

# Problematika podvodnog zavarivanja cjevovoda čelika X70

---

**Gvozdenović, Petar**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:924714>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-03**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJ

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Specijalistički diplomski stručni studij Strojarsva*

Petar Gvozdenović

**PROBLEMATIKA PODVODNOG  
ZAVARIVANJA CJEVOVODA  
ČELIKA X70**

Diplomski rad

Karlovac, 2018.

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
*Specijalistički diplomski stručni studij Strojarsstva*

Petar Gvozdenović

**PROBLEMATIKA PODVODNOG  
ZAVARIVANJA CJEVOVODA  
ČELIKA X70**

Diplomski rad

Dr.sc. Tanja Tomić

Karlovac, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj Diplomski rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na Veleučilištu u Karlovcu i koristeći navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Tanji Tomić na povjerenju, stručnim savjetima i uputama pri izradi ovog diplomskog rada.

Petar Gvozdenović



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
KARLOVAC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES  
Trg J.J. Strossmayera 9  
HR-47000, Karlovac, Croatia  
Tel. +385 - (0)47 - 843 – 510  
Fax. +385 - (0)47 - 843 – 579



## **VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**

Specijalistički diplomski studij: STROJARSTVO

Usmjerenje: PROIZVODNO STROJARSTVO

Karlovac, 2018

### **ZADATAK DIPLOMSKOG RADA**

Student: PETAR GVOZDENOVIĆ

Matični broj: 0123416034

Naslov: PROBLEMATIKA PODVODNOG ZAVARIVANJA CJEVOVODA ČELIKA X70

Opis zadatka:

Koristeći znanstvenu literaturu student će obraditi problematiku podvodnog zavarivanja visoko čvrstog čelika X70. U radu će se opisati princip podvodnog zavarivanja, te najčešći problemi koji se javljaju prilikom postizanja najbolje kvalitete zavarenog spoja ostvarenog pod vodom.

Zadatak zadan:  
10.04.2018.

Rok predaje rada:  
27.06.2018.

Predviđeni datum obrane:  
04.07.2018.

Mentor:  
dr.sc. Tanja Tomić

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:  
dr.sc. Tihomir Mihalić

## SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SADRŽAJ .....   | I   |
| POPIS SLIKA .....   | II  |
| POPIS KRATICA .....   | III |
| POPIS OZNAKA .....  | IV  |
| SAŽETAK.....  | V   |
| SUMMARY .....   | VI  |
| 1. UVOD.....  | 1   |
| 2. PODVODNO ZAVARIVANJE .....                                     | 4   |
| 2.1. Suho podvodno zavarivanje .....                              | 4   |
| 2.1.1. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori .....             | 5   |
| 2.1.2. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj mini-komori .....        | 6   |
| 2.1.3. Atmosfersko podvodno zavarivanje.....                      | 7   |
| 2.2. Mokro podvodno zavarivanje .....                             | 8   |
| 2.2.1. Povijesni razvoj mokrog podvodnog zavarivanje.....         | 9   |
| 2.2.2. Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom .....             | 10  |
| 2.2.3. Fizikalne osnove podvodnog zavarivanja .....               | 11  |
| 2.2.3.1. Shematski prikaz mokrog podvodnog zavarivanja .....      | 12  |
| 2.2.3.2. Plinski mjehurić .....                                   | 13  |
| 2.2.4. Tehnike rada.....  | 16  |
| 2.2.4.1. Tehnika povlačenja .....                                 | 16  |
| 2.2.4.2. Tehnika njihanja.....                                    | 17  |
| 2.2.4.3. „Korak-unatrag“ tehnika.....                             | 17  |
| 2.2.5. Oprema pri mokrom podvodnom zavarivanju .....              | 18  |
| 2.2.5.1. Oprema zavarivača.....                                   | 18  |
| 2.2.5.2. Oprema za zavarivanje.....                               | 19  |
| 2.2.6. Dodatni materijal.....                                     | 23  |
| 2.3. Zavarljivost .....   | 27  |
| 2.4. Klasifikacija podvodnih zavara prema AWS D3.6.....           | 28  |
| 3. ČELICI VISOKE ČVRSTOĆE API 5L X70 I NJIHOVA ZAVARLJIVOST ..... | 29  |
| 4. PROBLEMATIKA PODVODNOG ZAVARIVANJA CJEVOVODA .....             | 35  |
| 4.1. Vodikove pukotine i mehanizmi nastanka .....                 | 38  |
| 4.1.1. Metode određivanja vodika u zavarenim spojevima.....       | 40  |
| 4.2. Hladne pukotine .....  | 41  |
| 4.2.1. Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama .....      | 43  |
| 4.2.1.1. Implant metoda .....                                     | 44  |
| 4.2.1.2. Tekken metoda.....                                       | 46  |
| 5. ZAKLJUČAK.....   | 49  |
| PRILOZI.....  | 50  |
| LITERATURA.....   | 51  |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Naftna platforma[5].....   | 1  |
| Slika 2. Havarija platforme[5].....   | 1  |
| Slika 3. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori[3] .....  | 2  |
| Slika 4. Mokro podvodno zavarivanje[4].....   | 3  |
| Slika 5. Podvodni habitat [10].....   | 6  |
| Slika 6. Podmorsko zvono za 2 čovjeka[10] .....   | 7  |
| Slika 7. Atmosfersko podvodno zavarivanje[30] .....   | 7  |
| Slika 8. Primjer mokrog podvodnog zavarivanja[31] .....   | 8  |
| Slika 9. Prva testiranja mokrog podvodnog zavarivanja[12] .....   | 9  |
| Slika 10. Osnovna oprema za podvodno REL zavarivanje[13] .....  | 10 |
| Slika 11. Shematski prikaz REL zavarivanja[15] .....  | 12 |
| Slika 12. Prikaz procesa mokrog zavarivanja[13].....  | 14 |
| Slika 13. Tehnika povlačenja[16].....   | 16 |
| Slika 14. Tehnika njihanja[16] .....  | 17 |
| Slika 15. „Korak-unatrag" tehnika[16] .....   | 18 |
| Slika 16. Ronilac-zavarivač spreman za rad[19].....   | 19 |
| Slika 17. Izvor struje za podvodno zavarivanje [34].....  | 20 |
| Slika 18. Strmopadajuća karakteristika izvora struje[15] .....  | 21 |
| Slika 19. Držać elektrode, zavarivački kabel i obložena elektroda[34] .....   | 22 |
| Slika 20. Presjek specijalnog zavarivačkog kabela[21] .....   | 22 |
| Slika 21. Rutilne elektrode s dvostrukim vodonepropusnim premazom[18].....  | 25 |
| Slika 22. Kronološki prikaz razvoja čelika za cjevovode[6].....   | 29 |
| Slika 23. Mehanizmi očvršćivanja za čelike X60, X70, X80 [6].....   | 30 |
| Slika 24. Karakteristične mikrostrukture čelika X60, X70, X80 [6].....  | 31 |
| Slika 25. TTT dijagram čelika X70 [25] .....  | 32 |
| Slika 26. Metode legiranja za povećanje čvrstoće metala zavara [24].....  | 33 |
| Slika 27. Usporedba brzina hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima i mokrom<br>podvodnom zavarivanju [6]..... | 35 |
| Slika 28. Karakteristične greške zavara dobivenog mokrim podvodnim zavarivanjem [12] ..                             | 37 |
| Slika 29. Utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina[28].....  | 41 |
| Slika 30. Pukotine u zavarenom spoju[35].....   | 42 |
| Slika 31. Shematski prikaz implant uzorka i ispitne ploče [35].....   | 45 |
| Slika 32. Implant uzorak s obostranim navojem[35] .....   | 46 |
| Slika 33. Priprema spojeva i dimenzije uzoraka pri Tekken ispitivanju [36].....                                     | 47 |
| Slika 34. Mjesta nastanka hladnih pukotina [17] .....   | 48 |
| Slika 35. Ispitivanje sklonosti hladnim pukotinama[35] .....  | 48 |

**POPIS KRATICA**

|      |  |
|------|--|
| API  | American Petroleum Institute                             |
| REL  | Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom      |
| AWS  | American Welding Society                                 |
| ASTM | American Society for Testing and Materials               |
| ISO  | International Organization for Standardization           |
| IIW  | International Institute of Welding                       |
| JIS  | Japanese Industrial Standard                             |
| BCC  | Body Centered Cubic Crystal                              |
| FCC  | Face Centered Cubic Crystal                              |
| ANSI | American National Standard Institute                     |
| TTT  | Time Temperature Transformation                          |
| MZ   | Metal zavara   |
| ZUT  | Zona utjecaja topline                                    |
| CE   | Ekvivalent ugljika                                       |
| FCAW | Zavarivanje praškom punjenom žicom u plinskoj zaštiti    |
| MAG  | Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina |
| EPP  | Zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška      |



**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b>  | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>                  |
|----------------|-----------------|------------------------------|
| T              | S               | Vrijeme                      |
| I              | A               | jačina struje                |
| T              | °C              | Temperatura                  |
| CE             | %               | ekvivalent ugljika prema IIW |
| V <sub>z</sub> | m/h             | brzina zavarivanja           |

## **SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu je obrađena problematika podvodnog zavarivanja cjevovoda čelika X70 prema API 5L.

Općenito je objašnjeno podvodno zavarivanje, odnosno podjela podvodnog zavarivanja na suho i mokro. Obraden je REL postupak mokrog podvodnog zavarivanja, objašnjene su fizikalne osnove procesa, tehnike rada, a također je opisana oprema za zavarivanje kao i oprema ronioca-zavarivača. Jedno poglavlje posebno je posvećeno razvoju čelika povišene čvrstoće, te njihovoj zavarljivosti i primjeni u praksi. Problemi koji se javljaju kod podvodnog zavarivanja opisani su u posljednjem poglavlju, a poseban naglasak je na hladne pukotine, te su također opisane neke metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama.

Ključne riječi: mokro podvodno zavarivanje, hladne pukotine, cjevovod, visokočvrsti čelik

## **SUMMARY**

This graduate thesis deals with issues of underwater welding of steel pipeline X70 according to API 5L.

There is general explanation of the whole underwater welding process also as two welding types, dry and wet one. We processed MMAW procedure of wet underwater welding, explained the physical basics of the process and described equipment needed for welding process, also as for weld divers. One chapter is about high-strength steel and its weldability. Problems that occur during the welding are well explained in the last chapter with the accent on cold cracks and its prevention test methods.

Key words: wet underwater welding, cold cracks, pipeline, high strength steel

## 1. UVOD

Proizvodnja nafte i plina zahtjeva izgradnju podvodnih konstrukcija jer se potraga za novim izvorima proširila na mora i oceane, a također je povećan intenzitet pomorskog prijevoza. U današnje vrijeme čest prizor na morskoj površini i morskom dnu su naftne platforme, cjevovodi ili neke druge off-shore konstrukcije.

Na površini Meksičkog zaljeva, Indijskog oceana, izvan granica kontinentalnog pojasa Brazila i Zapadne Afrike te u dubokim, hladnim vodama Sjevernoga mora, danas se nalazi najviše off-shore postrojenja za crpljenje, proizvodnju i transport nafte i zemnog plina. [1]



**Slika 1. Naftna platforma[5]**

Cjevovodi su sustavi cijevi koji se koriste za transport sirovina od mjesta pronalaska do potrošača uglavnom u tekućem ili plinovitom stanju. Transport sirove nafte i zemnog plina najbolji je koristeći cjevovode, u usporedbi sa npr. željezničkim prijevozom je jeftiniji i brži.

Bitno je poznavati i definirati sve čimbenike koji utječu na integritet cjevovoda, kako ne bi došlo do havarije cjevovoda koja može uzrokovati teške posljedice za okoliš i dovesti do ljudskih žrtava.



**Slika 2. Havarija platforme[5]**

Konstantno se provode istraživanja novih tehnologija i postupaka kojima bi se povećala produktivnost, a ujedno i smanjila cijena održavanja i reparature, jer su troškovi rada i održavanja off-shore konstrukcija visoki. Površina svjetskog mora pokriva oko 71% površine Zemlje, a more je velika prometnica i na njemu danas odvija oko 80% svjetskog robnog prometa. Sve platforme, cjevovodi, brodovi i druge off-shore konstrukcije podložne su nastajanju oštećenja uslijed korozije, zamora materijala, teških vremenskih prilika i sudara sa drugim plovilima.

Razvijene su različite tehnike podvodnog zavarivanja s obzirom da su pomorski objekti rasprostranjeni na različitim dubinama, odnosno na dubinama od nekoliko metara sve do dubina od 100 m i više. Suhe tehnike zavarivanja (slika 3.) koriste se kod velikih dubina i kad se zahtjeva visoka kvaliteta zavarenih spojeva, a provode se u zavarivačkoj komori gdje je isključena prisutnost vode. Mokre tehnike zavarivanja (slika 4.) koriste se na dubinama do približno 60 m i za manje zahtjevne spojeve, a zavarivanje se provodi direktno u vodi. Kako se kod mokrog podvodnog zavarivanja sam proces zavarivanja odvija u opasnom i nepraktičnom ambijentu, bitno je poznavati sve elemente koji sudjeluju u njemu da bi izvođenje bilo uspješno. Tih elemenata koje treba poznavati ima dosta, a sigurnost ronionica-zavarivača je na prvom mjestu i njemu se posvećuje najviše pažnje. Dugo vremena mokro podvodno zavarivanje se smatralo tehnologijom drugog reda, a razlog tome su problemi koje stvara velika količina difundiranog vodika i brzo hlađenje. To su činjenice koje je nemoguće izbjeći, ali je moguće utjecati na njih i to najviše odabirom postupka zavarivanja, dodatnog materijala i odgovarajućih parametara. Danas je tehnika mokrog podvodnog zavarivanja jedna od glavnih tehnika reparaturnih i remontnih radova. [2]



**Slika 3. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori[3]**



**Slika 4. Mokro podvodno zavarivanje[4]**

Uz pojam mokro podvodno zavarivanje još uvijek se veže isključivo REL zavarivanje što je u većini slučajeva i istina. Međutim, sve više se eksperimentira s praškom punjenom žicom koja nudi niz prednosti. Nedostatak je svakako komplicirana i složena oprema, ali je velika prednost mogućnost automatizacije iz čega slijedi i primjena na većim dubinama. I dok se uz REL postupak mora voditi računa o ronioncu-zavarivaču, podvodno zavarivanje praškom punjenom žicom moguće je provesti i bez ronionca-zavarivača, samim time se smanjuje rizik i nema vremenskih ograničenja za radove na većim dubinama, ali to zahtjeva izradu kompleksnih automata za zavarivanje.[37]

Zbog vrlo zahtjevne okoline koju uglavnom imaju cjevovodi i off-shore postrojenja, tj. materijali koji se koriste pri izradi i održavanju postrojenja, vrlo česta je upotreba čelika visoke čvrstoće. Takvi čelici daju dosta prednosti u odnosu na standardne, posebno kad je težina konstrukcije važan faktor. Razvoj čelika za cjevovode podrazumijeva primjenu mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće pri čemu su za postizanje dobrih mehaničkih svojstava primijenjeni kontrolirani uvjeti valjanja i hlađenja.[37] Čelik gradacije X70 prema API 5L spada u skupinu čelika visoke čvrstoće i danas je standard u izgradnji kopnenih i podmorskih cjevovoda i smatra se dobro zavarljivim u normalnim uvjetima. [6]

## 2. PODVODNO ZAVARIVANJE

Tehnologija spajanja koja je danas nezamjenjiva pri izgradnji i održavanju podvodnih struktura, te reparaturi plovila, održavanju plovila i „off-shore“ postrojenja.[6]

Podvodno zavarivanje je svako zavarivanje izvedeno ispod površine vode na određenoj dubini, a prema atmosferi u kojoj se zavarivanje primjenjuje, može se podijeliti na dvije vrste, suho i mokro podvodno zavarivanje. Suho podvodno zavarivanje podrazumijeva da se proces provodi u atmosferi zraka ili inertnog plina, pri čemu tlak plina može biti povišen ili jednak atmosferskom unutar posebne komore tzv. habitata. Mokro podvodno zavarivanje podrazumijeva da se proces zavarivanja provodi direktno u vodi bez ikakve izolacijske barijere koja bi spriječavala kontakt okolne vode s mjestom rada, talinom, električnim lukom, dodatnim materijalom i samim zavarivačem.[6]

### 2.1. Suho podvodno zavarivanje

Kod suhog podvodnog zavarivanja proces se odvija unutar različitih izvedbi podvodnih kutija ili unutar podvodnih komora pri atmosferskom ili hiperbaričkom tlaku. Na kvalitetu dobivenih zavarenih spojeva i na sam proces zavarivanja utječu vrsta plinovite atmosfere i ambijentalni tlak. Na strukturu, svojstva i kvalitetu zavarenih spojeva negativan utjecaj imaju komprimirani zrak i mješavine za disanje na bazi dušika. Smjesa na bazi helija i kisika najčešće se koristi kao plinovita atmosfera za disanje, dok se argon koristi kao zaštitni plin. Udio pojedinog plina u smjesi ovisi o dubini mjesta zavarivanja, ali i o tome dali se radi o plinskoj mješavini za disanje, zaštitnoj plinskoj atmosferi pri zavarivanju ili okolnoj atmosferi u komori.[7] Porastom dubine mjesta zavarivanja raste i udio helija u plinskoj atmosferi.

