

# Mokro podvodno zavarivanje

---

Ivanek, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni 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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:768899>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-31**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Tomislav Ivanek**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Tomislav Ivanek

Zagreb, 2015.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu na mentorstvu i pomoći pri izradi ovog rada. Posebno se zahvaljujem i asistentu dr. sc. Matiji Bušiću koji mi je svojim praktičnim savjetima pomogao u pisanju ovog rada i izradi eksperimentalnog dijela.

Tomislav Ivanek





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne 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:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **TOMISLAV IVANEK** Mat. br.: 0035184960

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MOKRO PODVODNO ZAVARIVANJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **UNDERWATER WET WELDING**

Opis zadatka:

Proučiti postupke mokrog podvodnog zavarivanja. Opisati opremu za zavarivanje i opremu za zavarivačarionioča. Proučiti područje primjene ovisno o vrsti podvodne konstrukcije i navesti primjere primjene mokrog podvodnog zavarivanja. Ukazati na probleme koji se javljaju pri zavarivanju obzirom na medij u kojem se zavaruje.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je postupkom mokrog podvodnog REL zavarivanja zavariti preklopni spoj. Obzirom na odabrane parametre zavarivanja potrebno je vizualnom kontrolom ocijeniti prihvatljivost izvedenih zavarenih spojeva te odrediti njihovu geometriju.

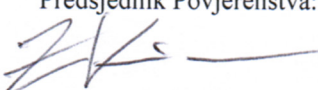
Zadatak zadan:  
17. studenog 2014.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 26. veljače 2015.  
**2. rok:** 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 2., 3., i 4. ožujka 2015.  
**2. rok:** 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	VI
SAŽETAK .....	VII
1. UVOD .....	1
2. MOKRO PODVODNO ZAVARIVANJE .....	3
2.1. Povijesni razvoj .....	3
2.2. Fizikalne osnove mokrog podvodnog zavarivanja .....	5
2.3. Problemi i greške kod mokrog podvodnog zavarivanja .....	9
2.3.1. Brzo hlađenje metala zavara .....	9
2.3.2. Problem zakaljivanja .....	10
2.3.3. Poroznost i krhkost zbog vodika .....	10
2.3.4. Uspostava i održavanje električnog luka .....	12
2.3.5. Smanjena vidljivost kod mokrog podvodnog zavarivanja .....	12
2.3.6. Greške uzrokovane lošom tehnikom rada i pogrešno odabranim parametrima zavarivanja kod mokrog podvodnog zavarivanja .....	13
2.4. Opasnosti podvodnog zavarivanja .....	15
2.5. Oprema kod mokrog podvodnog zavarivanja .....	16
2.5.1. Oprema za zavarivanje .....	16
2.5.1.1. Izvor struje za zavarivanje .....	17
2.5.1.2. Držać elektrode .....	19
2.5.1.3. Dodatni materijali .....	19
2.5.1.4. Zavarivački kabel .....	23
2.5.1.5. Sigurnosni prekidač .....	24
2.5.2. Oprema zavarivača-ronilaca .....	24
2.6. Tehnike rada kod mokrog podvodnog zavarivanja .....	26

---

2.6.1. Tehnika povlačenja .....	26
2.6.2. Tehnika njihanja .....	27
2.6.3. Korak-unatrag tehnika.....	27
2.7. Zavarljivost.....	28
2.8. Pregled ostalih postupka koji se koriste za mokro podvodno zavarivanje .....	29
2.8.1. Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom.....	29
2.8.2. Mokro podvodno zavarivanje trenjem .....	30
2.9. Klasifikacija podvodnih zavara prema AWS D3.6.....	31
2.10. Razvoj i primjena mokrog podvodnog zavarivanja.....	33
3. EKSPERIMENTALNI DIO.....	35
3.1. Vizualna kontrola.....	40
4. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43
PRILOZI.....	45

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori .....	2
Slika 2. Mokro podvodno zavarivanje.....	2
Slika 3. Prva testiranja mokrog podvodnog zavarivanja .....	3
Slika 4. Shematski prikaz REL podvodnog zavarivanja .....	6
Slika 5. Proces mokrog zavarivanja .....	7
Slika 6. Usporedba brzina hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima.....	9
Slika 7. Hladne pukotine uzrokovane vodikom kod mokrog podvodnog zavarivanja.....	12
Slika 8. Ugorina.....	13
Slika 9. Uključine u zavaru.....	13
Slika 10. Nedovoljna penetracija .....	14
Slika 11. Loša geometrija zavara .....	14
Slika 12. Oprema za mokro podvodno zavarivanje .....	16
Slika 13. Izvor struje .....	17
Slika 14. Strmopadajuća karakteristika struje.....	18
Slika 15. Držać elektrode.....	19
Slika 16. Navy 1 i Navy 2 elektrode.....	22
Slika 17. Elektroda Navy 1 i Navy 2 nakon procesa zavarivanja [20].....	23
Slika 18. Presjek zavarivačkog kabla .....	23
Slika 19. Ronilac-zavarivač spreman za rad.....	25
Slika 20. Tehnika povlačenja .....	26
Slika 21. Tehnika njihanja .....	27
Slika 22. Korak-unatrag tehnika.....	28
Slika 23. Shematski prikaz FCAW postupkom .....	29
Slika 24. Shematski prikaz zavarivanja trenjem .....	30
Slika 25. Podvodno zavarivanje trenjem .....	30
Slika 26. Popravak naftne platforme podvodnim zavarivanjem .....	34
Slika 27. Popravak oštećenja na brodu .....	34
Slika 28. Izmjena cinkove anode.....	34
Slika 29. Bazen za mokro podvodno zavarivanje .....	35
Slika 30. Izvor struje.....	36

---

Slika 31. Karakteristike izvora struje .....	37
Slika 32. Lastek elektroda za podvodno REL zavarivanje .....	38
Slika 33. Preklopni spoj pripremljen za podvodno zavarivanje.....	38
Slika 34. Geometrija ploča.....	38
Slika 35. Mokro podvodno REL zavarivanje.....	39
Slika 36. Modularni stereomikroskop Leica MZ6 .....	40
Slika 37. Uzorak 1 .....	41
Slika 38. Uzorak 2 .....	41

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Brzina hlađenja metala zavara ovisno o okolini .....	10
Tablica 2. Kemijski sastav čelika S235JR prema EN 10025-2:2004 .....	36
Tablica 3. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008.....	37

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$t$	s	vrijeme
$v_z$	m/h	brzina zavarivanja
$I$	A	jačina struje
$T$	°C	temperatura
$CE$	%	Ekvivalent ugljika prema IIW

**POPIS KRATICA**

REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
FCAW	Zavarivanje praškom punjenom žicom u plinskoj zaštiti
MIG	Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina
MAG	Zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina
ZUT	Zona utjecaja topline
IIW	International Institute of Welding
AWS	American Welding Society
PWI	Paton Electric Welding Institute

## SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisan je REL postupak mokrog podvodnog zavarivanja. Objasnjene su fizikalne osnove procesa te problemi i greške koji se pojavljuju kod mokrog podvodnog zavarivanja. Detaljno je opisana oprema za zavarivanje i oprema za zavarivača-ronioca te su ukazane opasnosti kojima su izloženi zavarivači-ronioci.

U eksperimentalnom dijelu, koji je izveden u Laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje mokrim podvodnim zavarivanjem REL postupkom zavaren je preklopni spoj iz osnovnog materijala S235JR. Nakon zavarivanja izuzeta su dva uzorka na kojima je određena geometrija zavara te je izveden je vizualni pregled i ocjenjena je prihvatljivost zavarenih spojeva prema normi AWS D3.6M:1999.

Ključne riječi: mokro podvodno zavarivanje, REL



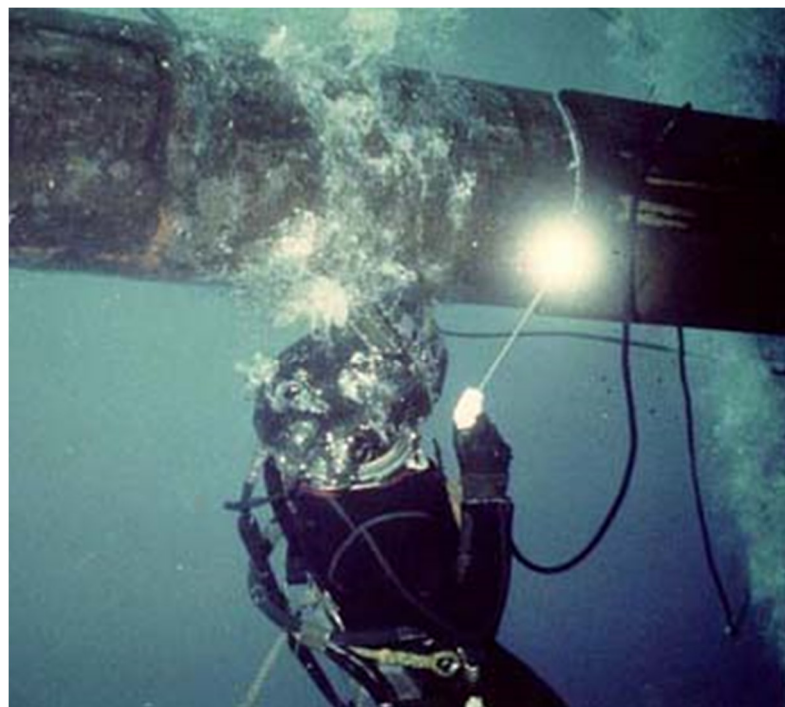
## 1. UVOD

Važnost pomorskih objekata u gospodarstvu jedne regije danas ima nemjerljiv značaj. Bilo da se radi o transportu morskim putem ili eksploataciji podmorja, svjedoci smo ogromnih ulaganja u postojeću infrastrukturu, kao i realizaciju novih projekata. Pomorski transport i intenzivna eksploatacija podmorja podrazumijevaju korištenje objekata, plovila i postrojenja kod kojih je dio konstrukcije ispod vodene linije. Izgradnja i održavanje takvih objekata zahtijeva primjenu posebno razvijenih tehnika, koje osiguravaju dugovječnost i ekonomičnost pri uporabi. Nažalost, iz prakse je poznato da havarije plovila ili postrojenja mogu u potpunosti ili djelomično uništiti floru i faunu prirodnog staništa te smanjiti kvalitetu života na određenom području. Trendovi u svjetskom gospodarstvu ukazuju na porast opsega pomorskog transporta dok stanje u proizvodnji i potrošnji energenata upućuje na sve već opseg istraživanja i eksploatacije podmorja. U svijetu se ulažu ogromna sredstva kako bi se osigurale dovoljne količine energenata, a vrlo velik broj nalazišta nalazi se ispod površine mora i oceana. Tijekom godina, posebice zadnjih nekoliko desetljeća, primjetan je dinamičan razvoj na području održavanja i ispitivanja podmorskih konstrukcija. Nezamjenjivu ulogu u održavanju podvodnih konstrukcija imaju postupci podvodnog zavarivanja [1]. Glavna prednost podvodnog zavarivanja je ekonomske prirode, jer omogućuje zavarivanje ispod površine mora te tako nije potrebno vaditi konstrukcije iz mora čime štedimo dragocjeno vrijeme i novac [2].

Pomorski objekti danas su rasprostranjeni na dubinama od nekoliko metara sve do dubina od 1000 m i dublje, prema tome razvijene su i različite tehnike podvodnog zavarivanja. Kod velikih dubina i visokih zahtjeva kvalitete zavarenih spojeva koriste se suhe tehnike zavarivanja (slika 1), koje se provode u zavarivačkoj komori koja isključuje prisutnost vode. Za dubine do približno 70 m i manje zahtjevnih spojeva, mokre tehnike zavarivanja koje se provode direktno u vodi (slika 2). Podvodno zavarivanje je definitivno najkompleksnija zavarivačka disciplina zbog širokog spektra znanja potrebnog za uspješno obavljanje zadatka. Za proces zavarivanja u krajnje neprirodnom ambijentu, koji je drugačije agregatno stanje od onog u kojem se najčešće koristi nužno je dobro poznavati sve elemente koji u njemu sudjeluju i osiguravaju uspjeh [3].



**Slika 1. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori [4]**



**Slika 2. Mokro podvodno zavarivanje [5]**

## 2. MOKRO PODVODNO ZAVARIVANJE

### 2.1. Povijesni razvoj

Povijesni razvoj podvodnog zavarivanja i rezanja počinje početkom 20 stoljeća. Prvi izvještaji koji spominju primjenu podvodnog «oxy-arc» rezanja potječu iz 1918. godine gdje se opisuju popravci na parnom brodu St. Paul. Dok je podvodno zavarivanje počelo s prvom primjenom 1932. godine, do tada se smatralo samoubojstvom za zavarivača uspostaviti električni luk u vodi. Sve je to promijenio ruski inženjer Konstantin Khrenov koji je otkrio da najveća prepreka uspješnom mokrom zavarivanju leži u nekontroliranom odljevu mjehurića plina s točke dodira metala i električnog luka. Ova reakcija izazvala je nestabilnost električnog luka i veliku poroznost u zavaru. Uz pomoć drugih Khrenov je osmislio vodootporni premaz za elektrodu i stabilniji izvor struje za zavarivanje nakon čega počinju prva uspješna testiranja u laboratoriju a nakon toga i u moru (slika 3) [6].



