

Operativne značajke dvostruko oplaštenih bazičnih elektroda

Pikelj, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:235:006713>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-11**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Pikelj

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Tomislav Pikelj

Zagreb, 2015.

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

Tomislav Pikelj

Zahvaljujem se svom mentoru Prof. dr. sc Zoranu Kožuhu, voditelju laboratorija Doc. dr. sc. Ivici Garašiću te asistentu Dr. sc. Matiji Bušiću, kao i svim laborantima i djelatnicima Zavoda za zavarene konstrukcije.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima, kolegama i djevojci koji su mi bili podrška tijekom studiranja i omogućili mi da ovaj studij uspješno privedem kraju.

Tomislav Pikelj

SAŽETAK

U ovom radu su analizirana i opisana svojstva bazičnih elektroda sa naglaskom na dvostruko oplastene bazične elektrode. Prikazana su osnovna pravila pri izboru i rukovanju elektrodama, njihova klasifikacija, operativne značajke i područja primjene. U eksperimentalnom dijelu je dana usporedba operativnih karakteristika dvostruko oplastene bazične elektrode s konvencionalnom bazičnom elektrodom. Prikazane su mogućnosti zavarivanja dvostruko oploštene bazične elektrode istosmjernom i izmjeničnom strujom, kao i zavarivanje korijena i popune zavora. Ispitane su mehaničke karakteristike zavora načinjenih dvostruko oploštenom elektrodom.

Ključne riječi: REL, elektrode, bazična elektroda, dvostruko oplastena elektroda

SUMMARY

This paper analyzes and describes basic properties of the electrodes with a focus on double-coated basic electrodes. Basic rules of a selecting and handling, classification, operating features and applications of the electrodes are presented. The experimental part shows a comparison between the operating characteristics of the double-coated basic electrodes with a conventional basic electrode . The possibility of welding with double-coated electrodes on DC and AC are shown. Mechanical properties of welds made by double-coated basic electrode were examine .

Key words: SMAW, electrodes, basic electrode, double- coated electrode



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: **TOMISLAV PIKELJ**

Mat. br.: **0035183594**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**OPERATIVNE ZNAČAJKE DVOSTRUKO OPLAŠTENIH
BAZIČNIH ELEKTRODA**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF DOUBLE COATED
BASIC ELECTRODES**

Opis zadatka:

Analizirati i opisati osnovne vrste obloženih elektroda za REL zavarivanje s posebnim naglaskom na bazične obloge. Specificirati približni kemijski sastav bazično obloženih elektroda i definirati načine određivanja bazičnosti konstituenata obloge. Usporediti mehanička svojstva zavara načinjenih bazičnim, rutilnim i celuložno obloženim elektrodama te istaknuti operativne značajke i područja primjene. Opisati klasifikaciju obloženih elektroda prema ISO normama.

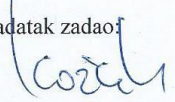
U eksperimentalnom dijelu potrebno je načiniti komparativnu analizu konvencionalne (EZ 50 B) i dvostruko oplastene (EZ 2B) bazične elektrode. Odrediti plan pokusa za procjenu operativnih značajki (zavarivanje korijena, mogućnost rada na izmjeničnoj i istosmjernoj struji, zavarivanje u prisilnim položajima) na osnovom materijalu iz grupe nelegiranih čelika. Na zavarenim uzorcima provesti odgovarajuća mehanička ispitivanja. U konačnici donijeti zaključke o operativnim značajkama dvostruko oplastenih bazičnih elektroda i eventualna područja primjene.

Zadatak zadan:
7. svibnja 2015.

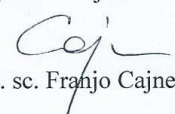
Rok predaje rada:
9. srpnja 2015.

Predvideni datum obrane:
15., 16. i 17. srpnja 2015.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner



Sadržaj

1. UVOD	1
2. PARAMETRI ZAVARIVANJA I UTJECAJNI ČIMBENICI	3
3. IZVORI STRUJE ZA ZAVARIVANJE.....	9
3.1. INTERMITENCIJA IZVORA STRUJE.....	9
4. OBLOŽENE ELEKTRODE	11
4.1. OSNOVNA PODJELA ELEKTRODA	13
4.2. OZNAČAVANJE ELEKTRODA	15
4.3. OSNOVNA PRAVILA PRI IZBORU ELEKTRODE	18
4.3.1. Određivanje bazičnosti elektroda.....	20
4.4. OSNOVNA PRAVILA PRI RUKOVANJU ELEKTRODAMA	21
4.5. TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE ELEKTRODA.....	23
4.6. GLAVNI TROŠKOVI REL ZAVARIVANJA	24
4.7. ŽELJEZNI PRAŠAK U ELEKTRODAMA ZA ZAVARIVANJE	27
5. DVOSTRUKO OPLAŠTENE ELEKTRODE	29
6. EKSPERIMENTALNI DIO	35
6.1. OSNOVNI I DODATNI MATERIJAL	36
6.2. ISPITIVANJE OPERATIVNIH KARAKTERISTIKA.....	40
6.2.1. Castoline 6666 (+ pol).....	43
6.2.2. Castoline 6666 - izmjenična struja	47
6.2.3. BÖHLER FOX EV 50.....	51
6.3. ANALIZA OPERATIVNIH KARAKTERISTIKA	55
6.4. MEHANIČKA ISPITIVANJA ZAVARA DOBIVENIH KORIŠTENJEM CASTOLINE 6666 ELEKTRODE	63
6.4.1. Specifikacija postupka zavarivanja	64
6.4.2. Tijek zavarivanja i izrezivanje epruveta za mehanička ispitivanja.....	65
6.4.3. Ispitivanje savijanjem.....	69
6.4.4. Makroanaliza	72
6.4.5. Statičko vlačno ispitivanje.....	74
7. ZAKLJUČAK.....	78
8. LITERATURA	80



POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz REL postupka	1
Slika 2. Struja zavarivanja u ovisnosti o promjeru elektrode.....	4
Slika 3. Utjecaj struje zavarivanja na oblik zavara	5
Slika 4. Promjena radne točke kod strmopadajuće karakteristike.....	5
Slika 5. Utjecaj glavnih parametara na oblik zavara	7
Slika 6. Dijagram pada napona ovisno o duljini i struji zavarivanja.....	8
Slika 7. Obložena elektroda.....	11
Slika 8. Skica zavara	24
Slika 9. Poprečni presjek dvostruko oplastene elektrode	29
Slika 10. Razlika u izgledu zavara između obične i dvostruko oplastene elektrode.....	30
Slika 11. Područja primjene dvostruko oplastenih elektroda	31
Slika 12. Položaji zavarivanja	32
Slika 13. Elektroda Zagreb dvostruko oplastena elektroda.....	33
Slika 14. Castoline 6666 dodatni materijal	37
Slika 15. BÖHER FOX EV 50 dodatni materijal.....	38
Slika 16. Pakiranja dodatnog materijala.....	39
Slika 17. Izvor struje za zavarivanje	40
Slika 18. Primjer vaganja epruveta	41
Slika 19. Držać epruvete	42
Slika 20. Epruvete nakon zavarivanja - Castoline DC(+)	43
Slika 21. Epruvete nakon čišćenja - Castoline DC(+).	44
Slika 22. Ostaci Castoline-ovih elektroda nakon zavarivanja - DC(+).	44
Slika 23. Epruvete nakon zavarivanja - Castoline AC	47
Slika 24. Epruvete nakon čišćenja - Castoline AC.....	48



Slika 25. Ostatci Castoline-ovih elektroda nakon zavarivanja izmjeničnom strujom.....	48
Slika 26. Epruvete nakon zavarivanja - BÖHLER FOX EV 50	51
Slika 27. Epruvete nakon čišćenja - BÖHLER FOX EV 50	52
Slika 28. Ostatci BÖHLER FOX EV 50 elektrode nakon zavarivanja	52
Slika 29. Zavarivanje korijena.....	65
Slika 30. Potpuni zavar korijena	65
Slika 31. Zavarivanje međuprolaza	65
Slika 32. Lice i korijen zavora - DC (+).....	66
Slika 33. Lice i korijen zavora - AC	66
Slika 34. Označavanje i priprema ploča za plinsko rezanje	67
Slika 35. Plinsko izrezivanje epruveta	68
Slika 36. Pripremljeni uzorci za savijanje	69
Slika 37. Postupak ispitivanja savijanjem	70
Slika 38. Rezultat ispitivanja savijanjem - DC (+).....	71
Slika 39. Rezultat ispitivanja savijanjem - AC	71
Slika 40. Fino brušeni makro uzorci	72
Slika 41. Makro izbrusak - DC (+).....	73
Slika 42. Makro izbrusak - AC.....	73
Slika 43. Statička kidalica WPM EU40mod	74
Slika 44. Izgled epruveta za statički vlačni pokus	75
Slika 45. Rezultat statičkog vlačnog pokusa - DC (+)	76
Slika 46. Rezultat statičkog vlačnog pokusa - AC	76
Slika 47. Izgled epruveta nakon statičkog vlačnog pokusa.....	77



POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostatci REL zavarivanja	2
Tablica 2. Karakteristike tipova obloge	14
Tablica 3. Standardi za obložene elektrode.....	15
Tablica 4. Kemijski sastav osnovnog materijala	36
Tablica 5. Mehanička svojstva čelika S235	36
Tablica 6. Operativne karakteristike pri zavarivanju - Castoline 6666 DC(+)	45
Tablica 7. Operativne karakteristike elektrode - Castoline 6666 DC (+).....	46
Tablica 8. Operativne karakteristike pri zavarivanju - Castoline 6666 AC	49
Tablica 9. Operativne karakteristike elektrode - Castoline 6666 AC	50
Tablica 10. Operativne karakteristike pri zavarivanju - BÖHLER FOX EV 50.....	53
Tablica 11. Operativne karakteristike elektrode - BÖHLER FOX EV 50.....	54
Tablica 12. Podijela elektroda	55
Tablica 13. Analiza mase metala zavara	57
Tablica 14. Srednja vrijednost širine zavara	58
Tablica 15. Analiza širine zavara	58
Tablica 16. Analiza koeficijenta iskorištenja elektrode	59
Tablica 17. Masa elektrode	59
Tablica 18. Analiza učinka elektrode	60
Tablica 19. Matematička analiza učinka elektrode	61
Tablica 20. Analiza konstante taljenja elektrode	62
Tablica 21. Izmjereni podatci statičkog vlačnog pokusa	77

POPIS SHEMA

Shema 1. Označavanje elektroda za niskolegirane čelike	16
Shema 2. Označavanje elektroda za navarivanje	17



POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
U	V	napon električnog luka
I	A	struja zavarivanja
v	mm/s	brzina zavarivanja
η	%	stupanj iskorištenja
E_{ef}	J/mm	unos topilne
L	mm	duljina električnog luka
D	mm	vanjski promjer elektrode
d	mm	unutarnji promjer elektrode
I_r	A	radna struja
U_r	V	radni napon
b	mm	širina zavara
p	mm	penetracija
h	mm	nadvišenje zavara
V_0	V	napon praznog hoda
I_0	A	struja praznog hoda
ε	%	intermitencija izvora struje
K_e	g/As	konstanta taljenja elektrode
v_e	g/s	brzina taljenja elektrode
R	%	koeficijent iskorištenja elektrode
G_{dep}	kg	količina depozita
ρ	kg/m ³	specifična masa
A	m ²	površina presjeka
N	kW	snaga električne energije
R_e	N/mm ²	minimalna granica elastičnosti
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
m	kg	masa
t	s	vrijeme zavarivanja
F_m	kN	maksimalna sila razlačenja
F_k	kN	prekidna sila

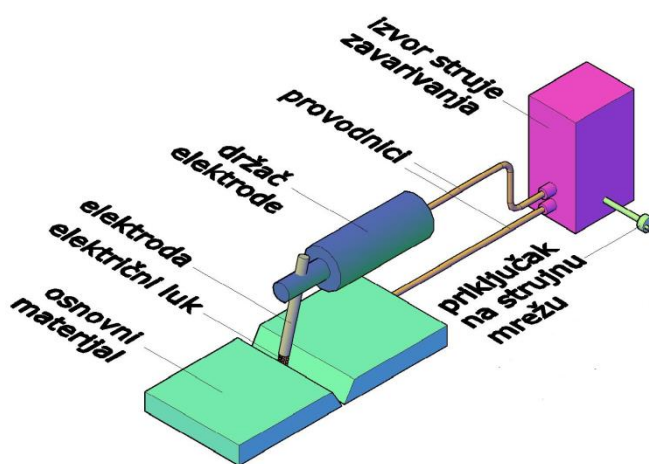


POPIS KRATICA

Kratika	Opis
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
EP	elektrolučni postopci
BI	indeks bazičnosti
AC	izmenična struja
DC	istosmjerna struja
C	ugljik
Mn	mangan
Si	silicij
S	sumpor
P	fosfor
N	dušik

1. Uvod

Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (REL) je postupak spajanja metala gdje se između obložene elektrode i metala koji zavarujemo stvara električni luk. Električni luk daje energiju koja tali metal koji zavarujemo (osnovni materijal) i obloženu elektrodu (dodatni materijal), stvarajući zavareni spoj. Slika 1. prikazuje REL postupak zavarivanja.



Slika 1. Prikaz REL postupka [9]

Taljenjem jezgre elektrode osigurava se da dodatni materijal popunjava žlijeb, a taljenjem, sagorijevanjem i isparavanjem obloge osigurava se zaštita taline od vanjskih utjecaja iz zraka. Rastaljeni sastojci obloge zbog manje gustoće od rastaljenog metala isplivaju na površinu taline, te očvrstu u obliku troske. Troska štiti metal zavara od utjecaja okoline i usporava njegovo hlađenje, a nakon zavarivanja se uklanja.

REL postupak je jedan od najrasprostranjenijih postupaka zavarivanja, a obložene elektrode primjenjuju se za zavarivanje gotovo svih vrsta metala i legura koje se mogu zavarivati taljenjem. Prve zavarene čelične konstrukcije su u potpunosti ili pretežno bile izrađene REL postupkom. Reparatura zavarivanja su danas nezamisliva bez ovog postupka.

U posljednjih 30-ak godina REL postaje potiskivan od strane poluautomatskog zavarivanja u zaštiti plina (MIG/MAG) no zbog svoje prilagodljivosti svim uvjetima rada i obliku osnovnog materijala te mobilnošću još će dugo odoljevati u raznim gradana industrije. [1,2]



Tablici 1. su prikazane prednosti i nedostaci REL zavarivanja.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci REL zavarivanja [11,12,13]

Prednosti REL postupka zavarivanja:	Nedostaci REL postupka zavarivanja:
➤ širok spektar dodatnih materijala ➤ mala cijena opreme za zavarivanje u odnosu na MIG/MAG i EP postupke zavarivanja ➤ pogodan za manja proizvodna i reparaturna zavarivanja ➤ mogućnost zavarivanja u svim položajima ➤ pogodan za izvođenje terenskih radova ➤ jednostavno rukovanje opremom ➤ dobra mehanička svojstva zavarenih spojeva	➤ mala brzina zavarivanja i niska produktivnost u odnosu na MIG/MAG i EP postupke zavarivanja ➤ kvaliteta zavarenog spoja značajno ovisi o vještinama zavarivača ➤ vrijeme izobrazbe zavarivača je relativno dugo ➤ neizbježan otpad elektrode ("čik" – 8-10%) ➤ gubitak materijala zbog prskanja ➤ gubitak vremena zbog čišćenja troske ➤ nastajanje štetnih plinova i jakog bljeskanja prilikom zavarivanja ➤ dugotrajan rad ostavlja štetne posljedice na zdravlje zavarivača



2. Parametri zavarivanja i utjecajni čimbenici

Određivanje parametara zavarivanja neophodno je za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja. Pravilnim određivanjem i korištenjem parametara zavarivanja osigurava se kvalitetan zavar, zavar bez proizvodnih, strukturnih i geometrijskih pogrešaka, odnosno sa potrebnim mehaničkim svojstvima. [4,7]

Može se reći da skup glavnih parametara zavarivanja za određeni materijal i geometriju (debljina,) određuje slijedeće veličine:

- napon električnog luka, $U(V)$
- jakost struje zavarivanja, $I(A)$
- brzina zavarivanja, $v(mm/s)$
- stupanj iskorištenja energije u električnom luku, η
- unesena toplina, E_{ef}
- temperatura metala koji se zavaruje definirana temperaturom predgrijavanja i
- temperaturom međuprolaza .

Kao važne varijable elektrolučnih postupaka često se navode:

- duljina (visina) električnog luka $L(mm)$
- promjer elektrode $d (mm)$
- vrsta i polaritet struje

Napon električnog luka pri zavarivanju kreće se orijentacijski u granicama od 18 do 35 V. Duljina luka određuje i napon luka, a kod REL postupaka zavarivanja ovisi o promjeru elektrode i tipu njene obloge. U praksi se kod REL postupaka zavarivanja duljina električnog luka određuje orijentacijski na osnovu promjera i tipa obloge elektrode. [2]

Tako se u praksi koriste slijedeće orijentacijske vrijednosti za duljinu električnog luka:

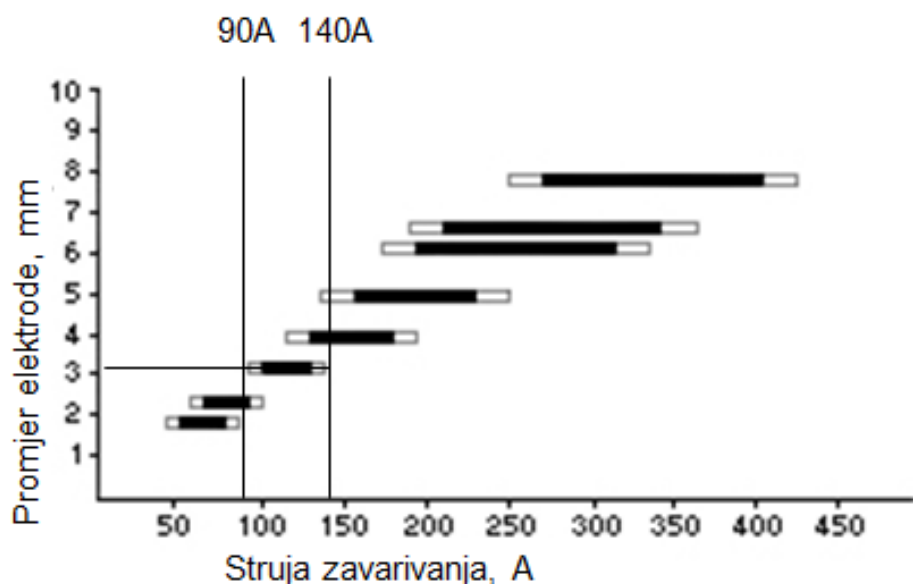
- $L = d(mm)$ (za rutine, kisele, celulozne obložene elektrode)
- $L = 0,5 d(mm)$ (za bazično obložene elektrode)

Pri REL zavarivanju nije moguće držati parametre zavarivanja konstantnim zbog samoga načina izvođenja postupka zavarivanja. Normalno je da zavarivaču zadrhti ruka, tu je prisutan i utjecaj okoline te je normalno da se parametri zavarivanja uzimaju orijentacijski. Radnik u toku rada nastoji održati duljinu luka konstantnim, a time i napon.



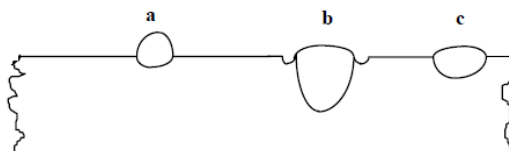
Struja zavarivanja - kod REL zavarivanja obično zavarivač bira samo jedan parametar na uređaju za zavarivanje, a to je struja zavarivanja. Struja zavarivanja prvenstveno ovisi o promjeru elektrode koja će se koristiti u radu, što opet ovisi o debljini i vrsti radnog komada, o kemijskom sastavu elektrode jezgre, te o položaju zavarivanja. Proizvođač daje upute o preporučenim veličinama struje, a za grubo pravilo može se uzeti podatak da struja zavarivanja pri zavarivanju elektrodom s normalnim iskorištenjem iznosi od 30 do 40 A za svaki milimetar promjera jezgre. U slučaju zavarivanja u prisilnim položajima struja zavarivanja koja je navedena u podacima proizvođača smanjuje se za 15 do 20 %. [2]

Slika 2. prikazuje okviran izbor parametara zavarivanja (struje) u ovisnosti o promjeru elektrode.



Slika 2. Struja zavarivanja u ovisnosti o promjeru elektrode [7]

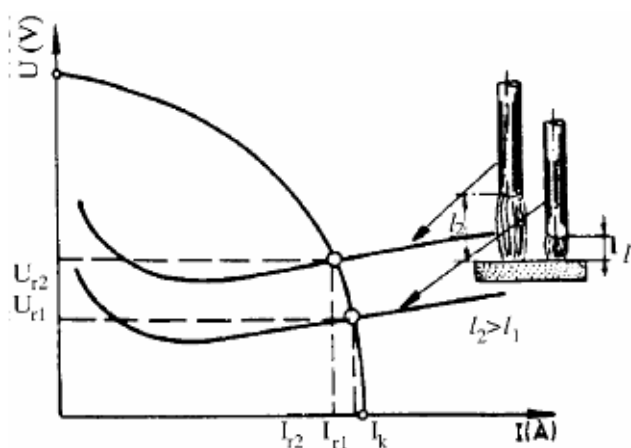
Polaritet i vrsta struje izabiru se prema vrsti obloge elektrode. Bazične elektrode najčešće se upotrebljavaju na istosmjernoj struji, plus (+) pol. Ostali tipovi elektroda mogu se upotrebljavati na izmjeničnoj i istosmjernoj struji, a pogrešno odabrana vrsta struje ili polariteta dovode do pojave poroznosti u zavaru, povećanog prskanja materijala i manje stabilnosti el. luka. Slika 3. prikazuje utjecaj struje zavarivanja na oblik zavara.



Slika 3. Utjecaj struje zavarivanja na oblik zavara [2]

- a** - premala struja zavarivanja
- b** - prejaka struja zavarivanja
- c** - odgovarajuća struja zavarivanja

Bez obzira na vrstu struje, pri REL zavarivanju koristi se izvor sa strmopadajućom statičkom karakteristikom, jer on osigurava malu promjenu jačine struje pri slučajnoj promjeni dužine luka, koja je neminovna kod ručnog zavarivanja. Slika 4. prikazuje promjenu radne točke.



