

Utjecaj parametara elektroplinskog zavarivanja na mehanička svojstva zavarenog spoja

Delač, Domagoj

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:235:113824>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-29**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Delač

Zagreb, 2016. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Domagoj Delač

Zagreb, 2016. godina.

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

Zahvaljujem prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu na mentorstvu i doc.dr.sc. Ivici Garašiću na savjetima, literaturi i pomoći koju sam dobio tijekom pisanja diplomskog rada, ali i tijekom cijelog studija.

Zahvaljujem se dr.sc. Matiji Bušiću na strpljenju, pomoći oko eksperimentalnog dijela rada te na svim ispravcima i savjetima kako bi ovaj rad bio što bolji.

Zahvala i djelatnicima Laboratorija za zavarivanje koji su mi praktično pomogli u izradi eksperimentalnog dijela rada te mi pomogli pri pisanju ovog rada savjetima i literaturom.

Na kraju, zahvaljujem i svima koji su bili uz mene tijekom studija i pomogli mi da sve ovo dovedem do kraja.

Domagoj Delač



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **DOMAGOJ DELAČ** Mat. br.: **0035173437**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ PARAMETARA ELEKTROPLINSKOG ZAVARIVANJA NA MEHANIČKA SVOJSTVA ZAVAREN OG SPOJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **EFFECT OF ELECTROGAS WELDING PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINT**

Opis zadatka:

Na osnovu literature proučiti postupak elektroplinskog zavarivanja. Analizirati utjecaj pojedinih parametara zavarivanja na mehanička svojstva spoja. Prikazati klasifikaciju dodatnih materijala uključujući i praškom punjene žice te primjenjive zaštitne plinove. Opisati značajke opreme za zavarivanje te ograničenja obzirom na primjenu u praksi kao i moguće nepravilnosti u zavarenom spoju.

U eksperimentalnom dijelu potrebno osmisliti plan pokusa kako bi se ustanovio utjecaj parametara elektroplinskog zavarivanja na mehanička svojstva zavara. Za odabranu debljinu osnovnog materijala definirati parametre zavarivanja uz primjenu plinske zaštite u atmosferi 100%CO₂ i mješavine 82 %Ar/18%CO₂. Analizirati proizvodnost u usporedbi s postupcima MAG zavarivanja te komentirati nastale deformacije nakon zavarivanja. Zaključno, odrediti operativni okvir parametara zavarivanja za odabranu debljinu osnovnog materijala.

Zadatak zadan:
29. rujna 2016.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2016.

Predviđeni datum obrane:
7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Čajner

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ..... | I |
| POPIS SLIKA..... | III |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS KRATICA..... | VI |
| POPIS OZNAKA..... | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| SUMMARY..... | IX |
| | |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. OSNOVE ELEKTROPLINSKOG ZAVARIVANJA..... | 2 |
| 2.1. Prednosti i nedostaci | 4 |
| 2.2. Metalurška i mehanička svojstva | 5 |
| 2.3. Varijante elektroplinskog zavarivanja | 8 |
| 2.3.1. Elektroplinsko zavarivanje s punom žicom | 8 |
| 2.3.2. Elektroplinsko zavarivanje s punjenom žicom | 9 |
| 2.3.3. Elektroplinsko zavarivanje s taljivom vodicom..... | 9 |
| 2.3.4. Elektroplinsko zavarivanje s dvije elektrode | 10 |
| 2.4. Primjena | 12 |
| 3. OPREMA..... | 14 |
| 3.1. Izvor struje | 17 |
| 3.2. Dodavač žice | 18 |
| 3.3. Vodicica elektrode | 18 |
| 3.4. Oscilator vodilice elektrode | 19 |
| 3.5. Kalupi (papuče)..... | 19 |
| 4. KLASIFIKACIJA DODATNOG MATERIJALA | 20 |
| 4.1. Pune elektrode..... | 20 |
| 4.2. Punjene elektrode | 22 |
| 5. ZAŠTITNI PLINOVI | 25 |
| 5.1. Ugljikov dioksid..... | 27 |
| 5.2. Mješavine argona i ugljikova dioksida | 28 |
| 6. PARAMETRI ZAVARIVANJA | 30 |
| 6.1. Napon..... | 30 |
| 6.2. Struja i brzina dodavanja žice | 31 |
| 6.3. Slobodni kraj žice..... | 32 |
| 6.4. Oscilacije elektrode..... | 33 |
| 6.5. Razmak korijena zavara | 33 |
| 7. PROBLEMI I NEPRAVILNOSTI | 34 |

| | |
|--|----|
| 7.1. Problemi s radom opreme | 34 |
| 7.2. Karakteristične nepravilnosti u zavarenom spoju | 35 |
| 7.2.1. Poroznost..... | 36 |
| 7.2.2. Pukotine..... | 38 |
| 7.2.3. Nepotpuno protaljivanje..... | 39 |
| 7.2.4. Pogreške oblika zavara..... | 40 |
| 8. PRIPREMA ZA ZAVARIVANJE | 43 |
| 8.1. Izgled spoja | 44 |
| 9. EKSPERIMENTALNI DIO | 45 |
| 9.1. Oprema za zavarivanje..... | 45 |
| 9.2. Osnovni i dodatni materijal..... | 50 |
| 9.3. Zaštitni plinovi | 53 |
| 9.4. Parametri zavarivanja..... | 53 |
| 9.5. Priprema i položaj elektrode | 55 |
| 9.6. Izvođenje zavarivanja | 57 |
| 9.7. Vizualno ispitivanje nakon zavarivanja | 59 |
| 9.8. Ispitivanje mehaničkih svojstava zavara..... | 61 |
| 9.8.1. Makroskopsko ispitivanje zavara..... | 61 |
| 9.8.2. Mjerenje tvrdoće | 63 |
| 9.8.3. Ispitivanje udarne radnje loma | 70 |
| 10. ZAKLJUČAK..... | 76 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 1. | Shematski prikaz EPZ-a [2] | 3 |
| Slika 2. | Prikaz zrna na vertikalnom presjeku kod EPZ-a [1] | 6 |
| Slika 3. | Usporedba profila poprečnog presjeka kod konvencionalnog EPZ-a i EPZ-a u uskom žlijebu [7]..... | 7 |
| Slika 4. | Shematski prikaz EPZ-a s pomičnim kalupima [1]..... | 8 |
| Slika 5. | Shematski prikaz EPZ-a s taljivim vodilicama [1]..... | 10 |
| Slika 6. | EPZ s dvije elektrode [11]..... | 11 |
| Slika 7. | Tipične primjene EPZ-a [1]..... | 13 |
| Slika 8. | Primjer opreme za EPZ [12]..... | 15 |
| Slika 9. | Shema glave za zavarivanje za EPZ [12] | 16 |
| Slika 10. | Oprema za EPZ na spremniku s pokretnim izvorom napajanja [7] | 17 |
| Slika 11. | Vodom hlađena pokretna papuča [2]..... | 19 |
| Slika 12. | Broj kapljica u ovisnosti o jakosti struje kod različitih žica i plinova [15]..... | 28 |
| Slika 13. | Utjecaj napona zavarivanja na izgled taline [1] | 31 |
| Slika 14. | Utjecaj struje zavarivanja na izgled taline [1] | 31 |
| Slika 15. | Utjecaj slobodnog kraja žice (CV karakteristika) na izgled taline [1] | 32 |
| Slika 16. | Karakteristične nepravilnosti u zavarenom spoju kod EPZ-a [1]..... | 36 |
| Slika 17. | Tipično pripremljeni spoj za EPZ [1]..... | 44 |
| Slika 18. | Tipičan izgled spoja za EPZ [1] | 44 |
| Slika 19. | Oprema za EPZ | 46 |
| Slika 20. | Izvor struje za zavarivanje s identifikacijskom pločicom | 47 |
| Slika 21. | Izgled i pozicija glave za zavarivanje [18]..... | 49 |
| Slika 22. | Kontrolna ploča glave za zavarivanje | 49 |
| Slika 23. | Tehnički list za dodatni materijal za zavarivanje VAC 60..... | 52 |

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 24. | Pripajanje pločice i ploča za zavarivanje | 55 |
| Slika 25. | Priprema za zavarivanje | 56 |
| Slika 26. | Upute za pozicioniranje elektrode [1] | 57 |
| Slika 27. | Položaj elektrode prije zavarivanja | 57 |
| Slika 28. | EPZ sa zaštitom C1 i trenutačnim vrijednostima parametara zavarivanja | 58 |
| Slika 29. | EPZ sa zaštitom M21 i povećanom brzinom gibanja kako se talina ne bi prelila. 58 | |
| Slika 30. | Izgled ploče s prednje i stražnje strane nakon zavarivanja | 59 |
| Slika 31. | Lice i korijen zavara uz zaštitu C1 (slika lijevo) i M21 (slika desno)..... | 60 |
| Slika 32. | Uređaj za izradu makroizbrusaka | 61 |
| Slika 33. | Makroizbrusak uzorka 1 – C1 | 62 |
| Slika 34. | Makroizbrusak uzorka 2 – M21 | 62 |
| Slika 35. | Uređaj za mjerenje tvrdoće..... | 64 |
| Slika 36. | Principi mjerenja kod Vickersove metode [23]..... | 64 |
| Slika 37. | Mjesta mjerenja tvrdoća na uzorku 1 | 65 |
| Slika 38. | Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 1 | 66 |
| Slika 39. | Mjesta mjerenja tvrdoća na uzorku 2 | 67 |
| Slika 40. | Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 1 | 68 |
| Slika 41. | Grafička usporedba tvrdoća uzoraka 1 i 2..... | 69 |
| Slika 42. | Oblik i dimenzije epruvete s V utorom za ispitivanje udarne radnje loma [24].... | 70 |
| Slika 43. | Položaj utora za ispitivanje udarne radnje loma VMT 0/0..... | 71 |
| Slika 44. | Epruvete za ispitivanje udarne radnje loma | 71 |
| Slika 45. | Charpyjev bat | 72 |
| Slika 46. | Ohlađivanje uzoraka na -40° | 73 |
| Slika 47. | Grafička usporedba udarne radnje loma za uzorak 1 i 2 | 74 |
| Slika 48. | Izgled prijelomne površine uzoraka iz zavarenih spojeva 1 i 2 | 75 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Temeljne razlike između EPT-a i EPZ-a [5] | 4 |
| Tablica 2. Primjeri čelika obično namijenjenih za EPZ [5] | 13 |
| Tablica 3. Zahtjevi kemijskog sastava za pune elektrode [14] | 21 |
| Tablica 4. Zahtjevi vlačnog ispitivanja [14]..... | 21 |
| Tablica 5. Zahtjevi ispitivanja žilavosti [14]..... | 22 |
| Tablica 6. Zahtjevi kemijskog sastava metala zavara od punjenih elektroda [14]..... | 23 |
| Tablica 7. Tipični iznosi struja ovisno o promjeru elektrode [1] | 32 |
| Tablica 8. Problemi s radom opreme [18]..... | 34 |
| Tablica 9. Uzroci nastajanja poroznosti i rješenja [18]..... | 37 |
| Tablica 10. Uzroci pogrešaka oblika zavara i rješenja [18] | 42 |
| Tablica 11. Specifikacija izvora struja [20] | 47 |
| Tablica 12. Specifikacija glave za zavarivanje [18]..... | 48 |
| Tablica 13. Kemijski sastav čelika S235 JR [21]..... | 50 |
| Tablica 14. Mehanička svojstva čelika S235 JR [21] | 51 |
| Tablica 15. Parametri zavarivanja..... | 54 |
| Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoća za uzorak 1 | 66 |
| Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoća za uzorak 2 | 68 |
| Tablica 18. Rezultati ispitivanja udarne radnje loma..... | 73 |
| Tablica 19. Operativni okvir parametara za debljinu materijala od 10 mm..... | 77 |

POPIS KRATICA

| Oznaka | Opis |
|---------------|--|
| EPZ | Elektroplinsko zavarivanje |
| EPT | Zavarivanje pod zaštitom troske |
| EPP | Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška |
| MIG | Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina |
| MAG | Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina |
| FCAW | Zavarivanje praškom punjenom žicom u plinskoj zaštiti |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| AISI | American Iron and Steel Institute |
| ZUT | Zona utjecaja topline |
| MZ | Metal zavara |
| OM | Osnovni metal |
| CV | Constant voltage |
| AWS | American Welding Society |
| EGW | Electrogas Welding |
| C1 | Zaštitni plin ugljikov dioksid |
| M21 | Zaštitni plin 82 % Ar + 18 % CO ₂ |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-------------------|---|
| R_e | N/mm ² | Konvencionalna granica razvlačenja |
| R_m | N/mm ² | Vlačna čvrstoća |
| A | % | Istezljivost |
| KV | J | Udarna radnja loma |
| CEV | % | Ugljični ekvivalent |
| T | °C | Temperatura |
| E | kJ/cm | Unos topline |
| U | V | Napon zavarivanja |
| I | A | Struja zavarivanja |
| F | N | Sila |
| d | mm | Dijagonala |
| k | | Faktor toplinske iskoristivosti procesa |
| v | mm/min | Brzina zavarivanja |
| E_p | J | Potencijalna energija |
| G | N | Težina |
| Φ | mm | Promjer elektrode |
| ρ | kg/m ³ | Gustoća |
| λ | W/mK | Toplinska vodljivost |
| Q | l/min | Protok zaštitnog plina |
| HB | | Tvrdoća po Brinellu |
| HV | | Tvrdoća po Vickersu |

SAŽETAK

U ovom radu obrađene su osnove elektroplinskog zavarivanja, varijante postupka te oprema, parametri, elektrode i zaštitni plinovi koji se koriste. Detaljno je opisana klasifikacija elektroda za EPZ. Razmotrene su promjene strukture metala zavara i ZUT-a zbog visokih unosa topline te njihov utjecaj na mehanička svojstva. Na kraju teorijskog dijela su opisani problemi kod zavarivanja te karakteristične greške i njihovi uzroci.

Ekperimentalni dio se sastojao od zavarivanja ploča čelika S235JR sa žicom za zavarivanje G3Si1 u zaštiti 100 % CO₂ i 82 % Ar/18% CO₂ te ispitivanja koja su se sastojala od vizualne kontrole, makroanalize, mjerenja tvrdoće i ispitivanja udarne radnje loma. Na kraju je dan operativni okvir parametara zavarivanja za konstrukcijski čelik debljine 10 mm.

Ključne riječi: elektroplinsko zavarivanje, EPZ, parametri, oprema, mehanička svojstva, dodatni materijal

SUMMARY

This paper covers basics of electrogas welding along with variations of process, equipment, process variables, electrodes and shielding gases used. Specification for electrodes for EGW is described in detail. Due to high heat input, changes in metal weld structure and in heat affected zone are discussed, as well as their effect on mechanical properties. The first part of this paper also deals with problems encountered in electrogas welding and with typical geometric imperfections and their causes.

The experimental part consisted of S235JR structural steel plates welding with G3Si1 solid wire and in 100 % CO₂ and 82%/18% shielding atmosphere and inspections that consisted of visual inspection, microscopic examination of welds, measurement of hardness and impact test. At the end of this paper there is the operational framework of the welding variables for structural steel of thickness 10 mm.

Key words: electrogas welding, EGW, proces variables, equipment, mechanical propeties, electrodes

1. UVOD

Elektroplinsko zavarivanje je postupak zavarivanja koji je nastao 60-ih godina prošlog stoljeća. Razvio se iz nastojanja da se ploče u vertikalnom položaju koje su tanje od onih kod zavarivanja pod zaštitom troske spoje u jednom prolazu. Time su tradicionalni postupci kojima se može zavarivati u vertikalnom položaju, kao što su MAG i FCAW, dobili ozbiljnog konkurenta. Elektroplinsko zavarivanje izvedbom je veoma slično EPT-u, dok se fizika procesa temelji na MAG zavarivanju, a dobivena struktura zavara je slična kao i kod EPP-a. EPZ-om se savladavaju sve teškoće koje postoje kod zavarivanja u više prolaza. Prednosti ovog postupka dolaze do izražaja kada je potrebno zavarivati dugačke, debele zavare (i do 100 mm) u vertikalnom položaju. Velike količine depozita, kvalitetan zavar bez deformacija i jednostavna priprema spoja čine ovaj postupak konkurentnim unatoč nekim ograničenjima. EPZ se najčešće upotrebljava za zavarivanje nelegiranih, niskolegiranih i čelika za posude pod tlakom. U našoj zemlji se rijetko upotrebljava čemu najbolje svjedoči da nema domaće literature o elektroplinskom zavarivanju. Ako znamo da je najveća primjena elektroplinskog zavarivanja u brodogradnji i proizvodnji spremnika, onda je zaista šteta što ovaj postupak nije našao širu primjenu u domaćoj industriji pogotovo kad su moguće značajne uštede njegovom primjenom.

Inicijalni problemi, odnosno skupoća opreme, priprema i obučavanje operatera te određena ograničenja u pogledu mehaničkih svojstava razlog su njegove male primjene. No, EPZ i dalje predstavlja jeftinije rješenje za debele i dugačke vertikalne zavare nego konvencionalni postupci. Razvojem dodatnih materijala i tehnika zavarivanja kod EPZ-a, kao i sve većim zahtjevima za automatizacijom može se očekivati njegova još veća upotreba.

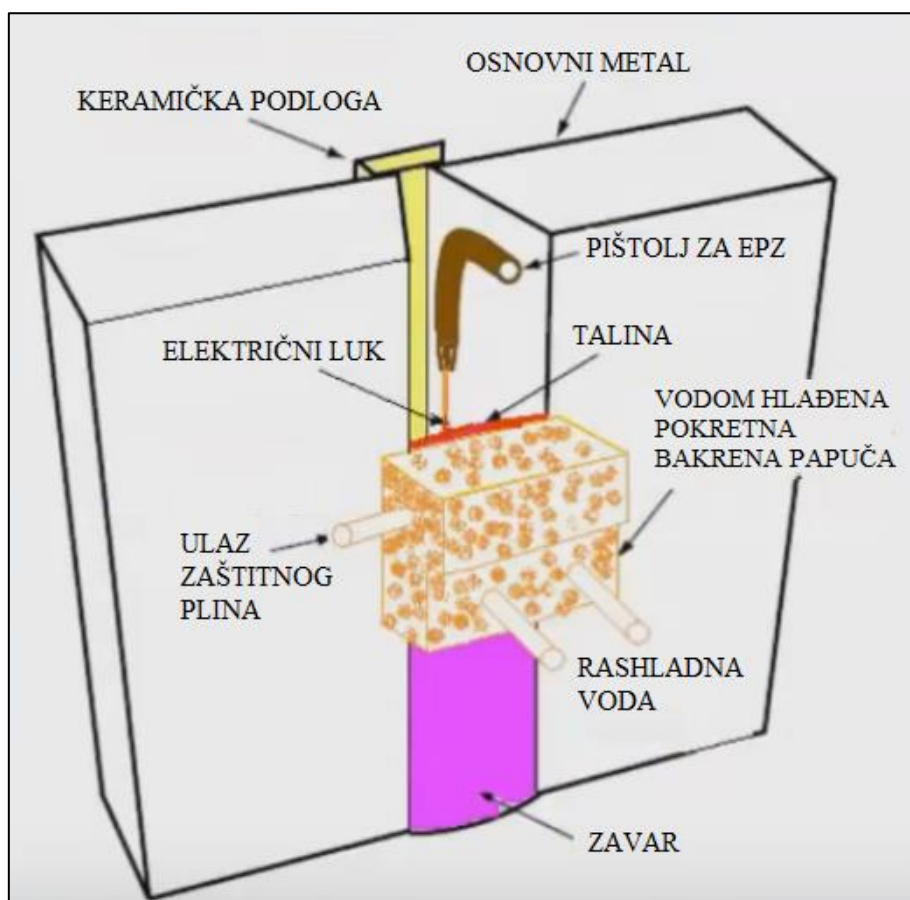
2. OSNOVE ELEKTROPLINSKOG ZAVARIVANJA

Elektroplinsko zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja koji koristi električni luk između dodatnog materijala u obliku kontinuirane elektrode i taline. Zavarivanje se izvodi u vertikalnom ili približno vertikalnom položaju s uporabom metalnih ili nemetalnih podloga koje ograničavaju rastaljeni metal zavara. Podloge su materijali ili uređaji, odnosno kalupi (papuče), koji se postavljaju s vanjske i unutarnje strane spoja kako bi podupirali i zadržavali rastaljeni metal zavara. Ovisno o vrsti podloge, one se mogu vezati sa spojem i tako postati dio zavara ili mogu ostati nevezane i uklonjene nakon zavarivanja. Proces se koristi sa ili bez vanjski dovođenog zaštitnog plina. Elektrode za EPZ su pune ili praškom punjene žice [1].

Taljiva elektroda, bilo puna bilo praškom punjena, dovodi se prema dolje u otvor korijena spoja, odnosno formiranu šupljinu koju čine osnovni materijal i kalupi koji sprječavaju bočno curenje i oblikuju zavar. Potreban je umetak, odnosno pločica ispod početka spoja kako bi se zatvorilo dno spoja što osigurava stabilnost i podupire rastaljeni metal dok se ne dosegne radni komad. Električni luk se uspostavlja između pločice i elektrode. Toplina koju generira električni luk tali kontinuiranu elektrodu i stranice žlijeba. Rastaljeni dodatni i osnovni materijal skupljaju se ispod električnog luka te se skrućuju i čine zavar. Kako se spoj puni metalom, tako se talina diže napredujući prema gore. Shematski prikaz EPZ-a prikazan je na slici 1.

Tipično se zavaruju debljine od 13 do 38 mm, iako je moguća upotreba za debljine od 10 do čak 100 mm. Za deblje materijale potrebne su horizontalne oscilacije kroz spoj da bi se jednako distribuirale toplina i depozit. Ako se upotrebljavaju pokretni kalupi, što je i najčešći slučaj, jedan ili oba se, zajedno s pištoljem za zavarivanje, gibaju prema gore kako se šupljina puni. Iako je gibanje vertikalno, metal zavara se ustvari deponira horizontalno na dnu šupljine [1].

EPZ je potpuno mehaniziran, odnosno automatiziran postupak. Zbog prirode taljenja i skrućivanja dobiva se kvalitetan depozit zavara. Kod zavarivanja u jednom prolazu gotovo da i nema kutnih deformacija.



Slika 1. Shematski prikaz EPZ-a [2]

Elektroplinsko zavarivanje prema normi za klasifikaciju postupaka zavarivanja EN ISO 4063:2009 spada u grupu ostalih postupaka zavarivanja te ima oznaku 73 pa se prema njoj označava sa ISO 4063 – 73 [3]. U tu grupu, između ostaloga, spada i postupak zavarivanja pod zaštitom troske (EPT) koji je sličan EPZ-u s iznimkom postojanosti električnog luka i mehanizma za zaštitu taline. Temeljne razlike su prikazane u tablici 1. Sličnosti su u pogledu opreme, pripreme spoja i procedure zavarivanja, a glavna razlika je u tome što se EPT temelji na električnoj provodnosti troske, a EPZ na električnoj provodnosti električnog luka. Prednost EPZ nad EPT-om je u manjem unosu topline, finijoj mikrostrukturi i poboljšanim svojstvima ZUT-a. Toplinska obrada nakon zavarivanja zato nije obavezna u mnogim primjenama EPZ-a što je važno jer je teško izvediva s obzirom na debljine i dimenzije konstrukcija za koje se primjenjuje. Proces, također, ima mogućnost lakšeg ponovnog pokretanja nego EPT kod kojeg je to komplicirano. Međutim, što je debljina osnovnog materijala veća, to zaštitni plin manje pokriva cijelu zonu spoja, što dovodi do neprihvatljive poroznosti. EPT je zato bolji

izbor kod debelih ploča (iznad 50 mm) jer zavari s tim postupkom pokazuju manje uključina i nepravilnosti [4].

Tablica 1. Temeljne razlike između EPT-a i EPZ-a [5]

| | Zavarivanje pod troskom | Elektroplinsko zavarivanje |
|----|---|--|
| 1. | Radi na principu električnog otpora u troski preko kojeg se dobiva toplinska energija za zavarivanje. | Toplina potrebna za zavarivanje se proizvodi električnim lukom uspostavljenim između elektrode i taline. |
| 2. | Nema električnog luka za vrijeme zavarivanja. | Električni luk se koristi za proizvodnju topline i tali metal. |
| 3. | Za EPT se može koristiti istosmjerna ili izmjenična struja. | Za EPZ se koristi samo istosmjerna struja. |
| 4. | Talina je zaštićena rastaljenim metalom. | Zaštitni plin se koristi za zaštitu rastaljenog metala. |

2.1. Prednosti i nedostaci

Neke prednosti povezane s EPZ-om rezultiraju značajnim uštedama, prvenstveno kod zavarivanja debljih materijala, u usporedbi s konvencionalnim zavarivačkim postupcima kao što su EPP ili FCAW. Čak i u nekim primjenama koje uključuju tanje osnovne materijale, EPZ može dovesti do ušteda zbog učinkovitosti i jednostavne pripreme spoja. Neke prednosti EPZ-a su sljedeće [6]:

- Visoka stopa depozita (od 16 do 20 kg/h po elektrodi).
- Predgrijavanje najčešće nije potrebno, čak i za materijale visoke zakaljivosti.
- Visoka kvaliteta depozita; metal zavara ostaje rastaljen dovoljno dugo dopuštajući plinovima da izađu i troski da pluta na vrhu zavara.
- Minimalna priprema spoja i zahtjevi za namještanjem; glodani rubovi i toplinski rezani sučeljeni I-spojevi se normalno upotrebljavaju.
- Visoka intermitencija; proces je automatski i jednom pokrenut traje do kraja; nema umaranja operatera.

- Minimalno rukovanje materijalom; spoj treba biti postavljen tako da os zavara bude pozicionirana vertikalno ili približno vertikalno; nema rukovanja materijalom kad zavarivanje počne.
- Eliminacija prskanja što rezultira efikasnošću deponiranja dodatnog materijala od 100 %.
- Minimalne deformacije; nema kutnih deformacija u horizontalnoj ravnini dok su u vertikalnoj ravnini minimalne i lako se kompenziraju.