Slika 3. Prva testiranja mokrog podvodnog zavarivanja [6]

Prve primjene postupka bile su tijekom II. svjetskog rata kada je zabilježeno više slučajeva podvodnog zavarivanja i rezanja pri čemu se izdvaja raščišćavanje potonulog brodovlja u luci Peral Harbor. Već tada sinonim za mokro podvodno zavarivanje bio je REL postupak ili ručno elektrolučno zavarivanje. Glavno područje primjene, osim brtvljenja pukotina odnosno otvora u trupovima brodova ispod vodene linije bilo je, a i danas je

izgradnja luka i obala, a tu prije svega popravak čeličnih vodonepropusnih zidova. Razvojem off-shore tehnologije "mokro" elektrolučno zavarivanje korišteno je u nizu slučajeva za popravke na plovnim off-shore postrojenjima, platformama, podvodnim spremnicima i cjevovodima. Vrsta spoja, kojoj se davala prednost, bio je kutni spoj, a osnovni materijal koji se zavarivao bio je lim. Dubine, na kojima su se izvodili zavarivački zahvati, zanemarujući izuzetke, bile su u području do 50 m, u kojem se prema propisu o sprječavanju nezgoda ovisno o maksimalnom trajanju ronjenja kao sredstvo za udisanje koristiti komprimirani zrak. Iako je u Meksičkom zaljevu provedeno jedno pokusno zavarivanje na dubini od 180 m, "mokro" ručno elektrolučno zavarivanje se, koliko je poznato, nije koristilo na dubinama većim od 70 m, uz uvjet da su se pritom koristile posebne mješavine za disanje. Ta dubina mnogim praktikantima vrijedi kao granica za "sigurno" REL zavarivanje sa dovoljno velikim mjehurom pare i plina u području mjesta podvodnog zavarenog spoja. U ovom kontekstu treba istaknuti još i to, da ronjaci-zavarivači, na dubinama ispod 50 m mogu koristiti samo specijalne smjese plina za disanje, čiji su sastojci kisik, dušik i/ili helij. To također vrijedi i za područja dubine 10-50 m, ako su zbog trajanja ronjenja na tim dubinama potrebni uvjeti zasićenja pri ronjenju. U državama bivšeg SSSR-a razvijao MIG/MAG postupak zavarivanja punjenom žicom, a u Japanu 90-tih tehnika "zavarivanja s vodenom zavjesom", mehanizirani proces kod kojeg stožasti mlaz vode služi kao "zavjesa", ručno elektrolučno zavarivanje pokazalo se kao najprimjenjivija tehnika mokrog podvodnog zavarivanja [7].

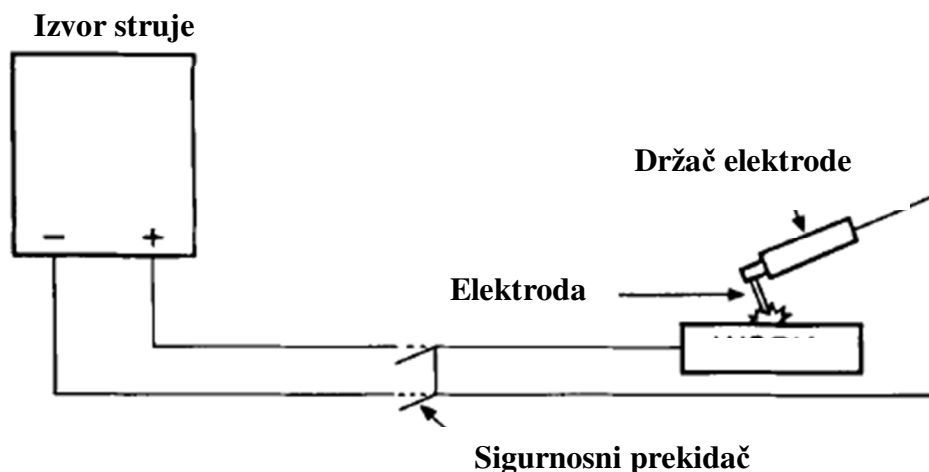
## 2.2. Fizikalne osnove mokrog podvodnog zavarivanja

Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom najstarija je tehnika spajanja metala pod vodom. Primjenjivana je za popravak oplata brodova i podvodnih struktura i smatrana tehnologijom drugog reda zbog loših mehaničkih svojstava zavarenog spoja. Danas mokro podvodno zavarivanje ima značajan industrijski, komercijalni i ekonomski potencijal pri izgradnji i održavanju podvodnih objekata te je zbog znatno nižih troškova i bolje fleksibilnosti u prednosti pred postupcima suhog podvodnog zavarivanja pri čemu se postiže visoka kvaliteta zavara. To je prvenstveno moguće zbog velikih napora na razvoju dodatnih materijala, izvora struje za zavarivanje, razumijevanju prijenosa metala i reakcija u električnom luku i razvoju ostale opreme. Međutim, daljnji razvoj osnovnih materijala, veliki broj instaliranih i planiranih podvodnih objekata i cjevovoda kao i povećanje dubine zahtijevaju daljnji razvoj postupaka mokrog podvodnog zavarivanja. Jasno je da se pri tome REL postupak nalazi pred velikom preprekom nemogućnosti automatizacije što ga ograničava za primjenu na manjim dubinama do 50 m, a drugi postupci poput zavarivanja praškom punjenom žicom postaju primarni za daljnja istraživanja [8].

Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom karakterizira slijedeće [8]:

- Nestabilnost električnog luka što uzrokuje nepravilnu geometriju zavarenog spoja, uključke troske, porozitet i nedovoljnu penetraciju.
- Brzo hlađenje dovodi do visoke tvrdoće u zoni utjecaja topline, niske žilavosti zavarenog spoja i pojave poroziteta zbog zarobljavanja plinskih mjehurića.
- Visok sadržaj vodika u stupu električnog luka, kapljicama rastaljenog metala u prijenosu i talini zavara što dovodi do zarobljavanja vodika u metalu zavara i zoni utjecaja topline. To povećava osjetljivost na pojavu hladnih pukotina, uzrokuje porozitet i degradira mehanička svojstva spoja.
- Visok sadržaj kisika u stupu električnog luka, kapljicama rastaljenog metala u prijenosu i talini zavara što dovodi do oksidacije, snižavanja udjela legirnih elemenata i degradacije mehaničkih svojstava.
- Raspad i otapanje obloge elektrode što rezultira nestabilnošću električnog luka i pojavu poroziteta.

Na slici 4 prikazan je shematski prikaz ručnog elektrolučnog podvodnog zavarivanja.



Slika 4. Shematski prikaz REL podvodnog zavarivanja [9]

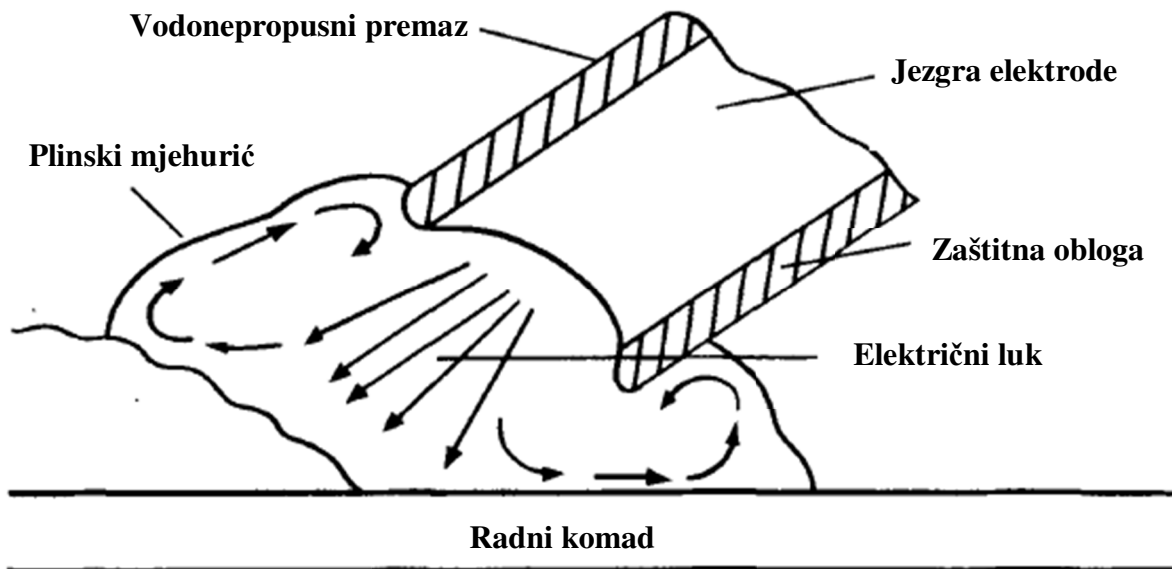
Podvodno mokro zavarivanje REL postupkom vrlo je slično REL zavarivanju na zraku, ali postoje tri značajne razlike između podvodnog i suhog REL postupka [10]:

- Koriste se elektrode sa specijalnom oblogom koja je zaštićena vodonepropusnim premazom namijenjenim podvodnom zavarivanju.
- Za zavarivanje koriste se istosmjerni izvori struje.
- Elektroda se spaja na negativni pol.

Obložena elektroda nalazi se u držaču za elektrodu te je preko drugog kabela povezana sa negativnim polom izvora struje. Kada elektroda dođe u kontakt s radnim komadom dolazi do električnog kontakta. Pritom se uspostavlja električni luk koji tali površinu radnog komada i elektrodu. Električni luk može se opisati kao intenzivno izbijanje naboja u jako ioniziranoj smjesi plinova i para različitih materijala koji potječu od metala i obloge elektrode te zaštitnih plinova ili praškova. Ako se luk dalje pomiče po radnom komadu ili se prekine, nastala talina će se skrnuti te će nastati zavareni spoj[7]. Vrlo je bitno da je držač elektrode spojen na negativni pol izvora struje, jer kada bi bilo suprotno došlo bi do elektrolize te bi moglo doći do uništenja svih metalnih dijelova u držaču elektrode [9].

Aktivni dijelovi električnog luka, stup, katodno i anodno područje, nisu u direktnom dodiru s tekućinom. Kod mokrog podvodnog zavarivanja obloženom elektrodom energija

luka je tako intenzivna da sva voda oko električnog luka trenutno ispari pa se stvara relativno stabilan mjehurić (slika 5) oko vrha elektrode koji se održava sve do prekidanja električnog luka [8].



Slika 5. Proces mokrog zavarivanja [9]

Prema [8] mjehurić ima višestruku ulogu i utjecaj na proces zavarivanja:

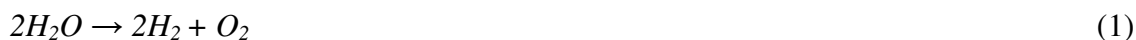
- Osigurava zaštitu pri prijenosu rastaljenog metala i štiti talinu na osnovnom materijalu.
- Smanjuje brzinu hlađenja metala zavara i zone utjecaja topline.
- Kod postupaka s plinskom zaštitom, zaštitni plin kolidira s mjehurićem pa se smanjuje efekt zaštite i utjecaja zaštitnog plina.
- Plinovi u mjehuriću utječu na formiranje poroziteta.
- Zbog visoke temperature električnog luka, stvaraju se uvjeti za pojavu atomarnog vodika koji lako difundira u metal zavara i zonu utjecaja topline.

Kako se električni luk kod podvodnog mokrog zavarivanja održava u parno-plinskoj atmosferi nastaloj od izgaranja i raspadanja obloge elektrode i disocijacijom vode u električnom luku, dolazi do stalnog rasta mjehurića do trenutka kada njegov polumjer postane tangenta inicijalne praznine. Tada se mjehurić odvaja dok istovremeno počinje stvaranje i rast novog mjehurića. Tako je pomoću ovog mehanizma električni luk konstantno zaštićen. Dinamika i frekvencija rasta i kolabiranja mjehura ovisi o postupku zavarivanja i vrsti

elektroda. Protok generiranog plina prema različitim autorima iznosi između 33 i 100 cm<sup>3</sup>/s, uz frekvenciju od 13 do 14 mjehurića u sekundi [8].

Mogućnost elektrolučnog zavarivanja pod vodom zasniva se na sposobnosti luka da automatski regulira svoje energetske stanje. Ako se pojača hlađenje bilo kojeg dijela luka, npr. površine katodne mrlje, onda se u hlađenoj zoni pojačava izdvajanje energije, što se manifestira povećanjem pada napona na hlađenoj sekciji, te se hlađenje kompenzira povećanim generiranjem topline. Zbog toga električni luk pod vodom tali metal isto tako intenzivno kao i na zraku, bez obzira na intenzivno odvođenje topline uzrokovano fizikalnim svojstvima sredine koja ga okružuje. Vodik koji nastaje toplinskom disocijacijom vode, čini veći udio u plinu koji nastaje prilikom mokrog podvodnog zavarivanja. Kisik, koji se oslobađa pri istom procesu, izgara materijal elektrode. Pare metala i komponente obloge, reagirajući s vodom, kondenziraju u sitne čestice, koje se pretežito sastoje od oksida željeza, a u vodi čine koloidni rastvor sivo-crne boje, koji se ne taloži [8].

