

# Primjena austenitnih elektroda u mokrom podvodnom REL zavarivanju

---

Zovko, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*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:235:258769>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-18**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Zovko**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Ivan Zovko

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentoru profesoru dr. sc. Ivici Garašiću na vodstvu i ukazanoj pomoći prilikom izrade završnog rada. Iskreno se zahvaljujem asistentici Andrei Zaninović koja je svojim savjetima, strpljenjem i pomoći upotpunila ovaj rad. Hvala i laborantima koji su proveli eksperimentalni dio rada kao i svima koji su u njemu sudjelovali.

I za kraj, posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima koji su me podržali na ovom putu.

*Ivan Zovko*



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: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Zovko** Mat. br.: 0035214551

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena austenitnih elektroda u mokrom podvodnom REL zavarivanju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of austenitic electrodes for underwater manual metal arc welding**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno proučiti mokro podvodno zavarivanje. Opisati opremu i dodatne materijale za mokro podvodno zavarivanje s posebnim osvrtom na konstrukcije načinjene od visokolegiranog austenitnog čelika. Proučiti područje primjene ovisno o vrsti podvodne konstrukcije i navesti primjere primjene mokrog podvodnog zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno postupkom mokrog podvodnog REL zavarivanja austenitnom elektrodom zavariti kutni spoj. Obzirom na korištene parametre zavarivanja potrebno je vizualnom kontrolom ispitati dobiveni zavareni spoj i ocijeniti njegovu kvalitetu.


U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.


Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
1. rok: 18. veljače 2021.  
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.  
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.  
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.  
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

  
Izv.prof.dr.sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:  
  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

# SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. MOKRO PODVODNO REL ZAVARIVANJE.....	2
2.1. Povijesni razvoj.....	2
2.2. Osnovne karakteristike.....	3
2.3. Oprema.....	6
2.3.1. Izvor struje.....	7
2.3.2. Držač elektrode.....	9
2.3.3. Kabel .....	9
2.3.4. Sigurnosna sklopka.....	10
2.3.5. Ronilačka oprema.....	10
2.4. Dodatni materijali .....	12
2.4.1. Austenitne elektrode.....	15
2.5. Tehnike rada.....	16
2.5.1. Tehnika povlačenja.....	16
2.5.2. Tehnika njihanja.....	17
2.5.3. Tehnika „korak unatrag“ .....	17
2.6. Problemi pri zavarivanju.....	18
2.7. Opasnosti podvodnog zavarivanja .....	21
2.8. Razvoj i primjena.....	23

---

3.	OSTALI POSTUPCI KORIŠTENI PRI MOKROM PODVODNOM ZAVARIVANJU .....	26
3.1.	Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom - <i>FCAW</i> .....	26
3.2.	Mokro podvodno zavarivanje trenjem – <i>UFSW</i> .....	28
3.3.	Mokro podvodno zavarivanje laserom – <i>ULBW</i> .....	29
3.4.	Točkasto zavarivanje.....	30
4.	KONSTRUKCIJE NAČINJENE OD VISOKOLEGIRANIH ČELIKA .....	33
4.1.	Općenito o austenitnim nehrđajućim čelicima.....	34
4.2.	Zavarljivost austenitnog Cr-Ni čelika .....	34
5.	EKSPERIMENTALNI RAD.....	36
5.1.	Opis eksperimenta.....	36
5.2.	Vizualna kontrola.....	41
6.	ZAKLJUČAK.....	43
	LITERATURA.....	44
	PRILOZI.....	46

## POPIS SLIKA

<b>Slika 1.</b> Prve izvedbe zavarivanja pod vodom [2] .....	2
<b>Slika 2.</b> Popravak broda u luci Pearl Harbour [4] .....	3
<b>Slika 3.</b> Shematski prikaz zavarivanja REL postupkom u mokroj i suhoj okolini [7] .....	4
<b>Slika 4.</b> Uspostava električnog luka pod vodom [8] .....	5
<b>Slika 5.</b> Oprema za mokro REL podvodno zavarivanje [1] .....	6
<b>Slika 6.</b> Inverter Lincoln Electric Flextec 350x [10] .....	7
<b>Slika 7.</b> Prikaz karakteristika izvora konstantne jakosti struje [11] .....	8
<b>Slika 8.</b> Držać elektrode [13] .....	9
<b>Slika 9.</b> Kabel za podvodno zavarivanje [14] .....	10
<b>Slika 10.</b> Sigurnosna sklopka [15] .....	10
<b>Slika 11.</b> Zavarivač ronilac [16] .....	11
<b>Slika 12.</b> Prikaz uspostavljanja električnog luka [17] .....	12
<b>Slika 13.</b> Elektrode za podvodno mokro REL zavarivanje [20] .....	14
<b>Slika 14.</b> Prikaz zavarivanja tehnikom povlačenja [5] .....	16
<b>Slika 15.</b> Prikaz zavarivanja tehnikom njihanja [5] .....	17
<b>Slika 16.</b> Prikaz zavarivanja tehnikom „korak unatrag“ [5] .....	18
<b>Slika 17.</b> Utjecaj napona i jačine struje na udio difundiranog vodika u zavarenom spoju [17] .....	19
<b>Slika 18.</b> Greške pri podvodnom zavarivanju [5] .....	20
<b>Slika 19.</b> Nastanak hladnih pukotina prilikom mokrog podvodnog zavarivanja [1] .....	20
<b>Slika 20.</b> Pukotine u zavaru [14] .....	21
<b>Slika 21.</b> Opasnosti podvodnog zavarivanja [24] .....	23
<b>Slika 22.</b> Proučavanje podvodnog zavarivanja kroz godine [25] .....	24
<b>Slika 23.</b> Reparacija nosača platforme [26] .....	25
<b>Slika 24.</b> Reparacija propelera [27] .....	25
<b>Slika 25.</b> Prikaz FCAW-S postupka zavarivanja [5] .....	26
<b>Slika 26.</b> Prikaz FCAW-G postupka zavarivanja [5] .....	27
<b>Slika 27.</b> Dobavljač žice kod mokrog podvodnog zavarivanja FCAW postupkom [5] .....	27
<b>Slika 28.</b> Oprema kod FCAW zavarivanja [5] .....	28
<b>Slika 29.</b> Prikaz podvodnog zavarivanja UFSW postupkom [17] .....	29
<b>Slika 30.</b> Shema provođenja laserskog zavarivanja pod vodom [29] .....	30
<b>Slika 31.</b> Shema općeg prikaza točkastog zavarivanja [31] .....	31
<b>Slika 32.</b> Izgled upravljačke ploče za podešavanje parametara zavarivanja [32] .....	31
<b>Slika 33.</b> Izgled zavara nakon provedenog podvodnog točkastog zavarivanja [33] .....	32



<b>Slika 34.</b> Mikrostruktura austenitnog čelika [36].....	34
<b>Slika 35.</b> Bazen za izvođenje podvodnog zavarivanja.....	36
<b>Slika 36.</b> Izvor struje korišten za izvođenje eksperimenta.....	37
<b>Slika 37.</b> Karakteristike izvora struje.....	37
<b>Slika 38.</b> Elektrode EZ-KROM 30 R.....	38
<b>Slika 39.</b> Vodonepropusne elektrode za podvodno zavarivanje .....	38
<b>Slika 40.</b> Priprema radnog komada.....	39
<b>Slika 41.</b> Provođenje zavarivanja pod vodom.....	40
<b>Slika 42.</b> Izgled zavara nakon podvodnog zavarivanja.....	40
<b>Slika 43.</b> Rezanje gotovog radnog komada.....	41
<b>Slika 44.</b> Makroizbrusak zavara.....	42

**POPIS TABLICA**

<b>Tablica 1.</b> Usporedba brzine hlađenja u suhoj i mokroj okolini ( $U = 29$ V do 32 V, $v_z=6,3$ m/h) 18
<b>Tablica 2.</b> Fizikalna svojstva glavnih grupa visokolegiranih čelika i nelegiranih čelika [34] ..... 33
<b>Tablica 3.</b> Mehanička svojstva i kemijski sastav metala zavara [39] ..... 38

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\varnothing$	mm	promjer
$I$	A	jakost struje
$R_m$	$N/mm^2$	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	$N/mm^2$	konvencionalna granica razvlačenja
$s$	m	put
$t$	s	vrijeme
$T$	°C	temperatura
$U$	V	napon
$v$	m/s	brzina
$V$	L	volumen

## **POPIS KRATICA**

<b>ZUT</b>	Zona utjecaja topline
<b>REL</b>	Ručno elektrolučno zavarivanje
<b>FCAW</b>	Flux Cored Arc Welding
<b>UFSW</b>	Underwater Friction Stir Welding
<b>ULBW</b>	Underwater Laser Beam Welding

## **SAŽETAK**

Teorijski dio rada detaljnije opisuje postupak mokrog podvodnog REL zavarivanja. Objašnjene su osnovne karakteristike postupka te navedeni problemi koji se mogu javiti prilikom izvođenja istog. Opisana je oprema zavarivača ronioca kao i dodatni materijali koji se koriste pri izvođenju mokrog podvodnog zavarivanja, moguće opasnosti koje se javljaju te primjena samog zavarivanja.

Eksperimentalni je dio rada proveden na prostoru Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zavarivanje. Mokrim podvodnim REL zavarivanjem zavaren je kutni spoj gdje je osnovni materijal izrađen od nehrđajućeg čelika. Nakon zavarivanja izrezan je jedan uzorak koji je nagrizen te mu je vizualnom kontrolom ocijenjena prihvatljivost zavarenog spoja prema normi AWS D3.6M:1999.

## **SUMMARY**

The theoretical part of the paper describes the procedure of wet underwater REL welding in more detail. The basic characteristics of the procedure are explained, as well as the problems that may arise during its performance. The equipment of the diver's welder is described, as well as the additional materials used in performing wet underwater welding, the possible dangers that occur and the application of the welding itself.

The experimental part of the work was carried out in the Welding Laboratory of the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. Wet underwater REL welding welded the corner joint where the base material is made of stainless steel. After welding, one sample was cut and etched, and the acceptability of the welded joint was assessed by visual inspection according to the AWS D3.6M: 1999 standard.

## 1. UVOD

Brojne pomorske konstrukcije predstavljaju osnovu ekonomske i strateške važnosti pojedine regije u gospodarstvu. Svjedoci smo velikih ulaganja u nove projekte, ali i u postojeću infrastrukturu. Razvoj naftne industrije i povećani intenzitet pomorskog prijevoza potaknuli su na otkrivanje novih tehnologija rada pod vodom. Cilj je ovoga rada istražiti nove tehnologije i postupke koji će smanjiti trenutne troškove održavanja i reparacija, a ujedno i povećati produktivnost i smanjiti cijenu izvođenja radova.

Podvodno mokro zavarivanje svoju primjenu pronašlo je u ugradnji, popravljanju i održavanju raznih pomorskih konstrukcija i objekata. Svi brodovi, platforme, cjevovodi i ostale konstrukcije stradaju uslijed korozije, zamora materijala, sudara s drugim pomorskim objektom i/ili prilikom nepovoljnih vremenskih uvjeta. Čest su rezultat zavarivanja onečišćenje ekološkog sustava te nenadoknadivi ljudski gubici zbog neadekvatnog održavanja i rukovanja postrojenjem.

Postavljanje cjevovoda na sve dublje razine ispod vode (čak i do 1000 m pa i dublje) prisiljava inženjere na konstantno ulaganje u znanje kako bi se potakao razvoj novih tehnologija i tehnika rada koje bi smanjile troškove, povećale produktivnost i bile jednostavnije za izvođenje. Neki su od projekata dali izvrsne rezultate, ali su zbog visoke cijene izvođenja radove i svoje slabe fleksibilnosti bili osuđeni na neuspjeh. Kao ekonomičan se i prilagodljiv proces zavarivanja pokazalo podvodno mokro zavarivanje REL postupkom. U početku je mokro REL zavarivanje bilo sinonim za zavarivanje nisko kvalitetnih zavara. Zbog manjka znanja i educiranosti izvođača ti su zavari bili puni pukotina, poroznosti i uključka troske što je uvelike smanjivalo mehanička svojstva zavara. Poboljšanjem tehnike rada, razvojem i odgovarajućim odabirom dodatnog materijala i izvora struje to se promijenilo. Također, dobro uvježban i educiran tim koji se sastoji od ronioca zavarivača te nadzornog tima na kopnu predstavlja temelj kvalitetno izvedenog zavara. Danas je podvodno mokro REL zavarivanja neizostavna tehnika u izvođenju reparacija i remonta na pomorskim objektima.

## 2. MOKRO PODVODNO REL ZAVARIVANJE

### 2.1. Povijesni razvoj

Prvi podatci koji spominju podvodno rezanje, a koje je usko povezano s podvodnim zavarivanjem datiraju od 1918. godine. Taj dokaz opisuje popravke parnog broda St. Paul. Podvodno se zavarivanje dugo smatralo nemogućim i neizvedivim i predstavljalo je samoubojstvo za zavarivača koji se odluči uspostaviti električni luk pod vodom. Sve je te teze srušio je ruski inženjer Konstantin Khrenov 1932. godine. Konstantin Khrenov je bio prvi čovjek koji je u laboratoriju uspješno izveo zavareni spoj pod vodom. Prema njegovim riječima je najveća prepreka u ostvarivanju kvalitetnog podvodnog zavara bilo nekontrolirano isparavanje vode koje je u obliku mjehurića izlazilo na površinu i tako ometalo stabilnost električnog luka i uzrokovalo nastanak pora. On i njegovi pomoćnici radili su na otklanjanju tog problema te su uspješno razvili vodonepropusni premaz za elektrodu i prilagodili izvor struje podvodnom zavarivanju. Nakon brojnih zavara izvedenih u laboratorijskim uvjetima, počela su i prva uspješna testiranja u moru [1].



**Slika 1.** Prve izvedbe zavarivanja pod vodom [2]

Sovjetski je savez tijekom Prvog svjetskog rata krenuo u primjenu podvodnog zavarivanja kako bi nadoknadio štete na pomorskoj floti. Otkrića mladog znanstvenika Khrenova i moguć ponovni sukob privukli su veliku pozornost. Prva velika primjena podvodnog zavarivanja bila je tijekom Drugog svjetskog rata kada su zabilježeni brojni popravci brodova u luci Pearl Harbour [3].





