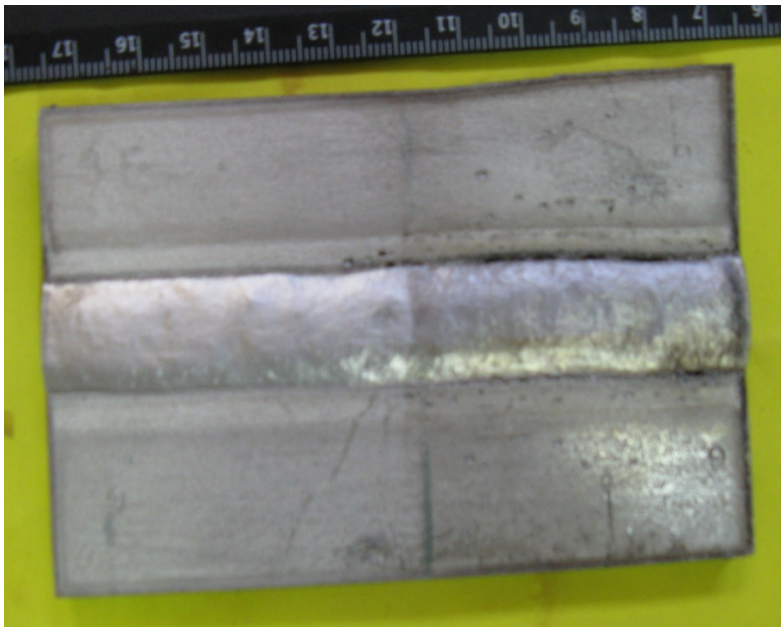
Jamičastu koroziju može uzrokovati prevelik unos topline koji dovodi do osiromašenja metalnog sloja elementom kroma smanjujući time korozijsku postojanost. Također, nečistoće na površini metala koje nastaju prilikom prskanja pri zavarivanju mogu onemogućiti nastanak zaštitnog filma koji štiti metal od korozije i u tim prekidima zaštitnog filma može doći do početka stvaranja jamičaste korozije. Veličina i učestalost zahvaćenosti uzoraka jamičastom korozijom prikazane su sljedećim slikama ***8.19. do 8.23.***



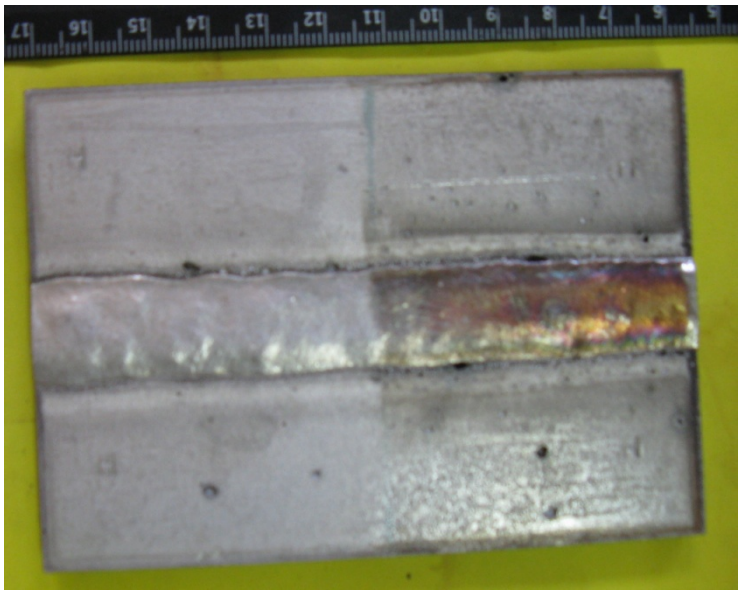
Slika 8.19. *Navari izvedeni MIG postupkom uz punu žicu, odnosno uzorci C i D. Jamičasta korozija je zahvatila ZUT i osnovni metal koji je manje plemenit od dodatnog metala.*



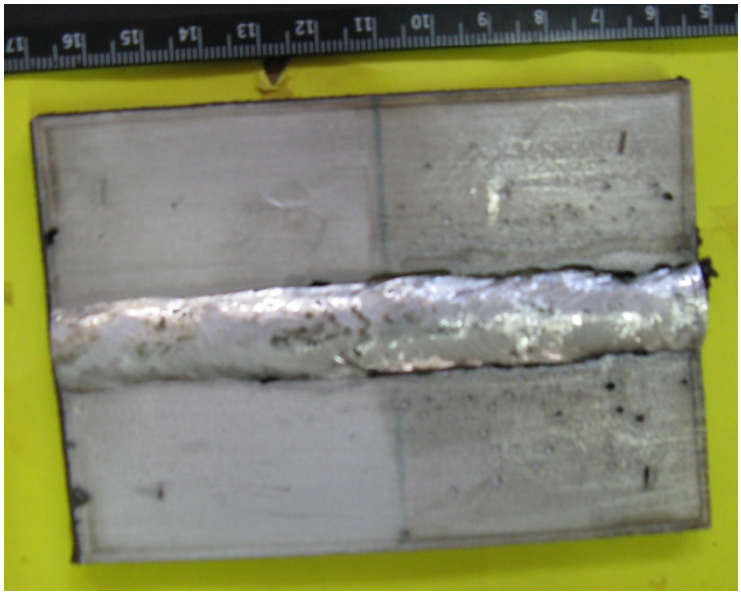
Slika 8.20. *Navari izvedeni FCAW-G postupkom uz PPŽ, odnosno uzorci E i F. Jamičasta korozija je također zahvatila ZUT i osnovni metal koji je manje plemenit od dodatnog metala, a veličina i učestalost su vrlo slične kao i kod predhodnog uzorka.*