Disocijacija vode pri mokrom podvodnom zavarivanju odvija se prema reakciji (1) te raste parcijalni tlak vodika i kisika u električnom luku [8]:



Uz to, ugljik koji dijelom nastaje izgaranjem obloge elektrode s kisikom stvara ugljični dioksid koji također disocira prema reakciji (2) [8]:



Prema navedenim reakcijama, isparavanjem i disocijacijom vode te sagorijevanjem obloge dolazi do stvaranja plinova sljedećeg sastava [8]:

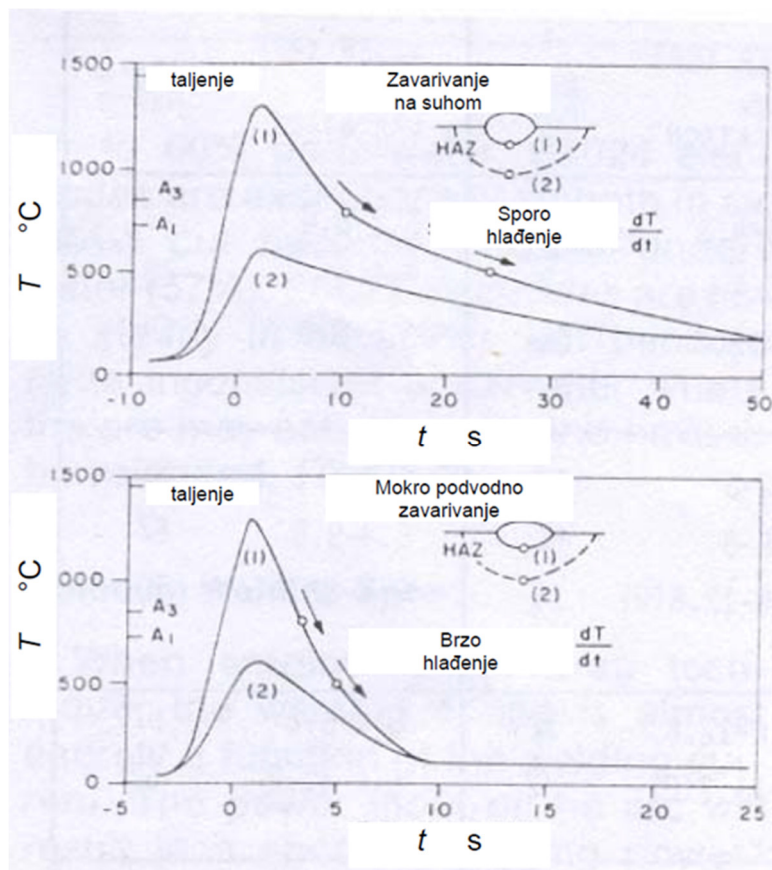
- 62-82% H<sub>2</sub> (vodik)
- 11-24% CO (ugljični monoksid)
- 4-6% CO<sub>2</sub> (ugljični dioksid)
- O<sub>2</sub> (kisik)
- N<sub>2</sub> (dušik)



## 2.3. Problemi i greške kod mokrog podvodnog zavarivanja

### 2.3.1. Brzo hlađenje metala zavara

Hlađenje u vodenom okruženju znatno je intenzivnije od hlađenja u normalnim uvjetima. Iako plinski mjehur donekle izolira proces zavarivanja, brzina odvođenja topline s radnog komada u vodu je vrlo intenzivna. Slika 6 prikazuje usporedbu intenziteta hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima na suhom i pri mokrom podvodnom zavarivanju [8].



Slika 6. Usporedba brzina hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima (gornji dio dijagrama) i mokrom podvodnom zavarivanju (donji dio dijagrama) [8]

Vremena hlađenja od 800 do 500°C su, ovisno o uvjetima i parametrima zavarivanja, između 2 i 4 sekundi. U tablici 1 prikazani su rezultati jednog istraživanja provedenog na PWI institutu za zavarivanje u Ukrajini, gdje možemo vidjeti brzinu hlađenja ovisno o okruženju u kojoj se provodilo ispitivanje FCAW postupkom zavarivanja. Iz tablice 1 vidimo da je najmanji intenzitet hlađenja na zraku dok se već u slatkovodnoj vodi povećava nekoliko puta. Isto tako vidimo razliku između brzine hlađenja u slatkovodnoj vodi i morskoj vodi, te da se povećanjem saliniteta morske vode povećava i brzina hlađenja. Takvo brzo hlađenje ima za

posljedicu pojavu martenzitne strukture te se onemogućava zarobljenim plinovima da izađu na površinu što ima za posljedicu pojavu poroziteta.

**Tablica 1. Brzina hlađenja metala zavara ovisno o okolini (U= 29 do 32V,  $v_z=6,3$  m/h) [13]**

Struja, A	Okolina	Brzina hlađenja, °C / s	
		od 800°C do 500°C	od 500°C do 300°C
230...250	Zrak	6.8	2.1
300...320		2.1	1.6
200...210	Slatkovodna voda	30.0	20.0
300...320		16.6	14.7
200...220	Morska voda saliniteta 10 ‰	31.0	22.6
300...320		19.6	16.5
200...220	Morska voda saliniteta 30 ‰	37.5	26.0
300...320		23.8	20.0

### 2.3.2. Problem zakaljivanja

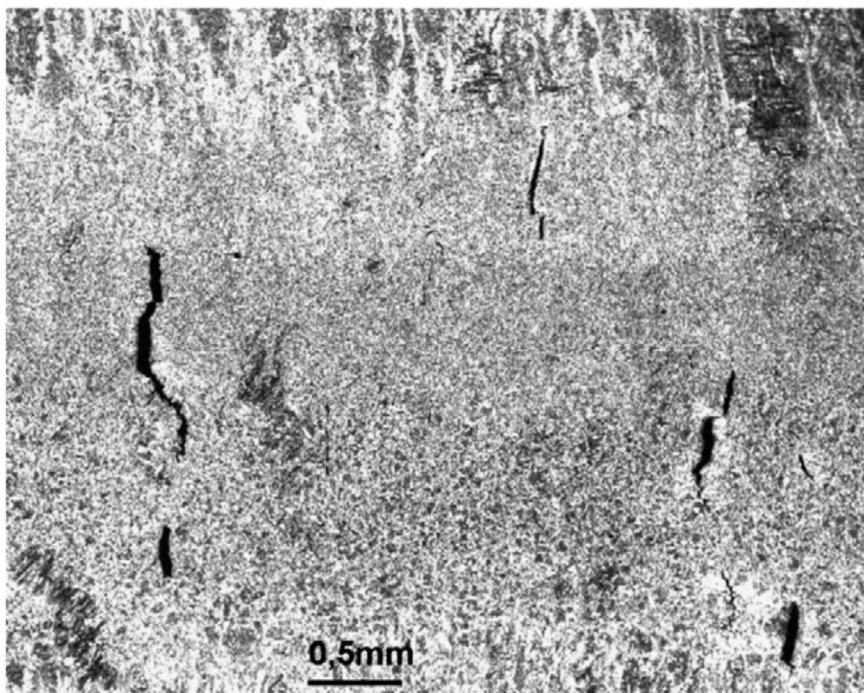
Kod čelika koji se zavaruju pod vodom javljaju se metalurški problemi zakaljivanja, zbog vrlo brzog hlađenja zavara. Mikrostrukture zavarenih spojeva na čelicima za izradu pomorskih instalacija i konstrukcija gotovo u pravilu ukazuju na postojanje martenzita u zoni utjecaja topline što može dovesti do pukotina zbog smanjene žilavosti na tom mjestu zavara i osnovnog materijala. Maksimalna tvrdoća nerijetko prelazi iznad 350 HV10, takve nepoželjne metalurške strukture mogu se donekle ublažiti većim unosom topline i zavarivanjem u više prolaza [8]. Mehanička svojstva mokrih podvodnih zavara daju se popraviti i naknadnom toplinskom obradom, ali se to u praksi obično ne primjenjuje.

### 2.3.3. Poroznost i krhkost zbog vodika

Direktan pristup vode mjestu zavarivanja ima za posljedicu stvaranje visokog udjela difundiranog vodika u metalu zavara koji se kreće u granicama između 30 i 80 ml H<sub>2</sub>/100g zavara te čini takvu strukturu osjetljivom na pojavu vodikove krhkosti, tj. dovodi do pojave pukotina uzrokovanih vodikom. Takvoj situaciji pridonosi i niz mikropora, koje nastaju zbog brze solidifikacije i nemogućnosti otplinjavanja metala zavara. Povišeni udio vodika u zavaru posljedica je povišenog parcijalnog tlaka u električnom luku. Glavni izvor vodika je vodena para, koja na visokim temperaturama disocira na vodik i kisik. Vodik u zavaru može doprijeti

i iz obloge elektrode, posebno ako je obloga kontaminirana vlagom pri proizvodnji ili tijekom rukovanja. Uz to potrebno je spomenuti da je udio vodika u metalu zavara pri mokrom podvodnom zavarivanju veći i zbog povišenog hidrostatskog tlaka, koji je uvijek viši nego je to slučaj kod zavarivanja na zraku. To znatno utječe na rastvorljivost plina u metalu. S porastom tlaka rastvorljivost vodika u talini čelika raste pri čemu također raste i udio vodika u metalu zavara. Unos topline, osim na mikrostrukturu i mehanička svojstva zavara, utječe i na količinu difundiranog vodika. Iako se velikim povećanjem unosa topline, a zbog visokog intenziteta hlađenja, ne utječe znatno na produženje vremena hlađenja, ipak je zabilježen malo smanjenje udjela difundiranog ugljika povećanjem unosa topline. Na apsorpciju vodika, osim sastava obloge i parametara zavarivanja, znatno utječe i polaritet elektrode. Dokazano da se manje vodika apsorbira ako je elektroda na negativnom polu [8].

Mehanizam nastajanja hladnih pukotina vrlo je složen. Vodik koji je difundirao u talinu zavara kod visokih temperatura nalazi se u atomarnom stanju. Pri hlađenju vodik najčešće prelazi u molekularno stanje i „smješta“ se u materijalu na mjestima sitnih pogrešaka, pri čemu nastaju vrlo visoki tlakovi. Njegova raspodjela ovisi od količine i tipu raznih uključaka, mikro i makro pora te njihovog rasporeda, koje se pod utjecajem visokog tlaka vodika između sebe povezuju u manju ili veću pukotinu (slika 7), posebno kada dodatno djeluju visoka napreznja nastala skupljanjem metala zavara ili krhko stanje otvrdnutog metala u ZUT-u [11]. Pukotine inducirane vodikom karakterizira krhki lom inače duktilnih materijala pri kontinuiranom opterećenju i uz prisutnost vodika, i to pri napreznju nižem od granice tečenja. Mehanizam pukotine se općenito opisuje kao podkritična (*eng. sub-critical*) propagacija pukotine koja često uzrokuje zakašnjele prijelome, te ovisi o koncentraciji vodika, čvrstoći materijala, mikrostrukтури, napreznjima i temperaturi. Vodikova krhkost tj. pojava pukotina induciranih vodikom je prvenstveno fenomen povezan s feritnim čelicima i grubozratom lokalno zakaljenom strukturom ZUT-a. Te pukotine se najčešće javljaju u ZUT-u, ali se vremenom mogu pojaviti i u metalu zavara. Proces pojave vodikovih pukotina je vremenski zavisna, što znači da se one mogu javiti u različitim vremenskim intervalima nakon zavarivanja [8].



Slika 7. Hladne pukotine uzrokovane vodikom kod mokrog podvodnog zavarivanja [12]

#### 2.3.4. Uspostava i održavanje električnog luka

Slatkovodna i morska voda pokazuje izrazite razlike u uspostavi i održavanju električnog luka. Slana voda poboljšava ionizaciju i uspostavu električnog luka te potpomaže stabilnosti luka. S druge strane problemi uspostave i stabilnosti električnog luka izraženi su u slatkovodnoj vodi pogotovo pri velikim dubinama. Vrsta vode utječe i na vrijeme potrebno za uspostavu električnog luka. Vrijeme potrebno za uspostavu električnog luka prema istraživanjima u slatkovodnoj vodi iznosi 0,98 s, dok u slanoj vodi slainiteta 30‰ iznosi 0,56s odnosno vodi slainiteta 41‰ iznosi 0,36s. Iz ovih podataka može se zaključiti da je uspostava i održavanje stabilnosti električnog luka mnogo teže u slatkoj nego u slanoj vodi, te se s povećanjem slanosti vode električni luk lakše uspostavlja [13].

#### 2.3.5. Smanjena vidljivost kod mokrog podvodnog zavarivanja

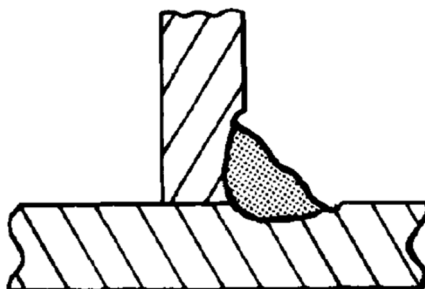
Vidljivost je značajan problem u podvodnom zavarivanju. Smanjenje vidljivosti rezultat je slabije apsorpcije svjetla u vodi, sitnih čestica koje se nalaze u vodi ali i zbog mjehurića koji nastaju prilikom zavarivanja. Zbog smanjene vidljivosti u vodi zavarivač ronioac u mnogome ovisi o svojim drugim osjetilima, prije svega o zvuku i dodiru. Zavarivač mora imati najmanje razumne uvijete vidljivosti kako bi mogao promatrati električni luk i

formiranje zavarenog spoja u udaljenosti od najmanje 150 mm. Niža vidljivost neće garantirati zavareni spoj prihvatljive kvalitete. Stoga je vrlo bitno da zavarivač može jasno vidjeti gibanje električnog luka i ponašanje taline [14].