**Slika 2.** Popravak broda u luci Pearl Harbour [4]

Podvodno mokro zavarivanje provodilo se već tada poznatim REL postupkom odnosno ručnim elektrolučnim zavarivanjem. Glavna primjena bila je popravljanje i brtvljenje pukotina na brodskim trupovima, ali često se koristilo i za gradnju i obnovu luka i obala.

Dolaskom *off-shore* tehnologije, podvodno zavarivanje počinje se koristiti i za popravke morskih platformi, postrojenja, podvodnih spremnika i cjevovoda. Većinom su se zavarivali kutni spojevi limova manjih debljina. Zavarivanje se većinom provodilo na dubinama do 50 m gdje se za disanje pod vodom koristio komprimirani zrak. Kao izuzetak u Meksičkom zaljevu izveden je pokusni projekt u kojem se provelo zavarivanje na 180 m dubine. Dubina od 70 m ronionicima zavarivačima predstavljala je gornju granicu za „sigurno“ izvođenje REL zavarivanja tijekom čega su koristili specijalne smjese plinova za disanje.

Osim podvodnog mokrog REL zavarivanja kroz vrijeme su se počele razvijati i nove tehnologije podvodnog zavarivanja. Tako su države članice bivšeg SSSR-a počele razvijati postupak zavarivanja pomoću punjene žice, a Japan je 90-ih godina razvio nov mehanizirani postupak „zavarivanja s vodenom zavjesom“ gdje je kao „zavjesa“ služio mlaz vode u obliku stošca. Ipak, vrijeme je pokazalo da je ručno elektrolučno zavarivanje postiglo najveću primjenu u izvođenju podvodnih radova [5].

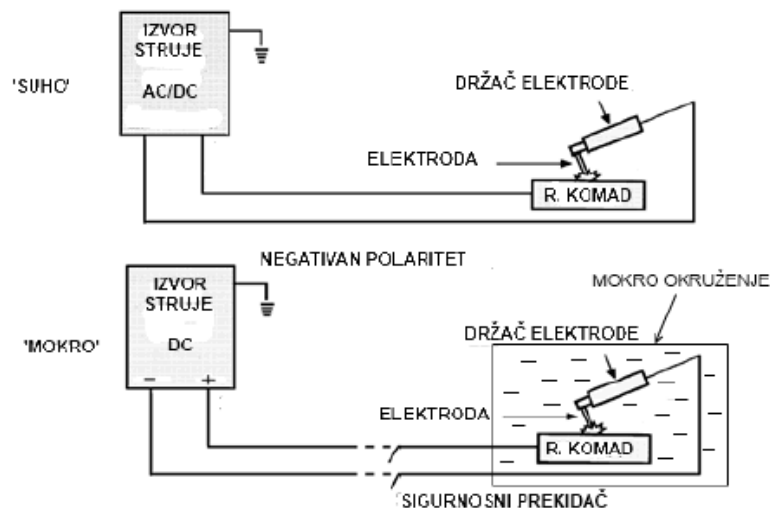
## **2.2. Osnovne karakteristike**

Podvodno mokro REL zavarivanje prva je primjenjivana tehnika spajanja dva metalna dijela pod vodom. U početcima je služila za reparaciju brodova i raznih podvodnih struktura, ali dugo se smatrala samo tehnologijom spajanja metala drugog reda jer su zavareni spojevi imali loša mehanička svojstva. Razvojem mokrog podvodnog zavarivanja ostvaren je veliki napredak i tako se našlo u samom vrhu prema primjenjivanim tehnikama u održavanju i gradnji podvodnih objekata. Zbog svoje prilagodljivosti i nižih troškova dobilo komercijalnu

prednost nad suhim podvodnim zavarivanjem iako se ovime dobivaju kvalitetniji zavareni spojevi. Međutim, pojavom novih materijala, većim brojem instaliranih podvodnih cjevovoda i raznih podvodnih objekata te povećanjem dubine na kojoj se radovi vrše zahtjeva se veći razvoj automatiziranih tehnika zavarivanja kako bi se povećala kvaliteta zavarenog spoja i izbjegle eventualne opasnosti za ronioce zavarivače [6].

Osnovne karakteristike podvodnog mokrog REL zavarivanja su [1]:

- Nestabilan električni luk koji uzrokuje nepravilnost u geometriji zavara, nedovoljnu penetraciju, uključke troske i porozitet.
- Velika brzina hlađenja što rezultira visokom tvrdoćom u zoni utjecaja topline (ZUT), niskom žilavošću i pojavom poroziteta zbog zarobljenih plinskih mjehurića.
- Visok udio vodika u električnom luku, rastaljenom metalu i talini zavara koji kasnije ostaje zarobljen u metalu zavara i ZUT-u što smanjuje mehanička svojstva zavara i uzrokuje hladne pukotine i porozitet.
- Visok udio kisika u električnom luku, rastaljenom metalu i talini zavara uzrokuje oksidaciju, snižava udio legiranih elemenata i smanjuje mehanička svojstva zavara.
- Otapanje i raspad vodootporne obloge što dovodi do gubitka stabilnosti luka i poroziteta.

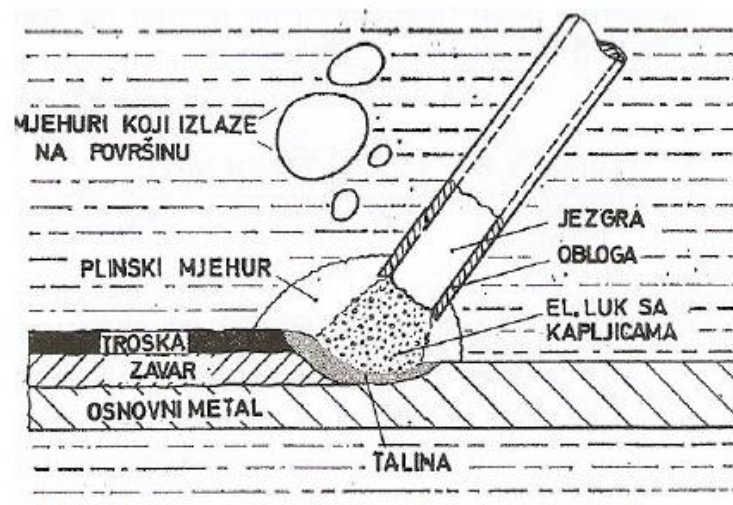


**Slika 3.** Shematski prikaz zavarivanja REL postupkom u mokroj i suhoj okolini [7]

Princip REL zavarivanja pod vodom vrlo je sličan onom koji se izvodi na suhom (Slika 3.). Za podvodno mokro zavarivanje koristi se obložena elektroda koja je pričvršćena na držač elektrode koji je kablom spojen na izvor struje. Prilikom dodira elektrode i radnog komada

uspostavlja se električni luk koji tali elektrodu i radni komad. Kasnijim skrućivanjem taline nastaje zavareni spoj.

Bitna razlika u REL zavarivanju koje se izvodi pod vodom i onog na suho jest u samom izvoru struje. Za suho zavarivanje koriste se izvori istosmjerne ili izmjenične struje dok se kod podvodnog REL zavarivanja koriste samo izvori koji daju istosmjernu struju. Znanost je dokazala da istosmjerni izvori struje, korišteni za podvodno zavarivanje, omogućuju lakšu uspostavu i vođenje električnog luka. Važno je napomenuti da su i opasnosti od strujnog udara manje [7].



**Slika 4.** Uspostava električnog luka pod vodom [8]

Električni se luk kod podvodnog mokrog zavarivanja održava u plinsko-panom mjehuru koji nastaje disocijacijom vode i izgaranjem elektrode (Slika 4.). Duljina električnog luka povezana je s iznosom napona. Ako zavarivač odmiče elektrodu od radnog komada, duljina električnog luka će se povećati i napon će rasti. To će narušiti kvalitetu zavarenog spoja. Zato je važno da podvodne radove izvode iskusni zavarivači ronioci koji znaju kontrolirati i održavati električni luk jednakim.

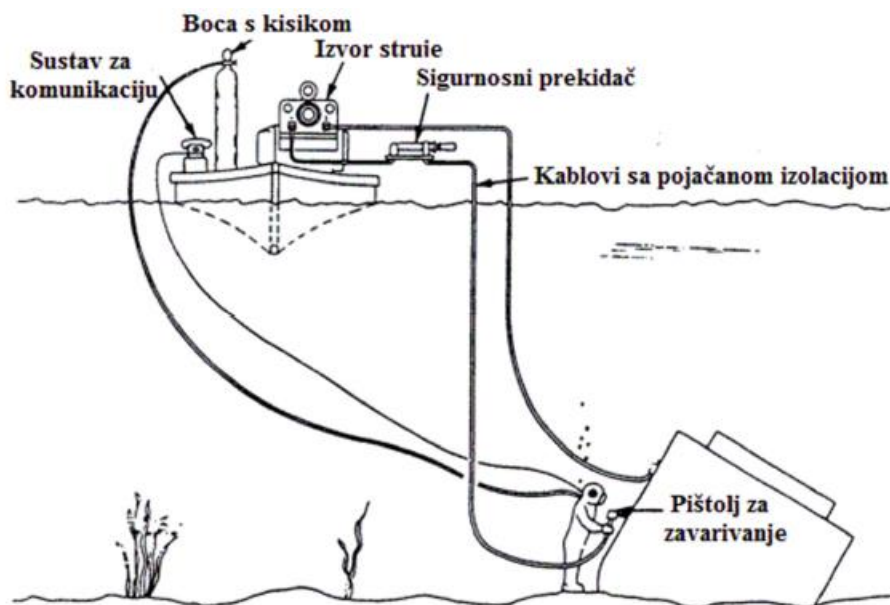
Preko mjehurića koji izranjaju na površinu gubi se 15 % – 20 % toplinske energije. Razlog tome je velika razlika između temperature električnog luka (3000 °C do 5000 °C) i temperature vode (najčešće od 5 °C do 20 °C). Iz tog se razloga za mokro zavarivanje koristi približno 15 % veća jakost struje. Plinski mjehurić štiti talinu kod prijenosa materijala s vrha elektrode na radni komad. On služi i kako bi usporio hlađenje zavara koji će time imati bolju mikrostrukturu i mehanička svojstva.

Elektroda se najčešće spaja na negativni (-) pol izvora struje kako bi se omogućilo ujednačeno taljenje elektrode i kako bi se proizvela veća količina topline na radnom komadu, a i mjehurići su pravilnijeg oblika. Pozitivni (+) pol rijetko se spaja na elektrodu. Primjenjuje se samo kada se koriste elektrode većih promjera. Tada se većina topline prebacuje na elektrodu te ona brže izgara i popunjava zavar [5].

### 2.3. Oprema

Oprema kod podvodnog mokrog zavarivanja REL postupkom slična je opremi koja se koristi pri zavarivanju na suho. Zbog razlike u mediju kojim se zavarivanje vrši, potrebne su određene modifikacije zbog sigurnosti samog ronioca. Opremu dijelimo na opremu za zavarivanje i ronilačku opremu. Cjelokupna oprema mora zadovoljiti sigurnosne propise i, istovremeno, zavarivaču osigurati optimalne radne uvjete zbog ograničenog vremena zadržavanja pod vodom. Oprema mora biti redovito održavana kako bi se osigurala njezina ispravnost i produžio joj se vijek trajanja.

U opremu za zavarivanje (Slika 5.) spadaju istosmjerni izvor struje (kojem je snižen napon praznog hoda zbog smanjenja opasnosti od strujnog udara), držač elektrode (pištolj za zavarivanje), posebni kabeli s povećanom izolacijom, sigurnosna sklopka i elektrode za zavarivanje [1].



**Slika 5.** Oprema za mokro REL podvodno zavarivanje [1]

Zavarivača ronioca obavezno nadzire pomoćni tim dok izvodi zavarivanje u vodi. Pomoćni tim nalazi se na kopnu te je sa zavarivačem roniocem u stalnoj komunikaciji preko

sustava za komunikaciju te se brinu kako bi se zavarivaču osigurala dovoljna količina zraka, dovoljna količina elektroda i alata, a ujedno reguliraju parametre zavarivanja i brinu o sigurnosti samog zavarivača. Organizacija je radova za zavarivanje od ključne važnosti i sve se vodi prema već dogovorenim planovima i protokolima. U slučaju nepredviđenih situacija ili prekida komunikacije s pomoćnim timom ronilac je primoran napustiti mjesto rada kako bi izbjegao eventualne opasnosti [9].

### 2.3.1. Izvor struje

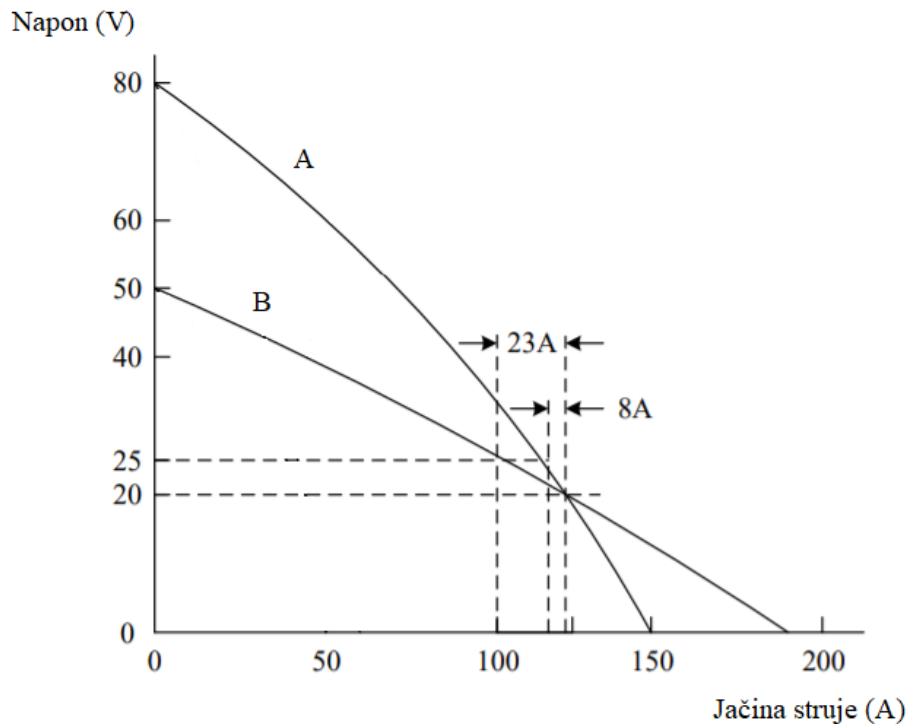
Kod mokrog podvodnog REL zavarivanja koristi se istosmjerni izvor struje. Razlog tome je osiguravanje veće sigurnosti zavarivača ronioca i minimiziranje pojave poteškoća pri održavanju samog električnog luka.