Kvaliteta zavarenih spojeva dobivenih suhim tehnikama zavarivanja je dobra i ponekad istovjetna kvaliteti spojeva zavarenih na kopnu jer je moguće postići A i O klase zavara prema specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6. [10] Tako visoka kvaliteta zavara postiže se zbog mogućnosti predgrijavanja i naknadne toplinske obrade nakon zavarivanja, a ne samo zahvaljujući okolnim uvjetima (zaštitna atmosfera, hlađenje zavara na zraku). Odlični uvjeti za pripremu spoja prije zavarivanja je ono što karakterizira suho podvodno zavarivanje, a također naknadno brušenje lako se može izvesti ako je potrebno.

Potreba za puno sofisticiranijom i tehnički zahtjevnijom opremom je razlog puno veće cijene izvedbe suhog podvodnog zavarivanja za razliku od izvedbe mokrog podvodnog zavarivanja.[10] Zahtjevi za kvalitetu zavarenih spojeva nekad su takvi da su ostvarivi jedino suhim podvodnim zavarivanjem, a iako bi korištenjem mokrog podvodnog zavarivanja za zavarivanje nekog nosača pri izgradnji platforme troškovi postupka bili puno manji, to nije uvijek moguće upravo zbog zahtjeva za kvalitetu zavora. Još jedan nedostatak je nefleksibilnost postupka jer da bi mogli montirati komoru potrebno je da moguć jednostavan pristup mjestu zavarivanja, a to nije uvijek moguće kod razno raznih konstrukcija platformi. Zbog toga se tehnike suhog podvodnog zavarivanja koje uključuju komore i mini komore primjenjuju prvenstveno za zavarivanje podvodnih cjevovoda. Za rad na platformama češće se koriste tehnike suhog zavarivanja koje koriste kutije kao prostor u kojem se zavarivanje odvija. Pri suhom podvodnom zavarivanju primjenjuju se jednake tehnike rada kao u normalnim uvjetim, a najčešće se zavaruje REL, TIG, MIG/MAG i FCAW postupcima zavarivanja zavisno o dubini, osnovnom materijalu, debljini osnovnog materijala, itd..[8]

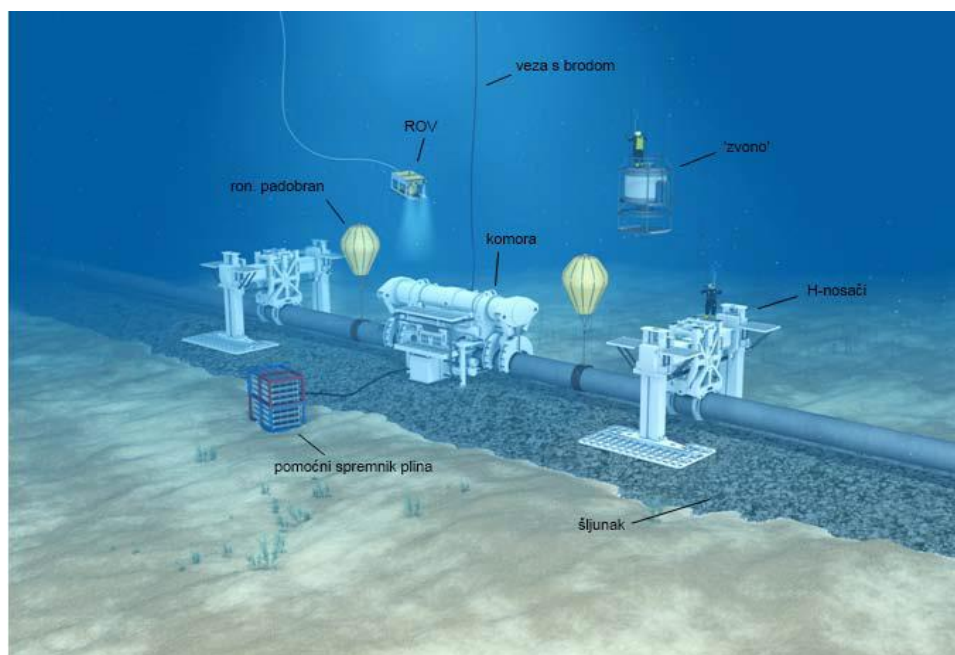
Prema specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6 tehnike suhog podvodnog zavarivanja dijele se na:

- a) Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori
- b) Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj mini-komori
- c) Atmosfersko podvodno zavarivanje

### ***2.1.1. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj komori***

Habitati su čelične konstrukcije u obliku većih prostorija, a njihov oblik i veličina prilagođeni su objektu koji se zavaruje. S pratećeg ronilačkog broda habitat se spušta i postavlja na konstrukciji kada je to moguće ujedno oslanja na morsko dno. Ronioci-zavarivači pri radovima u habitatu u pravilu ne nose ronilačku opremu, a samo za vrijeme zavarivanja koriste zaštitne maske koje štite od zavarivačkih plinova i dimova. Moderni habitati opremljeni su uređajima za klimatizaciju, sustavom za održavanje života, zatim uređajima za pročišćavanje atmosfere i opremom za kontrolu i nadzor. Glavni nedostaci hiperbaričkog zavarivanja jesu: visoki troškovi, ograničenje primjene na spajanje dijelova jednostavnije geometrije radi brtvljenja, visoka složenost operacija i dr.[37]





Slika 5. Podvodni habitat [10]

### 2.1.2. Zavarivanje u suhoj hiperbaričkoj mini-komori

Suhe hiperbaričke mini-komore su relativnom male i jednostavne prostorije koje nemaju dno i okružuju mjesto zavarivanja. Nakon postavljanja na mjesto gdje je potrebno obaviti zavarivanje, mini komora se ispunjava plinom ili plinskom mješavinom, koja istiskuje vodu i omogućava rad na suhom. U komorama zbog malog prostora nije moguće imati sve alate i ostalu opremu kao u normalnim komorama.[37] Za transport ronioca sa površine broda do radnog mjesta koristi se zvono (slika 6.). Kad roniaci dosegnu dno izvrši se izjednačavanje tlaka unutar zvona sa tlakom na toj dubini i zatim se otvori izlaz na dnu zvona. Zbog malog prostora, u mini komorama istovremeno može raditi samo jedan zavarivač, a drugi tj. njegova zamjena nalazi se u zvonu i nadzire njega i sve parametre instrumenata potrebnih za rad. Također roniac u zvonu može čuti kako njegov partner diše. Zapremina zraka u zvonu je dovoljna za 24 sata u slučaju zatajenja opreme, a zvono također sadržava i drugu opremu potrebnu za takve situacije. Kako bi roniac-zavarivač na velikim dubinama bio koncentriran na proces zavarivanja, ekipa na površini sve nadzire i u stalnoj je komunikaciji sa zamjenom u zvonu, a to omogućava audio-vizualni sustav i vanjska svjetla na zvonu. Roniaci-zavarivači koriste grijana odijela na većim dubinama zbog niskih temperatura, jer se oni djelomično nalaze u vodi tijekom rada. Stupnju vlage u atmosferi komore i mogućnosti kvalitetne pripreme spoja određuju kvalitetu zavarenog spoja.[9]



Slika 6. Podmorsko zvono za 2 čovjeka[10]

### 2.1.3. Atmosfersko podvodno zavarivanje

Kako bi se mjesto zavarivanja izoliralo od vode koriste se aluminijske ili čelične konstrukcije, koje su otvorene prema površini. Nema potrebe za ronjenjem te nema utjecaja povišenog tlaka na parametre zavarivanja. Nakon postavljanja i fiksiranja koferdama na konstrukciju voda koja se nalazi u njemu ispumpava se pomoću posebnih sustava ventila. Zavarivači ulaze u koferdam sa gornje (otvorene) strane. Zavarivanje pomoću koferdama koristi se u praksi zbog visoke kvalitete dobivenih zavara u odnosu na zavare dobivene "mokrim" postupcima zavarivanja, ali su visoki financijski troškovi. Ovdje se javljaju problemi zbog propuštanja vode na mjestima gdje se koferdam i metalna konstrukcija spajaju te je zbog toga nekad tijekom cijelog procesa potrebno ispumpavati vodu iz koferdama. Moguće je koristiti REL i MIG/MAG postupak za zavarivanje u koferdamu.[11]



Slika 7. Atmosfersko podvodno zavarivanje[30]

## 2.2. Mokro podvodno zavarivanje

Kod mokrog podvodnog zavarivanja mjesto zavarivanja i električni luk nisu odvojeni od vode nego se nalaze u direktnom doticaju s vodom. Bolja fleksibilnost i niži troškovi prednosti su mokrog podvodnog zavarivanja u odnosu na suho podvodno zavarivanje pri kojem se postiže visoka kvaliteta zavara, a također mokro zavarivanje danas ima sve veći industrijski i ekonomski potencijal pri izgradnji i održavanju podvodnih objekata.[6] Nedostaci su brzo odvođenje topline zbog čega se povećava tvrdoća materijala, također difundirani vodika u materijalu utječu na lošiju kvalitetu zavarenog spoja, odnosno povećava se sklonost pojavi pukotina. Najčešća primjena mokrog podvodnog zavarivanja je prilikom reparacija, odnosno sanacija šteta nastalih prilikom eksploatacije u agresivnoj okolini, dakle korozija off-shore postrojenja ili popravaka cjevovoda kao i brodova, odnosno podmornica.[9] Radne dubine zavarivača su uglavnom do 50 m, ali napravljeni su pokusi na dubinama većim od 100 m, ali utjecaj hidrostatskog tlaka nepovoljno utječe na održavanje električnog luka, a i kvaliteta zavarenog spoja je upitna. Oprema za podvodno zavarivanje mora biti dizajnirana za okolišne uvjete, a operater obično nosi kompletnu opremu za ronjenje.[37]



Slika 8. Primjer mokrog podvodnog zavarivanja[31]

### 2.2.1. Povijesni razvoj mokrog podvodnog zavarivanja

Uspostava električnog luka u vodi bila je nezamisliva pa se tako podvodno zavarivanje sve do 1932. godine smatralo samoubojstvom. A kao početak smatra se primjena podvodnog rezanja iz 1918. godine za koju postoje neki izvještaji koji opisuju popravke na parnom brodu St. Paul. Ruski inženjer Konstantin Khrenov je to promijenio kada je otkrio da je 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. Khrenov i drugi znanstvenici osmislili su 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 9).[12]



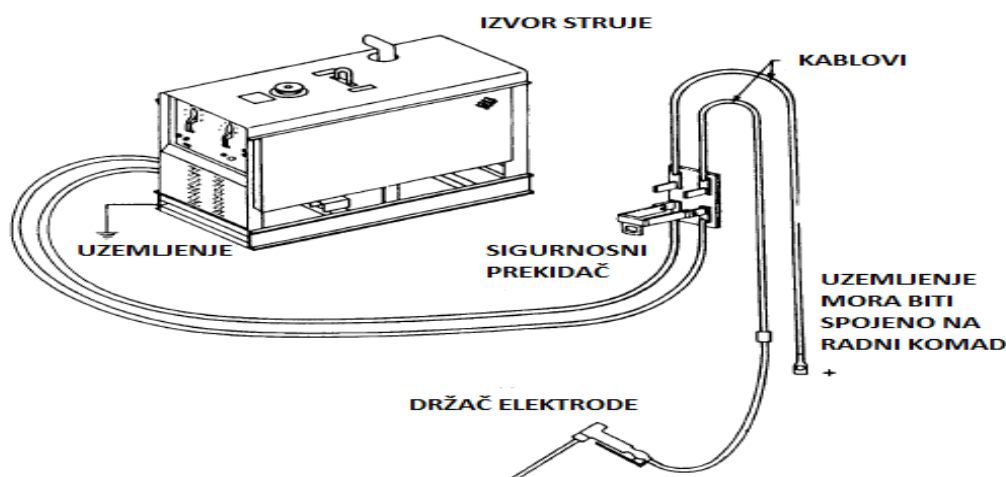
Slika 9. Prva testiranja mokrog podvodnog zavarivanja[12]

Tijekom II. Svjetskog rata javljaju se prve primjene postupka kada je zabilježeno više slučajeva podvodnog zavarivanja i rezanja pri čemu se izdvaja raščišćavanje potonulog brodovlja u luci Peral Harbor. REL postupak, odnosno ručno elektrolučno zavarivanje već tad je bio sinonim za mokro podvodno zavarivanje.[6] 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 podvodno zavarivanje korišteno je u nizu slučajeva za popravke na plovnim off-shore postrojenjima, platformama, podvodnim spremnicima i cjevovodima. 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. U Meksičkom zaljevu provedeno jedno pokusno zavarivanje na dubini od 180 m, ali se REL, koliko je poznato nije koristio na dubinama većim od 70 m. U državama bivšeg SSSR-a razvijao se 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]

### 2.2.2. Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom

Mokro zavarivanje REL postupkom najčešće se koristi jer ima dobru prilagodljivost i primjenjivost. REL postupak karakteriziraju niski troškovi opreme za zavarivanje i fleksibilnost primjene, pa se upravo zbog toga kod mokrog podvodnog zavarivanja najčešće koristi REL postupak. Postupak je vrlo rasprostranjen i koristi se kod popravaka oštećenih off-shore platformi. Korištenje naprednih izvora struje i elektroda sa adekvatnim oblogama potrebno je zbog mogućnosti pojave loma koji se javlja zbog visokog stupnja topljivosti vodika. Osnovne uvijete kod mokrog podvodnog zavarivanja jako je važno zadovoljiti kako bi dobili što bolju kvalitetu zavarenog spoja. Kao najvažniji uvijet ističe se educiranos i uvježbanost ronioca-zavarivača. Slika 10. prikazuje osnovnu opremu potrebnu za uspješno provođenje REL postupka.



Slika 10. Osnovna oprema za podvodno REL zavarivanje[13]

Zavarivanje REL postupkom temelji se na uspostavi električnog luka između elektrode i radnog komada koji je koncentriran na vrlo uskom području. Rezultat procesa je taljenje osnovnog materijala, dodatnog materijala i njegove obloge. Glavna zadaća obloge elektrode je razgradnja i uspostava zaštitne plinske atmosfere oko električnog luka. Zaštitna atmosfera štiti talinu od kontaminacije okolnom atmosferom i njezinim nečistoćama. U procesu taljenja elektrode formiraju se kapljice, koje se deponiraju u osnovni materijal stvarajući pri tome talinu, koja se naknadno skrućuje i pri tome nastaje formirani zavareni spoj. Ronilac zavarivač mora biti svjestan da kapljice ne mogu biti unesene u talinu samo gravitacijskom silom, nego su potaknute i silom toka električne struje.[13]

### **2.2.3. Fizikalne osnove podvodnog zavarivanja**

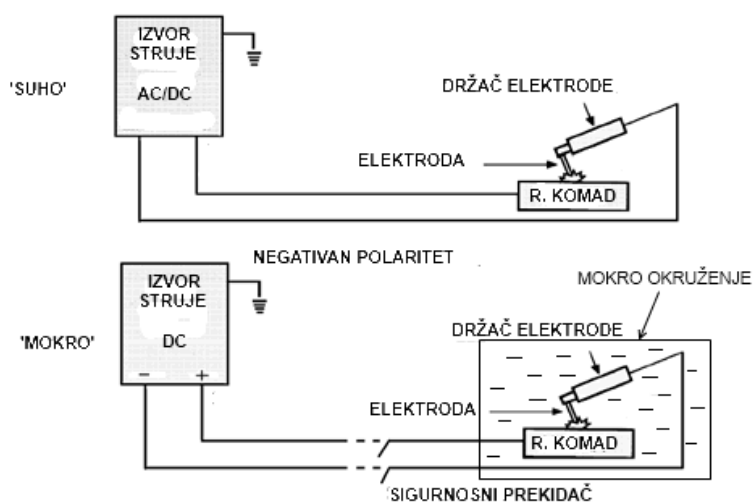
Može se reći da je REL postupak zavarivanja najstarija tehnika spajanja metala ispod površine vode, a primjenjiv je za podvodne strukture, ali dugo vremena zbog loših mehaničkih svojstava zavarenog spoja je smatran je tehnologijom drugog reda. Niži troškovi i bolja fleksibilnost, daju prednost mokrom podvodnom zavarivanju pred postupcima suhog podvodnog zavarivanja pri kojem se postiže visoka kvaliteta zavara. To je najviše 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.[6] Kao što je već navedeno za postizanje prihvatljive kvalitete zavarenog spoja pri mokrom podvodnom zavarivanju, potrebno je ispuniti više uvijeta. Educirani i uvježbani ronionci-zavarivači temelj su aktivnosti podvodnog zavarivanja. Tehnika rada posebno je naglašena na treningu ronionca-zavarivača, a razlog tome je što pri zavarivanju može doći do povećanja udjela vodika i poroziteta u metalu zavara ako je nepravilna tehnika rada. Uz vještinu ronjenja koja je jako važna, ronionc-zavarivač mora imati savršenu vještinu zavarivanja u normalnim uvijetima. Zbog opasnosti od električnog šoka, jako je važna koordinacija između tima izvan vode i ronionca-zavarivača, kako bi se održala sigurnost ronionca zavarivača i učinkovitost rada.