### 2.3.6. Greške uzrokovane lošom tehnikom rada i pogrešno odabranim parametrima zavarivanja kod mokrog podvodnog zavarivanja

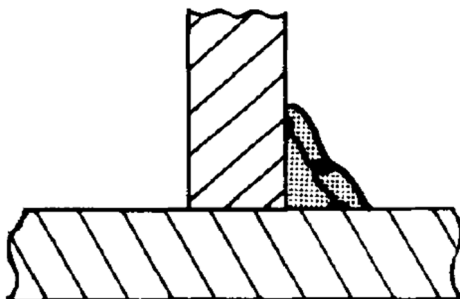
U nastavku su navedene najčešće greške koje se uglavnom povezuju sa lošom tehnikom rada ili odabranim krivim parametrima zavarivanja [9]:

- a) Ugorine uz zavar – nastaju zbog predugačkog električnog luka ili zbog pogrešnog kuta između elektrode i radnog komada. Preporuča se zavarivanje pod kutom od 30 do 45°.



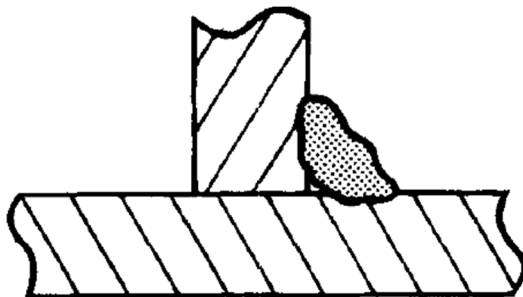
Slika 8. Ugorina [9]

- b) Uključine u zavaru i nedovoljni provar zavara – nastaju zbog neodgovarajuće pripreme spoja te prevelike brzine zavarivanja



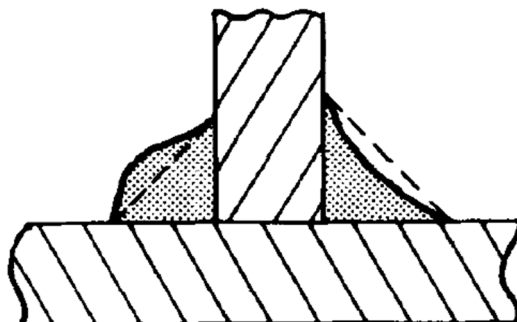
Slika 9. Uključine u zavaru [9]

- c) Nedovoljna penetracija – odabrana je premala struja zavarivanja



Slika 10. Nedovoljna penetracija [9]

- d) Loša geometrija zavara – potrebno je provjeriti parametre zavarivanja i korigirati brzinu zavarivanja



Slika 11. Loša geometrija zavara [9]

## 2.4. Opasnosti podvodnog zavarivanja

Mnogo propisa je uvedeno kako bi se osiguralo da podvodni zavarivač bude što više sigurniji u vodenoj sredini. Ipak, nijedan set propisa ne može obuhvatiti sve, pogotovo kada osoba odlazi ispod površine vode, i radi sa električnom opremom. Navedeni su neke od opasnosti s kojima su suočeni zavarivači roniaci prilikom podvodnog zavarivanja [15]:

### 1. Opasnost od strujnog udara

Podvodni zavarivači, kao što znamo, zaranjaju u vodu kako bi radili svoj posao. Usprkos svim sigurnosnim predostrožnostima koje poduzimaju, oni su još uvijek izloženi riziku električnog udara unutar vode. To se može dogoditi, pogotovo kada oprema za zavarivanje koja se koristi nije prilagođena za rad pod vodom. Stoga je preporučljivo da se na odgovarajući način testira oprema i potvrdi da je dobro izolirana i da su vodootporne elektrode priključene na njega. To će smanjiti, ako ne i potpuno eliminirati rizik od strujnog udara pod vodom. Također je potrebno isključiti električnu struju odmah nakon obavljenog posla [15].

### 2. Opasnost od eksplozije

Podvodna eksplozija je još jedan veliki rizik sa kojim se podvodni zavarivači moraju suočiti. Takve eksplozije se javljaju u procesima, gdje oboje, vodik i kisik, može dovesti do stvaranja brojnih "džepova" plinova. Posebno, u slučaju zatvorene komore, prilikom suhog zavarivanja, kombinacija vodika i kisika u "džepovima" je opasna jer su eksplozivne, kada se zapale. Ova podvodna eksplozija je izuzetno smrtonosna [15].

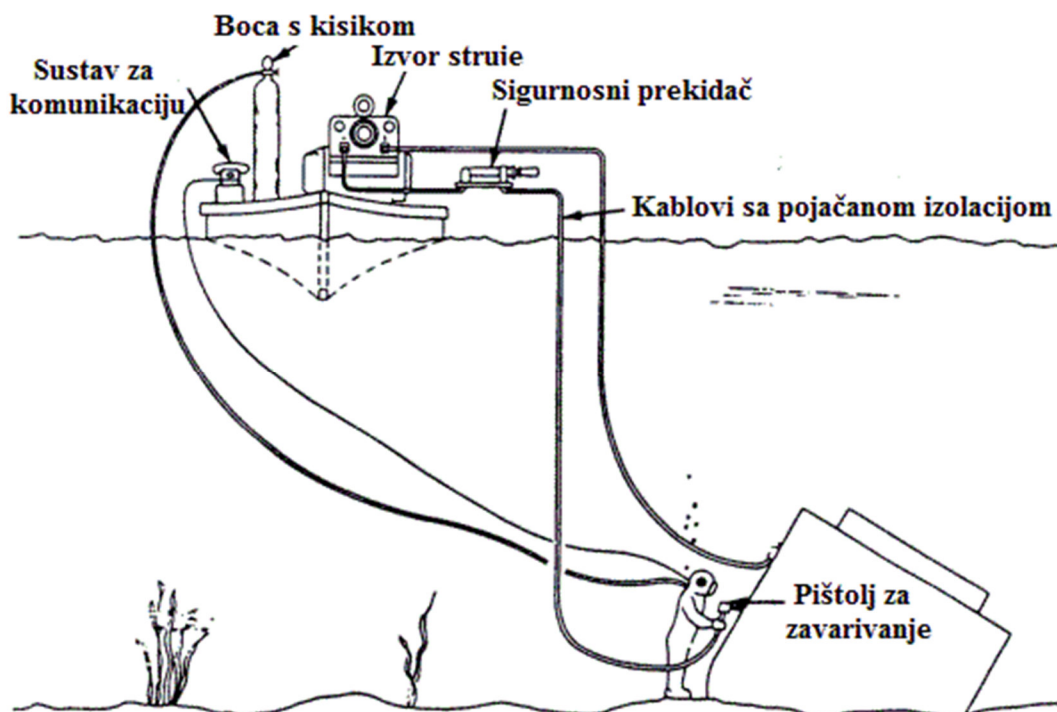
### 3. Bolesti dekompresije

Bolest dekompresije, poznata kao 'ronilačka bolest', nastaje zbog pojave mjehurića inertnog plina ( dušik ) u tkivima i krvi. Disanje pri povišenom tlaku ima kao posljedicu njegovo otapanje u krvi i tkivima. Za vrijeme ronjenja, dok ronilac boravi u području povišenog tlaka, otopljeni dušik ne stvara nikakve probleme, no čim započne izron, otopljeni se plin vraća iz tkiva u krv i pluća. Znatno je veća količina tih mjehurića pri brzom povratku sa povišenog na normalni pritisak. Ozbiljnost bolesti, težina simptoma i prognoza ishoda liječenja ovise o brojnosti, veličini i lokalizaciji mjehurića, odnosno o " dekompresijskoj dozi " koju određuju vrijeme i dubina na kojoj se ronilo. Najčešće se javlja unutar 6 do 12 sati, ali i do 36 sati nakon izrona.

## 2.5. Oprema kod mokrog podvodnog zavarivanja

### 2.5.1. Oprema za zavarivanje

Zavarivačka oprema (slika 12) se sastoji od istosmjernog izvora struje s obvezno sniženim naponom praznog hoda, specijalnih kabela s pojačanom izolacijom, pištolja za zavarivanje (držač elektrode) te elektroda za mokro podvodno zavarivanje. Potrebno je naglasiti da uz zavarivača-ronioca u vodi, na površini postoji pomoćni tim koji je s roniocem u stalnoj komunikaciji. Pomoćni tim se brine za opskrbu zrakom, dobavu alata i elektroda, regulaciju parametara zavarivanja (na zahtjev zavarivača) kao i ostalih sigurnosnih elemenata (npr. prekidanje strujnog kruga posebnom sklopkom ) [16].



Slika 12. Oprema za mokro podvodno zavarivanje [5]

Organizacija rada ima veliku ulogu pri izvršavanju radnih aktivnosti, te se sve provodi po unaprijed dogovorenom planu i protokolu. U slučaju prekida veze ili nepredviđenih okolnosti ronilac izlazi iz vode kako bi se izbjegle eventualne incidentne situacije. Oprema za podvodno mokro zavarivanje mora zadovoljiti sve sigurnosne aspekte, a istovremeno se roniocu zavarivaču moraju pružiti zadovoljavajući radni uvjeti radi ograničenog vremena boravka pod vodom i ekonomičnosti samog procesa. Oprema se mora redovno održavati prema određenom planu kako bi se produljio njen vijek trajanja i osigurala njena ispravnost u



realnim uvjetima. Ovisno o zahtjevima radnog zadatka moguća je upotreba i dodatne opreme poput sistema za stabilizaciju zavarivača (platforma ili košara, prihvatni magneti), posebnih naprava za pridržavanje i centriranje radnih komada [16].

#### 2.5.1.1. Izvor struje za zavarivanje

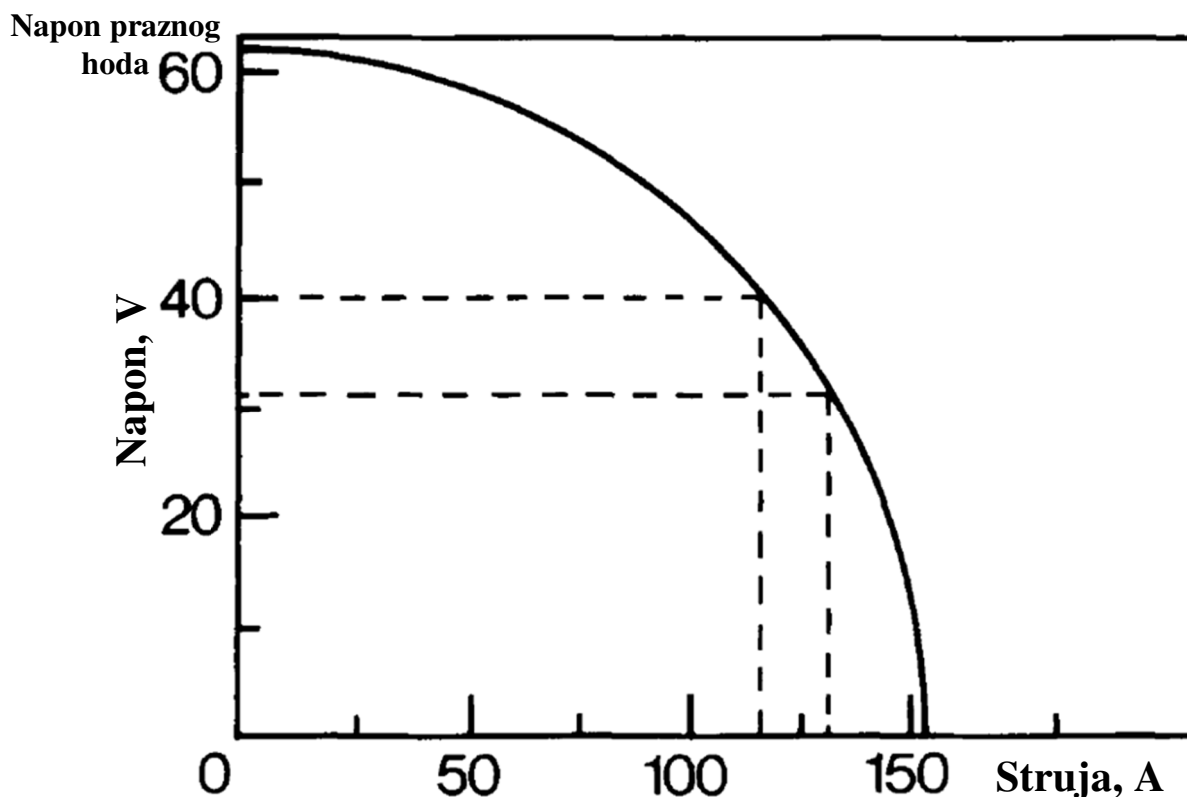
Električna energija potrebna za elektrolučno zavarivanje je vrlo nestabilna. Prilikom uspostave električnog luka kontaktom elektrode i radnog komada nastaje kratki spoj. Smanjen električni otpor uzrokuje iznenadno povećanje struje što izaziva štrcanje. Upravo zbog toga izvor struje mora biti tako konstruiran da daje konstantnu struju zavarivanja. Izvor struje (slika 13) može davati istosmjernu (DC) ili izmjeničnu struju (AC). Međutim za mokro podvodno zavarivanje zbog sigurnosti zavarivača ronioca i poteškoća u održavanju električnog luka pod vodom koristi se samo istosmjerna struja [9].