Slika 8.21.. *Zavar sučeljenog spoja dobiven FCAW-G postupkom uz PPŽ kod uzorka G i razmak u korijenu od 1 mm manje je zahvaćen jamičastom korozijom od predhodna dva primjera. Osnovni metal je ploča manje plemenitog čelika (čelik 304; dodatni metal je čelik 316), dok je vidljiv razvoj rupičaste korozije uz liniju spoja metala zavara i ZUT-a. Mogući uzrok je samo naljepljivanje zavara, bez provara u korijenu.*

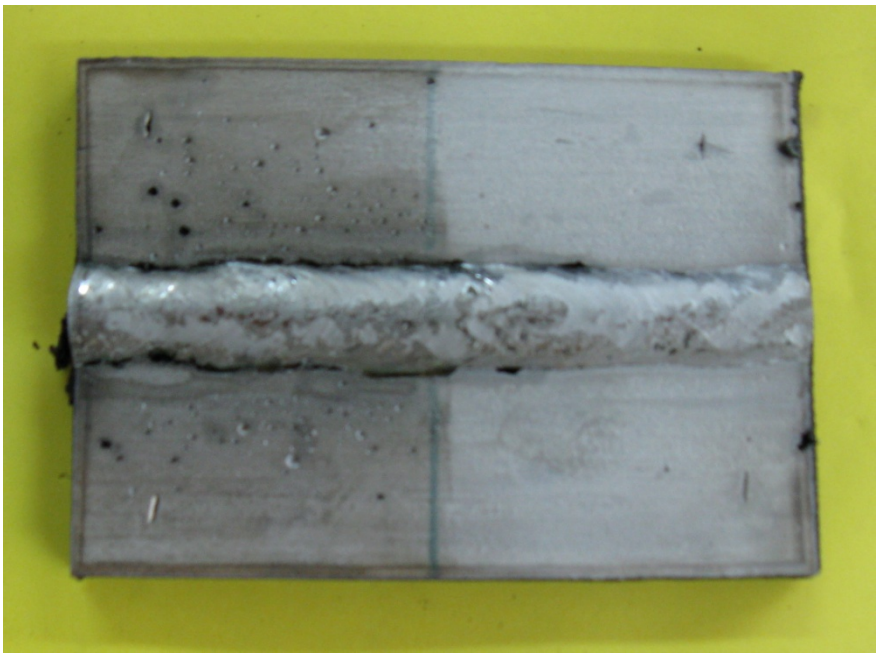


Slika 8.22. *Zavar sučeljenog spoja dobiven FCAW-G postupkom uz PPŽ kod uzorka H i razmak u korijenu od 3 mm. Vidljiv je razvoj rupičaste korozije uz liniju spoja metala zavara i ZUT-a, ali u manjem obimu nego kod predhodnog primjera. Kod ovog uzoraka je došlo do prihvatljivog provara korijena.*



Slika 8.23. *Zavar sučeljenog spoja dobiven MIG postupkom uz punu žicu kod uzorka H i razmak u korijenu od 1 mm. Vidljiv je razvoj rupičaste korozije uz liniju spoja metala zavara i ZUT-a, većeg obima zbog moguće većeg unosa topline. Kod ovog uzorka je došlo do vrlo dobrog provara korijena.*

Iz predhodnih slika uzoraka vidljivo je da nečista površina više zahvaćena jamičastom korozijom, a najviše je izražena kod linije spoja metala zavara i ZUT-a kao što je prikazano ***slikom 8.24.*** Nije utvrđeno je li tome uzrok naljepljivanje pri zavarivanju. Kod sučeljenog spoja zavarenog MIG postupkom došlo je do veće zahvaćenosti metala jamičastom korozijom; jamice su dublje i učestalije. Kod navara je zahvaćenost jednolika za oba postupka zavarivanja. Na svim uzorcima jamičasta korozija je puno izraženija na osnovnom metalu koji je manje plemenit od dodatnog metala.

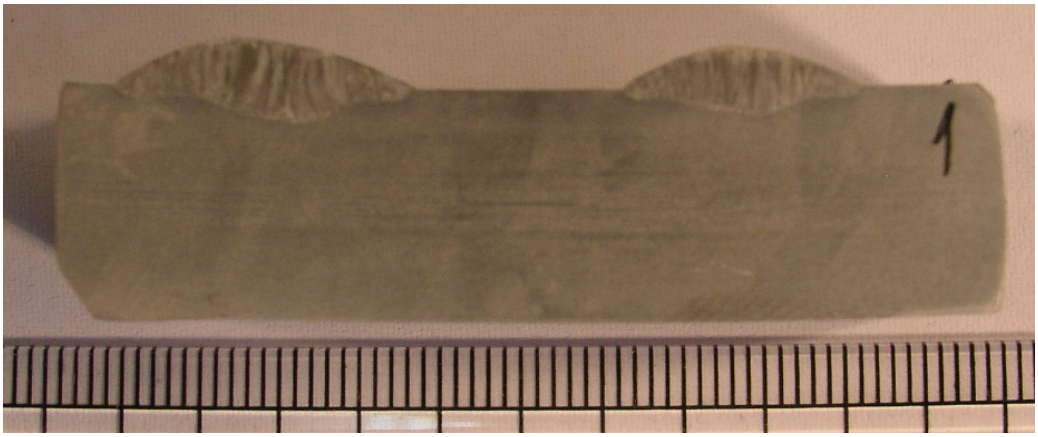


Slika 8.24. *Najzorniji prikaz jamičaste korozije dobiven je na I uzorku. Linija spoja metala zavara i ZUT-a je najviše zahvačena.*