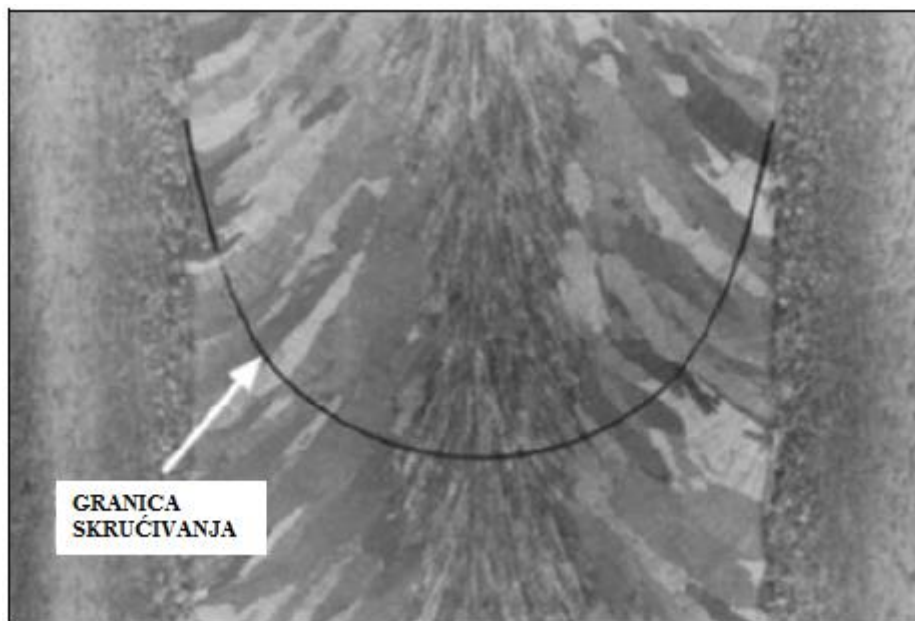
Neki nedostaci kod EPZ-a su sljedeći [1, 6]:

- EPZ-om se u praksi zavaruju samo nelegirani i niskolegirani čelici.
- Spoj mora biti pozicioniran vertikalno ili približno vertikalno.
- Kad zavarivanje krene mora se provesti do kraja jer može doći do nepravilnosti, a popravci koji se zahtijevaju zbog prekida su teški.
- Kompleksne oblike materijala je teško ili nemoguće zavariti.
- Edukacija operatera traje dugo i presudna je za uspješnost procesa.
- Početni troškovi opreme su visoki i vrijeme uvođenja može biti dugo.
- Visok unos topline uzrokuje nižu žilavost u metalu zavara i ZUT-u.

2.2. Metalurška i mehanička svojstva

Ovaj postupak karakterizira visok unos topline i depozita zbog čega se metalurška i mehanička svojstva razlikuju od drugih elektrolučnih postupaka. Glavni nedostatak u kontekstu mehaničkih svojstva kod EPZ-a niska je žilavost metala zavara i ZUT-a zbog visokog unosa topline. Prema [7] u industrijskoj praksi EPZ-om se mogu postići odgovarajuće žilavosti zavara do -20°C . Ispod te temperature, tipični izgledi spojeva i dodatni materijali ne mogu osigurati najmanju zajamčenu žilavost, pogotovo u metalu zavara.

EPZ karakteriziraju relativno spore brzine zavarivanja od 36 mm/min do 180 mm/min zbog čega djelovanje topline duže traje [1]. To ima za posljedicu grubozrnatu strukturu metala zavara s tendencijom stupičastog rasta. Dominantna značajka metala zavara kod EPZ-a su upravo krupna stupičasta zrna koja nastaju zbog sporog skrućivanja zavara. Stupičasta zrna su okomita na granicu između tekućeg i čvrstog metala tijekom zavarivanja, slika 2.



Slika 2. Prikaz zrna na vertikalnom presjeku kod EPZ-a [1]

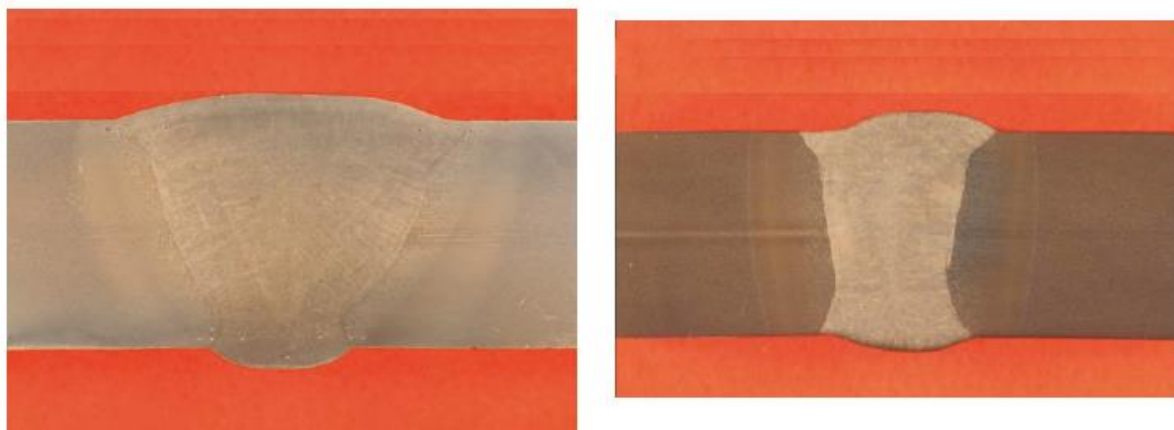
Zavare s velikim stupičastim zrnima karakterizira niža žilavost i viša prijelazna temperatura nego zavare s jednakoosnim ili dendritnim zrnima. Pravilnom izvedbom zavora, korištenjem odgovarajuće legiranih elektroda i kontrolom uvjeta zavarivanja, mogu se postići iste, čak i bolje vrijednosti žilavosti nego kod osnovnog materijala [1].

ZUT je širi nego kod konvencionalnog elektrolučnog zavarivanja i ima značajno pogrubljenje zrna kod linije stapanja. Zbog produženog djelovanja topline hlađenje je sporo. To, osim rasta zrna, ima za posljedicu ZUT bez nepoželjnih tvrdih struktura koje su karakteristične kod zavarivanja nelegiranih i niskolegiranih čelika konvencionalnim postupcima. Profil tvrdoće je zato kod EPZ-a relativno ujednačen u usporedbi s drugim elektrolučnim postupcima. ZUT može imati niže vrijednosti žilavosti zbog značajnog rasta zrna kod linija staljivanja. Žilavost u ZUT-u za mnoge konstrukcijske i čelike za izradu posuda pod tlakom više ovisi o žilavosti osnovnog materijala nego o uvjetima zavarivanja.

Za upotrebu kod koje se zahtijeva odgovarajuća žilavost pri niskim temperaturama ili kod promjenjivog naprezanja, elektroplinski proces mora biti temeljito testiran. EPZ može smanjiti žilavost u ZUT-u u tolikoj mjeri da se proces može razmatrati samo nakon cjelokupne toplinske obrade. Toplinskom obradom nakon zavarivanja može se povećati žilavost čime se omogućava upotreba EPZ-a pri niskim temperaturama.

Kako toplinska obrada najčešće nije moguća na konstrukcijama koje se izrađuju EPZ-om, visoka žilavost na niskim temperaturama može se postići primjenom uskog žlijeba i prilagođenih dodatnih materijala [8].

Istraživanja [7] su pokazala da se smanjenim depozitom i upotrebom boljih dodatnih materijala mogu postići potrebne žilavosti do -40°C . Smanjenje depozita i unosa topline postiglo se vrstom spoja i tehnikom zavarivanja. Najvažniji faktor kod poboljšavanja žilavosti metala zavara i ZUT-a je smanjenje volumena spoja. Mali volumen spoja značajno smanjuje unos topline kod zavarivanja. Kod debljina od 25 mm upotreba uskog žlijeba smanjila je unos topline za 27 % u usporedbi s konvencionalnim EPZ-om. To je, osim smanjenim žlijebom, postignuto i osciliranjem elektrode. Uski žlijeb je omogućio i upotrebu elektrode manjeg promjera. Osciliranjem elektrode može se postignuti penetracija po cijelom spoju, a dodatna je prednost i miješanje taline što dovodi do finije strukture spoja. Na slici 3. prikazana je usporedba profila poprečnog presjeka zavara s V pripremom spoja. Na lijevoj slici zavar je napravljen konvencionalnim EPZ-om s kutom otvora žlijeba od 55° , a na desnoj slici je EPZ u uskom žlijebu s kutom od 25° . Debljina osnovnog materijala je 25 mm. Značajno je smanjena količina depozita te samim time i unesena toplina što rezultira boljom žilavošću.



Slika 3. Usporedba profila poprečnog presjeka kod konvencionalnog EPZ-a i EPZ-a u uskom žlijebu [7]

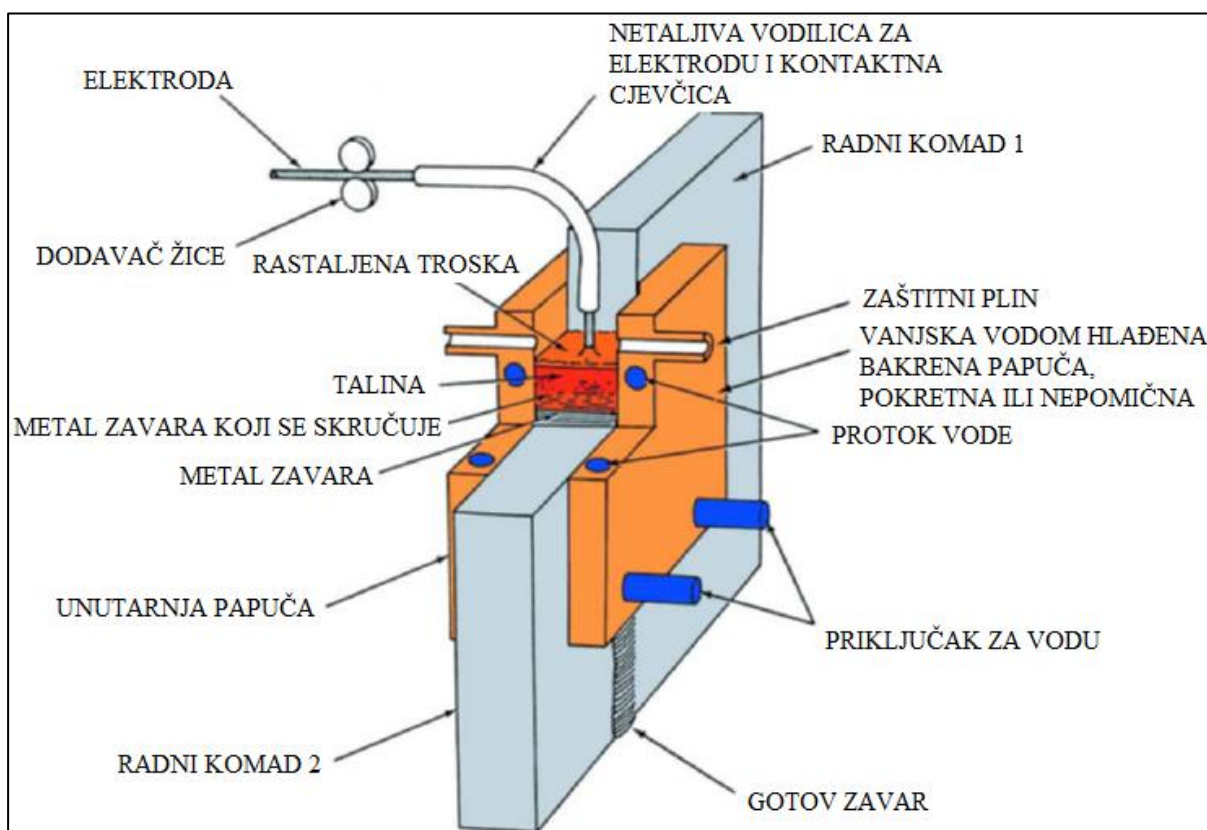
Također, EPZ je visoko taljiv proces u kojem rastaljeni osnovni metal čini oko 35 % metala zavara čime on značajno pridonosi žilavosti. Zato se sastav i mehanička svojstva metala zavara mogu značajno razlikovati kod čelika drugačijeg kemijskog sastava, čak i kod čelika istog sastava s drugačijim unosom topline. Elektrode modificiranog kemijskog sastava

(oznaka G) se razvijaju računajući na visoku taljivost EPZ-a s ciljem da se postigne odgovarajuća žilavost pri niskim temperaturama i zadrži niska tvrdoća metala zavara.

2.3. Varijante elektrotinskog zavarivanja

2.3.1. Elektrotinsko zavarivanje s punom žicom

Na slici 4. shematski je prikaz EPZ-a s punom elektrodom i pokretnim kalupima. Obično se dovodi jedna žica u spoj kroz netaljivu vodilicu. Elektrode koje se koriste su iste kao i za MIG/MAG zavarivanje. Za debele stijenke mogu se koristiti horizontalne oscilacije. Zaštitni plin, obično CO₂ ili Ar-CO₂, dovodi se u šupljinu zavara kroz otvore za plin na pomičnoj papučici, kroz plinsku kutiju ili sapnicu. Normalno se primjenjuju vodom hlađene bakrene papuče s obje strane spoja koje zadržavaju rastaljeni metal zavara. U brodogradnji se češće upotrebljava keramička podloga s unutarnje, skrivene strane nego pokretna papučica [2]. Papučice se automatski vertikalno pomiču prema gore s pištoljem za zavarivanje i obično su priključene na glavu za zavarivanje. Koriste se struje do 400 A. Vertikalno gibanje mora biti ujednačeno s količinom depozita. Gibanje kontrolira operater zavarivanja [1].



Slika 4. Shematski prikaz EPZ-a s pomičnim kalupima [1]

2.3.2. Elektrolinsko zavarivanje s punjenom žicom

Principi i karakteristike funkcioniranja su isti kao i kod EPZ-a s punim žicama tako da shema prikazana na slici 4. odgovara i za ovu varijantu. Kod punjenih žica stvara se tanak sloj troske između kalupa i metala zavora i tako se dobiva glatko lice zavora. Upotreba zaštitnog plina je najčešće nepotrebna ako se koriste samozaštitne punjene žice. Za zavarivanje praškom punjenih žica koriste se struje do 750 A [9]. Punjene žice klasificirane su posebno za EPZ.

2.3.3. Elektrolinsko zavarivanje s taljivom vodilicom

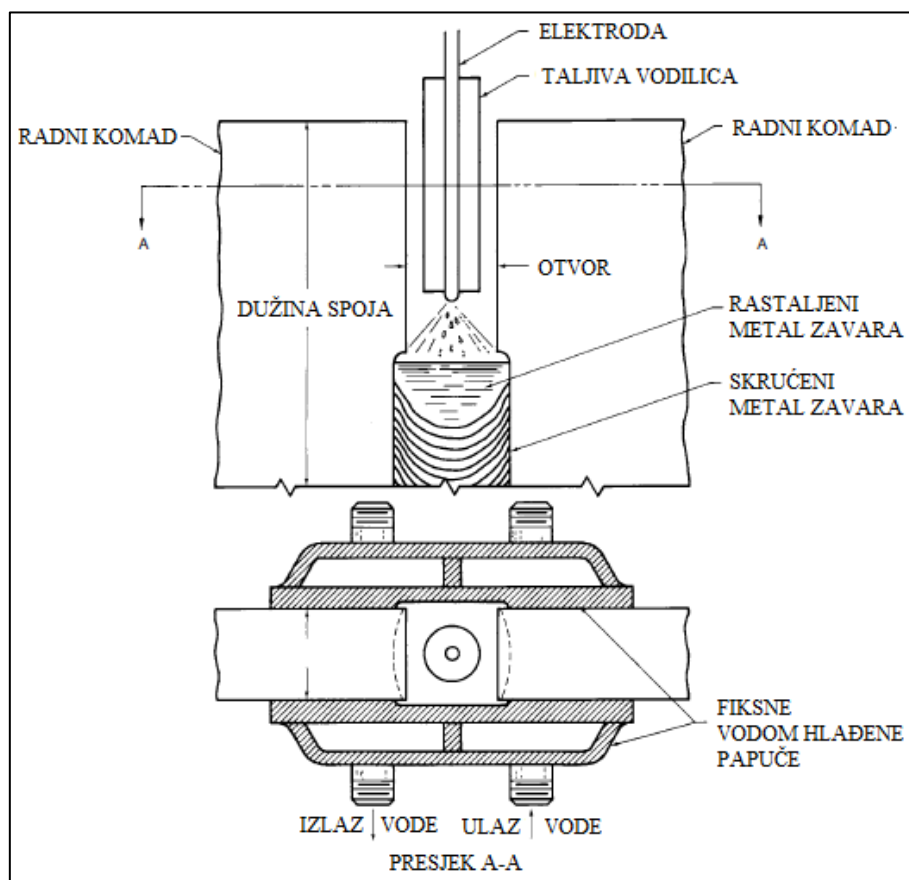
Ova varijanta EPZ-a primarno se upotrebljava za kratke zavora od 1 do 1,5 m i koristi relativno jednostavnu opremu koja se sastoji do izvora struje, kontrolnog uređaja, dodavača žice i kalupa. Taljiva vodilica je prispojena na kontaktnu vodilicu koja se ne tali. Za ovu varijantu upotrebljavaju se samozaštine praškom punjene žice (oznaka 1) [10].

Kod ove varijante, za razliku od konvencionalnog EPZ-a s pokretnim papučama, vertikalno se ne pomiče ni jedan dio opreme. Elektroda se kao i kod konvencionalnog EPZ-a dovodi u električni luk, ali kroz stacionarnu taljivu vodilicu koja se proteže cijelom dužinom spoja do oko 25 mm od dna spoja, slika 5. Na početku, elektroda viri oko 25 mm izvan taljive vodilice. Luk se uspostavlja isto kao i kod procesa s pokretnim papučama. Kako zavar vertikalno napreduje, tako se elektroda tali unatrag do vodilice dok se električni luk održava. Tada se razvija ustaljeno taljenje žice i taljive vodilice koje traje dok se zavar ne završi. Tipičan vanjski promjer taljive vodilice je od 13 do 16 mm, iako može biti i manji za tanje materijale, a unutarnji je od 3 do 5 mm. Sastav taljive vodilice, koja čini između 5 i 30 % depozita dok ostatak čini metal elektrode, mora odgovarati onom osnovnog materijala. Dužine vodilice mogu biti različite, ali obično su do 3 m. Za neke varijante vodilice se mogu međusobno zavariti kako bi bile smještene u duže spojeve.

Kod debljih materijala nije preporučljivo osciliranje taljivih vodilica dužih od 1 m jer dolazi do ljuhanja donjeg kraja te se može iskriviti i izgubiti krutost zbog zagrijavanja. Tada je bolja opcija upotreba dvaju ili više vodilica i elektroda.

U ovoj varijanti papuče su neovisne o pištolju za zavarivanje. Papuče mogu biti fiksirane pomoću klinova i potpornih nosača koji se zavaruju na radni komad. Za duže spojeve moguće

je naslagati više papuča. Ovu varijantu moguće je upotrebljavati i za kompleksno oblikovane spojeve, ali je onda potrebno prilagoditi vodilicu [1].



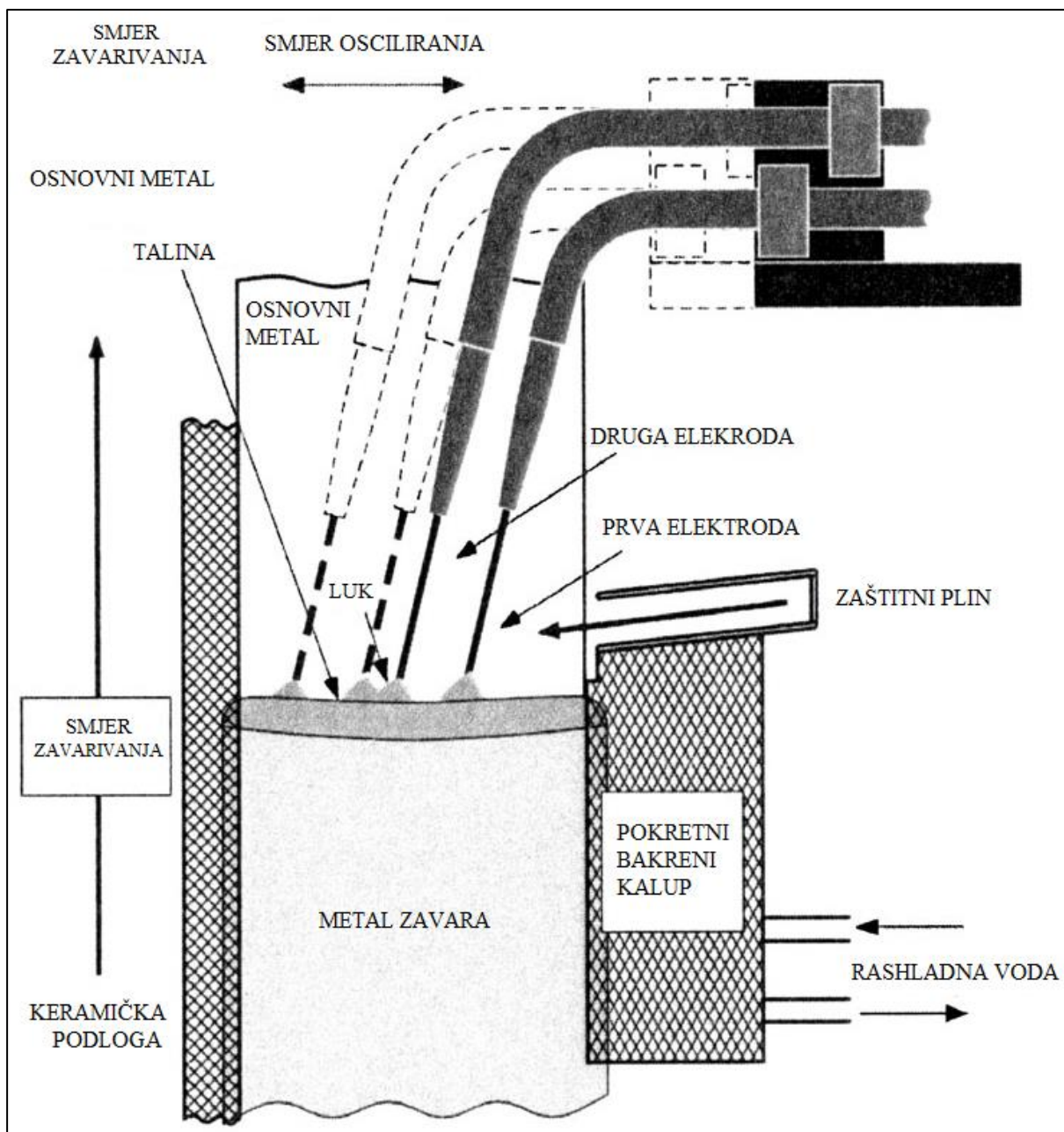
Slika 5. Shematski prikaz EPZ-a s taljivim vodilicama [1]

Za taljive vodilice najčešće se koristi ugljični čelik gradacije AISI 1008 do 1020. Za neke upotrebe, taljive vodilice prevučene su s praškom koji osigurava zaštitnu trosku i izolira vodilicu da ne dotiče bočne stijenke ili bakrene papuče. Moguće je koristiti i topljive keramičke izolatore u obliku prstena pričvršćene za cijev. Taljive vodilice razrijeđuju sadržaj legure metala zavara.

2.3.4. Elektrolinsko zavarivanje s dvije elektrode

Zbog svoje efikasnosti EPZ se koristi kod debelih materijala, ali kod materijala debljina iznad 50 mm može doći do nedovoljnog protaljivanja. Kako bi se tom i ostalim problemima stalo na kraj, može se upotrijebiti varijanta s dvije žice koja je ekonomičnija od zavarivanja u dva prolaza. Za razliku od EPZ-a s jednom žicom kod kojeg se kod debljina materijala iznad 50

mm teško postiže potpuno protaljivanje unatoč opciji osciliranja, ovom varijantom EPZ-a moguće je zavarivati debljine materijala od 50 do 70 mm bez pogrešaka [11]. Zahvaljujući ravnomjernom unosu topline kod varijante s dvije elektrode mogu se postići dobra mehanička svojstva spoja. Oprema je prema slici 6. načelno ista kao i kod konvencionalnog EPZ-a, samo što je omogućeno lako montiranje druge elektrode za debele materijale.



Slika 6. EPZ s dvije elektrode [11]

Polaritet elektroda mora biti različit jer kod istog polariteta električni luk postaje jako nestabilan što dovodi do značajnog prskanja. Kad je elektroda na pozitivnom polu, šav je širi,

a stapanje je pliće, dok je kod negativnog pola šav uži, a stapanje je dublje. Iz tog razloga, kod sučeljenog V-spoja, elektroda na pozitivnom polu se smješta na širu stranu žlijeba zbog mogućnosti šireg protaljivanja, dok je negativna elektroda smještena u užu, stražnji dio žlijeba. Prednosti ove varijante nad postupkom s jednom elektrodom su [11]:

1. Stabilna penetracija metala zavara – ova varijanta olakšava primjenu i smanjuje mogućnost pogreška kao što su nedovoljno protaljivanje ili loša penetracija što je karakteristično za debljine materijala iznad 50 mm.
2. Poboljšana efikasnost zavarivanja – brzina zavarivanja je dva puta veće nego kod EPZ-a s jednom elektrodom, odnosno za istu pripremu spoja dva puta je veća stopa deponiranja. Budući da je vrijeme pripreme isto za obje varijante, onda je efikasnost dva puta veća kod varijante s dvije elektrode. Također, moguće je zavariti dva puta duži spoj bez prekidanja procesa.
3. Smanjena potrošnja zaštitnog plina – budući da je brzina zavarivanja udvostručena, količina zaštitnog plina je po prolazu približno prepolovljena.
4. Primjena u brodogradnji – kod zavarivanja čelika kod kojih se traži dobra žilavost pri niskim temperaturama presudan je unos topline. Ovom varijantom moguće je postići finu mikrostrukturu pri visokom unosu topline i dobra mehanička svojstva u ZUT-u. Sve veće dimenzije kontejnerskih brodova zahtijevaju upotrebu debljih materijala i većih čvrstoća zbog čega se može očekivati sve šira primjena EPZ-a s dvije elektrode.

2.4. Primjena

EPZ se najčešće koristi u SAD-u, Japanu, J. Koreji, Kini, a rjeđe u Europi [8]. Primjenjuje se za sve vertikalne spojeve kod debljine materijala od 10 do 100 mm. Upotrebljava se za izradu spremnika, trupova brodova, konstrukcijskih elemenata i posuda pod tlakom [6]. Navode se primjene i u izradi mostova, cijevi debelih stijenki i velikog promjera te podmornica [9]. Na slici 7. su prikazane tipične primjene EPZ-a u brodogradnji (slika lijevo) i u izradi spremnika (slika desno).



Slika 7. Tipične primjene EPZ-a [1]

EPZ se najčešće koristi za zavarivanje:

1. niskougljičnih čelika,
2. konstrukcijskih čelika,
3. čelika za izradu posuda pod tlakom.