Slika 13. Izvor struje [17]

Električnu energiju proizvodi najčešće dizelski generator koji daje istosmjernu struju. Izvor struje ima strmopadajuću karakteristiku (slika 14), odnosno izlazna struja mora ostati gotovo nepromijenjena tijekom pomicanja elektrode po radnom komadu koje može biti slučajno ili namjerno kada zavarivač kontrolira talinu, što naposljetku uzrokuje varijaciju duljine električnog luka. Povećanjem duljine električnog luka povećava se napon u

električnom luku, dok struja ostaje blizu zadane vrijednosti. Tako je taljenje elektrode ujednačeno prilikom procesa [9].



Slika 14. Strmopadajuća karakteristika struje [9]

Da bi se osigurali pogodni uvjeti za sve vrste podvodnih zavarivačkih radova potrebno je imati izvor struje koji može osigurati minimalno 300 A [16]. Ispravljači su konstruirani tako da imaju smanjen napon i primjerena svojstva za zavarivanje pod vodom. Također se upotrebljavaju tranzistorski izvori struje, a daljnja istraživanja upućuju na to da sadašnji stadij razvoja tehnologije izvora struje omogućuje bolje uspostavljanje električnog luka i njegovu stabilnost. Intenzivno dinamičko ponašanje izvora struje potrebno je za ostvarivanje električnog luka u većim dubinama. Korištenjem slabijih strojeva produžuje se vrijeme zavarivanja, a time i vrijeme boravka zavarivača pod vodom. Povećanjem dubine na kojoj se zavarivanje odvija raste i potrebna dužina kabela za zavarivanje, što može izazvati pad napona zbog velike udaljenosti koju struja mora prijeći od izvora do radnog komada. Stoga izvori struje za mokro podvodno zavarivanje moraju moći dati dovoljno visok napon praznoga hoda (eng. *Open Circuit Voltage*) [7,16].

### 2.5.1.2. Držać elektrode

Trajnost s povećanjem dubine i zaštitna izolacija za zaštitu ronilaca su glavne značajke držača elektrode (slika 15) za podvodno zavarivanje, plus mehanizam za jednostavno umetanje i ispuštanje elektrode. Za mokro podvodno zavarivanje koriste se samo držači elektroda koji su posebno konstruirani za tu namjenu, bez opruga i potpuno izolirani neprevodljivim materijalom. Prije svake upotrebe potrebno je provjeriti ispravnost odnosno istrošenost ili moguća oštećenja držača elektrode [9].



Slika 15. Držać elektrode [17]

### 2.5.1.3. Dodatni materijali

Obložene elektrode primjenjuju se kod ručnog elektrolučnog zavarivanja i sastoje se od metalne jezgre, obloge i vodonepropusnog premaza. Metalna jezgra može biti žica ili šipka napravljena od materijala ovisno o namjeni, a obloga je na metalnu jezgru nanosena prešanjem ili umakanjem. Umjesto ovog oblika postoji i elektroda koja ima oblik cijevi, a unutar cijevi je prašak koji ima funkciju obloge [18].

Obloga kod elektroda za podvodno zavarivanje i njihovi premazi, u cilju sprečavanja prodora vode u oblogu, igraju ključnu ulogu za stabilno održavanje električnog luka u vodi. Električni luk se kod mokrog podvodnog zavarivanja obloženom elektrodom stalno podržava u parno-plinskoj atmosferi koja nastaje isparavanjem vode, te razlaganjem i izgaranjem obloge elektrode. Bitna karakteristika obloge je da gori sporije od metalne jezgre kako bi

električni luk bio cijelo vrijeme zaštićen plinskim mjehurićem. Isto tako preporuča se da duljina električnog luka ne bude duža od pola promjera elektrode kako bi se lakše održavao plinski mjehur.

Obloga obavlja tri funkcije [18]:

- a) električnu,
- b) fizikalnu i
- c) metaluršku.

Električna funkcija omogućava uspostavljanje i stabilno održavanje električnog luka. Iz tog razloga obloge sadrže tvari koje kod taljenja stvaraju plinove s velikom sposobnošću ionizacije i na taj način daju dobru provodnost električnoj struji između radnog komada i vrha elektrode. Fizikalna funkcija ogleda se u olakšanom zavarivanju u prisilnim položajima, te zaštiti taline metala od štetnih plinova (npr. vodika). Metalurška funkcija je u djelovanju na zavareni spoj u toku zavarivanja, a to se odnosi na [18]:

- a) dolegiranje,
- b) otplinjavanje i
- c) rafinaciju.

Dolegiranjem nastojimo nadoknaditi legirne elemente koji izgaraju tokom procesa zavarivanja ili da bismo poboljšali svojstva zavarenog spoja. Otplinjavanjem iz taline zavara otklanjamo nepoželjni kisik i vodik, dok pod rafinacijom podrazumijevamo uklanjanje sumpora i fosfora iz taline, koji se vežu s određenim dodacima iz obloge i prelaze u trosku [18]. Osim gore tri navedene funkcije obloge, kod mokrog podvodnog zavarivanja obloga još mora štiti elektrodu od dodira s vodom, osigurati nastajanje kompaktnog sloja troske koji će smanjiti intenzitet hlađenja te spriječiti kontaminaciju zavarenog spoja kisikom i vodikom nastalim disocijacijom vode.

Elektrode za mokro podvodno zavarivanje razlikujemo prema sastavu metalne jezgre, prema vrsti obloge i prema vodonepropusnim premazima. Prema sastavu metalne jezgre elektrode za mokro podvodno zavarivanje dijelimo na [9]:

- a) feritne,
- b) na bazi nikla.

Feritne elektrode su najčešće u upotrebi, dok se nikalne koriste kod zavarivanja čelika s povišenim ekvivalentom ugljika ali se kod njih mogu pojaviti vruće pukotine. Za zavarivanje nehrđajućih čelika i dupleks nehrđajućih čelika razvijaju se specijalne elektrode. Kod razvoja pojedinih vrsta elektroda naglasak je na razvoju elektroda na bazi nikla.

Prema oblogama elektrode za podvodno zavarivanje dijelimo na [9]:

- a) rutilne,
- b) kisele,
- c) sa metalnim prahom,
- d) rutilno-kisele.

Rutilne elektrode pokazuju najbolja operativna svojstva za primjenu pri mokrom podvodnom zavarivanju te su najčešće u uporabi za mokro podvodno zavarivanje. Jedan od glavnih razloga tome jest dobra stabilnost električnog luka pri zavarivanju ovim elektrodama. Zavareni spojevi dobiveni korištenjem rutilnih elektroda posjeduju dobra mehanička svojstva, lijep izgled te mogućnost jednostavnog otklanjanja troske nakon završetka zavarivanja. Nedostatak je da zavareni spojevi dobiveni rutilnim elektrodama posjeduju slabiju žilavost u metalu zavara. Elektrode s kiselom oblogom imaju ograničena operativna svojstva i relativno nestabilan luk stoga se ne koriste previše kod mokrog podvodnog zavarivanja [7,19]. Osim komercijalnih elektroda postoje i elektrode koje za vlastite potrebe proizvode pojedine tvrtke koje se bave proizvodnjom opreme za podvodno zavarivanje. Zbog poboljšanja žilavosti metala zavara, smanjenja utjecaja poroziteta i pukotina pokušava se s razvojem elektrode s borom i titanom u oblogi. Intencija je dobiti povećanu količinu igličastog ferita u strukturi zavara.

Izbor pravilne kombinacije žice i obloge radimo prema određenom kriteriju koji je zajednički svim univerzalnim primjenama mokrog zavarivanja, a to je da elektroda mora imati:

- a) dobru taljivost (eng. *high deposition-rate*),
- b) mogućnost da podnese povećanu struju,
- c) sposobnost izvođenja zavarivanja u svim položajima i
- d) zadovoljavajuću penetraciju.

Uloga vodonepropusnog zaštitnog premaza na elektrodi je da spriječi prodor vlage do obloge elektrode. Jer bi u protivnom vlaga razorila oblogu. Vlažna obloga također postaje električki provodljiva. Zatvara se strujni krug između jezgre i okolne vode, te se narušava stabilnost procesa. Isto tako vodik koji se burno izdvaja na površini jezgre također razlaže oblogu i čini elektrodu potpuno neupotrebljivom. Prije samog korištenja elektrode potrebno je ostrugati vodonepropusni premaz kako bi mogli ostvariti električni luk između elektrode i radnog komada [8,9]. Danas su razvijene i elektrode s dvostrukim premazom koji omogućavaju laganu uspostavu i vođenje električnog luka, a jedna od karakteristika takvih elektroda je da nije potrebno mehanički skidati zaštitni sloj kako bi uspostavili električni luk. Na slikama 16 i 17 prikazane su elektrode za podvodno mokro zavarivanje Navy 1 i Navy 2 razvijene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



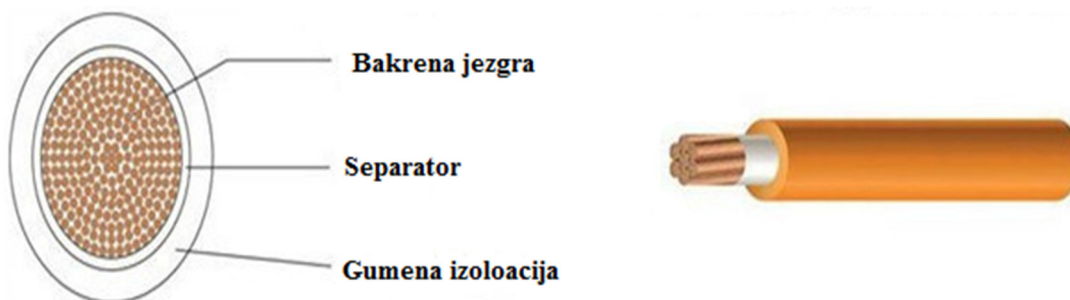
**Slika 16. Navy 1 i Navy 2 elektrode [20]**



Slika 17. Elektroda Navy 1 i Navy 2 nakon procesa zavarivanja [21]

#### 2.5.1.4. Zavarivački kabel

Za podvodno zavarivanje koriste se specijalni zavarivački kablovi (slika 17) s pojačanom izolacijom. Minimalna preporučena površina poprečnog presjeka kabla je  $50 \text{ mm}^2$  jer kada se zavaruje na velikim udaljenostima između izvora struje do mjesta zavarivanja, pad napona je manji zbog nižeg električnog otpora. Upravo zbog pada napona poželjno je da je dužina kablova najkraća moguća (preporuča se ne više od 15m), te da su svi spojevi čisti. Radi sigurnosti zavarivača od električnog udara svi spojevi trebaju biti potpuno izolirani s nekoliko slojeva gume ili plastične trake. Na držač elektrode može biti spojen i kabel manje površine poprečnog presjeka od 25 mm koji omogućuje zavarivaču lakši rad [9].



Slika 18. Presjek zavarivačkog kabla [17]

### 2.5.1.5. Sigurnosni prekidač

Iz sigurnosnih razloga pri mokrom podvodnom zavarivanju potrebno je imati sigurnosni prekidač prikazan na slici 19. Sigurnosni prekidač se nalazi izvan vode, a čijim se pritiskom prekida strujni krug. Važno je da operater koji upravlja sigurnosnim prekidačem ne zatvara ili otvara strujni krug sve dok mu zavarivač to ne naredi, a kad mu to naredi mora potvrditi svaku promjenu zavarivaču pomoću komunikacijskog sustava. Postoje i određena pravila koja se primjenjuju kod sigurnosnog prekidača a to su [9]:

1. Strujni krug treba biti isključen cijelo vrijeme, osim kada je zavarivač spreman za zavarivanje
2. Prekidač mora biti pozicioniran na takvom mjestu da odgovorna osoba može vrlo jednostavno upravljati njime

### 2.5.2. Oprema zavarivača-ronilaca

Prema [ 8, 16] osnovna oprema ronilaca - zavarivača sastoji se od:

1. Zavarivačke maske - ronilac treba nositi zaštitnu masku koja je opremljena odgovarajućim zavarivačkim lećama koje se određuju ovisno o uvjetima pod vodom.
2. Gumene rukavice
3. Suho ronilačko odijelo – odabir odijela ovisi o uvjetima pod vodom odnosno temperaturi vode, te se preporuča sljedeće [3]:
  - 30 do 20 C° - suho odijelo bez pododijela
  - 20 do 15 C° - suho odijelo sa pododijelom
  - 15 do 5 C° - suho odijelo sa debelim pododijelom
  - 5 do -2 C° - odijelo sa grijanjem
4. Boca sa stlačenim zrakom i regulacijskim ventilom
5. Crijevo za vanjsku dobavu zraka i spremnik zraka na površini
6. Uređaj za komunikaciju



7. Ampermetar – prilikom podvodnog zavarivanja preporuča se da se koristi se još jedan dodatni ampermetar koji se nalazi kod zavarivača kako bi imali točnije podatke o struji zavarivanja
8. Ostala oprema - ronilac treba biti opremljena svim potrebnim alatima koji mogu biti pneumatski / hidraulički upravljani, ili ručno kao što su zavarivački čekić ili žičana četka.



**Slika 19. Ronilac-zavarivač spreman za rad [22]**

## 2.6. Tehnike rada kod mokrog podvodnog zavarivanja

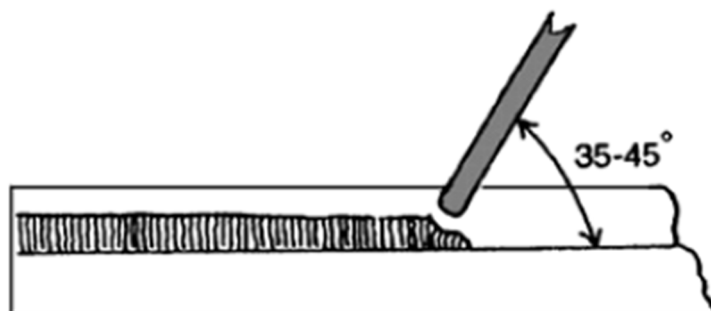
Kod mokrog podvodnog zavarivanja postoje tri osnovne tehnike zavarivanja, a to su [23]:

- tehnika povlačenja (eng. *Drag technique*),
- tehnika njihanja (eng. *Oscillation technique*) i
- “korak-unatrag” tehnika (eng. *Step-back technique*).