Mokro podvodno zavarivanje REL postupkom karakterizira[6]:

- ✓ Nestabilnost električnog luka koja uzrokuje nepravilnost geometrije zavarenog spoja, uključke troske, porozitet i nedovoljnu penetraciju.
- ✓ Ubrzano hlađenje dovodi do visoke tvrdoće u zoni utjecaja topline, niske žilavosti zavarenog spoja i pojave poroziteta zbog zaostalih „zarobljenih“ plinskih mjehurića.
- ✓ Visok sadržaj vodika u stupu električnog luka, kapljicama rastaljenog metala u prijenosu i talini zavara uzrokuje zarobljavanje 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 uzrokuje oksidaciju, snižavanje udjela legiranih elemenata i degradaciju mehaničkih svojstava.
- ✓ Raspad i otapanje obloge elektrode što dovodi do nestabilnosti električnog luka i pojave poroziteta.

### 2.2.3.1. Shematski prikaz mokrog podvodnog zavarivanja

Kako se mokro podvodno zavarivanje uglavnom odvija REL postupkom na slici 11. dan je shematski prikaz ručnog elektrolučnog zavarivanja u suhoj i morkoj okolini za usporedbu.



Slika 11. Shematski prikaz REL zavarivanja[15]

Princip rada REL postupka pod vodom i REL postupka na suhom je sličan, ali postoje razlike u opremi koja se koristi:

- ✓ Elektroda se spaja na negativni pol
- ✓ Koriste se samo istosmjerni izvori struje
- ✓ Koriste se elektrode sa specijalnom oblogom koja je zaštićena vodonepropusnim premazom

Preko kabela radni komad je povezan sa izvorom struje. U držaču za elektrodu nalazi se obložena elektroda, te je preko drugog kabela povezana sa negativnim polom izvora struje. Do električnog kontakta dolazi kada elektroda dođe u kontakt sa radnim komadom. Tada se uspostavlja električni luk koji tali elektrodu i površinu radnog komada. Ako se luk pomiče dalje po radnom komadu ili se prekine, nastala talina će se skrutnuti te će nastati zavareni spoj. Bitno je da je obložena elektroda spojena na negativni pol izvora struje, u suprotnom bi došlo do elektrolize, te bi moglo doći do uništenja svih metalnih dijelova u držaču elektrode.[10] Mokro podvodno zavarivanje zahtjeva samo korištenje istosmjernog izvora struje, dok kod zavarivanja na suhom moguće je koristiti istosmjerni ali i izmjenični izvor struje. Istosmjerna struja pod vodom stvara stabilniji električni luk i lakše ga je uspostaviti nego izmjeničnom strujom, a uz to smanjena je i opasnost od strujnog udara.

Kablovi koji zatvaraju strujni krug dobro su izolirani od vodene okoline dvostrukom oblogom. Kod mokrog podvodno zavarivanja iz sigurnosnih razloga potrebno je imati sigurnosni prekidač koji je izvan vode, a njegovim se pritiskom zatvara strujni krug.[15]

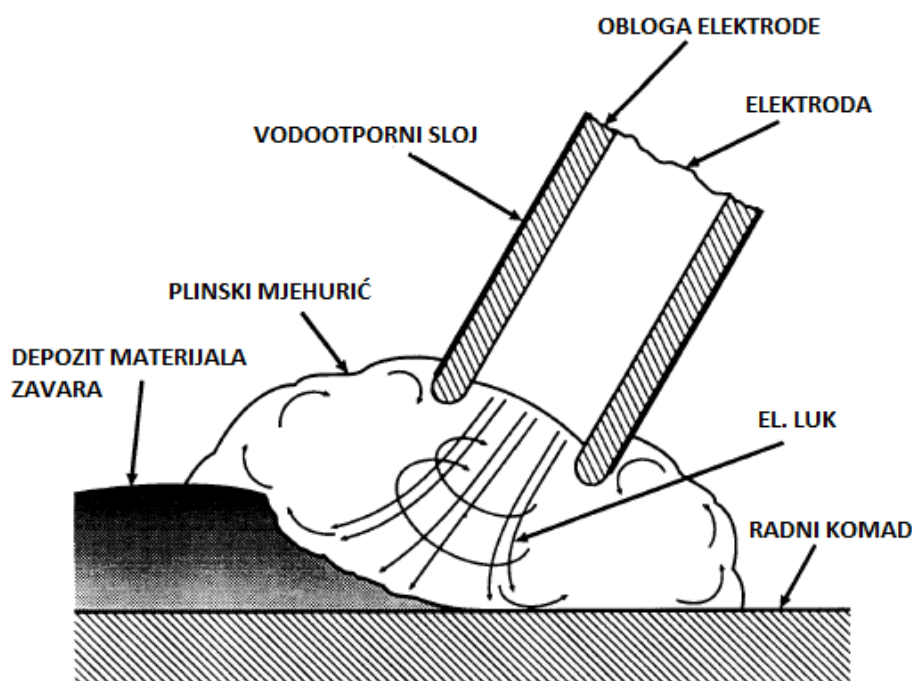
#### 2.2.3.2. Plinski mjehurić

S procesom zavarivanja moguće je početi, kada se steknu uvjeti da se formira zavarivački strujni krug i uspostavi električni luk. 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 oko vrha elektrode koji se održava sve do prekidanja električnog luka.[6]



Mjehurić ima višestruku ulogu i utjecaj na proces zavarivanja[37]:

- ✓ 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.



Slika 12. Prikaz procesa mokrog zavarivanja[13]

U parno-plinskoj atmosferi održava se električni luk kod mokrog podvodnog zavarivanja, a ta atmosfera nastaje izgaranjem i raspadom obloga elektroda te disocijacijom vode u električnom luku. Velike razlike između temperature vode i električnog luka dovodi do trenutnog isparenja vode oko električnog luka te stvaranja relativno stabilnog plinskog mjehurića. Plinski mjehurić, tj. njegov volumen konstantno raste sve dok njegov polumjer ne postane tangenta inicijalne praznine, tada se mjehurić odvaja a istovremeno počinje stvaranje novog mjehurića i njegov rast. Sve dok se ne prekine električni luk ovaj proces se ponavlja. A električni luk pomoću takvog mehanizma je konstantno zaštićen.

Zbog sposobnosti luka da automatski regulira svoje energetske stanje omogućeno je elektrolučno zavarivanje ispod površine vodom. 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.[37]

Disocijacija vode pri mokrom podvodnom zavarivanju odvija se prema reakciji (1) te raste parcijalni tlak vodika i kisika u električnom luku [6]:



Uz to, ugljik koji dijelom nastaje izgaranjem obloge elektrode s kisikom stvara ugljični dioksid koji također disocira prema reakciji (2) [6]:



Prema navedenim reakcijama, isparavanjem i disocijacijom vode te sagorijevanjem obloge dolazi do stvaranja plinova sljedećeg sastava [6]:

- 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)

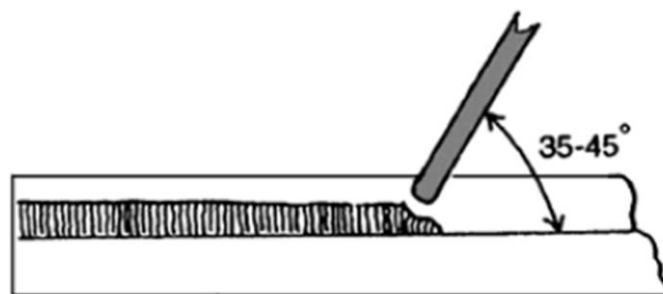
#### 2.2.4. Tehnike rada

Kod mokrog podvodnog zavarivanja koriste se 3 osnovne tehnike rada, a to su:[15]

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

##### 2.2.4.1. Tehnika povlačenja

Tehnika povlačenja je najjednostavnija tehnika kod podvodnog zavarivanja, a radno iskustvo zavarivača ne treba biti najvišeg stupnja kao kod nekih drugih tehnika. Kad se uspostavi električni luk, ronioc-zavarivač povlači elektrodu po radnom komadu, pritom održavajući lagani pritisak na elektrodu dok se ona tali. Zavarivač pritom mora paziti da održava pravilan kut nagiba elektrode u odnosu na radni komad i jednoliku brzinu povlačenja. Kut nagiba elektrode mora biti oko  $35-45^\circ$  kako bi se omogućilo odvođenje mjehurića sa električnog luka. Brzina zavarivanja, odnosno brzina povlačenja elektrode po radnom komadu direktno je povezana s kutom nagiba elektrode.[15] Što je kut nagiba elektrode veći, brzina povlačenja elektrode biti će manja, te će nastali sloj zavara biti širi, a penetracija veća. Pomoću ove tehnike moguće je npr. zavare širine od 5 mm zavariti u jednom prolazu s elektrodom promjera 5 mm, a zavareni spoj ima približnu čvrstoću kao i spoj s tri prolaza.[17] Tehnika povlačenja pogodna je za stvaranje sučeljenih i kutnih spojeva, a razlikujemo 3 osnovne pozicije zavarivanja, a to su horizontalni položaj, vertikalni položaj i nadglavni položaj kad je radni komad iznad zavarivača. Smanjenje vremena zavarivanja, jednostavnost održavanja zavarenih spojeva i to što nije potrebno čišćenja troske između prolaza se neke od prednosti ove metode. Za otežane uvijete rada i situacije kada je slaba vidljivost ova tehnika ja jako povoljna.



Slika 13. Tehnika povlačenja[16]

#### 2.2.4.2. Tehnika njihanja

Kod tehnike njihanja zavarivač mora konstantno mijenjati kut elektrode tijekom zavarivanja dok elektrodu njiše oko točke najbliže držaču elektrode. Ovime se postiže veći depozit metala, te se spriječava nekoncentrično izgaranje elektrode, posebice pri zavarivanju korijena zavara. Kako je kut nagiba elektrode kod mokrog zavarivanja nešto manji za razliku od suhog zavarivanja dolazi do nekoncentričnog izgaranja elektrode. Elektroda je u stalnom kontaktu s radnim komadom, pa zbog toga dolazi do nejednolikog taljenja, odnosno jedna strana elektrode se protali više od druge, zbog čega nije moguće kontrolirati depozit metala.[15] Kut nagiba elektrode se mijenja tehnikom njihanja upravo kako bi se to spriječilo. Kod zavarivanja korijena zavara kod kutnih spojeva najbolje rezultate daje tehnika njihanja.

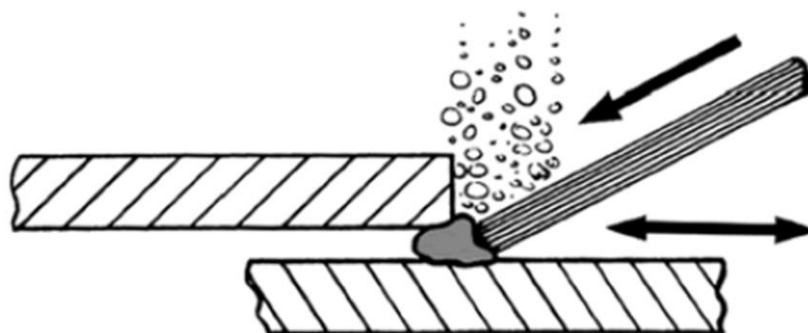


Slika 14. Tehnika njihanja[16]

#### 2.2.4.3. „Korak-unatrag“ tehnika

Kod korak-unatrag tehnike zavarivač odugovlači na trenutak s pomicanjem elektrode dalje duž zavara tako da ju pomakne nekoliko milimetara natrag u talinu zavara. Ovom tehnikom se postižu veća čvrstoća i širina zavarenog spoja, a moguće je kontroliranje brzine hlađenja taline čime zavareni spoj ima bolja mehanička svojstva. Međutim, ova tehnika zahtjeva dobru vještinu, iskustvo te dobro razumijevanje skrućivanja od strane zavarivača. Kod zavarivanja kutnih spojeva u 3 prolaza, korak-unatrag tehnika idealna je za zadnji prolaz, jer uklanja sve sitne pogreške nastale u prethodnim prolazima.[15]

Kutni spojevi su daleko najčešće korišteni u praksi pri mokrom REL zavarivanju i uvijek se ostvaruju u najmanje 3 prolaza. Ova tehnika se najčešće koristi za kutne zavare.



Slika 15. „Korak-unatrag" tehnika[16]

### 2.2.5. Oprema pri mokrom podvodnom zavarivanju

Potrebne su određene modifikacije opreme koja se koristi za mokro podvodno zavarivanje iako je oprema veoma slična opremi za rad na suhom, a razlog modifikacije je potreban i sigurnosnih potreba. Prema primjeni opremu možemo podijeliti na opremu za zavarivanje i opremu ronioca-zavarivača.

#### 2.2.5.1. Oprema zavarivača

Osnovna oprema ronioca-zavarivača sastoji se od [18] :

- 1) Suho ronilačko odijelo – ovisno o uvjetima pod vodom, odnosno temperaturi vode odabire se odijelo, a preporučava se:
  - 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
  - niže od 5 C° - odijelo sa grijanjem
- 2) Zavarivačka maska - zaštitna maska koja je opremljena odgovarajućim zavarivačkim lećama koje se određuju ovisno o uvjetima pod vodom.
- 3) Gumene rukavice
- 4) Boca sa stlačenim zrakom i regulacijskim ventilom
- 5) Crijevo za vanjsku dobavu zraka i spremnik zraka na površini
- 6) Uređaj za komunikaciju



**Slika 16. Ronilac-zavarivač spreman za rad[19]**

#### 2.2.5.2. Oprema za zavarivanje

Oprema za zavarivanje sastoji se od istosmjernog izvora struje s obvezno sniženim naponom praznog hoda, specijalnih kablova s pojačanom izolacijom, pištolja za zavarivanje odnosno držača elektrode te elektroda za mokro podvodno zavarivanje. Uz zavarivača u vodi, na površini postoji pomoćni tim koji je u stalnoj komunikaciji sa zavarivačem. Uloga pomoćnog tima je da brine za opskrbu zraka, dobavu alata i elektroda, regulaciju parametara zavarivanja, kao i ostalih sigurnosnih elemenata kao npr. prekidanje strujnog kruga posebnom sklopkom. U slučaju prekida veze ili nepredviđenih okolnosti ronilac izlazi iz vode kako bi se izbjegle eventualne incidentne situacije.[18] Sigurnosni aspekti moraju obavezno biti ispunjeni, a također važno je redovno održavanje opreme za mokro podvodno zavarivanje kako bi joj se produžio vijek trajanja te osigurala njena ispravnost.