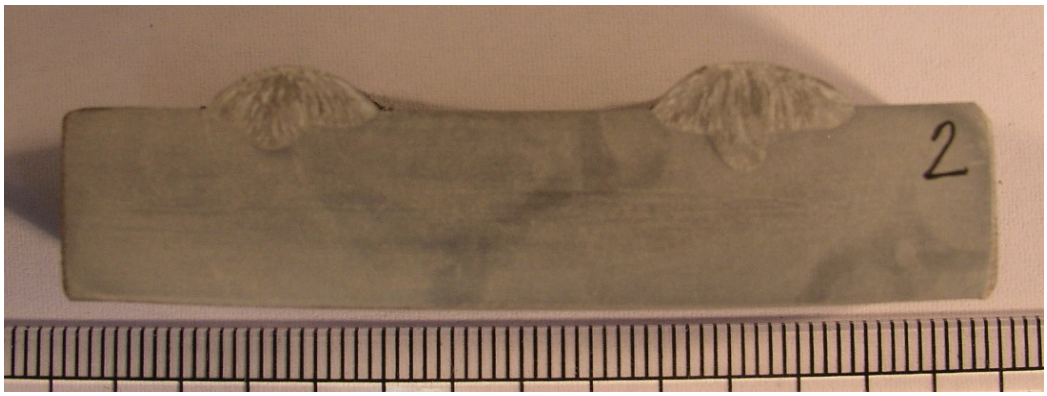
8.3.3. MAKRO IZBRUSAK ZAVARENIH/NAVARENIH UZORAKA

Uzorci za makro izbrusak su debljine 10 mm i izrezani su bez ili uz vrlo mali unos topline pri rezanju iz prethodno zavarenih i navarenih ploča i kutnog T spoja. Površina koja se promatra u makro izbrusku i koja se izlaže kiselini da se nagrize uzorak mora biti potpuno ravna. Nadalje potpuno ravnu površinu uzorka ručno brusimo do “najfinijeg” brusnog papira oznake P1000.

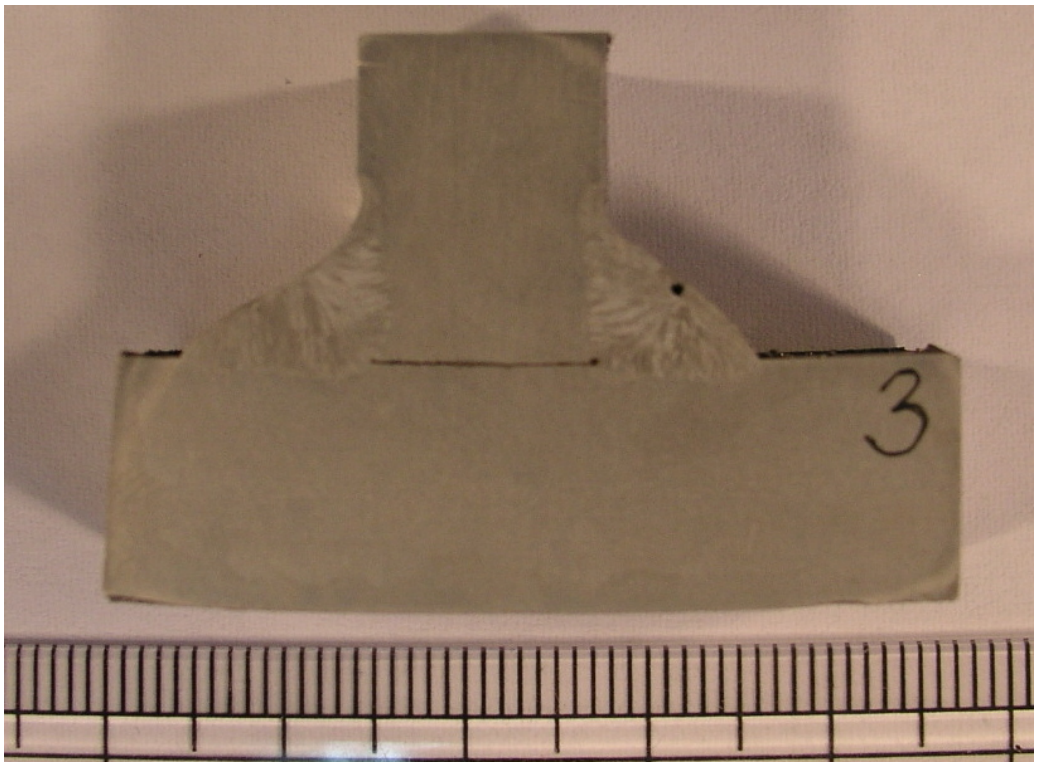
Nagrizanje uzoraka se izvodi u ovom slučaju univerzalnom smjesom kiselina, koja se koristi kada se zavaruju raznorodni metali. Uzorak se potpuno uranja u kiselinu u staklenoj posudi i ostaje u njoj nekoliko sekundi. Prilikom vađenja ispire se vodom i čisti etilnim alkoholom, a zatim stavlja na sušenje. ***Slike 8.25. do 8.30.*** prikazuju makro izbruske zavara i navara.



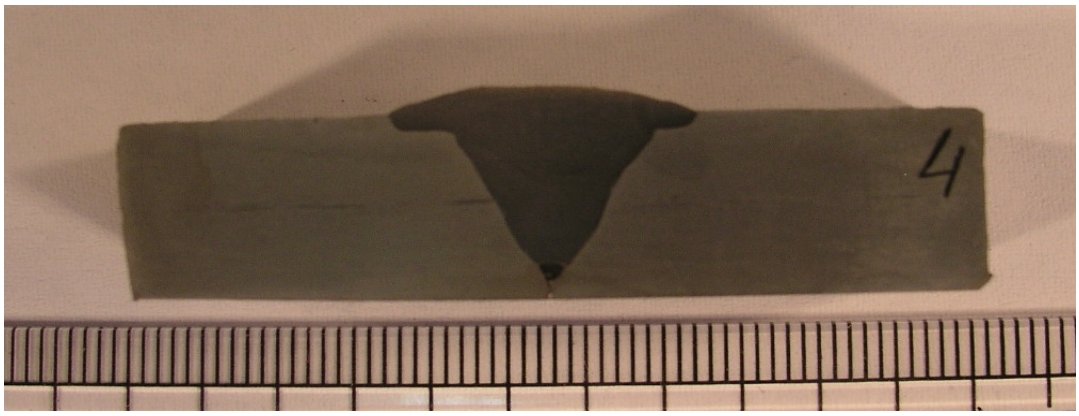
Slika 8.25. *Prikaz makro izbruska broj 1, uzoraka E i F prikazuje navare dobijene FCAW-G postupkom uz PPŽ i različite struje navarivanja. Dobiveni navari su široki, ali dubina penetracije je mala. Vidi se oblik navara na kojeg znatno utječe zaštitni plin.*