Izmjenična struja ne smije se koristiti za podvodno rezanje ili zavarivanje zbog velike opasnosti od strujnog udara. Električni udar proizveden izmjeničnom strujom sprječava samovoljno opuštanje mišića ruku te ronilac možda neće moći pustiti opremu za zavarivanje iz ruku, ako dođe do strujnog udara.



**Slika 6.** Inverter Lincoln Electric Flextec 350x [10]

Prikazani inverter (Slika 6.) ima strmo padajuću karakteristiku izvora struje. Upravo strmo padajuća karakteristika ili karakteristika konstantne jakosti struje koristi se za mokro podvodno REL zavarivanje. Kod strmo padajuće karakteristike promjena napona tj. duljina električnog luka znatno ne utječe na iznos jačine struje. Izvor struje održava jakost struje približno jednakom i time elektroda izgara jednakom brzinom bez obzira na manju izmjenu vrijednosti napona [5].



**Slika 7.** Prikaz karakteristika izvora konstantne jakosti struje [11]

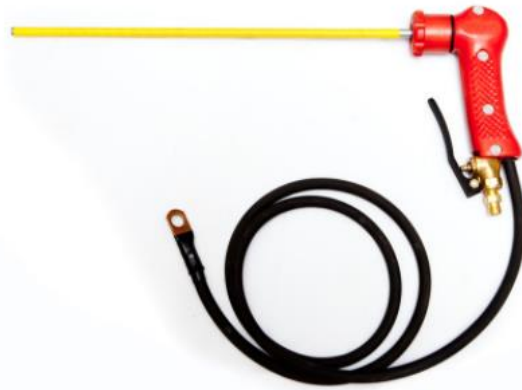
Krivulju A (Slika 7.) karakterizira napon praznog hoda koji iznosi 80 V. Poveća li se duljina električnog luka, povećat će se i napon. To je čest slučaj kod podvodnog zavarivanja jer je otežano praćenje električnog luka zbog nepreglednosti. Uzme li se povećanje napona s vrijednosti 20 V na 25 V (povećanje od 25 %), jakost struje pada s vrijednosti 123 A na 115 A (smanjenje od 6,5 %). Promjena struje puno je manja od promjene napona što dovodi do zaključka da bi se elektroda nastavila taliti gotovo konstantno, iako se povećala duljina električnog luka. U slučaju krivulje B, napon praznog hoda postavljen je na 50 V. Ako se usporede dvije krivulje na grafu, krivulja B je blažeg nagiba. Tada bi povećanje napona sa 20 V na 25 V uzrokovalo smanjenje jakosti struje sa 123 A na 100 A. Jakost struje smanjuje se za 19 % što nije zanemarivo [11].

Za izvođenje zavarivačkih radova pod vodom potrebno je osigurati izvor struje koji proizvodi minimalno 300 A. Uporabom slabijih strojeva produžit će se vrijeme zavarivanja, a time i vrijeme zadržavanja zavarivača pod vodom. Sama dubina na kojoj zavarivač izvodi radove može utjecati na pad napona. Za veće dubine potreban je duži kabel, a tako raste i

udaljenost koju struja mora prijeći kako bi stigla do mjesta rada. Iz tog razloga izvori struje moraju osigurati dovoljno visok napon praznog hoda [1].

### 2.3.2. *Držać elektrode*

Glavne značajke pištolja za zavarivanje odnosno držače elektrode (Slika 8.) su adekvatna zaštita i trajnost s obzirom na dubinu na kojoj se izvodi zavarivanje. Držać elektrode je konstruiran tako da bi se omogućila jednostavna izmjena elektroda. Kod podvodnog REL zavarivanja koriste se posebni držači elektrode koji su napravljeni samo za tu upotrebu, ne sadrže opruge i izolirani su neprovodljivim materijalima. Držači za podvodno zavarivanje razlikuju se od onih koje se koriste za zavarivanje na zraku. Kod držača za podvodno zavarivanje, elektroda se može ugraditi samo u jednom položaju (45 ° ili 90 °) dok oni obični dopuštaju polaganje i kombiniranje elektrode pod 45 ° i pod 90 °. Prije svakog korištenja mora se provjeriti ispravnost držača [12].



**Slika 8.** Držać elektrode [13]

### 2.3.3. *Kabel*

Kod podvodnog zavarivanja koriste se posebni zavarivački kablovi s povećanom izolacijom (Slika 9.). Povećana izolacija sprječava kontakt električne struje i vode, što može ugroziti sigurnost ronionca ili proizvesti probleme pri zavarivanju.

Minimalni preporučeni površinski presjek kabla je 50 mm<sup>2</sup>. Time se smanjuje pad napona i prekomjerno zagrijavanje što može dovesti do raspada izolacije i kasnijih mogućih problema. Moguće je i spajanje kablova manjih dimenzija na pištolj za zavarivanje kako bi se povećala elastičnost kabla i olakšao rad zavarivaču. U obzir moramo uzeti pad napona čija vrijednost raste i s duljinom kabla. Preporučuje se što manja dužina kablova (do 15 m) i čista

izvedba spojeva kabla kako bi se smanjio utjecaj pada napona. Radi sigurnosnih razloga kablovi moraju biti dodatno izolirani s više slojeva plastične trake ili gume [14].



**Slika 9.** Kabel za podvodno zavarivanje [14]

#### **2.3.4. Sigurnosna sklopka**

Radi sigurnosti prilikom podvodnog zavarivanja potrebno je imati i sigurnosnu sklopku (Slika 10.). Sigurnosna sklopka nalazi se na kopnu, a njenim isključivanjem prekida se strujni krug. Na znak zavarivača ronioca preko komunikacijskog sustava operater iz pomoćnog tima isključuje ili uključuje sigurnosnu sklopku. Bitno je za naglasiti da operater ne smije bez dopuštenja i kasnijeg obavještenja isključiti ili uključiti sklopku.

Prilikom primjene same sklopke vrijede sljedeća pravila:

1. Strujni krug mora cijelo vrijeme biti isključen, osim kad se zavarivač sprema za zavarivanje.
2. Sklopka mora biti adekvatno pozicionirana kako bi operater mogao lako upravljati njome.



**Slika 10.** Sigurnosna sklopka [15]

#### **2.3.5. Ronilačka oprema**

Osnovna oprema zavarivača ronioca sadrži [1]:

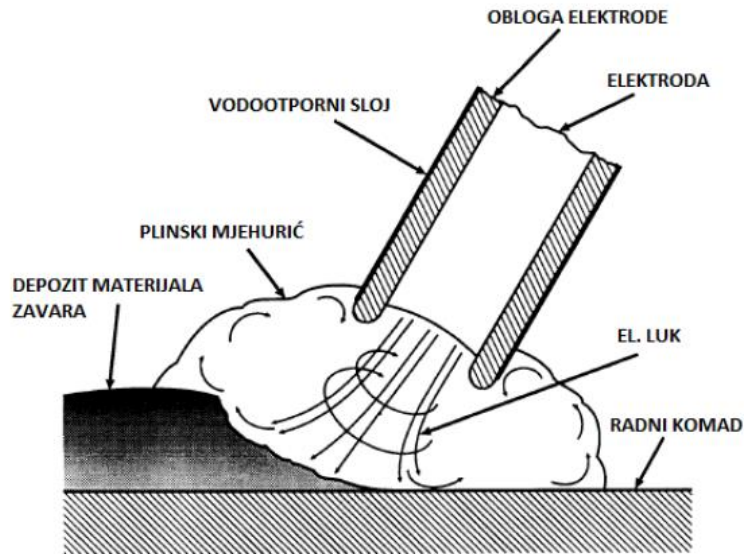


1. Zavarivačka maska za cijelo lice – ronilac mora nositi masku sa zaštitnim staklom i posebnim lećama odabranim prema uvjetima u kojima se zavarivanje vrši
2. Gumene rukavice služe kao zaštita i izolacija zavarivača
3. Ronilačko odijelo štiti ronioca i održava njegovu tjelesnu temperaturu.  
Bira se s obzirom na temperaturu vode:
  - 30 °C do 20 °C – suha odijela bez pododijela
  - 20 °C do 15 °C – suha odijela sa pododijelom
  - 15 °C do 5 °C – suha odijela s debljim pododijelom
  - 5 °C do -2°C – odijela s grijanjem
4. Boca sa zrakom i ventilom za regulaciju
5. Crijevo za dotok zraka, vanjski spremnik zraka te kompresor koji puni spremnike zraka
6. Hiperbarička komora za dekompresiju – u slučaju ronilačkih nesreća
7. Komunikacijski uređaj
8. Ampermetar – preporučuje se korištenje dodatnog ampermetra kojim zavarivač mjeri i daje preciznije podatke o jakosti struje zavarivanja
9. Ostatak opreme: npr. peraje, svjetiljke, kamere, pneumatski i hidraulični alati te alati koji se koriste prilikom zavarivanja kao što su uređaji za držanje i centriranje radnih predmeta, čekić, žičana četka itd.



Slika 11. Zavarivač ronilac [16]

## 2.4. Dodatni materijali



**Slika 12.** Prikaz uspostavljanja električnog luka [17]

Kao dodatni materijal kod podvodnog mokrog REL zavarivanja koriste se vodootporne elektrode. Najvažnija razlika između normalne elektrode za zavarivanje i elektrode za podvodno zavarivanje je vodonepropusni premaz. Podvodne elektrode moraju biti izuzetno vodootporne. Vodonepropusna obloga istovremeno izgara s elektrodom i štiti od direktnog kontakta elektrode s vodom.

Prilikom zavarivanja na vrhu elektrode stvara se mali krater koji održava električni luk i postojanje parno – plinskog luka. Funkcija vodonepropusnog premaza je zaštita obloge od utjecaja vode. Ako je premaz vodopropustan, vruća voda ući će u oblogu elektrode i lagano će je otkidati s metalne jezgre. Namočena obloga postaje i električni vodljiva te će se time dodatno narušiti električna stabilnost luka. Dodatne probleme može proizvesti salinitet vode i vodik koji se skuplja na površini metalne jezgre. Zato se moraju osigurati visoki zahtjevi za vodonepropusnost premaza [6].

Glavna uloga takvih elektroda je lako uklanjanje troske s površine zavara te što niža razina otopljenog vodika u zavaru. Premali iznosi struje i kemijska agresivnost medija, odnosno vode, često rezultiraju nemogućnošću uspostave i održanju električnog luka i njegovim prekidanjem. Dodavanjem aditiva u elektrode povećava se stabilnost i uspostava električnog luka i smanjuje udio vodika. Dobre rezultate pokazuju elektrode s dvostrukom oblogom koje uspješno sprječavaju ulazak vode u elektrodu i njeno uništavanje. Obloge ne mogu adekvatno zaštititi elektrodu, ako se ona nalazi duži period u vodi. Preporučuje se da se uzima onoliko

elektroda koliko se može iskoristiti unutar 30 minuta. U elektrode kod mokrog podvodnog zavarivanja dodaju se aditivi na bazi nikla, titana ili cirkonija, a svojstva samih elektroda mogu varirati od dubine na kojima se one upotrebljavaju [17].

Obloge kod elektroda imaju tri uloge:

- električnu
- fizičku
- metaluršku.

Pod električnom ulogom podrazumijeva se pravilna uspostava i održavanje električnog luka. Kako bi se olakšala uspostava i održavanje luka elektrodi se dodaju plinovi koji se prilikom izgaranja elektrode oslobađaju te ioniziraju područje između elektrode i radnog komada.

Fizička uloga osigurava lakše zavarivanje u svim položajima. Kod zavarivanja u prisilnim položajima traži se povišena viskoznost taline koja bi se odupirala gravitaciji. U fizičku ulogu elektrode ubraja se i zaštita metalne taline od plinova koji mogu uzrokovati greške u zavaru.

Metalurška uloga ima ulogu legiranja, otplinjavanja i rafinacije. Legiranjem se nadomještavaju legirni elementi koji izgaraju prilikom zavarivanja. Otplinjavanjem se žele ukloniti štetni plinovi koji uzrokuju greške u zavaru kao što su vodik i kisik. Rafinacijom eliminiramo fosfor i sumpor iz taline zavara na način da se oni vežu u spojeve koji se kasnije izbacuju u obliku troske [18].

Osnovna podjela elektroda za izvođenje podvodnih radova je na [19]:

- elektrode za zavarivanje
- elektrode za rezanje.

Elektrode za mokro podvodno zavarivanje možemo podijeliti prema vrsti metalne jezgre:

- feritne
- austenitne
- na bazi nikla.

Najviše se upotrebljavaju feritne elektrode dok se austenitne elektrode i one na bazi nikla upotrebljavaju pri zavarivanju čelika s povišenim udjelom vodika. Međutim, ne

preporučuje se korištenje elektroda na bazi nikla na dubinama većim od 10 m zbog stvaranja poroziteta u zavaru. Zbog manjeg unosa topline, plinovi ne stignu izići i ostaju zarobljeni u metalu zavara [17]. Nehrđajući i dupleks čelici zavaruju se posebnim elektrodama.

Elektrode možemo podijeliti i s obzirom na vrstu obloge [18]:

- rutilne
- bazične
- celulozne
- oksidirajuće
- elektrode sa željeznim prahom
- elektrode s mješovitim oblogama.