Tablica 2. Primjeri čelika obično namijenjenih za EPZ [5]

| Niskougljični čelici AISI | Konstrukcijski čelici ASTM | Čelici za izradu posuda pod tlakom ASTM |
|------------------------------|-------------------------------|--|
| 1010 | A 36 | A 285 |
| 1018 | A 131 | A 515 |
| 1020 | A 242 | A 516 |
| | A 283 | A 537 |
| | A 441 | |
| | A 572 | |
| | A 573 | |
| | A 588 | |

Osim toga, moguće je zavarivati i debele aluminijske stijenke uz upotrebu praška s velikim udjelom fluorida i inertnog zaštitnog plina [4]. Zavarivanje poboljšanih čelika ili normaliziranih čelika ograničeno je propisima za neke primjene, npr. pri izgradnji mostova kod dijelova koji su vlačno ili promjenjivo opterećeni [1]. Jedan od razloga je i u velikom unosu topline karakterističnom za EPZ zbog čega dolazi do smanjenja čvrstoće kod nekih poboljšanih čelika u ZUT-u zbog niske brzine hlađenja. Kod tih čelika moralo bi se s naknadnom toplinskom obradom povratiti originalna svojstva osnovnog metala. Kod normaliziranih sitnozrnatih čelika povišene čvrstoće veliki unos topline može negativno djelovati na žilavost jer dolazi do rasta zrna.

3. OPREMA

Strojevi za elektroplynsko zavarivanje variraju u veličini od prijenosnih jedinica teških 35 kg koje su najčešće samohodne do masivnih strojeva koji se pomiču pomoću kranova od jednog do drugog zavora.

Osnovna oprema za EPZ sastoji se od [1]:

1. istosmjernog izvora struje,
2. dodavača žice,
3. papuča za zadržavanje rastaljenog metala,
4. vodilice za elektrodu,
5. mehanizma za osciliranje vodilice elektrode,
6. opreme za opskrbu zaštitnim plinom, ako se koristi,
7. sustava za vodeno hlađenje papuča.

Na slici 8. prikazana je oprema za EPZ čiji je proizvođač ESAB. Ona se primjenjuje za zavarivanje u izgradnji brodova i spremnika u vertikalnom položaju za ploče debljine do 34 mm uz osciliranje i visine do 3000 mm [12]. Kako bi se ostvario konstantan napon luka, vertikalno gibanje glave za zavarivanje je najčešće automatsko.



GLAVA ZA ZAVARIVANJE



KONTROLNA PLOČA



SUSTAV ZA DOVOĐENJE ŽICE



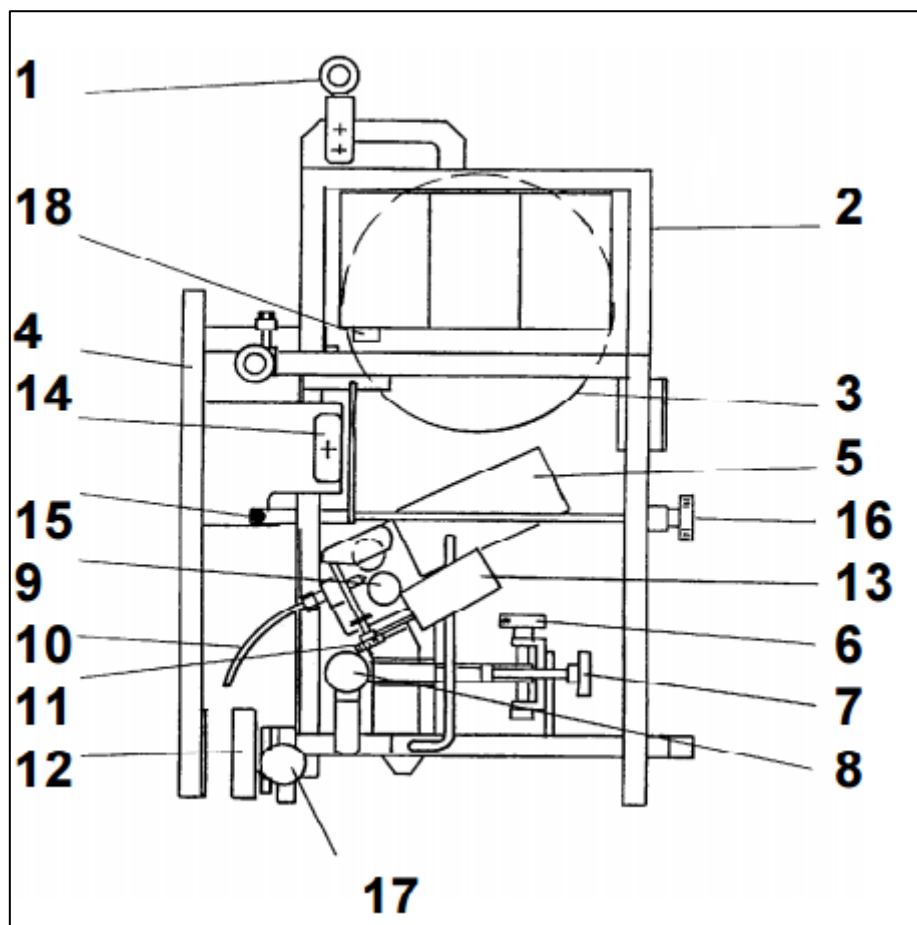
IZVOR STRUJE ZA ZAVARIVANJE
+ ZAŠTITNI PLIN



SUSTAV ZA VODENO HLAĐENJE

Slika 8. Primjer opreme za EPZ [12]

Schema glave za zavarivanje čije je proizvođač, također, ESAB prikazan je na slici 9.



Slika 9. Shema glave za zavarivanje za EPZ [12]

Ona se sastoji od: 1. kuke za podizanje, 2. kontrolne kutije, 3. kalema za žicu, 4. stražnje papuče, 5. elektromotora, 6. kutne regulacije jedinice za dodavanje žice, 7. poprečne regulacije jedinice za dodavanje žice, 8. uzdužne regulacije jedinice za dodavanje žice, 9. dodavača žice, 10. sapnice, 11. regulacije pritiska dodavača žice, 12. prednje papuče, 13. fotoćelija, 14. podupirača stražnje papuče, 15. fiksatora stražnje papuče, 16. regulatora stražnje pauče, 17. regulatora prednje papuče, 18. reflektora (opcionalno).

Oprema za elektroplinsko zavarivanje za teške uvjete rada prikazana je na slici 10. Jedinica sadrži pokretni izvor napajanja koji se može pomicati pomoću platforme za pomicanje od jednog vertikalnog šava do drugog na svakoj razini spremnika. Time se povećava sigurnost i efikasnost procesa jer se eliminira povlačenje kablova po podu [7].



Slika 10. Oprema za EPZ na spremniku s pokretnim izvorom napajanja [7]

3.1. Izvor struje

Za EPZ najčešće se upotrebljavaju istosmjerni izvori struje s elektrodom priključenom na + pol (isto kao i kod MIG/MAG zavarivanja). Istosmjerni izvori se koriste zbog stabilnosti električnog luka. Najviše se upotrebljavaju ispravljači za zavarivanje, a ako to nije moguće, onda se upotrebljavaju generatori pokretani motorom s unutarnjim izgaranjem ili elektromotorom [1]. Statička karakteristika izvora za zavarivanje je najčešće ravna, odnosno blagopadajuća pa je napon struje konstantan (*eng. Constant Voltage*). To znači da izvor održava napon struje konstantnim dok se jačina struje mijenja visinom električnog luka. Kod CV karakteristike se teži održati visinu luka konstantnom, ali bilo kakva promjena visine luka povlači za sobom drastičniju promjenu jakosti struje što ujedno znači i veliku promjenu količine depozita koja se polaže na radni komad. Takav efekt se naziva i „samoregulacija“ električnog luka. Dodavač žice je kontroliran izvorom struje za zavarivanje, točnije povratnom informacijom o izlaznom naponu kojim se održava električni luk. S povećanjem napona povećava se i brzina dodavanja žice – tj. količina depozita, a s obzirom da promjene

napona nisu skokovite kao kod ručnih postupaka, dobivamo kontinuiranu brzinu dodavanja depozita uz mogućnost precizne kontrole [13].

Izvor struje za zavarivanje mora omogućiti dovođenje tražene struje bez prekidanja za vrijeme zavarivanja što može trajati satima. Kapaciteti izvora za zavarivanje za EPZ su od 750 do 1000 A pri 30 do 55 V. Od njih se traži da intermitencija za te kapacitete bude 100 %.

3.2. Dodavač žice

Dodavač žice sastoji se od elektromotora, kotačića i pomoćnog uređaja za poravnavanje žice i pritiska. Dodavači s konstantnom brzinom dodavanja žice koriste se s CV izvorom za zavarivanje. Koriste se dodavači sa 2 i 4 kotačića. Podešavanje pritiska kotačića omogućuje primjenu različitih sila na žicu ovisno o njenim karakteristikama, npr. puna ili punjena. Dodavač elektroda najčešće je „push“ sustav koji se koristi i kod automatiziranog MIG/MAG i FCAW postupka. „Push“ sustav gura žicu kroz bužir pomoću kotačića u uređaju za dodavanje žice. Kotačići moraju biti dovoljno pritisnuti kako bi osigurali trenje pomoću kojeg guraju žicu. Dodavač žice može biti montiran kao sastavni dio glave za zavarivanje. Brzina dodavanja žice je do 14 m/min za promjer elektrode od 3,2 mm. Dodavač može sadržavati i ispravljач žice što je važno kod EPZ-a s pokretnim papučama jer je tamo slobodni kraj žice relativno dugačak, tipično oko 75 mm za samozaštitne praškom punjene elektrode. Važno je da žica bude ravna prilikom izlaska iz vodilica jer se time osigurava točan plasman žice i položaj električnog luka u spoju. Dodavač mora bi sposoban za glatko kontinuirano dodavanje žice malih promjera pri visokim brzinama i velikih promjera pri malim brzinama [1].

3.3. Vodilica elektrode

Vodilice za elektrodu su vodljivi, potporni dijelovi kroz koje prolazi puna ili praškom punjena žica. Najčešće su cjevastog oblika i slične su pištoljima kod poluautomatskih MIG/MAG i FCAW postupaka zavarivanja. Vodilica može imati izlaz za zaštitni plin kako bi dostavila plin do isturene elektrode te može biti hladena vodom. Vrlo je važno uzeti u obzir razmak u korijenu zavara kako bi vodilica mogla nesmetano ući i kako bi imala prostora za horizontalno osciliranje. Zato se širina vodilice ograničava na 10 mm jer je minimalni razmak u praksi 18 mm za EPZ s pokretnim papučama [1].

3.4. Oscilator vodilice elektrode

Za debljine materijala od 30 do 100 mm kod EPZ-a s pokretnim papučama električni luk bi se morao pomicati naprijed nazad, odnosno oscilirati između papuča i iznad taline kako bi se postiglo ujednačeno deponiranje materijala i osiguralo protaljivanje obje stranice žlijeba. Za manje debljine osnovnog materijala od 30 mm nije potrebno osciliranje osim ako se želi smanjiti penetracija u osnovni metal i poboljšati svojstva zavara modifikacijom rasporeda skrućivanja. Horizontalno gibanje naprijed-nazad ostvaruje se sustavom koji oscilira vodilicu elektrode i omogućuje podešavanje vremena zastoja na krajnjim točkama osciliranja (*dwell time*) [1].

3.5. Kalupi (papuče)

Najčešće se upotrebljavaju kalupi, tj. papuče od bakra koji se ne spajaju s metalom tijekom zavarivanja. Oni su pritisnuti na radni komad s jedne ili s obje strane i tako zadržavaju rastaljeni metal u korijenu zavara. Osim njih, upotrebljavaju se još keramičke i čelične papuče koje se spajaju s metalom zavara tijekom zavarivanja. Bakrene papuče se hlade vodom što je prednost pred papučama koje se ne hlade jer su kod njih sporije brzine hlađenja što može utjecati na mehanička svojstva. Kad se koristi zaštitni plin, mogu se nabaviti pokretne papuče s plinskim priključcima kroz koje se zaštitni plin dostavlja direktno u šupljinu koju čine žlijeb i papuče. Na slici 11. je prikazana pokretna vodom hlađena papuča s ulazom za zaštitni plin te ulaznom i izlaznom cjevčicom za rashladnu vodu. Križni utor služi kako bi se papuča pritisnula na radni komad.



Slika 11. Vodom hlađena pokretna papuča [2]

4. KLASIFIKACIJA DODATNOG MATERIJALA

Kod elektroplinskog zavarivanja upotrebljavaju se sljedeće elektrode [14]:

- pune elektrode sa zaštitnim plinom,
- punjene elektrode sa zaštitnim plinom,
- punjene elektrode bez zaštitnog plina (samozaštitne).

4.1. Pune elektrode

Elektrode koje se koriste kod EPZ-a identične su onima koje se koriste kod MIG/MAG zavarivanja, no mehanička svojstva zavara će se razlikovati ovisno u postupku zavarivanja. Kad se koriste pune elektrode najčešće se koristi samo zaštitni plin, a prašak se gotovo ne upotrebljava. No, na početku zavarivanja može se dodati malo zrnastog praška [4].

Pune elektrode isporučuju se u promjerima od 0,8 do 3,2 mm a s njima se zavaruje materijal debljine od 10 do 100 mm. Zaštitni plin koji se najčešće upotrebljava je ugljikov dioksid (CO₂) ili mješavina argon – ugljikov dioksid (Ar - CO₂). On se dostavlja u šupljinu zavara kroz ulaze u pokretnim papučama, sapnicu ili plinsku kutiju [1].

Norma ANSI/AWS A5.26/A5.26M klasificira pune elektrode prema kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima zavara. One se označavaju, koristeći jedinice iz SI sustava, na način da:

- prva dva slova označavaju postupak zavarivanja (EG – elektroplinsko zavarivanje),
- druga dva broja najmanju vlačnu čvrstoću umanjenu 10 puta,
- treća oznaka indicira najmanju temperaturu pri kojoj je žilavost metala zavara veća od 27 J,
- četvrta oznaka ima slovo S koja označavaju punu elektrodu (oznaka T označava punjenu žicu),
- zadnja oznaka indicira kemijski sastav pune elektrode (1, 2, 3, 5, 6, D2 ili G).

Kemijski sastav punih elektroda sličan je sastavu elektroda za ugljične i niskolegirane čelike za elektrolučne postupke zavarivanja sa zaštitnim plinom, iako će metal zavara imati drugačija mehanička svojstva. U tablici 3. dani su zahtjevi za kemijski sastav punih elektroda. Dopuštene vrijednosti masenog udjela bakra mogu se odnositi na prevlaku elektroda.

Tablica 3. Zahtjevi kemijskog sastava za pune elektrode [14]

| AWS | C | Mn | S | P | Si | Ni | Mo | Cu | Ti | Zr | Al | ostalo |
|-----------|--------------------|-----------|-------|-------|-----------|------|-----------|------|-----------|-----------|-----------|--------|
| EGXXXS-1 | 0.07–0.19 | 0.90–1.40 | 0.035 | 0.025 | 0.30–0.50 | - | - | 0.35 | - | - | - | 0.50 |
| EGXXXS-2 | 0.07 | 0.90–1.40 | 0.035 | 0.025 | 0.40–0.70 | - | - | 0.35 | 0.05–0.15 | 0.02–0.12 | 0.05–0.15 | 0.50 |
| EGXXXS-3 | 0.06–0.15 | 0.90–1.40 | 0.035 | 0.025 | 0.45–0.75 | - | - | 0.35 | - | - | - | 0.50 |
| EGXXXS-5 | 0.07–0.19 | 0.90–1.40 | 0.035 | 0.025 | 0.30–0.60 | - | - | 0.35 | - | - | 0.50–0.90 | 0.50 |
| EGXXXS-6 | 0.06–0.15 | 1.40–1.85 | 0.035 | 0.025 | 0.80–1.15 | - | - | 0.35 | - | - | - | 0.50 |
| EGXXXS-D2 | 0.07–0.12 | 1.60–2.10 | 0.035 | 0.025 | 0.50–0.80 | 0.15 | 0.40–0.60 | 0.35 | - | - | - | 0.50 |
| EGXXXS-G | Nije specificirano | | | | | | | | | | | |

Osim kemijskog sastava norma definira i vrijednosti mehaničkih svojstava. Tako postoje zahtjevi za vlačno ispitivanje i ispitivanje žilavosti. Vlačnim ispitivanjem se utvrđuju vrijednosti minimalne granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i istežljivosti zavara koje moraju odgovarati onima u tablici 4.

Tablica 4. Zahtjevi vlačnog ispitivanja [14]

| AWS A5.26M | Vlačna čvrstoća MPa | Minimalna granica razvlačenja MPa | Minimalna istežljivost % |
|----------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| EG43ZX-X EG432X-X EG433X-X | 430-550 | 250 | 24 |
| EG48ZX-X EG482X-X EG483X-X | 480-650 | 350 | 22 |
| EG55ZX-X EG552X-X EG553X-X | 550-700 | 410 | 20 |

Ispitivanjem žilavosti definira se minimalna udarna radnja loma pri određenoj temperaturi. Vršiti se 5 ispitivanja, od koji se odbacuju najmanja i najveća dobivena vrijednost. Dva rezultata od preostala tri moraju biti jednaki ili iznad 27 J, a preostali može biti ispod 27 J, ali ne ispod 20 J. Prosječna vrijednost tri rezultata mora biti iznad 27 J.

Tablica 5. Zahtjevi ispitivanja žilavosti [14]

| AWS A5.29M | Prosječna udarna radnja loma, J |
|----------------------------------|---------------------------------|
| EG43ZX-X EG48ZX-X EG55ZX-X | Nije specificirano |
| EG432X-X EG482X-X EG552X-X | 27 J pri – 20°C |
| EG433X-X EG483X-X EG553X-X | 27 J pri – 30°C |

4.2. Punjene elektrode

Principi rada za punjene elektrode su isti kao i kod punih elektroda. Upotrebljavaju se samozaštitne elektrode ili elektrode koje zahtijevaju upotrebu vanjski dodanog zaštitnog plina. Punjene elektrode su specijalno napravljene te posebno klasificirane za EPZ tako da ne proizvode suviše troske iznad taline. Naslage troske iznad zavara mogu negativno utjecati na stabilnost električnog luka i mogu nastati uključci troske u zavaru [4]. Što su deblje ploče koje se zavaruju, to je potrebno manje praška. Punjene elektrode mogu biti praškom punjene ili metalnim prahom punjene. Nemetalni sadržaj praškom punjenih žica za EPZ je manji nego kod konvencionalnih samozaštinih i praškom punjenih elektroda. Praškom punjene žice stvaraju tanki sloj troske između papuča i metala zavara što osigurava glatku površinu zavara. Ako elektroda stvara previše troske potrebno ju je periodično uklanjati tijekom procesa zavarivanja. Troska se može uklanjati preko vrha pokretnih papuča ili preko utora za odvodnju na stacionarnim papučama. Samozaštitne elektrode rade na višim strujama i s većim depositima nego punjene elektrode sa zaštitnim plinom. Promjer punjenih elektroda kreće se od 1,6 do 3,2 mm [1].

Norma ANSI/AWS A5.26/A5.26M klasificira punjene elektrode prema upotrebi vanjskog plina, kemijskom sastavu zavara dobivenog punjenom elektrodom i mehaničkim svojstvima zavarenog spoja, tablice 4. i 5. Punjene žice imaju oznaku T. Zadnja oznaka indicira kemijski sastav metala zavara dobivenog od punjene elektrode i da li se upotrebljava zaštitni plin (1, 2, Ni1, NM1, NM2, W ili G). Za ovu klasifikaciju nije specificiran maseni raspon ugljika u metalu zavara, ali mora biti određen i obznanjen pa su ta mjesta u tablici 6. označena sa /.

Tablica 6. Zahtjevi kemijskog sastava metala zavara od punjenih elektroda [14]

| AWS | Plin | C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo | Cu | V | ostalo |
|------------|--|------|---------|------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|--------|
| EG43XT-1 | ne | / | 1.7 | 0.03 | 0.03 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.35 | 0.35 | 0.08 | 0.50 |
| EG48XT-1 | ne | / | 1.7 | 0.03 | 0.03 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.35 | 0.35 | 0.08 | 0.50 |
| EG55XT-1 | ne | / | 1.8 | 0.03 | 0.03 | 0.90 | 0.30 | 0.20 | 0.25-0.65 | 0.35 | 0.08 | 0.50 |
| EG43XT-2 | CO ₂ | / | 2.0 | 0.03 | 0.03 | 0.90 | 0.30 | 0.20 | 0.35 | 0.35 | 0.08 | 0.50 |
| EG48XT-2 | CO ₂ | / | 2.0 | 0.03 | 0.03 | 0.90 | 0.30 | 0.20 | 0.35 | 0.35 | 0.08 | 0.50 |
| EGXXXT-Ni1 | CO ₂ | 0.10 | 1.0-1.8 | 0.03 | 0.03 | 0.50 | 0.70-1.10 | - | 0.30 | 0.35 | - | 0.50 |
| EGXXXT-NM1 | Ar/CO ₂ ili CO ₂ | 0.12 | 1.0-2.0 | 0.03 | 0.03 | 0.15-0.50 | 1.5-2.0 | 0.20 | 0.40-0.65 | 0.35 | 0.05 | 0.50 |
| EGXXXT-NM2 | CO ₂ | 0.12 | 1.1-2.1 | 0.03 | 0.03 | 0.20-0.60 | 1.1-2.0 | 0.20 | 0.10-0.35 | 0.35 | 0.05 | 0.50 |
| EGXXXT-W | CO ₂ | 0.12 | 0.5-1.3 | 0.03 | 0.03 | 0.30-0.80 | 0.40-0.80 | 0.45-0.70 | - | 0.30-0.75 | - | 0.50 |
| EGXXXT-G | Nije specificirano | | | | | | | | | | | |

EGXXT-1 (i EGXXXT-1) je klasifikacija samozaštitnih elektroda koje ne zahtijevaju upotrebu vanjski dodatnog plina. Elektrode s ovom klasifikacijom su napravljene tako da materijali jezgre osiguraju prevlaku od troske, zajedno s odgovarajućim legurama, dezoksidantima, denitrifikatorima i zaštitnim materijalima. One se često sastoje od fluorida, metalnih legura te alkalijskih i zemnoalkalijskih oksida i karbonata. Dizajnirane su za zavarivanje konstrukcijskih čelika i raznih kategorija brodograđevnih čelika. Primjenjuju se za temelje opreme za teške uvjete, spremnike, trupove brodova, konstrukcijske elemente i opremu pod tlakom.

EGXXT-2 (i EGXXXT-2) je klasifikacija elektroda koje su namijenjene za korištenje uz CO₂. Primjena im je slična kao i kod EGXXT-1 osim što upotreba vanjski dodanog plina ograničava njihovo korištenje na otvorenim gradilištima.

EGXXT-Ni1 (i EGXXXT-Ni1) je klasifikacija elektroda koje su namijenjene za korištenje uz CO₂. Ove elektrode su slične onima s oznakom EGXXT-2 osim što proizvode metal zavara koji sadrži oko 1 % nikla.

EGXXT-NM1 (EGXXXT-NM1) i EGXXT-NM2 (EGXXXT-NM2) je klasifikacija elektroda koje su namijenjene za korištenje uz CO₂ (ili mješavine Ar - CO₂ kod EGXXT-NM2). Ove elektrode proizvode metal zavara s različitim udjelom nikla i molibdena.

EGXXT-W (i EGXXXT-W) je klasifikacija elektroda koje su namijenjene za korištenje uz CO₂. Ove elektrode proizvode metal zavara koji je namijenjen za upotrebu kod niskolegiranih čelika otpornih na atmosfersku koroziju (COR –TEN čelici).

EGXXT-G (i EGXXXT-G) je klasifikacija elektroda za koje su specificirani samo zahtjevi za mehanička svojstva. Dobavljač elektroda daje sastav, svojstva, karakteristike te namjenu ovih elektroda [14].

5. ZAŠTITNI PLINOVI

Kod EPZ-a elektrode se tale električnim lukom u zaštitnom plinu na isti način kao i kod MAG i FCAW zavarivanja. Za pune i punjene elektrode koriste se isti aktivni zaštitni plinovi kao i kod MAG i FCAW zavarivanja, a to su ugljikov dioksid i argon pomiješan s ugljikovim dioksidom. Prema [15] navodi se i upotreba argona pomiješanog s kisikom te mješavine inertnih plinova za zavarivanje aluminija za što se EPZ rijetko koristi.

Primarna funkcija zaštitnog plina je da zaštiti rastaljeni metal od okolne atmosfere. To je važno jer većina metala, kada se zagrijava do točke taljenja na zraku, ima tendenciju stvaranja oksida i u manjoj mjeri nitrida. Kisik također reagira s ugljikom u rastaljenom čeliku i stvara ugljikov monoksid i ugljikov dioksid. Ti produkti uzrokuju pogreške u zavarenim spojevima kao što su uključci troske, poroznost i pojava krhkosti. Budući da se produkti reakcije stvaraju lako u okolišnoj atmosferi, važno je zaštititi talinu od kisika i dušika [15].

Osim toga, zaštitni plin ima utjecaja i na karakteristike luka, prijenos metala, penetraciju i oblik zavara, brzinu zavarivanja, stvaranje pogrešaka, čišćenje i mehanička svojstva zavara.

Kada se upotrebljavaju elektrode koje zahtijevaju upotrebu vanjski dodanog zaštitnog plina važno je istaknuti da će mehanička svojstva zavara kod EPZ-a ovisiti o odabranom plinu. Promjena plina ili mješavine utjecat će na kemijski sastav zavara i dobivena mehanička svojstva [14].

Za razumijevanje ponašanja i utjecaja zaštitnih plinova prilikom zavarivanja važno je poznavati njihova fizikalna svojstva poput ionizacijskog potencijala, disocijacije i rekombinacije, kemijske reaktivnosti, toplinske vodljivosti, gustoće te čistoće plina [15].

Struja luka se provodi kroz plazmu, ionizirano stanje plina sastavljeno od približno jednakog broja elektrona i iona koji potječu od atoma i molekula plina. Elektroni, koji provode struju, izlaze iz negativnog pola (katode) i idu prema pozitivnom polu (anodi). Zajedno s plazmom su pomiješani rastaljeni metali, troska, pare, neutralni i pobuđeni atomi plinova i molekule .

Kod elektrolučnih postupaka uspostavljanje i održavanje električnog luka povezani su s minimalnim ionizacijskim potencijalom elemenata u atmosferi luka. Ionizacijski potencijal je energija, izražena u elektronvoltima, potrebna da bi od atoma nastao elektron i pozitivan ion. Da bi došlo do ionizacije potrebno je uložiti određenu količinu energije koja ovisi o vrsti

atoma. Što je manji atomski broj, potrebna je veća energija ionizacije. Argon ima ionizacijski potencijal 15,7 eV, a CO₂ 14,4 eV. Zaštitni plinovi s relativno nižim vrijednostima ionizacijskog potencijala lakše oslobađaju elektrone čime se olakšava uspostavljanje električnog luka. Kad se ionizirani plinovi kontaminiraju metalnim parama, ovisno o temperaturi ključanja i latentnoj toplini taljenja dotičnih metala, koje se razmjerno lako ioniziraju i u takvom raspletu postaju osnovni nosioci naboja, bitno se mijenja priroda električnog luka [16].