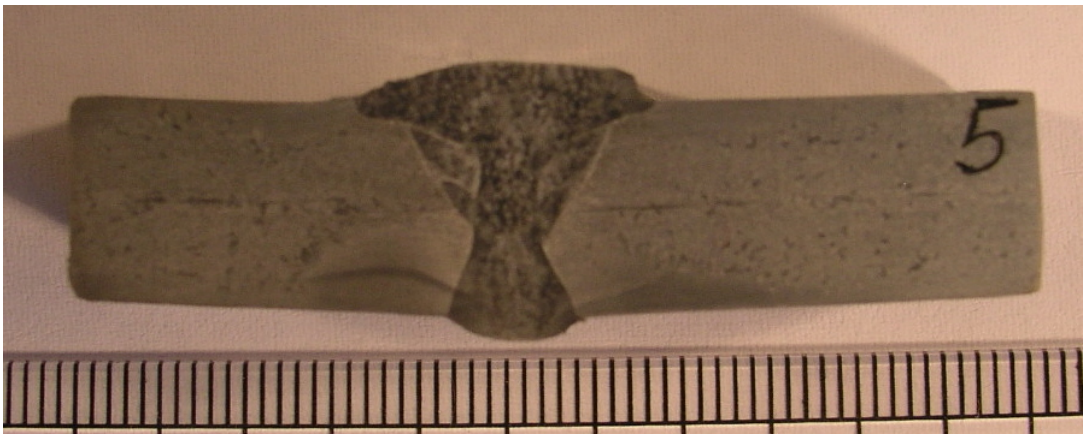
Slika 8.26. *Prikaz makro izbruska broj 2, uzoraka C i D, prikazuje navare dobijene MIG postupkom uz punu žicu i različite struje navarivanja. Dobiveni navari su uži, ali dubina penetracije je nešto veća i prstenastog je oblika. Također se vidi oblik navara na kojeg znatno utječe zaštitna mješavina (mješavina Ar/O_2) koja daje tipičan oblik čavla.*



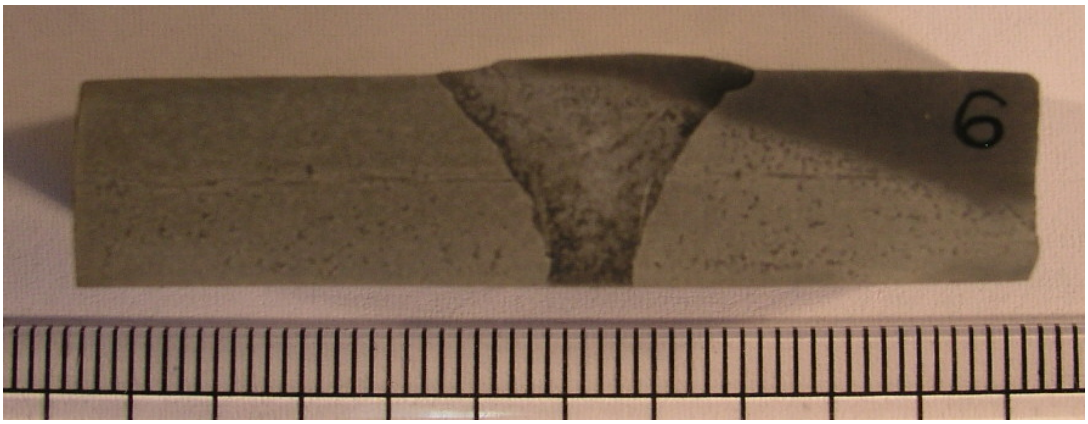
Slika 8.27. *Prikaz makro izbruska broj 3, uzoraka A i B, prikazuje zavare kutnog T spoja dobijene FCAW-G postupkom uz PPŽ (lijevi zavar na slici) i MIG postupkom uz punu žicu (desni zavar na slici). Zavar dobiven uz FCAW-G postupak ima veću dubinu penetracije i nešto je širi uz bolju simetriju.*



Slika 8.28. *Prikaz makro izbruska broj 4, uzorka G, prikazuje zavar dobiven FCAW-G postupkom uz PPŽ i V žljeb kuta 60° uz razmak u korijenu od 1 mm i korištenje keramičke podloge. Ovako izveden zavar sadrži u korijenu zaostalu trosku vjerojatno zbog premalenog otvora korijena.*