Rutilne elektrode pokazuju najbolje rezultate za primjenu u mokrom podvodnom REL zavarivanju. Električnom luku daju odličnu stabilnost, zavareni spojevi lijepog su izgleda i posjeduju zadovoljavajuća mehanička svojstva, a troska se lako čisti. Usporede li se s bazičnim elektrodama, rutilne daju nešto manju žilavost metalu zavara [20].

Ako se doda željezni prah u oblogu elektrode, smanjit će se utjecaj difundiranog ugljika na nastanak hladnih pukotina. Dodavanjem titana i bora dobivamo kvalitetniji zavareni spoj s boljim mehaničkim svojstvima te smanjiti šanse za nastanak poroziteta. Male količine mangana poboljšat će mehanička svojstva zavara, a dodavanjem kalcijeva karbonata  $\text{CaCO}_3$  (udjela 9 % do 12 %) smanjit će se porozitet zavara [6].



**Slika 13.** Elektrode za podvodno mokro REL zavarivanje [20]

Ove su elektrode (Slika 13.) razvijene na Fakultetu strojarstva i brodogradnje i napravljene su i razvijene isključivo za uporabu pri podvodnom mokrom zavarivanju.

Zaštićene su dvostrukim zaštitnim premazom koji omogućava lagano uspostavljanje električnog luka i njegovo vođenje uz adekvatnu zaštitu elektrode od njezinog raspada. To omogućava zavarivaču ronioncu duži period zavarivanja i boravak pod vodom. Rutilnim elektrodama ne može se kontrolirati udio vodika u zavarenom spoju i iz tog razloga, ponekad, koriste se posebne elektrode za zavarivanje. One se već tijekom proizvodnje podvrgavaju dodatnim toplinskim obradama kako bi se maksimalno izvukla vlaga iz njih. Uporabom posebnih elektroda smanjit će se udio disociranog vodika u zavarenom spoju. Svaka elektroda mora imati jasno navedene informacije gdje se i u kojim uvjetima koristi dana elektroda i parametre zavarivanja koje moramo postaviti prilikom zavarivanja [20].

#### **2.4.1. Austenitne elektrode**

Austenitne elektrode otapaju velike količine disociranog vodika i izvlače ga iz zavara. One mogu zadržati u svom sastavu vodik u čvrstom stanju i time smanjuju uvjete za nastanak hladnih pukotina. Hladne pukotine bitno smanjuju kvalitetu zavara i najčešća su greška koja se javlja pri podvodnom mokrom zavarivanju. Austenitne elektrode daju dobre iznose vlačne čvrstoće, no često dolazi do pojave ravnomjerno raspoređenog poroziteta. Zbog razlike u toplinskom širenju između metala zavara (feritni) i elektrode koja je austenitna dolazi do mogućnosti pucanja zbog zaostalih naprezanja. Iako eliminiraju vodik iz zavara i time smanjuju opasnosti od formiranja hladnih pukotina, uporaba austenitnih elektroda je ograničena zbog nastanka pukotina po granici ZUT-a [17].

Istraživanja su pokazala da austenitne elektrode uistinu smanjuju udio vodika u zavaru i time pojavu hladnih pukotina pri mokrom podvodnom zavarivanju. Također je otkriveno da uporabom nekih austenitnih elektroda dobivamo austenitnu mikrostrukturu na zraku dok zavarivanjem u vodi one daju martenzitnu mikrostrukturu. O nastaloj mikrostrukturi odlučuje sama mikrostruktura metala zavara i brzo hlađenje koje se javlja u vodi. Imamo razne izvedbe austenitnih elektroda koje se koriste u komercijalnoj upotrebi, a najčešće su [18]:

- R142
- E316L
- E309-16, E310-16.

## 2.5. Tehnike rada

Iako se iskusni zavarivači koriste i svojim tehnikama zavarivanja, one proizlaze iz triju osnovnih tehnika rada:

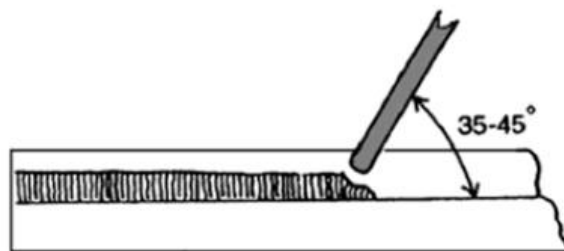
- tehnike povlačenja
- tehnike njihanja
- tehnike „korak unatrag“.

Prije početka zavarivanja potrebno je dobro pripremiti spoj zavara. S mjesta zavarivanja moraju se ukloniti sve nečistoće. One mogu biti anorganske (kao hrđa ili oksidi metala) ili organske poput naslaga podvodnih organizama. Kako bi se ostvario kvalitetan zavareni spoj, čišćenje je potrebno provesti poslije svakog prolaza.

### 2.5.1. Tehnika povlačenja

Tehnika povlačenja (Slika 14.) je najjednostavnija tehnika korištena kod mokrog podvodnog zavarivanja. Zavarivač ronilac istovremeno povlači elektrodu i lagano ju pritišće kako se ona tali. Cijelo vrijeme zavarivač mora održavati dobar kut između elektrode i radnog komada te mora paziti na brzinu zavarivanja. Da bi se omogućilo pravilno odvođenje mjehurića, kut elektrode tijekom zavarivanja treba biti unutar  $35^\circ$  i  $45^\circ$ . Sama brzina povlačenja proizlazi iz održavanja kuta elektrode i radnog komada. Ako je nagib kuta veći, zavar će biti širi uz veću penetraciju te je brzina povlačenja elektrode manja. Ova tehnika je pogodna za zavarivanje sučeljenih spojeva, a može se upotrijebiti za zavarivanje u svim položajima [1].

Ovom tehnikom moguće je zavariti zavare debljine 5 mm s elektrodama promjera 5 mm u jednom prolazu. Zavar će imati približno istu čvrstoću kao i zavar koji je izveden s tri prolaza. Zavarivanje u više prolaza otežano je jer se gubi linija vođenja i kontroliranja električnog luka. Najveća prednost ove tehnike je kraće vrijeme zavarivanja i jednostavnost izvođenja zavara. Nema naknadnog čišćenja troske i lako je održavanje takvih zavara [21].

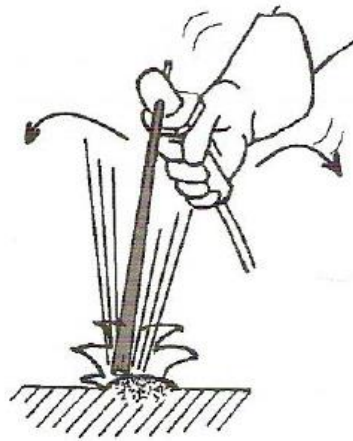


**Slika 14.** Prikaz zavarivanja tehnikom povlačenja [5]

### 2.5.2. Tehnika njihanja

U ovoj tehnici rada zavarivač njiše elektrodu odnosno mijenja kut nagiba točke tj. spojnice držača elektrode i elektrode tijekom zavarivanja (spuštanjem i dizanjem elektrode u vertikali). To rezultira većim depozitom metala i sprječava se neravnomjerno taljenje elektrode.

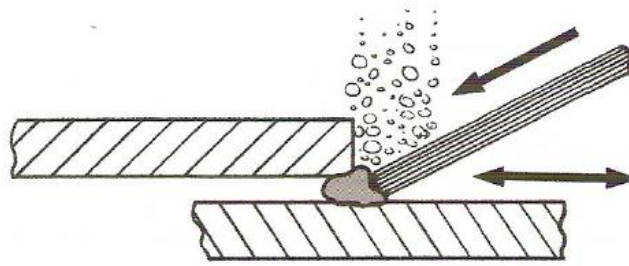
Kutovi elektroda prilikom mokrog zavarivanja često su manji od kutova kod suhog zavarivanja. Tada vrh elektrode neujednačeno izgara, odnosno točka elektrode koja se nalazi bliže radnom komadu prije se tali. Električni luk se premješta u točku elektrode najbližu radnom komadu i dolazi do neravnomjernog izgaranja elektrode. Kako bi se to izbjeglo zavarivači se koriste tehnikom njihanja. Tehnikom njihanja najbolje se zavaruje korijen zavara kutnih spojeva [8].



**Slika 15.** Prikaz zavarivanja tehnikom njihanja [5]

### 2.5.3. Tehnika „korak unatrag“

Osnovni princip rada ove tehnike temelji se na odugovlačenju zavarivača s pomicanjem elektrode. Umjesto da zavarivač povlači elektrodu dalje dužinom zavara on je pomakne par milimetara prema talini zavara. Ovom tehnikom koriste se napredniji zavarivači koji posjeduju dobre vještine zavarivanja i imaju dobru kontrolu nad talinom. Tehnikom „korak unatrag“ dobiva se veća penetracija i širina zavara te se smanjuje brzina hlađenja zavara što rezultira boljim mehaničkim svojstvima. Iz tog razloga, koristi se kao zadnji prolaz kod zavarivanja kutnih spojeva kako bi se eliminirale eventualne greške nastale u prethodnim prolazima. Podvodno mokro zavarivanje kutnih spojeva najčešće se provodi kroz najmanje tri prolaza [5].



**Slika 16.** Prikaz zavarivanja tehnikom „korak unatrag“ [5]

## 2.6. Problemi pri zavarivanju

Podvodno je zavarivanje prikladno za hitne popravke oštećenih konstrukcija u moru gdje su demontaže objekata kompleksne. Time se štedi vrijeme, energija radnika i novac. Međutim, primjena podvodnog zavarivanja može imati i negativan utjecaj na konstrukciju. Nepravilnom se izvedbom i pogrešno podešenim parametrima konstrukcija može lako oštetiti što će u većini slučajeva smanjiti njenu konstrukcijsku nosivost.

Čest rezultat zavarivanja pod vodom je slabija kvaliteta zavara. Uzrok su tome izravan kontakt električnog luka i vode i velike brzine hlađenja. U podvodnom zavarivanju brzine hlađenja taline i radnog komada veće su 4 do 5 puta. Visoke temperature taline i niske temperature vode (koje nekad znaju doseći temperature i do 5 °C) rezultiraju velikom temperaturnom razlikom između taline i vode. Posljedično, zavareni spojevi izvedeni pod vodom imaju udio martenzita u svojoj strukturi koji daje povišenu tvrdoću, a smanjuje žilavost i čvrstoću. Zbog krhke su strukture zavari izvedeni pod vodom skloni pucanju.

**Tablica 1.** Usporedba brzine hlađenja u suhoj i mokroj okolini ( $U = 29 \text{ V}$  do  $32 \text{ V}$ ,  $v_z = 6,3 \text{ m/h}$ ) [22]

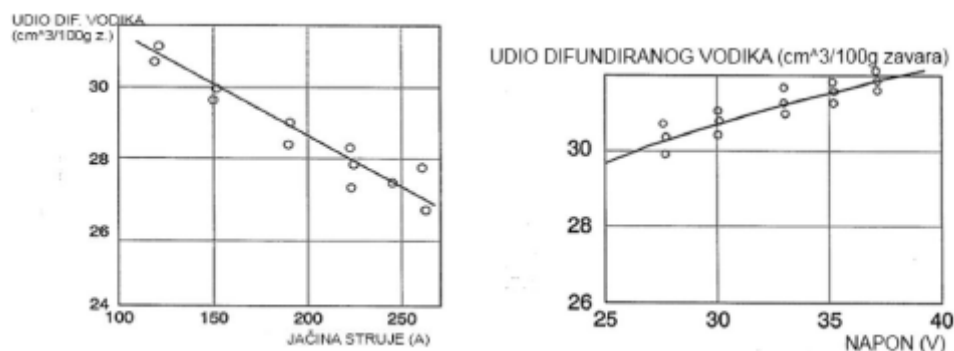
Struja, A	Okolina	Brzina hlađenja, °C / s	
		od 800°C do 500°C	od 500°C do 300°C
230...250	Zrak	6.8	2.1
300...320		2.1	1.6
200...210	Slatkovodna voda	30.0	20.0
300...320		16.6	14.7
200...220	Morska voda saliniteta 10 ‰	31.0	22.6
300...320		19.6	16.5
200...220	Morska voda saliniteta 30 ‰	37.5	26.0
300...320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



Brojna su istraživanja bazirana na produljivanju vremena hlađenja kod podvodnog zavarivanja. Upotrebom se izolacijskih masa ili prilagodbom postupka zavarivanja produljuje vrijeme hlađenja. Međutim, takva rješenja znatno povećavaju zahtjeve prilikom izvođenja radova te su primjenjiva samo na određene tipove konstrukcija [14].

Tijekom isparavanja i disocijacije vode te izgaranjem elektrode formiraju se veliki udjeli vodika (62 % – 82 %  $H_2$ ) te ugljikov monoksid, ugljikov dioksid, kisik i dušik. Zbog povećane količine vlage dolazi do disocijacije vodika u zavaru. Takvi zavari imaju između 30 mL do 80 mL prisutnosti vodika na 100 g zavara. Uglavnom vodik u zavareni spoj ulazi iz vodene pare, ali i pri izgaranju elektrode koja u sebi ima povećani udio vlage. Povišena koncentracija vodika, tvrda i krhka mikrostruktura i velika zaostala naprezanja pospješuju nastanak hladnih pukotina. Posebnim se tehnikama zavarivanja nastoji smanjiti temperatura hlađenja i tako eliminirati vodik iz zavara [5].