Disocijacija i rekombinacija

Kod molekula plinova kao što su ugljikov dioksid, zbog visoke temperature u plazmi električnog luka, dolazi do disociranja na atome koji se potom, barem djelomično, ioniziraju dajući elektrone što poboljšava strujni tok. Energija disocijacije za ugljikov dioksid je 5,3 eV.

Dvoatomni plinovi zahtijevaju više dovedene energije kako bi postali provodljivi za električnu struju. Međutim, u okviru rekombinacije ovih plinova, kada disocirani plin dođe u dodir s hladnijim osnovnim metalom, dolazi do oslobađanja apsorbirane energije te zagrijavanje radnog komada postaje uvelike učinkovitije nego u slučaju s inertnim plinovima. Dakle, za istu temperaturu električnog luka, toplina generirana na radnoj površini je veća kod primjene aktivnih plinova nego što je to slučaj za inertne plinove zbog čega upotrebu ugljikova dioksida karakterizira duboka i široka penetracija [15].

Djelovanje zaštitne plinske atmosfere na rastaljeni metal, u smislu reakcija, ovisi o volumnim udjelima plinova koji se nalaze u mješavini, a ono može biti neutralno, reducirajuće ili oksidirajuće. Argon je inertan plin, dok ugljikov dioksid i kisik spadaju u kategoriju reaktivnih plinova poznatu kao oksidansi. Ovi plinovi reagiraju s rastaljenim metalom u luku i u talini stvarajući pri tome okside, a nerijetka posljedica reakcija su otpadni plinovi [15].

Gustoća (ρ) plina ima veliki utjecaj na zaštitu zavara od okolne atmosfere. Plinovi veće gustoće od zraka zahtijevaju manji dotok od plinova koji su manje gustoće od zraka da bi postigli jednaku zaštitu taline zavara. Argon, koji je najgušći od inertnih plinova, te ugljikov dioksid, koji je za 1/3 gušći od argona, oblikuju dobar zaštitni omotač [15].

Toplinska vodljivost (λ) svojstvo je plina vezano uz njegovu sposobnost da provodi toplinu ovisno o temperaturi. Utječe na širenje, odnosno gubitak topline od sredine električnog luka prema periferiji. Čisti argon ima nisku toplinsku vodljivost zbog čega električni luk čine dvije

zone: uska, vruća jezgra i primjetno hladnija vanjska zona. Rezultat ovoga je penetracijski profil zavara s uskim, prstolikim korijenom i širim vrhom. Plinovi s većom toplinskom vodljivošću provode više topline u vanjsku zonu pa imamo širi električni luk s ravnomjernijom raspodjelom temperature. Što je udio ugljikovog dioksida veći to je širi penetracijski profil na mjestu spajanja.

Ovisno o vrsti metala koji se zavaruje, ponekad i vrlo malo nečistoća u zaštitnim plinovima može imati nepovoljan učinak na brzinu zavarivanja, potpunost spajanja, izgled i oblik zavara te količinu poroznosti, stoga je za svaki zaštitni plin potrebno paziti da zadovoljava, normama određenu, minimalnu čistoću [15]. Minimalna čistoća ugljikova dioksida koja se zahtijeva kod EPZ-a prema [17] je 99,8 %, dok se kod mješavina svaka komponenta mora posebno testirati i odgovarati zahtjevima za čistoću za tu vrstu plina. Kod analize plinskih mješavina volumni udio dodatnog plina mora biti unutar ± 10 posto od nominalnog udjela sporedne komponente.

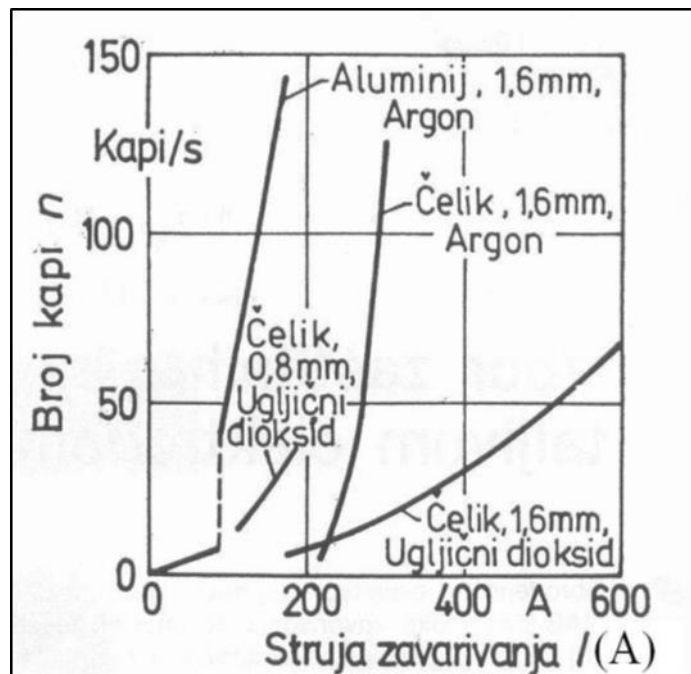
5.1. Ugljikov dioksid

Kod EPZ-a ugljikov dioksid je najčešće upotrebljavan zaštitni plin. Za zavarivanje čelika EPZ-om s praškom punjenim žicama najčešće se upotrebljava ugljikov dioksid, iako se mogu koristiti i mješavine argona i ugljikova dioksida, dok se kod punih žica podjednako koriste obje vrste [1].

Ugljikov dioksid je pri sobnoj temperaturi relativno neaktivan. Njegova kemijska reaktivnost dolazi do izražaja pri visokim temperaturama. Pod utjecajem topline električnog luka CO_2 disocira na CO i O_2 . Slobodni elementi nastali disocijacijom miješaju se s talinom ili se pak rekombiniraju kako bi ponovno nastao CO_2 što biva popraćeno velikim oslobađanjem energije, a posljedica je formiranje dubljeg i šireg zavara. Atmosfera električnog luka disocijacijom sadrži i značajan udio kisika koji reagira s elementima u rastaljenom metalu. To se može spriječiti dodavanjem dezoksidansa poput silicija, mangana i titana u žicu dodatnog materijala. Kisik se onda radije veže s dezoksidansima nego s ugljikom iz metala pa se potom izlučuje na vrhu taline u obliku troske [1].

Za čisti ugljični dioksid je svojstven „grubo“ kapljičasti prijenos materijala, odnosno, kapljice metala su većeg promjera nego u slučaju mješavina.. Broj kapi je pri tome znatno manji nego u slučaju argona, odnosno plinskih mješavina bogatih argonom. Na slici 12. moguće je vidjeti

dijagram ovisnosti broja kapljica o jakosti struje za različite zaštitne plinove i žičane elektrode [15].



Slika 12. Broj kapljica u ovisnosti o jakosti struje kod različitih žica i plinova [15]

Prednosti ugljikova dioksida su laka dostupnost i niska cijena. Uporaba CO₂ kod MAG zavarivanja te kod FCAW, koji proizvodi još više dima i prskotina nego pune elektrode, ne garantira ekonomsku isplativost jer treba uzeti u obzir i manju učinkovitost deponiranja metala, otpadne plinove i prskanje te uklanjanje tragova prskanja kao čimbenike koji, u konačnici, povećavaju cijenu zavara [15]. Kako je kod EPZ-a visoka efikasnost deponiranja, odnosno gotovo da nema prskanja, to će znači da će i cijena po depozitu biti niska [1].

5.2. Mješavine argona i ugljikova dioksida

Kod EPZ-a s punim žicama uz CO₂ koriste se i plinske mješavine argona i ugljikova dioksida. Za zavarivanja nelegiranih i niskolegiranih čelika koji se najčešće zavaruju EPZ-om mješavine Ar – CO₂ imaju određenih prednosti.

Argon, kao glavnu komponentu plinske smjese, obilježava laka ionizacija i stvaranje stabilnog električnog luka. Ugljični dioksid doprinosi širenju zavara i penetraciji. Utjecaj

ugljkova dioksida na penetracijski profil značajnije dolazi do izražaja pri njegovu udjelu u smjesi većem od 10%, a iznad 20 % sve više dolazi do izražaja „grubo“ kapljičasti prijenos materijala i nestabilni električni luk [15]. Prema [4] najčešće se koriste mješavine koje sadrže 20 ili 25 % CO₂ i imaju široku upotrebu kod zavarivanja nelegiranih i niskolegiranih čelika. Mješavine osiguravaju dobar električni luk, CO₂ utječe na duboku penetraciju i dobro oblikovanje troske, a Ar smanjuje količinu para i dima pri zavarivanju.

Protoci zaštitnog plina su od 14 do 19 L/mm [4], iako se navode protoci i do 66 L/mm [1]. Protoci mješavine argon-helij za aluminijske zavarene konstrukcije proizvedene EPZ-om su od 28 do 38 L/min [4]. Preporučeni protoci ovise o konstrukciji opreme tako da se valja držati preporuka proizvođača.

6. PARAMETRI ZAVARIVANJA

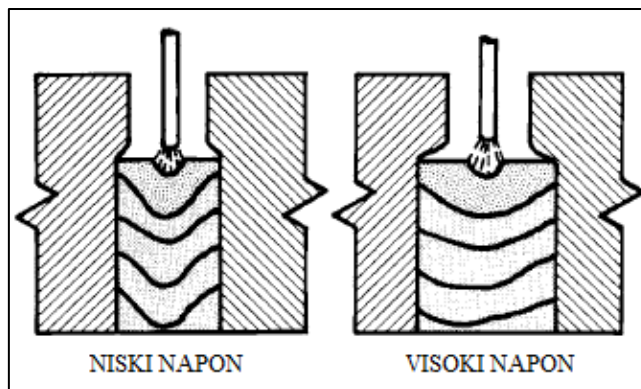
Da bi se postigla kvaliteta zavara potrebno je dobro razumjeti i namjestiti parametre procesa. Oni utječu i na ekonomičnost i dobro funkcioniranje procesa. Zbog specifičnosti procesa utjecaj parametara kod EPZ-a se značajno razlikuje od onog kod MIG/MAG zavarivanja. Također, parametri se mogu razlikovati i između konvencionalnog EPZ-a i onog s taljivom elektrodom. Parametri zavarivanja za EPZ su sljedeći [1]:

1. napon,
2. struja,
3. polaritet,
4. brzina dodavanja žice,
5. slobodni kraj žice,
6. oscilacije elektrode i trajanje zastoja,
7. razmak korijena zavara.

6.1. Napon

Napon zavarivanja je jedan od najvažnijih parametara koji utječe na širinu zavara i taljenje osnovnog materijala. Za razliku od MIG/MAG zavarivanja kod kojih se sa smanjivanjem napona dobiva veća penetracija, kod EPZ-a se sa smanjivanjem napona dobiva dublje protaljivanje, a manje penetracije [1]. Osim geometrije zavara, stabilnost i konstantna duljina električnog luka utječu na kontinuitet kemijsko-metalurške reakcije u samom procesu zavarivanja te u konačnici na kvalitetu prijenosa metala u električnom luku tako da je očuvanje podešene i željene duljine električnog luka pri zavarivanju od primarne važnosti [13].

Najčešće se koriste naponi od 35 do 45 V. Povećanjem napona, dakle, povećava se penetracija i širina zavara prema slici 13. Na lijevoj slici je nizak napon koji uzrokuje dublju talinu i manju penetraciju osnovnog materijala. Na desnoj slici je visok napon koji uzrokuje dublju penetraciju u osnovni materijal.

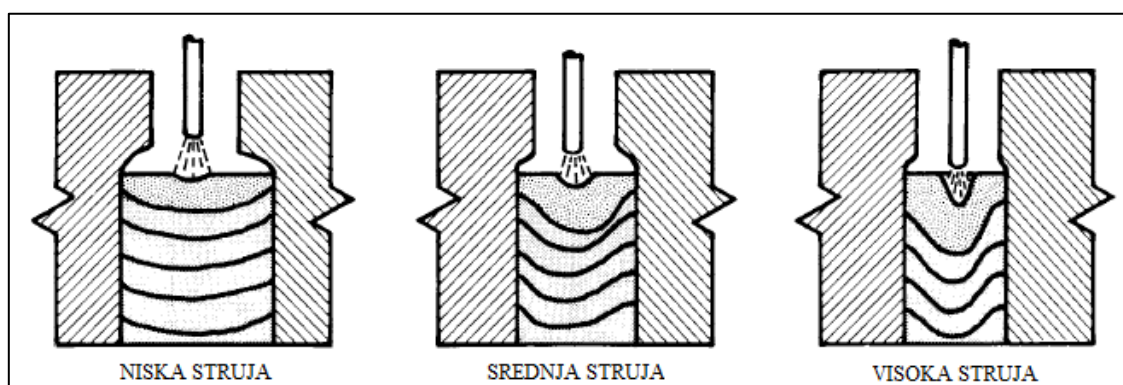


Slika 13. Utjecaj napona zavarivanja na izgled taline [1]

Za veće debljine osnovnog materijala ili veće stope depozita treba povisiti napon. Međutim, preveliko povećanje napona može dovesti do gorenja luka na stranicama žlijeba iznad taline što dovodi do nestabilnosti procesa. Kod samozaštitnih elektroda preveliki napon uzrokuje poroznost. Važno je stoga pridržavati se uputa proizvođača ili ispravno namjestiti napon kako bi se dobila željena mehanička svojstva

6.2. Struja i brzina dodavanja žice

Dok kod MIG/MAG zavarivanja povećanje struje obično znači dublju penetraciju kod EPZ-a znači manje penetracije u osnovni materijal. Za danu vrstu elektrode, promjer i slobodni kraj žice struja zavarivanja i brzina dodavanja žice su proporcionalni. Povećanje brzine dodavanja žice, povećava stopu depozita, struju zavarivanja i vertikalnu brzinu gibanja (stopu popunjavanja). Povećanjem struje smanjuje se penetracija i širina zavara. Utjecaj struje na izgled taline prikazan je na slici 14. Niska struja uzrokuje sporu vertikalnu brzinu gibanja i široki zavar. Visoka struja uzrokuje značajno smanjenje širine zavara, odnosno penetracije stranica zavara te osjetljivost na pucanje zavara po simetrali.



Slika 14. Utjecaj struje zavarivanja na izgled taline [1]

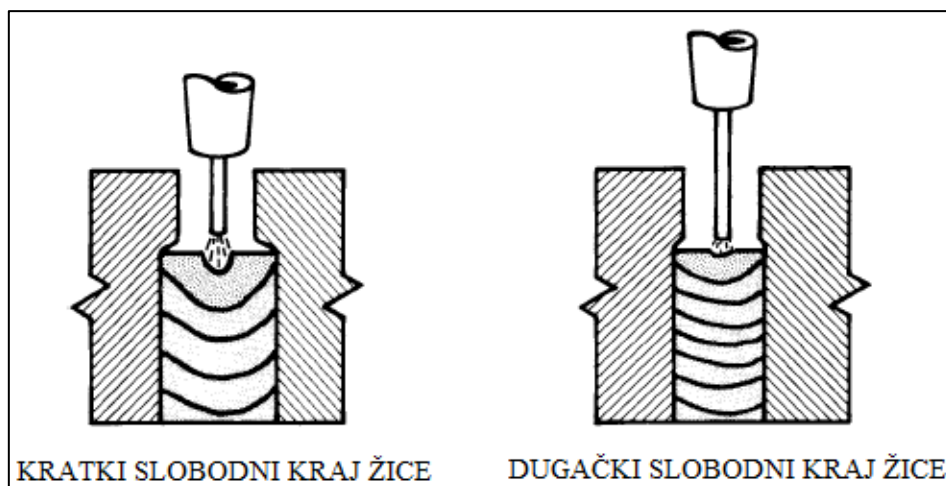
U tablici 7. dani su iznosi struja zavarivanja za najčešće upotrebljavane promjere elektroda kod EPZ-a. Kako se radi o visokim iznosima struje i dugotrajnom gorenju električnog luka, izvor struje i kablovi moraju biti prilagođeni za EPZ.

Tablica 7. Tipični iznosi struja ovisno o promjeru elektrode [1]

| Φ 1,6 mm | Φ 2,4 mm | Φ 3,2 mm |
|---------------|---------------|---------------|
| 300 – 400 A | 400 – 800 A | 500 – 1000 A |

6.3. Slobodni kraj žice

Kod EPZ-a dužina slobodnog kraja žice određuje se ovisno o tome upotrebljavali li se vanjski zaštitni plin ili ne. Kod punih i praškom punjenih žica on iznosi oko 40 mm, dok kod samozaštinih punjenih žica on iznosi od 50 do 75mm. O statičkoj karakteristici izvora za zavarivanje ovisi utjecaj slobodnog kraja žice. Kod preporučenih izvora sa CV karakteristikom, povećanjem slobodnog kraja žice, podizanjem vodilice, smanjit će se struja čime će se smanjiti širina zavara prema slici 15. desno. Povećanje slobodnog kraja žice rezultira povećanjem električnog otpora. Zauzvrat, otporno zagrijavanje povisuje temperaturu elektrode što rezultira malim povećanjem stope taljenja elektrode. Ukupno, povećani električni otpor proizvodi veći pad napon od kontaktne cjevčice do radnog komada. Izvor napajanja to kompenzira smanjenjem struje. Stopa taljenja elektrode odmah je smanjena te je dopušteno elektrodi da smanji fizičku dužinu električnog luka. Ako se poveća slobodni kraj žice povećanjem brzine dodavanja žice porast će stopa depozita, a smanjit će se penetracija i širina zavara.



Slika 15. Utjecaj slobodnog kraja žice (CV karakteristika) na izgled taline [1]

6.4. Oscilacije elektrode

Oscilacije se koriste za debljine materijala veće od 30 mm. Pritom je potrebno odrediti položaj krajnjih točki, brzinu gibanja oscilacija i trajanje zaustavljanja u krajnjim točkama. Elektrode se trebaju zaustavljati na udaljenosti od 6 do 10 mm od svake papuče. Najčešće brzine su od 13 mm/s do 16 mm/s. Trajanje zaustavljanje je potrebno odrediti tako da dođe do potpunog protaljivanja duž cijele stranice zavara. Tipična vremena su od 0,5 s do 3 s ovisno o debljini materijala. Kod procesa s taljivom vodicom dužom od 1 m upotrebljava se pouzdanija varijanta procesa s više vodilica i elektroda [1].

6.5. Razmak korijena zavara

Mora se osigurati dovoljna zračnost između radnih komada kako bi vodilica elektrode mogla nesmetano ući. Preveliki razmak dovodi do povećanja vremena zavarivanja, povećane potrošnje dodatnog materijala i zaštitnog plina, čime se povećavaju troškovi. Kod većih razmaka potrebno je povećati i napon kako bi se osiguralo potpuno protaljivanje. Kod I-spoja razmak je od 17 do 32 mm, dok je kod V-spoja otvor žlijeba od 17 do 32 mm, a 4 do 10 mm je razmak u korijenu [1].

7. PROBLEMI I NEPRAVILNOSTI

7.1. Problemi s radom opreme

U tablici 8. prikazane su karakteristične teškoće koje se mogu pojaviti kod EPZ-a. Za razliku od pogrešaka u zavarenom spoju koje se otkrivaju nakon zavarivanja problemi navedeni u tablici javljaju se tijekom zavarivanja ili sprječavaju izradu zavara. Poteškoće koje nastaju mogu biti električne, mehaničke i vezane uz postupak [1].

Tablica 8. Problemi s radom opreme [18]

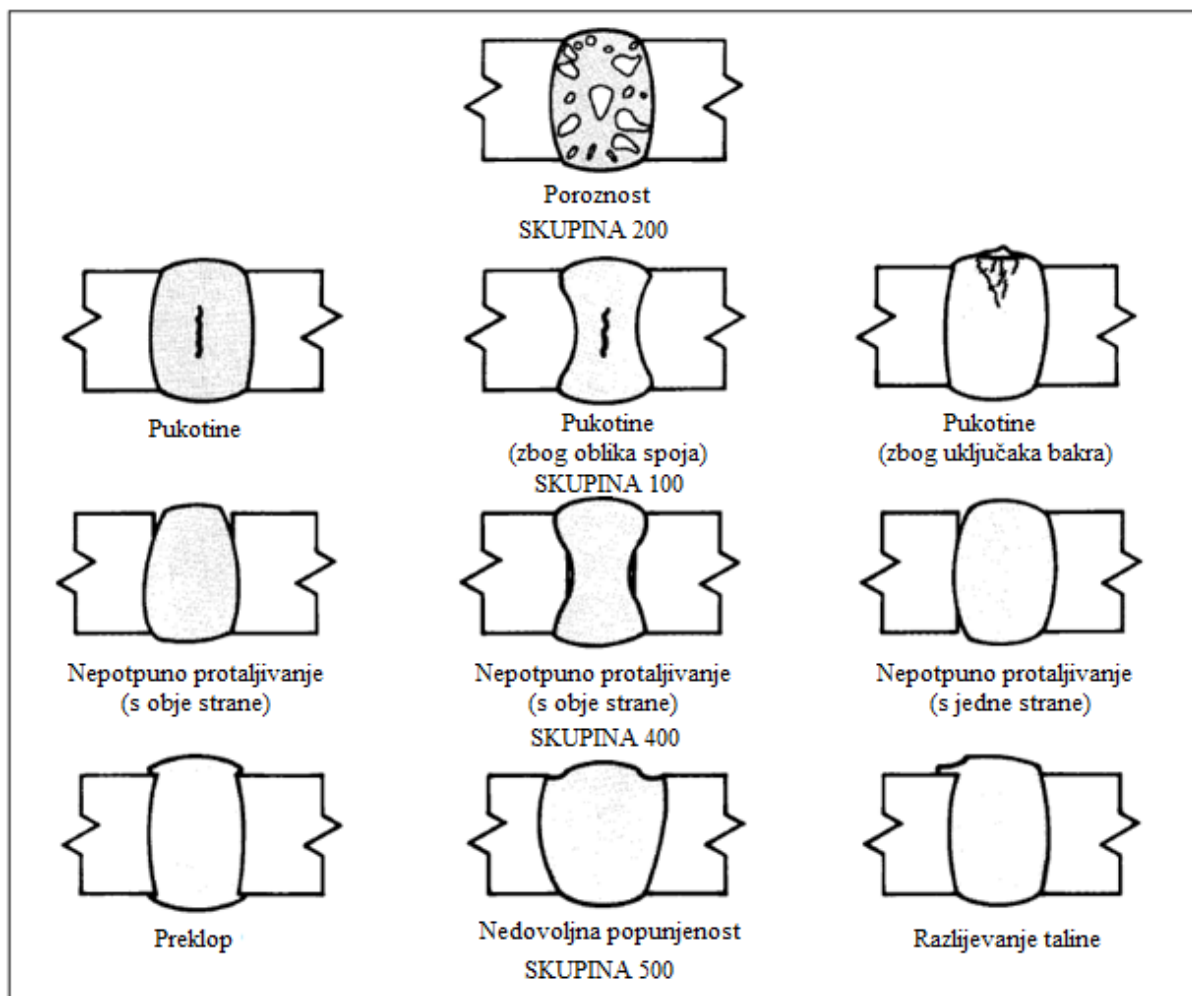
| Pogreška | Uzrok |
|------------------------------|--|
| Loše dodavanje žice | Otpor dodavanju žice (hrapava unutrašnja površina vodilice; prskotina na kraju vodilice; prašina ili strugotine unutar bužira za dovod žice; oštra savinutost bužira za dovod žice) |
| | Slabo dodavanje žice (nizak pritisak kotačića na žicu; loši kotačići dodavača; prašina u žlijebu kotačića) |
| Nestabilan električni luk | Loše dodavanje žice |
| | Loš napon električnog luka |
| | Neppravilni uvjeti zavarivanja (loši parametri) |
| | Strani materijali u dijelu zavara |
| Dodavanje rastaljene žice | Loše dodavanje žice |
| | Kretanje luka po površini obrade (mala udaljenost između luka i površine; previsoki napon) |
| | Loši uvjeti zavarivanja (kratki slobodni kraj žice) |
| Taljenje bakrene papuče | Premali protok vode (odrezano ili oštećeno rashladno crijevo; nizak pritisak vode) |
| | Električni luk na bakrenoj papuči (ljuljanje vodilice) |
| Loše klizanje bakrene papuče | Visoki otpor površine koja se zavaruje (prehrapava površina ploče; prejako pritisnuta papuča) |
| | Preveliki otpor između taline i bakrene papuče (prehrapava površina obrade za papuču) |

| | |
|--|---|
| Zubna letva ili tračnica nije odgovarajuće pričvršćena | Loša magnetska sila (metalni prah na magnetu; hrapava površina ploče) |
| | Primijenjena jaka vanjska sila (prejako pritisnuta papučica; savinuti dio zavara) |
| Loše automatsko kretanje prema gore (curenje taline) | Prekratak slobodni kraj žice |
| | Prevelika udaljenost između vodilice i papučice (visoko smješten pištolj; kratka vodilica) |
| Loše automatsko kretanje prema gore (preniska talina) | Predugačak slobodni kraj žice |
| | Prekratka udaljenost između vodilice i papučice (nisko smješten pištolj; dugačka vodilica) |

7.2. Karakteristične nepravilnosti u zavarenom spoju

Elektroplinsko zavarivanje je osmišljeno kako bi se kontinuirano zavarivao cijeli spoj najčešće u jednom prolazu. Kada zavarivanje krene mora biti izvedeno do kraja jer neplaniranim prekidom procesa dolazi do grešaka. Važno je imati opremu u ispravnom stanju, odgovarajuću tehniku rada te imati uvježbanog i kvalificiranog operatera kako bi se minimalizirali popravci [1]. Karakteristične skupine pogreške kod EPZ-a, prema slici su sljedeće:

1. Poroznost
2. Pukotine
3. Nepotpuno protaljivanje
4. Pogreške oblika zavara



Slika 16. Karakteristične nepravilnosti u zavarenom spoju kod EPZ-a [1]

7.2.1. Poroznost

Poroznost u metalu zavara su mjesta ispunjena stlačenim plinom. Različitih su veličina, od vrlo sitnih, okom nevidljivih, pa do veličina od nekoliko milimetara. Generalno, poroznost uzrokuju plinski uključci koji se prilikom skrućivanja metala ne tope dok su šupljine bez plina. Uzročnici poroznosti u zavaru su [19]:

- nečistoće i vlaga na mjestu zavarivanja i u dodatnim materijalima,
- slaba zaštita procesa zavarivanja,
- neispravni parametri tehnika rada u zavarivanju.

Prema mjestu pojavljivanja kod EPZ-a razlikujemo poroznost na početku zavara, u metalu zavara i na završetku zavara.