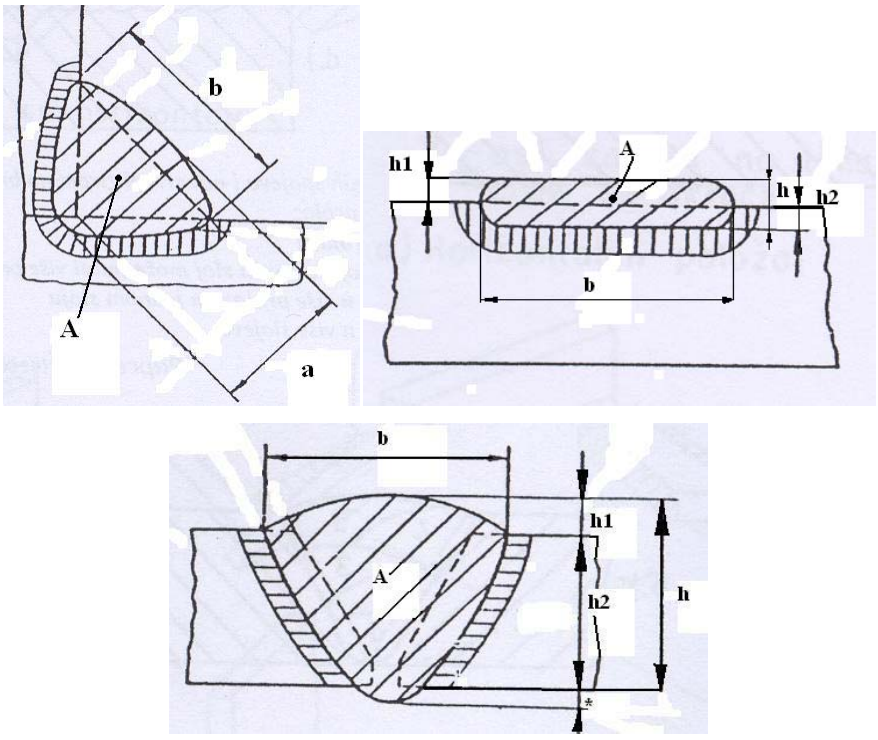
Slika 8.29. *Prikaz makro izbruska broj 5, uzorka I, prikazuje zavar dobiven MIG postupkom uz punu žicu i V žljeb kuta 60° uz razmak u korijenu od 1 mm i korištenje keramičke podloge. Ovako izveden zavar ima dobru dubinu penetracije i dobar profil zavara, korijen je protaljen, a lice zavara ima nadvišenje.*



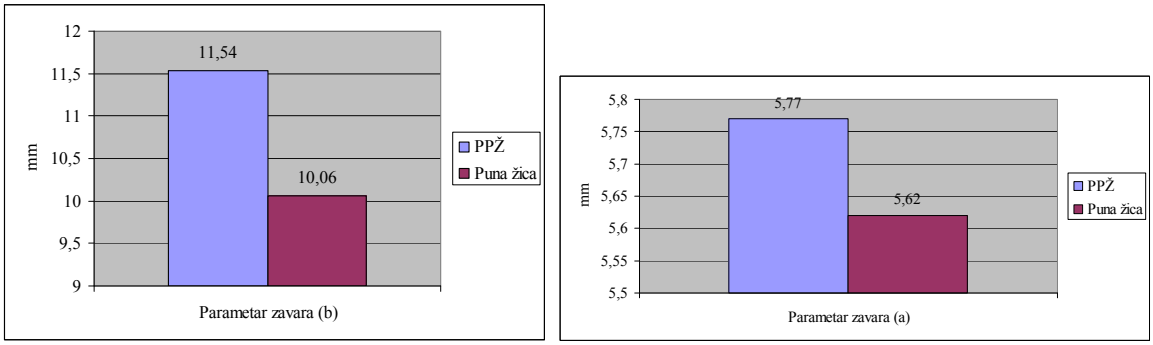
Slika 8.30. *Prikaz makro izbruska broj 6, uzorka H, prikazuje zavar dobiven FCAW-G postupkom uz PPŽ i V žljeb kuta 60° uz razmak u korijenu od 3 mm i korištenje keramičke podloge. Ovako izveden zavar ima prolazno protaljen korijen kao i prolazno nadvišenje lica zavara. Vidi se razlika oblika profila zavara po visini u odnosu na predhodnu sliku i MIG postupak.*

8.4 USPOREDBA VELIČINA ZAJEDNIČKIH GEOMETRIJSKIH PARAMETARA ZAVARA/NAVARA I DIJAGRAMSKI PRIKAZ

Zajednički geometrijski parametri kutnog i sučeljenog zavara, te navara prikazani su na ***slici 8.31.*** Veličine tih parametara su dobivene izmjerom u računalnom programu ImageJ i upisane su u ***tablici 8.5.***, a dijagramska usporedba zajedničkih geometrijskih parametara je prikazana ***slikama 8.32. do 8.49.***



Slike 8.31. *Zajednički geometrijski parametri pokusnih zavara i navara. [14]*

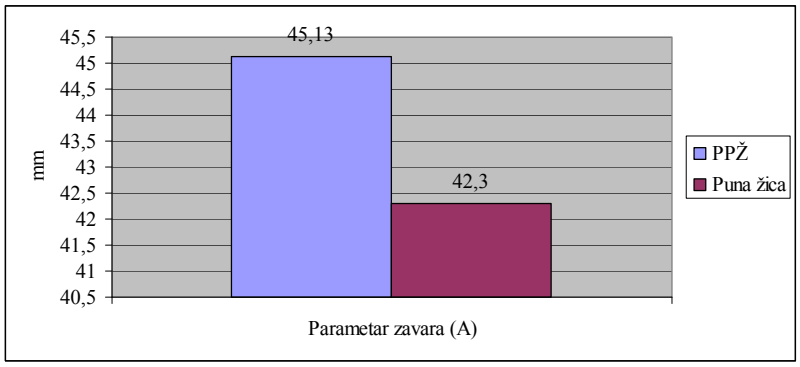


Slika 8.32. i 8.33. *Usporedba zajedničkih parametara (b, h) PPŽ i pune žice uzoraka A i B u dijagramskom prikazu.*

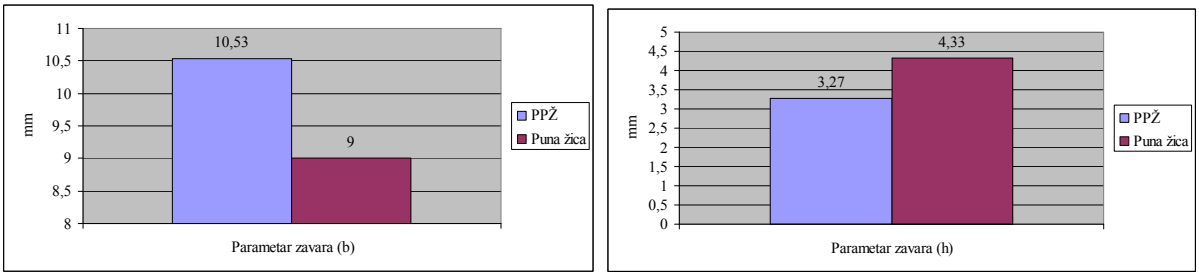
UZORAK	PARAMETAR (mm)					
	b	h	h1	h2	a	A
A	11.54	x	x	x	5.77	45.13
B	10.06	x	x	x	5.62	42.3
C	9	4.33	2.26	2.07	x	22.7
D	10.63	5.63	2.36	3.27	x	33.05
E	10.53	3.27	1.73	1.54	x	20.4
F	13.08	3.75	2.164	1.59	x	28.84
G	16.67	10.05	1.552	8.5	x	79.22
H	14.97	10.73	0.96	9.77	x	85.35
I	14.65	13.39	2.01	11.38 (1.1)*	x	93.9