Iskusni zavarivači koriste i svoje tehnike zavarivanja ali koje se zasnivaju više manje na trima navedenim tehnikama.

### 2.6.1. Tehnika povlačenja

Tehnika povlačenja (slika 20) je najjednostavnija tehnika kod podvodnog zavarivanja. Ronilac-zavarivač povlači elektrodu po radnom komadu te pritom održava lagani pritisak na elektrodu dok se ona tali. Zavarivač mora paziti da održava odgovarajući kut i brzinu zavarivanja. Kut prilikom zavarivanja između elektrode i radnog komada mora biti između  $35^\circ$  i  $45^\circ$  kako bi se omogućilo odvođenje mjehurića sa električnog luka. Brzina povlačenja elektrode po radnom komadu direktno je povezana s kutom nagiba elektrode. Što je kut nagiba elektrode veći, brzina elektrode biti će manja te će nastali sloj zavara biti širi uz veću penetraciju. Tehnika povlačenja pogodna je za stvaranje sučeljenih kutnih spojeva te se može koristiti u svim položajima zavarivanja [23].



Slika 20. Tehnika povlačenja [23]

### 2.6.2. Tehnika njihanja

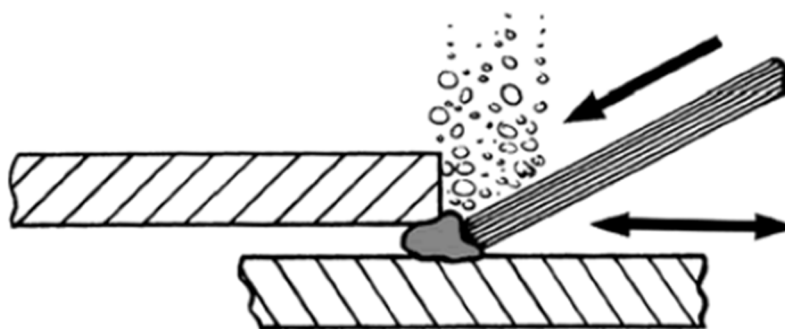
Kod tehnike njihanja (slika 21) zavarivač njiše elektrodu oko točke najbliže držaču elektrode, pritom konstantno mijenja kut elektrode. Ovime se postiže veći depozit metala te se sprječava ne koncentrično izgaranje elektrode, posebice pri zavarivanju korijena zavora. Ne koncentrično izgaranje elektrode događa se zbog manjih kutova pod kojim zavarujemo kod podvodnog zavarivanja za razliku od suhog zavarivanja. Kako je elektroda u stalnom kontaktu s radnim komadom dolazi do nejednolikog taljenja odnosno jedna strana elektrode protali se više od druge, zbog čega nije moguće kontrolirati depozit metala. Kako bi se to spriječilo zavarivač koristi tehniku njihanja [23].



Slika 21. Tehnika njihanja [23]

### 2.6.3. Korak-unatrag tehnika

Korak-unatrag tehnika (slika 22) zasniva se na principu da zavarivač odugovlači jednu sekundu s pomicanjem elektrode dalje duž zavora tako da ju pomakne nekoliko milimetara natrag u talinu zavora. Ova tehnika poboljšava penetraciju i širinu te omogućava kontroliranje brzine hlađenja zavora, međutim zahtjeva dobru vještinu, iskustvo te dobro razumijevanje skrućivanja od strane zavarivača. Korak-unatrag tehnika pogodna je kada zavarujemo u više prolaza za zadnji prolaz, jer pokriva sitne pogreške nastale u prethodnim prolazima a najčešće se koristi za kutne zavora [23].



Slika 22. Korak-unatrag tehnika [23]

## 2.7. Zavarljivost

Mokro podvodno zavarivanje generalno se koristi za zavarivanje „off-shore“ konstrukcija od niskolegiranih i konstrukcijskih čelika. To su uglavnom čelici s vrlo malim udjelom ugljika i legiranih elemenata koji imaju veliki značaj na kvalitetu zavara kod mokrog podvodnog zavarivanja. Povećana tvrdoća i sklonost hladnim pukotinama uzrokovanim vodikom, usko su povezani sa udjelom ugljika i legiranih elemenata u čelicima. Sklonost hladnim pukotinama uzrokovanim vodikom procjenjuje se pomoću formule za CE – ekvivalenta ugljika koju propisuje International Institute of Welding (IIW), a koja uzima u obzir postotak ugljika i drugih legiranih elemenata. Ekvivalent ugljika određuje se prema sljedećoj jednadžbi [14]:

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{\%(Ni+Cu)}{15} [\%] \quad (3)$$

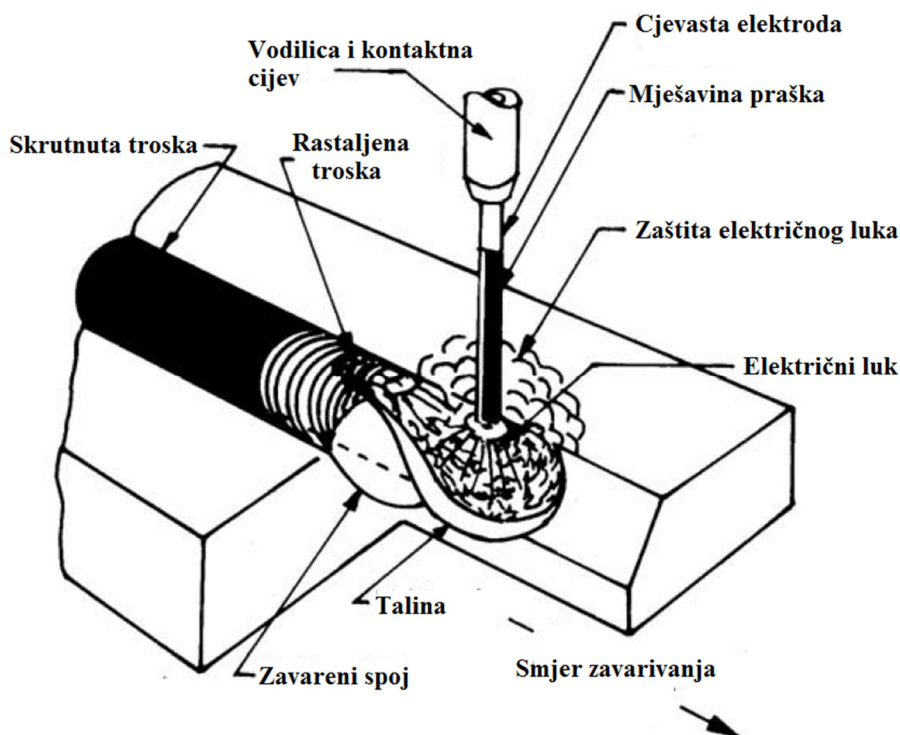
Ekvivalent ugljika zajedno sa sadržajem ugljika glavni je kriterij za određivanje zavarljivosti materijala pod vodom. Čelik sa  $CE < 0,4\%$  i malim sadržajem ugljika od  $0,10\%$  stvara manje problema prilikom zavarivanja od npr. čelika sa  $CE > 0,4\%$  i sadržajem ugljika između  $0,13$  i  $0,16\%$  [14]. Čelici sa višim ekvivalentom ugljika od  $0,4\%$  također su osjetljiviji na pojavu hladnih pukotina te se mogu zavarivati samo sa posebnim elektrodama (austenitne nehrđajuće i Ni-elektrode) i posebnim tehnikama rada. Mogućnost nastajanja hladnih pukotina može se smanjiti i korištenjem tehnike njihanja elektrode i dodatnim prolazima u svrhu toplinske obrade zavarenih spojeva [8].

## 2.8. Pregled ostalih postupka koji se koriste za mokro podvodno zavarivanje

Uz REL postupak mokrog podvodnog zavarivanja danas se još primjenjuju FCAW postupak i mokro podvodno zavarivanje trenjem. U razvoju je i mokro podvodno zavarivanje laserom, ali taj postupak je još uvijek u fazi istraživanja i još nema primjenu.

### 2.8.1. Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom

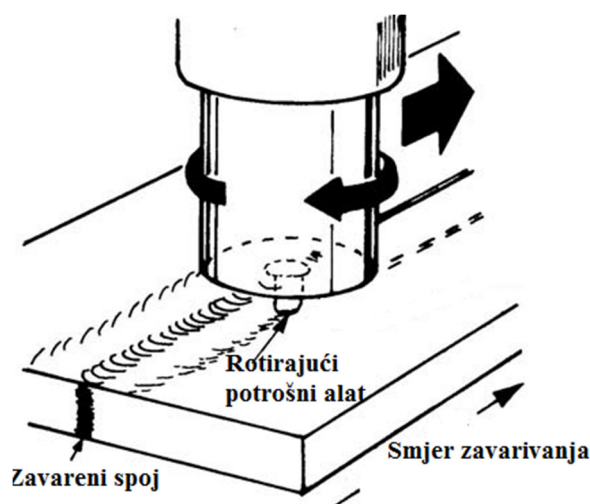
Postupak zavarivanja praškom punjenom žicom (eng. *Flux Cored Arc Welding – FCAW*) koristi se za zavarivanje pod vodom kada nam je potreban veliki depozit materijala. Postupak je veoma sličan MIG/MAG postupku zavarivanja na suhom. Kao i kod MIG/MAG postupka dodatni materijal je u obliku žice namotane na kolutu koji se automatski dovodi do mjesta zavarivanja, samo u ovom slučaju koristi se cjevasta žica punjena praškom. Taljenjem elektrode generiraju se zaštitni plinovi i troska koji štite električni luk odnosno talinu od utjecaja vode i oksidacije. Zaštitni plinovi se mogu još dodatno dovoditi kroz zavarivački pištolj. Postupak odlikuje velika produktivnost, dobra mehanička svojstva zavara, smanjen udio vodika te mogućnost automatizacije [2]. Na slici 23 je prikazan shematski prikaz FCAW postupka.



Slika 23. Shematski prikaz FCAW postupkom [2]

### 2.8.2. Mokra podvodno zavarivanje trenjem

Uz REL i FCAW postupke zavarivanja danas je dobro razvijen i postupak mokrog podvodnog zavarivanja trenjem. Zavarivanje trenjem je vrsta zavarivanja pritiskom, gdje se dijelovi između dodirnih površina zagrijavaju toplinom trenja nastalom vrtnjom jednog djela u odnosu na drugi, nakon čega slijedi zavarivanje povećanim pritiskom uz istovremenu obustavu vrtnje. Glavni parametri podvodnog zavarivanja trenjem su rotacija, vrijeme trajanja i tlak. Najveća prednost ovog postupka je dobivanje visoko kvalitetnih zavara bez ikakvih pora i uključaka u vrlo kratkom vremenu, te ne postoji potreba za dodatnim materijalom kao ni za zaštitnim plinom. Kako kod ovog postupka ne postoji talina te su tako eliminirani svi problemi uzrokovani vodikom [2,20]. Na slici 24 i 25 je prikazan postupak zavarivanja trenjem.



Slika 24. Shematski prikaz zavarivanja trenjem [2]



Slika 25. Podvodno zavarivanje trenjem [20]

## 2.9. Klasifikacija podvodnih zavara prema AWS D3.6

AWS D3.6 specifikacija pripremljena je kao odgovor na potrebu za normom koja bi dozvolila korisnicima podvodnog zavarivanja konvencionalno specificiranje i izvedbu podvodnih zavara predviđene razine kvalitete. Specificirana su 4 tipa zavara u D3.6 specifikaciji koji obuhvaćaju kvalitetu i svojstva zavara izvedenih različitim metodama. Propisi definiraju način izvođenja, vrste spojeva i sve zavarivačke varijable. Prema specifikaciji razlikujemo četiri tipa zavarenih spojeva [24]:

- A tip,
- B tip,
- C tip,
- O tip.

Svaki tip određuje izgled, mehanička svojstva i dopuštene pogreške u zavarenom spoju. U D3.6 specifikaciji, tipovi nisu nužno povezani sa specifičnom metodom. Međutim, u praksi postaje korisnicima očito, da su određene metode prikladne za proizvodnju određenih tipova podvodnih zavara. Zahtjevi za sve tipove zavara:

- Potreban je atest postupka i zavarivača.
- Potreban ujednačen zavar po strukturi i obliku.
- Nužan vizualni pregled svih zavara.
- Nisu dopuštene nikakve pukotine, osim kraterskih kod zavara tipa B.