Poroznostima kod EPZ-a koje se javljaju blizu početka zavara doprinose mnogi od sljedećih faktora: mala brzina dodavanja žice, visoki napon, kratki slobodni kraj žice i nedovoljno vrijeme na pločici na kojoj se pali električni luk; nečistoće na startnoj pločici ili između startne pločice i osnovnog metala; kondenzacija na kalupima ili između kalupa i osnovnog metala; brzo hlađenje uzrokovano debelim pločama, velikom bakrenom startnom pločicom i niskom temperaturom okoline; plitkom startnom pločicom; električni luk smješten preblizu kalupa; propuštanje vode na startnoj pločici; loše postavljanje kalupa ili startne pločice; nedovoljna pokrivenost zaštitnim plinom ili kontaminiran plin; nestabilan električni luk; vlaga u talini od brtvila koja se koriste kako bi se spriječilo curenje metala zavara [1].

Uzroci poroznosti u metalu zavara su: početna poroznost koja se proteže u izradu zavara; prekomjeren napon; niska brzina dodavanja žice; prekratak slobodni kraj žice; „hladan zavar“ (niska brzina dodavanja žice i napon), nečistoće u području zavara; popuštanje kalupa zbog kojeg dolazi zrak u zavar; nedovoljna pokrivenost zaštitnim plinom ili kontaminiran plin; propuštanje vode iz kalupa, nestabilan električni luk; vlaga u talini od brtvila koja se koriste kako bi se spriječilo curenje metala zavara [1].

Poroznost na završetku zavara mogu uzrokovati isti faktori kao i u metalu zavara. Sljedeći faktori, također, mogu uzrokovati poroznost: kratka pločica na izlazu ili kratki kalupi; propuštanje troske radi neispravno priključene izlazne pločice i puhanje luka uzrokovano neispravno smještenim kabelom mase [1].

Tablica 9. Uzroci nastajanja poroznosti i rješenja [18]

| Pogreška | Uzrok | Rješenje | |
|-----------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Poroznost | Nedovoljna opskrba zaštitnim plinom | Curenje plina | Popravak crijeva |
| | | Mali protok plina | Podešavanja protoka |
| | | Jak vjetar | Postavljanje zaštite od vjetra |
| | | Začepljen dovod plina na papuči | Čišćenje prskotina (svakih 5 minuta) |
| | | Slab kontakt keramičke podloge | Bliži kontakt |

| | | |
|------------------------------|--------------------------------------|---|
| Vlaga, loša dezoksidacija | Curenje vode iz bakrene papuče | Promjena papuče |
| | Onečišćen CO ₂ | Upotreba plina bez vodika i dušika |
| | Vlaga na keramičkoj podlozi | Zagrijavanje na 200 – 250°C po 1 – 2 sata |
| | Strani materijali na površini obrade | Uklanjanje stranog materijala |
| | Nečisti sastav dijela zavara | Upotreba čelika s malim udjelom sumpora |
| | Vlaga u dijelu zavara | Zagrijavanje da se ukloni vlaga |
| | Vlaga ili hrđa na žici | Zamjena s novom žicom |
| | Hrđa u dijelu zavara | Uklanjanje hrđe |

7.2.2. Pukotine

Pukotine su mjestimično razdvojen materijal u zavarenom spoju nastale uslijed zavarivanja.

Pukotine mogu biti povezane sa:

- parametrima procesa,
- toplinskim uvjetima,
- naprezanjima nastalim skupljanjem zavara,
- kemijskim sastavom dodatnog i osnovnog materijala,
- brzinom hlađenja,
- pretjeranim miješanjem osnovnog metala,
- uključcima bakra.

Nastajanje pukotine mnogo ovisi o načinu skrućivanja metala. Toplina se odvodi iz taline zavara preko osnovnog metala i kalupa tako da skrućivanje počinje na tim hladnijim mjestima i napreduje do sredine zavara. Kako se dodatni materijal kontinuirano dovodi, progresivno skrućivanje odvija se od dna spoja, a talina je uvijek iznad metala koji se skrućuje.

Otpor uzdužnim pukotinama izražava se faktorom oblika. Faktor oblika je omjer između maksimalne širine taline (otvor žlijeba + penetracija na stranici žlijeba) i maksimalne dubine. Oblik taline i njen rezultirajući faktor oblika kontroliraju se parametrima zavarivanja. Pretjerana brzina dodavanja žice, odnosno struja, niski napon, pretjerano uzak razmak

korijena žlijeba i dugo zaustavljanje kod osciliranja uzrokuju nizak faktor oblika, odnosno doprinose stvaranju uzdužnih pukotina [1].

Previsoka struja zavarivanja značajno smanjuje širinu zavara čime se smanjuje faktor oblika (usko i duboko protaljivanje) što dovodi do osjetljivosti na pukotine. Što je faktor oblika veći (široko i plitko protaljivanje) otpor uzdužnim pukotinama je veći. Generalno, povećavajući razmak korijena žlijeba ili napon, povećava se faktor oblika dok se povećanjem struje ili smanjenjem razmaka korijena žlijeba faktor smanjuje.

Faktor oblika je empirički broj koji sam ne određuje sklonost pukotinama, već je potrebno uzeti u obzir i ostale uzroke koji dovode do pucanja. Osjetljivosti doprinosi kemijski sastav dodatnog i osnovnog materijala. Čelici s visokim ugljičnim ekvivalentom, visokim udjelom sumpora ili fosfora podložniji su stvaranju uzdužnih pukotina. Naprezanje kod skupljanja zavara je faktor koji najviše doprinosi u svima slučajevima pucanja. Faktori koji izazivaju brzo hlađenje uključuju velike kalupe s prekomjernim protokom vode i nedostatak predgrijavanja kod debelih ploča pri niskoj temperaturi okoline.

Tople pukotine kod zavarivanja nastaju na visokim temperaturama tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zavara da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Pojava toplih pukotina je posebno povezana s nečistoćama u materijalu. Kod EPZ-a su karakteristične toplinske pukotine na licu zavara koje nastaju zbog djelomičnog otapanja bakrenih kalupa. Pojava otopljenog bakra u metalu zavara može biti zbog iskrenja na kalupu ili taljenja kalupa zbog lošeg hlađenja. Do toplih pukotina može doći i zbog niske kvalitete osnovnog metala [1].

7.2.3. *Nepotpuno protaljivanje*

Nepotpuno protaljivanje, odnosno naljepljivanje je pogreška nepostojanja čvrste veze u zavarenom spoju. Nepotpuno protaljivanje na obje stranice žlijeba uzrokovano je neželjenim toplinskim stanjem koje onemogućuje taljenje stranica žlijeba. Do naljepljivanja dolazi zbog loše distribucije topline te nedovoljne topline. Također, može biti uzrokovano zarobljenom troskom između metala zavara i rastaljenog dodatnog materijala. Faktori koji doprinose nepotpunom protaljivanju su [1]:

- nizak napon ili mala brzina dodavanja žice i nizak napon (hladni zavar)
- pretjerana brzina dodavanja žice (brzo popunjavanje)
- uzak otvor korijena žlijeba (brzo popunjavanje)
- brzo osciliranje
- suvišna troska na vrhu taline (može se izbjeći s kalupima dubljih i širih žlijebova)
- pretjeran otvor korijena žlijeba

Zbog asimetričnih toplinskih uvjeta dolazi do nepotpunog protaljivanja s jedne strane. Razlozi za to su: smještaj električnog luka izvan centra, nagib elektrode prema jednoj stranici žlijeba, puhanje električnog luka zbog neispravne lokacije priključivanja kabela mase, pretjerani otvor korijena žlijeba.

7.2.4. Pogreške oblika zavora

Preklop

Preklop zavora kod sučeljenog spoja na prijelazu zavar - osnovni metal, bez staljivanja s osnovnim metalom, može biti na licu i korijenu zavora. Ova se greška javlja kod zavarivanja gdje se stvara velika talina. Zavarivanjem pokrovnog spoja talina djelomično prelazi na površinu osnovnog metala i naliježe na nepretaljenu površinu pa može doći do mjestimičnog nespajanja s osnovnim materijalom. Do preklopa na prednjoj strani dolazi kad je električni luk smješten previše unazad; kad su nepravilno postavljeni ispravljач žice, nagib elektrode, lokacija vodilice ili kad je kontaktna cjevčica oštećena; kad je kut otvora žlijeba prevelik; kad dolazi do hladnog zavora. Na stražnjoj strani do preklopa dolazi kad je luk smješten previše naprijed uz ostale nabrojane uzroke. Preklop s obje strane proizlazi iz hladnog zavora; pretjerane širine žlijeba u kalupu; pretjeranog gašenja od kalupa; nepravilne konstrukcije kalupa; pretjeranog vodenog protoka; pretjerane brzine zavarivanja; uskog otvora žlijeba; puhanja luka ili nepravilne oscilacije [1].

Razlijevanje taline

Do razlijevanja taline dolazi zbog lošeg namještanja osnovnog metala. Ono može biti rezultat podizanja pokretnih kalupa od osnovnog metala uzrokovanog stranim materijalom kao što su prskotine čime je moguće curenje i hlađenje metala iznad ploče [1].

Nedovoljna popuna zavara

Nedovoljno popunjen zavar je stanje kada je pokrovni spoj ili popuna zavara preniska, mjestimično ili po cijeloj dužini, odnosno kada je lice zavara i površina korijena zavara ispod okolne površine osnovnog metala. Nedovoljna popuna može biti prihvatljiva u određenim uvjetima, a u najboljem slučaju predstavlja samo estetski nedostatak. Lako se da spriječiti. Može biti uzrokovana pretjeranim taljenjem osnovnog materijala ispod kalupa ili preuskim žlijebom u kalupu [1].

Prokapljina

Prokapljina je mjestimično ispupčeni višak metala, ustvari, metal zavara koji se nalazi izvan spoja. Ne smatra se nepravilnošću jer se prokapljivanje na startnoj pločici događa izvan proizvedenog zavara. Prokapljina dovodi do nezadovoljavajućeg zavarivanja zbog gubitka taline. Lako se sprječava upotrebom startne pločice odgovarajuće debljine ili jačim pripojem. Prokapljivanje je moguće i kod loše namještenog stražnjeg kalupa.

Tablica 10. Uzroci pogrešaka oblika zavara i rješenja [18]

| Pogreška | Uzrok | | Rješenje |
|-------------------------------|--|--|--|
| Neravnomjerna širina zavara | Promjena protaljivanja | Fluktuacije napona | Konstantan napon |
| | | Loše dodavanje žice | Poboljšan dodavač žice |
| | Promjena širine podloge | Promjena razmaka | Konstantan razmak |
| Preklop | Zavar ne penetrira na površini u osnovni materijal | Prevelika širina papuče | Papuča odgovarajuće širine |
| | | Centar podloge se ne poklapa s linijom zavarivanja | Centar po ravnini |
| | | Slabo prijanjanje podloge | Bolji kontakt |
| | | Nedovoljna penetracija zavara | Popraviti probleme s protaljivajem |
| Ugorine | Veće protaljivanje od širine papuče | Uska površina papuče | Papuča odgovarajuće širine |
| | | Preveliko protaljivanje | Manji napon i pomak luka |
| | | Centar podloge se ne poklapa s linijom zavarivanja | Centar po ravnini |
| | | Previše troske | Preveliko taljenje podloge |
| Neravnomjerna površina zavara | Nepravilna količina troske penetrira u metal između podloge i depozita | Hrapava površina papuče | Zamjena papuče |
| | | Luk usmjeren na jednu stranu | Podešavanje |
| | | Loše klizanje papuče | Podešavanje pritiska papuče i zamjena |
| | | Površina podloge erodirana od topline luka | Povećanje napona ili pomak luka prema papučici |

8. PRIPREMA ZA ZAVARIVANJE

Za uspješno zavarivanje konstrukcija mora biti namještena i pripremljena na odgovarajući način.

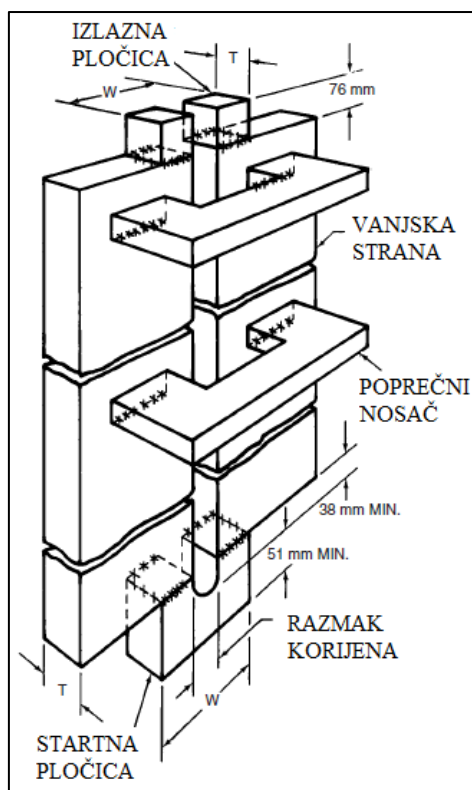
Mora se osigurati da posmaknutost između površina osnovnog materijala s prednje i stražnje strane ne bude veća od 3,2 mm jer dolazi do pogrešaka. Moguće je i brušenje površina da se ostane u tolerancijama. Pogreške do kojih dolazi zbog odstupanja od ravnine sučeljenih elemenata su: curenje taline i troske, nepravilan izgled šava, ugorine, preklop, poroznost itd.

Da bi se osigurala dimenzije spoja i poravnatost konstrukcije tijekom zavarivanja koriste se stege, podupirači i poprečni nosači. Poprečni nosači, prikazani na slici 17., moraju biti dovoljno kruti da spriječe skupljanje otvora korijena tijekom zavarivanja, ali ne prekruti da ne stvore zaostala naprezanja.

Prije zavarivanja potrebno je postaviti pločicu. To je dodatni materijal u obliku slova U, žlijeba sličnih dimenzija kao i spoj zavara. Širina pločice mora odgovarati širini papuče + 50 mm. Na njoj se uspostavlja električni luk i pridržava talina tako da sve moguće pogreške na početku ne utječu na kvalitetu zavara jer se ona na kraju jednostavno odreže. Debljina pločice i oblik žlijeba moraju biti jednaki kao i kod radnog komada koji se zavaruje. Površina pločice koja se naliježe na dno osnovnog materijal mora biti suha i čista. Pločica se zavaruje tako da ne dolazi do curenja, ali se mora ostaviti otvor da zaštitni plin izađe kako ne bi zaostao u rastaljenom metalu. Preslabi brtveni zavar ili premala debljina materijala ispod žlijeba u startnoj pločici uzrokuje curenja metala što dovodi do pogrešaka.

Na kraju se postavljaju izlazne pločice. One su potrebne jer brzo hlađenje velike taline na kraju stvara krater koji se skuplja i koji može uhvatiti trosku ili plin. Stacionarne podloge moraju biti iznad zavara radnog komada 25 do 75 mm. Izlazne pločice se skidaju nakon zavarivanja.

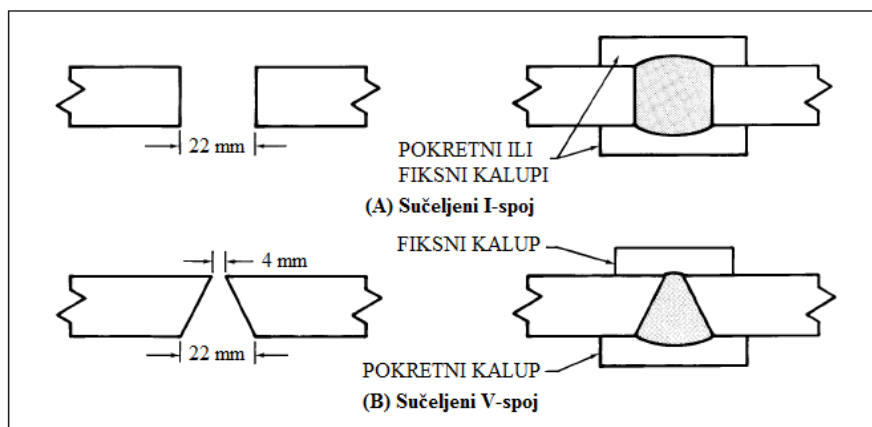
Na slici 17. prikazana je tipična priprema spoja kod EPZ-a koja se sastoji od pločica na početku i kraju zavara te poprečnih nosača koji osiguravaju dimenzije i poravnatost konstrukcije.



Slika 17. Tipično pripremljeni spoj za EPZ [1]

8.1. Izgled spoja

Kod EPZ-a tipično se koriste I- te V-spojevi iako se mogu koristiti i drugi. Najčešće se koristi sučeljeni I-spoj kod kojeg je razmak između žljebova oko 22 mm, slika 18. (A). Kod takve pripreme spoja najčešće se koristi jedna pokretna papuča kako bi se povećala brzina zavarivanja. Sučeljeni V-spoja također se koristi s jednim pomičnim i jednim fiksnim kalupom. Razmak korijena je tipično oko 4 mm, a otvor žlijeba je oko 22 mm, slika 18. (B). Pokretni kalup oblikuje lice zavara, a fiksni kalup oblikuje korijen zavara [1].



Slika 18. Tipičan izgled spoja za EPZ [1]

9. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu bilo je potrebno osmisliti plan pokusa kako bi se ustanovio utjecaj parametara elektroplinskog zavarivanja na mehanička svojstva zavara. Parametri su određeni prema debljini osnovnog materijala nakon čega je zavarivanje izvršeno uz primjenu zaštitnog plina CO₂ i mješavine 82 % Ar i 18 % CO₂. Nakon zavarivanja mehanička svojstva su određena:

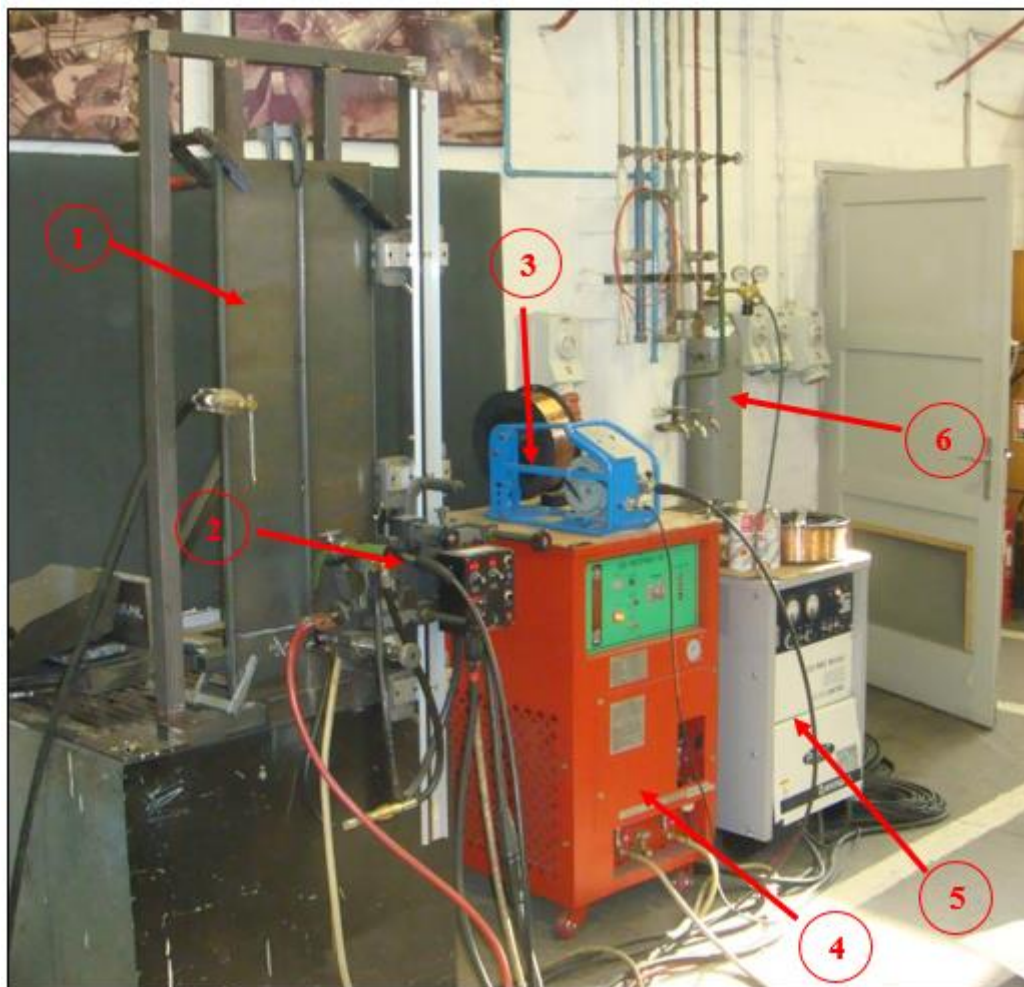
1. ispitivanjem makrostrukture zavarenog spoja,
2. mjerenjem tvrdoće,
3. ispitivanjem udarne radnje loma.

Eksperimentalni dio proveden je u Laboratoriju za zavarivanje, dok je ispitivanje udarne radnje loma provedeno u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Oba laboratorija nalaze se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

9.1. Oprema za zavarivanje

Oprema za zavarivanje prikazana je na slici 19. Brojevima su označeni glavni dijelovi:

1. osnovni materijal,
2. glava za zavarivanje MINI-EGW s bakrenom papučom, pištoljem i nazubljenom letvom,
3. dodavač žice s 4 kotačića,
4. sustav za hlađenje s ulaznim i izlaznim crijevom,
5. izvor struje,
6. zaštitni plin,
7. kablovi kojima se prenosi struja, bužir i crijevo za zaštitni plin.



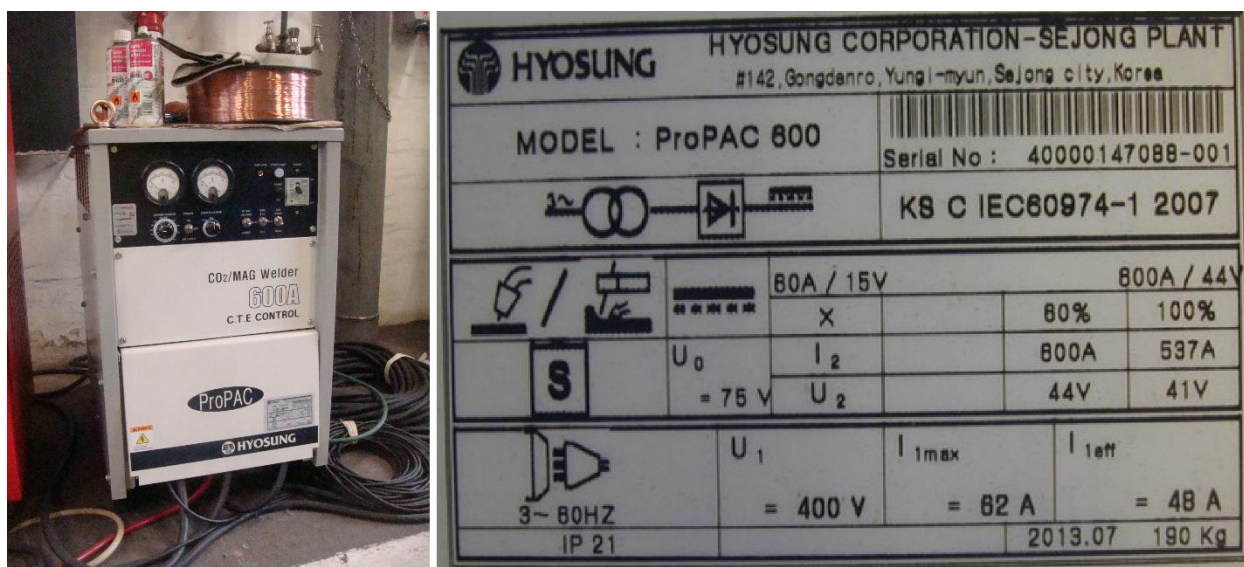
Slika 19. Oprema za EPZ

Izvor struje

Za zavarivanje je korišten trofazni istosmjerni izvor za zavarivanje s podešenom ravnom karakteristikom, odnosno CV karakteristikom. U tablici 11. je dana specifikacija izvora struje čiji je proizvođač HYOSUNG, a model je ProPAC 600 koji je prikazan na slici 20. Na kontrolnoj ploči izvora struje podešavaju se osnovni parametri. Podešena vrijednost struje zavarivanja odnosi se samo na vodeću vrijednost i ona je fiksna za dodavač žice dok se stvarna vrijednost struje zavarivanja očitava na kontrolnoj ploči glave za zavarivanje. Napon zavarivanja se automatski fino podešava prema namještenoj struji i korištenom zaštitnom plinu. Namješta se još i vrsta i promjer žice te se kontrolira protok zaštitnog plina.

Tablica 11. Specifikacija izvora struja [20]

| | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Proizvođač i model | HYOSUNG – ProPAC 600 |
| Tip | HW-S600 |
| Nazivni primarni ulazni napon | AC 220/380/440 V, 50/60 Hz, 3-faze |
| Nazivna ulazna snaga | 41 kVA, 36 kW |
| Nazivna struja zavarivanja | 600 A |
| Raspon struje za zavarivanje | 80 – 600 A |
| Nazivni napon zavarivanja | 50 V |
| Raspon napona zavarivanja | 14 – 52 V |
| Nazivna intermitencija | 600 A 100 % |
| Dimenzije | 490 x 690 x 850 mm |
| Masa | 190 kg |



Slika 20. Izvor struje za zavarivanje s identifikacijskom pločicom

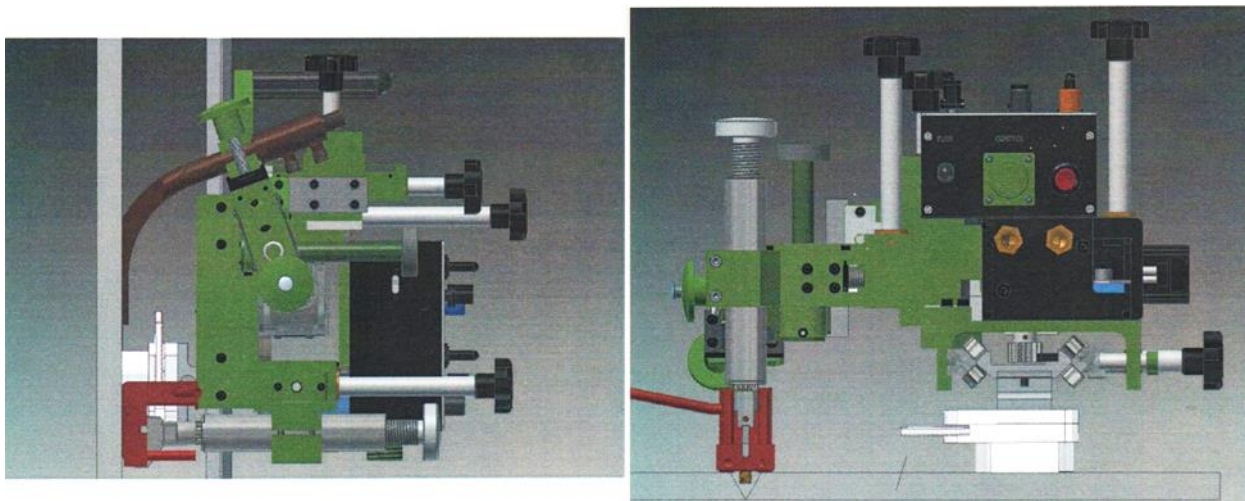
Glava za zavarivanje MINI - EGW

Za zavarivanje je korištena glava MINI – EGW, južnokorejskog proizvođača KOWELD čija je specifikacija prikazana u tablici 12. Na slici 21. prikazan je izgled te pozicija glave za zavarivanje u odnosu na pripremljene ploče. S lijeve strane je pogled s boka dok je s desne pogled odozdo. Crvenom bojom je označena papuča pritisnuta na ploče. To je uređaj specijalno dizajniran za zavarivanje sučeljenog V-spoja vertikalnim pomicanjem prema gore. On se koristi za zavarivanje debljina od 10 do 25 mm u jednom prolazu. Da bi se oblikovao šav, s prednje strane se koristi bakrena papuča, a sa stražnje strane keramička podloga.