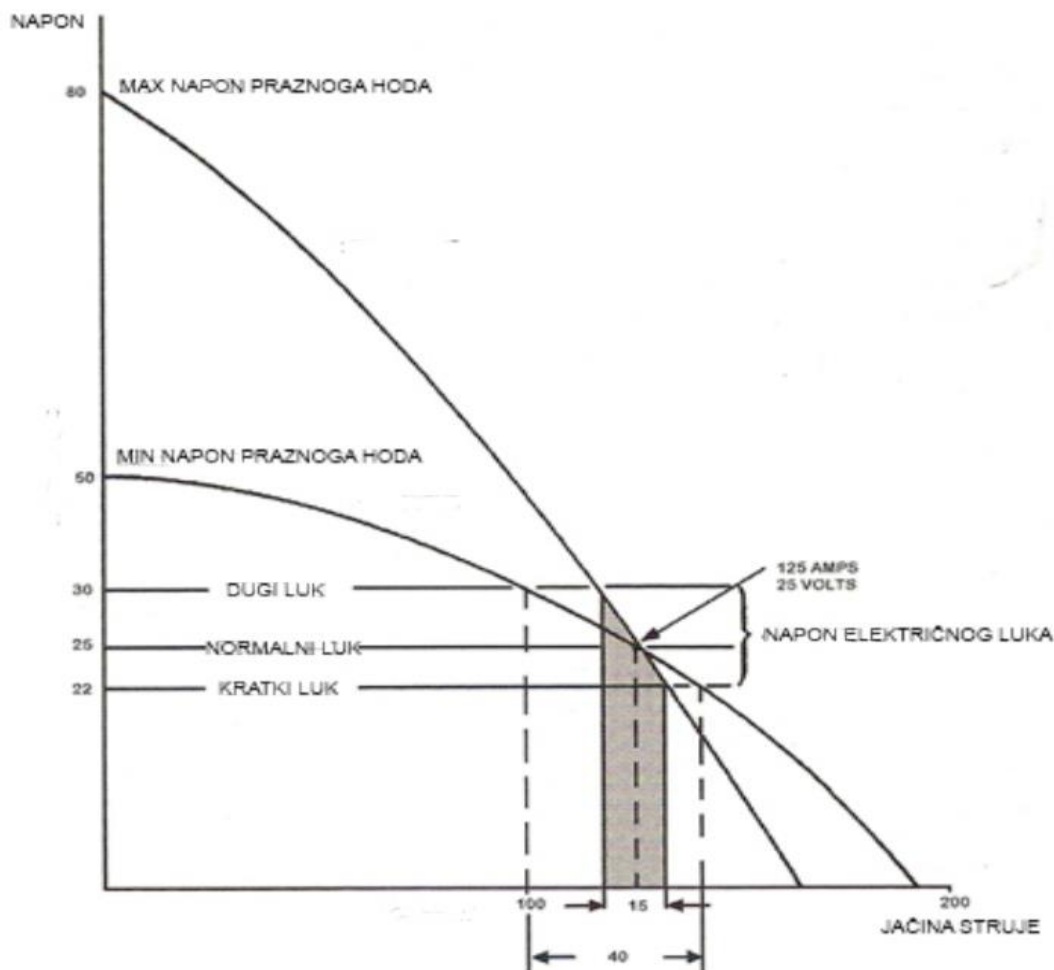
Izvor struje mora moći osigurati minimalno 300 A kako bi se osigurali pogodni uvjeti za sve vrste podvodnih zavarivanja. Ispravljači su konstruirani tako da imaju smanjen napon i primjerena svojstva za zavarivanje pod vodom. Također se upotrebljavaju tranzistorski izvori struje, a daljnja istraživanja upućuju na to da sadašnji stadij razvoja tehnologije izvora struje omogućuje bolje uspostavljanje električnog luka i njegovu stabilnost.[10]

Ostvarenje električnog luka u većim dubinama moguće je ako izvor struje ima intenzivno dinamičko ponašanje. Korištenjem slabijih strojeva produžuje se vrijeme zavarivanja, a time i vrijeme boravka zavarivača pod vodom. Potreba za većom dužinom kabela za zavarivanje može se dogoditi ako dođe do povećanja dubine na kojoj se zavarivanje odvija, a to može izazvati pad napona zbog velike udaljenosti koju struja mora prijeći od izvora do radnog komada. Zato je bitno da izvor struje može dati dovoljno visok napon praznog hoda kod mokrog podvodnog zavarivanja.[18]



**Slika 17. Izvor struje za podvodno zavarivanje [34]**

Izvor struje ima strmopadajuću karakteristiku (slika 18.), 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. Ako se duljina električnog luka povećava onda će se napon u električnom luku isto povećati, dok struja ostaje blizu zadane vrijednosti. Taljenje elektrode tako je ujednačeno prilikom procesa.[18]



**Slika 18. Strmopadajuća karakteristika izvora struje[15]**

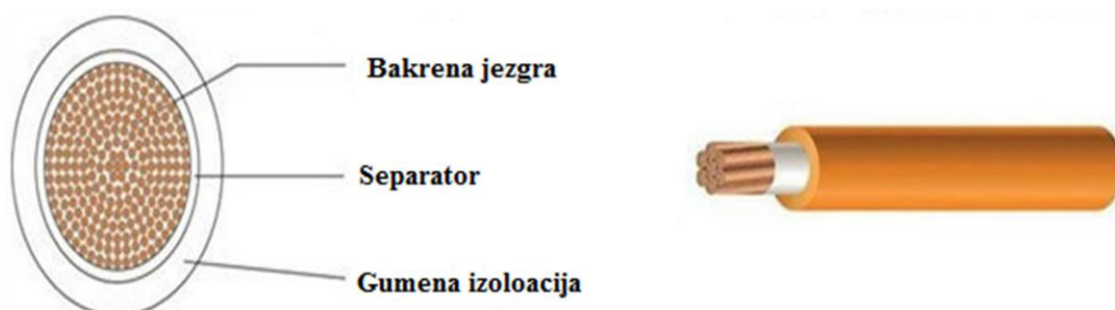
Glavne značajke držača elektrode (slika 19.) za podvodno zavarivanje su trajnost s povećanjem dubine i zaštitna izolacija za zaštitu ronilaca, plus mehanizam za jednostavno umetanje i ispuštanje elektrode. Držači elektroda koji se koriste za mokro podvodno zavarivanje su posebno konstruirani za tu namjenu, bez opruga i potpuno izolirani neprovodljivim materijalom. Potrebno je provjeriti ispravnost odnosno istrošenost ili moguća oštećenja držača elektrode prije svake upotrebe.[20]





Slika 19. Držać elektrode, zavarivački kabel i obložena elektroda[34]

Specijalni zavarivački kablovi (slika 20.) s pojačanom izolacijom se koriste za mokro podvodno zavarivanje. Zbog pada napona preporučava se da dužina kabela ne bude veća od 15m, te da su spojevi čisti. Minimalna preporučena površina poprečnog presjeka kabla je 50 mm<sup>2</sup>, jer kada se zavaruje na velikim udaljenostima između izvora struje i mjesta zavarivanja, pad napona je manji zbog nižeg električnog otpora.[20] Svi spojevi trebaju imati dobru izolaciju s nekoliko slojeva gume ili plastične trake kako si se osigurala sigurnost zavarivača od strujnog udara. Kako bi se zavarivaču omogućio lakši rad na držać elektrode može biti spojen kabel površine poprečnog presjeka manje od 25 mm<sup>2</sup>.



Slika 20. Presjek specijalnog zavarivačkog kabla[21]

Sigurnosni prekidač potrebno je imati zbog sigurnosnih razloga pri mokrom podvodnom zavarivanju. Pritiskom sigurnosnog prekidača dolazi do prekida strujnog kruga, a on se nalazi izvan vode. Osoba koja radi sa sigurnosnim prekidačem ne smije otvarati ili zatvarati strujni krug dok mu to zavarivač ne kaže, a kad mu zavarivač to kaže svaku promjenu mora potvrditi zavarivaču pomoću komunikacijskog sustava. Kod sigurnosnog prekidača se primjenjuju i određena pravila [20]:

- ✓ Prekidač mora biti pozicioniran na takvom mjestu da odgovorna osoba može vrlo jednostavno upravljati njime.
- ✓ Cijelo vrijeme strujni krug treba biti isključen, osim kad je zavarivač spreman za zavarivanje.

#### **2.2.6. Dodatni materijal**

Vodootporne obložene elektrode koriste se kod mokrog podvodnog zavarivanja kao dodatni materijal, a njihovom primjenom moguće je dobiti zavarene spojeve odgovarajuće kvalitete. Obložene elektrode sastoje se od metalne jezgre koja može biti žica, obloge koja je nanosena na metalnu jezgru prešanjem ili umakanjem i vodonepropusnog premaza. Oblogu elektrode je potrebno odrediti prema osnovnom metalu, zahtjevima kvalitete zavarenog spoja i uvjetima kod zavarivanja, dok metalna jezgra mora biti od istog ili sličnog materijala kao i radni komad. A kao glavna zadaća se izdvaja da osiguraju što je moguće manju količinu difundiranog vodika i jednostavno ukljanjanje troske.

Važnu ulogu za stabilno održavanje električnog luka u vodi ima obloga elektrode i njeni premazi koji sprječavaju prodor vode u oblogu. Izgaranjem i razlaganjem obloge elektrode te isparavanjem vode nastaje parno-plinska atmosfera, a u njoj se održava električni luk kod mokrog podvodnog zavarivanja. Zaštita električnog luka plinskim mjehurićem postoji cijelo vrijeme jer obloga gori sporije od metalne jezgre. Duljina električnog luka ne bi trebala biti duža od pola promjera elektrode kako bi se lakše održavao plinski mjehur.

Vlaga bi razorila oblogu da nema vodonepropusnog premaza na elektrodi koji sprječava prodor vlage do obloge elektrode. Vlažna obloga postala električki provodljiva, došlo bi zatvaranja strujnog kruga između jezgre i okolne vode, te bi došlo do narušavanja stabilnosti 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.[6]

Glavne funkcije obloge jesu [22]:

- ✓ Omogućuje uspostavljanje i lako održavanje električnog luka.
- ✓ Osigurava nastanak troske koja štiti zavar i smanjuje brzinu hlađenja. Troska mora biti takva da ju je moguće jednostavno ukloniti.
- ✓ Taljenjem stvara zaštitnu plinsku atmosferu oko električnog luka i taline metala, koja sprječava kontaminaciju zavarenog spoja kisikom i vodikom nastalim disocijacijom vode.
- ✓ Štiti elektrodu od direktnog kontakta s vodom.
- ✓ Sadrži legirne elemente koji poboljšavaju mehanička svojstva zavarenog spoja.
- ✓ Olakšava zavarivanje u prisilnim položajima.

Vrste obloga elektroda [23]:

- a) kisele (A - acide)
- b) bazične (B - basic)
- c) celulozne (C - cellulosic)
- d) rutilne ( R - rutilne)
- e) oksidne (FeO,SiO<sub>2</sub>)

Kisele elektrode ne koriste se za mokro podvodno zavarivanje te nisu preporučljive za zavarivanje čelika sa povišenim udjelom sumpora zbog opasnosti od toplih pukotina. Te elektrode nije potrebno posebno sušiti za zavarivanje u normalnim uvjetima, primjenjive su za zavarivanje istosmjernom i izmjeničnom strujom, te se mogu koristiti u svim položajima. Bazične elektrode iako daju dobra mehanička svojstva zavarenog spoja i smanjenu sklonost nastanku pukotina i poroziteta, također se ne koriste pri mokrom podvodnom zavarivanju zbog smanjene stabilnosti električnog luka. Nakon završetka zavarivanja bazičnim elektrodama troska se teško odstrani. Najčešće se primjenjuju kod zavarivanja konstrukcija sa visokim zahtjevima za mehanička svojstva i kvalitetu.[23]

Celulozne elektrode koriste se za zavarivanje korijena cijevi zbog velikog provara. Brzina taljenja je velika, troska se može lako otkloniti, moguće je zavarivanje u svim položajima sa istosmjernom ili izmjeničnom strujom.[23]

Rutilne elektrode daju odličnu stabilnost električnog luka pa su zbog toga najčešće primjenjive pri mokrom podvodnom zavarivanju. Primjenom rutilnih elektroda dobiju se dobra mehanička svojstva i lijep izgled zavara, a nakon zavarivanja troska se jednostavno može ukloniti. Moguće ih je koristiti pri zavarivanju istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Zavareni spojevi dobiveni rutilnim elektrodama posjeduju slabiju žilavost u metalu zavara, u odnosu na bazične elektrode.[23]

Rutilne elektrode s dvostrukim premazom pokazale su se kao najbolja opcija za mokro podvodno zavarivanje. Laku uspostavu i održavanje električnog luka omogućava prvi sloj premaza koji je električki provodljiv, a također ima vrlo dobra mehanička svojstva i u nekoj mjeri je nepromočiv. Drugi, vanjski sloj je električni izolator sa odličnim mehaničkim svojstvima i odličnom vodonepropusnošću. Prvenstvena zaštitna funkcija vanjskog sloja jest da omogući uporabu ovih elektroda u kemijski agresivnim sredinama, te pri većim dubinama.[10] Dodatne zalihe rutilnih elektroda moraju biti pohranjene na suhim mjestima, na temperaturama 15-30 °C, jer kvaliteta obloge određuje kvalitetu zavara. Ako je potrebno, proces sušenja odvija se pri maksimalnoj temperaturi od 80 °C u trajanju od 1 sat. [18] U vodu se ne bi trebalo uroniti više elektroda nego što je moguće potrošiti za nekih pola sata, a razlog tome je što obloga ne može štititi elektrodu duže vrijeme pod vodom.



**Slika 21. Rutilne elektrode s dvostrukim vodonepropusnim premazom[18]**

Za uspostavu električnog luka korištenjem ovih elektroda nije potrebno mehanički skinuti zaštitni sloj, i to je jedna od bitnih karakteristika uz jednostavno uspostavljanje i održavanje električnog luka te spriječavanja raspada obloge. Proizvođači elektroda za mokro podvodno zavarivanje razvili su vlastite elektrode po pitanju sastava obloge, metala za popunu zavara i vodonepropusnog sloja, tako da svaka elektroda ima specificirano kad, gdje i pri kojim parametrima se koristi.[10]

Metalna jezgra elektrode može biti od [15] :

- a) niskougličnog mekog čelika (C/Mn)
- b) niskolegiranog čelika
- c) austenitnog nehrđajućeg čelika
- d) na bazi nikla

Elektrode s metalnom jezgrom od niskougličnog mekog čelika koriste se za opću uporabu i prikladne su za zavarivanje niskougličnih čelika. Elektrode od austenitnog nehrđajućeg čelika te elektrode na bazi nikla koriste se za zavarivanje čelika s višim udjelom ugljika ili legiranih elemenata u svom sastavu.[15] Sklonost nastanku hladnih pukotina u ZUT smanjuje se jer zavareni spojevi dobiveni elektrodama od austenitnog nehrđajućeg čelika i elektrodama na bazi nikla mogu u svom sastavu zadržati vodik. Ravnomjerno raspoređeni porozitet se ipak javlja kod spojeva koji su dobiveni primjenom elektroda od austenitnog nehrđajućeg čelika. Zavareni spojevi dobiveni takvim elektrodama imati će dobru vlačnu čvrstoću, no zbog razlike u toplinskoj ekspanziji između osnovnog metala (feritni) i elektrode (austenitna) nastali zavareni spojevi biti će podložni pucanju uslijed velikih zaostalih naprezanja. Dok kod elektroda na bazi nikla to nije slučaj. Iako zavareni spojevi dobiveni elektrodama od austenitnog nehrđajućeg čelika imaju manju opasnost od nastajanja hladnih pukotina, zbog pukotina u metalu zavara uz granicu ZUT-a njihova uporaba je ograničena.[10] Na dubinama većim od 10 m dolazi do stvaranja visokog udjela poroziteta na zavarima, pa je korištenje elektroda na bazi nikla ograničeno dubinom. Plinovi koji nastaju izgaranjem elektrode ne stignu difundirati iz metala zavara, zbog nedovoljnog unosa topline.

### 2.3. Zavarljivost

Zavarljivost podrazumijeva dobivanje homogenih zavarenih spojeva prihvatljivih mehaničkih i ostalih svojstava primjenom uobičajene ili specijalne tehnologije zavarivanja.[10] Ekvivalentom ugljika može se izraziti zavarljivost čelika, a on se može izračunati po formuli, pri čemu svi kemijski elementi koji čine kemijski sastav čelika u različitim udjelima utječu na njegov iznos. Dodatni materijal ne smije imati niži ekvivalent ugljika od ekvivalenta ugljika osnovnog materijala. Udjel ugljika i utjecaj legirnih elemenata u čelicima bitno utječu na povećanje tvrdoće i sklonosti hladnim pukotinama koje su uzrokovane vodikom. Ekvivalentom ugljika određuje se mogućnost zavarivanja nekog osnovnog materijala, tj. sklonost pojavi hladnih pukotina upotrebom REL postupka ispod površine vode. Prema "specifikaciji za podvodno zavarivanje AWS D3.6" izraz za izračunavanje ekvivalenta ugljika glasi [27]:

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

Za mokro podvodno zavarivanje podobni su oni čelici kojima je ekvivalent ugljika manji od 0.4% i čelici kojima je udjel ugljika ispod 0.1%. Ako je ekvivalent ugljika kod nekih čelika viši od 0.4% onda je te čelike moguće zavarivati samo posebnim elektrodama (austenitne nehrđajuće i Ni-elektrode) te posebnim tehnikama rada jer su oni osjetljivi na pojavu hladnih pukotina. Ako se koristi tehnika njihanja elektrode i dodatni prolazi u svrhu toplinske obrade zavarenih spojeva može se umanjiti sklonost nastajanju hladnih pukotina. Ako se provodi toplinska obrada zavara bitno je da je interval između 2 prolaza bude kraći od minute. [15]

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

"Specifikacija za podvodno zavarivanje AWS D3.6" uzima u obzir čimbenike podvodnog okruženja i u njoj su sklopljene procedure i kvalifikacije za podvodno zavarivanje. Prema AWS D3.6 specifikaciji definirane su 4 klase zavara koje obuhvaćaju kvalitetu i svojstva zavara izvedenih različitim metodama. Klase zavarenih spojeva su [8]:

- a) klasa A zavara
- b) klasa B zavara
- c) klasa C zavara
- d) klasa O zavara

Ako govorimo o kvaliteti klasa A zavara je najbolja i može se čak usporediti sa zavarima koji su dobiveni na suhom. Zbog toga što je klasa A najteža za realizirati koriste se suhe tehnike za njeno ostvarivanje. Klasa B zavara namjenjena je za manje kritične primjene, gdje je dopustiva niža duktilnost, veliki porozitet i visok stupanj diskontinuiteta. Klasa C zavara primjenjuje se tamo gdje stupanj opterećenja nije primaran i to je zavar najniže kvalitete. Klasa O zavara su zavari koji moraju zadovoljiti zahtjeve neke druge norme ili specifikacije. Klase A i B primarne su u AWS D3.6 specifikaciji, dok klase C i O predstavljaju specijalne slučajeve koje nije moguće uključiti u klase A i B.