Slika 4. Promjena radne točke kod strmopadajuće karakteristike [4]

Na slici je pokazano kako se mijenja jakost struje (I_{r1} i I_{r2}) i napon (U_{r1} i U_{r2}) pri povećanju dužine luka (l_1 na l_2). Promjena napona je značajna, dok je promjena jačine struje mala. Kako promjena napona ne utiče bitno na ostale parametre zavarivanja, strmopadajućom karakteristikom se osigurava dovoljno kvalitetno zavarivanje, jer se parametri procesa koji najviše ovise o jačini struje održavaju u uskim granicama. [4]



Brzina zavarivanja ovisi o tehnici rada, vrsti i dimenzijama spoja, osnovnog materijala i tipu obloge. Ako se za vrijeme zavarivanja izvode poprečna kretanja elektrode brzina zavarivanja je manja. Pri zavarivanju rutilnim i mineralno kiselim elektrodama postižu se veće brzine zavarivanja nego pri radu bazičnim elektrodama. Zavarivanja CrNi čelika izvodi se većim brzinama zavarivanja, jer se tako manje topline unosi u osnovni materijal.

Stupanj korisnog djelovanja. Da bi određivanje unosa topline bilo dovoljno točno, moramo poznavati vrijednost stupnja korisnog djelovanja električnog luka.

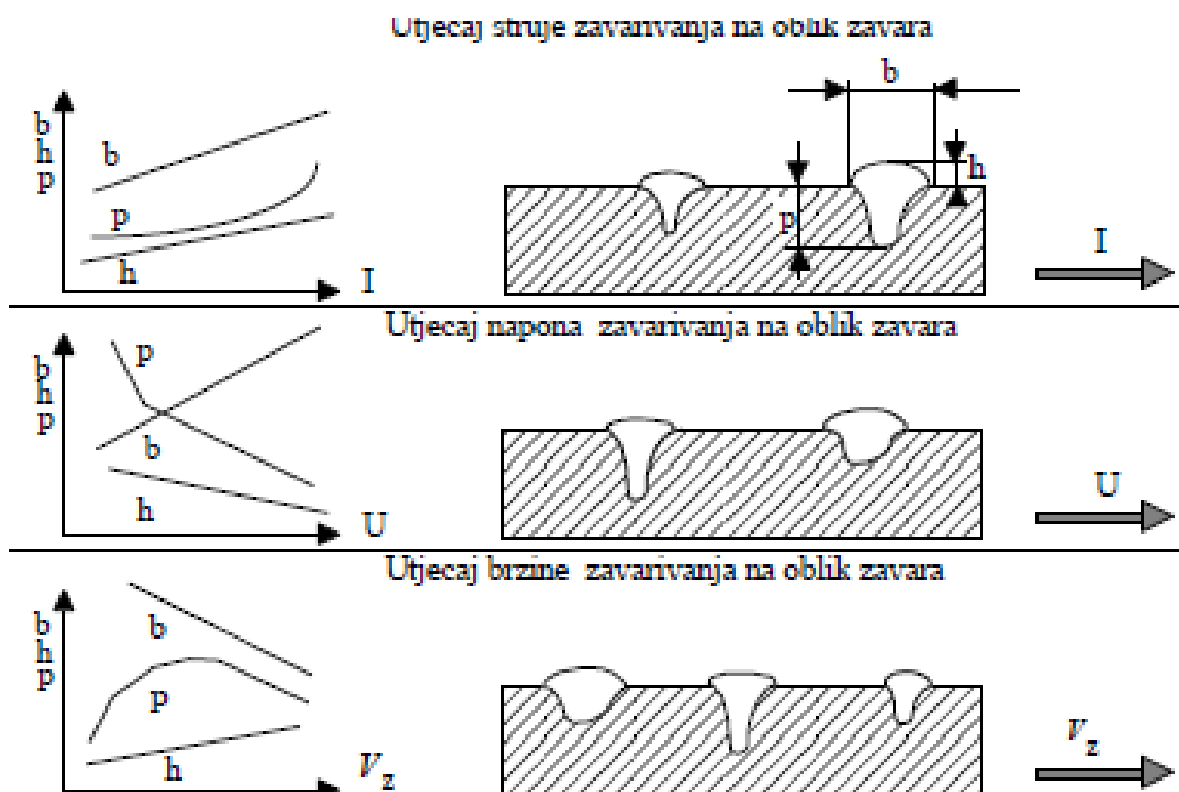
Orijentacijske vrijednosti stupnja korisnog djelovanja u električnom luku za pojedine postupke elektrolučnog zavarivanja su:

- REL postupak zavarivanja : $\eta = 0,65 \div 0,85$
- MAG/MIG postupak zavarivanja : $\eta = 0,65 \div 0,85$
- TIG postupak zavarivanja : $\eta = 0,2 \div 0,65$
- EPP postupak zavarivanja : $\eta = 0,9 \div 0,95$

Temperatura predgrijavanja je značajna iz više razloga. Predgrijavanjem se unosi toplina što povećava ukupno unesenu toplinu u zavar. Predgrijavanjem se unosi tzv. sekundarna toplina u zavareni spoj, pa se tako smanjuje brzina hlađenja, čime se daje mogućnost dužeg trajanja izlaska vodika iz zavarenog spoja i smanjuje se vjerojatnost nastajanja hladnih pukotina. Pored toga, predgrijavanjem se s površine lima odstranjuje tzv. vezana vlaga, i smanjuju zaostale napetosti zbog zavarivanja. Da bi se izbjegla pojava hladnih pukotina, temperatura predgrijavanja mora biti dovoljno visoka kako bi hlađenje zavarenog spoja bilo dovoljno dugo zbog mogućnosti izlaska vodika iz zavarenog spoja. Vrijednost temperature predgrijavanja ovisi o udjelu kemijskih elemenata u osnovnom materijalu, odnosno kemijskom sastavu kao i debljini osnovnog materijala i udjela difuzijskog vodika u zavarenom spoju.

Temperatura između prolaza je praktično temperatura predgrijavanja za sljedeći prolaz, mjerena na sredini zavara. Temperatura predgrijavanja orijentacijski se određuje na osnovu eksperimentalno dobivenih formula, a potvrđuje se eksperimentalnim radovima i certifikacijom postupaka zavarivanja. Proračun se zasniva na kemijskom sastavu osnovnog materijala, sadržaja difuzijskog vodika u zavarenom spoju, debljini materijala koji se zavaruje. [4,7]

Utjecaj struje, napona i brzine zavarivanja kao glavnih parametara zavarivanja na oblik zavora mogu se jasnije uočiti na slici 5.



Slika 5. Utjecaj glavnih parametara na oblik zavora [5]

Jakošću struje zavarivanja (I), naponu električnog luka (U), brzine zavarivanja (v) i stupanju iskorištenja energije (η) u električnom luku definira se i toplinski input, (E).

Veza između navedenih veličina i toplinskog inputa može se pokazati izrazom:

$$E = \frac{U * I}{v}, \left[\frac{J}{mm} \right] [5]$$

$$E_{ef} = \frac{U * I * \eta}{v}, \left[\frac{J}{mm} \right] [5]$$

E vrijednost toplinskog inputa, a E_{ef} vrijednost efektivnog toplinskog inputa koji uzima u obzir stupanj iskorištenja energije u električnom luku.

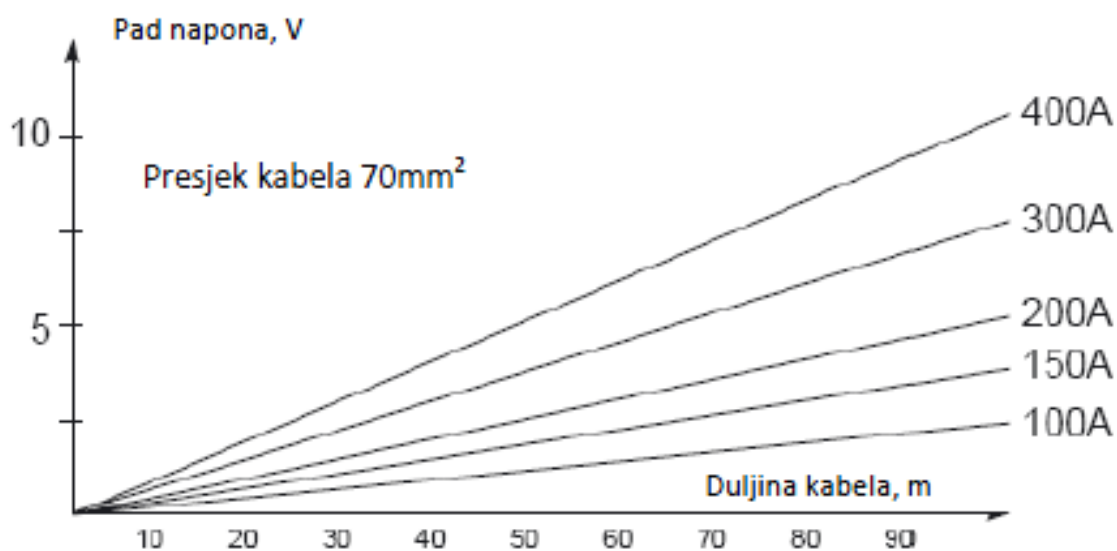
Držać elektrode je s jedne strane provodnik koji osigurava provođenje struje od izvora do elektrode, a s druge strane izolator, koji osigurava siguran rad zavarivača jer odvaja njegovu ruku od struje. Čeljusti držača, koje su u direktnom kontaktu sa elektrodom, moraju biti u dobrom stanju i ne smiju raditi veći otpor struji da se ne bi pregrijavale.



Zavarivački kablovi spajaju izvor struje sa radnim komadom i sa elektrodom. Provodni dio kabla je upletena bakrena ili aluminijska žica, koja je odvojena od omotača zaštitnim izolacionim slojem. Zavarivački kablovi se proizvode u različitim veličinama, koje se koriste ovisno o jačini struje i radnog ciklusa zavarivanja. REL postupak nije posebno osjetljiv na duljinu kabla pod uvjetom da uređaj može osigurati dovoljno visok napon, što je i trend pri gradnji uređaja, posebno velikih, da se predvidi veće naponsko opterećenje od uobičajenih pri zavarivanju kako bi se mogle kompenzirati kritične situacije. Više struje su potrebne pri uspostavi električnog luka i u situacijama kada dolazi do kratkog spoja. Pri kratkom spoju napon je relativno nizak, iz čega slijedi da nema velikih gubitaka tj. padova napona. U praksi je duljina kabla ograničena s naponom kojeg može osigurati uređaj za zavarivanje.

Ako se u određenim situacijama traže velike duljine kabla, mora se provjeriti da li uređaj to može kompenzirati, ili ako je moguće upotrijebiti veći presjek kabla. Pad napona se može izračunati ili odrediti iz dijagrama. [7,8]

Slika 6. prikazuje dijagram pada napona ovisno o duljini i struji zavarivanja.



Slika 6. Dijagram pada napona ovisno o duljini i struji zavarivanja [8]



3. Izvori struje za zavarivanje

Izvori struje su takvi električni uređaji koji daju na mjestu zavarivanja električnu struju sa karakteristikama pogodnim za zavarivanje. Za elektrolučno zavarivanje koriste se obje vrste struje - izmjenična i istosmjerna. Izvori izmjenične struje su transformatori, a istosmjerne struje ispravljači i pretvarači. Izvor struje treba osigurati potrebnu jačinu struje i napon luka u nekom radnom opsegu, kao i lako uspostavljanje luka te njegovu stabilnost.

Osnovna karakteristika svakog izvora struje je ovisnost napona o jačini struje, odnosno njegova vanjska/statička karakteristika. Osnovni parametri statičke karakteristike izvora struje su napon praznog hoda (U_0), koji nastaje kada je izvor struje uključen, ali se ne zavaruje ($I=0$), struja kratkog spoja (I_k), koja nastaje kada je elektroda u dodiru s osnovnim metalom ($U=0$), i radna točka (RT), koja je definirana presjekom statičkih karakteristika izvora struje i električnog luka, koja određuje radni napon (U_r) i struju (I_r). Za ručne postupke se u pravilu koriste strmopadajuće karakteristike izvora struje, a za poluautomatske blagopadajuće karakteristike. Za izbor određenog izvora struje za zavarivanje bitna karakteristika stroja je i intermitencija, o kojoj će nešto više biti rečeno u nastavku. [5,6]

3.1. Intermitencija izvora struje

Rad izvora napajanja obično protiče u naizmjeničnim uključivanjima za zavarivanje i isključivanjima radi zamjene elektrode, pregleda i čišćenja zavora, predaha i dr., a karakterizira se odnosom trajanja opterećenja (zavarivanja) i trajanja pogonskog ciklusa. Pod trajanjem pogonskog ciklusa podrazumjeva se ukupno vrijeme (trajanje opterećenja i pauze, odnosno praznog hoda). Odnos između trajanja opterećenja i trajanja pogonskog ciklusa naziva se intermitencija (ε):

$$\varepsilon = \frac{t_0}{t_0 + t_{ph}} * 100(\%) = \frac{t_0}{t_c} * 100(\%) \quad [4]$$

gdje su:

- ε intermitencija;
- t_0 vrijeme trajanja opterećenja (zavarivanja);
- t_{ph} vrijeme trajanja praznog hoda;
- t_c vrijeme trajanja pogonskog ciklusa.



Dakle, izvor napajanja se nalazi u takozvanom intimitirajućem pogonu, tj. naizmjenično se izmjenjuju rad pod opterećenjem (zavarivanje) i pauza (rad u praznom hodu). Za vrijeme opterećenja (t_0) izvor napajanja ne smije postići maksimalnu temperaturu, a ne može se ni potpuno ohladiti za vrijeme praznog hoda (t_{ph}). Zbog toga se izvori napajanja ne moraju termički dimenzionirati na maksimalne vrijednosti, tj. za $\varepsilon=100\%$, već na neke manje vrijednosti, ovisno o pogonskom ciklusu, odnosno namjeni izvora napajanja. Intermitencija je određena standardima. Za trajan rad transformatora (automatizirano zavarivanje) intermitencija iznosi 100%, a za ručno zavarivanje 60%, intermitencija izvora napajanja za servisne radove iznosi 35% , a za izvore za poluautomatiziranog zavarivanja 70%-80%. Za ručno elektrolučno zavarivanje trajanje pogonskog ciklusa određeno je standardom i iznosi 5 min. Ako izvor ima intermitenciju $\varepsilon=50\%$, to znači da se uređaj ne može opteretiti da u 2 sata radi 1 sat neprekidno, već on može biti maksimalno neprekidno opterećen 2,5 min (maksimalnom strujom) i nakon pauze (rada na praznom hodu) od 2,5 min može ponovo raditi (zavarivati) neprekidno 2,5 min i tako naizmjenično. [4]

U tehničkim podacima o svakom izvoru napajanja dati su podaci o njegovoj intermitenciji i maksimalnoj jačini struje koja se može primjeniti pri toj intermitenciji. Treba se pridržavati nazivne intermitencije izvora napajanja, jer je izvor napajanja konstruiran prema njoj i svako forsiranje izvora izvan granica može dovesti do njegovog uništenja, a najviše je izolacija podložna degradaciji pri povišenim temperaturama.

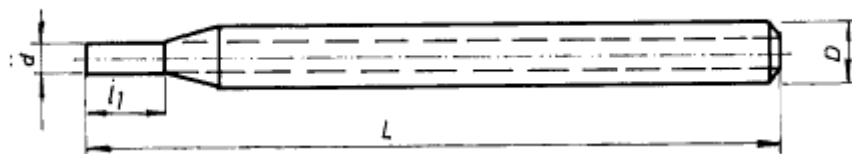
Ako su poznate intermitencija izvora (ε) i maksimalna jakost struje (I_{max}) pri toj intermitenciji, onda se može pomoću formule: $I_{tz} = I_{max} * \sqrt{\frac{\varepsilon}{100}}$ [A] izračunati jakost struje zavarivanja koju bi izvor napajanja mogao trajno (kontinualno) davati.

U prethodnoj formuli su:

- I_{tz} - jakost trajne struje zavarivanja;
- I_{max} - maksimalna jakost struje zavarivanja;
- ε - intermitencija.

4. Obložene elektrode

U postupku ručnog elektrolučnog zavarivanja primjenjuju se obložene elektrode. Obložene elektrode sastoje se od metalne jezgre (šipka, žica) i obloge (prikazano na slici 7.).



Slika 7. Obložena elektroda [4]

(d -promjer jezgre, l_1 - slobodan kraj, L - dužina, D - promjer elektrode)

U proizvodnji elektroda za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika najčešće se upotrebljava vučena žica od niskougljičnog čelika (max 0,1% C, udio P i S što manji), a sva potrebna legiranja su iz obloge. Kod elektroda za visokolegirane čelike upotrebljava se žica kemijskog sastava koji odgovara sastavu zavarenog spoja. Kod ovih elektroda legiranje iz obloge je minimalno.

Kemijski sastav obloge sastoji se iz više komponenata:

- komponente za stabilizaciju električnog luka (materijali koji snižavaju prosječni potencijal ionizacije para metala – materijali prve i druge grupe periodnog sustava elemenata: npr. kalijev i natrijev karbonat)
- komponente koje stvaraju trosku (materijali koji omogućuju nastajanje troske za vrijeme taljenja elektrode: npr. oksid, rude različitih elemenata)
- komponente za stvaranje plinova (elementi koji stvaraju zaštitne plinove: npr. organski karbonati, celuloza)
- komponente za legiranje i dezoksidaciju (metalne komponente za nadomjestak legiranih elemenata, metalne komponente s velikim afinitetom za spajanje s kisikom pri čemu nastali oksidi odlaze u trosku)
- vezivne komponente [4]



Obloga elektrode u procesu zavarivanja vrši tri složene funkcije: električnu, fizikalnu i metaluršku.

Električna funkcija obloge elektrode je laka uspostava električnog luka te stabilnost istog. Stabilnost električnom luku daje ionizirana atmosfera između vrha elektrode i osnovnog materijala. Problem stabilnosti električnog luka kod REL-a osobito dolazi do izražaja ako se radi s izmjeničnim strujama. U tom slučaju mijenja se smjer struje i luk se gasi na početku svake poluperiode. U trenutku gašenja luka pada temperatura što izaziva i rekombinaciju plinova u stupu luka. Također, snižava se temperatura katode i anode. Materijali koji snižavaju prosječni potencijal ionizacije omogućuju lako ponovno paljenje električnog luka.

Metalurška funkcija obloge elektrode ima trostruku zadaću: legiranje, otplinjavanje i rafinacija. Metalurško djelovanje nastaje taljenjem obloge. Intenzitet i smjer metalurškog djelovanja najviše ovisi o bazičnosti troske koja je određena odnosom kiselih i bazičnih komponenata iste, što je pak posljedica oksida različitih elemenata od čega se troska sastoji. S obzirom na vrstu oksida koji sudjeluju kao komponente troske, bazičnost troske (bazicitet) može se izračunati, a na temelju dobivenih vrijednosti određuje se kakvoća troske (bazična, kisela ili neutralna). Podatak o bazičnosti troske vrlo je važan jer izravno utječe na mehanička svojstva zavarenog spoja. Isto tako, bazičnost troske povoljno utječe i na proces legiranja metala zavara preko obloge, tj. olakšava ulazak legirnog elementa u metal zavara. Pri tome je važno znati da su elementi koji sudjeluju u legiranju najčešće oni koji se teško vežu s kisikom. Suprotno tome, elementi s jakim afinitetom vezivanja s kisikom teško ulaze u metal zavara, ali aktivno sudjeluju u procesu dezoksidacije (otplinjavanja). Funkcija rafinacije je uklanjanje sumpora i fosfora iz taline, tj. iz metala zavara. I ovaj proces je povezan s bazičnošću elektrode: što je troska bazičnija, to će i udio ovih elemenata biti manji, tj. veća količina primjesa iz taline prelazi u trosku.

Obloga elektrode ima zaštitnu funkciju. Troska nastala taljenjem obloge elektrode obavlja kapljice rastaljenog materijala i tako sprečava kontakt rastaljenog materijala s dušikom, kisikom i vodikom iz zraka za vrijeme prolaza kapljica kroz električni luk. Istu funkciju troska ima i kada stvori zaštitni "film" na metalu zavara, s time da ujedno i smanjuje njegovu brzinu ohlađivanja pa tako u znatnoj mjeri povoljno utječe na tijek kristalizacije zavarenog spoja u smislu boljih mehaničkih svojstava. Kemijskim sastavom obloge utječe se i na viskozitet te na napetost površine rastaljenih kapljica. Ova fizikalna funkcija obloge omogućava izvođenje zavarivanja u različitim prostornim položajima (npr. zavarivanje u prisilnim položajima). [11,12,13]



4.1. Osnovna podjela elektroda

Prema promjeru elektrode standardne elektrode su: $\Phi 2$, $\Phi 2,5$, $\Phi 3,25$, $\Phi 4$, $\Phi 5$, $\Phi 6$

Obložene elektrode za REL zavarivanje dijele se:

- 1) Prema tipu obloge:
 - a. oksidne
 - b. rutilne
 - c. kisele
 - d. bazične
 - e. celulozne
 - f. drugi tipovi
- 2) Prema namjeni:
 - a. za zavarivanje
 - b. za navarivanje
 - c. za žlijebljenje i rezanje
- 3) Prema tehnološkim svojstvima:
 - a. duboko penetrirajuće
 - b. visokoproduktivne
 - c. specijalne
- 4) Prema debljini obloge:
 - a. tanko obložene
 - b. srednje obložene
 - c. debelo obložene
- 5) Prema vrsti osnovnog materijala:
 - a. za nelegirane i niskolegirane čelike
 - b. za visokolegirane čelike
 - c. za zavarivanje sivog lijeva
 - d. za zavarivanje obojenih metala
- 6) Prema dimenzijama [4]



Prema tipu obloge:

- A (Acide) → kisela obloga
- B (Basc) → bazična obloga
- C (Cellulosic) → celulozna obloga
- R (Rutile) → rutilna obloga (rutil TiO_2) [6]

Tablica 2. prikazuje karakteristike tipova obloge.

Tablica 2. Karakteristike tipova obloge [4,6]

Tip	Obloga	Razvijeni zaštitni plinovi	Difuzijski H ml/100g Fe	Karakteristike
A	Oksidi i karbonati Fe i Mn sa silikatima	40% H_2 40% ($\text{CO}+\text{CO}_2$) 20% H_2O	10-20	Glatka površina. Lako odstranjivanje troske. Niska udarna žilavost.
B	60% CaCO_3 , 30% CaF_2 , kvarc, rutil, ferolegure	80% CO 20% CO_2	0.5-.7.5	Čista ZT. Niski sadžaj vodika. Dobra udarna žilavost. Teško se odstranjuje troska. Hrapava i izbočena površina.
C	40% celuloza, 25% TiO_2 , 20% MgSiO_3 , 15%Fe Mn vezani s K i Na silikatima	40% H_2 40% ($\text{CO}+\text{CO}_2$) 20% H_2O	15-30	Elektrode za zavarivanje cijevi "odozgo prema dole". Velika penetracija. Koriste se i za rezanje. Visok sadžaj vodika.
R	50% TiO_2 , 20% tinjac, 10% Fe Mn, 6% SiO_2 , 4% celuloza	40% H_2 40% ($\text{CO}+\text{CO}_2$) 20% H_2O	10-30	Stabilan električni luk. Koristi se za razne namjene.