A tip je najkvalitetniji i usporediv je sa zavarima ostvarenim na zraku. Namijenjen je za najodgovornije primjene na konstrukcijama. Tipovi B, C i O definirani su sa više naglaska na svrhu. B tip zavara dozvoljava prisutnost određenih pogrešaka i predviđen je za manje odgovorne uloge. Tip C je nestrukturni mokri zavar čiji je primarni zadatak da prisustvo zavara neće oštetiti strukturu uz koju se veže i to je zavar najniže kvalitete. Zahtjeva se da bude bez pukotina i da zadovolji geometrijski oblik. Kod O tipa zavara je ostavljena mogućnost da zadovolji zahtjeve drugih propisa na zahtjev naručitelja, odnosno, da se nosi sa postojećim regulama ili specijalnim zahtjevima drugih specifikacija, kao što je API 1104 za cjevovode (naftovode) [24]. Tipovi A i B primarni su u D3.6 specifikaciji. Zavari tipa C i tipa O predstavljaju specijalne slučajeve koje nije moguće uključiti u tipove A i B. Specifikacija

AWS D3.6 u pravilu se dopunjava, popravlja te preuređuje svakih 5 godina kako bi se aktualizirala sa modernim tehnologijama. Jedan od osnovnih čimbenika za postizanje odgovarajuće kvalitete zavarenih spojeva jest pravilan odabir ronioca-zavarivača. Oni moraju biti vješti ronioci sa dobro uvježbanom tehnikom zavarivanja. Loša tehnika uzrokuje pojavu grešaka u zavarenim spojevima poput poroziteta ili povišenog udjela vodika u zavaru, a nepravilan nagib elektrode može izazvati uključenje troske u sam zavareni spoj. Osim odlične tehnike zavarivanja i vještine ronjenja potrebna je i visoka fizička sprema zavarivača. Iskustvo je pokazalo da zavarivači s odličnom fizičkom spremom mogu raditi pod vodom bez pauze maksimalno 4 sata. Duži rad od toga uzrokuje greške kod zavarivača uslijed nastalog umora. Kako bi se osigurala jedinstvena edukacija za sve ronioce-zavarivače diljem svijeta i u Europi razvili su se standardi za njihovu obuku i certificiranje [20].



## 2.10. Razvoj i primjena mokrog podvodnog zavarivanja

Značajni istraživački napori su učinjeni za poboljšanje performansi procesa i kontrole za različite postupke podvodnog zavarivanja tijekom posljednjih pola stoljeća. Međutim još uvijek postoje mnogi problemi koji se trebaju prevladati. Glavni napori u daljnjim istraživanjima se moraju usmjeriti na sljedeće [2]:

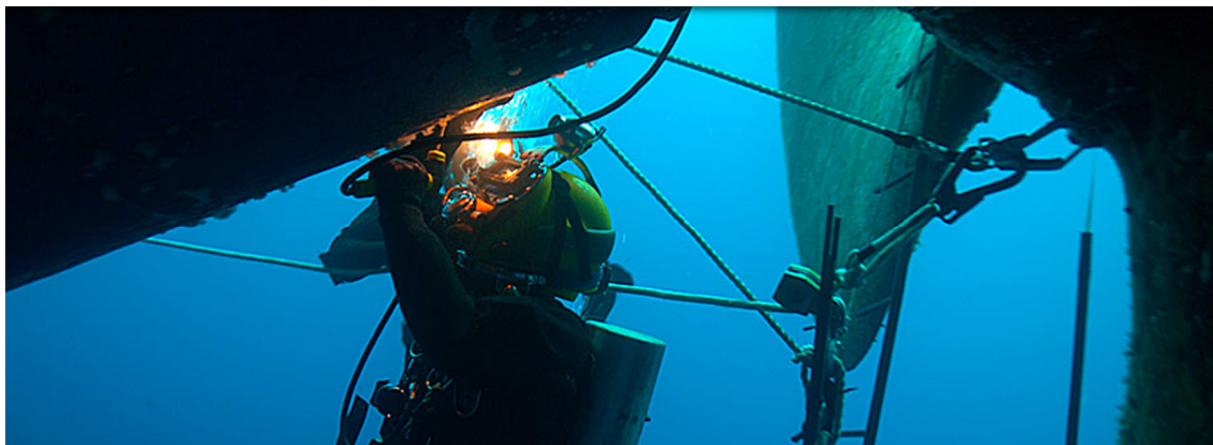
- Automatizacija procesa podvodnog zavarivanja i kontrole podvodnih konstrukcija.
- Istraživanje potencijala uporabe robota i manipulatora za podvodno ultrazvučno ispitivanje zavarenih spojeva složenih geometrija.
- Primjena naprednih tehnika zavarivanja kao što su zavarivanje trenjem i laserom, razumijevanje ponašanja materijala nakon zavarivanja te optimizacija procesa.
- Pronalazak novih postupaka zavarivanja i istraživanje njihove primjene u podvodnom zavarivanju.
- Istraživanje zavarljivosti materijala kod podvodnog zavarivanja.

U proteklih 10-ak godina, status tehnike mokrog podvodnog zavarivanja u svijetu se znatno poboljšao. Tehnika mokrog podvodnog zavarivanja je opće prihvaćena i višestruko upotrebljavana pri održavanju plovnih objekata i “off-shore” postrojenja. Najvažnije aplikacije mokrog podvodnog zavarivanja su [21]:

- Održavanje „*offshore*“ konstrukcija kao što su naftne platforme, cjevovodi odnosno naftovodi (slika 26)
- Popravak i održavanje brodova (slika 27)
- Održavanje brana i mostova
- Izmjena žrtvenih anoda (slika 28)
- Održavanje nuklearnih postrojenja



Slika 26. Popravak naftne platforme podvodnim zavarivanjem [25]



Slika 27. Popravak oštećenja na brodu [26]

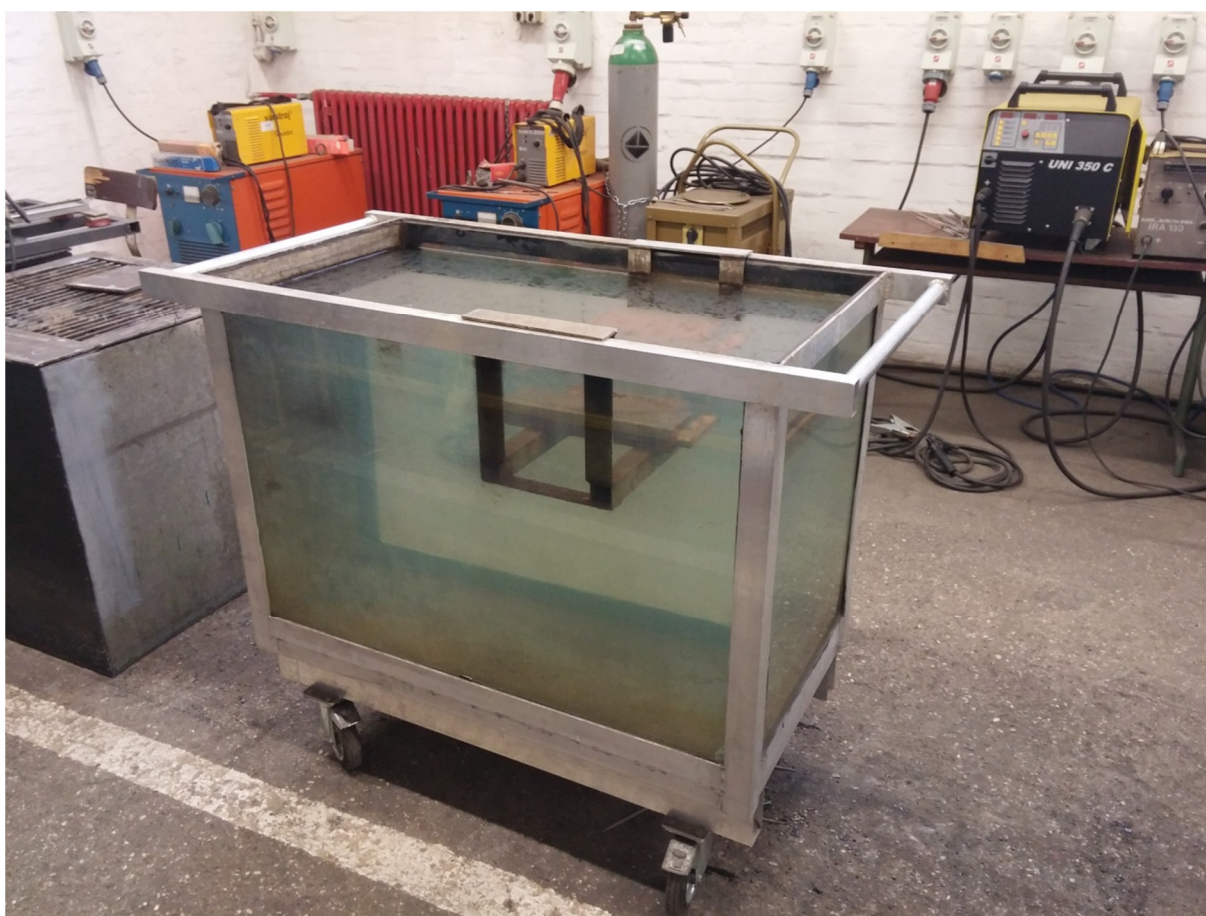


Slika 28. Izmjena cinkove anode [21]

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Cilj eksperimenta jest vizualnom kontrolom ocijeniti prihvatljivost zavara preklopnog spoja zavarenog REL postupkom zavarivanja.

Mokro podvodno zavarivanje provedeno je u laboratorijskim uvjetima u malom bazenu (Slika 29), zapremnine 500 litara. Zavarivanje je provedeno je na dubini od 250 mm, u slatkoj vodi iz gradske opskrbe, temperature 20 do 25 °C.



**Slika 29. Bazen za mokro podvodno zavarivanje**

Osnovni materijal ploča debljine 10 mm je konstrukcijski čelik S235JR vlačne čvrstoće  $R_m=235 \text{ N/mm}^2$ . U tablici 2 prikazan je kemijski sastav čelika.



Tablica 2. Kemijski sastav čelika S235JR prema EN 10025-2:2004 [27]

Kemijski element	C	Mn	P	S	N	Cu	Si
Maseni udio, maks. %	0,17	1,40	0,040	0,040	0,012	0,55	-

Za izvor struje koristio se kompaktni inverterski uređaj UNI 350C namijenjen je za MIG/MAG, REL i TIG zavarivanje. Proizvođač izvora struje je Uljanik TESU SZZ d.o.o. Na slikama 30 i 31 prikazan je izvor struje i njegove karakteristike.



Slika 30. Izvor struje

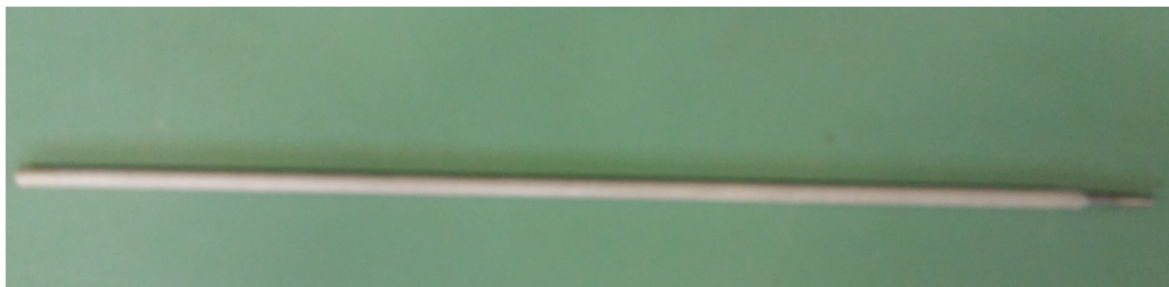


Slika 31. Karakteristike izvora struje

Kao dodatni materijal koristile su se Lastek elektrode promjera 4mm (slika 32), namijenjene za podvodno zavarivanje. Obloga elektrode premazana je prozirnim slojem polimera koji održava stabilnost obloge i sprječava prodor vode te je ujedno i izolator čime se povećava sigurnost ronilaca i stabilnost električnog luka. Preporuča se primjena istosmjerne struje DC na minus (-) polu. Struja zavarivanja za elektrodu promjera 4mm smije biti od 130 do 220A, pritom napon praznog hoda ne smije biti viši od 65V [28, 29]. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek prikazana su tablicom 3.

Tablica 3. Mehanička svojstva metala zavara elektrode Lastek 1008 [28]

Uvjeti zavarivanja	Vlačna čvrstoća $R_m, N/mm^2$	Istezljivost $A, \%$	Kontrakcija $Z, \%$	Udarne radnja loma $K_v$
Suho zavarivanje	540	26	70	62 J pri 0°C
Mokro zavarivanje	564	12 do 13,5	47	50 do 54 J pri -20°C

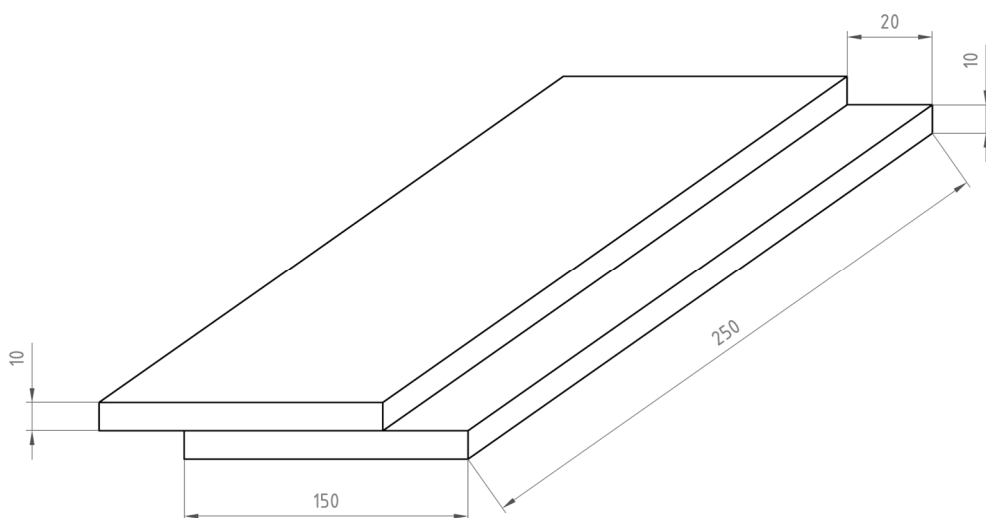


**Slika 32. Lastek elektroda za podvodno REL zavarivanje**

Prije početka podvodnog zavarivanja potrebno je bilo zavariti pomoćne zavare kako bi se ploče učvrstile te pozicionirati ploče u bazenu (slika 33). Geometrija ploča odnosno preklopnog spoja prikazana je na slici 34.