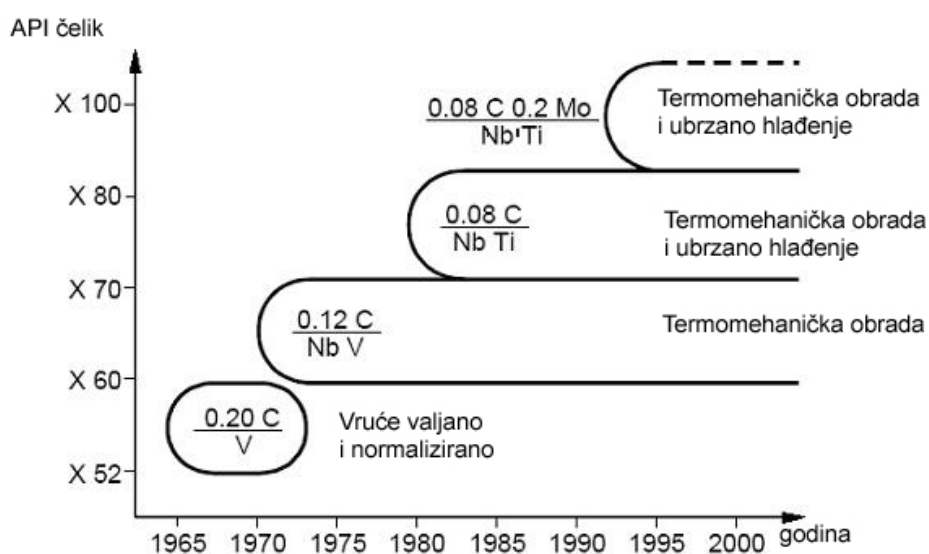
Radi aktualizacije sa modernim tehnologijama, svakih 5 godina specifikacija AWS D3.6 u pravilu se preuređuje, dopunjava i popravlja. Pravilan izbor ronioca-zavarivača jedan je od glavnih čimbenika za postizanje odgovarajuće kvalitete zavarenih spojeva. Mora biti vješt ronionac sa dobro uvježbanom tehnikom zavarivanja. Pojava grešaka u zavarenim spojevima kao porozitet ili povišeni udjel vodika u zavaru uzrokuje loša tehnika rada, dok uključke troske u zavarenom spoju može izazvati nepravilan nagib elektrode. Potrebna je i visoka fizička sprema zavarivača, a ne samo vještina ronjenja i odlična tehnika zavarivanja. Iskustvo je pokazalo da zavarivači sa visokom fizičkom spremom mogu raditi pod vodom bez pauze maksimalno 4 sata. Duži rad od toga zbog nastalog umora uzrokuje greške kod zavarivača. Standardi za obuku ronioca zavarivača i certificiranje razvijeni su diljem svijeta pa tako i u Europi kako bi se odigurala jedinstvena edukacija.[8]

### 3. ČELICI VISOKE ČVRSTOĆE API 5L X70 I NJIHOVA ZAVARLJIVOST

Dobra mehanička svojstva i odlična zavarljivost karakteriziraju čelike grupe X70 prema API 5L, a to je rezultat razvoja na području metalurgije i termomehaničke obrade. Fina sitnozrnata struktura odličnih mehaničkih svojstava postiže se smanjenjem udjela ugljika ispod 0.1%, mikrolegiranjem s Nb, Al i V, te pravilnom toplinskom obradom. Čelici X70 primjenjuju se svakodnevno za izgradnju cjevovoda, a u manjoj mjeri u off-shore postrojenjima.[37] Kod podmorskih cjevovoda, hidrostatski tlak okoline ima veći utjecaj pri projektiranju od radnog tlaka, tj. od kriterija čvrstoće materijala znatno je važnija otpornost cjevovoda na spljoštenje uslijed tlačnog opterećenja što od proizvođača zahtjeva kvalitetniju geometriju i oblik cijevi. Za slučaj povećanja udjela H<sub>2</sub>S u plinu i ako uz to postoji i voda u plinu, primjenjuje se navarivanje osnovnog materijala slojem visokolegiranog čelika s ciljem izbjegavanja pukotina uzrokovanih vodikom, odnosno korozivskih učinaka vode.

Čelici gradacije X70 prema API 5L svoju primjenu su pronašli pri izgradnji cjevovoda koji se koriste za transport nafte i plina, a uz njih često se koriste i čelici X80, dok se čelici X90 i X100 tek uvode u primjenu. U zadnjih 30 godina jako su povećani zahtjevi za materijale od kojih se izrađuju cjevovodi. Cjevovodi velikih promjera transportiraju i do 75% svjetske proizvodnje prirodnog plina i to na najekonomičniji i najsigurniji način.[6]

Razvoj čelika visoke čvrstoće za cjevovode u prošlom stoljeću prikazan je na slici 22.

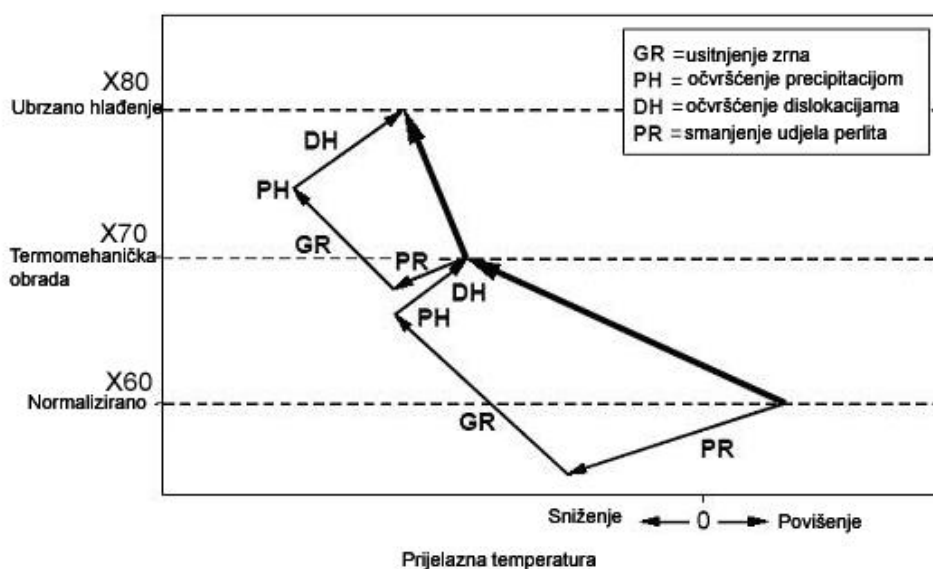


Slika 22. Kronološki prikaz razvoja čelika za cjevovode[6]



Uz razvoj čelika visoke tvrdoće bitno je da se razvijaju i tehnologije podvodnog zavarivanja i održavanja u eksploataciji, jer cjevovod ima sve veće zahtjeve s obzirom da crpilišta nafte i plina odlaze na sve veće dubine. Godišnja proizvodnja je oko 8 milijuna tona cijevi, a najviše se pri tom koriste čelici X70 i X80.

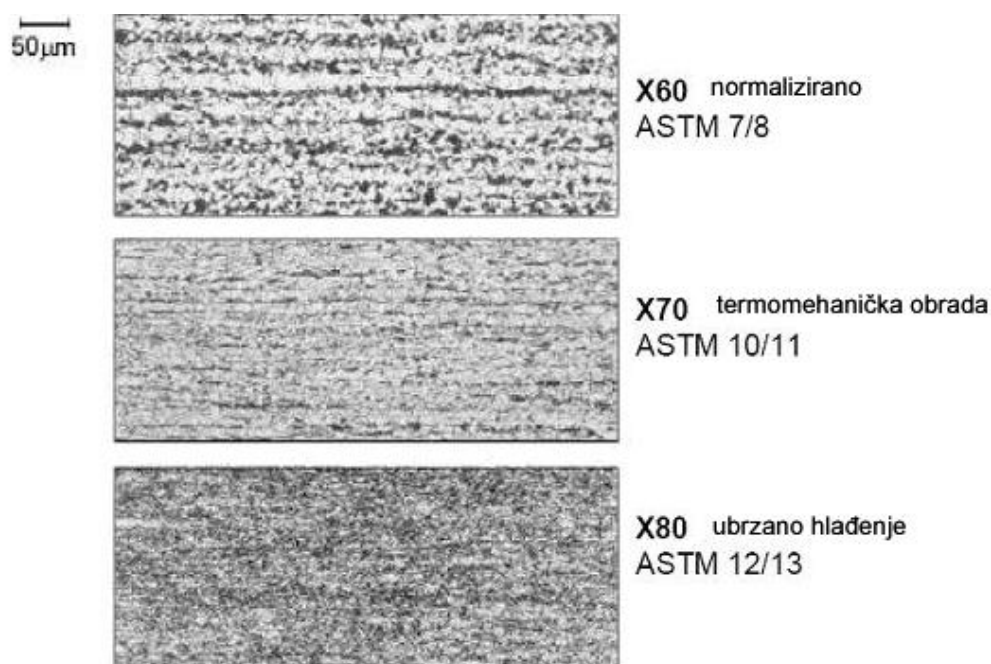
Mehanička svojstva čelika određena su mikrostrukturnim značajkama poput granica zrna, precipitata i dislokacija. Mehanizmi očvršnuća kod niskolegiranih čelika razvijaju se tijekom transformacije austenita pri hlađenju, a utječe se brzinom hlađenja i završnom temperaturom hlađenja.[6] Na slici 23. Prikazano je kako se spomenutim mehanizmima očvršćivanja dobijaju čelici gradacije X60, X70, X80.



Slika 23. Mehanizmi očvršćivanja za čelike X60, X70, X80 [6]

Čelici gradacije X60 su normalizirani i uobičajeno sadrže 0,2% ugljika, 1,55% mangana, 0,12% vanadija, 0,03% niobija i 0,02% dušika. 70-ih godina vruće valjanje i normalizacija zamijenjeni su termomehaničkim valjanjem što je omogućilo dobivanje gradacije X70 uz mikrolegiranje niobijem i vanadijem, te uz smanjeni udio ugljika do 0,12%. Smanjenje feritnog zrna je rezultat primjene termomehaničke obrade. Usitnjavanjem zrna istovremeno se povećava čvrstoća i snižava prijelazna temperatura.[37] Gubitak čvrstoće nastao redukcijom perlita nadomješten je precipitacijskim očvršćavanjem i dislokacijama. Smanjenje udjela perlita, usitnjavanje zrna, očvršćavanje mehanizmom umrežavanja dislokacija i precipitacijom rezultiralo je kombinacijom svojstava gradacije X70 prema API 5L pri čemu je zadržana dobra zavarljivost i prihvatljive prijelazne temperature iz žilavog u krhko stanje.[6]

Promjenom feritno-perlitne strukture u feritno-bainitnu nastavljen je razvoj i tako se dobio čelik gradacije X80. Kod ovih čelika još više je smanjen udio ugljika, zrno je usitnjeno i povećana je gustoća dislokacija, a to je postignuto daljnjim mikrolegiranjem te također unaprijeđenom termomehaničkom obradom uz brzo hlađenje.

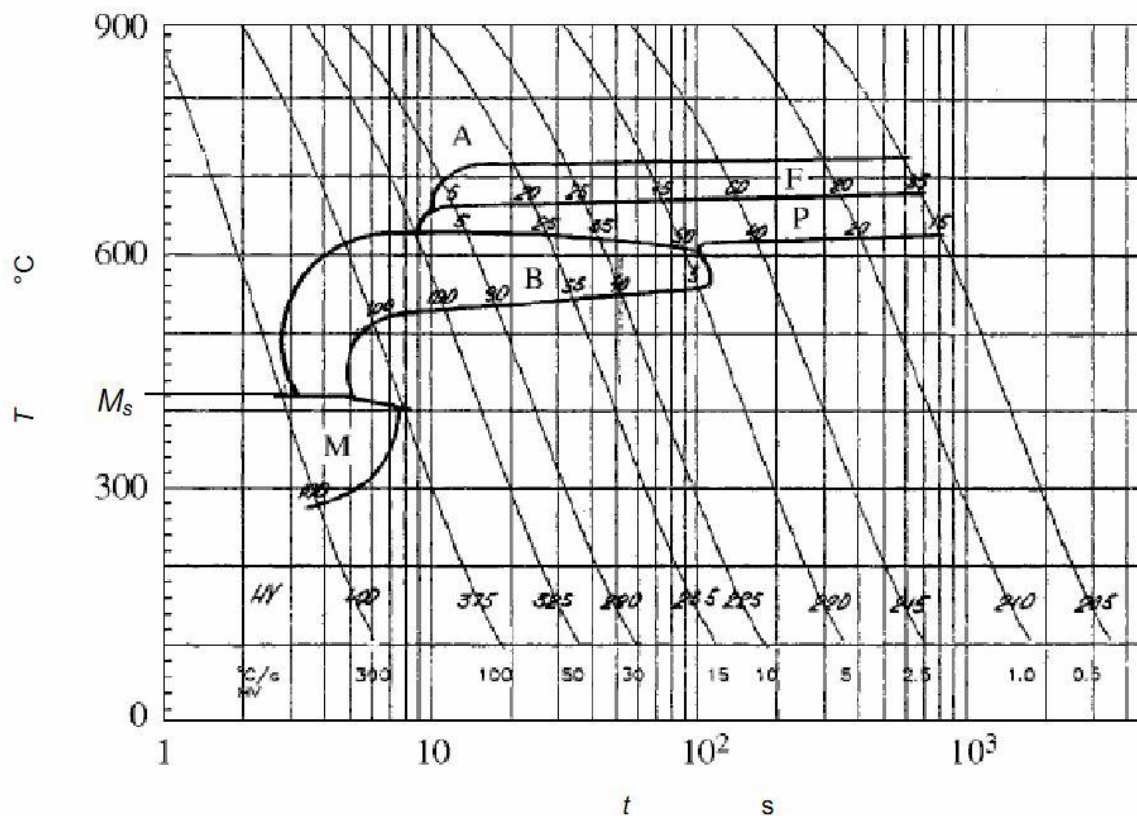


**Slika 24. Karakteristične mikrostrukture čelika X60, X70, X80 [6]**

Kao se je prikazano na slici 24. čelici X60 imaju normaliziranu trakastu feritno-perlitnu strukturu veličine zrna po ASTM 7/8, čelika X70 ima ujednačeniju strukturu te zrno veličine po ASTM 10/11, dok čelik X80 ima feritno-bainitnu strukturu veličine zrna po ASTM 12/13.

Pri brzinama hlađenja uobičajenim za REL od 20 do 70 °C/s i čak sporije za EPP od 7 do 13 °C/s dobiva se feritna, perlitna i bainitna struktura, a to je vidljivo iz TTT dijagrama (slika 25.) za čelik gradacije X70. Moguća je slabija žilavost zbog neujednačenosti strukture. Martenzitna struktura s tvrdoćama višim od 350HV10 pojavljuje se ako je brzina hlađenja viša od 70 °C/s, a takve se prisutne kod mokrog podvodnog zavarivanja. Na približno 420°C počinje stvaranje martenzita, a područje sa martenzitom je osjetljivo na pojavu vodikovih pukotina. Pri zavarivanju čelika X70 s nižim unosima topline i pri konvencionalnom zavarivanju formiraju uvjeti za pojavu hladnih pukotina. Izbjegavanje pojave hladnih

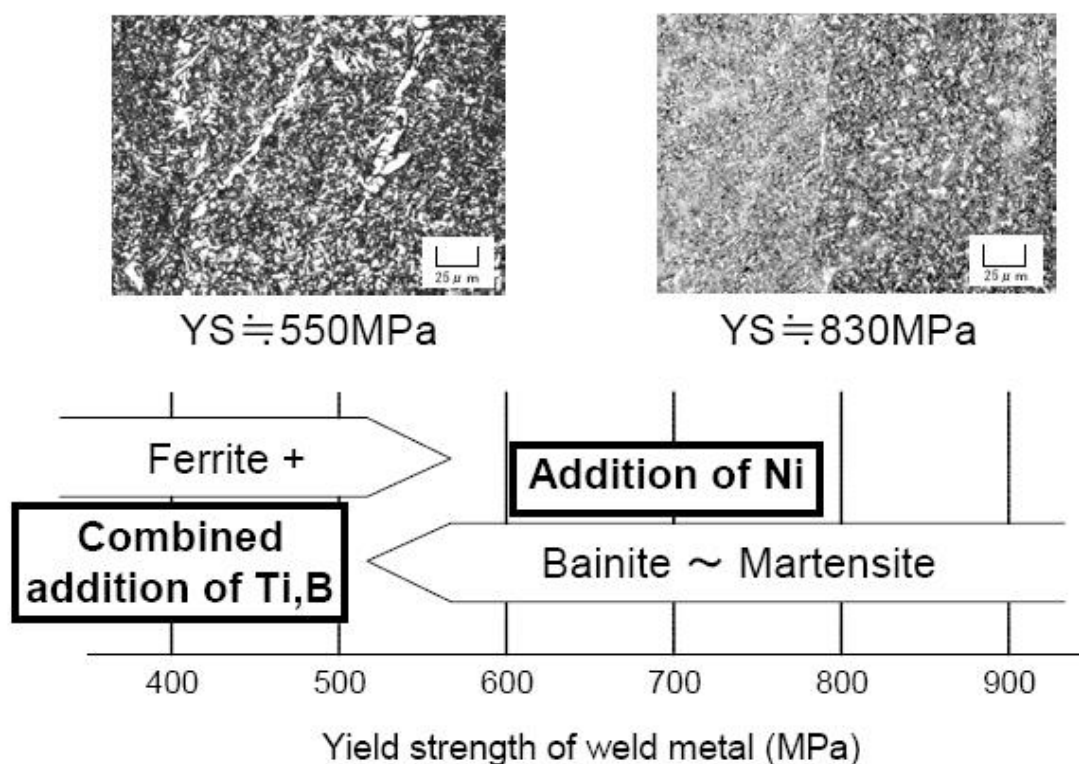
pukotina moguće je ako se definiraju točni parametri i tehnologije zavarivanja, jer je vrlo usko područje za garanciju homogene strukture.[6]



Slika 25. TTT dijagram čelika X70 [25]

Kako se razvijaju čelici povišene i visoke čvrstoće paralelno se razvija i dodatni materijala za zavarivanje, pri čemu za cjevovode i off-shore postrojenja, zbog hladnoće i dinamičkih opterećenja, traže visoke vrijednosti udarne radnje loma, niske prijelazne temperature i dovoljna vlačna čvrstoća.[37] Glavni mehanizmi dobivanja željenih mehaničkih svojstava su smanjenje udjela kisika, te mikrolegiranje s borom, titanom i niklom. U razvoju dodatnih materijala najbolja svojstva se dobivaju primjenom praškom punjenih žica jer je moguće izvesti mikrolegiranje iz praška.[6] Maksimum kvalitete zavarenog spoja moguće je dobiti ako se pravilno odaberu parametri i dodatni materijal.