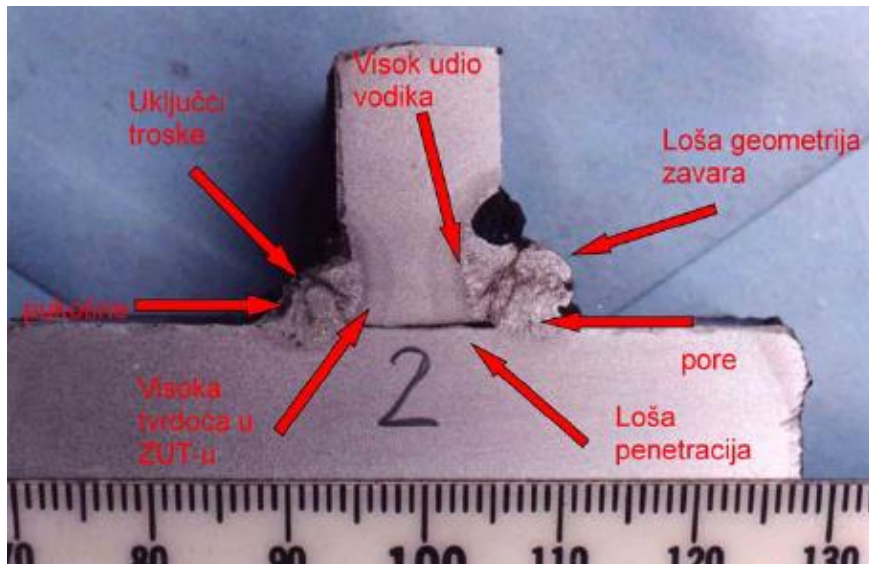
Istraživanja su pokazala da difundirani vodik u zavaru pada s porastom jačine struje, a raste kod povećanja napona (Slika 17.).



**Slika 17.** Utjecaj napona i jačine struje na udio difundiranog vodika u zavarenom spoju [17]

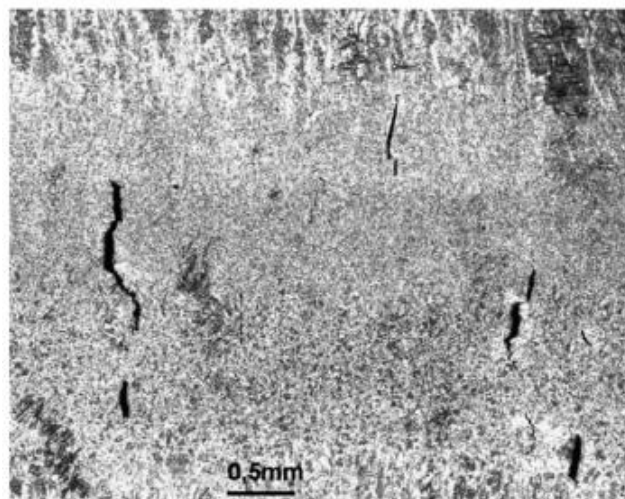
Zaključno, kod podvodnog zavarivanja, jača struja, niski napon i negativni polaritet elektrode, tj. veći unos topline, smanjuju udio difundiranog vodika u zavaru [17].

Zarobljeni su plinovi, koji su zbog naglog hlađenja ostali u zavaru, potencijalni inicijatori pukotina i smanjuju kvalitetu zavarenog spoja. Porastom dubine, na kojima se podvodno zavarivanje provodi, raste i hidrostatski tlak. Veći će hidrostatski tlak omogućiti vodi prodiranje u oblogu elektrode i oslabiti operativno svojstvo električnog luka. Visok hidrostatski tlak smanjuje električni luk i veći se dio topline gubi u okolnom mediju. Posljedica je loša geometrija zavara, uključci troske, loša penetracija i porozitet (Slika 18.).



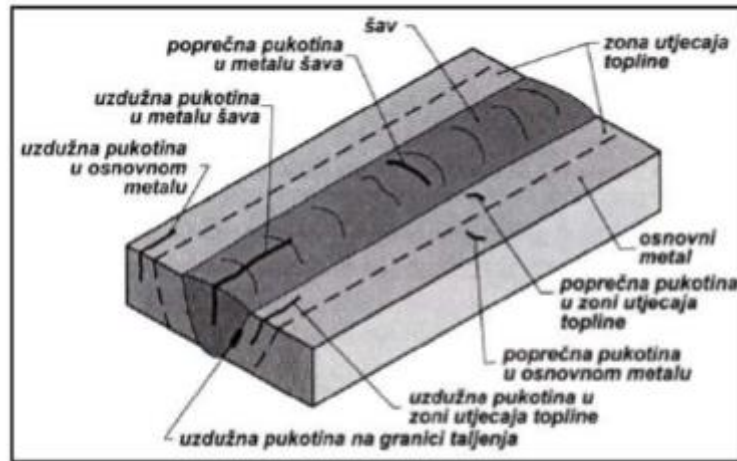
**Slika 18.** Greške pri podvodnom zavarivanju [5]

Smanjena je vidljivost jedan od glavnih problema kod podvodnog zavarivanja. Nedostatak prirodnog svjetla, sitne čestice u vodi i isparavajući mjehurići otežavaju rad pod vodom. Ronilac zavarivač mora imati zadovoljene minimalne uvjete vidljivosti kako bi formirao zavareni spoj određene kvalitete. Praćenje električnog luka i taline jedna je od najvažnijih stavki kod zavarivanja. Kod podvodnog zavarivanja razvijene su tehnike koje smanjuju negativan utjecaj loše vidljivosti [5]. Hladne pukotine nastaju pri hlađenju zavora na temperaturama ne višim od 200 °C – 250 °C. Hladne pukotine (Slika 19.) mogu nastati i nekoliko dana nakon što je zavarivanje provedeno.



**Slika 19.** Nastanak hladnih pukotina prilikom mokrog podvodnog zavarivanja [1]

One najčešće nastaju u zoni ZUT-a i metalu zavara. Mogu biti orijentirane okomito ili paralelno na uzdužnu os zavara, a mogu biti i orijentirane pod bilo kojim kutom s obzirom na uzdužnu os. Mogu biti površinske ili se nalaziti unutar zavara [14].



**Slika 20.** Pukotine u zavaru [14]

Hladne pukotine nastaju zbog visokog sadržaja vodika i velike brzine hlađenja koja uzrokuje visoku tvrdoću zavara i uz prisutnost zaostalih i vanjskih naprezanja. Hladne pukotine mogu se minimizirati optimiziranjem parametara zavarivanja, mikrolegiranjem ili zavarivanjem u zaštiti plina. Razvojem se opreme, tehnika zavarivanja i propisa navedene greške nastoje eliminirati ili svesti na minimum.

## 2.7. Opasnosti podvodnog zavarivanja

Posao ronioca zavarivača slovi kao jedan od najopasnijih poslova u svijetu. Istraživanja pokazuju da stopa smrtnosti od podvodnog zavarivanja iznosi oko 15% što zanimanje podvodnog zavarivača čini do 1000 puta opasnijim od zanimanja jednog policajca [23]. Postoji mnogo propisa koji se primjenjuju kako bi se eliminirale situacije opasne po zdravlje i život ronioca.

Jedna od najvećih opasnosti podvodnog zavarivanja je opasnost od strujnog udara. Zavarivanje zahtjeva uporabu električne struje koja u kombinaciji s vodom može rezultirati smrtnim slučajem. Ako oprema nije prilagođena izvođenju radova pod vodom ili nije održavana na način kako je propisano, može doći do ozbiljnih problema. Preporučuju se pažljivi pregledi i testiranje opreme prije nego puštanja u rad. Također, nakon obavljenog zavarivanja pod vodom sklopka se isključuje kako bi se prekinuo strujni krug. To će smanjiti i eliminirati rizik od strujnog udara.

Veliku opasnost prilikom podvodnog zavarivanja predstavlja mogućnost podvodne eksplozije prilikom izvođenja radova. Kombinacija vodika i kisika koji se oslobađaju pri zavarivanju može stvoriti „džepove“ koji su vrlo eksplozivni. Podvodna eksplozija u većini slučajeva rezultira smrću ronioca.

Bolest dekompresije ili „ronilačka bolest“ javlja se pri brzom padu tlaka (izranjanje, brz izlazak iz hiperbarične komore...) gdje otopljeni plinovi u tijelu stvaraju mjehuriće u krvnim žilama. Simptomi ove bolesti su osip, bol u zglobovima, paralize i neurološki problemi, a teški slučajevi mogu završiti smrtonosno. Danas ronionci kao dio opreme imaju računala koje prate dubine, vrijeme trajanja urona i zadržavanja pod vodom, a koja im računaju vrijeme i raspored rekompresije. Međutim, samo 50 % ronioca koje je zahvatila dekompresijska bolest izron su izvršili pravilno. To govori da se učestalost dekompresijske bolesti nije smanjila usprkos primjeni moderne tehnologije i računala prilikom ronjenja.

Izmjenična magnetska polja koja se razvijaju prilikom rezanja i zavarivanja pod vodom često štete zubnim plombama. One izazivaju sekundarne struje u usnom tkivu ronioca što može dovesti i do loma zubi.

Mnogi ronionci žalili su se i na oštećivanje sluha, a neki ga čak i izgubili. Velik broj ronioca imao je problema i s gubitkom pamćenja i verbalnom disfunkcijom. Neki od izvođača radova pod vodom imali su problema i s oštećivanjem njihovih pluća, uha ili nosa zbog visokog tlaka na kojima su vršili radove. Također, morske životinje itekako mogu omesti rad zavarivača i smanjiti mu koncentraciju pri izvođenju radova pa čak i ugroziti njegov život.

Zbog svih je opasnosti koje su prethodno navedene, zanimanje ronioca – zavarivača jedno od najplaćenijih zanimanja u svijetu. Kako bi se sve opasnosti svele na minimum, ronilac je u stalnoj komunikaciji s pomoćnim timom koji se nalazi na kopnu i koji poduzima eventualne mjere zaštite [3].

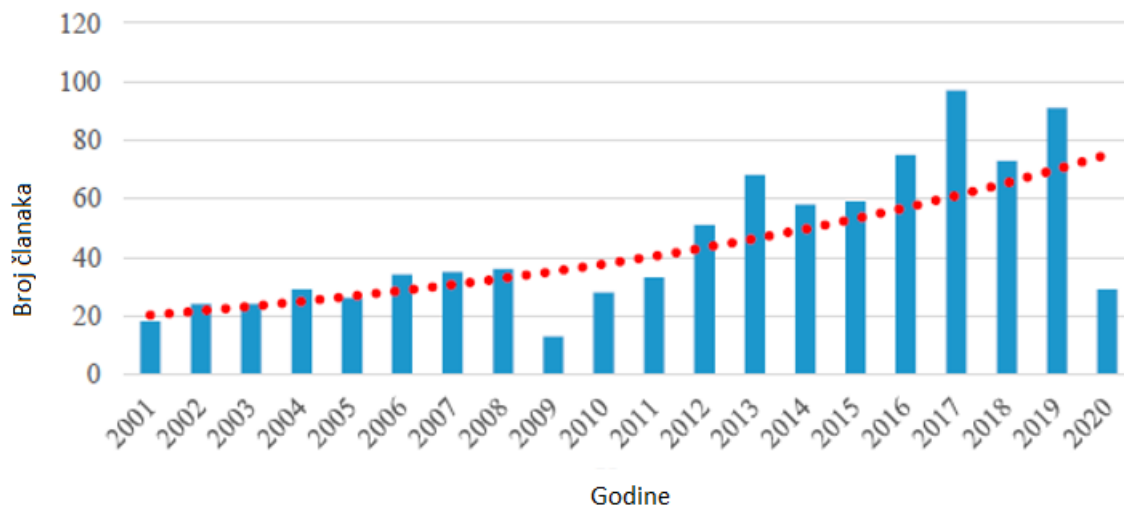


**Slika 21.** Opasnosti podvodnog zavarivanja [24]

## 2.8. Razvoj i primjena

Brojna istraživanja i naponi uloženi su u proučavanje i razvoj podvodnog zavarivanja posljednjih 10-ak godina. Velik je napredak u poboljšanju tehnika rada i kontroli različitih postupaka podvodnog zavarivanja. Međutim, mnogo je još prostora za razvoj, ali i problema koji se javljaju i koje treba prevladati.

Istraživanje (Slika 22.) je provedeno početkom 2020. godine, a prikazuje intenzitet proučavanja i razvoja podvodnog zavarivanja u razdoblju od 2001. do 2020. godine. Istraživanje je obuhvatilo brojne članke u kojima se u bilo kojem kontekstu raspravljalo o podvodnom zavarivanju te ih grupiralo po godinama objavljivanja. Teme su raznolike, uključuju razvoj tehnologije podvodnog zavarivanja, mikrostrukturu i mehanička svojstva metala zavara, upotrebu konstrukcijskih materijala u podvodnom zavarivanju itd.



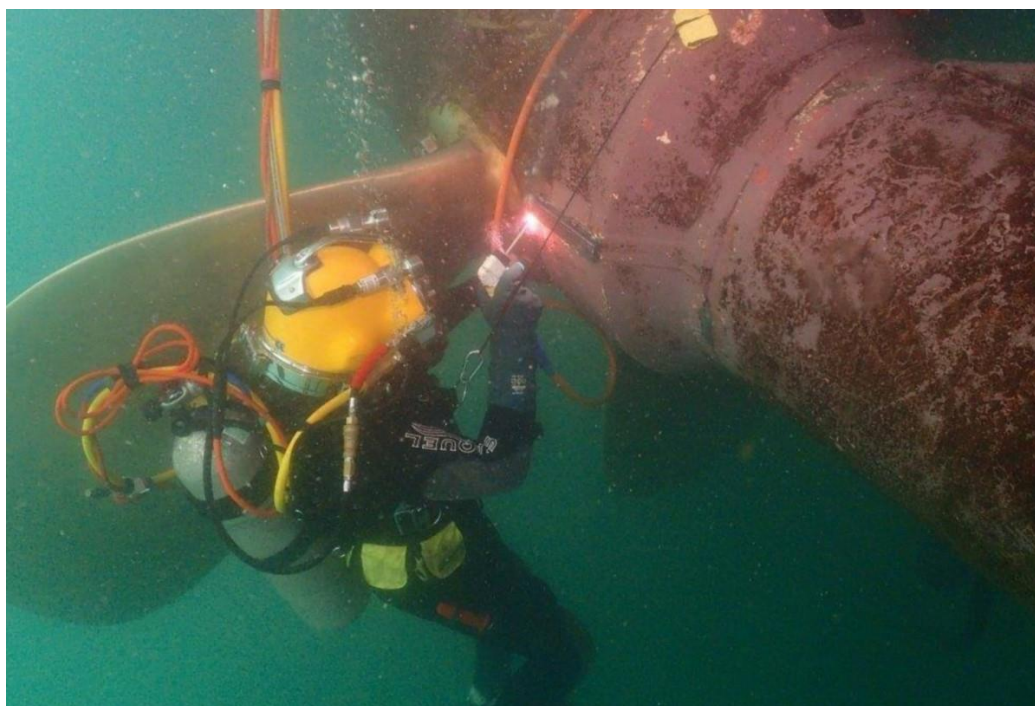
**Slika 22.** Proučavanje podvodnog zavarivanja kroz godine [25]

Tehnika je podvodnog zavarivanja opće prihvaćena u svijetu, a njena je primjena sve veća u održavanju „*off-shore*“ postrojenja i raznih plovni objekata. Neka od najznačajnijih primjena podvodnog zavarivanja su [1]:

- održavanje „*off-shore*“ konstrukcija npr. naftnih platformi, cjevovoda i naftovoda
- reparacija i održavanje brodova
- održavanje mostova i brana
- održavanje raznih energetske i industrijske postrojenja
- korozijska zaštita pri izmjeni žrtvenih anoda.