**Slika 33. Preklopni spoj pripremljen za podvodno zavarivanje**



**Slika 34. Geometrija ploča (spoja)**

Nakon pripreme ploča slijedilo je podvodno zavarivanje REL postupkom (slika 35). Elektroda je prilikom zavarivanja bila spojena na minus pol izvora struje. Za prvih 125 mm zavara struja zavarivanja je bila 200A a napon 24V, nakon čega je struja promjenjena na 220A pri čemu je napon bio 26V.



**Slika 35. Moko podvodno REL zavarivanje**

Nakon zavarivanja, tračnom pilom izrezana su dva uzorka širine približno 32mm. Uzorke je bilo potrebno izbrusiti, prvo je slijedilo grubo strojno brušenje a kasnije fino brušenje. Prilikom finog brušenja koristio se brusni papir granulacije 320 a za završno brušenje brusni papir granulacije 600. Nakon brušenja površine uzoraka nagrizzane su otopinom NITAL-a (3%-tna dušična kiselina u etilnom alkoholu). Površine uzoraka snimljene su modularnim stereomikroskopom (slika 36).





**Slika 36. Modularni stereomikroskop Leica MZ6**

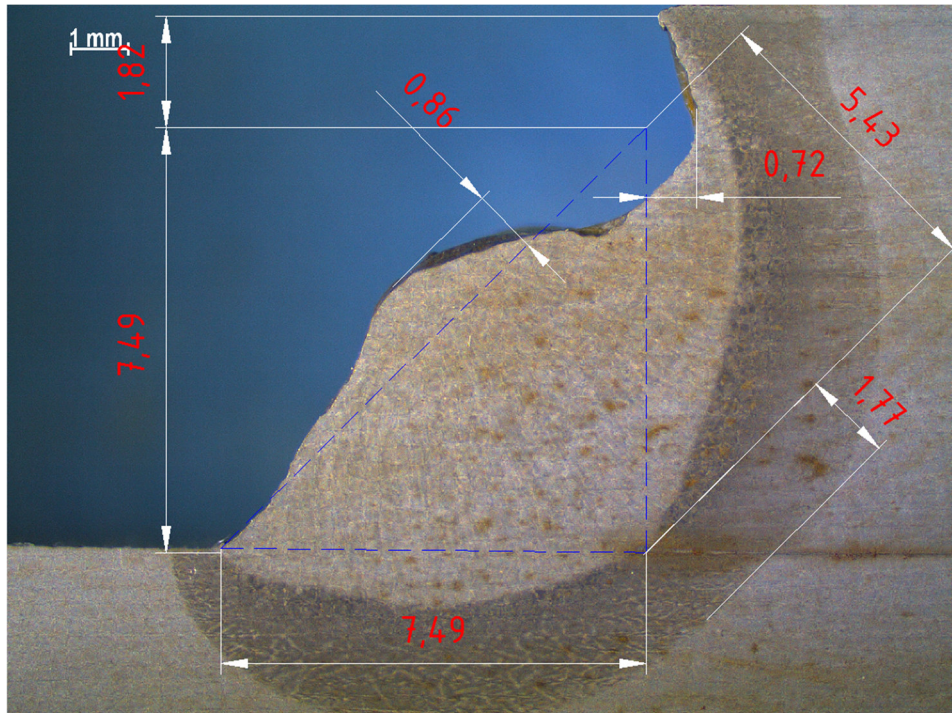
### **3.1. Vizualna kontrola**

Nakon provedbe vizualne kontrole na uzorcima uočeno je nekoliko grešaka. Iako nisu uočene nikakve pukotine ni porozitet, na oba uzorka došlo je do pojave ugorina. Razlog pojavi ugorine je bio predugačak električni luk te premali kut između elektrode i radnog komada. Isto tako na oba uzorka uočena je i nepravilna geometrija zavara odnosno asimetričnost i nadvišenje što je posljedica otežane kontrole nad električnim lukom uslijed ograničene vidljivosti u bazenu. Nakon određivanja geometrije zavarenog spoja vidi se jasna razlika između uzoraka 1 i 2. Zavar na uzorku 1 ima širi profil zavara od uzorka 2 iako se zavarivalo manjom strujom. Razlog tome je razlika u brzini zavarivanja, pretpostavlja se da je uzorak 2 zavarivan većom brzinom. Isto tako vidimo bolje protaljšivanje materijala te širi ZUT kod uzorka 2 zbog većeg unos topline odnosno veće struje.

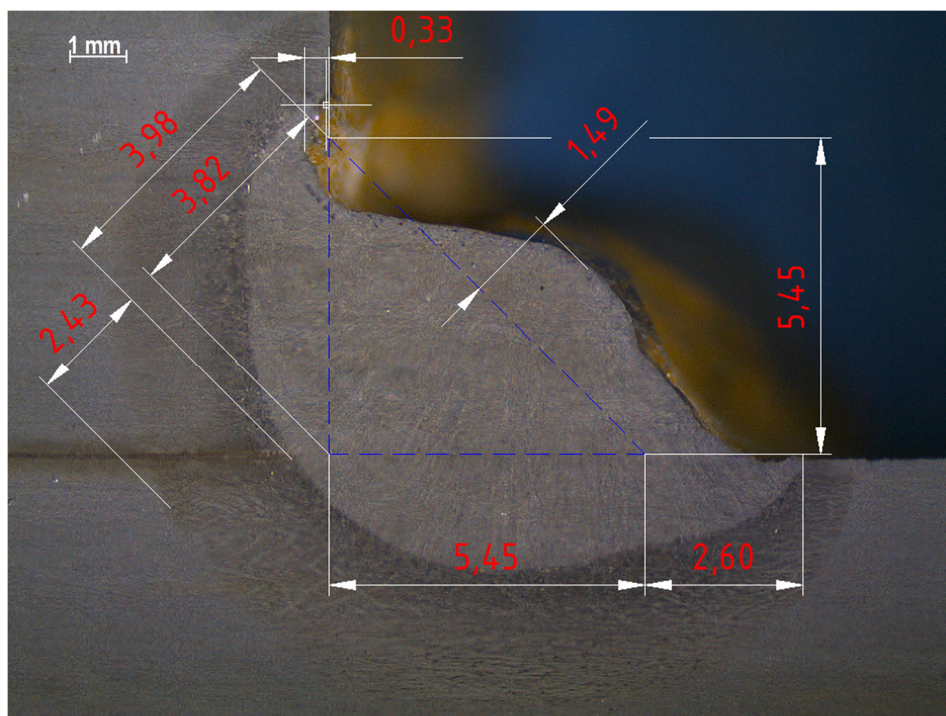
Ocjenjivanje prihvatljivosti zavara provodilo se prema normi AWS D3.6M:1999, te je ustanovljeno da je dubina ugorine i visina nadvišenja na oba zavarena spoja u dopuštenim vrijednostima, ali ni jedna klasa zavara prema normi ne dopušta asimetričnost zavarenog spoja, stoga su oba zavarena spoja ocjenjena neprihvatljivim.

Na idućim slikama prikazane su dobivene geometrije zavarenih spojeva s pripadajućim parametrima zavarivanja.





Slika 37. Uzorak 1 (I=200A, U=24V)



Slika 38. Uzorak 2 (I=220A, U=26V)

#### 4. ZAKLJUČAK

Zadnjih godina dolazi do ubrzanog razvoja podvodnog zavarivanja. Pored ručnog zavarivanja sve se više važnosti pridaje automatskom zavarivanju. Razlog leži u činjenici da se osvajaju sve veće dubine, prije svega zbog traženja i iskorištavanja novih nalazišta nafte i plina ispod morske površine. Takvi poslovi zahtijevaju visoku razinu kvalitete i dugi radni vijek konstrukcije. Stoga su postavljeni standardi vrlo visoki. Mokro podvodno zavarivanje svoju ulogu nalazi u nešto manjim dubinama, ali je njegova prednost u odnosu na druge tehnike zavarivanja u mobilnosti, nižoj cijeni te efikasnosti. Problemi koji se javljaju kod mokrog podvodnog zavarivanja kao što su hladne pukotine i porozitet pokušavaju se riješiti razvojem novih dodatnih materijala ali i razvojem novih postupaka mokrog podvodnog zavarivanja. Tako danas u dubinama do 50 m kvaliteta zavara sve se manje razlikuje od kvalitete zavara postignutih na zraku. Glavni razvojni cilj je zadržati istu razinu kvalitete na većim dubinama i podizanje mehaničkih svojstava zavara postignutih mokrim podvodnim zavarivanjem.

U eksperimentalnom dijelu rada koji proveden u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje pojavili su se problemi koji su karakteristični za mokro podvodno zavarivanje. Nakon provedenog zavarivanja preklopnog spoja REL postupkom koji je pokazao dobre karakteristike stabilnosti i održavanja električnog luka pod vodom, vizualnom kontrolom prema normi AWS D3.6M:1999 uočeno je nekoliko grešaka. U metalu zavara i ZUT-u nisu uočene pukotine ni poroznost ali uočene su ugorine te nepravilna geometrija zavara. Greške su se pojavile na oba uzorka što nam ukazuje da pojavljivanje grešaka nije ovisno o parametrima zavarivanja. Stoga se zaključuje da je pojava grešaka uzrokovana radi otežane kontrole električnog luka uslijed ograničene vidljivosti u bazenu.

## LITERATURA

- [1] <http://proizvodno-strojarstvo.blogspot.com/2011/07/podvodno-zavarivanje.html>;  
16.08.2015
- [2] J. D. Majumdar; Underwater welding - present status and future scope, Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, *br.3*, 2006., str. 39-48
- [3] A. Smajover; Podvodno zavarivanje u otežanim uvjetima; Zavarivanje u pomorstvu, Haludovo, 1998.
- [4] <http://www.nhctesting.com/hyperbaric-welding/>; 18.08.2015
- [5] <http://www2.wisd.net/archive/industrialtech/WELDING/WELDLESSONS/UNDERWATERWELDING.htm>; 18.08.2015
- [6] <http://waterwelders.com/underwater-welding-history/>; 20.08.2015
- [7] Ivan Mikulić; Diplomski rad - Analitički i eksperimentalni pristup određivanju zavarljivosti pri mokrom podvodnom zavarivanju, FSB Zagreb, 2014
- [8] I. Garašić; Doktorski rad - Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju, FSB Zagreb, 2008.
- [9] D. J. Keates; Professional divers manual on wet-welding, Cambridge, 1990.
- [10] R. L. Johnson; The effect of water temperature on underbead cracking of underwater wet weldments, Monterey, 1997.
- [11] I. Juraga, K. Ljubić, M. Živčić; Pogreške u zavarenim spojevima, Zagreb, 1998.
- [12] E. Padillaa, N. Chawlaa, L.F. Silvab, V.R. dos Santos, S. Paciornik; Image analysis of cracks in the weld metal of a wet welded steel joint by three dimensional (3D) X-ray microtomography, Materials characterization, 2013. str. 139-144
- [13] K. A. Yushchenko, Y. Y. Gretski, S. Y. Maksimov; Under water wet welding and cutting; Study of physico-metallurgical peculiarities of wet arc welding, Middlesbrough, 1998.
- [14] P. Szelagowski; Wet welding as a "serious" repair procedure, Haludovo, 1998.
- [15] <http://www.scribd.com/doc/251842463/Opasnosti-podvodnog-zavarivanja#scribd>;  
25.08.2015

- [16] I. Garašić, Z. Kožuh, Slobodan Kralj; Podvodno mokro zavarivanje i podvodno ispitivanje u održavanju pomorskih objekata, FSB Zagreb.
- [17] <http://waterwelders.com/stinger-electrode-machine/>; 03.09.2015
- [18] S. Kralj, Š. Andrić; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Zagreb, 1992.
- [19] <http://www.pondt.hr/zavarivanjeall.pdf>; 04.09.2015
- [20] S. Kralj, Z. Kožuh i I. Garašić; Stanje i trendovi razvoja podvodnog zavarivanja i nerazornih ispitivanja; časopis Zavarivanje, br. 48, 2005.
- [21] I. Garašić; Postupci zavarivanja-Mokro podvodno zavarivanje, prezentacija.
- [22] <http://www.scubaverse.com/careers-as-a-commercial-diver/>.05.09.2015
- [23] <http://www.welding-advisers.com/Preview3.html>.; 05.09.2015
- [24] P. T. Delanue; Offshore Structural Repair Using Specification For Underwater Welding, AWS D3.6, Welding Journal, 1987., str. 32-43
- [25] <http://www.carpenters.org>; 06.09.2015
- [26] <http://www.all-sea.com/>; 06.09.2015
- [27] <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/141/>; 08.09.2015
- [28] Katalog proizvođača Lastek
- [29] <http://www.lastek.eu>; 08.09.2015

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**