Trendovi razvoja dodatnih materijala za zavarivanje čelika visoke čvrstoće prikazani su na slici 26.



Slika 26. Metode legiranja za povećanje čvrstoće metala zavara [24]

Podvodne strukture pomiču se na veće dubine gdje je samim time i hladnije, a postavljaju se veliki zahtjevi na čvrstoću i udarnu radnju loma pri čemu se nužno moraju zadovoljiti uvjeti dobre zavarljivosti. Čelici gradacije X70 smatraju se izvrsno zavarljivima u normalnim uvjetima, ali sve češće je potrebno podvodno reparaturno ili montažno zavarivanje što donosi niz novih problema. Pri mokrom podvodnom zavarivanju čelika X70 uz ubrzano hlađenje cilj je dobiti mikrostrukture koje imaju veću otpornost na pojavu i propagaciju pukotina. Pa je zato je važno raditi na razvoju tehnologija i dodatnih materijala.[6]

Standardom ISO određena je zavarljivost na sljedeći način:

- Najpotpunija definicija zavarljivosti je metalni materijal smatra se zavarljivim ako se može postići homogenost zavarenog spoja primjenom pogodnog postupka zavarivanja, tako da spojevi odgovaraju zahtjevima njihovih lokalnih svojstava i utjecaja na konstrukciju, čiji su oni sastavni dio, te ako je konstrukcija nakon zavarivanja dovoljno pouzdana.[32]

Za ocjenu zavarljivosti čelika povišene čvrstoće potrebno je provesti brojna ispitivanja, a to su [32]:

- nastajanje hladnih pukotina,
- nastajanje toplih pukotina,
- lamelarno trganje,
- krhki lom,
- povišenje tvrdoće materijala,
- starenje materijala,
- nastajanje pukotina u visokočvrstom materijalu.

Kod zavarivanja visokočvrstih čelika na prvom mjestu javlja se problem nastanka pukotina. A te pukotine mogu se podijeliti na one u [37]:

- metalu zavora,
- osnovnom materijalu, koje nastaju u ZUT ili u osnovnom materijalu često ove pukotine prelaze jedna u drugu.

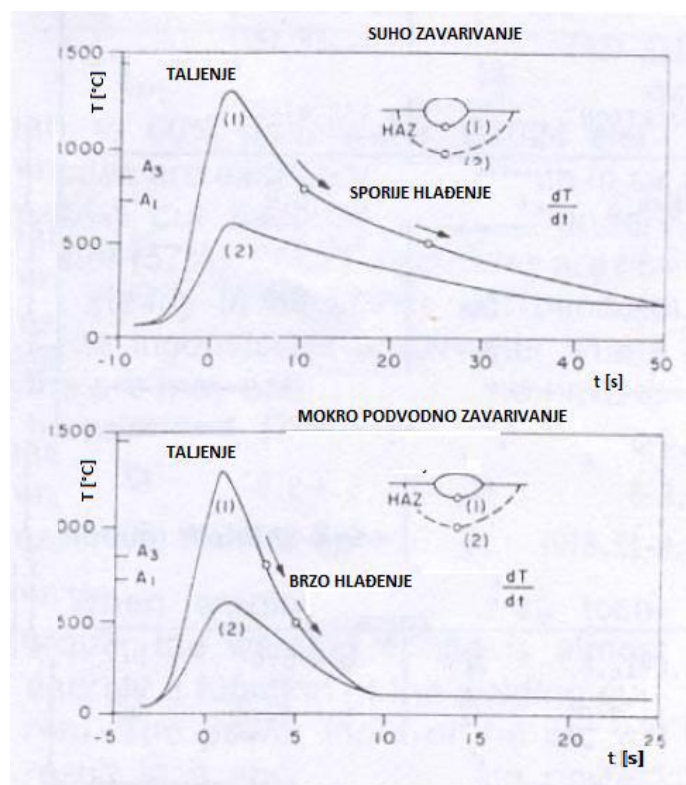
Metalurški uzroci nastanka pukotina su [33]:

- prevelika brzina hlađenja zavora,
- strukturne transformacije u zavarenom spoju,
- prisutnost vodika,
- nastajanje unutrašnjih napreznja zbog temperaturnog ciklusa pri zavarivanju,
- kemijski sastav.

#### 4. PROBLEMATIKA PODVODNOG ZAVARIVANJA CJEVOVODA

Prilikom mokrog podvodnog zavarivanja kao dva najznačajnija problema izdvajaju se visoka koncentracija vodika u metalu zavara te ubrzano hlađenje zavarenog spoja. Kvaliteta dobivenog zavarenog spoja i mehanička svojstva u velikoj mjeri ovise o navedena dva problema. Hladne pukotine se mogu manifestirati kao negativna posljedica.

S obzirom da kod mokrog podvodnog zavarivanja voda u direktnom doticaju s električnim lukom i talinom metala zavara dolazi do niz problema. Hlađenje u vodenom okruženju znatno je intenzivnije nego hlađenje u normalnim uvjetima, četiri do pet puta je brže, a posljedica toga je nastanak zavarenih spojeva s povišenom tvrdoćom. Brzo hlađenje taline rezultat je visokog specifičnog toplinskog kapaciteta vode te velike razlike u temperaturi između vode i taline. Zavareni spojevi dobiveni mokrim podvodnim zavarivanjem uslijed naglog hlađenja imaju određeni udio martenzita u svojoj mikrostrukтури što uzrokuje visoku tvrdoću, a nisku udarnu radnju loma i čvrstoću. Zbog krhke i zakaljene strukture nastali zavareni spojevi podložni su pucanju. Tvrdoća u području zone utjecaja topline može doseći vrijednosti iznad 350 HV10.

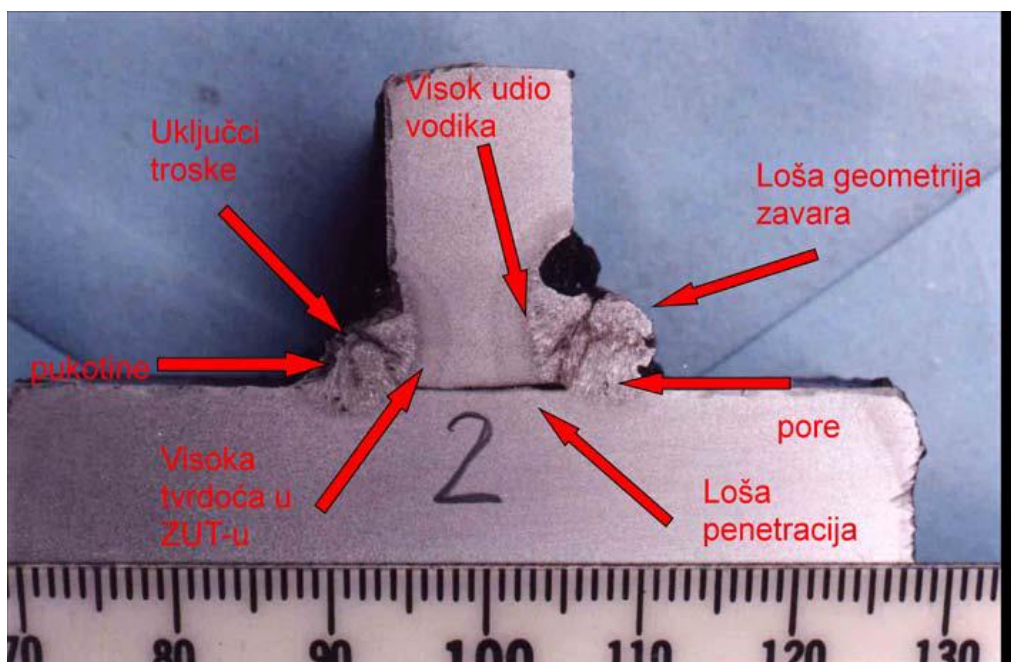


Slika 27. Usporedba brzina hlađenja pri zavarivanju u normalnim uvjetima i mokrom podvodnom zavarivanju [6]

Ovisno o uvjetima i parametrima zavarivanja vremena hlađenja od 800 do 500°C su između 2 i 4 sekunde, dok kod zavarivanja na suhom vremensko hlađenja u tom temperaturnom području iznosi oko 16 sekundi. Da bi se produžilo vrijeme hlađenja kod mokrog zavarivanja, provedena su brojna istraživanja pri kojima su primijenjene posebne izolacijske mase ili pak prilagodbe postupaka zavarivanja. Takva rješenja znatno povećavaju zahtjeve pri izvedbi u realnim uvjetima te nisu primjenjiva za sve oblike konstrukcije.[37]

Zbog direktnog pristupa vode mjestu zavarivanja dolazi do stvaranja visokog udjela difundiranog vodika u metalu zavara, a on 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. Niz mikropora, koje nastaju zbog brze solidifikacije i nemogućnosti otplinjavanja metala zavara također pridonosi takvoj situaciji.[37] Povišeni udio vodika u zavaru je posljedica povišenog parcijalnog tlaka vodika u električnom luku. Glavni izvor vodika je vodena para, koja na visokim temperaturama disocira na vodik i kisik. Vodik u zavar može doprijeti i iz obloge elektrode, posebno ako je obloga kontaminirana vlagom pri proizvodnji ili tijekom rukovanja.[6] Kako je hidrostatski tlak uvijek viši kod podvodnog zavarivanja nego kod zavarivanja na zraku, pa je i to jedan od razloga zašto je udio vodika veći kod mokrog podvodnog zavarivanja. Visoki hidrostatski tlak koji raste porastom dubine, a može uzrokovati prodiranje vode u oblogu elektrode uzrokuje suženje luka te povećani gubitak topline u okolinu. Ova pojava uzrokuje lošu geometriju zavara, uključke troske u zavaru, porozitet i nedovoljnu penetraciju. Utjecaj povišenog hidrostatskog tlaka na rastvorljivost plina u metalu je takav da pri porastu tlaka raste rastvorljivost vodika u talini, a pri tom raste i udio vodika u metalu zavara.

Unosom topline utječe se na količinu difundiranog vodika, a ne samo na mikrostrukturu i mehanička svojstva zavara. Zbog intenzivnog hlađenja velikim unosom topline ne utječe se na produljene trajanja hlađenja, ali je zabilježen utjecaj unosa topline na količinu difundiranog vodika. Na količinu vodika može se utjecati sastavom obloge i parametrima zavarivanja, ali važno je napomenuti da se također može utjecati polaritetom elektrode, pa ako je elektroda na negativnom polu apsorbirat će se manje vodika



Slika 28. Karakteristične greške zavara dobivenog mokrim podvodnim zavarivanjem [12]

Slatkovodna i morska voda pokazuje izrazite razlike u uspostavi i održavanju električnog luka. Slana voda poboljšava ionizaciju i ubrzava uspostavu električnog luka te potpomaže stabilnosti luka, dok u slatkovodnoj vodi posebno u većim dubinama izraženi su problemi sa uspostavom i održavanjem električnog luka.[26]

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. Zavarivač mora imati najmanje razumne uvijete vidljivosti kako bi mogao promatrati električni luk i formiranje zavarenog spoja u udaljenosti od najmanje 150 mm.[27] Niža vidljivost nam ne garantirati da ćemo dobiti zavareni spoj zahtjevane kvalitete. Stoga je vrlo bitno da zavarivač može jasno vidjeti gibanje električnog luka i ponašanje taline. Istraživanja su pokazala da postoji veza između parametara zavarivanja (struja, napon, polaritet) i udjela difundiranog vodika u metalu zavara. Zavarivanjem jakom strujom i niskim naponom udio vodika u metalu zavara biti će maksimalno reduciran.[15]

Na sadržaj vodika u zavaru možemo utjecati na više načina, a to su pravilan odabir postupaka zavarivanja, parametara zavarivanja i dodatnog materijala. Istraživanja o zavarljivosti čelika visoke tvrdoće uglavnom su provedena u normalnim uvjetima.



#### 4.1. Vodikove pukotine i mehanizmi nastanka

Difundirani vodik, lokalno zakaljena struktura i zaostala naprežanja su kritični faktori koji povezuju mokro podvodno zavarivanje i hladne pukotine. Zbog ekonomsko tehničkih razloga predgrijavanje i usporeno kontrolirano hlađenje kod mokrog podvodnog zavarivanja se ne provode. Kako bi sveli na minimum pojavu hladnih pukotina potrebni su optimalnim parametrima zavarivanja, mikrolegirni dodaci u dodatnom materijalu ili utjecaja zaštitnog plina te prihvatljivi termodinamičkim ciklusi.

Zbog uvijeta koji vladaju pri mokrom podvodnom zavarivanju nije praktična primjena svih konvencionalnih postupaka ispitivanja materijala na pojavu hladnih pukotina. Postoji mogućnost pojave vodikom uzrokovanih pukotina i bez zavarivanja, pa se moraju u obzir uzeti i uvjeti eksploatacije i karakter transportiranog medija. Vodik pri konvencionalnim postupcima zavarivanja dolazi iz vezane vlage u oblogi elektrode kod REL zavarivanja ili prašku kod EPP i FCAW zavarivanja. Kod postupaka s plinskom zaštitom, tj. TIG i MIG/MAG česta je pojava unosa vodika iz zaštitnog plina.[6] Uz vlagu, iz obloge vodik se pojavljuje iz krutih spojeva vode i konstituenata obloge, npr. ugljikovodici u celulozi, hidratirani oksidi iz produkata hrđe ili kristalna voda vezana u glini ili azbestu. Vodik se također apsorbira iz prljavštine na radnom komadu ili dodatnom materijalu u obliku masti, ulja i sl.[37] Vodik kod mokrog podvodnog zavarivanja uglavnom dolazi iz stupa električnog luka gdje vodena para disocira na kisik i vodik, pa se tako parcijalni tlak vodika u mješavini plinova u stupu električnog luka povećava.

Krhki lom inače duktilnih materijala pri kontinuiranom opterećenju i uz prisutnost vodika, i to pri naprežanju nižem od granice tečenja karakterizira pukotine inducirane vodikom. Mehanizam pukotine se općenito opisuje kao podkritična propagacija pukotine koja često uzrokuje zakašnjele prijelome, te ovisi o koncentraciji vodika, čvrstoći materijala, mikrostrukтури, naprežanjima i temperaturi. Vodikova krhkost tj. pojava pukotina induciranih vodikom je prvenstveno fenomen povezan s feritnim čelicima i grubozrnatom lokalno zakaljenom strukturom ZUT-a.[6] U ZUT-u najčešće se javljaju pukotine, ali moguće je da se vremenom pojave i u metalu zavora. Pukotine se mogu pojaviti u različitim vremenskim intervalima nakon procesa zavarivanja, što znači da je nastanak vodikovih pukotina vremenski zavisian.