**Slika 23.** Reparacija nosača platforme [26]



**Slika 24.** Reparacija propelera [27]

### 3. OSTALI POSTUPCI KORIŠTENI PRI MOKROM PODVODNOM ZAVARIVANJU

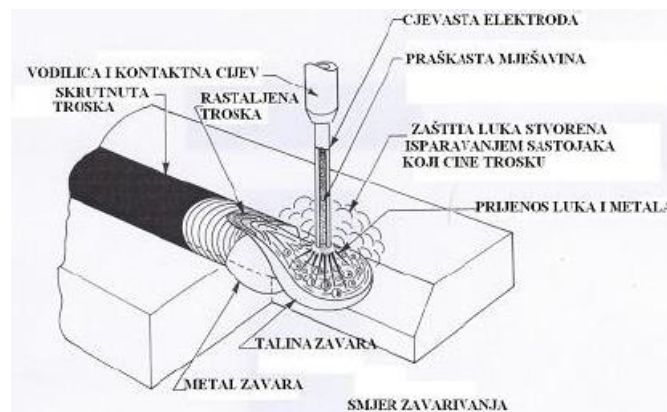
#### 3.1. Mokro podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom - FCAW

Zavarivanje praškom punjenom žicom (eng. *Flux Cored Arc Welding – FCAW*) može se provesti i pod vodom, a koristi se kada nam je potreban velik depozit materijala. Ovaj postupak, kao i kod MIG/MAG zavarivanja koristi žicu namotanu na kolut koji se po potrebi automatski odmotava. U ovom postupku koristi se praškom punjena žica. Prilikom taljenja elektrode proizvodi se troska i zaštitni plinovi koji brane električni luk i talinu od oksidacije i utjecaja vode. Zaštitne plinove moguće je dodatno dovesti kroz zavarivački pištolj. Osnovna je karakteristika ovog postupka zavarivanja velika produktivnost, mogućnost automatizacije, dobra mehanička svojstva i smanjen udio vodika u zavarenom spoju [1].

Razlikujemo dvije vrste FCAW zavarivanja:

- FCAW-S postupak (Slika 25.)
- FCAW-G postupak (Slika 26.).

Osnovna razlika između dva postupka zavarivanja je u upotrebi zaštitnog plina. Kod FCAW-S postupka zavarivanja ne koristi se zaštitni plin jer prašak koji se nalazi u elektrodi služi kao zaštita. Prašak iz elektrode prilikom zavarivanja stvara zaštitni plin i tako štiti i održava električni luk. Prednosti ove vrste zavarivanja je mogućnost rada na otvorenom, dublja penetracija i otpornost strujanju zraka.

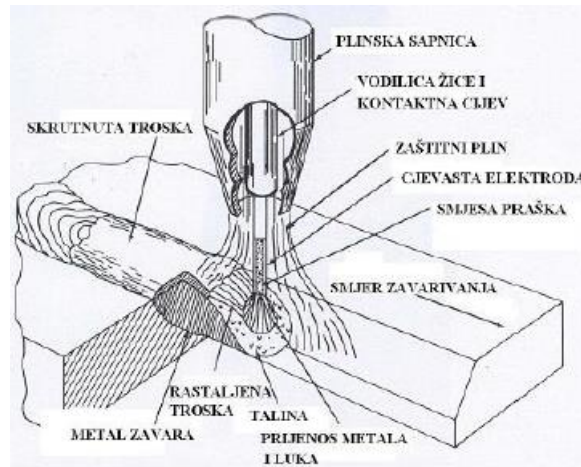


**Slika 25.** Prikaz FCAW-S postupka zavarivanja [5]

FCAW-G postupak koristi zaštitni plin tijekom zavarivanja. Ovaj postupak koristi se za zavarivanje metala debljih presjeka. Nastala se troska lakše uklanja, ali postupak nije primjenjiv



prilikom vjetrovitog vremena jer vjetar uklanja određeni dio zaštitnog plina što može uzrokovati poroznost.



**Slika 26.** Prikaz FCAW-G postupka zavarivanja [5]

FCAW postupak zavarivanja primjenu je pronašao i kod podvodnog zavarivanja. Glavne prednosti su: velika produktivnost, dobra mehanička svojstva, mogućnost automatizacije i smanjen udio vodika u zavarenom spoju. Dobavljači žica (Slika 27.) koji se koriste kod ovog postupka potpuno su uronjeni u vodi i mogu se koristiti i na dubinama do 40 m. Kako bi se eliminirao hidrostatski tlak, dobavljači žica pune se vodom, a kućište elektromotora ispunjeno je dielektričnom tekućinom i zabrtvljeno radi izolacije.



**Slika 27.** Dobavljač žice kod mokrog podvodnog zavarivanja FCAW postupkom [5]

Kontinuirana dobava žice daje neisprekidani izgled zavara što doprinosi boljoj kvaliteti i produktivnosti procesa. Upravljačka konzola i izvor struje smješteni su na suhom, na brodu ili na kopnu, a povezani su kabelima s pištoljem za zavarivanje i dobavljačem žice koji se nalaze u vodi. Izvori struje moraju osigurati minimalno 500 A jakosti struje i napon praznog hoda od 60 V. Na upravljačkoj se konzoli podešavaju parametri zavarivanja, upravlja dobavom žice i kontrolira ispravnost sustava.



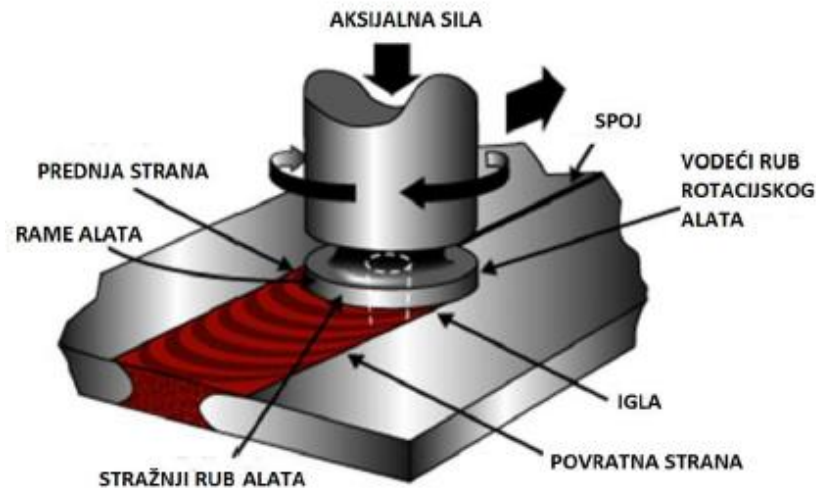
**Slika 28.** Oprema kod FCAW zavarivanja [5]

Provedena ispitivanja između FCAW i REL zavarivanja pokazuju da se pri zavarivanju lima debljine 14 mm troškovi smanjuju za oko 40 %. Velika prednost FCAW naspram REL zavarivanje je neisprekidanost zavara koja je nužna kod REL postupka [5].

### **3.2. Mokro podvodno zavarivanje trenjem – UFSW**

Zavarivanje trenjem (Slika 29.) dobro je razvijen postupak koji je svoju primjenu pronašao i u podvodnom zavarivanju. Podvodno zavarivanje trenjem dugo je vrijeme bilo ograničeno i primjenjivalo se samo u plitkim vodama za anodno pričvršćivanje, vanjske prekide itd. To se promijenilo nakon reparacije podmornice Kursk koja je bila na dubini od 106 m. Zavari su morali biti izuzetno kvalitetno izvedeni što je zavarivanje trenjem stavilo ispred REL zavarivanja [28].

Postupak zavarivanja trenjem temelji se na rotaciji i pritisku jednog dijela na drugi zbog čega se dodirne površine dvaju dijelova zagrijavaju. Poslije toga provodi se zavarivanje uz povećan pritisak i obustavu vrtnje. Važni parametri kod zavarivanja trenjem su tlak, rotacija i vrijeme trajanja. Prednost ovakvog zavarivanja je dobivanje visoko kvalitetnog zavara bez uključka i pora, kratko vrijeme trajanja zavarivanja te nema potrebe za dodatnim materijalom i zaštitnim plinom. Ovim se postupkom ne proizvodi talina i nema problema s difundiranim vodikom [1].



**Slika 29.** Prikaz podvodnog zavarivanja UFSW postupkom [17]

Glavni parametri zavarivanja su:

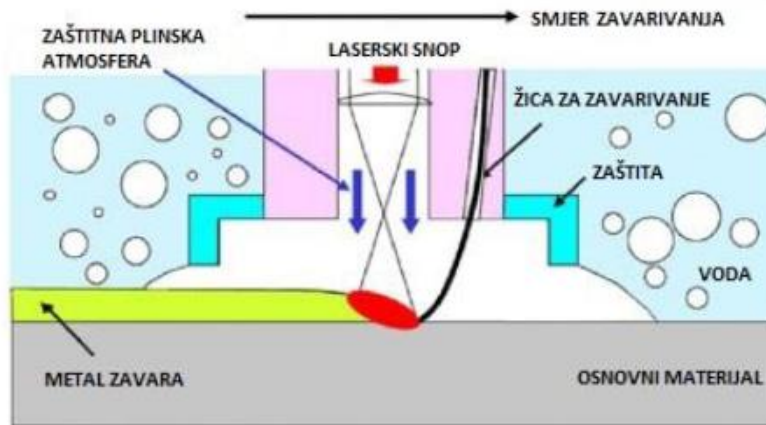
- Brzina rotacije alata
- Tlak između radnog komada i alata
- Period trajanja zavarivanja.

Osnovne značajke koje karakteriziraju postupak su:

- eliminacija poroznosti i prisutnosti uključka
- veća čvrstoća zavara
- manje područje ZUT-a s obzirom na postupke zavarivanja na suhom.

### 3.3. Mokro podvodno zavarivanje laserom – ULBW

Laser svoju namjenu pronalazi u širokoj primjeni, a njegova upotreba je moguća čak i kod zavarivanja. On je izvor monokromatske i koherentne radijacije. Zaštitna plinska atmosfera (argona), štiti talinu zavara od oksidacije, pomaže kod odvoda topline, osigurava protok kisika te štiti od kontakta medija (vode) i laserskog snopa. Povlačenje laserskog snopa po radnim komadima uzrokuje taljenje i spajanje istih. Ako se zavarivanje provodi s dodatnom žicom, laserski snop tali vrh žice i dio osnovnog materijala što rezultira glatkim zavarenim spojem.



**Slika 30.** Shema provođenja laserskog zavarivanja pod vodom [29]

Lasersko zavarivanje (Slika 30.) moguće je provesti na dva načina, ovisno o odnosu snage tj. konfiguraciji laserskog snopa s njegovim fokusom. Stoga razlikujemo:

1. kondukcijsko zavarivanje
2. princip zavarivanja ključanicom.

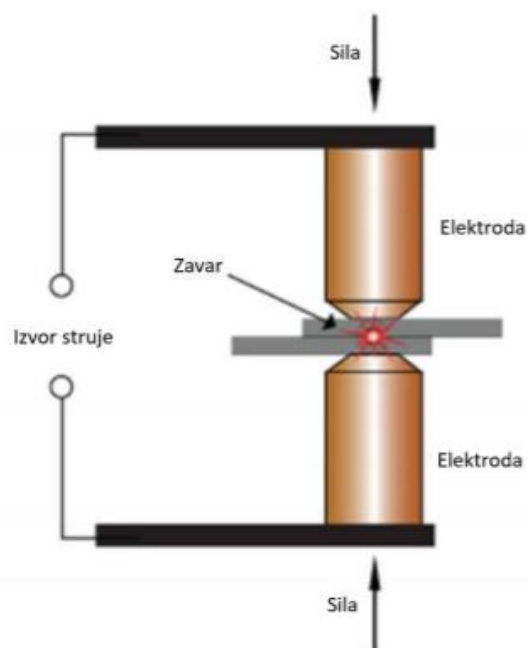
Kod kondukcijskog zavarivanja laserski je snop izvan fokusa što daje manju snagu uspoređujući ga s principom zavarivanja ključanicom.

Princip zavarivanja ključanicom daje duboku penetraciju tijekom zavarivanja. Velika energija koja se unosi dovodi do trenutnog isparavanja te dolazi do pojave rupe (ključanice). Taline se može usporediti s optičkim crnim tijelom jer se pojavom radijacije u rupi radijacija razmnoženo reflektira [30].

Uspoređujući mokro podvodno lasersko zavarivanje s ostalim postupcima zavarivanja pod vodom, lasersko zavarivanje karakterizira nizak unos topline, jednostavni prijenos energije i dobra kontrola procesa. U praksi se lasersko zavarivanje gotovo ne koristi, odnosno koristi se rijetko, u nekim od naprednijih sustava. Brojni problemi kao što su prijenos laserskog snopa u vodi do radnog komada, eliminiranje vode iz procesa zavarivanja i negativni utjecaj vode na svojstva zavara itd. [17].

### 3.4. Točkasto zavarivanje

Zahtjevi za visokokvalitetnim zavarivačima i drugi problemi koji se javljaju tijekom podvodnog zavarivanja dale su prostora razvitku drugih postupaka zavarivanja. Kao dobra alternativa REL postupku zavarivanja u uporabi se pojavio postupak podvodnog točkastog zavarivanja. Točkasto zavarivanje uvelike smanjuje potrebu za izvrsnim vještinama zavarivača [9].