Korištenjem senzora oprema se giba automatski ovisno o visini ploče koja se zavaruje. Izvrsne su performanse u gibanju konstantnom brzinom jer uređaj za regulaciju pomoću povratne veze mijenja brzinu zavarivanja različitim opterećenjem zahvaljujući istosmjernom motoru bez četkica (BLDC motor).

Tablica 12. Specifikacija glave za zavarivanje [18]

| | | |
|------------------|----------------------------|---|
| Osnovni podatci | Model | MINI-EGW |
| | Dimenzije (š x d x v) | 406 x 325 x 268 mm |
| | Težina | 10,5 kg |
| Pomična glava | Materijal | Al6N01 |
| | Pogonski motor | DC 24 V, 40 W, 4000 o/min |
| | Prijenosni omjer redukcije | 400:1 |
| | Mehanizam gibanja | Nazubljena letva |
| | Brzina gibanja | 0-800 mm/min |
| | Ulazna snaga | AC 110-230 V, 50-60 Hz |
| Kontrolna kutija | Pomična | Struja, napon, zavarivanje/ne-zavarivanje/ručno zavarivanje, uguravanje žice, pokretanje prema gore/dolje, start, stop, brzina zavarivanja/kraj žice (<i>stick out</i>) |
| Tračnica | Fiksni tip | Magnet ON/OFF priključena/odvojena |
| | Materijal | Al6N01 |
| | Težina | 6,7 kg |
| | Dužina tračnice | 1,5 m |



Slika 21. Izgled i pozicija glave za zavarivanje [18]

Kontrolna ploča



Slika 22. Kontrolna ploča glave za zavarivanje

Na kontrolnoj ploči prikazanoj na slici 22. kontroliraju se i očitavaju trenutačni parametri prilikom zavarivanja. Na mjestu s oznakom 1 prikazuje se trenutačna vrijednost struje zavarivanja, a ispod je prekidač kojim se mijenja vrijednost struje. Kod oznake 2 je indikator trenutačnog napona zavarivanja, a ispod je prekidač za upravljanje naponom. Oznaka 3 prikazuje sklopku koja mora biti namješšana na opciji *welding* prije nego zavarivanje počne. U protivnom zavarivanje neće krenuti iako je upaljen START. Gumb kod oznake 4 služi za namještanje slobodnog kraja žice. Kod oznake 5 indikacija je brzine, a ispod prekidač za upravljanje brzinom tijekom zavarivanja. Također moguće je namjesti automatsko gibanje s kontrolom visine taline ili ručno pri čemu operater kontrolira brzinu zavarivanja kako se talina ne bi prelila. Pomoću prekidača kod oznake 6 pomiče se glava najvećom brzinom prema gore ili dolje dok zavarivanje ne traje. Pritiskom na gumb start počinje zavarivanje, oznaka 7.

9.2. Osnovni i dodatni materijal

Osnovni materijal je nelegirani konstrukcijski čelik S235 JR. Kemijski sastav i mehanička svojstva određena su normom *HRN EN 10025-2 Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika – 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike*. Debljina osnovnog materijala iznosi 10 mm. Za tu debljinu dan je kemijski sastav čelika prema navedenoj normi prikazan u tablici 13.

Tablica 13. Kemijski sastav čelika S235 JR [21]

| S235 JR | C | Mn | P | S | N | Cu |
|---------|------|------|-------|-------|-------|------|
| max., % | 0,17 | 1,40 | 0,035 | 0,035 | 0,012 | 0,55 |

Za tu debljinu maksimalni ugljični ekvivalent (CEV) mora biti 0,35 što znači da se radi o dobro zavarljivom čeliku.

Mehanička svojstva za debljinu materijala od 10 mm dana su u tablici 14. Tvrdoća osnovnog materijala je navedena prema [22] kako bismo ju usporedili sa stanjem u metalu zavara i ZUT-u nakon zavarivanja. Vrijednosti izmjerene Brinellovom metodom nešto su niže od onih izmjerenih Vickersovom metodom [23].

Tablica 14. Mehanička svojstva čelika S235 JR [21]

| Granica razvlačenja, R_e N/mm ² | Vlačna čvrstoća, R_m N/mm ² | Udarna radnja loma pri 20°C, J | Istezljivost, A % | Tvrdoća, HB informativno |
|---|---|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| 235 | 360 - 510 | 27 | 26 | 104 – 154 |

Dodatni materijal je elektroda pod trgovačkim nazivom VAC 60 primjera 1,6 mm koju proizvodi Elektrode Jesenice. Na slici 23. je tehnički list za dodatni materijal izvađen iz kataloga. Ova elektroda koja prema normi AWS A5.18 ima oznaku ER70S-6 prema normi AWS A5.26M bi imala oznaku EG482S-6.



VAC 60 * TIG VAC 60

Klasifikacija:

| | |
|--------------------|------------------|
| EN 440 | G 42 5 C/M G3Si1 |
| EN 1668 | W 42 5 W3Si1 |
| DIN 8559 | SG 2 |
| | WSG 2 |
| | 1.5125 |
| W.Nr | ER 70 S-6 |
| ASME/AWS SFA A5.18 | W 42 5 W3Si1 |
| EN ISO 636-A | W 49 5 WE |
| EN ISO 636-B | G42 5M/C G3Si1 |
| EN ISO 14341-A | G 49A 5 M/C G6 |
| EN ISO 14341-B | |

Osobine i primena:

Pobakrena ili nepobakrena žica za zavarivanje u zaštitnom gasu MAG postupkom. Pogodna je za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 530 N/mm². Takođe, koristi se za zavarivanje kotlovskih limova, cevi, čelika za brodogradnju, mikrolegiranih čelika i čeličnih livova. CTOD - atestirana (VAC 60 žica) žica u obliku štapova za zavarivanje TIG postupkom se najviše koristi za zavarivanje korenih zavara.

Osnovni materijali

| | DIN, AISI: | EN: |
|------------------------|--|---------|
| Nelegirani čelici | St 33 do St 60.2 | 10025 |
| Sitnozmi čelici | St E 255 do St E 355 W St E 255 do W St E 355 | - |
| Kotlovski limovi | H I, H II, 17Mn4, 19Mn5 | 10028-2 |
| Čelici za cevi | St 35 do St 52.4 E St E 210.7 do St E 360.7 | - |
| Čelici za brodogradnju | A, B, D, E | 10025 |
| Čelični livovi | GS 38 do GS 52 | - |

Hemijski sastav žice (%)

| C | Si | Mn | P | S |
|------|------|------|---------|---------|
| 0,08 | 0,90 | 1,50 | < 0,025 | < 0,025 |

Mehaničke osobine čistog metala šava

| | Napon tečenja R _p N/mm ² | Zatezna čvrstoća R _m N/mm ² | Izduženje A ₅ % | Žilavost na - 40°C A _v J |
|------------|---|--|-------------------------------|--|
| VAC 60 | > 410 | 510 – 590 | > 22 | > 47 |
| TIG VAC 60 | > 410 | 540 – 640 | > 22 | > 47 |

Zaštitni gasovi: MAG - postupak 100% CO₂, Ar + 18% CO₂, CO₂ + Ar + O₂
(C1, M21, M22 - M33 po EN 439)
TIG - postupak Ar (I1 po EN 439)

Dimenzije žice: prečnik 0,6; 0,8; 0,9; 1,0; 1,2; 1,6 mm
Dimenzije štapova: prečnik 1,6; 2; 2,5; 3 mm, dužina 1000 mm

Pakovanje: Žica je namotana na koture – metalne ili plastične, (po standardu AWS A5.18 i DIN 8559), slobodno ili precizno namotana, navoj do navoja.
Štapovi su pakovani u kartonsku kutiju, težine 25 kg.

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

Slika 23. Tehnički list za dodatni materijal za zavarivanje VAC 60

9.3. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi korišteni pri eksperimentalnom radu su čisti ugljikov dioksid oznake C1 i plinska mješavina od 82% Ar i 18% CO₂ trgovačkog imena Ferroline C18 i oznake M21 (označeni prema normi *HRN EN ISO 14175:2008 Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke*). Proizvođač obaju plinova je Messer. Protok zaštitnih plinova pri zavarivanju je 20 l/min.

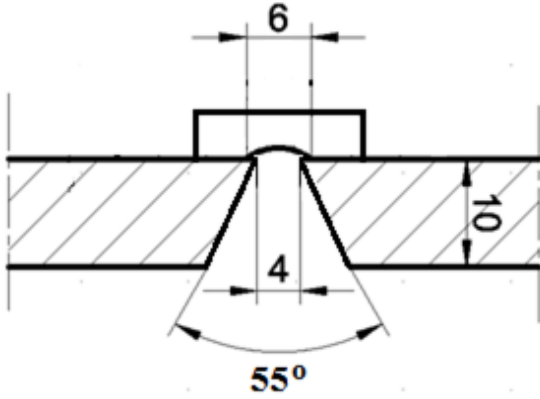
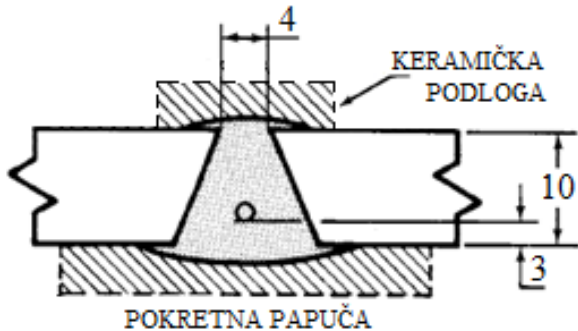
9.4. Parametri zavarivanja

U tablici 15. su prikazani početni parametri prema iskustvenim podacima [8]. Unos topline je izračunat prema formuli iz norme HRN EN 1011-1:2009 Zavarivanje – Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje:

$$Q = k \times \frac{Q \times I}{v} \times 10^{-3}, [\text{KJ}/\text{mm}]$$

Faktor toplinske iskoristivosti postupka (k) uzet je isti kao i za MIG/MAG i FCAW, odnosno 0,8.

Tablica 15. Parametri zavarivanja

| Mjesto: Laboratorij za zavarivanje, FSB Zagreb Oznaka upute za zavarivanje (WPS): 11/2016 Postupak zavarivanja: EPZ 73 Vrsta zavara i spoja: BW (sučeljen spoj) Pojednosti pripreme žlijeba: V spoj s keramičkom podlogom | | | | Način pripreme rubova i čišćenja: plinsko rezanje, brušenje Specifikacija osnovnog materijala: EN 10025-2:2004: S235JR ISO/TR 15608:2005: grupa 1.1 Debljina ploča: 10 mm. Širina ploča: min. 150 mm, Visina ploča: 1000 mm Položaj zavarivanja: PF | | | |
|--|----------|---------------------------------|-----------|--|-------------------------|----------------------------|---------------------|
| Oblikovanje zavarenog spoja | | | | Položaj elektrode | | | |
|  | | | |  | | | |
| Prolaz | Postupak | Promjer dodatnog materijala, mm | Struja, A | Napon, V | Vrsta struje, polaritet | Brzina zavarivanja, mm/min | Unos topline, kJ/cm |
| 1. | 73 EPZ | 1,6 | 230 | 24 | DC(+ pol) | 70 - 80 | 35 |
| 2. | 73 EPZ | 1,6 | 230 | 24 | DC(+ pol) | 70 - 80 | 35 |
| Dodatni materijal (vrsta / trgovačko ime) ISO 14341-A G3Si1 / Jesenice VAC 60 Zaštitni plinovi (vrsta / trgovačko ime) 1. prolaz ISO 14175 C1 / Messer Tehnički ugljikov dioksid 2. prolaz ISO 14175 M21 / Messer Ferroline C18 Protok plina 20 l/min | | | | Dodatne informacije: 1. Pripremiti rubove tako da kut između njih bude 55° kako je prikazano na slici. 2. Razmak između korijena ploča treba biti 4 mm. 3. Slobodni kraj žice 35 mm (uz postavku stickout -40) 4. Prije zavarivanje potrebno je pripojiti pločicu na dnu spoja te napraviti pripoje na sredini i kraju ploče. Pripoj je potrebno prebrusiti. 5. Pripremljeni spoj mora biti čist | | | |

9.5. Priprema i položaj elektrode

Ploče su plinski izrezane na dimenzije 1000 x 150 x 10 (visina x širina x debljina) i obrađene tako da je kut jednostrukog sučeljenog V-spoja 55° .

Prije postavljanja ploča na nosač potrebno je napraviti pripremu. Na pločama je najprije pripojena pločica na dnu spoja da bi se uspostavio električni luk i da talina ne bi iscurila. Potom su napravljeni pripoji na sredini i na vrhu spoja, slika 24., da se ploče ne bi pomaknule uslijed unosa topline. Da bi se osigurao razmak između korijena točno 4 mm između ploča su stavljene pločice te debljine koje su nakon „heftanja“ maknute. Na kraju su pripoji na samom spoju prebrušeni. „Heftanje“ je napravljeno MAG zavarivanjem.



Slika 24. Pripajanje pločice i ploča za zavarivanje

Stranice žlijeba i površina osnovnog materijala oko spoja očišćena je žičanom četkom od nehrđajućeg čelika, a korijen zavora je očišćen alkoholom prije stavljanja keramičkih podloga. Keramičke podloge, dužine oko 120 mm sa širinom žlijeba polukružnog oblika od 6 mm, spojene su s osnovnim metalom ljepljivom aluminijskom trakom.

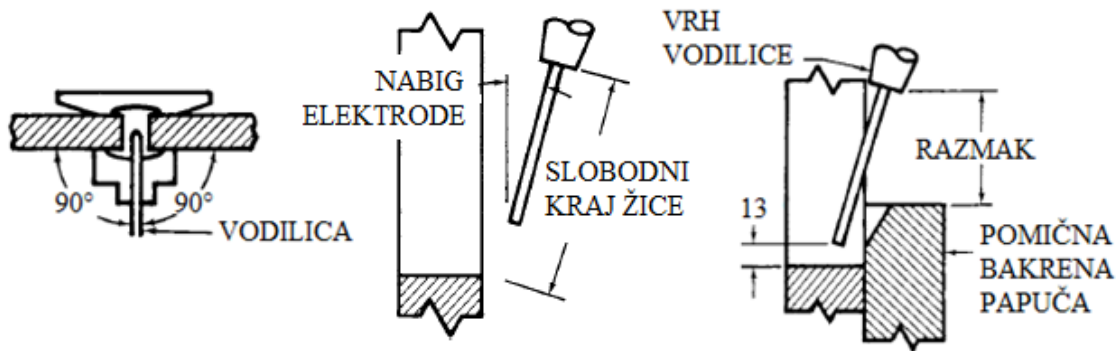
Ploče su potom stavljene na nosač i pričvršćene stegama prema slici 25. lijevo. Na slici 25. u sredini prikazana je stražnja strana na kojoj se vidi kako je keramika pričvršćena trakom.

Zbog velikog unosa topline i depozita preko keramike je još dodatno učvršćena čelična ploča, prikazano na slici 25. desno, kao dodatno osiguranje od curenja taline i ispadanja keramičkih podloga.



Slika 25. Priprema za zavarivanje

Upute za namještenje elektrode prema [1] prikazane su na slici 26. Kut kontaktne cjevčice, to jest elektrode, prema spoju je uvijek 90° , odnosno u središtu pripreme, slika 26. lijevo. Zatim se namješta elektroda. Nagib elektrode je moguće namjestiti od 0° kada je elektroda paralelna sa stranicama žlijeba što je povoljni slučaj kod I-spoja do nagiba od 20° koji se koristi kod V-spoja prema slici 26. u sredini. Pozicija elektrode se namješta mjerenjem od prednje strane ploče, prikazano u tablici 15. Prije zavarivanja potrebno je namjestiti elektrodu tako da je udaljena oko 13 mm od startne pločice, slika 26. desno. Kontaktna cjevčica ne smije doći u kontakt s kalupom. Na slici 27. prikazan je položaj elektrode prije zavarivanja.



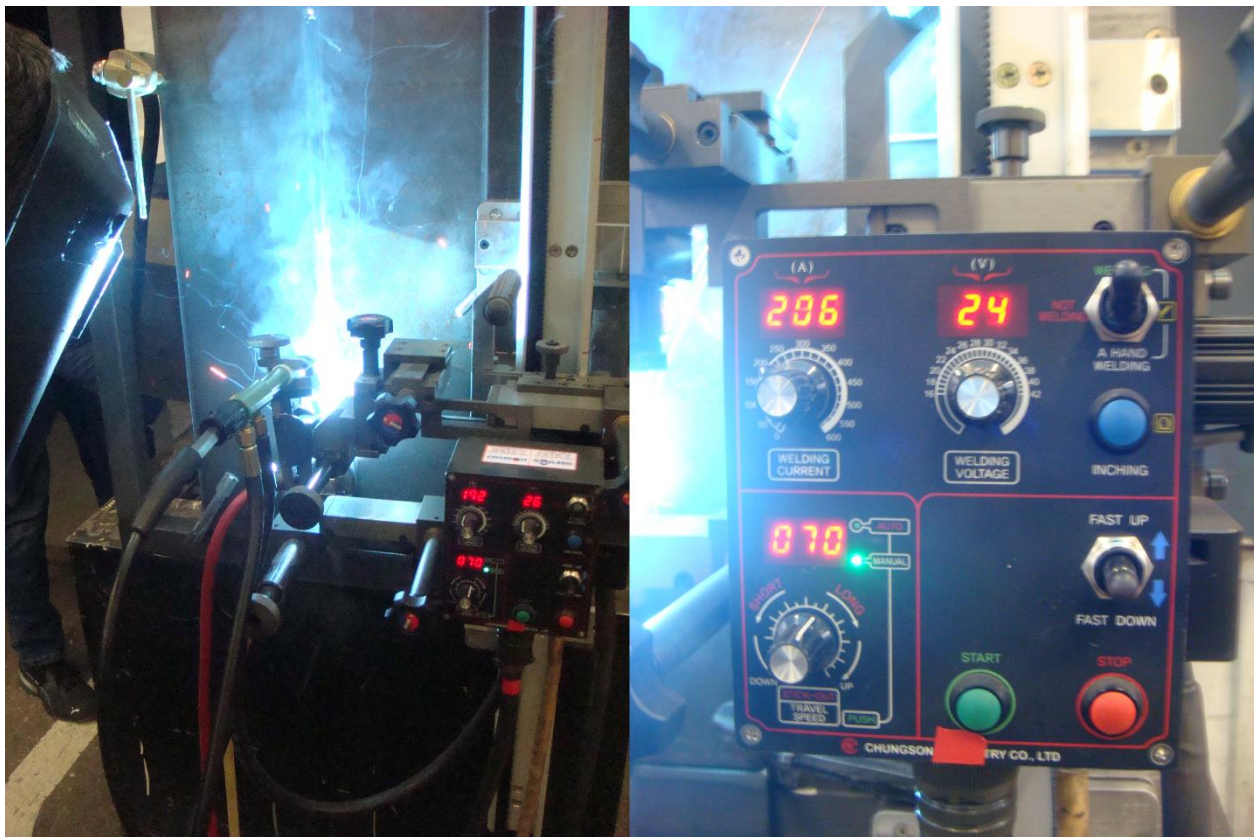
Slika 26. Upute za pozicioniranje elektrode [1]



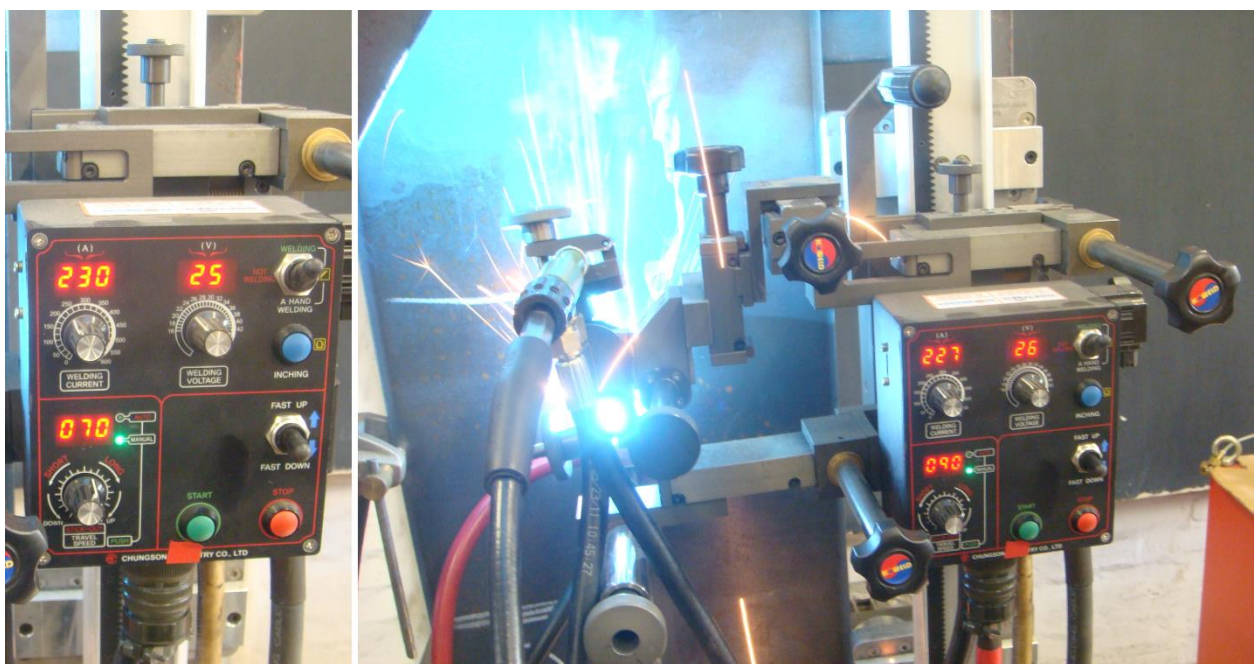
Slika 27. Položaj elektrode prije zavarivanja

9.6. Izvođenje zavarivanja

Najprije je napravljen pokusni zavar. Problemi na početku su bili protok vode za hlađenje papuče te nedovoljni pritisak papuče na osnovni materijal zbog čega je došlo do izlivanja taline. Nakon ispravljanja pogrešaka krenulo se sa zavarivanjem sa zaštitnim plinom CO_2 , a zatim s mješavinom 82% Ar / 18% CO_2 . Brzina gibanja se prilagođavala količini taline tako da se talina ne prelije ili ne iscuri. Oba prolaza su prikazana na slikama 28. i 29.



Slika 28. EPZ sa zaštitom C1 i trenutačnim vrijednostima parametara zavarivanja



Slika 29. EPZ sa zaštitom M21 i povećanom brzinom gibanja kako se talina ne bi prelila

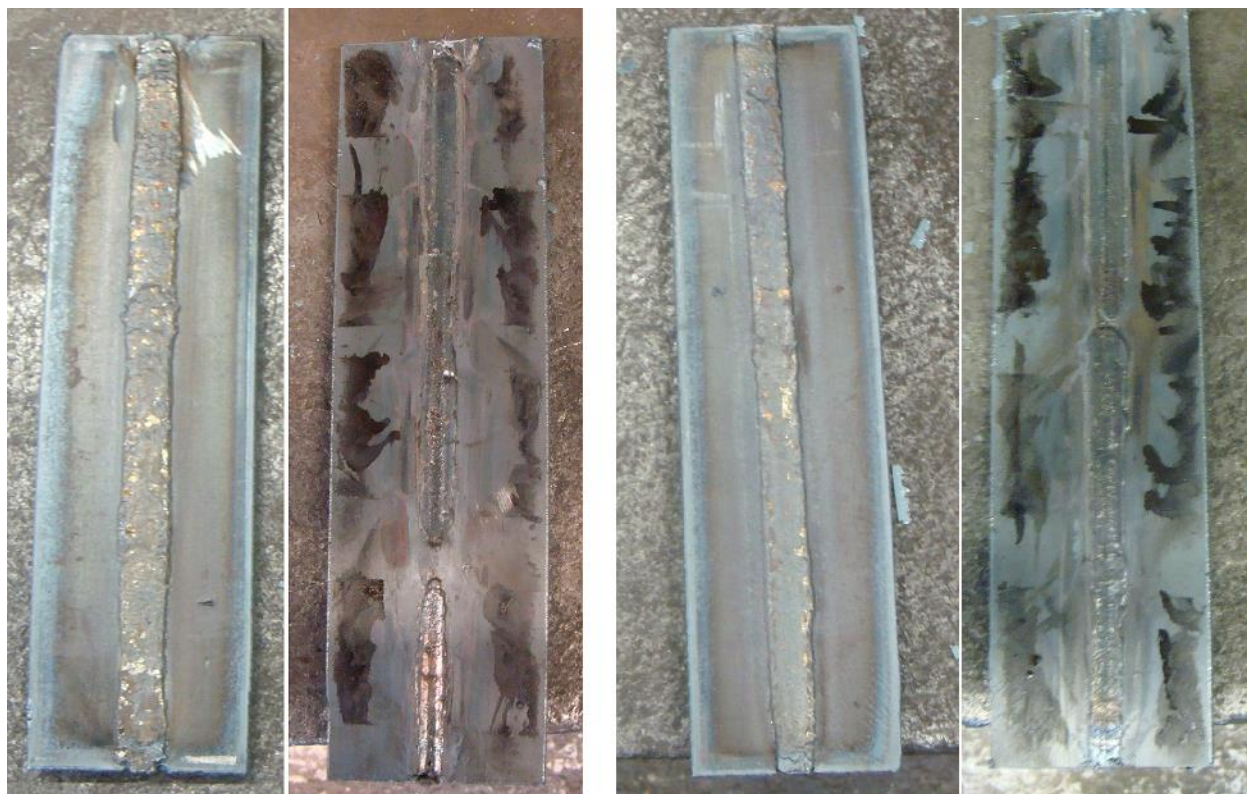
9.7. Vizualno ispitivanje nakon zavarivanja

Nakon zavarivanja ploče su skinute s nosača kako bi se ustvrdile nastale deformacije i pogreške. Na slici 30. je prikazana ploča s prednje i stražnje strane nakon zavarivanja. Kutnih deformacija u horizontalnoj ravnini gotovo da i nema. To je zbog simetrije oblika zavarenog spoja koja rezultira jednolikim skupljanjem u smjeru debljine. To će se kasnije vidjeti analizom makroizbrusaka. Kako zavarivanje napreduje radni komadi se zajedno uvlače skupljanjem zavara. Kod konvencionalnih postupaka česte su kutne deformacije kod sučeljenog V-spoja zbog veće mase zavara na gornjoj strani spoja. Ovim su postupkom kutne deformacije izbjegnute. Vizualnim pregledom nisu se uočile nikakve pore, pukotine ili ugorine. Također nema prskotina što je važno u pogledu ekonomičnosti EPZ-a.