Mehanizme vodikovih pukotina definiraju slijedeće činjenice [6]:

- ✓ Ovisnost o vrsti kristalne rešetki; pojava vodikovih pukotina se veže uz BCC i BCT kristalne rešetke tj. feritne i martenzitne čelike. Austenitni čelici i aluminijske legure koje imaju FCC rešetku nisu osjetljive na pojavu vodikovih pukotina.
- ✓ Ovisnost o mikrostrukturi; martenzitni čelici su osjetljiviji na pojavu vodikovih pukotina od feritnih čelika, ali martenzitna mikrostruktura nije nužni preduvjet za inicijaciju pukotine.
- ✓ Ovisnost o promjeni intenziteta naprezanja; vodikova krhkost se javlja pri vlačnim naprezanjima sporog intenziteta promjene. Kod bržeg porasta naprezanja difuzija vodika se ne odvija dovoljno brzo da bi držala korak s propagacijom pukotine, tj. ne dolazi do nakupljanja vodika oko vrška pukotine.
- ✓ Ovisnost o temperaturi; vodikove pukotine se najčešće javljaju u intervalu od  $-150^{\circ}\text{C}$  do  $200^{\circ}\text{C}$ . Ovisnost o temperaturi ukazuje da su za propagaciju pukotine nužne kritične veličine sadržaja vodika i veličine naprezanja oko vrška pukotine.
- ✓ Ovisnost o vremenu; kako je proces pojave vodikovih pukotina kontroliran difuzijom vodika, pukotine će se širiti u «stepeničastom» obliku kako bi se omogućio dolazak vodika na sami vršak pukotine iz okolne matrice.

Uz pojavu vodikovih pukotina veže se pojam tzv. zamki, tj. lokacija na kojima dolazi do skupljanja vodika. Postoji klasifikacija tih zamki prema veličini [37]:

- točkaste (elementi poput Mn, Ti, Cr, Nb itd.),
- linearne (dislokacije),
- planarne ili bidimenzionalne (površine čestica, granice zrna itd.),
- volumne ili prostorne (šupljine, pukotine, čestice).

Ovisno o tome je li vodik čvrsto vezan ili se lagano može otpustiti zamke mogu biti reverzibilne ili ireverzibilne. Te također mogu biti mobilne odnosno dislokacije ili stacionarne odnosno čestice.

#### 4.1.1. Metode određivanja vodika u zavarenim spojevima

Zbog toga što vodik jako brzo difundira već pri sobnim temperaturama, moguće je da nastanu značajni gubici odnosno greške u mjerenju zbog velike vjerojatnosti da će se jedan dio vodika izgubiti u okolinu.

Koncentracije koje se mjere su vrlo niske, a izražavaju se u ppm – dijelova na milijun (eng. parts per million), odnosno promil, tako da su potrebne stroge procedure i postupci. Standardne procedure su načinjene kako bi mogli uspoređivati rezultate iz različitih ispitnih ustanova.[37]

Standardizirane metode koje se danas najčešće koriste su : [6]

- Japanska metoda (JIS Z 313 -1975) koja se razvila iz bivše ASTM A 316-48T metode. Ova metoda se bazira na sakupljanju difundiranog vodika u glicerinu iz jednog navara u roku 48h na temperaturi 45°C. Količina vodika se izražava u ml na 100g nataljenog metala. Od prekidanja električnog luka do pothlađivanja epruvete dozvoljeno je vrijeme od najviše 5s.
- Francuska metoda (N.F.A. 81-305-1975) pri kojoj se dva sloja deponiraju na žice smještene u bakrenom kalupu. Vodik iz ovih navara se skuplja u živi i količina se iskazuje u ml na 100g protaljenog metala u što je uključen i rastaljeni osnovni metal.
- Metoda IIW-a (International Institute of Welding) pri kojoj se na izvaganu čeličnu epruvetu smještenu u bakrenom nosaču nanosi navar. Epruveta se pothlađuje u strogo propisanom režimu. Vodik difundira na temperaturi od 25°C u roku 72h i skuplja u živi. Dobivena količina se izražava na dva načina: ml na 100g nataljenog materijala, oznaka H<sub>D</sub> ili u ml na 100g protaljenog metala koji uzima u obzir poprečni presjek zavara, oznaka H<sub>F</sub>.

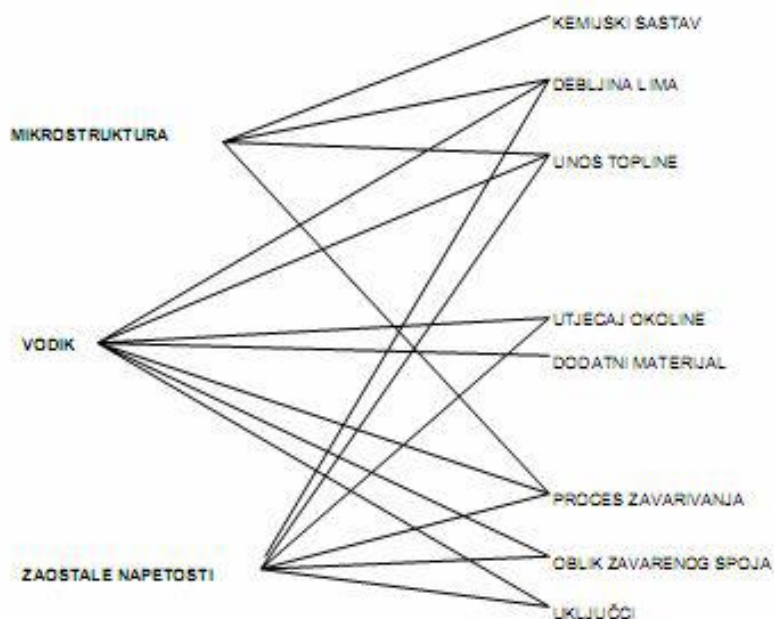
## 4.2. Hladne pukotine

Pri hlađenju zavarenog spoja na temperaturama ne višim od 200 do 250°C nastaju pogreške koje nazivamo hladne pukotine, a moguće je da nastanu i nekoliko dana nakon zavarivanja, pa se takve pukotine nazivaju "zakašnjele hladne pukotine". Ispitivanja zavarenih spojeva metodama ispitivanja bez razaranja provode se 48 sati nakon postupka zavarivanja, a razlog tome je mogućnost nastanka zakašnjelih hladnih pukotina.

Hladne pukotine mogu nastati u zoni utjecaja topline i/ili u metalu zavara, a mogu biti orijentirane paralelno ili okomito s obzirom na uzdužnu os zavarenog spoja ili se mogu pojaviti bilo pod kojim kutom, s obzirom na uzdužnu os zavarenog spoja. [37] Također mogu biti vidljive na površini zavarenog spoja ili nevidljive unutar zavarenog spoja.

Uzroci nastanka hladnih pukotina su [37]:

- visoke vršne temperature,
- porast zrna u ZUT-u,
- visoki sadržaj vodika,
- visoki sadržaj martenzita,
- velika brzina hlađenja,
- zaostala naprezanja.

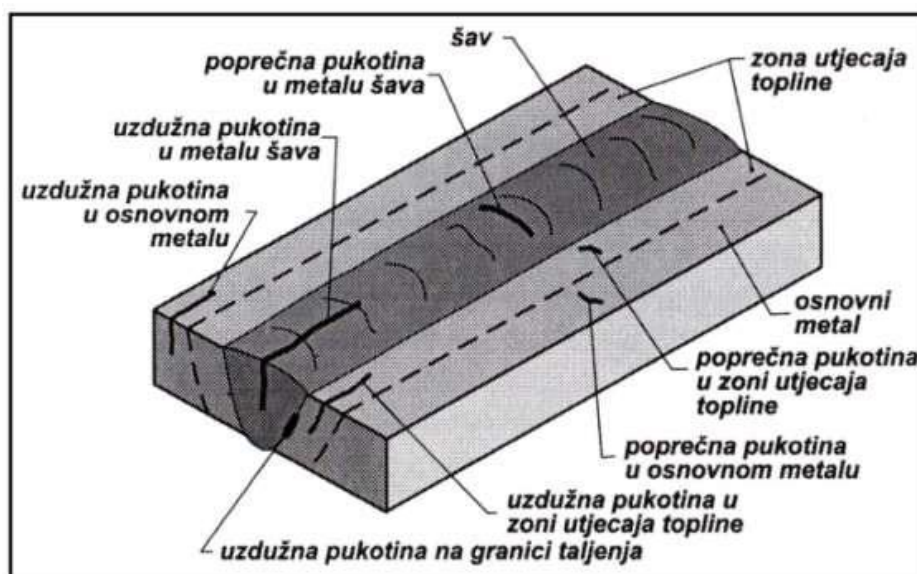


Slika 29. Utjecajni čimbenici nastanka hladnih pukotina[28]

Do nastanka hladnih pukotina dolazi kao rezultat sljedećih čimbenika [39]:

1. Prisutnost vodika u zavarenom spoju tijekom zavarivanja, a koji nakon zavarivanja nije izašao van.
2. Postojanje zaostalih naprezanja i vanjskih naprezanja uzrokovanih skraćivanjem vremena hlađenja i tvrdoćom spoja.
3. Stvaranje mikrostrukture ekstremne tvrdoće koja ovisi o brzini hlađenja i kemijskom sastavu materijala.

Hladne pukotine češće se pojavljuju u ZUT-u, a rijede u samom metalu zavara, a da bi se pojavile hladne pukotine moraju biti ispunjena gore navedena 3 preduvjeta.[37] Nisko i srednje legirani čelici feritno-perlitne i martenzitne strukture osjetljivi su na pojavu hladnih pukotina, također sklonost pukotinama pokazuju čelici povišene i visoke čvrstoće. Dok manju sklonost prema hladnim pukotinama pokazuju austenitni čelici.



Slika 30. Pukotine u zavarenom spoju[35]

Hladne pukotine nastavljaju se širiti ako nisu otkrivene kontrolom poslije zavarivanja, tj. ako zavareni spojevi nisu popravljeni, pa je moguće da će doći do zakazivanja zavarenog spoja već tijekom izrade, a vrlo vjerojatno tijekom eksploatacije.

Kontrolom koja je obavezna nakon zavarivanja moguće je da će biti utvrđena prisutnost pukotina, a na nekoliko načina moguće je razlučiti hladne pukotine od toplih. Razlikuju se od toplih u prvom redu time što su manje razgranate i manje otvorene. Ako se radi o otvorenim pukotinama, s pristupom zraka, onda su to tople pukotine tamnije boje zbog površinske oksidacije na visokim temperaturama pri kojima nastaju tople pukotine. Kod hladnih je pukotina prijelomna površina svjetlija, naime debljina oksidnog sloja, za razliku od toplih, vrlo je mala.[28]

Spriječavanje nastajanja hladnih pukotina moguće je [39]:

- Predgrijavanje osnovnog materijala kako bi se smanjila brzina hlađenja, spriječilo stvaranje martenzita na zavaru i omogućilo uklanjanje vodika iz zavara.
- Korištenje dodatnih materijala s niskim sadržajem vodika kako bi se minimalizirao difuzijski vodik na zavaru.
- Smanjenje koncentracija napetosti izbjegavajući diskontinuitete na zavaru ili dobar odabir rasporeda zavara i redosljeda sklapanja strukture.
- Odabir ispravnog procesa zavarivanja za materijal.

#### **4.2.1. Metode ispitivanja sklonosti hladnim pukotinama**

Kvalitetan kriterij ispitivanja zavarljivosti morao bi omogućiti korisniku da odabere kombinaciju čelika, dodatnog materijala i postupka zavarivanja koji bi osigurali dovoljan stupanj sigurnosti od pojave vodikovih pukotina uz minimalni trošak.[37] Ispitivanjem bi se također morao razlučiti utjecaj svakog utjecajnog faktora koji može dovesti do pojave pukotina.[6]

Da bi direktno odradili problem zavarljivosti čelika ne postoji metoda ispitivanja. Pa upravo zbog toga, da bi ispitali i dobili ocjenu zavarljivosti, koristi se niz različitih eksperimentalnih metoda od koji svaka služi za određivanje specifičnih svojstava. Tako se kod visokočvrstih čelika koristi Implant i Tekken test kako bi se ispitala sklonost materijala prema nastajanju hladnih pukotina. Pomoću ekvivalenta ugljika moguće je ispitati zavarljivost i s metalurškog stajališta, pomoću računskih i eksperimentalnih metoda ispituje se veličina temperature predgrijavanja.

Do sad je definiran cijeli niz empirijskih metoda ispitivanja materijala na sklonost pukotinama uslijed vodika koje se mogu svrstati u dvije kategorije [32]:

- ispitivanja s vanjskim narinutim naprežanjem (npr. Implant, TRC-Tensile Restraint Cracking, LTP),
- ispitivanja s vlastitim zaostalim naprežanjima (npr. Tekken, CTS-Controlled Thermal Severity, WIC-Welding Institute of Canada, IRC-Instrumented Restraint Cracking, Lehigh Restraint Test, RGW test itd.).

Podjela metoda ispitivanja sklonosti čelika prema nastanku hladnih pukotina pri zavarivanju može biti i na izravne i neizravne. Izravne su metode one koje se provode na uzorcima zavarenih spojeva i/ili zavarenim spojevima na zavarenoj konstrukciji, dok se neizravne metode ispituju na različitim eksperimentalno dobivenim formulama za procjenu utjecaja raznih čimbenika na pojavu pukotine.[33]

Izravna ispitivanja mogu se podijeliti u tri skupine [37]:

- ispitivanje sa stvarnim zavarivanjem uz vlastitu krutost (Tekken, Lehigh, CTS, probe s kružnim zarezom RD) i probe s prisilnom krutošću (s vanjskim dodatnim opterećenjem, npr. TRC, RRC i dr.)
- ispitivanje s realnim ciklusom ili uložnim uzorkom (umetak ili implant)
- ispitivanje simuliranjem ciklusa zavarivanja

Budući da ne postoji dovoljno podataka o izbjegavanju hladnih pukotina u metalu zavara kod visokočvrstih čelika, primjenjuju se kvantitativne metode određivanja otpornosti materijala prema vodikom induciranim pukotinama. Kvantitativne metode ispitivanja otpornosti materijala prema hladnim pukotinama moraju obuhvatiti varijable poput vrste i koncentracije naprežanja, mikrostrukture i vremenske inkubacije.[32]

#### 4.2.1.1. *Implant metoda*

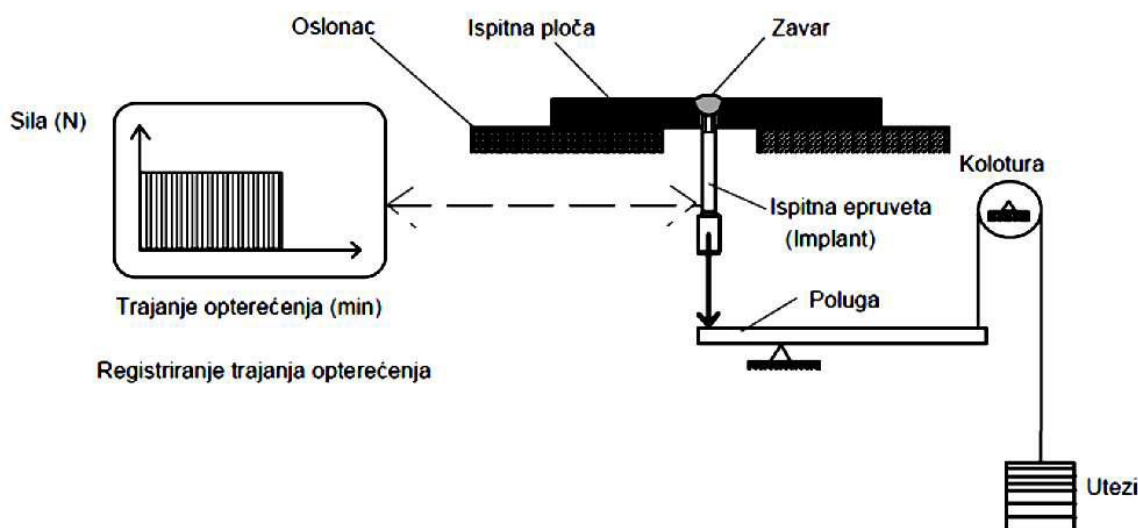
Za ispitivanje u uvjetima podvodnog zavarivanja Implant metoda pokazala se najpogodnijom, jer je moguća odvojena procjena različitih metalurških i operativnih uvjeta koji uzrokuju pojavu vodikovih pukotina. Moguće je postići različite razine naprežanja za ista stanja pokusa, različite brzine hlađenja i količine vodika. Uz to, moguće je dobiti kvantitativne

rezultate kritičnog napreznja za dane uvjete koji se mogu primijeniti u izradi matematičkih modela.

Implant metoda ispitivanja nastanka hladnih pukotina je najprikladnija zbog [32]:

- Jednostavnosti izvođenja eksperimenta,
- Implant uzorak prolazi kroz sve toplinske cikluse kao i osnovni materijal,
- Postupak predgrijavanja i naknadne toplinske obrade isti je kao i kod zavarivanja u realnim uvjetima,
- Iz malog uzorka moguće je sakupiti veliku količinu podataka (kritično implant napreznja, izgled zone zavara sa zonom utjecaja topline i metalom zavara, makroizbruske, mikroanalizu uzorka, kemijsku analizu uzorka, itd).