* nadvišenje u korijenu zavara

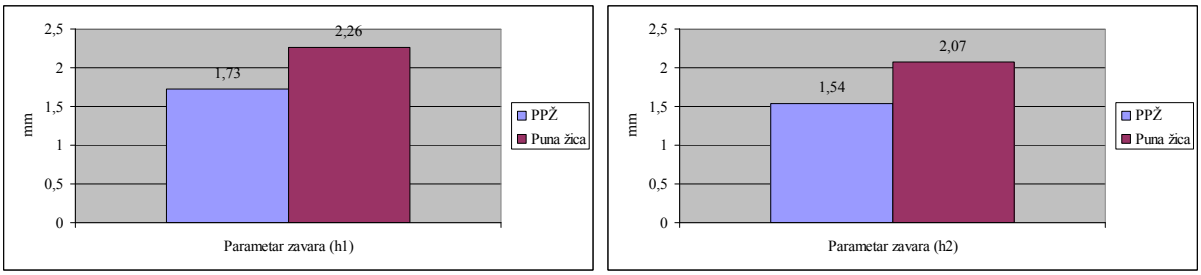
Tablica 8.5. *Veličine zajedničkih parametara svih makro uzoraka.*



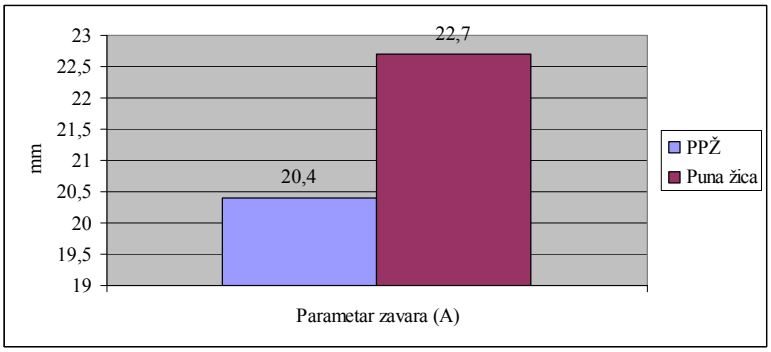
Slika 8.34. *Usporedba zajedničkog parametra (A) PPŽ i pune žice uzoraka A i B u dijagramskom prikazu.*



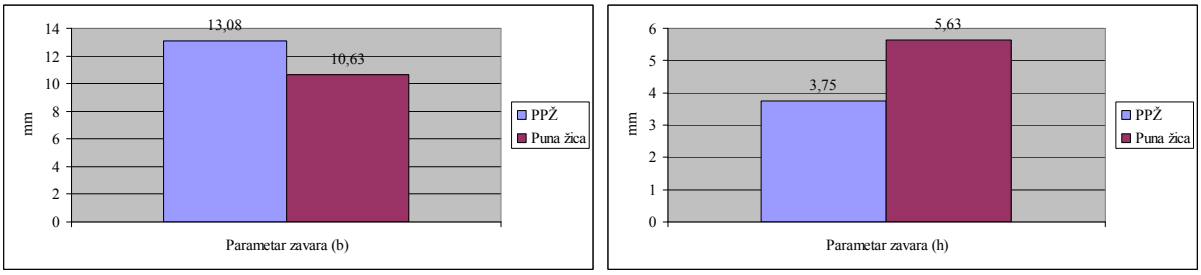
Slika 8.35. i 8.36. *Usporedba zajedničkih parametara (b, h) PPŽ i pune žice uzoraka C i E u dijagramskom prikazu.*



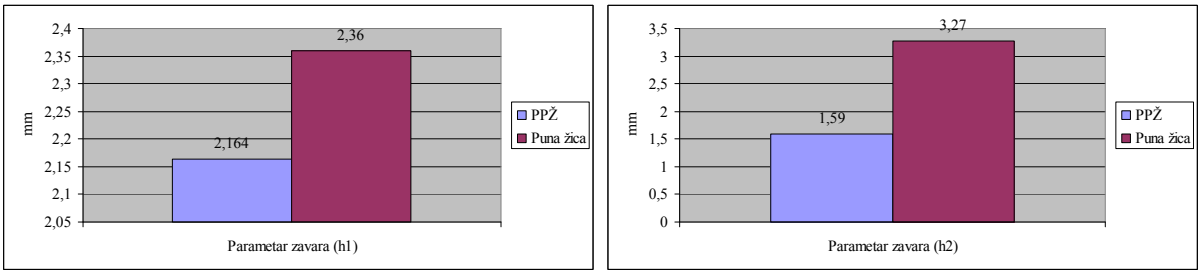
Slika 8.37. i 8.38. *Usporedba zajedničkih parametara (h1, h2) PPŽ i pune žice uzoraka C i E u dijagramskom prikazu.*



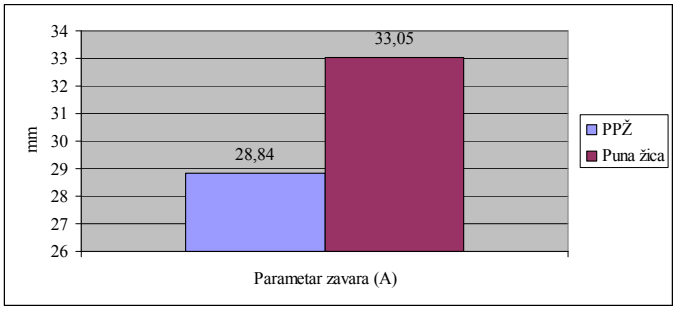
Slika 8.39. *Usporedba zajedničkog parametra (A) PPŽ i pune žice uzoraka C i E u dijagramskom prikazu.*