Prema debljini obloge:

Prema odnosu ukupnog promjera (uključujući oblogu), D , i promjera jezgra, d , elektrode se dijele na:

- tanko obložene ($D/d < 1,2$),
- srednje obložene ($1,2 < D/d < 1,4$) i
- debelo obložene ($D/d > 1,4$).

Na način prenosa dodatnog metala kod REL postupka najviše utiču debljina i vrsta obloge, te jakost struje. Povećanjem debljine obloge i dodavanjem sastojaka koji smanjuju površinsku napetost pospješuje se prijenos sitnim kapima. Jača struja također omogućava prijelaz od krupnih ka sitnim kapima, jer pojačava učinak *pinch* efekta i pritiska plinova. [4,6]

4.2. Označavanje elektroda

Da bi se olakšala identifikacija elektroda uvedeno je standardizirano označavanje, i to posebno za pojedine vrste konstrukcijskih materijala. Osim standardne oznake elektrode treba imati u vidu i oznake proizvođača. Oznake, sastav, mehanička svojstva, osnovne karakteristike i primjene obloženih elektroda date su u katalozima proizvođača. [5]

Tablica 3. Standardi za obložene elektrode [10]

Oznaka norme	Napomena
HRN EN ISO 2560-A:2010.	nelegirani i niskolegirani čelici
HRN EN ISO 3580-A:2010.	čelici postojani pri povišenim temperaturama
HRN EN 1600:1999.	visokolegirani čelici
HRN EN 14700:2014.	elektrode za navarivanje
HRN EN ISO 1071:2004.	sivi lijev

Na shemama 1. i 2. su navedeni primjeri označavanja elektroda za niskolegirane čelike prema normi HRN EN ISO 2560-A:2007, te elektrode za navarivanje prema normi HRN EN ISO 14700:2007.

primjer: **EZ - 50 B****E 42 4 B 42 H5**

E	obložene elektrode za REL zavarivanje
----------	---------------------------------------

Oznake za vlačnu čvrstoću i izduženje čistog metala zavara

Oznaka	Granica razvlačenja min. [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća min. [N/mm ²]	Izduženje [%]
35	355	440 - 570	22
38	380	470 - 600	20
42	420	500 - 640	20
46	460	530 - 680	20
50	500	560 - 720	18

Oznake za temperaturu ispitivanja udarnom radnjom loma

Oznaka	Temperatura [°C] udarna radnja loma min. [47J]
Z	nema zahtjeva
A	+ 20
0	0
2	- 20
3	- 30
4	- 40
5	- 50
6	- 60

Oznake kemijskog sastava čistog metala zavara

Oznaka legiranja	Kemijski sastav [%] ¹		
	Mn	Mo	Ni
Nema	< 2,0	-	-
Mo	< 1,4	0,3 - 0,6	-
MnMo	1,4 - 2,0	0,3 - 0,6	-
1Ni	< 1,4	-	0,6 - 1,2
2Ni	< 1,4	-	1,8 - 2,6
3Ni	< 1,4	-	2,6 - 3,8
Mn1Ni	1,4 - 2,0	-	0,6 - 1,2
1NiMo	< 1,4	0,3 - 0,6	0,6 - 1,2
Z	bilo koja druga dogovorena analiza		

¹ Ako nije naznačeno Mo<0,2; Ni<0,3; Cr<0,2; V<0,05; Nb<0,05; Cu<0,3

Oznake sadržaja vodika u čistom metalu zavara

Oznaka	Sadržaj vodika ml H ₂ /100g zavara max.
H5	5
H10	10
H15	15

Oznake položaja zavarivanja

1	Svi položaji
2	Svi položaji osim vertikalno odozgo prema dolje
3	Sučeljeni i kutni spoj u vodoravnom položaju, kutni spoj u horizontalno-vertikalnom položaju.
4	Sučeljeni i kutni spoj u vodoravnom položaju
5	Vertikalni odozgo prema dolje i svi položaji

Oznake koeficijenta iskorištenja i vrste struje zavarivanja

Oznaka	Koeficijent iskorištenja [%]	Vrsta struje Izmjenična struja, AC (~) Istosmjerna struja, DC (=)
1	≤ 105	izmjenična i istosmjerna
2	≤ 105	istosmjerna
3	105 - 125	izmjenična i istosmjerna
4	105 - 125	istosmjerna
5	125 - 160	izmjenična i istosmjerna
6	125 - 160	izmjenična
7	> 160	izmjenična i istosmjerna
8	> 160	izmjenična

Oznake vrste obloge elektrode

A	kisela obloga
B	bazična obloga
C	celulozna obloga
R	rutilna obloga
RA	rutilno - kisela obloga
RB	rutilno - bazična obloga
RC	rutilno - celulozna obloga
RR	debela rutilna obloga

Shema 1. Označavanje elektroda za niskolegirane čelike [10]

primjer: **EZ - ABRA 60****E Fe 14**

E obložena elektroda za
REL zavarivanje

Oznake legiranja i kemijskog sastava

Oznaka legiranja ¹⁾	Svojstva navara	Kemijski sastav, [%]										Ostatak
		C	Cr	Ni	Mn	Mo	W	V	Nb	Ostalo		
Fe 1	p	≤ 0,4	≤ 3,5	-	0,5 - 3,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	-	-	Fe	
Fe 2	p	0,4 - 1,2	≤ 7,0	≤ 1,0	0,5 - 3,0	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,0	-	-	Fe	
Fe 3	s t	0,2 - 0,5	1,0 - 8,0	≤ 5,0	≤ 3,0	≤ 4,5	≤ 10,0	≤ 1,5	-	Co, Si	Fe	
Fe 4	s t (p)	0,2 - 1,5	2,0 - 6,0	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 10,0	≤ 19,0	≤ 4,0	-	Co, Ti	Fe	
Fe 5	c p s t w	≤ 0,5	≤ 0,1	17,0 - 22,0	≤ 1,0	3,0 - 5,0	-	-	-	Co, Al	Fe	
Fe 6	g p s	≤ 2,5	≤ 10,0	-	≤ 3,0	≤ 3,0	-	-	≤ 10,0	Ti	Fe	
Fe 7	c p t	≤ 0,2	4,0 - 30,0	≤ 6	≤ 3	≤ 2,0	-	≤ 1,0	≤ 1,0	Si	Fe	
Fe 8	g p t	0,2 - 2,0	5,0 - 18,0	-	0,3 - 3,0	≤ 4,5	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 10,0	Si Ti	Fe	
Fe 9	k (n) p	0,3 - 1,2	≤ 19,0	≤ 3,0	11,0 - 18,0	≤ 2,0	-	≤ 1,0	-	Ti	Fe	
Fe 10	c k (n) p z	≤ 0,25	17,0 - 22,0	7,0 - 11,0	3,0 - 8,0	≤ 1,5	-	-	≤ 1,5	Si	Fe	
Fe 11	c n z	≤ 0,3	18,0 - 31,0	8,0 - 20,0	≤ 3,0	≤ 4,0	-	-	≤ 1,5	Cu	Fe	
Fe 12	c (n) z	≤ 0,08	17,0 - 26,0	9,0 - 26,0	0,5 - 3,0	≤ 4,0	-	-	≤ 1,5	-	Fe	
Fe 13	g	≤ 1,5	≤ 6,5	≤ 4,0	0,5 - 3,0	≤ 4,0	-	-	-	B, Ti	Fe	
Fe 14	g (c)	1,5 - 4,5	25,0 - 40,0	≤ 4,0	0,5 - 3,0	≤ 4,0	-	-	-	-	Fe	
Fe 15	g	4,5 - 5,5	20,0 - 40,0	≤ 4,0	0,5 - 3,0	≤ 2,0	-	-	≤ 10,0	B	Fe	
Fe 16	g z	4,5 - 7,5	10,0 - 40,0	-	≤ 3,0	≤ 9,0	≤ 8,0	≤ 10,0	≤ 10,0	B, Co	Fe	
Fe 20	c g t z	WCa ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	Fe	
Ni 1	c p t	≤ 1,0	15,0 - 30,0	Ostatak	0,3 - 1,0	≤ 6,0	≤ 2,0	≤ 1,0	-	Si, Fe, B	Ni	
Ni 2	c k p t z	≤ 0,1	15,0 - 30,0	Ostatak	≤ 1,5	≤ 28,0	≤ 8,0	≤ 1,0	≤ 4,0	Co, Si, Ti	Ni	
Ni 3	c p t	≤ 1,0	1,0 - 15,0	Ostatak	0,3 - 1,0	≤ 6,0	≤ 2,0	≤ 1,0	-	Si, Fe, B	Ni	
Ni 4	c k p t z	≤ 1,0	1,0 - 15,0	Ostatak	≤ 1,5	≤ 28,0	≤ 8,0	≤ 1,0	≤ 4,0	Co, Si, Ti	Ni	
Ni 20	c g t z	WCa ²⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	Ni	
Co 1	c k t z	≤ 0,6	20,0 - 35,0	≤ 10,0	0,1 - 2,0	≤ 10,0	≤ 15,0	-	≤ 1,0	Fe	Co	
Co 2	t z (c) (s)	0,6 - 3,0	20,0 - 35,0	≤ 4,0	0,1 - 2,0	-	4,0 - 10,0	-	-	Fe	Co	
Co 3	t z (c) (s)	1,0 - 3,0	20,0 - 35,0	≤ 4,0	≤ 2,0	≤ 1,0	6,0 - 14,0	-	-	Fe	Co	
Cu 1	c (n)	-	-	≤ 6,0	≤ 15,0	-	-	-	-	Al, Fe, Sn	Cu	
Al 1	c n	-	-	10,0 - 35,0	≤ 0,5	-	-	-	-	Cu, Si	Al	
Cr	g n	1,0 - 5,0	Ostatak	-	≤ 1,0	-	-	15,0 - 35,0	-	Fe, B, Si, Zr	Cr	

c - otpornost na koroziju
g - otpornost na trošenje s brazijom
k - povećava tvrdoću eksploatacijom

n - nemagnetičnost
p - otpornost na udarce
s - svojstvo brzoreznih čelika

t - otpornost na visoke temperature
z - otpornost na stvaranje ogorine
w - toplo otvrdnjavanje

(.) - ne mora se odnositi na sva legiranja unutar grupe

¹⁾ Legiranja koja nisu navedena u tablici označavaju se na isti način, ali se ispred oznake legiranja navede slovo "Z".

²⁾ Volfram karbidi taljeni ili sinterirani (lomljeni ili sferoidni).

Shema 2. Označavanje elektroda za navarivanje [10]



4.3. Osnovna pravila pri izboru elektrode

Pri izboru elektrode promatra se niz elemenata. Najvažniji je izbor elektrode prema osnovnom materijalu, a obavlja se prema svojstvima osnovnog materijala i zahtjevima zavarenog spoja.

Za zavarivanje nelegiranih čelika elektroda se odabire prema mehaničkim svojstvima osnovnog materijala. Granica razvlačenja, istezljivost i žilavost metala zavara moraju biti jednake ili veće nego kod osnovnog materijala. Ako se izrazito traži povećana žilavost, odabire se bazična elektroda. Kod zavarivanja debelih materijala i ukrućenih konstrukcija, fosforom i sumporom onečišćenih čelika u pravilu se bira bazična elektroda.

Za zavarivanje niskolegiranih čelika izabire se elektroda koja ima odgovarajuće mehaničke karakteristike i kemijski sastav osnovnog materijala, i to tako da metal zavra ima te ili bolje karakteristike. Kod debljih materijala s više legiranih elemenata prednost imaju bazične elektrode.

Za zavarivanje nelegiranih s niskolegiranim čelicima u izboru elektrode vrijedi pravilo: kod sučeljenih spojeva bira se elektroda koja odgovara manje- legiranom materijalu, a kod kutnih spojeva bira se elektroda koja odgovara više- legiranom materijalu.

Za zavarivanja visokolegiranih čelika izbor elektrode vrši se uglavnom prema kemijskom sastavu i mehaničkim karakteristikama osnovnog materijala, i to tako da metal zavra ima ista ili bolja navedena svojstva.

Za zavarivanje visokolegiranih čelika s niskolegiranim ili nelegiranim čelicima redovito se bira visokolegirana austenitna elektroda. Međutim kod ovakvih zavarivanja treba dobro poznavati probleme zavarivanja raznorodnih čelika i ovisno o slučaju propisno odabrati elektrodu. Mogu biti i dvije vrste elektrode.

Za zavarivanje sivog lijeva na hladno najpogodnije su nikal elektrode, zatim bakar-nikal, željezo-nikal elektrode. Najslabije su bazične elektrode iako se u određenim slučajevima i s njima može zavariti sivi lijev. [13]



Za zavarivanje obojenih metala nema velikog izbora elektroda, pa se i ne može značajno pogriješiti.

Za navarivanje čelika postoji širok izbor odgovarajućih elektroda. Za tvrda navarivanja biraju se uglavnom elektrode kod kojih navar daje potrebnu tvrdoću. Za navarivanje otporno na koroziju biraju se elektrode visokolegirane s kromom. Za navarivanje otporno na habanje biraju se elektrode visokolegirane s manganom itd.

Izbor elektroda s obzirom na tehnološka svojstva. Za zavarivanje u prisilnim položajima odabiru se uglavnom obložene ili srednje obložene elektrode. Debelo obložene i visokoučinske elektrode nisu dobre za zavarivanje u prisilnim položajima. Postoje posebno izrađene elektrode za zavarivanje u vertikalnom položaju odozgo prema dole. Za zavarivanje korijena zvara na cjevovodima najbolje su celulozne elektrode.

Izbor struje i izbor elektroda. Ako su izvor struje transformatori, odabiru se uglavnom rutilne i kisele elektrode, odnosno elektrode izgrađene za rad s izmjeničnom strujom. Sa istosmjernom strujom, odnosno sa ispravljačima i pretvaračima dobro se zavaruju sve vrste elektroda. Visokolegirane elektrode uglavnom se zavaruju istosmjernom strujom, izuzetci su specijalno izrađene elektrode za izmjeničnu struju.

Promjer elektrode prema debljini osnovnog materijala i položajima zavarivanja. Bira se na osnovi iskustva. Za zavarivanje korijena zvara redovito se odabiru elektrode promjera 2-3,25 mm, ovisno o debljini materijala, i to tako da se elektrodom može izvršiti dobro provarivanje korijena zvara. Za ostale slojeve odabire se onaj promjer elektrode koji sjeda na dno žlijeba, odnosno na položeni korijen zvara. Za zavarivanje u prisilnim položajima uglavnom se odabire elektroda promjera od 2,5 do 3,25 mm, ponekad 4 mm.

Jakost struje s obzirom na promjer, vrstu elektrode i položaj zavarivanja. Odabire se prema preporukama proizvođača elektroda i prema iskustvu. Za zavarivanje čeličnim obloženim elektrodama u vodoravnom položaju jakost struje iznosi oko 20 do 40 A/mm promjera elektrode. Pri zavarivanju u prisilnim položajima jakost struje se smanjuje za 15 do 20%. Pri zavarivanju visokolegiranih čelika također se smanjuje jakost struje za 15 do 20% u odnosu na onu koja se primjenjuje za zavarivanje nelegiranih čelika. Kod zavarivanja sivog lijeva jakost struje je još manja. [13]



Izbor elektrode s obzirom na ekonomičnost. Promatra se koeficijent taljenja, koeficijent gubitaka i koeficijent iskorištenja elektrode, koji je različit kod različitih vrsta elektrode. Ovi koeficijenti se mogu dobiti ispitivanjem navedenih svojstava elektrode. Gdje je moguće preporučuje se korištenje debelo obloženih visokoučinskih elektroda. Debele obložene visokoučinske elektrode su posebno pogodne za primjenu na debelim limovima u vodoravnom položaju, dok su ograničavajući faktori prisilan položaj, tanak lim i nedovoljna snaga izvora struje. [13]

4.3.1. Određivanje bazičnosti elektroda

Bazičnost elektroda se određuje pomoću BI indexa (Basicity indeks). BI index je usvojen od strane Međunarodnog instituta za zavarivanje, te je određen masenim udjelima pojedinih oksida i fluorida u oblozi elektrode.

$$\text{Index bazičnosti (BI)} = \frac{\sum \text{bazičnih oksida}}{\sum \text{kiselih oksida}}$$

$$BI = \frac{\text{CaF}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{BaO} + \text{SrO} + \text{Li}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + 0.5(\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 0.5(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)}$$

Obloga elektrode će biti bazična ili kiselá u ovisnosti o BI indexu. Jedna od glavnih razlika između bazične i kisele obloge elektrode je njihova sposobnost uklanjanja zaostalih nečistoća (sumpora i fosfora) iz metala zavora.

Postoje četiri razine indexa bazičnosti za standardizaciju obloga elektrode:

- Obloge sa indexom bazičnosti manjim od 1 nisu sposobne učinkovito kontrolirati količinu sumpora u metalu zavora. $BI < 1$ = Kisele.
- Obloge sa indexom bazičnosti između 1 i 1.5 su sposobne efikasno kontrolirati količinu sumpora u metalu zavora, ali ne i oksida. $1 < BI < 1.5$ = Neutralne.
- Obloge sa indexom bazičnosti između 1.5 i 2.5 su sposobne efikasno kontrolirati količinu sumpora i oksida, te snižavaju prijelaznu temperaturu kontrolirajući količinu Si u metalu zavora do određene mjere. $1.5 < BI < 2.5$ = Bazične.
- Obloge sa indexom bazičnosti iznad 2.5 su sposobne za povećanje žilavosti na temperaturama od -40°C i nižim prikladno kontrolirajući sastav i mikrostrukturu metala zavora. $BI > 2.5$ = Visoko bazične. [18,19]



4.4. Osnovna pravila pri rukovanju elektrodama

Proizvođač je obavezan da elektrode tako pakuje da su zaštićene od atmosferskog utjecaja. Na svakom paketu moraju biti označeni podaci o vrsti, dimenzijama i broju šarže, kao i znak proizvođača. Ovi paketi se moraju uskladištiti tako da su zaštićeni od atmosferskog utjecaja, posebno vlage, a takođe mora biti osigurano da ne dođe do oštećenja obloge i zamjene pojedinih vrsta elektrode.

Elektrode koje su dobro zatvorene u pakete ili u zalemljene limene kutije (spriječeno pristup zrakom) ne treba naknadno sušiti. Ostale elektrode prije upotrebe treba sušiti, naročito ako se zahtjeva povišena kvaliteta zavarenih spojeva. To se posebno odnosi na bazične elektrode koje su vrlo higroskopne. Već nakon 4 sata neke vrste bazičnih elektroda u otvorenoj kutiji se mogu smatrati vlažnim i treba ih naknadno sušiti. Sušenje elektroda se obavlja u posebnim pećima za sušenje sa mogućnošću regulacije temperature. Svaki zavarivač bi morao na radnom mjestu imati posebnu priručnu torbu za održavanje temperature, najčešće između 60-90 °C, kako bi se spriječilo vlaženje elektroda za vrijeme rada. Temperatura i vrijeme sušenja ovise o vrsti elektrode. [4,13]

Rutilne i kisele elektrode po pravilu ne treba sušiti, osim u slučajevima primjetnih znakova vlažnosti. Tada ih treba sušiti na temperaturi 120 °C u trajanju 2 sata.

Bazične elektrode i pored dobrog skladištenja treba u većini slučajeva sušiti, a naročito ako se zavaruju mikrolegirani čelici ili debeli limovi neumirenog čelika. Ove elektrode se suše po pravilu na temperaturi od 300 do 350 °C u trajanju od najmanje 2 sata. Na temperaturi od 350 °C elektrode se mogu najduže držati 10 sati, jer bi inače došlo do oksidacije obloge. Elektrode sa bazičnom oblogom za zavarivanje čelika granice razvlačenja manjeg od 360 MPa mogu se sušiti i na temperaturi od 250 °C. Ovako osušene elektrode mogu se prije upotrebe ohladiti do temperature 150 do 200 °C i odložiti u peć za jednodnevnu upotrebu ili ručne sušionike. [4,13]



Elektrode za visokolegirane čelike treba sušiti na temperaturi između 200 i 250°C u trajanju 3 sata. Preporučuje se polagano zagrijavanje i hlađenje. Vlažne elektrode se lako prepoznaju i prema zvuku pri udaru jedna o drugu: suhe elektrode daju oštar i visok zvuk, a vlažne dubok. Pri zavarivanju vlažnim elektrodama čuju se male eksplozije i pucketanja, a sa površine se može primjetiti isparavanje vlage.

Sušenje elektrode rutilnog tipa, u nedostatku drugog načina, može se obaviti i neposredno prije zavarivanja uključivanjem elektrode u kratak spoj. Obložene elektrode vremenom stare, što se može primjetiti po malim bijelim kristalima na oblozi. Ovo je rezultat kemijskih reakcija sastojaka iz obloge. Ovakve elektrode ne smiju se koristiti. Konačno, treba paziti da se koriste samo elektrode bez mehaničkog oštećenja ili zamašćenja obloge. [4,13]



4.5. Tehnološke karakteristike elektroda

Pod tehnološkim karakteristikama elektrode se podrazumevaju konstanta taljenja, brzina taljenja i koeficijent iskorištenja.

Konstanta taljenja elektrode, K_e , je masa istaljenog metala elektrode, M_e (g), u jedinici vremena, t_z (s), i po jedinici jakosti struje zavarivanja, I_z (A):

$$K_e = \frac{M_e}{I_z * t_z}, (\text{g/As}) [5]$$

Konstanta taljenja ovisi o vrsti i sastavu jezgra i obloge elektrode, i vrste i polariteta struje. Brzina taljenja elektrode, v_e , je masa istaljenog metala elektrode, M_e (g), u jedinici vremena zavarivanja, t_z (s):

$$v_e = \frac{M_e}{t_z}, (\text{g/s}) [5]$$

Brzina taljenja ovisi o vrsti i promjeru elektrode te jakosti struje zavarivanja. Na osnovu prvih dviju jednažbi očigledno je:

$$v_e = K_e \cdot I_z [5]$$

Koeficijent iskorištenja elektrode, R (%), je količina mase istaljenog metala elektrode, M_e , i mase stvarno utrošenog metala jezgre, M_j , izražen u postotcima:

$$R = \frac{M_e}{M_j} * 100\% [5]$$

Koeficijent iskorištenja kod običnih elektroda dostiže najviše 90%, zbog gubitaka usljed sagorijevanja i prskanja elektrode. Kod specijalnih, visokoproduktivnih elektroda, koeficijent iskorištenja može biti veći od 100% usljed prisustva željeznog praška u oblozi elektrode, koji poslije taljenja prelazi u metal zavara. [5]

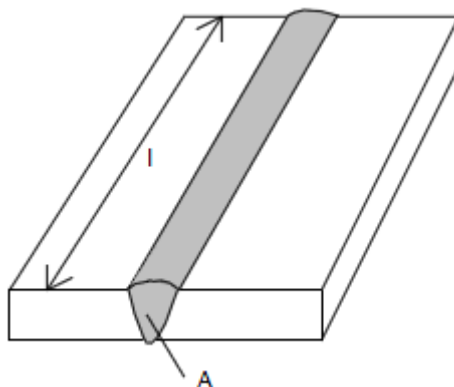
4.6. Glavni troškovi REL zavarivanja

Najvažniji troškovi ručnog elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom su:

- troškovi elektroda,
- troškovi električne energije,
- troškovi osobnog dohodka - plaće radnika,
- troškovi izvora struje za zavarivanje.