Ispitivanje zavarljivosti Implant metodom zasniva se na promjeni utjecajnih čimbenika, kao što su: dodatni materijal, zarivački toplinski ciklus, temperatura predgrijavanja, udjel difundiranog vodika, napreznje i dr., kao i sagledavanje njihova utjecaja na nastanak hladnih pukotina.[35] Cilj ispitivanja je odrediti je li materijal sklon nastanku hladnih pukotina u određenim uvjetima.



Slika 31. Shematski prikaz implant uzorka i ispitne ploče [35]

Shematski princip implant ispitivanja prikazan je na slici 31. odnosno prikazano je kako je pozicioniran uzorak u osnovnu ploču s jednim slojem zavara. Implant uzorak se nakon zavarivanja opterećuje narinutim vanjskim opterećenjem. Ukoliko uzorak izdrži narinuto statično opterećenje u trajanju od 24 sata u uvjetima sobne temperature, tada se to isto



naprezanje označava kao kritično implant naprezanje i smatra se da u tim uvjetima neće doći do pojave hladnih pukotina. Zatim se na istom uzorku mogu provesti daljnja ispitivanja koja uključuju karakterizaciju materijala i mikrostrukturne analize s ciljem utvrđivanja mikropukotina u zoni utjecaja topline i metalu zavara.[32]

Navoj koji je narezan s obje strane koristi se kao implant uzorak (slika 32.) i on se polaže u provrt na položenoj osnovnoj ploči gdje navoj ima funkciju mnogostrukih zareza koji djeluju kao koncentratori naprezanja. Dok se za pričvršćivanje u implant uređaj za ispitivanje koristi navoj koji je na drugom kraju.

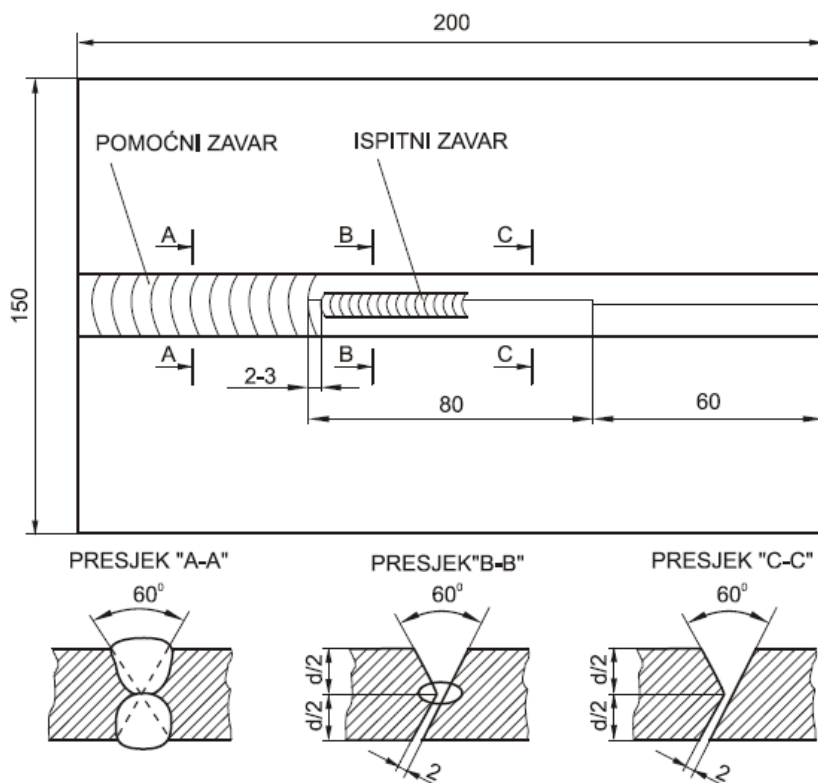


**Slika 32. Implant uzorak s obostranim navojem[35]**

Pojava mikropukotina na uzorku koji je izdržao kritično implant naprezanje ili pojava lom na uzorku su kriteriji implant ispitivanja.[32]

#### 4.2.1.2. Tekken metoda

Može se koristiti kao tehnološko ispitivanje pri postupku elektrolučnog ispitivanja i zavarivanja pod praškom, za relativno tanke limove (12 mm), kao i za one čija je debljina do 150 mm.[17] Kod sučeonih spojeva za zavarivanje korijenskog dijela pri odabiru parametara zavarivanja koristi se ispitivanje Tekken metodom. Za odabranu tehnologiju i uvijete zavarivanja ovim ispitivanjem dobijemo kvantitativne rezultate, odnosno ima ili nema pukotina.

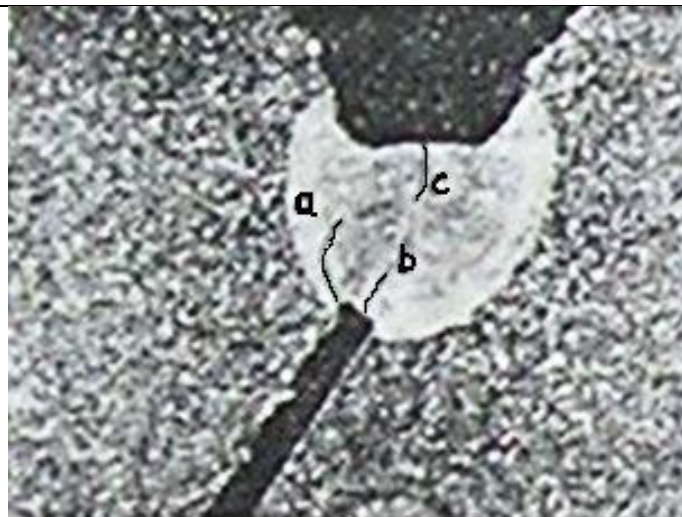


Slika 33. Priprema spojeva i dimenzije uzoraka pri Tekken ispitivanju [36]

Proces izvođenja Tekken testa [36]:

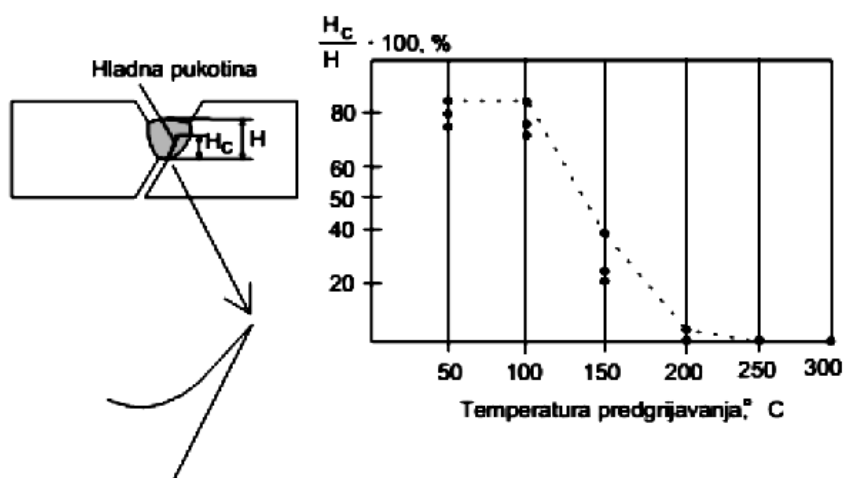
- Prvo se zavare pomoćni zavari, a tek onda ispitni zavar, pomoćnim zavarima ploča je ukrućena (nema stezanja i rastezanja);
- Epruvetu se 48 sati ostavi da stoji, a zatim se ispituje;
- Ispitivanje se prvo vrši vizualnim pregledom, zatim penetrantskim tekućinama, a zatim se zavar reže na tri mjeta, rade se izbrusci i promatraju se mikroskopom;
- U ovisnosti o duljini i visini pukotina zaključujemo o sklonosti prema hladnim pukotinama.

Razne osnovne materijale moguće je razlikovati iz razloga što se pukotine uglavnom javljaju od prijelazne zone do ZUT-a. Uzorak se najčešće priprema od dvije međusobno zavarene ploče, pri čemu zazor Y spoja treba biti 2 mm.[37] Pri ovom ispitivanju mogu se pojaviti 3 tipa pukotina. To su pukotine *a* koje nastaju u prijelaznoj zoni donjeg dijela korijenskog spoja, na strani X pripreme ispitnog spoja.[17] Hladne pukotine koje je uzrokovao vodik su te pukotine, a one se šire do ZUT-a i mogu se vratiti natrag do metala zavara. Tipovi pukotina *b* i *c* nastaju u metalu zavara te postoji mogućnost da se spoje.



Slika 34. Mjesta nastanka hladnih pukotina [17]

Ispitivanje se ocjenjuje analizom 5 isječaka, od kojih su dva iz početnog i završnog kratera. Iz ovih analiza se određuje učestalost pojave pukotina po dužini uzorka u ovisnosti od parametara zavarivanja (npr. temperatura predgrijavanja).[17]



Slika 35. Ispitivanje sklonosti hladnim pukotinama[35]

Da bi se prihvatio neki od parametara zavarivanja kao npr. temperature predgrijavanja potrebno uspješno zavariti 3 uzorka bez nastanka pukotina. Sadržaj vodika u metalu zavara, temperatura predgrijavanja te unos topline mogu utjecati izbjegavanje pojave hladnih pukotina. Kad se pukotina pojavi, klasifikacija zavarenog uzorka izvodi se uvođenjem "koeficijenta pukotine". Koeficijent pukotine jednostavno se izračuna omjerom visine pukotine i visine zavarenog spoja.[35]

## 5. ZAKLJUČAK

Otežani radni uvjeti pri mokrom podvodnom zavarivanju prvenstveno zbog direktnog dodira vode i električnog luka daju vrlo sužen izbor pri odabiru postupka zavarivanja, dodatnog materijala, osnovnog materijala i tehnike rada. Mokro podvodno zavarivanje u današnje vrijeme se smatra ozbiljnim reparaturnim postupkom, jer je razvojem dodatnih materijala, opreme pa i same tehnologije danas moguće izvesti neke vrste popravaka i održavanja koje je prije bilo izvedivo samo suhim tehnikama. Mokro podvodno zavarivanje sve više se primjenjuje nego suho podvodno zavarivanje, a rezultat toga su puno manji troškovi, pa u budućnosti razvoj izvora struje za mokro podvodno zavarivanje, ronilačke opreme, dodatnog materijala tj. elektroda vrlo je vjerojatan. Kvaliteta zavara ovisi i o roniocu-zavarivaču, pa je jako važna educiranost i uvježbanost ronioca-zavarivača, a najviše pažnje se daje tehnicima rada za vrijeme edukacije. REL postupak najčešće se primjenjuje pri mokrom podvodnom zavarivanju, a izvodi se slično onome na suhom. Radi sigurnosti postoje male modifikacije izvora struje, postoji vanjska sklopka za prekidanje strujnog kruga, a najveća razlika je u dodatnom materijalu, on je dosta nadograđen u odnosu na onaj koji se koristi za REL postupak na suhom. Ronioc-zavarivač mora imati na sebi posebno dizajnirano suho odijelo koje za štiti od strujnog udara. Mokro podvodno zavarivanje svoju ulogu nalazi u nešto manjim dubinama, do 50 m, a kvaliteta zavara sve manje se razlikuje od kvalitete zavara postignutih na zraku.

Povećan sadržaj difundiranog vodika je jedan od problema kod mokrog podvodnog zavarivanja, a on uzrokuje pojavu pukotina. Kao drugi veliki problem izdvaja se brzo hlađenje, s obzirom da je voda u direktnom dodiru sa radnim komadom, a posljedica brzog hlađenja je povišena čvrstoća koja kasnije utječe na kvalitetu zavarenog spoja. Ti problemi pokušavaju se riješiti razvojem novih dodatnih materijala.

Dobra mehanička svojstva i dobra zavarljivost karakteriziraju čelike gradacije X70, pa se zbog toga koriste za izgradnju cjevovoda. Za dobivanje zavarenog spoja dobrih mehaničkih svojstava i kako se ne bi povećao rizik od pojave hladnih pukotina potrebno je parametre zavarivanja definirati u uskim područjima.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc

## LITERATURA

- [1] Maintenance and Repair Welding in the Open Sea; Welding Journal; November 2005
- [2] Smojver A.; Podvodno zavarivanje u otežanim uvjetima; Zavarivanje u pomorstvu; Haludovo 1998.
- [3] <http://www.nhctesting.com/hyperbaric-welding/>
- [4] <http://underwater-welding-schools.net/images/144497.jpg>
- [5] [www.diversacademy.com](http://www.diversacademy.com)
- [6] Garašić, I.: Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju, doktorski rad, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
- [7] Napredovanje hiperbaričkog podvodnog zavarivanja do velikih dubina kao rezultat razvoja off shore tehnologije; časopis Zavarivanje, br. 29, god. 1986;
- [8] Kralj S. , Kožuh Z. , Garašić I. ; Stanje i trendovi razvoja podvodnog zavarivanja i nerazornih ispitivanja; časopis Zavarivanje, br. 48, god. 2005.
- [9] Krnić N.: "Podvodno zavarivanje – gdje hrvatska vidi sebe u odnosu na svijet" Zbornik radova: "Strategija razvoja zavarivanja u Hrvatskoj", HDTZ, Opatija 1993.
- [10] Ivan Mikulić; Analitički i eksperimentalni pristup određivanju zavarljivosti pri mokrom podvodnom zavarivanju, Diplomski rad, FSB Zagreb, 2014
- [11] Adrian F. Dier; Assesment of repair techniques for ageing or damaged structures
- [12] <http://waterwelders.com/underwater-welding-history/>
- [13] ..., U. S. Navy underwater cutting and welding manual, Direction of commander, naval sea systems command, US, 2002.
- [14] Garašić, I., Kožuh, Z.: Underwater welding and cutting, Module of doctoral study: Advanced production technologies, Zagreb, 2016.
- [15] David J. Keats; Underwater Wet Welding; A Welder's Mate; TJ International, Padstow, Cornwall, 2011.
- [16] <http://www.welding-advisers.com/Preview3.html>.
- [17] Hrivnjak I., "Zavarljivost čelika", Beograd, 1982.
- [18] I. Garašić, Z. Kožuh, Slobodan Kralj; Podvodno mokro zavarivanje i podvodno ispitivanje u održavanju pomorskih objekata, FSB Zagreb.
- [19] <http://www.scubaverse.com/careers-as-a-commercial-diver>
- [20] D. J. Keates; Professional divers manual on wet-welding, Cambridge, 1990.

- [21] <http://waterwelders.com/stinger-electrode-machine/>
- [22] S. Kralj, Š. Andrić; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Zagreb, 1992.
- [23] Zavarivanje i zavarivanju srodne tehnike; <http://www.pondt.hr/zavarivanjeall.pdf>
- [24] K. Suenaga, T. Sugino, State of the art welding consumables for offshore structures, IIW Doc. XII-1818-04, 2004.
- [25] Nosochenko A.O., Matrosov Yu.I., Ganoshenko I.V., Nazarov A.V., Volodarskii V.V.: "PROPERTIES OF PEARLITE-FREE PIPE STEEL OF TYPE 0.03C-1.5Mn-0.09Nb IN STRENGTH CLASS X65–X70"  
Metallurgist, Vol. 47, Nos. 11–12, 2003
- [26] 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.
- [27] P. Szelagowski; Wet welding as a "serious" repair procedure, Haludovo, 1998.
- [28] Kralj S., Dunder M., "Ispitivanje sklonosti zavarenih spojeva čelika 25CrMo4 i Ck45 prema nastajanju hladnih pukotina", Zavarivanje 43(2000) 1/2 5-16
- [29] Woodward N.: "Developments in Diverless Subsea Welding",  
Welding Journal October, 2006.
- [30] <http://www.cdu.navy.mil/>
- [31] [http://www.thefabricator.com/ArcWelding/ArcWelding\\_Article.cfm?ID=1977](http://www.thefabricator.com/ArcWelding/ArcWelding_Article.cfm?ID=1977)
- [32] Tomić T.: Utjecaj sadržaja vodika na zavarljivost čelika API 5L X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [33] Kralj S., Sikiričić V., "Zavarljivost visokočvrstih čelika"  
Zavarivanje 45(2002) 3/4, 91-96
- [34] [https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Izvor\\_struje\\_za\\_zavarivanje](https://hr.m.wikipedia.org/wiki/Izvor_struje_za_zavarivanje)
- [35] M. Čalopek: Hladne pukotine u zavarenim spojevima, završni rad, Varaždin, Sveučilište Sjever, 2015.
- [36] Dunder, M., Salopek, G., Horvat, M., Kondić, V., Marković, M.: Pristup određivanju zavarljivosti čelika, stručni glasnik, 2015.
- [37] Barun T.: Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [38] <http://www.geocities.com/uhexo/dvrworks.html>
- [39] Hrvatski portal o zavarivanju, Hladne pukotine, [www.welding.com.hr](http://www.welding.com.hr)