Slika 30. Izgled ploče s prednje i stražnje strane nakon zavarivanja

S prednje strane ploče su povučene crte kako bi se izrezale trake iz kojih će se zatim dobiti uzorci za ispitivanja mehaničkih svojstava. Trake, slika 31., izrezane su plinskim postupkom na automatskoj rezačici „Uljanik“. Za svaki prolaz bilo je potrebno izrezati po 4 uzorka, jedan za makro analizu na kojem će biti napravljeno i mjerenje tvrdoće, a po tri za ispitivanje udarne radnje loma, znači sveukupno 8 uzoraka.



Slika 31. Lice i korijen zavora uz zaštitu C1 (slika lijevo) i M21 (slika desno)

Lice metala zavora je grubo, nešto je glađe kod primjene zaštitnog plina M21. Razlog grubom licu je u intenzivnom hlađenju zbog protoka vode kroz bakrenu papuču što pogrubljuje površinu. Naime, zbog veće brzine hlađenja talina nema vremena da pravilno popuni žlijeb papuče i da oblikuje glatko lice zavora. Širina zavora je ravnomjerna cijelim prolazom bez grubih prijelaza. Nadvišenje zavora je oko 2,5 mm, također dosta ravnomjerno. Može se smanjiti primjenom pliće papuče.

Kod upotrebe keramike, znači sa stražnje strane, postiže se glađa površina. Na dva mjesta korijen je neprovaren. Kod upotrebe zaštitnog plina C1 neprovareni korijen je nešto duži. Uzrok neprovarenom korijenu može biti povećanje brzine zavarivanja kako bi se spriječilo curenje taline.

9.8. Ispitivanje mehaničkih svojstava zavara

9.8.1. Makroskopsko ispitivanje zavara

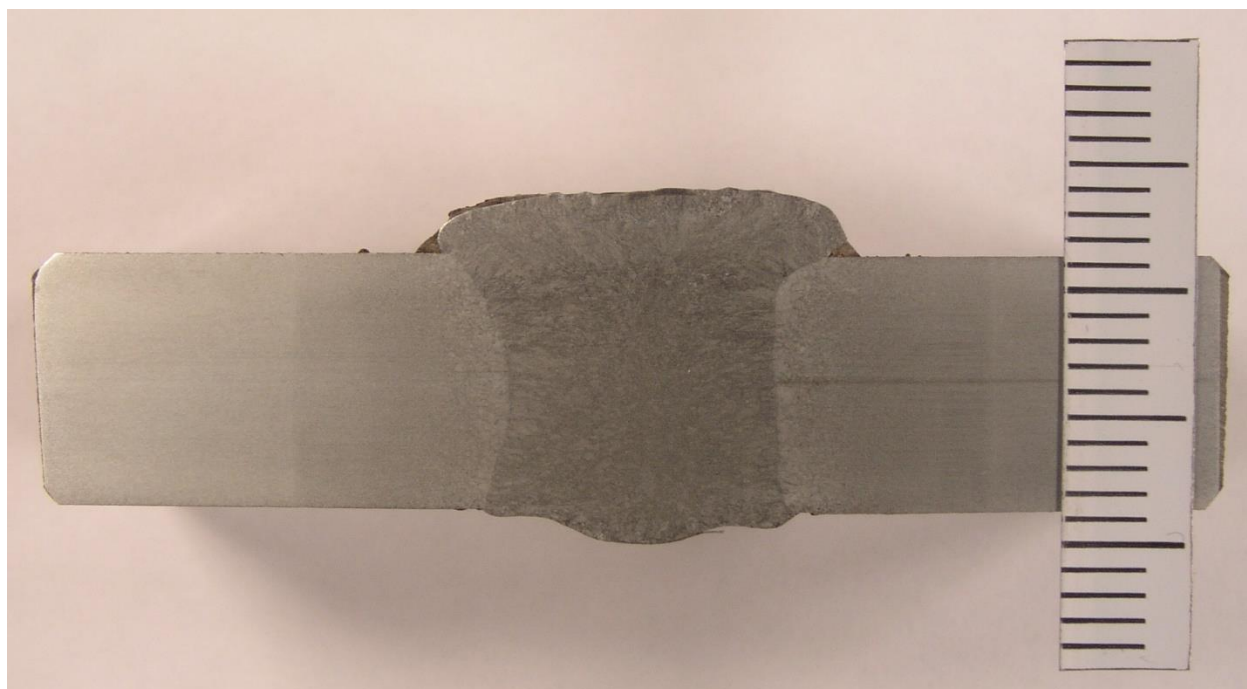
Ispitivanje makrostrukture zavarenog spoja radi se prema normi *HRN EN ISO 17639:2013 Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala - Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara*.

Za makroanalizu potrebno je odgovarajuće pripremiti uzorke. Nakon izrezivanja uzoraka dimenzija 45 x 20 x 10 mm na tračnoj pili, uzorci se moraju mehanički i kemijski obraditi za makroanalizu. Obrada se provodi na uređaju navedenom na slici 32. Na stol od uređaja stavlja se brusni papir od manje prema većoj gradaciji, odnosno od hrapavijeg prema finijem. Brzina vrtnje stola, to jest brusnog papira je 300 min^{-1} . Prvo brušenje se vrši brusnim papirom P320, zatim P500 te onda slijedi strojno poliranje s P1000, P2000 i P4000. Vodeno hlađenje je tijekom svih koraka brušenja.

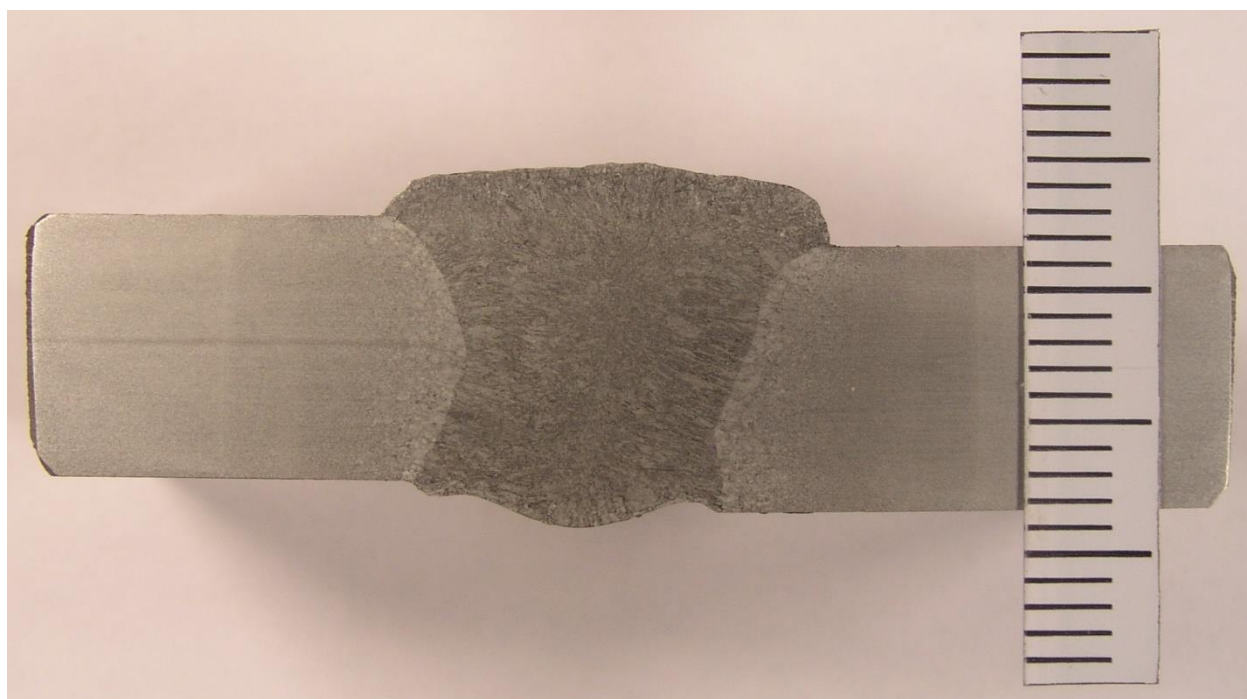


Slika 32. Uređaj za izradu makroizbrusaka

Nakon mehaničke obrade uzorci se stavljaju u 3 % nital. Nital je otopina dušične kiseline (HNO_3) u alkoholu koja se koristi za nagrivanje površine metala. Nakon dobivanja vidljive strukture uzorci se ispiru u vodi kako bi se prekinula kemijska reakcija. Zadnji korak je fotografiranje. Tako dobiveni uzorci omogućuju da se na ispitnom uzorku jasno vidi metal zavara, linija staljivanja te zona utjecaja topline. Ispitivanje se sastoji od vizualnog pregleda poprečnih presjeka uzoraka. Uzorak 1 je dobiven uz zaštitu s CO_2 , prikazan na slici 33., dok je uzorak 2 dobiven uz zaštitu 82% Ar i 18 CO_2 , prikazan na slici 34.



Slika 33. Makroizbrusak uzorka 1 – C1



Slika 34. Makroizbrusak uzorka 2 – M21

U oba slučaja vidi se homogena struktura metala zavara. Struktura metala zavara je gruba i vidljiva su stupičasta zrna koja svjedoče o načinu skrućivanja metala zavara. Naime, skrućivanje kod EPZ-a počinje od površine bakrenog kalupa (i podloge) i okomito je na smjer gibanja elektrode kod zavarivanja. Zbog toga su u centru zavara zaostala vlačna naprezanja, a na vanjskim površinama tlačna naprezanja. Takva gruba struktura svjedoči niskoj žilavosti i visokoj prijelaznoj temperaturi. Penetracija je u oba slučaja dobra te nema naljepljivanja. Zavar je simetričan kod upotrebe CO₂. CO₂ uzrokuje dublju i širu penetraciju pa iz toga proizlaze gotovo paralelne linije staljivanja. Kod uzorka 2 zavar nije simetričan jer je došlo do posmaknutosti od 1 mm. Razlog može biti u pucanju pripoja tijekom zavarivanja zbog čega su se rubovi pomaknuli relativno jedan prema drugome.

ZUT je općenito širi nego kod konvencionalnih postupaka zbog visokog unosa topline. Kod linije staljivanja vidi se prilično gruba struktura što je posebno kritično za žilavost. Također, ZUT je nešto širi kod uzorka 2 što može svjedočiti nešto većem unosu topline.

9.8.2. Mjerenje tvrdoće

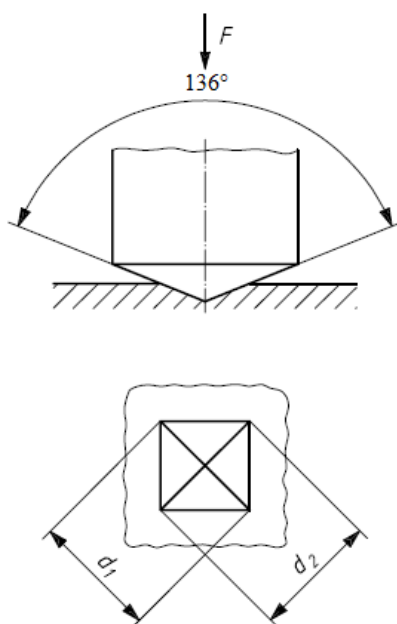
Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom radi se prema normi *HRN EN ISO 6507-1:2008 Metalni materijali -- Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu -- 1. dio: Ispitna metoda.*

Da bi se tvrdoća ispitala prema Vickersu potrebno je imati metalografsko pripremljenu površinu pa se zato mjerenja rade na makroizbruscima. Drugi uvjet je tvrdomjer s mjernim mikroskopom. Mjerenje tvrdoće je rađeno na uređaju Reichert TM12., slika 35.



Slika 35. Uređaj za mjerenje tvrdoće

Vickersovom metodom HV10 moguće je mjeriti materijale svih tvrdoća neovisno o primijenjenoj sili. To se postiže materijalom i geometrijom penetratora. Penetrator je istostrana četverostrana piramida s kutom između stranica 136° napravljenim od dijamanta, slika 36. gore. Utiskivanjem ovakvog penetratora u materijalu ostaje oblik piramide, slika 36. dolje. Na temelju veličine otiska određuje se tvrdoća [23].

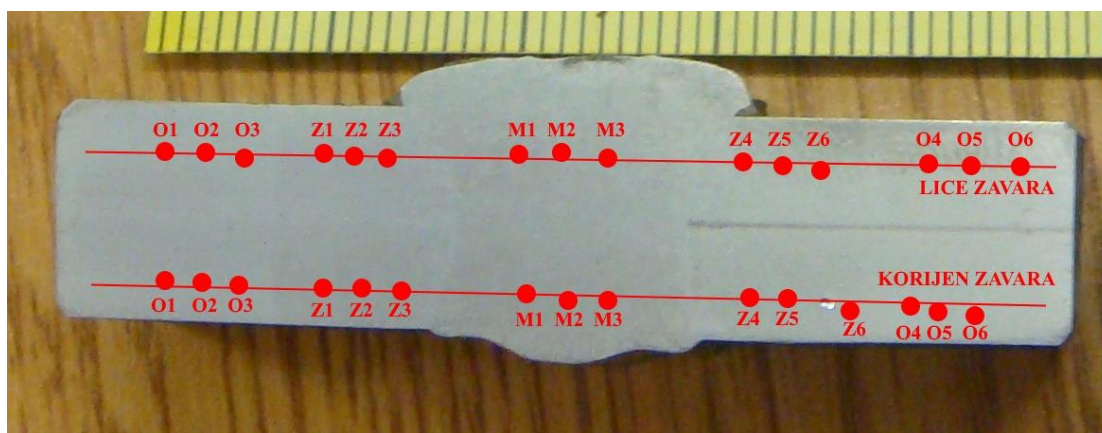


Slika 36. Principi mjerenja kod Vickersove metode [23]

Indeks 10 označava primijenjeno opterećenje u kp, to znači da sila utiskivanja iznosi $10 \cdot 9,81 = 98,07$ N. Nakon utiskivanja pomoću mikroskopa se mjere dijagonale d_1 i d_2 te se iz tablica očitavaju vrijednosti tvrdoće za svaku dijagonalu i konačno se uzima srednja vrijednost. Tablične vrijednosti su izračunate prema sljedećoj formuli:

$$HV = \frac{F \cdot 0,189}{d^2}$$

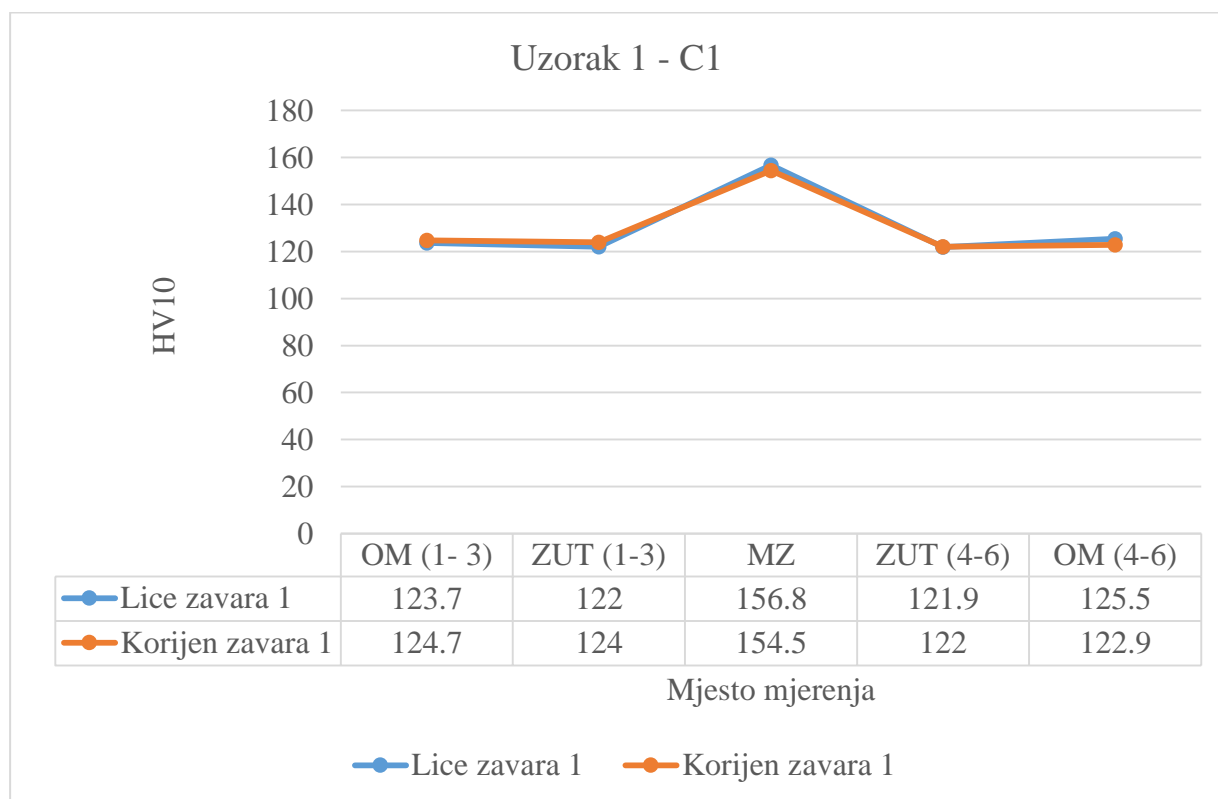
Mjerenje je rađeno u dvije linije po uzorku s po tri mjerenja u osnovnom metalu te po 6 u ZUT-u i metalu zavara. Ukupno 15 mjerenja po liniji, slika 37 i 39. Kako osnovni (C=0,17%) i dodatni materijal (C=0,08%) karakterizira nizak udio ugljika za očekivati je niske vrijednosti tvrdoće. Prosječne vrijednosti tvrdoće osnovnog materijala mjerene Brinellovom metodom iznose od 104 do 153 HB [21]. To bi prema normi *ISO 18265:2013 Metalni materijali — pretvaranje vrijednosti tvrdoće* iznosilo od 110 do 160 HV10. U tablicama 16. i 17. su prikazani rezultati mjerenja i izračunate srednje vrijednosti tvrdoće za svaku liniju za OM, ZUT i MZ. Radi što bolje analize rezultati mjerenja su prikazani grafički na slikama 38. i 40., dok je su na slici 41. grafički prikazani rezultati svih mjerenja radi usporedbe.



Slika 37. Mjesta mjerenja tvrdoća na uzorku 1

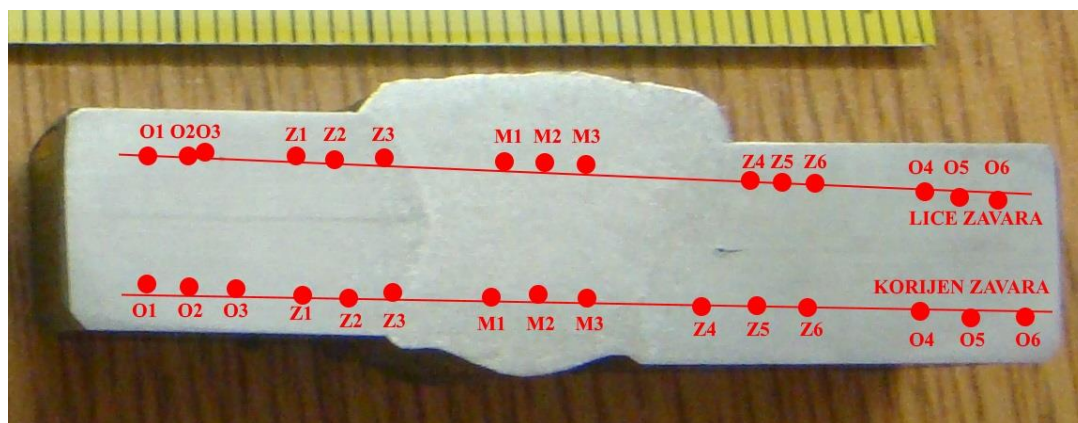
Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoća za uzorak 1

| HV10 | LICE | \bar{x}_{HV10} | KORIJEN | \bar{x}_{HV10} |
|------|-------|------------------|---------|------------------|
| O1 | 125,8 | 123,7 | 124,2 | 124,7 |
| O2 | 122,9 | | 125,5 | |
| O3 | 122,5 | | 124,5 | |
| Z1 | 122,3 | 122 | 125,8 | 124 |
| Z2 | 120,4 | | 120,4 | |
| Z3 | 123,2 | | 125,8 | |
| M1 | 155,5 | 156,8 | 153,5 | 154,5 |
| M2 | 154,5 | | 154 | |
| M3 | 160,5 | | 156 | |
| Z4 | 124,5 | 121,9 | 124,5 | 122 |
| Z5 | 118,6 | | 124,2 | |
| Z6 | 122,6 | | 117,4 | |
| O4 | 122,9 | 125,5 | 121,7 | 122,9 |
| O5 | 123,2 | | 121,9 | |
| O6 | 130,5 | | 125,2 | |



Slika 38. Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 1

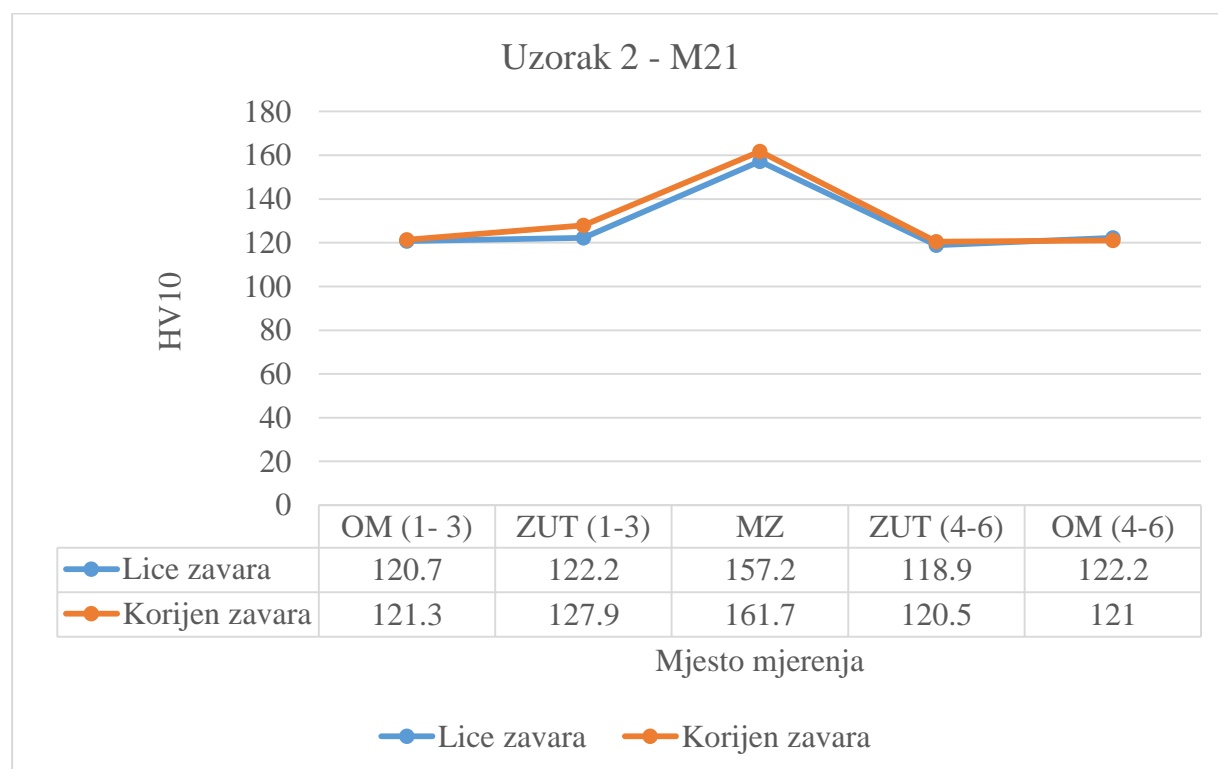
Kao što je i pretpostavljano u cijelom zavaru izmjerene su niske vrijednosti tvrdoća. Ono što je karakteristično za EPZ ujednačen je raspored tvrdoća u osnovnom materijalu i ZUT-u. Za razliku od konvencionalnih postupaka kod kojih se najviše vrijednosti tvrdoća općenito mjere u ZUT-u, ovdje izostaju tvrde strukture. Razlog leži u visokom unosu topline. Kod MIG/MAG zavarivanja prosječne vrijednosti su od 10 do 20 kJ/cm, dok su unosi toplina u eksperimentu bili i do 35 kJ/cm. Zbog niske brzine zavarivanja (70 – 90 mm/min) hlađenje je sporo pa ne dolazi do zakaljivanja, a dugo djelovanje topline dovodi do pogrubljivanja strukture što se negativno odražava na žilavost. Također, zamjetna je malo niža vrijednost tvrdoće u ZUT-u nego u osnovnom materijalu zbog veće izloženosti toplini, a što je vidljivo na grafičkom prikazu. Vrijednosti tvrdoća metala zavara su osjetno veće. Ako se zna da su tvrdoća i čvrstoća u korelaciji onda to znači i veću čvrstoća metala zavara. To proizlazi iz kemijskog sastava žice koja je legirana silicijem čiji je glavni utjecaj na svojstva čelika povišenje granice tečenja R_e .