Troškovi se mogu izraziti u kn/kg depozita ili kn/m dužine zavora. Kao prikladniji način se obrazlaže iskazivanje troškova u kn/kg depozita. Naime za 1 m zavarenog spoja može se utrošiti različita količina depozita, a troškovi su proporcionalni masi depozita.

Na slici 8. je prikazana skica zavora na kojoj su označene geometrijske veličine potrebne za izračun mase potrebnog metala zavora.



Slika 8. Skica zavora [20]

$$G_{dep} = A * l * \rho, \text{ kg}$$

G_{dep} masa depozita

ρ specifična masa, kg/m³

Apovršina presjeka deponiranog DM (žlijeba), m²

l ... dužina zavora, m

Masa depozita i troškovi zavarivanja će biti to manji što je manja površina presjeka žlijeba u koji se tali dodatni materijal i dužina zavora.

Teorijski troškovi zavarivanja će biti minimalni (minimum funkcije G), ako je $A = 0$ ili $l = 0$, dakle za slučaj bez zavarenih spojeva. Ovaj zaključak ukazuje da konstruktori i tehnolozi trebaju jako paziti na debljinu zavora, presjek žlijeba i dužinu zavora, te ove veličine držati što je niže moguće. [20]



1. Troškovi elektroda

$$T_{elektroda} = C_{elektroda} * k_t, \text{ kn/kg depozita}$$

$C_{elektroda}$ - jedinična cijena elektroda, kn/kg elektroda

k_t - koeficijent taljenja elektrode koji iskazuje iznos mase elektroda zajedno sa oblogom koja je potrebna da se istali (deponira) 1 kg depozita. Ovaj koeficijent ovisi o debljini obloge elektrode, dodatku željeznog praška u oblozi, koji se dodaje zbog povišanja učinka, te o otpatku ("čiku") elektrode, koji zavarivač ostavlja neiskorišten. Taj otpadak treba nastojati da je što manji. Duži otpaci zbog nepažnje uzrokovat će veće troškove. Koeficijent taljenja k_t je različit i može iznositi npr. 1,7 kg elektroda/kg depozita. [20]

2. Troškovi električne energije [20]

Snaga električne energije:	Električna energija za 1 kg depozita:
$N = \frac{U * I}{1000 * \eta_s} * \varepsilon + N_0(1 - \varepsilon), \text{ kW}$	$E_{kg} = \left[\frac{U * I}{1000 * \eta_s} * \varepsilon + N_0(1 - \varepsilon) \right] * \frac{1}{k_t * \varepsilon}, \text{ kn/kWh}$

Troškovi električne energije:

$$T_{el.energije} = \left[\frac{U * I}{1000 * \eta_s} * \varepsilon + N_0(1 - \varepsilon) \right] * \frac{1}{k_t * \varepsilon} * CC_{el.en.}^1, \text{ kn/kg depozita [20]}$$

U - napon električnog luka; orijentacijski za REL 20 - 25 V

I - struja zavarivanja

η_s - stupanj korisnog djelovanja uređaja za zavarivanje:

- rotacijski agregat 0.55 - 0.65
- transformator 0.80 - 0.95
- ispravljač 0.75 - 0.85

ε - intermitencija, vrijeme uključivanja električnog luka [20]



No- snaga koju uređaj za zavarivanje koristi u praznom hodu, kada luk ne gori. Snaga se tada troši za rad ventilatora, trenje, rasipanje magnetskog polja, i zagrijavanje vodiča u stroju. No iznosi približno za:

- agregate 1,0 kW,
- ispravljače 0,7 kW
- transformatore 0,5 kW

k_t - koeficijent taljenja elektrode

$C_{el.en.}^1$ - jedinična cijena električne energije kn/kWh.

3. Troškovi osobnog dohodka

$$T_{ODI} = \frac{ODI \left[\frac{kn}{h} \right]}{k_t \left[\frac{kg \ dep}{h} \right] * \varepsilon}, \text{ kn/kg dep [20]}$$

ODI - bruto iznos OD, koji se dobije, ako se neto OD dodaje u obavezna davanja društvenoj zajednici (mirovinsko i zdravstveno osiguranje i ostala izdvajanja)

4. Troškovi uređaja za zavarivanje

Troškove uređaja za zavarivanje računamo po satu rada za jednu godinu.

$$T_s^1 = \frac{C_N(amort. + osiguranje + održavanje + kamate + PF)}{\text{broj sati rada godišnje}}, \text{ kn/h [20]}$$

$$T_{stroja} = T_s^1 \left[\frac{kn}{h} \right] * \frac{1}{k_t * \varepsilon} \left[\frac{h}{kg \ dep} \right], \text{ kn/kg dep [20]}$$

C_N - nabavna cijena uređaja za zavarivanje

amort - godišnja stopa amortizacije

osiguranje - premija osiguranja

održavanje - godišnji iznos za održavanje

kamate PF - kamate ili porez na poslovni fond (osnovna sredstva) ako se moraju plaćati društvenoj zajednici

Broj sati godišnje rada uređaja za zavarivanje u jednoj ili više smjena ovisi o stvarnom korištenju stroja. Ukupni troškovi su suma svih troškova potrebnih za zavarivanje. [20]



4.7. Željezni prašak u elektrodama za zavarivanje

Osnovna komponenta obloga visokoučinskih elektroda je željezni prašak. U usporedbi s ostalim materijalima koji ulaze u sastav obloge (rutil, alumino-silikati, karbonati, fluoridi, ferolegure, veziva) željezni prašak ima specifično mjesto, jer zavisno od kemijskog sastava i fizikalnih svojstava može varirati u širokim granicama. Željezni prašak utječe na izradu elektroda (prešanje), iskorištenje i produktivnost, zavarivačka svojstva, i mehanička svojstva zavara.

Da bi se koristio za proizvodnju elektroda željezni prašak namijenjena za zavarivanje mora ispuniti neke zahtjeve:

- niski sadržaj nečistoća,
- konstantna kemijska i fizikalna svojstva.

Najbitniji je kemijski sastav (niski sadržaj nečistoća sumpora i fosfora), niski sadržaj ugljika i kisika. Bitni čimbenici su dalje oblik i veličina zrna, granulacija, i nasipna težina. Željezni prašak se mogže podijeliti u dvije vrste: reducirani i atomizirani prašak, a razlikuju se po izgledu i obliku, i po fizikalnim svojstvima zbog razlike u načinu dobivanja.

Reducirani prašak je mikro-porozan i nepravilnih čestica za razliku od atomiziranog praška koja više-manje ima kompaktnu strukturu i pravilan oblik čestica. Struktura i oblik čestice najviše utječu na nasipnu težinu. Nepravilan, porozan i rastresit oblik je korisniji. Međutim željezni prašak s glatkim zrnima visoke nasipne težine ima prednost za visokoučinske elektrode.

Željezni prašak za rutilne elektrode

Za rutilne elektrode s iskorištenjem od 120 do 250% naročito su prikladne atomizirani željezi prašci visoke nasipne težine s kombinacijom čestica pravilnog i nepravilnog oblika u određenom omjeru. Prijenos metala elektrode u zavar je vrlo miran i jednolik. Krater koji se formira taljenjem elektrode je konstantne dubine što rezultira stabilnim i pravilno usmjerenim električnim lukom, visokim, ali konstantnim naponom. [14]



Željezni prašak za bazične elektrode

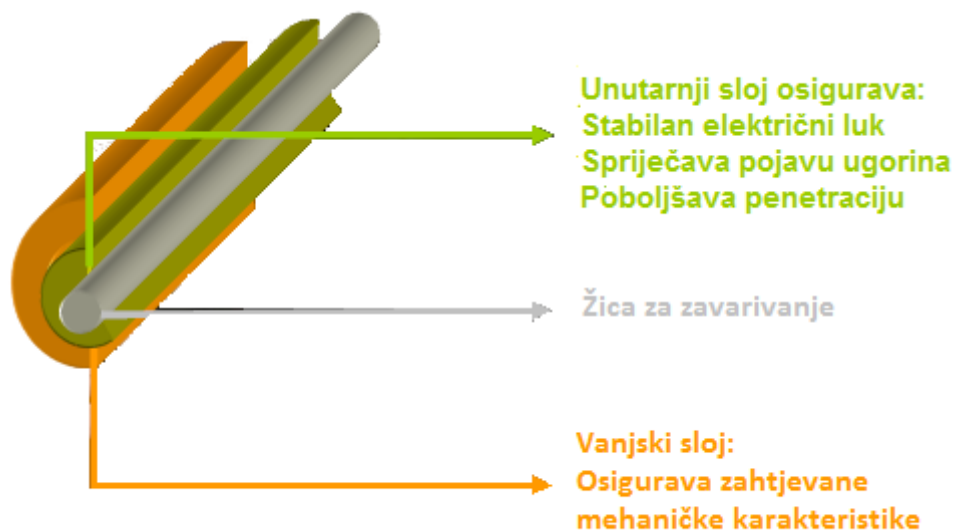
Za bazične elektrode reducirani željezni prašci su se pokazali naročito prikladnima. Željezni prašak koji ulazi u sastav materijala za bazičnu oblogu ima niski sadržaj kisika i visoku kemijsku čistoću. Sadržaj kisika je ispod 0,5%. Nasipna težina i oblik čestica variraju za pojedine tipove. Visoka čistoća, osobitno nizak sadržaj ugljika i kisika povoljno utječu na stabilnost luka i smanjuju rasprskavanje metala. Poznate su "lagani" prašci velikih spužvastih (poroznih) čestica. Uglavnom se koriste za bazične elektrode s iskorištenjem do 140%. Porozni prašak u oblozi, osigurava miran i tih rad elektrode, minimalna rasprskavanja, površina zavara je fino valovita i skidanje troske je dobro. Za bazične elektrode s iskorištenjem preko 140% preporučuje se prašak sa kompaktnim česticama i veće nasipne težine.

Utjecaj željezne prašine na iskorištenje i koeficijent taljenja

Udio željeznog praška u oblozi elektroda kreće se od nekoliko postotaka do 70% kod elektroda s najvećim iskorištenjem. Niski sadržaj željeznog praška u oblozi stabilizira električni luk, olakšava uspostavljanje električnog luka i smanjuje gubitke nastale kao rezultat oksidacije. Stupanj iskorištenja takvih elektroda je približno 110%. Međutim, pri većim količinama željeznog praška pored navedenog djelovanja, vidljivo je povećanje iskorištenja kao i povećanje produktivnosti zavarivanja. Iz prakse je poznato da elektrode bez željeznog praška u oblozi gdje krater nije tako pogodnog oblika pokazuju gubitke materijala rasprskavanjem do 10%, međutim kod elektroda s željeznim praškom gubitak materijala rasprskavanjem i izgaranjem je vrlo mali. Prisutstvo željeznog praška u oblozi omogućuje i korištenje znatno viših struja zavarivanja bez pojave nekorisnih efekata zapaženih kod klasičnih elektroda. Poznato je da je koeficijent taljenja direktno proporcionalan struji zavarivanja. [14]

5. Dvostruko oploštene elektrode

U današnje vrijeme se sve više koriste dvostruko oploštene elektrode, koje su rezultat stalnog unaprijeđivanja i razvoja dodatnih materijala te elektroda za zavarivanje. Poprečni presjek dvostruko oploštene elektrode je prikazan na slici 9.

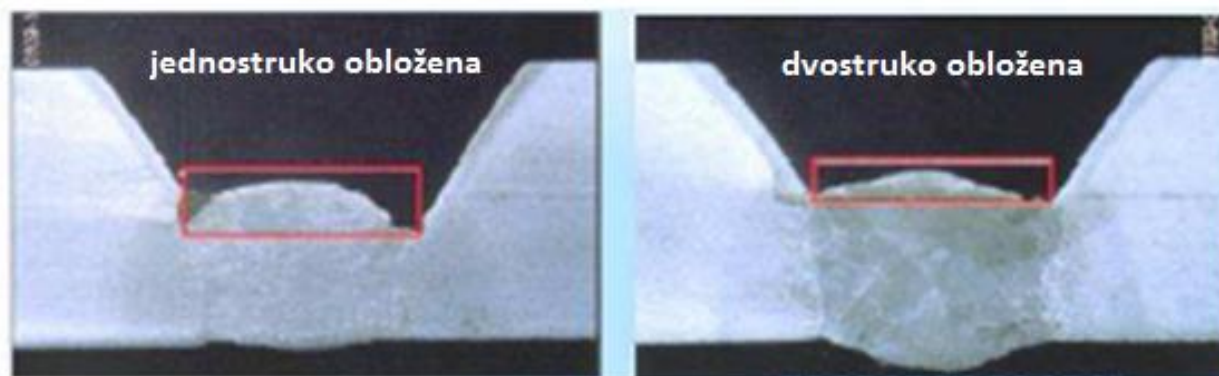


Slika 9. Poprečni presjek dvostruko oploštene elektrode [16]

Proizvođači suvremenih obloženih elektroda taje kemijske sastave obloga, te njihove udjele, ali danas postoji velik broj proizvođača koji proizvode dvostruko oploštene elektrode, pa tako možemo uspoređivati njihova mehanička svojstva, karakteristike i područja primjene.

Općenito možemo reći da je cilj dvostruko oploštenih elektroda ujedinenje dobrih karakteristika različitih vrsta obloga.

Slika 10. pokazuje izgled zavora običnom i dvostruko oplštenom bazičnom elektrodom.



Slika 10. Razlika u izgledu zavora između obične i dvostruko oplštene elektrode [16]

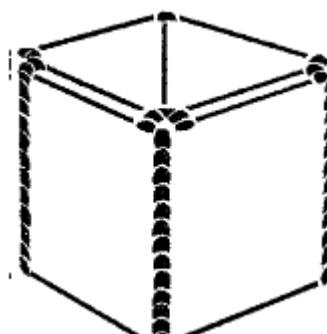
Dvostruko oplštene bazične elektrode sa jedinstvenim kemijskim sastavom obloge daju odlična radna svojstva rutilne elektrode sa vrlo dobrim mehaničkim karakteristikama bazičnih elektroda. Elektrode su vrlo pogodne za sve izvore struja za zavarivanje, te se mogu spajati na izmjeničnu i istosmjernu struju (+ pol), te daju minimalno puhanje električnog luka.

Odlikuje ih vrlo dobro zavarivanje u prisilnim položajima, a vertikalno zavarivanje se izvodi u smjeru odozdola prema gore. Idealne su za zavarivanje spojeva kod kojih je potrebna visoka kvaliteta zavora. [15]

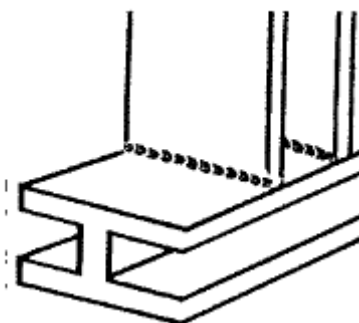
Slika 11. prikazuje neka područja primjene dvostruko oplastenih elektroda.



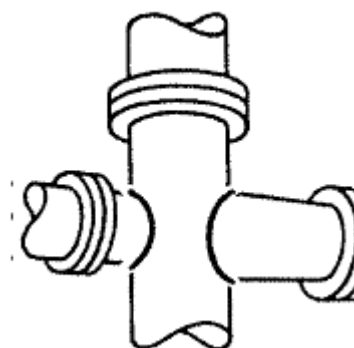
a) korijen zavora cijevi



c) limovi



b) profili

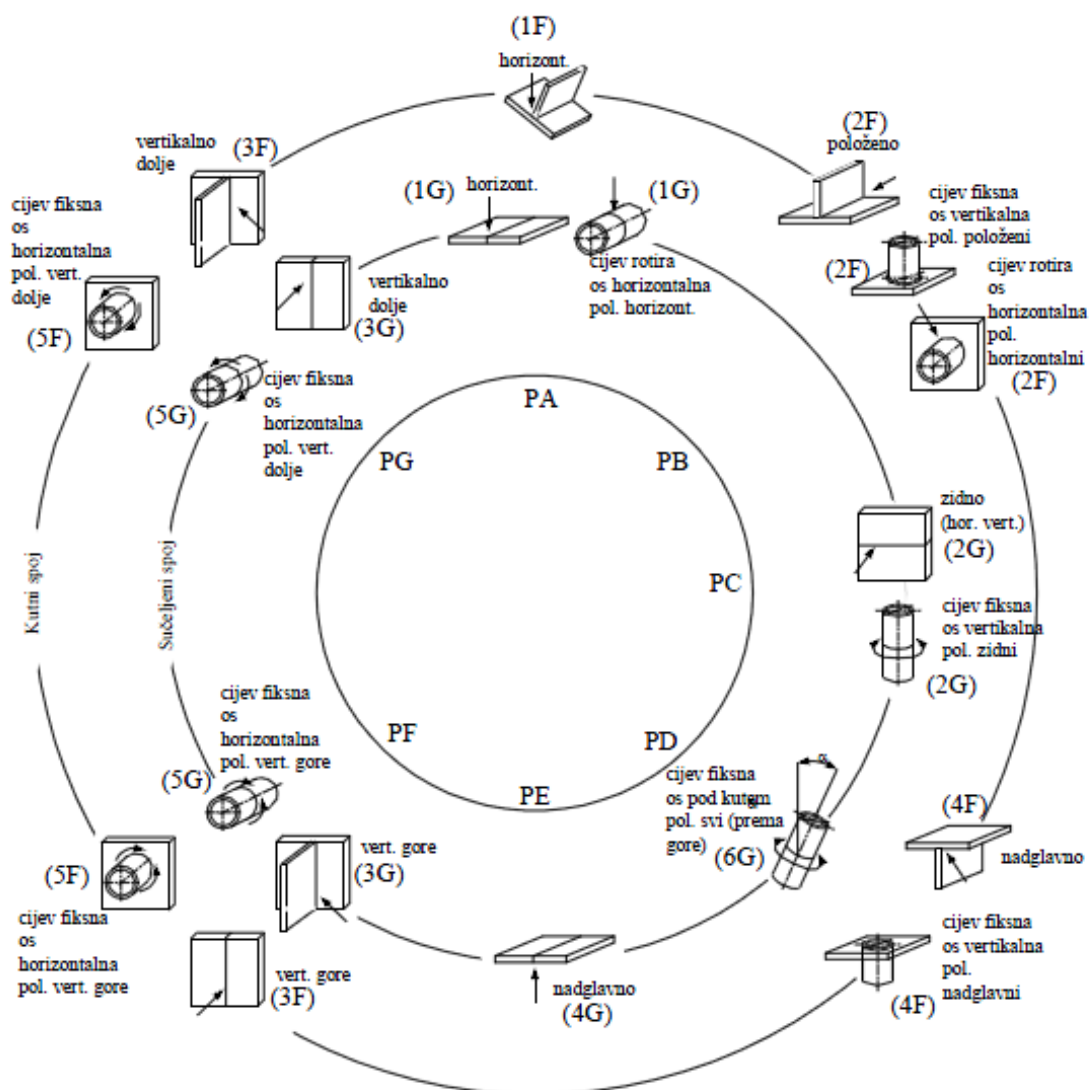


d) prisilni položaji zavarivanja

Slika 11. Područja primjene dvostruko oplastenih elektroda [15]

Kao što je ranije spomenuto dvostruko oplastene elektrode su napravljene s namjenom primjene za zavarivanje u prisilnim položajima, i teško dostupnim mjestima.

Slika 12. prikazuje položaje zavarivanja.



Slika 12. Položaji zavarivanja [15]

Na slici 13. su prikazana svojstva dvostruko oplastene elektrode, proizvođača Elektroda Zagreb.

EZ - 2 B

NORME

HRN EN ISO 2560-A	AWS / ASME SFA-5.1
E 42 4 B 32	E7016

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Dvostruko opláštena bazična elektroda sa izvrsnim operativnim karakteristikama zavarivanja u svim pozicijama osim vertikalno prema dolje. Posebno je pogodna za zavarivanje u zahtjevnim pozicijama. Prikladna je za zavarivanje korijenskog prolaza na minus polu.

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

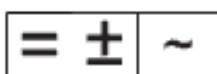
R_{m} N/mm ²	R_{e} N/mm ²	A_{5} %	KV (-40°C) J
> 420	500 - 640	> 22	≥ 60

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ČISTOG METALA ZAVARA

	C	Mn	Si
%	0,08	1,0	0,6

PAKIRANJE

Dimenzija elektrode mm	Količina u toni cca kom	Težina kutije kg
Ø 2,5 x 300	53 100	3,2
Ø 3,2 x 350	26 900	3,9
Ø 4,0 x 450	14 400	5,2
Ø 5,0 x 450	9 600	5,4



Oznaka: **EZ - 2 B** Po potrebi sušiti 2h/300°C

Slika 13. Elektroda Zagreb dvostruko opláštena elektroda [10]



Važno je napomenuti da je skladištenje i rukovanje dvostruko oploštenim elektrodama vrlo važno, te svaki proizvođač preporuča "pečenje" elektroda prije uporabe na određenoj temperaturi u propisanom vremenu, kako bi elektrode bile najboljih radnih karakteristika. U današnje vrijeme dvostruko oploštene elektrode su relativno nove u primjeni i proizvodnji elektroda, te njihov točan kemijski sastav obloga nije poznat.

Svaki proizvođač nastoji razviti svoju vrstu obloge. U novije vrijeme moguće je kombinacijom dvije različite vrste obloge, poboljšati radna svojstva elektrode, te iskoristiti prednosti dvaju različitih obloga. U nekim dvostuko oploštenim elektrodama se dodaje i željezni pršak koji povećava efikasnost elektroda, ali s obzirom da je glavna zadaća ovih elektroda zavarivanje u prislinim položajima, njihova efikasnost nije ni približna visoko učinkovitim elektrodama, što se od njih ni ne očekuje.