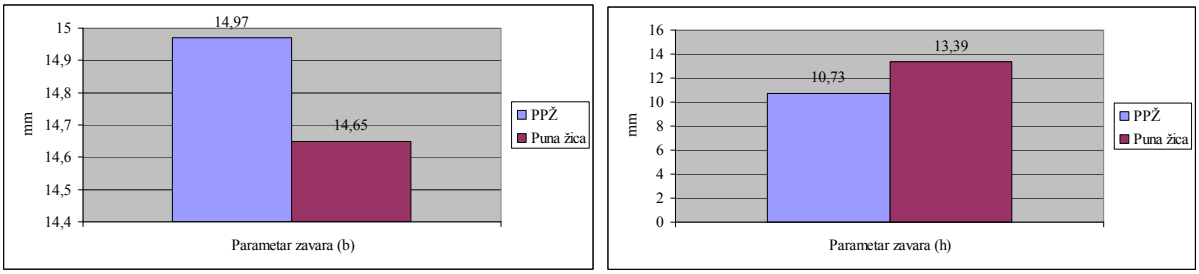
Slika 8.40. i 8.41. *Usporedba zajedničkih parametara (b, h) PPŽ i pune žice uzoraka D i F u dijagramskom prikazu.*



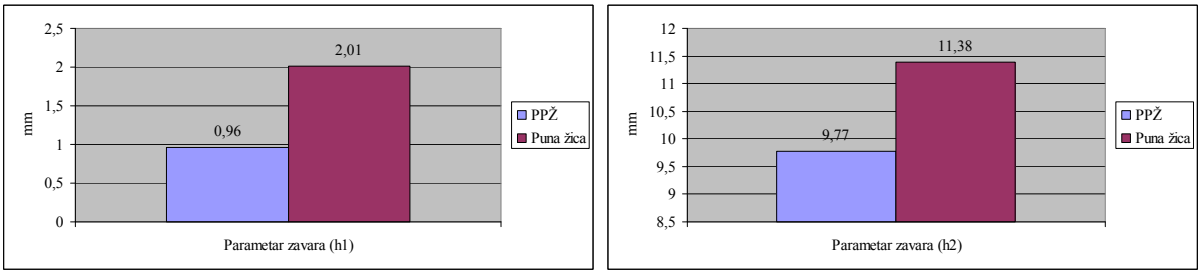
Slika 8.42. i 8.43. *Usporedba zajedničkih parametara (h1, h2) PPŽ i pune žice uzoraka D i F u dijagramskom prikazu.*



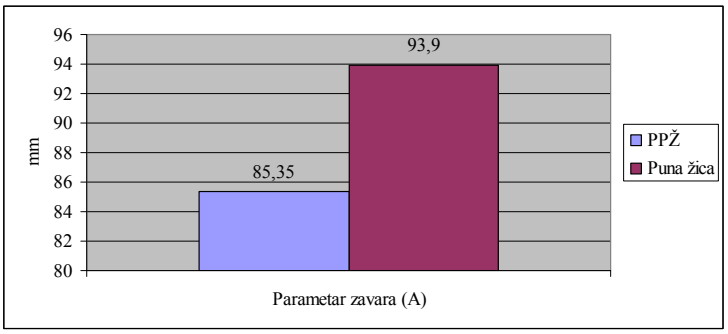
Slika 8.44. *Usporedba zajedničkog parametra (A) PPŽ i pune žice uzoraka D i F u dijagramskom prikazu.*



Slika 8.45. i 8.46. *Usporedba zajedničkih parametara (b, h) PPŽ i pune žice uzoraka H i I u dijagramskom prikazu.*



Slika 8.47. i 8.48. *Usporedba zajedničkih parametara (h1, h2) PPŽ i pune žice uzoraka H i I u dijagramskom prikazu.*



Slika 8.49. *Usporedba zajedničkog parametra (A) PPŽ i pune žice uzoraka H i I u dijagramskom prikazu.*

9. ZAKLJUČAK

Primjena FCAW postupka u budućnosti bi se trebala proširiti na račun REL i MIG/MAG postupaka.

FCAW postupak je pogodan za automatizaciju za razliku od REL-a, a po brzini zavarivanja nadmašuje oba postupka. Izravna zamjena MIG/MAG postupku koji je neprimjenjiv za terensko zavarivanje na otvorenom prostoru.

Njegov udio će se polako povećavati uz smanjenje troškova izrade PPŽ, odnosno smanjenja njihove nabavne cijene. U Japanu i SAD-u udio zastupljenosti FCAW postupka već sada iznosi 25% dok u Europi iznosi oko 10% uz tendenciju porasta. Povećanje zastupljenosti PPŽ bi trebalo napredovati uvođenjem FCAW postupka u automatsko i robotsko zavarivanje.

Dvije vrste postupka daju dodatan poticaj u svrhu mogućnosti daljnjeg razvoja, jer sam nije ograničen na određenu, usko specijaliziranu, primjenu. Dodatno, ova vrsta zavarivanja je pogodna za visokokvalitetne čelike čija primjena raste iz dana u dan.

Pri određenim primjenama ovaj postupak ne zahtjeva visokokvalitetnu pripremu i čišćenje spoja, ali samo ukoliko nemamo posebno visoke zahtjeve za kvalitetom zavara, jer će i sama svojstva zavara biti lošija.

Problem FCAW postupka čine pare koje nastaju tijekom zavarivanja i njihovo odvođenje koje ne smije utjecati na električni luk.