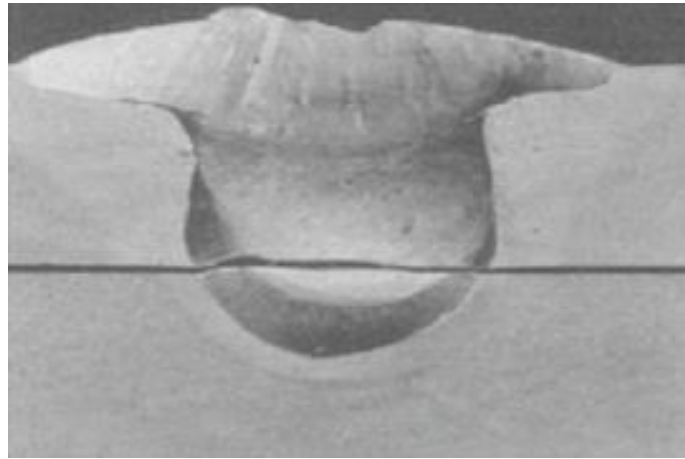
**Slika 31.** Shema općeg prikaza točkastog zavarivanja [31]

Prilikom zavarivanja nema električnog luka već se primjenjuje mehanička i toplinska energija. Prije zavarivanja radni komadi moraju se složiti jedno na drugo. Kontakt elektrode i radnih komada izaziva otpor protoku struje kroz radne komade. Otpor kroz radne komade je veći od otpora koji se javlja između elektrode i radnog komada što dovodi do taljenja limova. Prekidom strujnog kruga točka zavara se skrutne, a pritisak elektroda se održava sve do ohlađivanja.



**Slika 32.** Izgled upravljačke ploče za podešavanje parametara zavarivanja [32]

Najveće prednosti podvodnog točkastog zavarivanja su mogućnost formiranja kvalitetnog zavara i u uvjetima smanjene vidljivosti, jednostavnost izvođenja (nema kontrole električnog luka i brzine zavarivanja), visoka produktivnost, zavarivači ne moraju biti izvrsni itd. [33].



**Slika 33.** Izgled zavara nakon provedenog podvodnog točkastog zavarivanja [33]

Ovaj postupak zavarivanja ima veliki potencijal u podvodnom zavarivanju te sve više postaje konkurentan REL zavarivanju.

#### 4. KONSTRUKCIJE NAČINJENE OD VISOKOLEGIRANIH ČELIKA

Čelik koji u sebi ima više od 5 % legirajućih elemenata smatra se visokolegiranim. Visokolegirani čelici konstantno se razvijaju i usavršavaju. Zadnjih su 40-ak godina visokolegirani čelici doživjeli najveći porast zbog uvođenja toplog i hladnog valjanja, uvođenjem sekundarne metalurgije i upotrebom kontinuiranog lijevanja. Kontakt elektrode i radnog komada uzrokuje penetraciju

Visokolegirane čelike dijelimo, s obzirom na strukturu materijala prilikom hlađenja na zraku poslije visokotemperaturnog zagrijavanja, na:

- martenzitne čelike (meko martenzitni)
- martenzitno-feritne čelike
- austenitno-martenzitne čelike
- austenitno-feritne čelike (*duplex* čelici)
- feritne čelike (super-feritni)
- austenitne čelike (super-austenitne).

Meko martenzitni su čelici najnovija skupina visokolegiranih čelika. Dodatnim legiranjem poboljšana su im svojstva. Visokolegirane čelike možemo podijeliti i s obzirom na njihovu primjenu na vatrootporne, korozijski postojane itd.

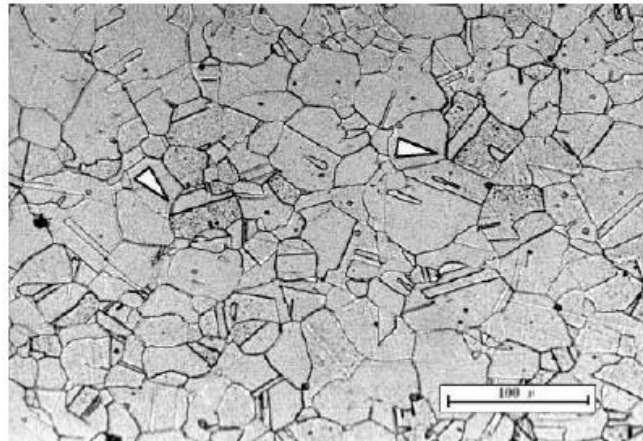
**Tablica 2.** Fizikalna svojstva glavnih grupa visokolegiranih čelika i nelegiranih čelika [34]

VRSTA ČELIKA		Fizikalna svojstva				
		$\alpha$ $10^{-6} \times K^{-1}$ (100 °C – 500 °C)	$\lambda$ W/(m x K) (20 °C)	$\Omega$ $\Omega \times mm^2/m$ (20 °C)	E kN/mm <sup>2</sup> (20 °C)	Magne- tičnost
VISKOLEGIRANI ČELICI	Feritni	10,5 – 12,0	29	0,60	210	+
	Martenzitni	10,5 – 12,0	30	0,60	210	+
	Austenitni	16 – 18	15	0,73	200	-
	Austenitno-feritni (duplex)	12,5 – 13 (do 300 °C)	14	0,79	206	+
Nelegirani čelici		13	47	0,15	205	+

Fizikalna svojstva visokolegiranih čelika (npr. toplinska vodljivost, temperaturno rastezanje, modul elastičnosti i električni otpor) bitno utječu na njihovu zavarljivost [34].

#### 4.1. Općenito o austenitnim nehrđajućim čelicima

Austenitni nehrđajući čelik u sebi sadrži 0,02 % – 0,15 % C, 15% – 20 % Cr, 7% – 20 % Ni, uz moguće dodatke molibdena, niobija, titana, tantala i dušika. Dodavanjem dušika i nikla proširuje se područje austenita i snižava se temperatura početka formiranja martenzita. Mikrostruktura austenitnih čelika (Slika 34.) prvenstveno je austenitno-feritna ili monofazno austenitna [35].



**Slika 34.** Mikrostruktura austenitnog čelika [36]

Austenitne čelike karakterizira [37]:

- nemagnetičnost
- odlična plastičnost
- visoka žilavost i korozivna postojanost
- vrlo dobra svojstva pri niskim temperaturama
- nemogućnost usitnjavanja zrna
- visoka deformabilnost koju osigurava kubična plošno centrirana FCC rešetka
- nemaju tendenciju povećanja zrna u ZUT-u prilikom zavarivanja.

Glavna su odličja austenitnih čelika dobra kemijska postojanost i vatrootpornost te odlična otpornost puzanju. Zbog tih karakteristika često se primjenjuju pri izradi turbina (lopatice, prirubnice, ventila, sapnice, svornjaka), komora za izgaranje, raznih dijelova u petrokemijskoj i kemijskoj industriji, plamenika, pogona za mlazne motore te raketa [38].

#### 4.2. Zavarljivost austenitnog Cr-Ni čelika

Austenitni je nehrđajući čelik najlakše zavariti od svih ostalih grupa korozivski postojanih Cr-Ni čelika jer ne dolazi do velikih faznih (metalurških) transformacija [35].



Iako su ti čelici korozijski vrlo otporni, prilikom je zavarivanja ipak moguća pojava interkristalne korozije i toplih pukotina. Austenitne čelike karakterizira:

- Povećan koeficijent toplinskog naprežanja u odnosu na ostale skupine čelika koji je 50 % veći. To rezultira pojavom zaostalih naprežanja i deformacija prilikom i poslije zavarivanja.
- Koeficijent toplinske vodljivosti je manji za 60 % zbog čega je otežano odvođenje topline tijekom i nakon zavarivanja. Kako bi se ubrzalo odvođenje topline koriste se bakrene podloge.
- Povećan je specifični električni otpor što utječe na neke od tehnoloških zahtjeva (jakost struje, slobodni kraj žice...).

Glavni problemi koji nastaju zbog nepoštivanja tehnoloških zahtjeva zavarivanja:

1. Pojava interkristalne korozije zbog izlučivanja karbida.
2. Pojava toplih pukotina zbog nečistoća u metalu zavara (unos sumpora i fosfor) što je uzrok padu čvrstoće na granicama zrna.
3. Izlučivanje  $\sigma$  (sigma) i  $\chi$  (hi) faza što smanjuje žilavost i istežljivost te utječu na smanjenje korozijske otpornosti austenitnih nehrđajućih čelika.

Utjecaj negativnih pojava može se smanjiti poštivanjem tehnoloških zahtjeva, pravilnim odabirom osnovnog i dodatnog materijala [34].

## 5. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je postupkom mokrog podvodnog REL zavarivanja austenitnom elektrodom zavariti kutni spoj. S obzirom na korištene parametre zavarivanja potrebno je vizualnom kontrolom ispitati zavareni spoj i ocijeniti njegovu kvalitetu.

### 5.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio rada izveden je u prostorima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u laboratoriju Katedre za zavarene konstrukcije. Mokro podvodno zavarivanje provedeno je u malom bazenu (Slika 35.) zapremnine 500 L, dimenzija 1100 × 600 × 750 mm. Bazen je bio ispunjen slatkom vodom iz gradske opskrbe. Temperatura bazena bila je između 25 °C do 28 °C. Zavarivanje se izvodilo na dubini od 300 mm.



**Slika 35.** Bazen za izvođenje podvodnog zavarivanja

Cilj eksperimenta bio je podvodno zavariti kutni spoj. Gornja ploča je dimenzija 320 mm × 120 mm, a donja je 300 mm × 120 mm. Debljina ploča iznosi 10 mm. Osnovni materijal izrađen je od nehrđajućeg čelika.

Pri izvođenju eksperimenta korišten je Uljanikov inverter IRA 400 (Slika 36.). Bitna razlika između zavarivanja na suhom i mokrog zavarivanja je u iznosu napona praznog hoda.

Iz sigurnosnih razloga kod mokrog zavarivanja napon praznog hoda niži je od napona praznog hoda kod suhog zavarivanja. Međutim, to dodatno otežava uspostavljanje električnog luka pod vodom.



Slika 36. Izvor struje korišten za izvođenje eksperimenta

ULJANIK			
Aparat za zavarivanje Welding rectifier Schweißgleichrichter Transformateur Redresseur de soudage			Temp. st. H IP 23 JUS R 1012/89 ISO 9700 VDE 0042 NF A 92-011
<b>IRA 400</b>			
Zavarivanje Welding Schweißen Soudage	$\frac{\square}{\square}$ $\frac{\square}{\square}$	7A/20V, 400A/36V U <sub>0</sub> = X 45% 60% 100% 88 V I 400 A 350 A 250 A U 36 V 34 V 30 V	
Uč. 2-10 Hz	U	380 V	I 25 A
Maximalna input Eingang Alimentation			
16.5 kVA			
~ 230 V	Glavna kutija / Cooling cabinet	F Masa 210 kg	God. izd. / Year Ass.
Made in Yugoslavia			

Slika 37. Karakteristike izvora struje

Za zavarivanje su korištene rutilne elektrode EZ-KROM 30 R (Slika 38.). Elektrode su tvornički zaštićene vodonepropusnim premazom. Glavna funkcija vodonepropusnog premaza

je održavanje stabilnosti obloge i zaštita elektrode od prodora vode u nju. Premaz ujedno pomaže i kod uspostave električnog luka, ali i kao izolator koji dodatno štiti ronioca.



Slika 38. Elektrode EZ-KROM 30 R



Slika 39. Vodonepropusne elektrode za podvodno zavarivanje

Tablica 3. Mehanička svojstva i kemijski sastav metala zavara [39]

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA			
$R_{p0,2}$ N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$A_5$ %	KV (-20°C) J
> 320	> 510	> 25	> 47

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ČISTOG METALA ZAVARA						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
%	≤ 0,03	0,9	0,8	18,5	12	2,7

Prije početka podvodnog zavarivanja ploče su bile učvršćene pomoćnim (sidrenim) zavarima. Pomoćni zavari izvedeni su na suhom i služe za blago učvršćivanje ploča kako nam olakšalo zavarivanje. Takvi zavari sprječavaju širenje i stezanje osnovnog materijala tijekom podvodnog zavarivanja. Zavari su pobrušeni (Slika 40.), a površine su ploča mehanički očišćene i spremne za izvođenje eksperimenta.



**Slika 40.** Priprema radnog komada

Nakon pripreme radnog komada uslijedilo je podvodno zavarivanje. Zavarivanje se izvodilo REL postupkom. Vodonepropusna elektroda  $\varnothing$  3,2 mm bila je spojena na negativni pol istosmjernog izvora struje. Zavarivanje se provodilo pri istosmjernoj struji iznosa 160 A. Razlog tome je osiguravanje veće sigurnosti zavarivača i minimiziranje pojave poteškoća pri održavanju samog električnog luka. Izmjenična struja ne smije se koristiti za podvodno rezanje ili zavarivanje zbog velike opasnosti od strujnog udara.