6. Eksperimentalni dio

U eksperimentalnom dijelu provedena je usporedba operativnih karakteristika dvostruko oploštene Castoline 6666 elektrode, sa bazičnom Böher FOX EV 50 elektrodom. Nakon ispitivanja operativnih karakteristika, izabrani su najpovoljniji parametri zavarivanja, te su zavarene dvije ploče, i na njima su provedena mehanička ispitivanja.

Ploče su zavarene na potpuno identičan način, sa istim parametrima, te je jedina razlika bila u polaritetu struje. Prva ploča se zavarivala sa istosmjernom strujom, gdje je elektroda bila priključena na + pol, a druga ploča je zavarena sa izmjeničnom strujom. Struje zavarivanja korijena i popune, te brzine zavarivanja su bili iste u oba slučaja.

U nastavku rada će biti prikazan tijek eksperimenta, postupak zavarivanja, ispitivanje zavara, te konačna analiza rezultata.



6.1. Osnovni i dodatni materijal

Kao osnovni materijal se koristio nelegirani konstrukcijski čelik S235. Za sva ispitivanja i tijekom cijelog eksperimenta debljina osnovnog materijala je bila 10 mm.

U tablici 4. je prikazan kemijski sastav osnovnog materijala.

Tablica 4. Kemijski sastav osnovnog materijala [21]

C %	Mn %	Si %	S %	P %	N %
0,19	1,5	-	0,055	0,055	0,011

U tablici 5. su prikazana mehanička svojstva osnovnog materijala

Tablica 5. Mehanička svojstva čelika S235 [21]

Min.granica elastičnosti, [N/mm ²]	Vlačna čvrstoća, [N/mm ²]	Udarni rad loma [J] (-20°C)	Suženje poprečnog presjeka [%]
235	340 – 470	27	24

Ovaj čelik spada u grupu općih konstrukcijskih čelika, pa s obzirom na to ima široko područje primjene, te je njegova zavarljivost u prisilnim položajima od iznimne važnosti.

Za zavarivanje ovog čelika ispitali smo dvije vrste elektroda. Dvostruko oplastenu bazičnu elektrodu Castoline 6666, te elektrodu BÖHLER FOX EV 50.

Slika 14. prikazuje svojstva dvostruko oplastene bazične elektrode Castoline 6666.

Slika 15. prikazuje svojstva bazične elektrode Böher FOX EV 50.



Doppelmantelstabelektrode
Castolin 6666
 für un- und niedriglegierte Stähle / FK-Baustähle

Eigenschaften

Doppelt-ummantelte Stabelektrode mit basischer und rutiler Umhüllungscharakteristik. Gleichmäßig und fein gefiederte Nähte. Stabiler Lichtbogen, feintropfiger Werkstoffübergang und geringe Spritzerbildung. Gute Zwangslageneignung. Gute Eignung zum Kontaktschweißen. Zulässige Betriebstemperaturen von -40 °C bis 350 °C. Leicht entfernbare Schlacke.

Technische Daten

DIN EN ISO 2560-A-E 42 4 B 32
 (EN 499: E 42 4 B 32)*
 AWS A5.5: E8018-G

Richtanalyse des Schweißgutes in %:
 max. 0,1 C - 0,5 Si - 1,6 Mn - max. 0,15 Cr -
 0,5 Ni - Rest Fe

Schweißgut (unbehandelt)	Mindestwerte**) bei 20 °C
Streckgrenze R_{eH} [MPa]	420
Zugfestigkeit R_m [MPa]	570
Bruchdehnung A_5 [%]	20
Kerbschlagarbeit A_K [J] (ISO-V, bei -40 °C ≥ 47 J)	47

**) entsprechend den geltenden Regelwerken.
 Ist-Werte sind deutlich höher.

Anwendungen

Zum Verbindungsschweißen von un- und niedriglegierten Stählen und hochfesten Feinkornbaustählen, z.B.:

EN 10025-2: S 235 J2 – S 355 K2
 EN 10025-3: S 275 NL – S 420 NL
 EN 10025-4: S 275 ML – S 420 ML
 EN 10083-1: C 22 R, C 25 R
 EN 10028-2: P 235 GH – P 355 GH
 und entsprechende Guss- und Rohrwerkstoffe.

Typische Anwendungsbeispiele sind:
 Heftnähte, Montagearbeiten, Werkstatt- und Reparaturschweißungen im Maschinen-, Karosserie-, Waggon-, Stahl- und Schiffbau sowie im Behälter- und Kesselbau.

Verarbeitungshinweise

Schweißbereiche säubern. Rücktrocknen bei 250 °C / 2 h. Wärmeführung beim Schweißen auf das Bauteil, dessen Werkstoff und Abmessung abstimmen.

Schweißpositionen: alle, außer PG (f)

Stromart: = (+) oder ~

Abmessung [mm]	Strom [A]	Gewicht [St./kg]	Verpackung [kg/Karton]
Ø 2,5 x 350	70- 90	44	5,0
Ø 3,2 x 350	100-130	29	5,0
Ø 4,0 x 350	130-170	18	5,0

Weitere Durchmesser auf Anfrage.

Zulassungen

TÜV, DB (10.024.03), CE

Eurocode 01964

Slika 14. Castoline 6666 dodatni materijal [22]

Mild Steel Filler Metals – SMAW stick electrodes

EN 499:1994: E 42 5 B 4 2 H5
 AWS A5.1-04: E7018-1H4R
 AWS A5.1M-04: E4918-1H4R

BÖHLER FOX EV 50

SMAW stick electrode, mild steel,
 basic-coated

Description

Basic coated electrode engineered for high-quality welds. Excellent strength and toughness properties down to -50 °C. Metal recovery approx. 110 %. Good weldability in all position except for vertical-down. Very low hydrogen content (according AWS condition HD < 4 ml/100 g weld metal). Suitable for welding steels with low purity and high carbon content. Welding in steel construction, boiler and tank manufacture, vehicle construction, shipbuilding, and machine construction as well as for buffer layers on build ups on high carbon steels. Especially suitable for off-shore construction, CODT tested at -10 °C. It can be used in sour gas applications (HIC-Test acc. NACE TM-02-84). Test values for SSC-test are available too.

Typical Composition of All-weld Metal

	C	Si	Mn
wt-%	0.07	0.5	1.1

Mechanical Properties of All-weld Metal

	u	s
(*) Yield strength R_{m} N/mm ² :	490 (≥ 420)	430
Tensile strength R_{m} N/mm ² :	560 (500 - 640)	520
Elongation A ($L_0 = 5d_0$) %:	27 (≥ 22)	29
Impact work ISO-V KV J		
+ 20 °C:	190 (≥ 120)	220
- 20 °C:	160	190
- 50 °C:	100 (≥ 47)	140

(*) u untreated, as-welded

s stress relieved 600 °C/2 h/furnace down to 300 °C/air

Operating Data

re-drying if necessary:
 300 - 350 °C, min. 2 h
 Electrode identification:
 FOX EV 50 7018-1 E 42 5 B

ø mm	L mm	amps A
2.0	250	50 - 70
2.5	250/350	80 - 110
3.2	350/450	100 - 140
4.0	450	130 - 180
5.0	450	180 - 230
6.0	450	240 - 290

**Base Materials**

steels up to a yield strength of 420 N/mm² (60 ksi)

S235JR-E335, S235J2G3 - S355J2G3, C22, P235T1-P355T1, P235T2, P355T2, L210 - L360NB L290MB - L320MB, P235G1TH, P255G1TH, P235GH, P265GH, P295GH, S235JRS1 - S235J4S, S355G1S - S355G3S, S255N - S355N, P255NH-P355NH, S255NL - S355NL, GE200-GE260, GE300

ASTM A 27 a, A36 Gr. all; A214; A 242 Gr. 1-5; A266 Gr. 1, 2, 4; A283 Gr. A, B, C, D; A285 Gr. A, B, C; A299 Gr. A, B; A328; A366; A515 Gr. 60, 65, 70; A516 Gr. 55; A570 Gr. 30, 33, 36, 40, 45; A 572 Gr. 42, 50; A606 Gr. all; A607 Gr. 45; A656 Gr. 50, 60; A668 Gr. A, B; A907 Gr. 30, 33, 36, 40; A841; A851 Gr. 1, 2; A935 Gr. 45; A936 Gr. 50; API 5 L Gr. B, X42 - X56

Approvals and Certificates

TÜV-D (0426.), DB (10.014.02), ÜZ (10.014/1), ÖBB, TÜV-A (32), ABS (3H5, 4Y), BV (3YHH), CL (0210), DNV (3YH10), FI (E 42 5 B 42 H5), GL (4Y40H15), ISPESL (X), LR (3, 3YH5), RMR (3YHH), RINA (4YDH5/4DH5), UDT, LTSS, VUZ, SEPPOZ, PDO, CRS (3YH5)

Slika 15. BÖHER FOX EV 50 dodatni materijal [23]

Pakiranje, transport i skladištenje dodatnog materijala je važno zbog zaštite elektroda od utjecaja okolne atmosfere.

Slika 16. prikazuje pakiranja dodatnog materijala.

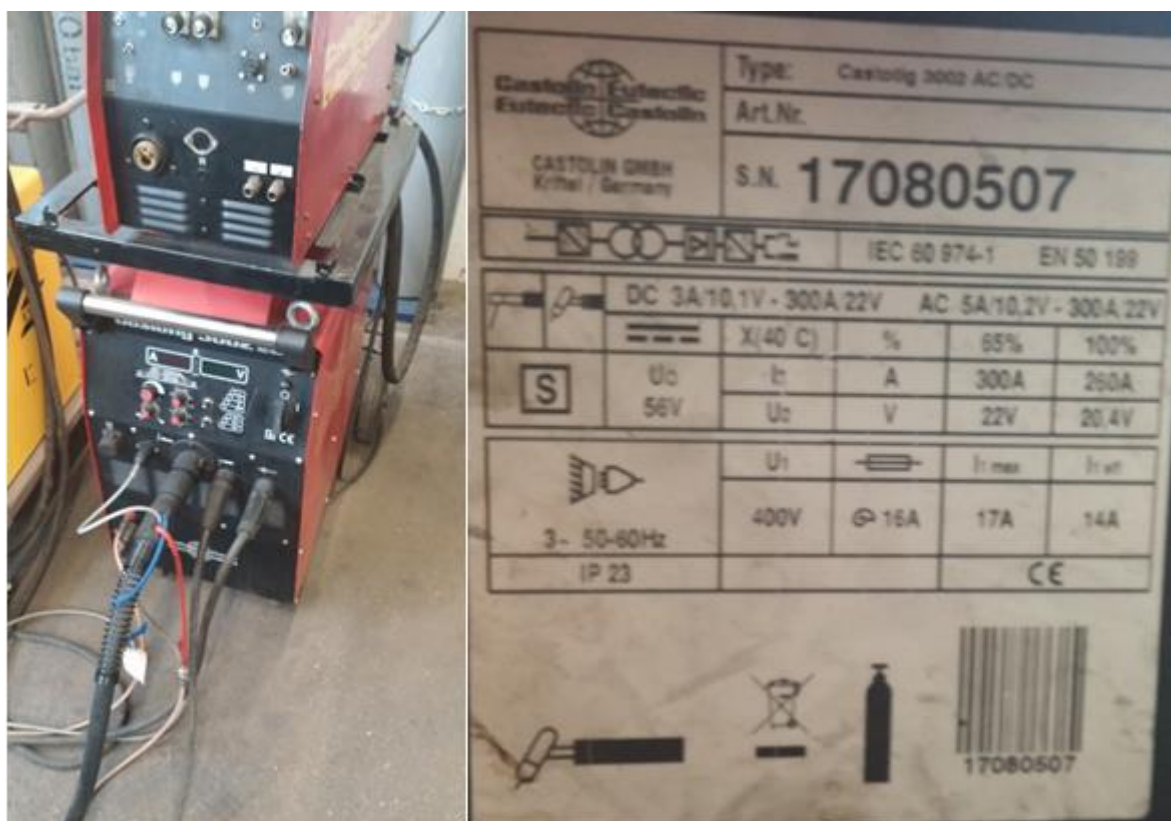


Slika 16. Pakiranja dodatnog materijala

Kao izvor struje za zavarivanje se koristio uređaj Castotig 3002, za potrebe cijelog eksperimentalnog rada. Ovim izvorom struje moguće je zavarivati pomoću TIG i REL postupka, te je na uređaj nadograđen modul za plazma zavarivanje.

Moguće je zavarivati sa strujama zavarivanja do 300A pri kojoj uređaj posjeduje intermitenciju od 65%, a već pri 250A dolazi do 100%-tne intermitence.

Na slici 17. je prikazan uređaj za zavarivanje i njegova natpisna pločica.



Slika 17. Izvor struje za zavarivanje

6.2. Ispitivanje operativnih karakteristika

U ovom dijelu eksperimentalnog rada ispitivale su se operativne karakteristike Castoline 6666 elektrode s kojom se zavarivalo na izmjeničnoj i istosmjernoj struji gdje je elektroda bila priključena na + pol, te BÖHER FOX EV 50 elektrode. Važno je napomenuti da BÖHER FOX EV 50 elektroda nije namjenjena za zavarivanje na izmjeničnoj struji te daje vrlo loše operativne karakteristike, pa se s toga njena operativna svojstva na izmjeničnoj struji nisu niti ispitivala.

Za svaku vrstu elektrode i polaritet struje, napravljeno je po 5 pločica na koje će biti navareni probni zavari sa rasponom struja od 60A do 100A. Epruvete na kojima su ispitivane operativne karakteristike su dimenzija 20x150x10 mm, te su izrezane iz jednog komada ploče dimenzija 250x150x10 mm.



Tijekom ispitivanja operativnih karakteristika najveća pozornost je dana uspostavi luka, stabilnosti luka, izgledu lica zavora, odvajanju troske, štrcanju, te pokrivenosti lica zavora troskom.

Svakoj epruveti je izmjerena masa prije zavarivanja i nakon zavarivanja, te je isto tako mjereno i vrijeme zavarivanja. Ti podatci su poslije korišteni za računanje mase metala zavora, konstante taljenja, učina elektrode, te koeficijenta iskorištenja.

Slika 18. prikazuje vaganje epruveta.



Slika 18. Primjer vaganja epruveta



Zbog manjih dimenzija epruveta, te da bi se ostvario bolji kontakt na - pol (masu), napravljen je poseban držač za epruvete, te je on ujedno poboljšao i odvođenje topline.

Držač je prikazan na slici 19.



Slika 19. Držač epruvete

6.2.1. Castoline 6666 (+ pol)

U ovom dijelu su prikazani uzorci na kojima se vršilo ispitivanje operativnih karakteristika Castolinove 6666 dvostruko oplastene elektrode, zavarivanje se izvodilo istosmjernom strujom (+pol).

Slika 20. prikazuje izgled epruveta nakon zavarivanja Castoline 6666 elektrodom.



Slika 20. Epruvete nakon zavarivanja - Castoline DC(+)

Na slici 20. se može uočiti da je troska sjajna (staklasta), a uzrok tomu je nešto povišen sadržaj silicija u oblozi elektrode. Ovakav izgled troske je karakterističan za elektrode proizvođača Castoline.

Slika 21. prikazuje epruvete nakon čišćenja.



Slika 21. Epruvete nakon čišćenja - Castoline DC(+)

Pore koje su se pojavile na počecima zavora, su posljedica vlažnosti obloge elektroda, tj. potrebe da se obložene elektrode suše iako su bile zapakirane u vakuumskoj vrećici.

Slika 22. prikazuje "čikove" elektroda.



Slika 22. Ostatci Castoline-ovih elektroda nakon zavarivanja - DC(+)



Tablica 6. prikazuj operativne karakteristike pri zavarivanju Castoline 6666 elektrodom.

Tablica 6. Operativne karakteristike pri zavarivanju - Castoline 6666 DC(+)

Operativne karakteristike	Castoline 6666 (+)				
	(A)				
	60	70	80	90	100
Uspostava luka	B	B ⁺	A	A	B
Vođenje luka	B	A	A	A	B
Prisutnost dima	B	B	B	B	C
Odvajanje troske	A	A	A ⁺	B	B ⁻
Poroznost	A				
Štrcanje	A	B	A	C	C
Ugorine	A				
Izgled lica zavara	neravnomjeran	valovit	ravnomjeran	ravnomjera	ravnomjeran
Pokrivenost troskom	djelomično	djelomično	kontinuirano po vrhu	kontinuirano po vrhu	kontinuirano po vrhu

Napomena:

- A-dobro,
- B-srednje,
- C-loše



Tablica 7. prikazuje operativne karakteristike Castoline 6666 elektrode.

Tablica 7. Operativne karakteristike elektrode - Castoline 6666 DC (+)

Elektroda	Castoline 6666 (+) (A)				
Struja zavarivanja	60	70	80	90	100
Uzorak	1	2	3	4	5
Masa uzorka prije zavarivanja (g)	291,024	280,438	289,196	294,239	280,953
Masa uzorka nakon zavarivanja (g)	297,526	288,363	297,785	303,288	291,418
Dobivena masa metala zavara (g)	6,502	7,925	8,589	9,049	10,465
Vrijeme zavarivanja (s)	46,1	46,9	44,9	42,1	39,4
Konstanta taljenja elektrode (g/As)	$2,3506 \cdot 10^{-3}$	$2,4139 \cdot 10^{-3}$	$2,3911 \cdot 10^{-3}$	$2,388 \cdot 10^{-3}$	$2,6561 \cdot 10^{-3}$
Učinak elektrode (kg/h)	0,3919	0,4693	0,5313	0,5971	0,7378
Elektroda	13,304 g / 350 mm				
Dužina čika elektrode (mm)	188	150,3	134,6	119,4	78,8
Masa stvarno utrošenog metala jezgre (g)	6,157	7,591	8,187	8,765	10,308
Koeficijent iskorištenja elektrode (%)	105,6	104,4	104,91	103,2	101,5

6.2.2. Castoline 6666 - izmjenična struja

U ovom dijelu su prikazani uzorci na kojima se vršilo ispitivanje operativnih karakteristika Castolinove 6666 dvostruko oplastene elektrode, zavarivanje se izvodilo izmjeničnom strujom.

Slika 23. prikazuje epruvete nakon zavarivanja.



Slika 23. Epruvete nakon zavarivanja - Castoline AC

Slika 24. prikazuje epruvete nakon čišćenja.



Slika 24. Epruvete nakon čišćenja - Castoline AC

Slika 25. prikazuje "čikove" elektroda.



Slika 25. Ostatci Castoline-ovih elektroda nakon zavarivanja izmjeničnom strujom



Tablica 8. prikazuje operativne karakteristike pri zavarivanju.

Tablica 8. Operativne karakteristike pri zavarivanju - Castoline 6666 AC

Operativne karakteristike	Castoline 6666 ($\approx$) (A)				
	60	70	80	90	100
Uspostava luka	C	B ⁻	B ⁺	B	B ⁻
Vođenje luka	B ⁻	B	A	B	B
Prisutnost dima	B ⁺	B ⁺	B ⁺	B ⁺	B
Odvajanje troske	A ⁻	B	B	B ⁻	B ⁻
Poroznost	A				
Štrcanje	A	A ⁻	A ⁻	B	B ⁻
Ugorine	A				
Izgled lica zavara	jednolik slabo razljevanje	jednolik	jednolik	jednolik dobro razljevanje	jednolik dobro razljevanje
Pokrivenost troskom	djelomično	kontinuiranu po vrhu	kontinuiranu po vrhu	kontinuiranu po vrhu	kontinuiranu po vrhu

Napomena:

- A-dobro,
- B-srednje,
- C-loše



Tablica 9. prikazuje operativne karakteristike elektrode.

Tablica 9. Operativne karakteristike elektrode - Castoline 6666 AC

Elektroda	Castoline 6666 ($\approx$) (A)				
Struja zavarivanja	60	70	80	90	100
Uzorak	6	7	8	9	10
Masa uzorka prije zavarivanja (g)	295,162	290,127	295,872	293,963	292,275
Masa uzorka nakon zavarivanja (g)	301,045	296,162	304,044	303,602	303,979
Dobivena masa metala zavara (g)	5,883	6,035	8,172	9,639	11,704
Vrijeme zavarivanja (s)	44,1	44,3	48,1	49,9	48,8
Konstanta taljenja elektrode (g/As)	$2,2233 \cdot 10^{-3}$	$1,9461 \cdot 10^{-3}$	$2,1237 \cdot 10^{-3}$	$2,1463 \cdot 10^{-3}$	$2,3983 \cdot 10^{-3}$
Učinak elektrode (kg/h)	0,3705	0,3784	0,4719	0,5365	0,6662
Elektroda	13,304 g / 350 mm				
Dužina čika elektrode (mm)	205	192	142,6	107,5	59,4
Masa stvarno utrošenog metala jezgre (g)	5,511	6,006	7,883	9,217	11,046
Koeficijent iskorištenja elektrode (%)	106,7	100,4	103,6	104,5	105,9

6.2.3. BÖHLER FOX EV 50

U ovom dijelu su prikazani uzorci na kojima se vršilo ispitivanje operativnih karakteristika BÖHLER FOX EV 50 bazične elektrode, zavarivanje se izvodilo istosmjernom strujom (+pol).

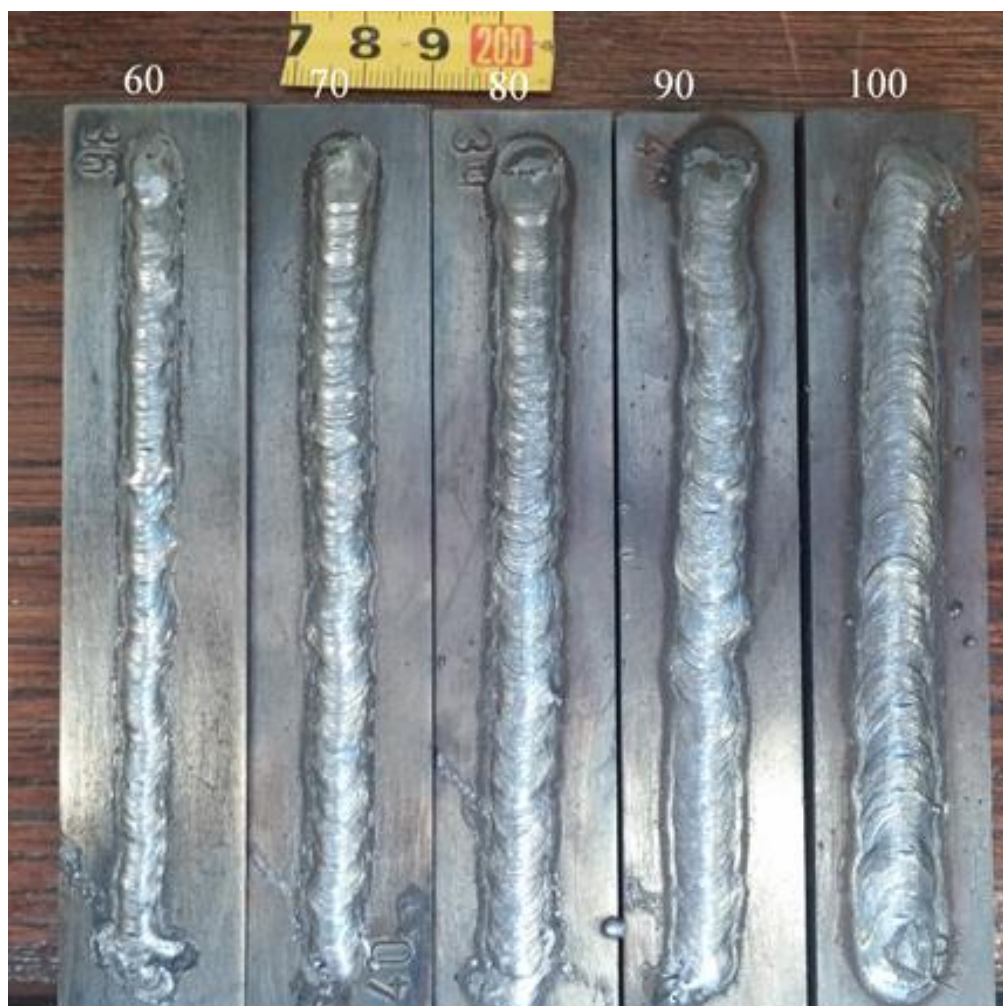
Slika 26. prikazuje epruvete nakon zavarivanja.