Također u eksperimentalnom dijelu smo uz približno iste unose topline tokom procesa zavarivanja, MIG i FCAW postupkom, usporedili uzorke. Zavarivanjem uz FCAW postupak dobili smo estetski ljepši, širi i manje jamičastom korozijom zahvaćen navar, dok je navar izveden MIG postupkom dao veću dubinu penetracije i veće nadvišenje lica zavara.

U slučaju kutnog T spoja FCAW postupak je omogućio zavar veće debljine (dubine penetracije) i simetrije.

Sučeljeni spoj uz V žljeb izveden MIG postupkom ima veće nadvišenje lica i korijena, te veću dubinu penetracije; širina zavara je manja od zavara izvedenog FCAW postupkom.

Ukupno gledajući zavari izvedeni FCAW i MIG postupkom su po postignutoj geometriji zavara vrlo slični.

Nakon eksperimentalno dobivenih rezultata u laboratorijskim uvjetima teško je vjerovati u tvrdnje proizvođača PPŽ o uštedi u ukupnim troškovima od 10 do 30%; nije uočena veća razlika zavarivačkih parametara FCAW i MIG postupka. Ta tvrdnja bi eventualno mogla biti ostvarena uz primjenu specijalne opreme za zavarivanje FCAW postupkom, vrlo strogu kontrolu svih zavarivačkih parametara i pripreme spoja, te laboratorijske uvjete rada za neke specifične položaje zavarivanja. Kako bi se to potvrdilo ili negiralo potrebna bi bila daljnja eksperimentalna ispitivanja zavara.

LITERATURA

[1] … http://www.wikipedia.org; → postupci zavarivanja

[2] Welding Handbook, The American Welding Society, Hialeah-Florida, 1998.

[3] ... http://www.lincolnelectric.eu

[4] ... http://www.boehler-welding.com

[5] ... http://www.esabna.com/euweb/AWTC/Lesson7

[6] Juraga, I.,Živčić, M.,Gracin, M., Reparaturno zavarivanje, Zagreb Montaža d.d., Zagreb, 1994.

[7] Linde Plin d.o.o., Praktični savjeti, MAG zavarivanje korozijski postojanih čelika

[8] ... http://www.thefabricator.com; Marty Rice, 2002.

[9] Kralj, S., Andrić, Š.,Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[10] … http://www.weldingengineer.com → zavarivačke nepravilnosti

[11] Lincoln Electric, The Procedure Handbook of Arc Welding, The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland, 1994.

[12] ... http://www.thefabricator.com; Mike Vandenberg, Tim Hensley, 2005.

[13] ... http://www.aksteel.com → kemijska i mehanička svojstva materijala

[14] Lukačević, Z., Zavarivanje, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.

[15] ... http://www.avestawelding.com

[16] ... http://www.techstreet.com; → ANSI/AWS A5.29/A5.29M:2005

[17] … http://www.weldingdata.com

[18] Science and technology of welding and joining, David, S.A., DebRoy, T., Bhadeshia, H. K. D. H., The Institute of Materials, Manley-London, 1996

[19] … http://www.patentstorm.com

[20] … http://www.robots.com, Robotic Automation: Flux Cored Welding

[21] ... http://www.robot-welding.com; → FCAW postupak zavarivanja

[22] Franz, M., Mehanička svojstva materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.

[23] … http://www.azom.com

[24] ... http://www.globalspec.com

[25] … http://www.freepatentsonline.com

[26] ... http://www.iso.org; The International Standard Organization, ISO standards

[27] Bajić, B., Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog i aktivnog gasa MIG-MAG, Gorenje-Varstroj, Lendava

[28] Grbin, M., Kovačević, B., Živčić, M., Elektrolučno zavarivanje u zaštiti plinova, Interweld Zagreb, Zagreb, 1996.

[29] Gojić, M., Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet Sisak, Sisak, 2003.

[30] ... http://www.millerwelds.ocom

DODATAK

POPIS NORMI VEZANIH UZ FCAW POSTUPAK ZAVARIVANJA

- **EN 758/ISO 17632/AWS A5.20** - Dodatni materijali – punjene žice za zavarivanje sitnozrnatih čelika sa ili bez zaštitnog plina.
- **EN 12071/ISO 17634/ANSI-AWS A5.29/A5.29 M:2005** – Dodatni materijali – punjene žice za elektrolučno zavarivanje čelika otpornih na puzanje. [14,15]
  Propis za niskolegirane čelične elektrode kod FCAW postupka daje uvjete za podjelu niskolegirajućih čeličnih elektroda, koji uključuju kemijski sastav i mehanička svojstva zavarenog metala i određene karakteristike pri korištenju.
  Dodatno, uključene su i neke vrste pomoći za poboljšanu čvrstoću i difuziju vodika. Dodatni zahtjevi za standardne veličine, oznake, proizvodnju i skladištenje također postoje. Na kraju je dodan propis kao izvor informacija koje se tiču podjele toga sustava i stvarne praktične upotrebe niskolegiranih čeličnih FCAW žica,
- **EN 12535/ISO 18276/AWS A5.29 -** Dodatni materijali – punjene žice za elektrolučno zavarivanje visokočvrstih čelika,
- **EN 12073/ISO17633/AWS A5.22** - Dodatni materijali – punjene žice za elektrolučno zavarivanje sa ili bez zaštitnog plina, nehrđajućih i vatrootpornih čelika,
- **AWS A5.15** – Dodatni materijali – punjene žice za elektrolučno zavarivanje ljevanog željeza,
- **DIN EN 1011-3** – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala - elektrolučno zavarivanje nehrđajućeg čelika,
- **ASTM G48-99a** – Standardna metoda za ispitivanje jamičaste korozije i korozije u procjepu kod nehrđajućih čelika i njegovih legura uz upotrebu otopine željeznog-klorida,
- **EN 29692** – Ručno elektrolučno zavarivanje, zavarivanje u zaštitnom plinu i plinsko zavarivanje – Priprema zavarenih spojeva na čeliku.