Slika 39. Mjesta mjerenja tvrdoća na uzorku 2

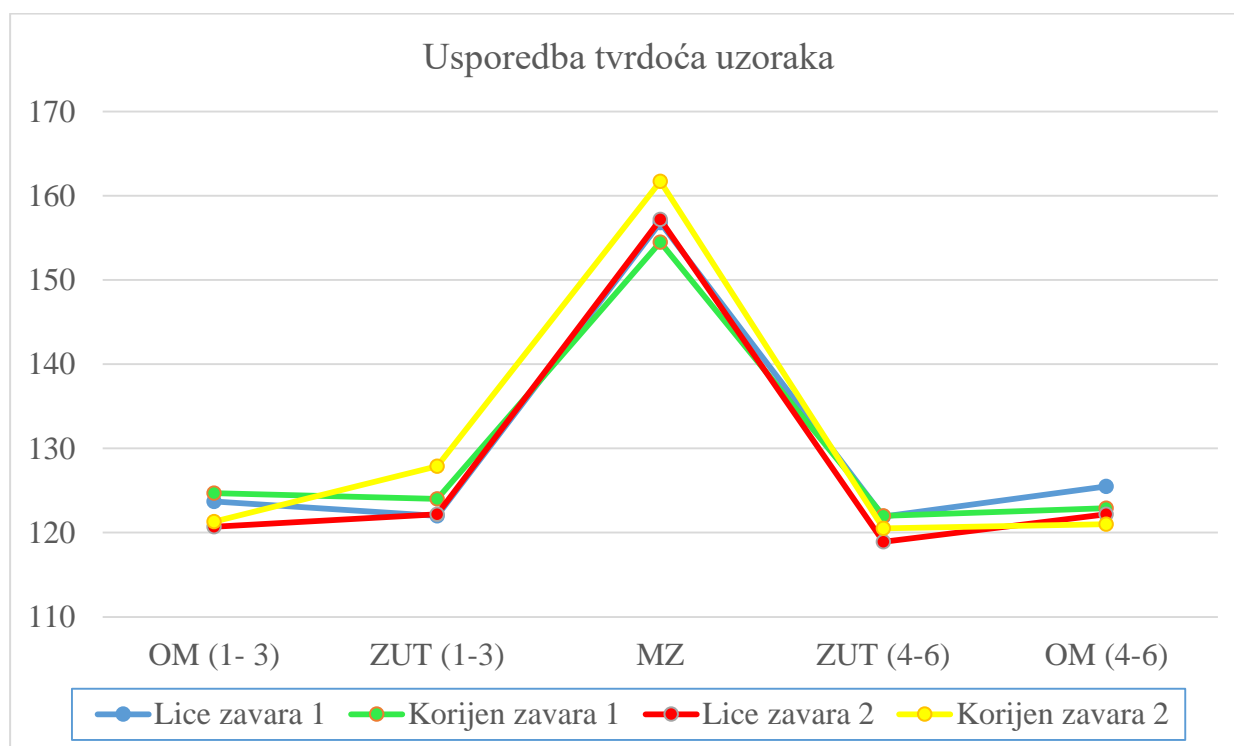
Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoća za uzorak 2

| HV10 | LICE | \bar{x}_{HV10} | KORIJEN | \bar{x}_{HV10} |
|------|-------|------------------|---------|------------------|
| O1 | 120,7 | 120,7 | 123,6 | 121,3 |
| O2 | 122,6 | | 121,3 | |
| O3 | 118,9 | | 118,9 | |
| Z1 | 120,4 | 122,2 | 121,3 | 127,9 |
| Z2 | 116,5 | | 123,6 | |
| Z3 | 129,8 | | 138,9 | |
| M1 | 157 | 157,2 | 153,2 | 161,7 |
| M2 | 157,5 | | 160,5 | |
| M3 | 157 | | 171,5 | |
| Z4 | 118,6 | 118,9 | 122 | 120,5 |
| Z5 | 120,5 | | 119,8 | |
| Z6 | 117,7 | | 119,8 | |
| O4 | 121,6 | 122,2 | 120,1 | 121 |
| O5 | 122,6 | | 121,7 | |
| O6 | 122,3 | | 121,3 | |



Slika 40. Grafički prikaz tvrdoća na uzorku 1

Kod upotrebe M21 gotovo je identična situacija kao i kod upotrebe C1. Ujednačen je profil tvrdoća u ZUT-u i u osnovnom materijalu dok su osjetno veće vrijednosti u metalu zavara. Unos topline je opet visok (>30 kJ/cm) pa je ovakav rezultat mjerenja tvrdoća očekivan. U ZUT-u korijena s lijeve strane (1-3) veća je tvrdoća nego u ostatku ZUT-a zavara. Ako se pogleda mjesto mjerenja vidjet će se da je mjerna lokacija Z3 skoro na liniji staljivanja. Kako je EPZ visoko taljiv proces, moguće je da je metal elektrode koji je kvalitetniji od osnovnog metala doprinio nešto većoj tvrdoći nakon miješanja.



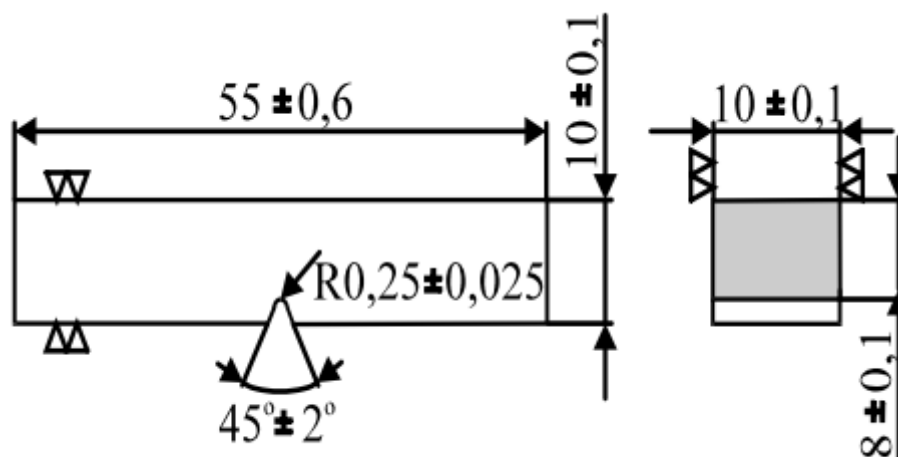
Slika 41. Grafička usporedba tvrdoća uzoraka 1 i 2

Za oba uzorka karakterističan je ujednačen profil tvrdoća osnovnog materijala i ZUT-a te povišena tvrdoća metala zavara. Ako se usporede tvrdoće metala zavara uzorka 1 i 2 zamjetna je nešto veća tvrdoća i u korijenu i u licu uzorka 2, to jest, uzorku koji je dobiven s upotrebom zaštitnog plina M21. Kako CO_2 karakterizira visok stupanj oksidacije dolazi do vezanja kisika sa silicijem iz metala elektrode. Tako se silicij izlučuje izvan metala zavara što je izraženije nego kod upotrebe mješavine M21. Udio silicija u čeliku povezan je s mehaničkim svojstvima čelika pa njegovo smanjenje može utjecati i na smanjenje tvrdoće. Mješavina argona i CO_2 doprinijela je nešto većoj tvrdoći u metalu zavara. Zaključno, niske vrijednosti tvrdoća i ujednačeni profili, koji su karakteristični za EPZ, posljedica su visokog unosa topline.

9.8.3. Ispitivanje udarne radnje loma

Ispitivanje udarne radnje loma provodi se prema normi *HRN EN ISO 148-1:2012 Metalni materijali — Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom — 1. dio: Metoda ispitivanja.*

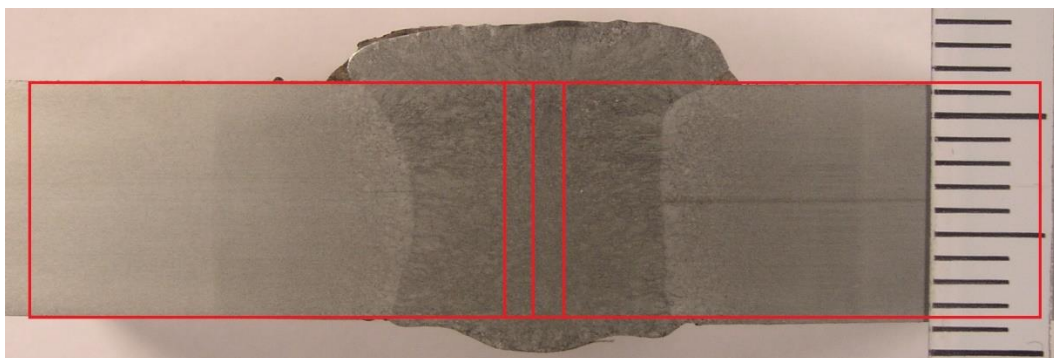
Prije samog ispitivanja na Charpyjevom batu moraju se pripremiti uzorci. Za oba prolaza priprema se po tri uzorka. Set se uzima iz metala zavara. Nakon grubog izrezivanja uzoraka iz trake na tračnoj pili uzorci su dani na glodanje kako bi se obradili na mjeru definiranu normom prema slici 42. Nakon toga uzorci su još ručno fino pobrušeni brusnim papirom gradacije 150 pa 500 te zatim nagrizeni u nitalu, otopini 3% dušične kiseline i alkohola. Cilj je dobiti vidljivu strukturu metala zavara kako bismo označili sredinu metala zavara na kojoj će biti izrađen V utor debljine 2 mm pod kutom od 45° .



Slika 42. Oblik i dimenzije epruvete s V utorom za ispitivanje udarne radnje loma [24]

Položaj epruvete za ispitivanje udarne radnje i položaj utora određuje se prema normi *HRN EN ISO 9016:201 Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima -- Ispitivanje udarnoga rada loma -- Položaj ispitnog uzorka, položaj zarez a i ispitivanje.*

Položaj utora prema slici 43. ima oznaku VWT 0/0. To znači da se radi o V utoru u metalu zavara izrezanom kroz debljinu spoja. 0/0 znači da je utor smješten kroz os zavara i da se proteže do površine zavara jer je debljina ploča 10 mm koliko mora iznositi i epruveta. Na slici 44. prikazane su pripremljene epruvete za ispitivanje udarne radnje loma.



Slika 43. Položaj utora za ispitivanje udarne radnje loma VMT 0/0



Slika 44. Epruvete za ispitivanje udarne radnje loma

Ispitivanje se provodi na Charpyjevom batu, proizvođača AVK Budapest u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava, slika 45. Princip funkcioniranja je sljedeći. Bat težine G podiže se na visinu h_1 te s obzirom na ravninu u kojoj se nalazi ispitni uzorak, posjeduje potencijalnu energiju $E_p = G \cdot h_1$. Puštanjem bata iz početnog položaja njegova potencijalna energija prelazi u kinetičku. U najnižem položaju sva se potencijalna energija pretvorila u kinetičku energiju. U tom trenutku brzina bata (v) iznosi 6 m/s. Na oslonce između kojih je razmak 40 mm centrirana se epruveta tako da je utor orijentiran suprotno od nadolazećeg bata. Kako bat lomi epruvetu utroši se određena količina kinetičke energije bata pa se bat u

uzlaznom dijelu penje na manju visinu nego pri slobodnom prolazu. Ta utrošena energija je udarna radnja loma i računa se prema izrazu:

$$KV = G \cdot (h_1 - h_2), J$$

Utrošena energija se očitava na skali uređaja. Uređaj na slici 45. može mjeriti do 300 J.



Slika 45. Charpyjev bat

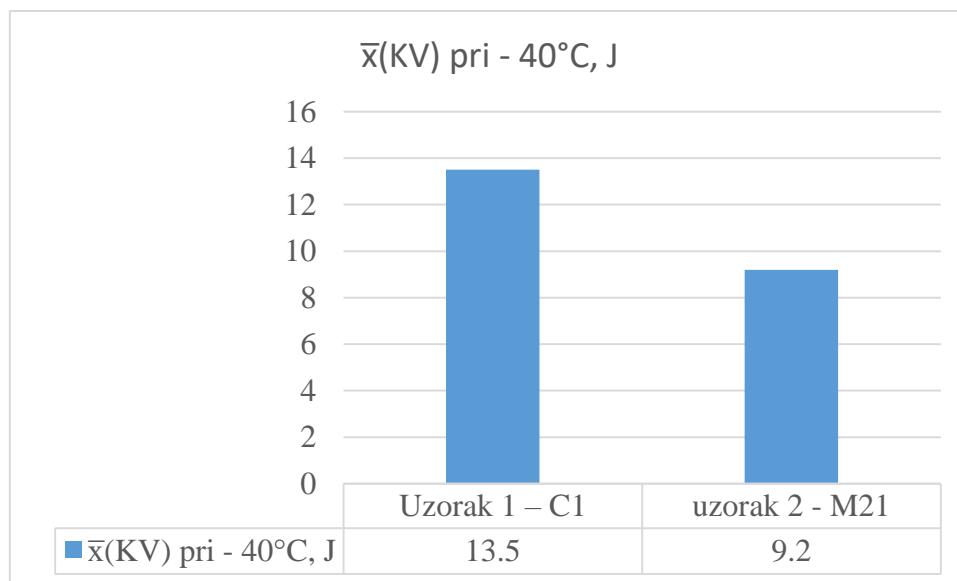
Prema tehničkom listu dodatnog materijala specificirana je udarna radnja loma od 47 J pri -40° . Za postizanje te temperature uzorci su ohlađeni u mješavini suhog leda i etilnog alkohola (96%). Uzorci su držani oko 15 minuta na temperaturi od oko -50°C kako bi temperatura pri stavljanju uzoraka bila u granicama $-40 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Temperatura je kontrolirana pomoću IR termometra Fluke 568 i to kontaktnom metodom prema slici 46.

Slika 46. Ohlađivanje uzoraka na -40°

Najveće ograničenje kod EPZ-a upravo je niska žilavost pri niskim temperaturama i visoka prijelazna temperatura. Razlog je metalurška struktura zavara koja se sastoji od krupnih stupičastih zrna koja nastaju zbog sporog očvršćivanja. Prema [1,12] zadovoljavajuće vrijednosti žilavosti pri niskim temperaturama postižu uglavnom praškom punjene žice od kojih se nešto bolji rezultati pokazuju kod upotrebe mješavina argona i ugljikova dioksida i to uglavnom do -20°C . Elektrode odgovarajuće žilavosti pri niskim temperaturama su legirane niklom. Ako se pogledaju rezultati žilavosti metala zavara za čelik ASTM A283 koji je ekvivalent čeliku S185 pri temperaturi od -20°C dobivaju se vrijednosti od oko 14 J [1]. Stoga je za očekivati nizak udaran rad s nešto većom žilavošću kod uzorka 2. U tablici 18. su prikazani rezultati ispitivanja udarne radnje loma, a na slici 47. su grafički prikazane srednje vrijednosti udarne radnje loma radi usporedbe.

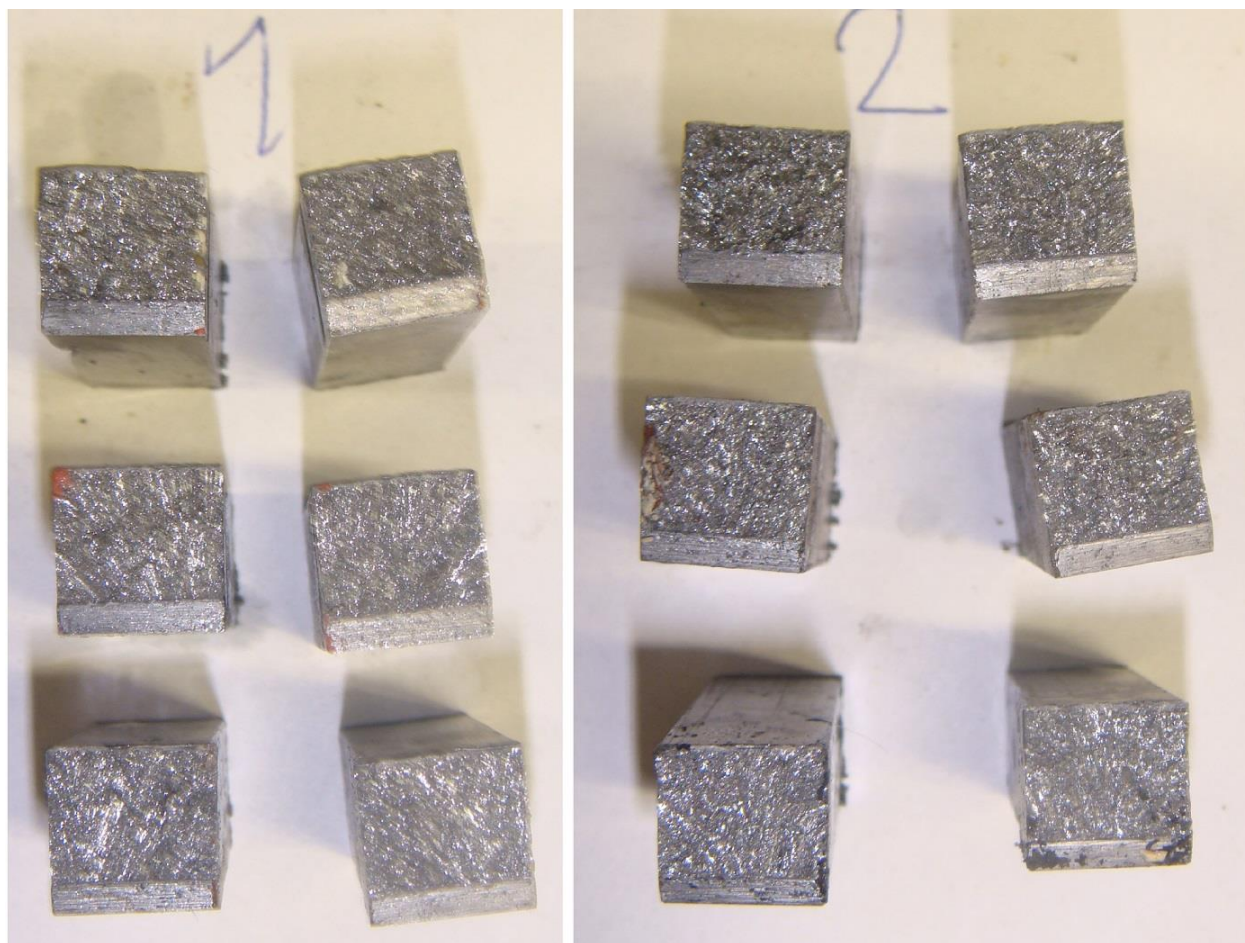
Tablica 18. Rezultati ispitivanja udarne radnje loma

| | KV (-40°C), J | | | \bar{K}_{KV} , J |
|----------------|---------------------------------|------|------|--------------------|
| Uzorak 1 – C1 | 12,5 | 16,5 | 11,5 | 13,5 |
| Uzorak 2 – M21 | 11 | 8 | 8,5 | 9,2 |



Slika 47. Grafička usporedba udarne radnje loma za uzorak 1 i 2

Rezultati su očekivano niski. Iako proizvođač dodatnog materijala G3Si1 garantira vrijednost udarne radnje loma u iznosu od 47 J pri temperaturi -40 °C, kod upotrebe s MAG zavarivanjem, kod EPZ-a gdje su unosi topline znatno veći postignute su niske vrijednosti. Također, prema slici 48., vidi se da je u oba uzorka došlo do krhkog loma što je i očekivano s obzirom na dobivene rezultate. Budući da nema vidljive plastične deformacije na prijelomnim površinama, može se zaključiti da je prijelazna temperatura viša od one na kojoj je provedeno ispitivanje, što je i očekivano. Uzroci nešto manje žilavosti kod uzorka 2 mogu biti zbog nešto većeg unosa topline.



Slika 48. Izgled prijelomne površine uzoraka iz zavarenih spojeva 1 i 2

10. ZAKLJUČAK

Unatoč svim spomenutim ograničenjima, EPZ je i dalje jedan od najboljih postupaka za vertikalno zavarivanje debljih materijala zbog svoje produktivnosti. Prema primjerima iz prakse [7] 400 % je veća produktivnosti EPZ-a u usporedbi s praškom punjenom žicom. Za zavarivanje debljine stijenke od 25mm, visine 2438mm (8ft) potrebno je 1,2 sati s elektrolinskim postupkom, dok je za isti slučaj s praškom punjenom žicom potrebno 5,3 sati. Razlog za to je u velikoj stopi depozita koja kod EPZ-a iznosi od 16 do 20 kg/h [6], prema [25] prelazi 12 kg/h, dok kod FCAW ona iznosi za vertikalne zavare od 4,5 do 6 kg/h [26]. Kod polu-automatskog MIG/MAG zavarivanja još su manje vrijednosti nataljenog materijala za vertikalne zavare, svega 1 do 2 kg/h za prijenos metala kratkim spojevima i do 2,7 kg/ za prijenos materijala impulsnim strujama [26]. Mali depozit proizlazi iz smanjenog unosa topline kako bi se smanjio utjecaj gravitacije. To se postiže elektrodama manjeg promjera, 1,2 mm ili manjeg čime je značajno smanjena produktivnost.

Postupak koji može konkurirati EPZ-u je automatsko zavarivanje s praškom punjenom žicom. Iako je postupak manje produktivan od EPZ-a njegova je upotreba raznovrsnija i oprema je mobilnija [25].

U eksperimentalnom dijelu rada ispitivana svojstva odgovaraju teorijskim razmatranjima. Visoki unos topline rezultirao je niskim tvrdoćama i ujednačenim profilom u ZUT-u i osnovnom materijalu i žilavošću manjoj od specificirane. Makroanalizom utvrđena je homogena struktura metala zavara, dobra penetracija i ujednačen izgled zavara bez pukotina, poroznosti ili onečišćenja kapljicama metala. Nakon zavarivanja nisu uočene nikakve kutne deformacije.

Shodno literaturnim podacima i saznanjima dobivenim provedenim eksperimentom u tablici 19. dan je operativni okvir parametara za debljinu materijal od 10 mm za konstrukcijski čelik S235.

Tablica 19. Operativni okvir parametara za debljinu materijala od 10 mm

| Parametar | Iznos | Komentar |
|-----------------------|------------------|---|
| Struja zavarivanja | 220 do 250A | Struje od 250 A su se pokazale dosta velikima pa je bilo potrebno povisiti brzinu gibanja. Najbolje su se pokazale struje od 230 A. |
| Napon | 23 do 26V | Povećanje napona (26V) kod upotrebe plina M21 donijelo je do većeg unosa topline što je rezultiralo nešto lošijoj žilavosti. |
| Slobodni kraj žice | oko 35mm | Zadovoljavajuće. |
| Brzina zavarivanja | 70 do 100 mm/min | Optimalnom se pokazala brzina od 80 mm/min. |
| Protok plina | 20 l/min | Zadovoljavajući protok, upotreba CO ₂ je doprinijela široj penetraciji, dok su kod M21 dobivene veće vrijednosti tvrdoće. |
| Širina bakrene papuče | 28 mm | Nadvišenje od oko 2,5 mm se može smanjiti upotrebom uže papuče. |
| Elektroda, promjer | G3Si1, 1,6 mm | Za upotrebu pri niskim temperaturama valjalo bi uzeti praškom punjene elektrode legirane s Ni i upotrijebiti osnovni materijal s višom žilavošću pri niskoj temperaturi. |
| Unos topline | 30-35 kJ/cm | Visok unos topline koji je rezultirao niski mehaničkim svojstvima. |
| Kut žlijeba | 55° | Velik kut žlijeba, užim žlijebom bi bio potreban manji depozit materijala što bi imalo bolji učinak na mehanička svojstva zbog nižeg unosa topline. Uži žlijeb bi djelovao i na povišenje brzine zavarivanja. |

LITERATURA

- [1] O'Brien, A. (ed.): „Welding Handbook, Volume 2: Welding Processes, Part 2“, 9th ed, AWS, Miami, 2004.
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=f4pjEN7ExI&list=LL0Sf5SvOnwV57A4DNSPt7zw&index=1&t=27s>; Hyundai Welding – EGW welding system
- [3] Welding and allied processes — Nomenclature of processes and reference numbers (ISO 4063:2009)
- [4] Olson, D.L.; Siewert, T.A.; Liu, S.; Edwards G.R.: „ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering“, ASM International, SAD, 1993.
- [5] Bawa, H.S.: „Workshop practice“ 2nd ed, Tata McGraw Hill, New Delhi, 2009.
- [6] http://www.weldcor.ca/encyclopedia.html?alpha=E&per_page=3 WeldCor Supplies Inc.
- [7] Lee, J. S.; Landon T. J.: „When the going gets tough“, Hydrocarbon Engineering, lipanj 2007.
- [8] Garašić, I.: „Elektroplinsko zavarivanje – primjena i specifičnosti“, seminar HDTZ, koordinatori zavarivanja, 2016.
- [9] <http://me-mechanicalengineering.com/electrogas-welding-egw/>
- [10] <http://www.sorex.com.tw/sorex/wp-content/uploads/2012/10/P.2-10-SFC-7211.pdf>
Elektroda za EPZ s taljivom vodilicom proizvođača SOREX.
- [11] Skupina autora: „Development of Two-electrode Electrogas Arc Welding Process“, Nippon Steel Tehnical Report, No. 90, srpanj 2004.
- [12] http://www.techproducts.se/documents/70370022_T.pdf Tehničke upute za Mini Vertomatic NC i LAF 100; Tech Products Sweden AB
- [13] Garašić, I.; Kožuh, Z.: „Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje“, FSB, Zagreb, 2016.

-
- [14] Specification for Carbon and Low-Alloy Steel Electrodes for Electrode Gas welding (AWS A5.26/A5.26M-97/SFA-5.26)
- [15] O'Brien, A. (ed.): „Welding Handbook, Volume 4: Materials and Applications, Part 1“ 9th ed, AWS, Miami, 2011.
- [16] Bilić, L.; „Utjecaj zaštitnih plinova na svojstva zavarenog spoja“, Završni rad, FSB, Zagreb, 2009.
- [17] Specification for Welding Shielding Gases (ANSI/AWS A5.32/A5.32M-97 (R2007))
- [18] ...: „MINI-EGW user manual“, Koweld, Chung Song Industry Co., LTD, Koreja
- [19] Juraga, I.; Ljubić, K.; Živčić, M.: „Pogreške u zavarenim spojevima“, 3. izdanje, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, 2007.
- [20] ...: „Instruction manual Model ProPAC350/500/600“, 1st ed, Hyosung Corporation, 2006.
- [21] HRN EN 10025-2 Toplo valjani proizvodi od konstrukcijskih čelika – 2. dio: Tehnički uvjeti isporuke za nelegirane konstrukcijske čelike
- [22] http://www.lucefin.com/wp-content/files_mf/s235jren42.pdf, technical card S235JR, Gruppo Lucefin, 2012.
- [23] Ivušić, V.; Franz, M.; Španiček, Đ.; Ćurković, L.: „Materijali 1“, FSB, Zagreb, 2011.
- [24] Alar, Ž.; „Mehanička svojstva materijala“ podloge za predavanja, FSB, 2016.
- [25] Howard, J.; Hatt, Sen, M.; Weld, I: „Tank construction in Saudi Arabia“, ESAB, Svetsaren, Vol 57, No 1., 2002.
- [26] Oberg, E.; „Machinery's Handbook“, 29th ed, Industrial Press, 2012.

PRILOZI

I. CD-R disc