Slika 26. Epruvete nakon zavarivanja - BÖHLER FOX EV 50

Na slici 26. se može uočiti razlika u vrsti troske nastale na površini zavora u odnosu na Castoline-ove elektrode. Troska u najvećem dijelu nastaje iz obloge elektrode, te se može uočiti da ova elektroda daje matt izgled površine troske.

Slika 27. prikazuje epruvete nakon čišćenja.



Slika 27. Epruvete nakon čišćenja - BÖHLER FOX EV 50

Slika 28. prikazuje "čikove" elektroda.



Slika 28. Ostatci BÖHLER FOX EV 50 elektrode nakon zavarivanja



Tablica 10. prikazuje operativne karakteristike pri zavarivanju.

Tablica 10. Operativne karakteristike pri zavarivanju - BÖHLER FOX EV 50

Operativne karakteristike	BÖHLER FOX EV 50 (+)				
	(A)				
	60	70	80	90	100
Uspostava luka	B ⁺	B	B	A	A ⁺
Vođenje luka	B ⁺	A	A	A	A
Prisutnost dima	B	B	B	B	B ⁻
Odvajanje troske	A ⁺	A ⁺	A	A	A ⁻
Poroznost	A				
Štrcanje	A	A ⁻	A	A	B ⁺
Ugorine	A				
Izgled lica zavora	neravnomjerno	ravnomjerno	ravnomjerno, glatko	ravnomjerno, glatko	ravnomjerno
Pokrivenost troskom	cijeli zavar pokriven, djelomično popucan	kontinuirano, odvaja se sama	kontinuirano, odvaja se sama	kontinuirano, odvaja se sama	kontinuirano, odvaja se sama

Napomena:

- A-dobro,
- B-srednje,
- C-loše



Tablica 11. prikazuje operativne karakteristike elektroda.

Tablica 11. Operativne karakteristike elektrode - BÖHLER FOX EV 50

Elektroda	BÖHLER FOX EV 50 (+) (A)				
Struja zavarivanja	60	70	80	90	100
Uzorak	11	12	13	14	15
Masa uzorka prije zavarivanja (g)	319,108	302,179	302,023	305,121	304,013
Masa uzorka nakon zavarivanja (g)	325,083	309,406	310,428	313,259	313,904
Dobivena masa metala zavara (g)	5,975	7,227	8,405	8,138	9,891
Vrijeme zavarivanja (s)	39,5	43	43,4	38	44,5
Konstanta taljenja elektrode (g/As)	$2,5211 \cdot 10^{-3}$	$2,4011 \cdot 10^{-3}$	$2,4208 \cdot 10^{-3}$	$2,3795 \cdot 10^{-3}$	$2,2227 \cdot 10^{-3}$
Učinak elektrode (kg/h)	0,4201	0,4668	0,5379	0,5948	0,6174
Elektroda	13,059 g / 350 mm				
Dužina čika elektrode (mm)	209	176,5	152,5	151	113,9
Masa stvarno utrošenog metala jezgre (g)	5,261	6,473	7,369	7,424	8,809
Koeficijent iskorištenja elektrode (%)	113,5	111,6	114	109,6	112,3



6.3. Analiza operativnih karakteristika

Ispitivanje operativnih karakteristika se provelo za elektrode prikazane u tablici 12.

Tablica 12. Podijela elektroda

Elektroda	Vrsta elektrode	Struja
Castoline 6666	dvostruko opláštena bazična	istosmjerna (+ pol)
		izmjenična
BÖHLER FOX EV 50	bazična	istosmjerna (+ pol)

Analizom rezultata dobivenih ispitivanjem operativnih karakteristika može se doći do sljedećih zaključaka:

- Uspostava luka je lakša pri većoj struji, isto tako, luk se lakše uspostavlja pri istosmjernoj nego pri izmjeničnoj struji.
- Vođenje luka je lakše pri istosmjernoj nego pri izmjeničnoj struji, ali razlike između vođenja električnog luka nisu toliko značajne kao pri uspostavi. Kod vođenja električnog luka treba paziti da razmak između elektrode i radnog komada tijekom zavarivanja uvijek bude pola debljine ($d/2$) promjera elektrode kako bi se ostvarilo najbolje vođenje električnog luka i kontrola taline.
- Do prekidanja električnog luka je došlo na visini od 8 do 12 mm udaljenosti elektrode od radnog komada, u proporcionalnoj ovisnosti o struji zavarivanja.
- Tijekom zavarivanja iz obloge se stvaraju dimni plinovi, čije se prisustvo neznatno povećava s povećanjem struje zavarivanja.
- Troska nastala pri procesu zavarivanja se lakše uklanja pri istosmjernoj struji, ali i pri nižoj jakosti struje. Troska nastala od bazične Böhler-ove elektrode se lakše uklanja od troske nastale od dvostruko obložene bazične elektrode Castoline. Nakon procesa zavarivanja na pojedinim epruvetama zavarenim Böhler-ovom elektrodom došlo je do samostalnog odvajanja troske s lica zavara, dok je troska nastala zavarivanjem Castoline-ovom elektrodom ostala kompaktna na licu zavara te se vrlo lako i jednostavno uklanjala zavarivačkim čekićem. Važno je napomenuti da se skidanje troske s lica zavara znatno otežava ako se zavar nalazi u korijenu ili popuni, za razliku od zavara koji je izveden u završnom prolazu, ili prilikom navarivanja.



- Lice zavora je za sve parametre koje propisuje proizvođač elektroda bilo pokriveno troskom, djelomično pokrivanje se pojavilo samo u slučaju snižene struje.
- Niti na jednoj epruveti nije došlo do pojave ugorina, te se može zaključiti da struja zavarivanja ni u jednom slučaju nije bila dovoljno jaka da se stvore ugorine.
- Niti na jednom uzorku se nisu pojavile pore i poroznost usljed procesa zavarivanja. Sitne poroznosti su se javile na nekoliko epruveta u samom početku zavarivanja zbog neadekvatnog obaveznog sušenja bazičnih elektroda prije početka procesa zavarivanja.
- Izgled lica zavora je zadovoljavajuć za parametre koje propisuje proizvođač elektroda. Pri zavarivanju sa strujama slabijim od propisanih moguća je pojava neravnomjernog izgleda lica zavora. Pri nižim strujama se postiže uži zavar, a pri povišenim se dobiva bolje razljevanje metala zavora.
- Pri zavarivanju izmjeničnom strujom dobija se nešto uži zavar, te veće nadvišenje, te manje razljevanje metala zavora, za iste parametre kao kod istosmjerne struje.
- Tijekom procesa zavarivanja metalna jezgra je uvijek brže izgarala od obloge.

Na temelju sljedećih zaključaka vidljivo je da obje elektrode zadovoljavaju sva ispitivanja operativnih karakteristika za jakosti struje koje propisuje proizvođač.

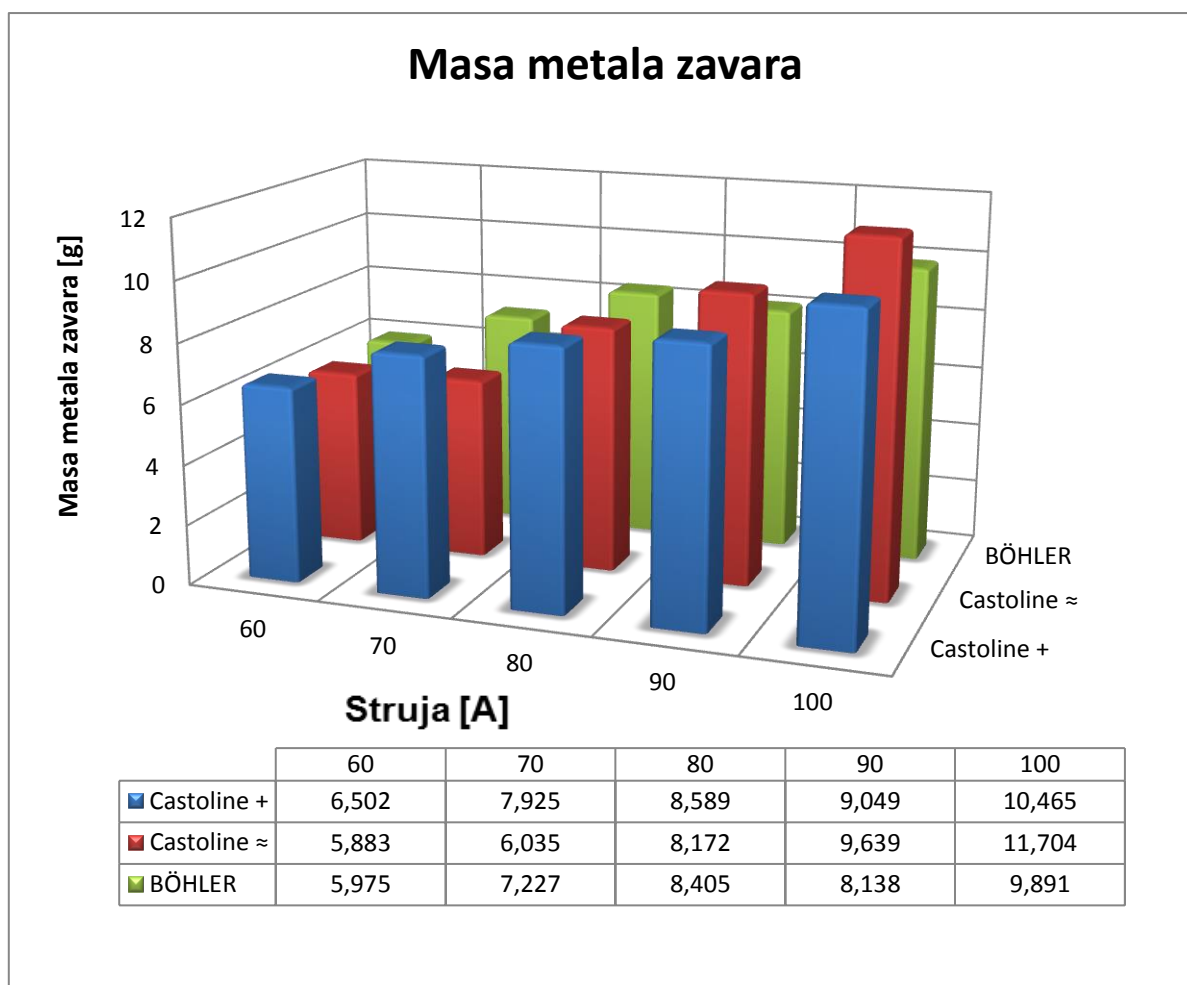
Dvostruko opláštena bazična elektroda proizvođača Castoline je namjenjena za zavarivanje u prisilnim položajima. Njene operativne karakteristike pri zavarivanju na izmjeničnoj struji olakšavaju zavarivanje korijena, te zavarivanje u nadglavnom položaju. Zavarivanje izmjeničnom strujom olakšava kontrolu taline, te daje uži zavar koji je pogodniji za zavarivanje korijena. Manje razljevanje olakšava rad u prislinim i nadglavnim položajima. Zavarivanje Castoline-ovom dvostruko opláštenom bazičnom elektrodom s istosmjernom strujom je namjenjeno za zavarivanje popune i završnog prolaza te njeno bolje razljevanje osigurava pravilan izgled lica zavora.

Böhler-ova bazična elektroda zadovoljava sve operativne karakteristike u horizontalnom položaju zavarivanja te može konkurirati Castoline-ovoj elektrodi, ali je važno napomenuti da Castoline-ova elektroda ima prednost prilikom zavarivanja u prislinim položajima, te isto tako prilikom zavarivanja korijena.



Tablica 13. prikazuje dobivenu masu metala zavora.

Tablica 13. Analiza mase metala zavora



Iz dijagrama dobivenog analizom mase metala zavora može se uočiti povećanje u masi nataljenog metala zavora s povećanjem struje zavarivanja. Castoline-ovom elektrodom je dobiveno više nataljenog metala zavora u odnosu na Böhler-ovu.



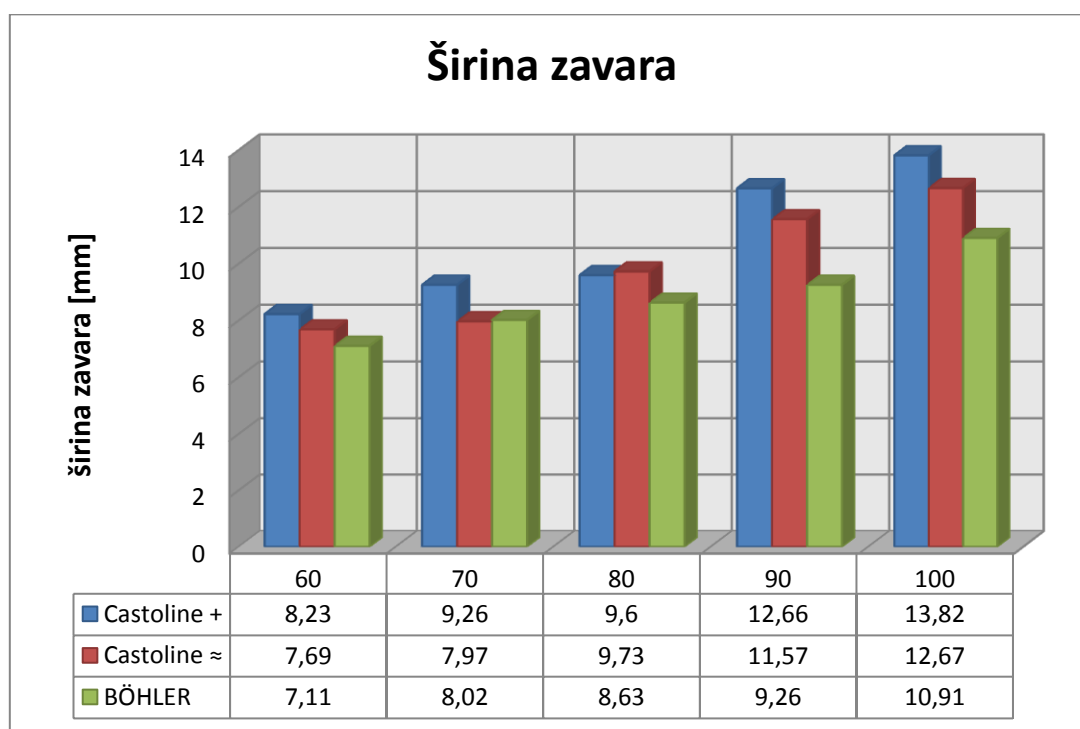
Tablica 15. prikazuje ovisnost širine lica zavora o struji zavarivanja.

Za točniji rezultat mjerenja, širina svake epruvete je mjerena na tri slučajno odabrana mjesta, te je uzeta srednja vrijednost. Pri mjerenjima se nije uzimala širina na početku i kraju zavora. Rezultati mjerenja su prikazani u tablici 14.

Tablica 14. Srednja vrijednost širine zavora

	60	70	80	90	100
Castoline DC(+)	8,37	9,6	9,6	12,46	13,89
	8,57	8,99	9,6	12,66	15,11
	7,76	9,19	9,6	12,87	12,46
Srednja vrijednost- $\bar{x}$	8,23	9,26	9,6	12,66	13,82
Castoline AC	7,96	7,56	8,78	11,44	11,64
	7,35	8,17	10,62	11,84	13,9
	7,76	8,17	9,8	11,44	12,46
Srednja vrijednost- $\bar{x}$	7,69	7,97	9,73	11,57	12,67
BÖHLER	7,9	7,42	7,81	8,66	10,09
	6,19	9,04	8,68	9,61	11,04
	7,23	7,61	9,42	9,52	11,61
Srednja vrijednost- $\bar{x}$	7,11	8,02	8,63	9,26	10,91

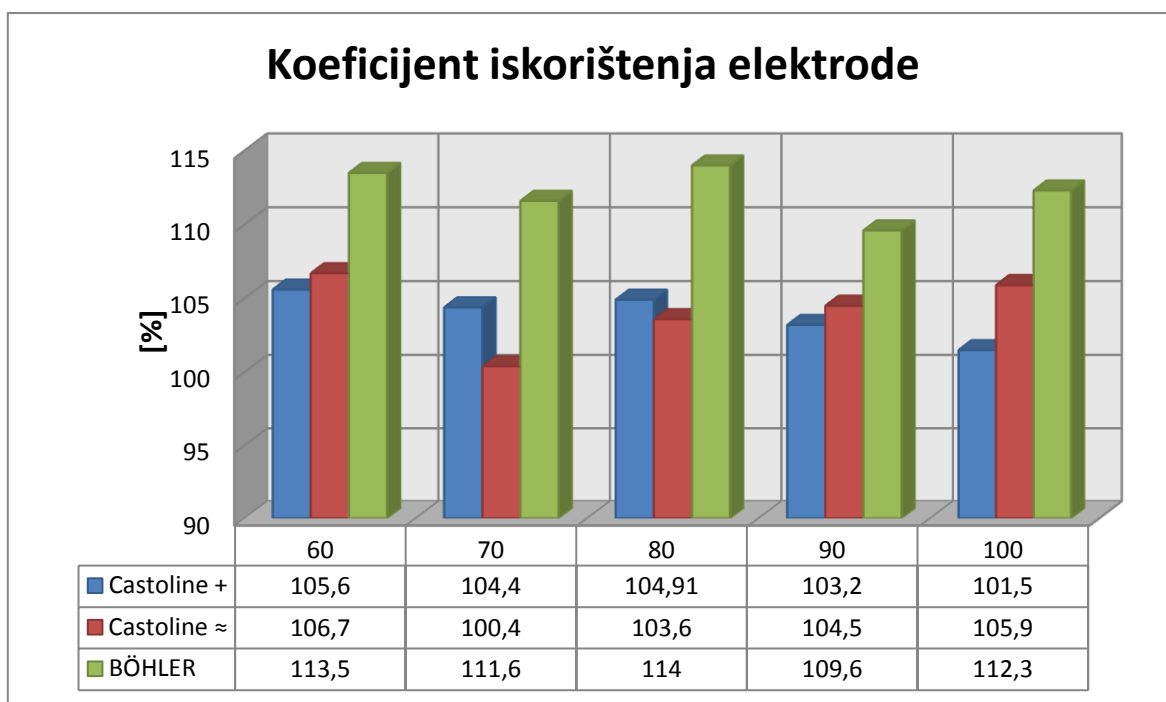
Tablica 15. Analiza širine zavora



Iz analize širine zavora je vidljivo da Castolinova elektroda ima veću širinu zavora od BÖHLER-ove elektrode. Moguće je uočiti da se pri istosmjernoj struji metal zavora bolje razlijeva i stvara veću širinu zavora uz iste parametre kao i pri izmjeničnoj struji.

Tablica 16. prikazuje analizu rezultata koeficijenta iskorištenja elektrode.

Tablica 16. Analiza koeficijenta iskorištenja elektrode



Koeficijent iskorištenja elektrode je omjer količina mase istaljenog metala elektrode, i mase stvarno utrošenog metala jezgre izračenog u postotcima. Za računanje stvarno utrošenog metala jezgre elektrode je izmjerena masa po 3 elektrode od obaju proizvođača te je uzeta srednja vrijednost. Mjerenja su prikazana u tablici 17.