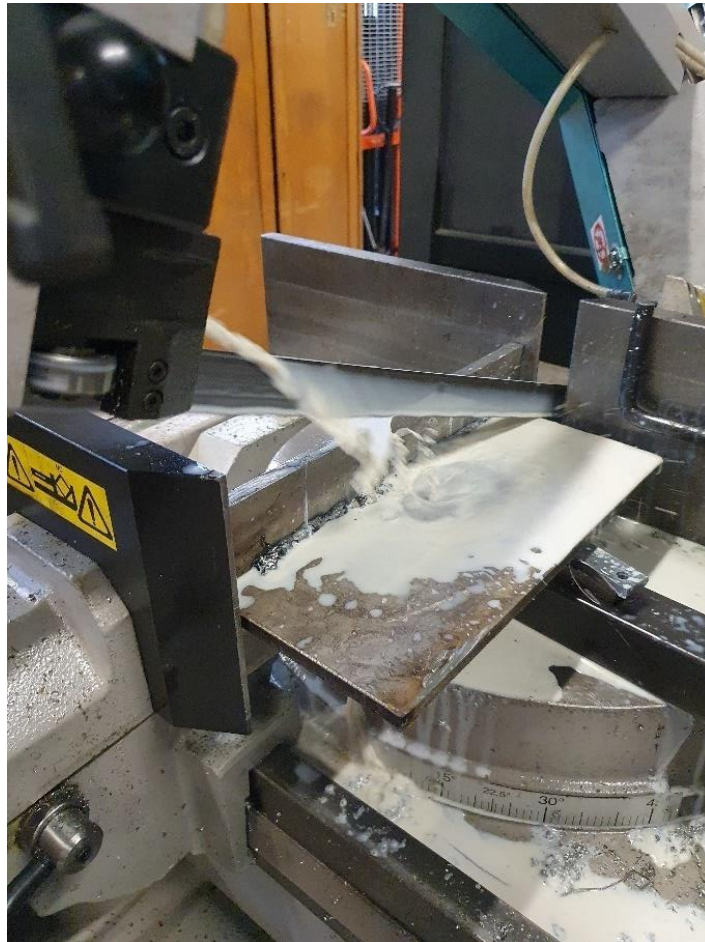
**Slika 41.** Provođenje zavarivanja pod vodom



**Slika 42.** Izgled zavara nakon podvodnog zavarivanja

## 5.2. Vizualna kontrola

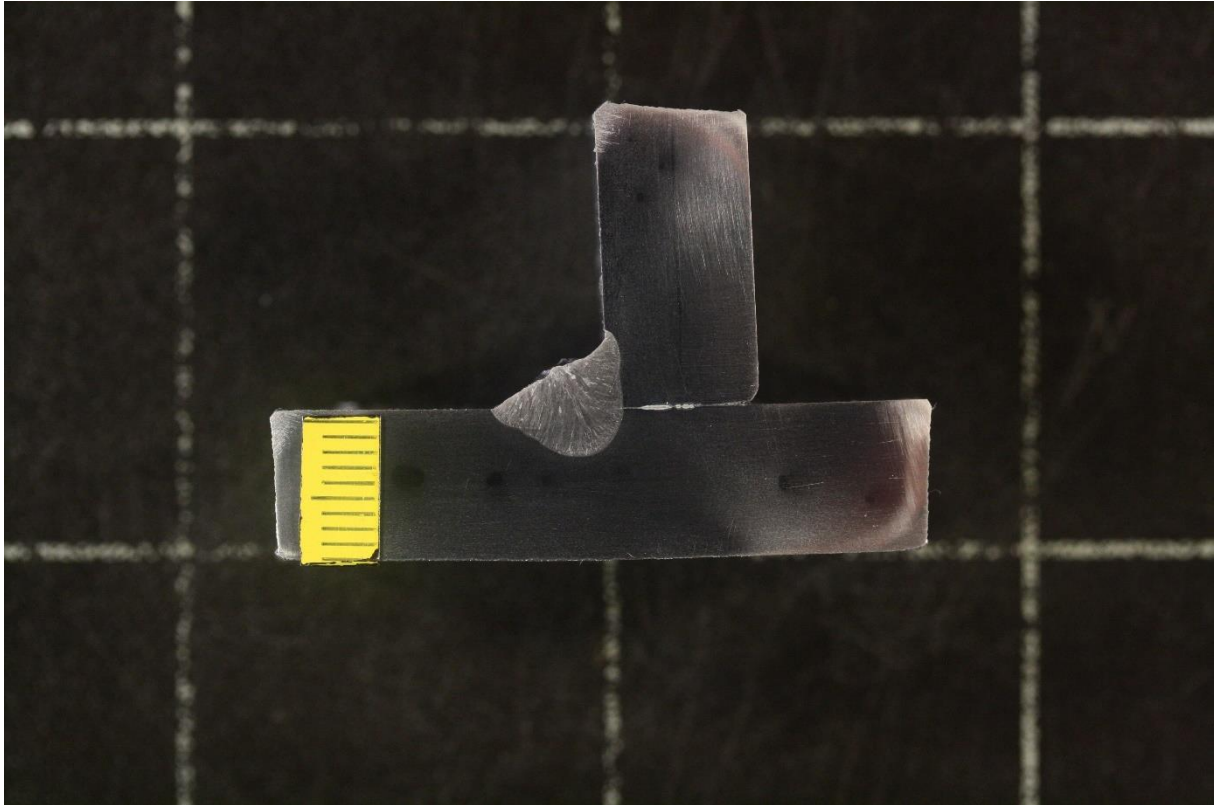
Nakon provedenog je zavarivanja tračnom pilom izrezan manji uzorak (Slika 43.). Uzorak je prvo grubo, a kasnije i fino izbrušen. Cilj je bio dobiti što glađu površinu presjeka zavara kako bi kasniji rezultat nagrizanja bio što jasniji. Izbrušeni se uzorak nagrizao u 10 postotnoj oksalnoj kiselini te je bio izložen 30 sekundi naponu od 10 V.



**Slika 43.** Rezanje gotovog radnog komada

Zavarivanje se provodilo u bazenu gdje je zavarivaču glava bila izvan površine vode. Uz to, zavarivanje su dodatno otežali plinovi koji su isparavali tijekom izvođenja procesa (Slika 41.). Iz makroizbruska zavara (Slika 44.) vidljivo je da je penetracija bila veća u horizontalnoj ploči nego u vertikalnoj. To nam govori da zavarivač prilikom zavarivanja nije držao elektrodu pod kutom od  $45^\circ$  što je dovelo do neravnomjernog protaljivanja. Zbog smanjene je vidljivosti

zavar asimetrične geometrije (Slika 42.) te je prepun pora, pukotina i ugorina. Iz tog je razloga izvedeni zavar ocijenjen neprihvatljivim (prema normi AWS D3.6M: 1999.).



**Slika 44.** Makroizbrusak zavora



## 6. ZAKLJUČAK

Posljednjih se godina ubrzao razvoj podvodnog zavarivanja. Podvodno je mokro REL zavarivanje prva primijenjena tehnika spajanja dva metalna dijela pod vodom. U počecima je služila za reparaciju brodova i raznih podvodnih struktura, ali dugo se smatrala samo tehnologijom spajanja metala drugog reda jer su zavareni spojevi imali loša mehanička svojstva. Razvojem je mokrog podvodnog zavarivanja ostvaren veliki napredak i ono se našlo u samom vrhu prema primjenjivanim tehnikama u održavanju i gradnji podvodnih objekata. Zbog svoje prilagodljivosti i nižih troškova dobilo komercijalnu prednost nad suhim podvodnim zavarivanjem iako se ovime dobivaju kvalitetniji zavareni spojevi. Pored mokrog REL zavarivanja pažnja se daje i drugim postupcima koji teže mogućnostima automatizacije. Razlog tome je istraživanje sve većih dubina iz kojih bi se mogla crpiti nafta i zemni plin. Radovi na tim dubinama zahtijevaju kvalitetno izvedene zavare s naglaskom na dugi vijek trajanja konstrukcije. Mokro se podvodno zavarivanje najčešće koristi u manjim dubinama, ali njegovu prednost predstavlja velika fleksibilnost i ekonomičnost izrade zavarenog spoja. Brojni problemi (kao što su hladne pukotine, poroznost i uključci troske) nastoje se eliminirati razvojem novih postupaka, tehnika rada, dodatnog materijala i edukacijom ronioca zavarivača. Glavni je cilj primijeniti podvodno zavarivanje na većim dubinama i osigurati što kvalitetnije zavare koji udovoljavaju visokim zahtjevima.

Eksperimentalni je dio rada proveden na prostoru Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zavarivanje. Podvodnim je mokrim REL zavarivanjem izveden kutni spoj zavara. Kasnijom su vizualnom kontrolom uočene karakteristične greške vezane za podvodno zavarivanje. Zbog slabe je vidljivosti otežano vođenje električnog luka, a rezultat je bio zavar asimetrične geometrije, pun ugorina i poroznosti. Taj je zavareni spoj ocijenjen neprihvatljivim prema normi AWS D3.6M: 1999. Najveći je problem pri izvođenju eksperimenta predstavljala ograničena vidljivost zavarivača zbog nepreglednosti, prljavog bazena i isparavajućih plinova. Također, zavarivač je imao glavu iznad površine vode što mu je dodatno otežalo praćenje električnog luka te dovelo do brojnih grešaka u zavaru. Zavari su kvalitetnije izvedeni, ako zavarivanje provode zavarivači s višegodišnjim iskustvom u podvodnom zavarivanju uz osiguranje pogodnih uvjeta zavarivanja. Optimizacijom parametara i boljim odabirom dodatnog materijala smanjit će se vjerojatnost nastanka grešaka u zavaru. Također, višeslojno zavarivanje ili korištenje elektroda većeg promjera ( $\varnothing$  4,0 mm) rezultirat će većom količinom nataljenog materijala te boljim izgledom geometrije zavara.

## LITERATURA

- [1] Ivanek, T.: *Mokro podvodno zavarivanje*, završni rad, Zagreb, 2015.
- [2] Bekar, S.: *SualtiKaynagi - Underwater Welding*, Sakarya, 2015.
- [3] [www.waterwelders.com](http://www.waterwelders.com), učitano 06.09.2021.
- [4] LeHardy, P.; Elliot, K.: *Underwater Welding and Non-Destructive Testing in Support of U.S. Navy Ship Repair Operations*, 2010.
- [5] Mikulić, I.: *Analitički i eksperimentalni pristup određivanju zavarljivosti pri mokrom podvodnom zavarivanju*, diplomski rad, Zagreb, 2014.
- [6] Garašić, I.: *Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju*, doktorski rad, Zagreb, 2008.
- [7] Keats, D. J.: *Underwater Wet Welding: A Welder's Mate*, TJ International, Padstow, Cornwall, 2011.
- [8] Katić, J.: *Podvodno mokro zavarivanje REL postupak*, završni rad, Karlovac, 2018.
- [9] Garašić, I.; Kožuh, Z.: *Underwater welding and cutting*, Zagreb, 2014.
- [10] [www.lincolnelectric.com](http://www.lincolnelectric.com), učitano 06.09.2021.
- [11] Bartolović, J.: *Transformator uređaja za zavarivanje*, diplomski rad, Zagreb, 2016.
- [12] *U.S. Navy Underwater cutting & welding manual*, 2002.
- [13] [www.smp-ltd.com](http://www.smp-ltd.com), učitano 06.09.2021.
- [14] Gvozdrenović, P.: *Problematika podvodnog zavarivanja cjevovoda čelika X70*, diplomski rad, Karlovac, 2018.
- [15] <http://www.broco-rankin.com/>, učitano 06.09.2021.
- [16] <https://www.scubaverse.com/>, učitano 06.09.2021.
- [17] Cerovečki, B.: *Mokro podvodno zavarivanje martenzitnog čelika X3CrNiMo13-4*, završni rad, Zagreb, 2017.
- [18] Abdalla, A.: *Primjena austenitnih elektroda za mokro podvodno zavarivanje*, završni rad, Zagreb, 2018.
- [19] Čolić, M.; Hodžić M.; Dervišević A.: *Reparaturno zavarivanje pod vodom – problematika zavarljivosti i tehnološke preporuke*, seminarski rad, Sarajevo, 2015.
- [20] Mikulić, I.: *Mokro podvodno zavarivanje čelika visoke čvrstoće*, završni rad, Zagreb, 2012.
- [21] Barun, T.: *Primjena TEKKEN metode za ispitivanje hladnih pukotina pri mokrom podvodnom zavarivanju*, diplomski rad, Zagreb, 2009.

- [22] Yushchenko K. A.; Gretski Y. Y.; Maksimov S. Y.: *Under water wet welding and Cutting*, Study of physico-metallurgical peculiarities of wet arc welding, Middlesbrough, 1998.
- [23] <https://weldingauthority.com/>, učitano 06.09.2021.
- [24] <https://arcweldingtipsandtricks.wordpress.com/>, učitano 06.09.2021.
- [25] Surojo E.; ErichaDwi Wahyu Syah Putri; EkoPrasetyaBudiana; Triyono: *Recent Developments on Underwater Welding of Metallic Material*, Indonezija, 2020.
- [26] <https://wonderfulengineering.com/underwater-welding/>, učitano 06.09.2021.
- [27] <https://www.careers.govt.nz/jobs-database/hospitality-tourism-and-recreation/sport-and-recreation/diver/job-opportunities>, učitano 06.09.2021.
- [28] Kralj, S.; Garašić, I.; Kožuh, Z.; Eržišnik, J.: *Stanje i trendovi u razvoju podvodnog zavarivanja*, Zagreb, 2016.
- [29] [www.industrial-lasers.com/welding/article/16488689/underwater-laser-welding-for-nuke-plants-coming-to-us](http://www.industrial-lasers.com/welding/article/16488689/underwater-laser-welding-for-nuke-plants-coming-to-us), učitano 06.09.2021.
- [30] Majumdar, J.D.: *Underwater welding-present status and future scope*, Journal of Navala Architecture and Marine Engineering, 2006.
- [31] Garcin, M.: *Elektrootporno točkasto zavarivanje tankih limova*, završni rad, Zagreb, 2020.
- [32] Keats, D. J.: *Benefits of Hammerhead wet – spot welding process*, Speciality Welds, 2017.
- [33] Gyasi, E. A.: *Welding processes of metals for offshore environment: Underwater welding*, LUT University
- [34] Hlevnjak, A.: *Točkasto elektrootporno zavarivanje raznorodnih čelika*, diplomski rad, Zagreb, 2016.
- [35] Hajdu, I.: *Primjena aktivacijskog premaza pri plazma zavarivanju austenitnih čelika*, diplomski rad, Zagreb, 2015.
- [36] Ptičar, M.: *MAG CBT zavarivanje visokolegiranih Cr-Ni čelika*, završni rad, Zagreb, 2016.
- [37] Kožuh S.: *Specijalni čelici*, skripta, Sisak, 2010.
- [38] Širić, P.: *Analiza zavarljivosti Cr-Mo čelika P91*, diplomski rad, Zagreb, 2020.
- [39] [www.ezg.hr](http://www.ezg.hr), učitano 06.09.2021.

## **PRILOZI**

I.CD-R disc