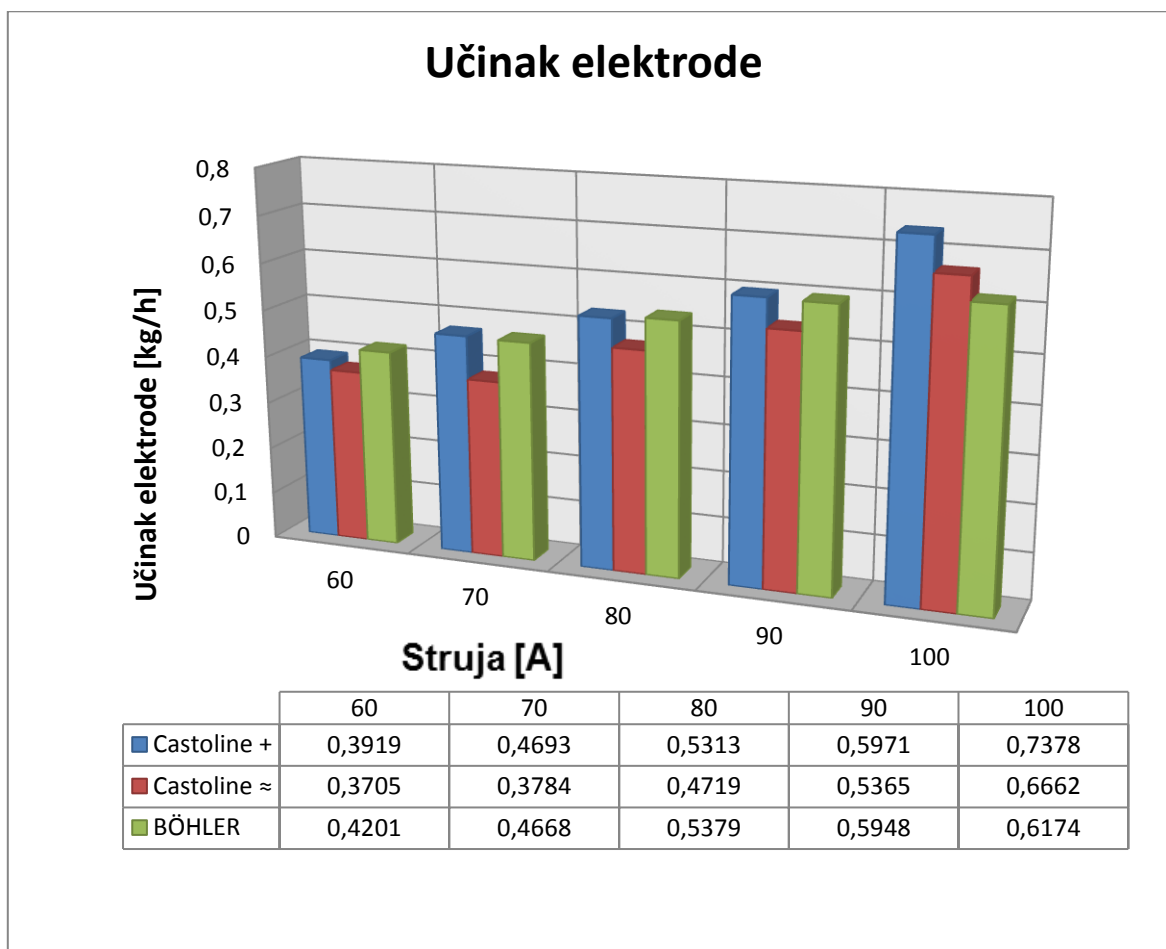
Tablica 17. Masa elektrode

Elektroda	Castoline 6666	BÖHLER FOX EV 50
Masa elektrode (g)	13,4	13,029
	13,392	13,087
	13,121	13,063
aritmetička sredina - $\bar{x}$	13,304	13,059
standardno odstupanje - σ	0,129	0,238

Na osnovu izračunatih podataka je vidljivo da Böhler-ova elektroda ima 10-ak % veći koeficijent iskorištenja elektrode. U svim mjerenjima se pokazalo da je koeficijent iskorištenja elektrode veći od 100%, a razlog tomu je taj što dio količine mase istaljenog metala dolazi iz obloge elektrode.

Tablica 18. pokazuju analizu rezultata učinka elektrode.

Tablica 18. Analiza učinka elektrode



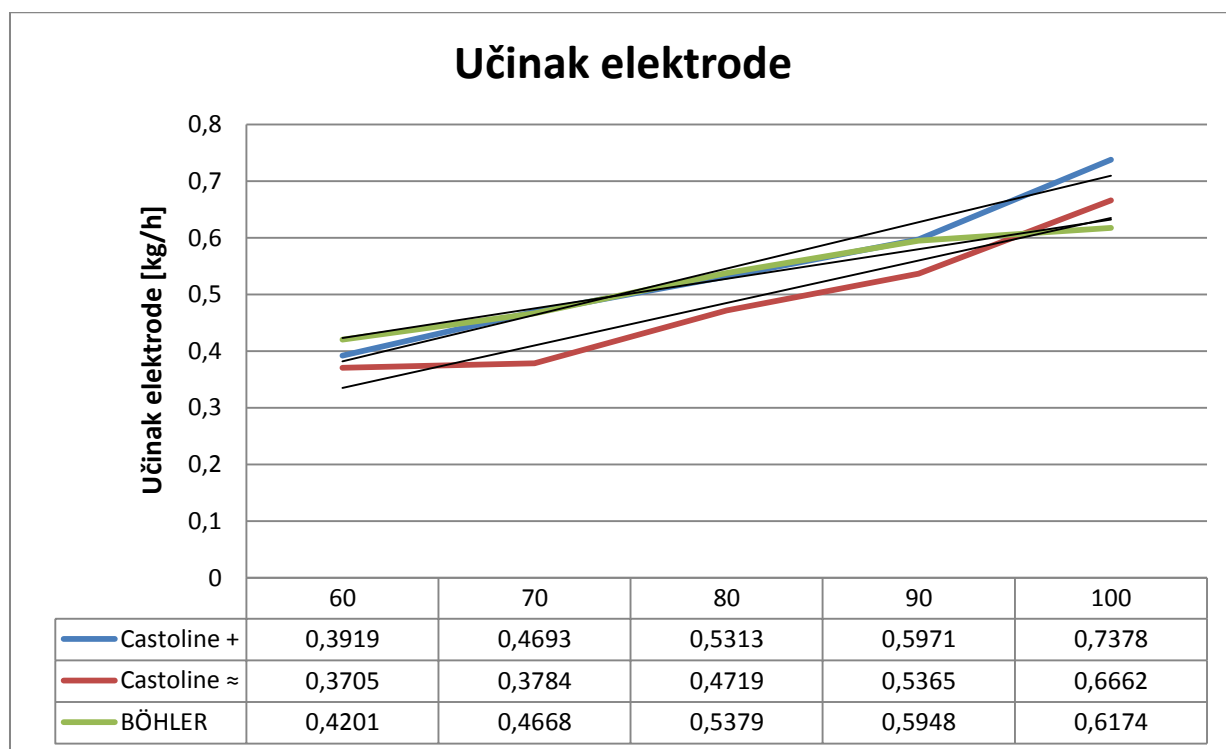
Učinak elektrode je omjer mase istaljenog metala elektrode i vremena zavarivanja.

Govori nam koliko metala zavara možemo nataliti u jednom satu.

Iz grafa je vidljivo da se učinak elektrode povećava sa povećanjem struje zavarivanja. Isto tako je moguće doći do zaključka da se zavarivanjem s istosmjernom strujom postiže bolji učinak elektrode.

Tablica 19. prikazuje matematičku analizu učinka elektrode

Tablica 19. Matematička analiza učinka elektrode

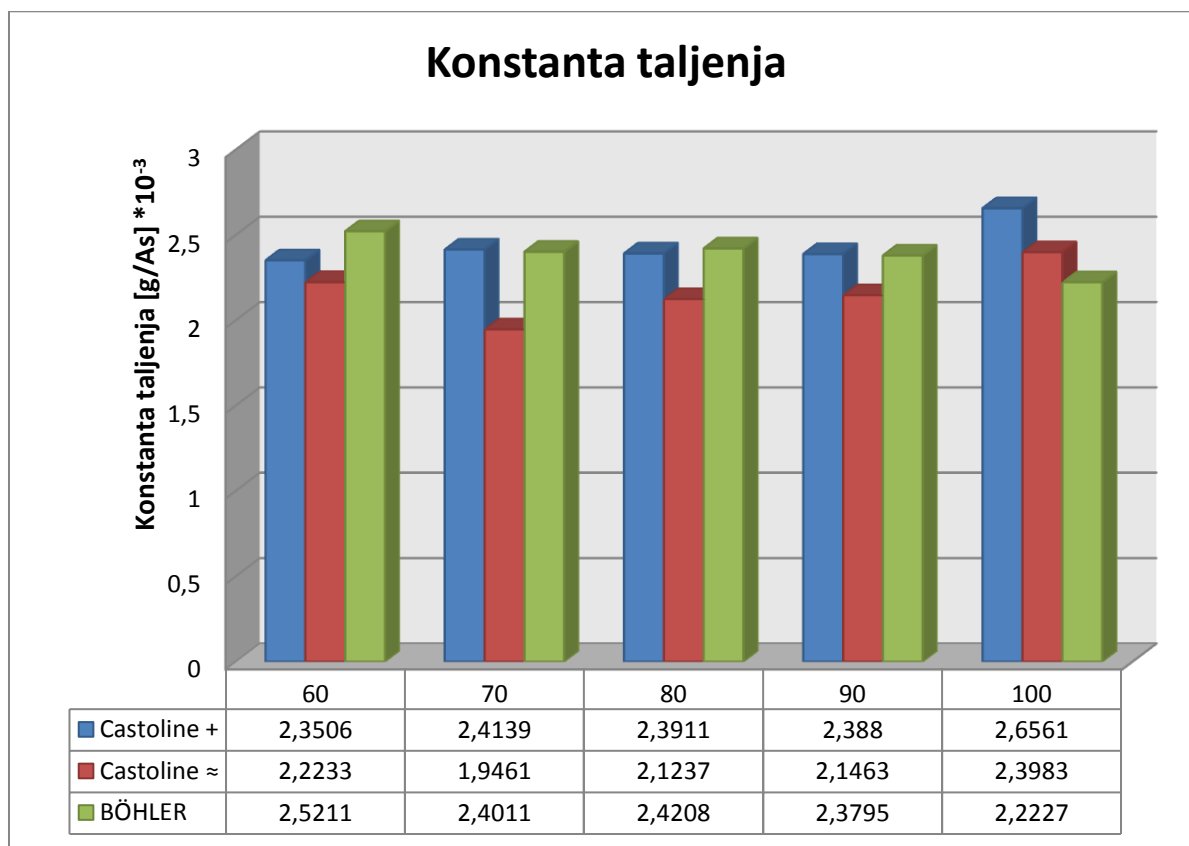


Linearnom aproksimacijom dobivenih rezultata učinka elektrode moguće je doći do jednadžbi za izračun učinka elektrode. Važno je napomenuti da su ovo jednadžbe dobivene na temelju eksperimentalno dobivenih podataka, te da vrijede samo za elektrode korištene u ovom eksperimentu, te neće biti iste za različite poprečne presjeke elektroda.

	Castoline DC (+)	Castoline AC	Bohler
Jednadžba	$y = 0,082x + 0,2996$	$y = 0,0749x + 0,2599$	$y = 0,0523x + 0,3706$
y- učinak elektrode [kg/h] x- struja zavarivanja [A]			

Tablica 20. pokazuje analizu rezultata konstante taljenja elektode.

Tablica 20. Analiza konstante taljenja elektrode



Analizom konstante taljenja se dobiva dijagram vrlo sličan dijagramu učinka neelektrode. Razlika je jedino u tome što uz povećanje struje ne dolazi do povećanja konstante taljenja. Razlog tome je taj što se za izračun konstante taljenja elektrode uz masu istaljenog metala jezgre i vremena zavarivanja uzima u obzir i struja zavarivanja.

Iz podataka dobivenih u dijagramu moguće je zaključiti da je konstanta taljenja elektrode približno jednaka pri svim jakostima struje. Elektrode zavarene istosmjernom strujom posjeduju neznatno veći koeficijent taljenja elektrode.



6.4. Mehanička ispitivanja zavara dobivenih korištenjem Castoline 6666 elektrode

Za potrebe ispitivanja mehaničkih karakteristika Castoline-ove elektrode zavarene su dvije ploče čelika S235 debljine 10 mm. Jedna ploča je zavarena istosmjernom strujom gdje je elektroda bila spojena na + pol, a druga ploča je zavarena izmjeničnom strujom.

U ovom dijelu prikazan je tijek procesa zavarivanja, specifikacija postupka zavarivanja, priprema uzoraka za ispitivanje, te samo ispitivanje i krajnje rezultate mehaničkih ispitivanja.

Ploče korištene u eksperimentu su dimenzija 250x150x10 mm.

Ploče je prije početka postupka zavarivanja trebalo pripremiti prema uputama iz norme HRN EN ISO 9692-1-2004. Prema uputama iz norme rubovi ploča su pripremljeni tako da je otvor između njih bio pod kutem od 60° , vrat korijena je bilo 1 mm, a razmak između ploča je bio postavljen sa jedne strane na 2.5 mm, što je jednako jednoj debljini elektrode koja se koristila u postupku zavarivanja, a na drugoj strani je ostavljen razmak od 3.2 mm kako bi se kompenziralo skupljanje ploča prilikom procesa zavarivanja.

6.4.1. Specifikacija postupka zavarivanja

Mjesto: FSB, Zagreb

Postupak zavarivanja

Oznaka uputstva za zavarivanje (WPS): 06/2015-1

Broj izvještaja o odobrenju postupka (WPAR):

Poduzeće:

Ime zavarivača:

Postupak zavarivanja: 111-REL

Vrsta spoja: Sučeljeni spoj

Pojedinosti pripreme rubova: Jednostrani V spoj

Ispitno mjesto: FSB, Zagreb

Način pripreme rubova i čišćenja: plinsko rezanje, glodanje, odmašćivanje i čišćenje

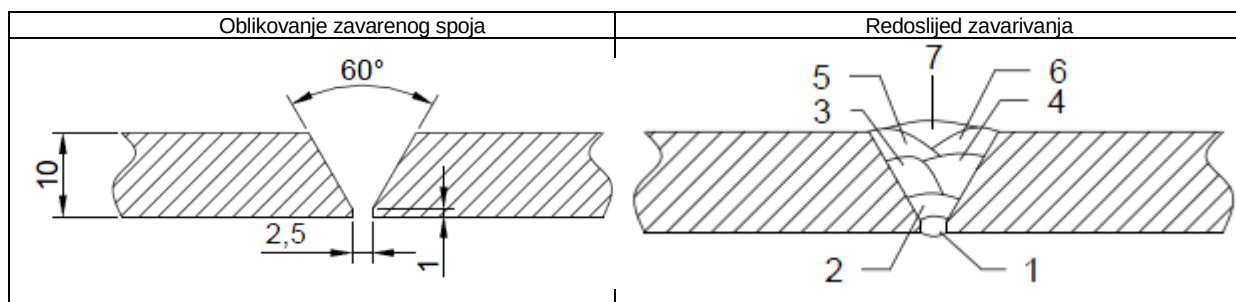
Specifikacija osnovnog materijala:

HRN EN 15608: Grupa 2.1

Debljina osnovnog materijala: 10mm

Veličina ploče: 300x150x10 mm

Položaj zavarivanja: PA



Pojedinosti postupka zavarivanja

Sloj	Postupak zavarivanja	Promjer dodatnog materijala [mm]	Jakost struje zavarivanja [A]	Napon zavarivanja [V]	Vrsta struje, polaritet		Brzina dodavanja žice [m/min]	Brzina zavarivanja [mm/min]	Unos topline [kJ/mm]
1.	111	2,5	70	20	DC(+)	AC	/	150	0,746
2.-8.	111	2,5	80	21	DC(+)	AC	/	200	0,624

Dodatni materijal:

-vrsta i trgovačko ime:

dvostruko opláštena bazična elektroda
DIN EN ISO 2560-A-E 42 4 B 32

Castoline 6666:

Promjer: 2,5mm

sušenje elektroda: 250 °C/120min

Temperatura predgrijavanja: -

Međuslojna temperatura: -

Toplinska obrada: -

Temperatura, vrijeme držanja, postupak: -

Brzina grijanja i hlađenja: -

Dodatne informacije:

1. Sučeljeni spoj izvesti prema normi HRN EN ISO 9692-1-2004.

2. Između prolaza, i nakon zavarivanja, zavareni spoj očistiti od troske.

3. Udaljenost elektrode od radnog komada na pola dužine promjera elektrode ($d/2 = 2,5/2 = 1,25$ mm)

Izradio:

Tomislav Pikelj

Datum/Potpis:

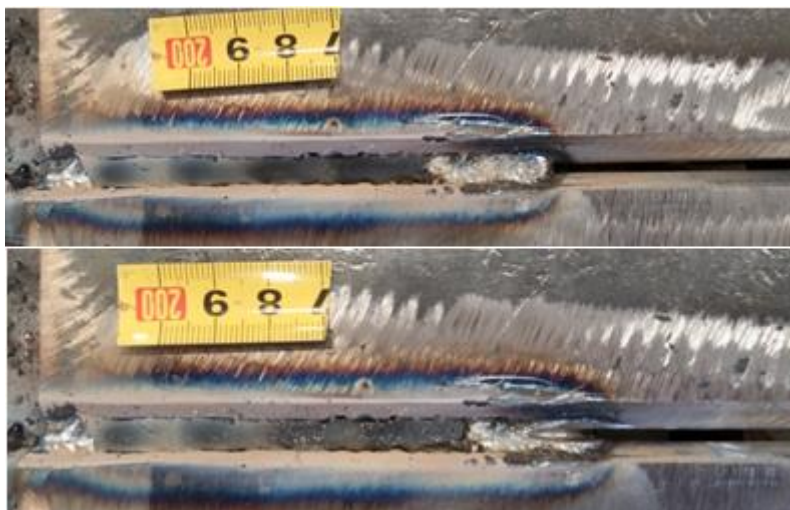
Ispitno mjesto: FSB, Zagreb

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Datum/Potpis:

6.4.2. Tijek zavarivanja i izrezivanje epruveta za mehanička ispitivanja

U ovom dijelu je moguće vidjeti tijek zavarivanja Castoline-ovom elektrodom. Tijek zavarivanja uključuje zavarivanje korijena, popune, završnog sloja, te izgled zavara nakon čišćenja troske. Slika 29. prikazuje zavarivanje korijena.



Slika 29. Zavarivanje korijena

Prilikom zavarivanja korijena, u nastavku zavarivanja korijena novom elektrodom, kraj zavara treba pobrusiti kako bi se ostvarila lakša uspostava novog luka, te kako bi korijen bio u potpunosti protaljen. Slika 30. prikazuje potpuni zavar korijena.



Slika 30. Potpuni zavar korijena

Slika 31. prikazuje zavarivanje međuprolaza.



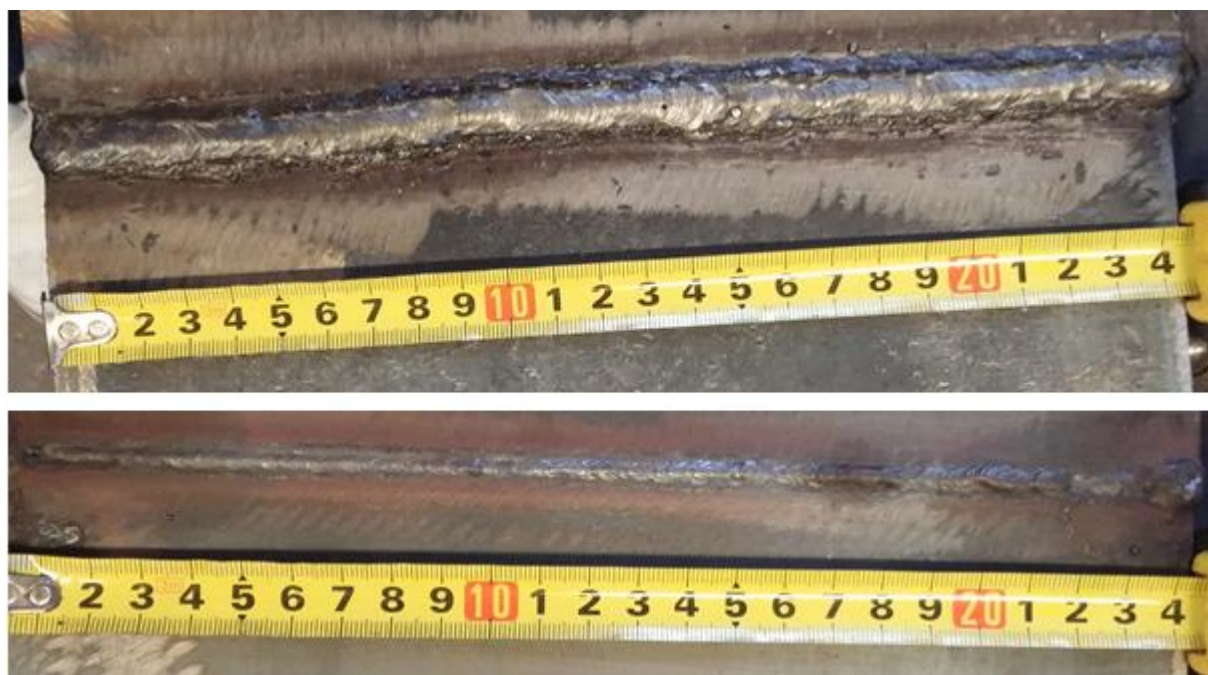
Slika 31. Zavarivanje međuprolaza

Slika 32. prikazuje lice i korijena zavora, zavaren istosmjernom strujom.



Slika 32. Lice i korijen zavora - DC (+)

Slika 33. prikazuje lice i korijen zavora, zavaren izmjeničnom strujom.



Slika 33. Lice i korijen zavora - AC

Nakon zavarivanja, ploče su plinski izrezane kako bi se napravile epruvete za mehanička ispitivanja.

Iz svake ploče je izrezano 6 epruveta.

- 4 epruvete za ispitivanje zavora na savijanje, 2 epruvete za ispitivanje lica, 2 za ispitivanje korijena zavora
- 1 epruveta za statički vlačni test
- 1 epruveta iz koje se naknadno izrezivao makro izbrusak

Na slici 34. je prikazana priprema i označavanje ploča za plinsko rezanje.



Slika 34. Označavanje i priprema ploča za plinsko rezanje

Na slici 35. je prikazano plinsko izrezivanje epruveta.



Slika 35. Plinsko izrezivanje epruveta

Prilikom izvođenja plinskog rezanja na ploču je zavaren nosač koji je držao ploču tijekom postupka rezanja, te je olakšao poravnanje ploče koje je važno kako bi se u konačnici dobio ravan i pravilan rez.

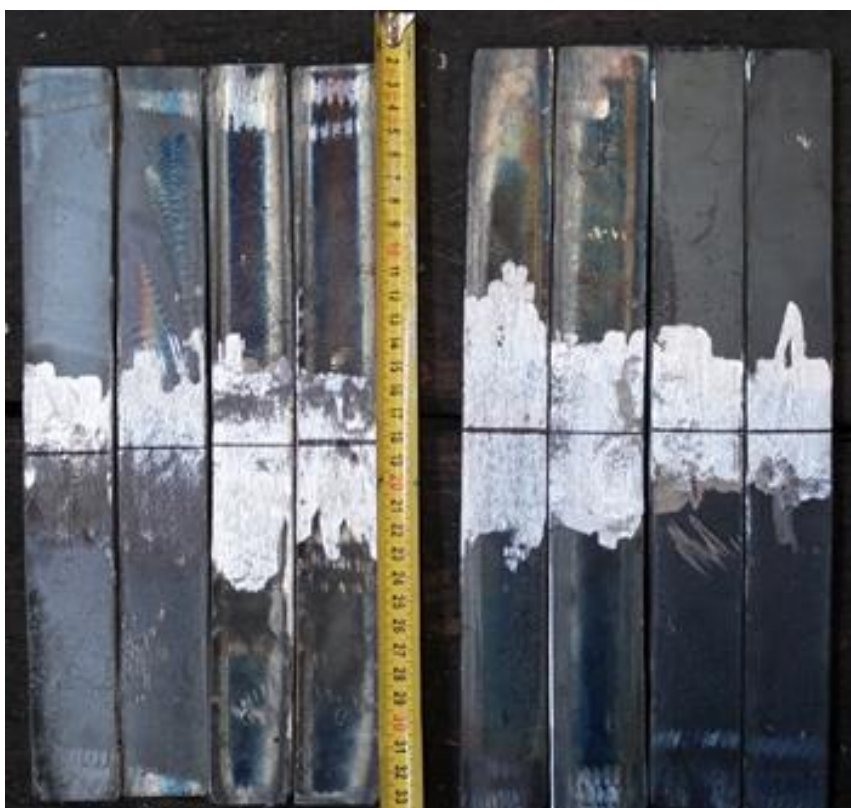
Nakon rezanja sa svake strane ploče se odbacilo 10 mm, kako bi se izbjegle greške koje se mogu pojaviti pri uspostavi i gašenju električnog luka.

Nakon što su epruvete izrezane, svaka epruveta je išla na naknadnu mehaničku obradu, potrebnu za daljnja ispitivanja.

6.4.3. Ispitivanje savijanjem

Ispitivanje savijanjem se provodi kako bi se utvrdio maksimalni kut pri kojem dolazi do pojave pukotina u zavarenom spoju. Dimenzije epruveta za savijanje su napravljene prema uputama iz norme BS EN ISO 5173-2010-A1-2011 te su dimenzija 300x40x10 mm. Epruvete za savijanje su se prije mehaničkog ispitivanja morale pobrusiti, tako da se ukloni nadvišenje lica i korijena zavora. Sve epruvete su pobrušene u istom smjeru.

Izgled epruveta pripremljenih za ispitivanje savijanjem je prikazan na slici 36.



Slika 36. Pripremljeni uzorci za savijanje

Važni parametri pri postupku mehaničkog ispitivanja savijanjem su promjer trna, te razmak između valjaka.

- Promjer trna: 40 mm.
- Razmak između valjaka: 60 mm.

Slika 37. prikazuje postupak mehaničkog ispitivanja savijanjem.



Slika 37. Postupak ispitivanja savijanjem

Rezultati mehaničkih ispitivanja su prikazani na slikama 38. i 39.



Slika 38. Rezultat ispitivanja savijanjem - DC (+)



Slika 39. Rezultat ispitivanja savijanjem - AC

Sve epruvete podvrgnute ispitivanju savijanjem su izdržale savijanje do maksimalnog kuta savijanja od 180° . Na jednoj epruveti koja je zavarena izimjениčnom strujom se pojavila pukotina u korijenu zavarivanja u dužini od 2,5 mm, na ostalim epruvetama nije došlo do pojave pukotina. Pukotina se pojavila zbog nedovoljno provarenog korijena. Može se zaključiti da su epruvete zadovoljile mehaničko ispitivanje savijanjem.

6.4.4. Makroanaliza

Za analizu makro izbruska se iz svake ploče izrezala po jedna epruveta. Iz epruvete se izrezao mali uzorak dimenzija 40x20x10 mm, tako da metal zavara bude u sredini uzorka.

Nakon što su uzorci za makro izbruske izrezani, potrebno ih je bilo postepeno izbrusti sa finim papirom do gradacije 4000.

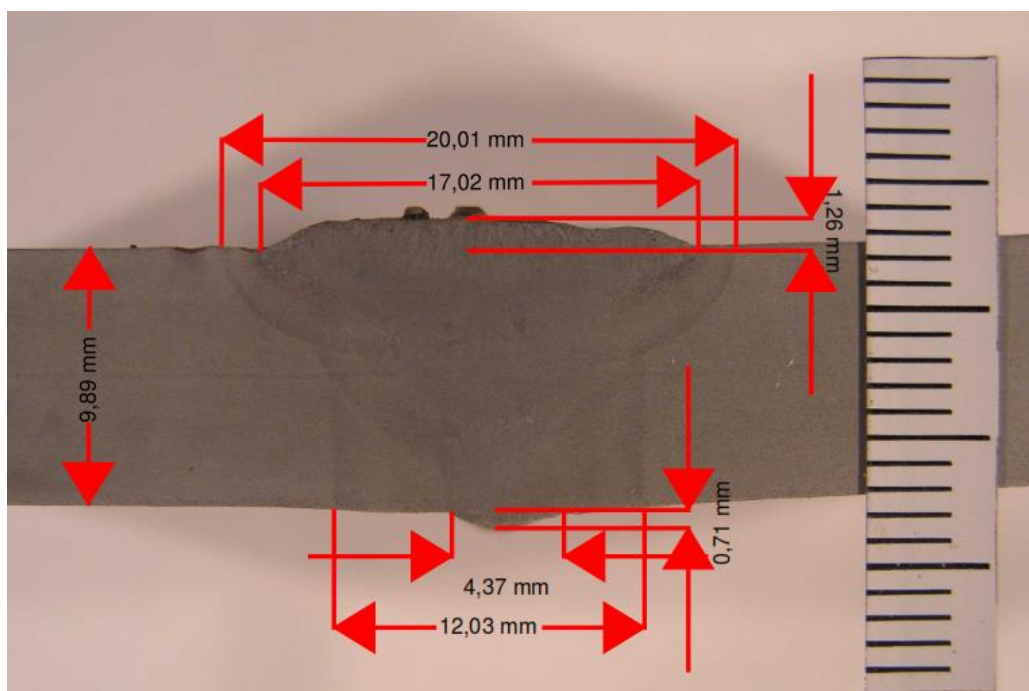
Slika 40. prikazuje fino brušene makro uzorke.



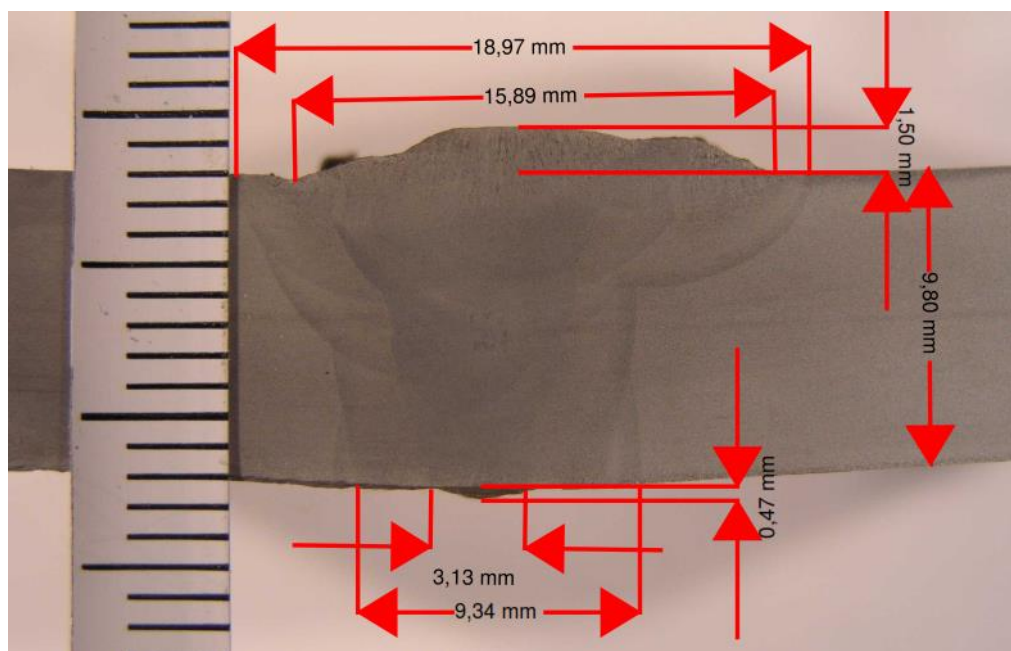
Slika 40. Fino brušeni makro uzorci

Nakon finog brušenja uzorci su uronjeni u 4%-tnu Nitalovu otopinu. Nital je smjesa dušične kiseline i etanola, nagrizanje se zbog isparavanja mora vršiti u dobro ventiliranoj prostoriji. Vrijeme nagrizanja uzoraka je 15 s. Predugo vrijeme nagrizanja ne bi poboljšalo odziv na makro izbrusku, te bi uzorak pocrnio. Važno je da se uzorci nakon nagrizanja isperu s destiliranom vodom.

Slike 41. i 42. prikazuju mjere dimenzija zavara.



Slika 41. Makro izbrusak - DC (+)



Slika 42. Makro izbrusak - AC

Na temelju makro izbrusaka može se zaključiti da se izmjeničnom strujom postiže uži zavar, uža zona utjecaja topline, te veće nadvišenje zavora.

6.4.5. Statičko vlačno ispitivanje

Statički vlačni pokus proveden je u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Statički vlačni pokus proveden je na statičkoj kidalici WPM EU40mod maksimalne sile ($F_{\max}$) 400 kN. Kidalica je spojena sa računalom na kojem se pomoću softvera TIRAtest System analiziraju dobivene vrijednosti.

Slika 43. prikazuje statičku kidalicu.



Slika 43. Statička kidalica WPM EU40mod

Dimenzije epruveta određene su prema normi HRN EN 895. Za potrebe ispitivanja, na epruveti su pobrušena sva nadvišenja zavara, te je glodanjem obrađena na željene mjere. Epruveta je širine 37 mm sa suženjem vrata od 25 mm i prijelaznim radijusom 25 mm. Dužina epruvete iznosi 300 mm, a dužina vrata epruvete 110 mm. Sljedeća slika prikazuje epruvete za statički vlačni pokus.

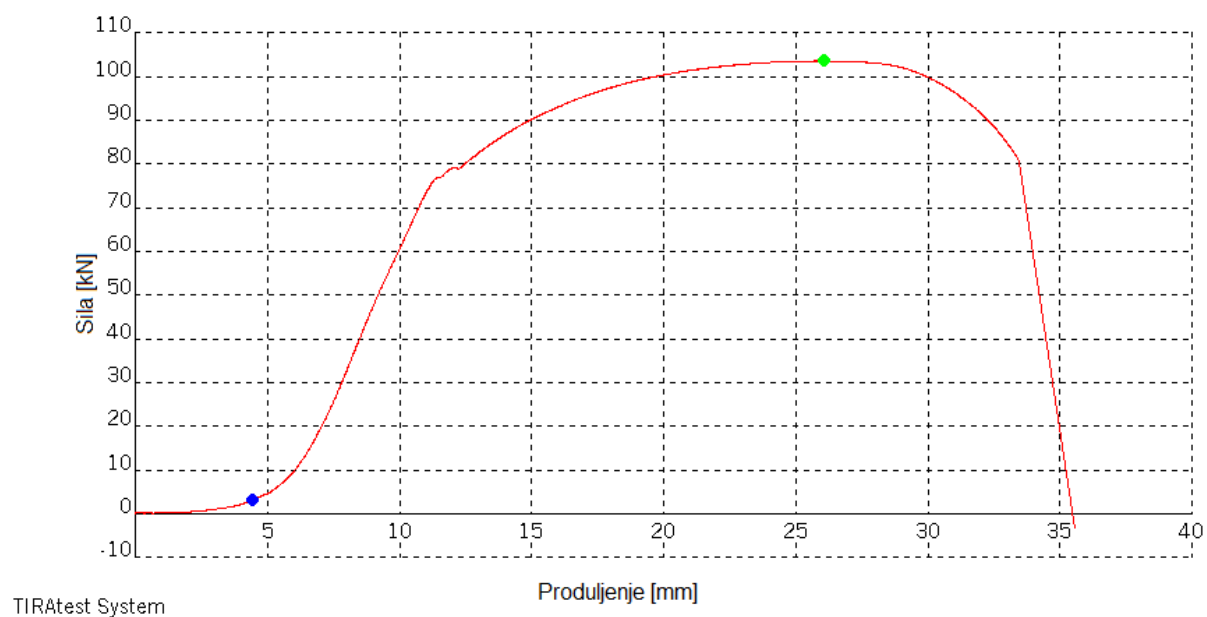
Slika 44. prikazuje izgled epruveta za statički vlačni pokus.



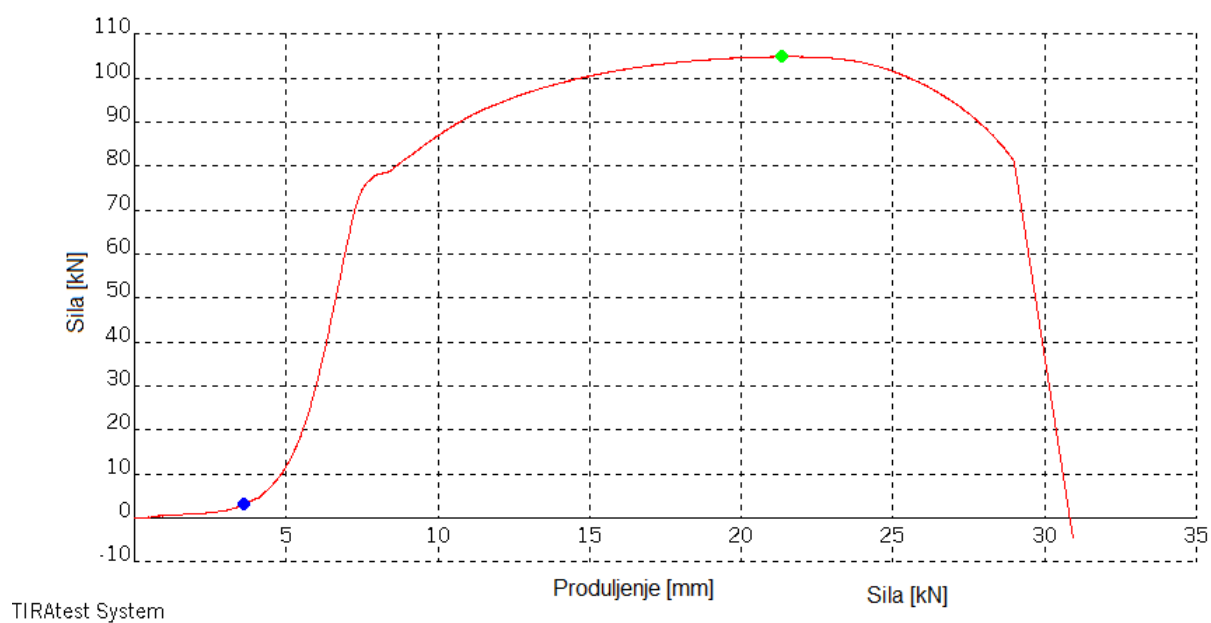
Slika 44. Izgled epruveta za statički vlačni pokus

Ispitivanja su provedena pri brzini razvlačenja od 6 mm/min, pri čemu je mjerena sila u odnosu na produljenje epruvete.

Slike 45. i 46. prikazuju grafički rezultat statičkog vlačnog ispitivanja.



Slika 45. Rezultat statičkog vlačnog pokusa - DC (+)



Slika 46. Rezultat statičkog vlačnog pokusa - AC

Tablica 21. pokazuje veličine izmjenjenih podataka dobivenih statičkim vlačnim pokusom.

Tablica 21. Izmjereni podatci statičkog vlačnog pokusa

Epruveta		DC (+)	AC
Maksimalna sila	F_m [kN]	103,47	104,8
Prekidna sila	F_k [kN]	80,29	81,4
Vlačna čvrstoć	R_m [N/mm ²]	418,8	420,9

Slika 47. prikazuje izgled epruveta nakon statičkog vlačnog pokusa i prikaz prijeloma epruveta.



Slika 47. Izgled epruveta nakon statičkog vlačnog pokusa

Na temelju rezultata statičkog vlačnog pokusa može se doći do zaključka da je do pucanja epruveta došlo u osnovnom materijalu. Vlačna čvrstoća je u okvirima propisanih granica osnovnog materijala. Na temelju toga se može doći do zaključka da je metal zavara u oba slučaja znatno veće vlačne čvrstoće, te da su zavari pravilno izvedeni.



7. Zaključak

U ovom radu su dana objašnjenja glavnih parametara REL zavarivanja, izvora struje, vrste obloženih elektroda za zavarivanje, njihova klasifikacija i označavanje. Prikazano je određivanje bazičnosti elektroda, te su dana osnovna pravila pri izboru i rukovanju elektrodama.

Dana su neka osnovna svojstva dvostruko obloženih elektroda, te područja njihove primjene. Može se doći do zaključka da se razvojem dvostruko obloženih elektroda ostvaruju najveća mehanička svojstva u zavarivanju niskolegiranih i brodograđevnih čelika. To je iznimno važno jer REL zbog svoje jednostavnosti nikada neće biti sasvim istisnut za zavarivanje na terenu i u brodogradilištima, gdje se ova vrsta elektroda posebno upotrebljava za zavarivanje u prisilnim položajima.

U eksperimentalnom dijelu radu su ispitane operativne karakteristike dvostruko oplastene bazične elektrode Castoline 6666, te su uspoređene sa operativnim karakteristikama bazične elektrode BÖHLER FOX EV 50. Na temelju rezultata operativnih karakteristika moguće je doći do zaključka da se masa dobivenog metala zavara približno linearno povećava sa strujom zavarivanja, te isto tako raste i učinak elektrode koji nam govori koliku masu elektrode možemo zavariti u jednom satu, dok je s druge strane konstata taljenja elektrode približno jednaka za obje elektrode koje su zavarivane istosmjernom strujom, nešto manja konstanta taljenja elektrode je pri zavarivanju izmjeničnom strujom. Zavarivanjem dvostruko obloženom elektrodom se dobiva veća širina zavara u odnosu na klasičnu bazičnu elektrodu. Koeficijent iskorištenja u slučaju zavarivanja obaju elektroda je iznad 100%, što znači da se dio mase metala dobiva i iz obloge elektrode, ali klasična bazična elektroda u prosjeku ima 10-ak % veće iskorištenje u odnosu na dvostruko obloženu elektrodu. Kod ispitivanja operativnih karakteristika pozornost se obratila i na uspostavu i vođenje luka, odvajanje i pokrivenost troskom, poroznost i štrcanje. Sve te karakteristike su načelno bolje kod dvostruko obložene elektrode. Vrlo je važno napomenuti da pri zavarivanju bazičnim elektrodama velik utjecaj ima iskustvo, znanje, i sposobnost samog zavarivača.

Castoline 6666 dvostruko oplastena bazična elektroda spada u novu generaciju dodatnih materijala za REL zavarivanje, te posjeduje mnoge prednosti u odnosu na klasične bazične elektrode. Razvijena je ponajprije za zavarivanje u prisilnim položajima, te ima mogućnost



zavarivanja istosmjernom strujom gdje je elektroda priključena na + pol, a isto tako i izmjeničnom strujom. U drugom dijelu eksperimenta su ispitani zavari načinjeni Castoline 6666 dvostruko oplštenom elektrodom. Prvi zavar je zavaren istosmjernom strujom, a drugi izmjeničnom, te se željelo vidjeti da li postoji značajnija razlika u mehaničkim svojstvima zavarenih spojeva. Nakon zavarivanja ploča debljine 10 mm u 7 prolaza, izrezane su epruvete za mehanička ispitivanja. Ispitivanja koja su provedena na zavarenim spojevima su: ispitivanje savijanjem, statički vlačni pokus, te makroanaliza. Na temelju rezultata svih ispitivanja nije se uočila značajnija razlika između mehaničkih karakteristika dvaju zavara, zavarenih sa istosmjernom i izmjeničnom strujom. Prilikom usporednog zavarivanja istosmjernom i izmjeničnom strujom došlo se do zaključaka da je izmjenična struja povoljnija za zavarivanje korijena zavara te za zavarivanje u prisilnim položajima, zato što pruža bolju kontrolu taline, manje razljevanje i veće nadvišenje zavara. Uporabom izmjenične struje pri zavarivanju korijena također se uklanja mogućnost pojave puhanja električnog luka. Zavarivanje istosmjernom strujom je pogodnije za zavarivanje prolaza popune, te završnih prolaza zbog boljeg razlijevanja metala zavara i većeg učinka elektrode.



8. Literatura

- 1) https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/izv_str.html, 2015.
- 2) http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/cz_dipl3/3.1.pdf, 2015.
- 3) D. Vučetić: Energetska elektronika, Pomorski fakultet Rijeka, 2009.
- 4) M. Milotić: Priručnik za zavarivače, Beograd, 2008.
- 5) A. Pavelić: Elektrolučno zavarivanje, Školska knjiga, 1987.
- 6) Grubić - Živčić: REL zavarivanje, Društvo za tehniku zavarivanja Hrvatske, 1990.
- 7) EWE skripta: Izvori struje za zavarivanje, 2008.
- 8) S. Kralj, B. Radošević, Z. Kožuh, I. Garašić: Strojevi i oprema za zavarivanje: Podloge, FSB, 2013.
- 9) http://hr.wikipedia.org/wiki/Ru%C4%8Dno_elektrolu%C4%8Dno_zavarivanje, 2015.
- 10) <http://www.elektroda-zagreb.hr/support/katalog.html>, 2015.
- 11) Kralj, S.; Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1992.
- 12) Lukačević, Z.: Zavarivanje, Strojarski fakultet– Slavonski Brod, Slavonski Brod, 1998.
- 13) G. Jurakić, M. Lovrić: Ručni elektrolučni postupak zavarivanja, Pula 2005.
- 14) B. Juraković: Visokoučinske obložene elektrode za REL zavarivanje, Zagreb, 1996.
- 15) Unitor: Maritime Wleding Handbook, 11th edition, 2015.
- 16) OERLIKON: Double coating SMAW electrodes, 2015.
- 17) <http://www.technolit.de/App/WebObjects/XSeMIPS.woa/cms/page/pid.102.104.193/agid.1.3798.18/lg.en/ecm.ag/TS-88.html>, 2015.
- 18) K. Sharana: Design and development of welding electrode for structural steel, Thapar University, Patiala, 2009.
- 19) I. Datta, M Parekh: Filler Metal Flux Basicity Determination using the Optical Basicity Index, 1989.
- 20) <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/Glavni%20troskovi%20REL%20zavarivanja.pdf>, 2015.
- 21) <http://www.horex.hr/docs/tablica.mehanickih.svojstava.za.limove.i.profile.pdf>, 2015.
- 22) <http://www.castolin.com/sites/default/files/product/downloads/castolin-6666-elektroden-schweissen-zusatzwerkstoffe.pdf>, 2015
- 23) http://www.mestriner.it/easyUp/file/1414_ev_50.pdf, 2015.



- 24) HRN EN ISO 9692-1:2004. - Zavarivanje i srodni postupci - Preporuke za pripremu spoja-1. dio: Ručno elektrolučno zavarivanje, MIG/MAG zavarivanje, plinsko zavarivanje, TIG zavarivanje I zavarivanje elektronskim snopom
- 25) BS EN ISO 5173:2010.+A1:2011. - Destructive tests on welds in metallic materials - Bend test
- 26) BS EN 895:1995. - Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test
- 27) DIN EN 499:1995. : Covered electrodes for manual arc welding of non-alloy and fine grain steels
- 28) BS EN ISO 5817:2007. - Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) - Quality levels for imperfections
- 29) HRN EN ISO 15614-1: Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale - Ispitivanje postupaka zavarivanja - 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelka te elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla