



Prof. dr. sc. Slobodan Kralj, Doc.dr.sc. Ivica Garašić, Prof.dr.sc. Zoran Kožuh, Jadranka Eržišnik, dipl.ing.

STATE OF THE ART AND TRENDS IN DEVELOPMENT OF UNDERWATER WELDING

STANJE I TRENDVI U RAZVOJU PODVODNOG ZAVARIVANJA

Originalni naučni rad / Original scientific paper

Rad primljen / Paper received:

Septembar 2016.

Rad je u izvornom obliku objavljen u Zborniku sa savetovanja
„ZAVARIVANJE 2016“ održanog na Srebrnom jezeru 14-
17. Septembra 2016

Ključne riječi: podvodno zavarivanje, razvoj, stanje, trendovi

Sažetak: Održavanje podvodnih konstrukcije zahtijeva primjenu odgovarajućih tehnologija, kao što je npr. podvodno zavarivanje. Dobro uvježban i educiran „team“ ljudskih resursa, uključujući ronioce i organizacijski „team“ na „površini“, odlučujući su u ostvarivanju visoke sigurnosti na radu, te su nosioci velike odgovornosti u obavljanju ovakvih poslova. U zadnjih desetak godina pojačala su se istraživanja za poboljšavanje primjene podvodnog zavarivanja. U Hrvatskoj je to područje od velike važnosti, zbog velike količine naftnog i plinskog transporta koji se odvija u Jadranskom moru. Katedra za zavarene konstrukcije, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu provodi nekoliko projekata na području podvodnih aktivnosti. U ovom radu prezentirani su glavni problemi i trenutno stanje u podvodnom zavarivanju, kao i moguće alternative u daljnjem razvoju.

1. UVOD

Potruga za „off-shore“ ugljikovodicima dovela je naftnu industriju do crpljenja nafte sa sve većih dubina. U zadnjih par desetljeća aktivnosti na ovom području prerasle su granice kontinentalnog pojasa u Meksičkom zaljevu, Brazilu, Zapadnoj Africi, sjeverno-zapadnoj Europi i Mediteranskom području. Nafta se danas crpi na dubinama većim 1000 metara, sa tendencijom razvoja na dublja područja [1].

Važnost tehnologija podvodnog zavarivanja i ispitivanja ističu se kroz brojna postrojenja, popravke i održavanja pomorskih objekata. Štoviše, kako se eksploatacija nafte i plina sve više „pomiče“ na veće dubine, tako i tehnički nivo ovih

Adresa autora / Author's address:

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
I. Lučića 1, HR – 10 000 Zagreb
Tel: +385 1 61 68 306, faks: +385 1 61 57 124
e-mail: zkozuh@fsb.hr

Key words: underwater welding, development, state of the art, trends

Abstract: Maintenance of underwater structures demands application of appropriate technologies such as underwater welding. Due to high safety risks, great importance and responsibility in performing of these activities is on the highly trained and educated human resources, including divers and organization team on the surface. In global aspects investigations for improvement and application of underwater welding have been highly intensified through recent decade. In Croatia, this field is very important, due to great intensity of oil transport and gas production in the Adriatic sea. There are several projects about underwater activities that are conducted within Department of Welded Structures, Faculty of mechanical engineering and naval architecture-FAMENA at University of Zagreb. In this article, main issues about underwater welding and the alternatives in further development are presented.

tehnologija zahtijeva daljnja ulaganja i razvoj. Iako je automatizacija neizbježna, u nekim situacijama,

nezamjenjive su konvencionalne metode ronjenja, pa je stoga od velike važnosti edukacija i uvježbavanje ljudskih resursa. Također je očito da je postignuti nivo razvoja ovih tehnologija primjenjiv u raznim situacijama. Poznato je da su u zadnjih 30-tak godina mnogi projekti pokrenuti s ciljem razvoja podvodnih tehnologija na razini „fit-for-service“. Neki od ovih projekata dali su dobre rezultate, ali mnogi su se ugasilii uslijed velikih troškova i male fleksibilnosti. Dugo vremena su podvodne tehnike zavarivanja bile sinonim za „loše zavarivanje“ koje se karakteriziralo velikom



poroznosti, pukotinama, te slabom žilavosti i sklonosti pucanju. Nedostatak iskustva i znanja bio je prisutan kod tvrtki koje su izvodile neadekvatne zavarivačke procedure, koje nisu imale dobru uvježbanost zavarivača, ni adekvatne elektrode. S vremenom se taj status uvelike promijenio, a promijenio se i pristup projektima za podvodno zavarivanje s naglaskom na visok stupanj osiguranja kvalitete. Procedure i kvalifikacije za podvodno zavarivanje upotpunjene su u „AWS D3.6 Specifikaciji za podvodno mokro zavarivanje“, koja uzima u obzir faktore podvodnog okruženja. „AWS D3.6 Specifikacija za podvodno mokro zavarivanje“, prvi put je objavljena 1983. godine s ciljem utvrđivanja trenutnog stanja razvoja tehnologija povezanih s podvodnim zavarivanjem i osiguravanjem potrebnih zahtjeva koji se moraju ispuniti za podvodno zavarivanje.

Specifikacija se svakih pet godina revidira kako bi se aktualizirala s modernim tehnologijama. AWS D3.6 daje četiri klase zavara koje se označavaju s A, B, C i O. Klase su definirane na sljedeći način: klasa A zavara, uspoređuju se sa zavarima „izvan“ vode po vrijednostima određenih komparativnih svojstava i zahtjeva za testiranje. Klasa B zavara, za manje kritične primjene, kod kojih se mogu tolerirati niska duktilnost, veliki porozitet i visok stupanj diskontinuiteta. Klasa C zavara, koji se primjenjuju tamo gdje stupanj opterećenja nije primaran. Klasa O zavara, koji moraju zadovoljavati zahtjeve neke druge norme ili specifikacije. Za svaku od navedenih klasa zavara, AWS D3.6 također daje detalje o kriterijima nerazornih i razornih ispitivanja. Kako bi se zadovoljio kriterij osiguranja kvalitete, razvijene su brojne tehnike podvodnog ispitivanja. Mnoge od tih tehnika su se s vremenom „izgubile“, ali neke su se dalje razvijale i danas su primjenjive kod ROV („Remote Operated Vehicle“) i AUV („Autonomous Underwater Vehicle“). Kao što je već ranije napomenuto, konvencionalno ronjenje također je dalo veliki doprinos razvoju na tom području, pogotovo područje razvoja opreme i mješavina plinova. Nova ronilačka odijela omogućavaju ronioncu rad na većim dubinama s povećanom sigurnosti i radnom sposobnosti.

2. STANJE I RAZVOJ PODVODNOG ZAVARIVANJA

Podvodno zavarivanje se dijeli na dvije osnovne vrste: podvodno mokro i podvodno suho zavarivanje. Kod podvodnog mokrog zavarivanja električni luk, osnovni i dodatni materijal su u

doticaju sa vodom, kod podvodnog suhog zavarivanja mjesto zavarivanja je suho (izbacuje se voda sa mjesta zavarivanja).

Kod mokrog podvodnog zavarivanja najčešći je postupak ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL). MIG/MAG postupak zavarivanja punjenom žicom najviše se izvodio u državama bivšeg SSSR. Zavarivanje trenjem ima prednost jer je neosjetljivo kod primjene u većim dubinama pomoću ROV-a. Zavarivanje trenjem godinama se pod vodom uspješno primjenjivalo kao sredstvo pričvršćivanja anoda za „off-shore“ konstrukcije i brodove.

Podvodno suho zavarivanje izvodi se ili u vodonepropusnim komorama, ili se zavarivanje izvodi pod tlakom, oko konstrukcije koja se treba zavarivati montira se komora koja se ispunjava plinom pod odgovarajućim tlakom. REL, TIG i MIG/MAG postupci najčešće se koriste za postizanje kvalitetnih zavara, za primjenu pri velikim dubinama. Veliki broj istraživanja je posvećen objašnjavanju utjecaja visokog tlaka na ponašanje električnog luka te optimalnom podešavanju parametara zavarivanja.

Daljnji razvoj podvodnih aktivnosti uključuje podvodno zavarivanje laserom i tzv. „zavarivanje s vodenom zavjesom“, mehanizirani proces kod kojeg stožasti mlaz vode služi kao „zavjesa“ za zaštitu plina za zavarivanje. Taj se postupak primjenjivao u Japanu u kasnim 1990-tim godinama. Materijali koji se najčešće zavaruju su čelici za cjevovode i „off-shore“ konstrukcije. Nekoliko stotina popravaka izvedeni su na platformama ili brodovima, a dnevno se mogu pročitati mnogi izvještaji o postupcima podvodnog zavarivanja diljem svijeta.

Zavarivanje pod pritiskom je dobro usavršena, istražena i ispitana tehnologija. Sadašnja istraživanja provode se u svrhu osiguravanja parametara zavarivanja na većim dubinama, od 500 do 1000 m.

Ručno elektrolučno mokro zavarivanje je najfleksibilnija i najekonomičnija tehnologija za popravke i održavanje. Iako dubina i okolina predstavljaju ograničenja, s dobro uvježbanim zavarivačima moguće je postići odgovarajuću kvalitetu zavarivanja. Zbog dobre primjenjivosti i fleksibilnosti, REL postupak je najčešće korištena tehnika za podvodno mokro zavarivanje. Slika 1 prikazuje podvodno mokro zavarivanje.



Slika 1. Podvodno mokro zavarivanje [2]

Da bi postigli prihvatljivu kvalitetu podvodnog zavarivanja, potrebno je zadovoljiti tri osnovne komponente.

Prvo, dobro uvježbani i educirani ronici-zavarivači su temelj aktivnosti podvodnog zavarivanja. Za vrijeme treninga ronica-zavarivača, posebno se naglašava sama tehnika zavarivanja. Upućuje se na to da nepravilna tehnika zavarivanja povećava udio vodika i porozitet u metalu zavara. Poznat problem u podvodnom zavarivanju je uključenje troske što je posljedica lošeg nagiba elektrode i veće brzine zavarivanja. Veliki utjecaj na sadržaj difuniranog vodika ima sama tehnika zavarivanja. Ronici-zavarivači moraju imati izvrsne vještine zavarivanja u realnim uvjetima i na različitim praktičnim zadacima kako bi se izbjegle pojave grešaka. Također se velika važnosti uz vještinu zavarivanja, pridaje i vještini ronjenja, a to dvoje je u pravilu jako teško postići [3].

Drugo, za uspostavljanje i održavanje električnog luka potrebne su kvalitetne elektrode. Do sada su razvijene obložene elektrode pokazale dobra operativna svojstva. Bitno je da obloge osiguraju jednostavno otklanjanje troske i što je moguće nižu razinu vodika. Što se tiče operativnih karakteristika, najbolje rezultate dale su rutilne elektrode. Također je bitno da vodonepropusna obloga „gori“ zajedno sa elektrodom, kako bi se spriječio direktan doticaj elektrode s vodom za vrijeme postupka zavarivanja. Treba naglasiti kako, osim smanjenja iznosa struje, kemijska agresivnost vode može oštetiti kompaktnost obloge, te uzrokovati smanjenje stabilnosti električnog luka ili čak prekid električnog luka. Zbog toga, veliku ulogu u proizvodnji visokokvalitetnih elektroda za podvodno mokro zavarivanje ima vodonepropusna obloga, koja ima funkciju zaštite od utjecaja vode kao i štetnih kemijskih sastojaka, te postojanost na visokim temperaturama električnog luka i jezgre

elektrode. Postoje mnogobrojne tvrtke i institucije koje se bave razvojem i proizvodnjom elektroda za podvodno mokro zavarivanje. Činjenica je da se ponekad elektrode za primjenu zavarivanja u suhom okruženju premazuju vodonepropusnom oblogom. Dokazano je da takav pristup podvodnom mokrom zavarivanju može prouzrokovati loše operativne karakteristike i slabu kvalitetu zavara. Veliku važnost imaju svojstva elektrode. Svojstva zavarenog spoja mogu se poboljšati modifikacijom obloga elektroda s aditivima, koji povećavaju stabilnost električnog luka ili koji smanjuju udio vodika. Za smanjenje udjela vodika potrebne su posebne metode zavarivanja kako bi se produljilo vrijeme hlađenja i napravila toplinska obrada prethodno nataljenih slojeva. Za visokočvrste čelike, ispitivanja su provedena na nehrđajućem čeliku i elektrodama na bazi nikla. Elektrode s dvostrukom oblogom pokazale su dobre rezultate, pogotovo zbog visoke kvalitete prevlaka koje sprječavaju penetraciju vode i degradaciju obloge, te mogućnosti održavanja visoke kvalitete zavara, slika 2. [3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14].

Treće, adekvatni izvori za zavarivanje moraju osigurati potrebne parametre zavarivanja. Ispravljači su konstruirani tako da imaju smanjen napon praznog hoda i primjerena svojstva za zavarivanje. Također se upotrebljavaju i tranzistorski izvori struje, i daljnja istraživanja upućuju na to da, sadašnji stadij razvoja tehnologije izvora struje omogućuje bolje uspostavljanje električnog luka i njegovu stabilnost. Intenzivno dinamičko ponašanje izvora struje potrebno je za ostvarivanje električnog luka u većim dubinama. Izvor struje za zavarivanje mora biti podešen za postupak podvodnog mokrog zavarivanja, ne samo zbog dobre stabilnosti luka već i zbog sigurnosti ronica-zavarivača [15,16,17,18,19,20].



Slika 2. Elektrode s dvostrukom nepropusnom oblogom razvijena na FSB-u, Sveučilište u Zagreb



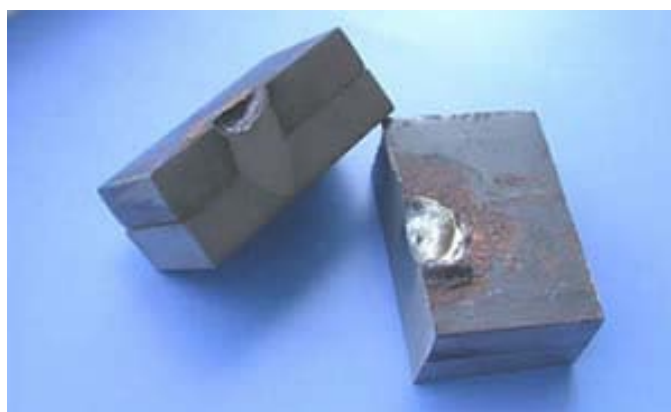
Slika 3. B klasa zavora prema AWS D3.6 [4]

Zbog činjenice da je vrlo teško pronaći visokokvalitetnog ronioca-zavarivača te zbog ostalih nedostataka mokrog zavarivanja, pojavila su se alternativna rješenja u obliku podvodnog „točkastog zavarivanja“. Novi dodatni materijal i kontrolni uređaji upotpunjavaju tradicionalne zavarivačke vještine potrebne za podvodno mokro zavarivanje. Elektrode protaljuju materijal, kroz kontrolni se uređaj provodi struja potrebna za taljenje elektrode i stvaranje točkastog zavora, tako nastaje zavar, postupak je djelom sličan principu spajanja zakovicama. Za ovaj postupak potreban je poseban kontrolni uređaj s odgovarajuće podešenim parametrima, slika 4. Kod ove operacije zavarivanja, nema potrebe da ronionic-zavarivač

kontrolira parametre kao što su brzina zavarivanja, kut nagiba elektrode, duljina električnog luka, itd., tj. sve one parametre koji se moraju kontrolirati u uvjetima konvencionalnih metoda zavarivanja. Također nije potreban dobar vizualan pregled postupka zavarivanja budući da ronionic-zavarivač ne mora nadgledati luk kao što je to potrebno u konvencionalnim uvjetima. Iako je vizualnost smanjena, kvaliteta zavora i dalje je visoka. Iako je ovaj postupak dobra zamjena za REL postupak zavarivanja, on ima svoja ograničenja i nije u mogućnosti potpuno zamijeniti REL zavarivanje [21]. Slika 5 pokazuje zavar izveden podvodnim točkastim zavarivanjem.



Slika 4. Kontrolni sistem za podvodno „točkasto“ zavarivanje [21]



Slika 5. Podvodni zavar, «točkasto» zavarivanje

Od velike važnosti je dobra koordinacija između ronioca-zavarivača i tima na površini. Kod podvodnog zavarivanja i rezanja postoji velika

opasnost od električnog šoka i eksplozije. Zbog toga je vrlo bitna pouzdana komunikacija kako bi se održala sigurnost zavarivača i efikasnost rada. S



obzirom na potrebnu pripremu zavarenog spoja, potrebno je osigurati zadovoljavajuće visokokvalitetne pripreme spoja koristeći pri tom podvodne brusilice i ostale odgovarajuće alate. Ukoliko su zadovoljeni svi aspekti, moguće je izvesti klasu A zavara, prema AWS D3.6:M na nelegiranom konstrukcijskom čeliku. Bitno je napomenuti da je nekoliko tvrtki prijavilo klasu A zavara postignutu u realnim i laboratorijskim uvjetima [22]. Najveći dio vremena i truda, u cjelokupnom razvoju podvodnog mokrog zavarivanja, oduzeli su razvoj elektroda i opreme za podvodno zavarivanje. U mnogim su zemljama organizirani tečajevi i otvoreni centri za obuku ronioca-zavarivača za tehniku podvodnog mokrog zavarivanja.

Postupak mokrog REL zavarivanja danas je jako rasprostranjen i godinama se koristi kod popravaka „off-shore“ platformi, uključujući i one koje su pretrpjele štete uzrokovane elementarnim nepogodama, kao što su uragani ili štete nastale u ratu. U budućnosti će se tražiti popravljane konstrukcija od čelika s povišenom i visokom čvrstoćom u dubokim vodama. Zbog visokog stupnja difundiranja vodika, postoji opasnost od pojave loma uzrokovane povećanim udjelom vodika, a ona raste s povećanjem ekvivalenta ugljika. Prema tome javlja se potreba za razvojem obloga elektroda kao i sofisticiranih tehnologija izvora struje.

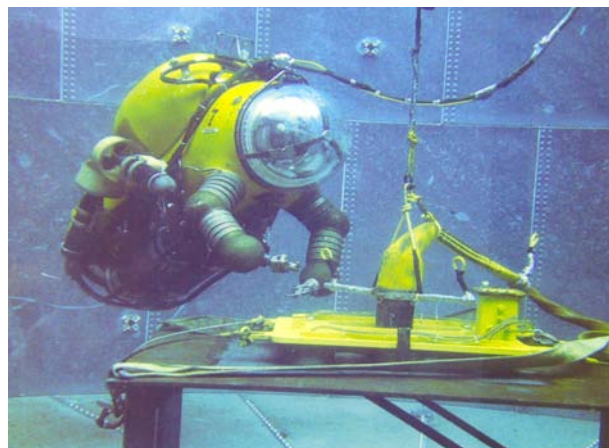
Podvodno zavarivanje praškom punjenim žicama istraživalo se u svrhu popravka cjevovoda i trupa broda. Izvedba praškom punjenih žica vrlo je bitna kod kvalitete zavarivanja. Ovaj postupak je poluautomatiziran, a ukoliko je primjena prikladna moguće ga je potpuno automatizirati [23,24].

Osim postupka podvodnog REL zavarivanja, dobro razvijen postupak je i podvodnog zavarivanja trenjem (slika 6). Do sada je primjena podvodnog zavarivanja trenjem bila ograničena na primjenu u plitkim vodama kao što je anodno pričvršćivanje, vanjski prekidi, itd. Katastrofa podmornice Kursk na 106m dubine, pokazala je značajnu primjenu podvodnog zavarivanja trenjem, gdje podvodno REL zavarivanje nije moglo osigurati takvu kvalitetu zavara koja se zahtijevala.

Razvijena je i posebna oprema, uključujući posebna atmosferska ronilačka odijela koja su robotizirana i omogućavaju ronioncu bolje radne uvjete i sigurnost. Glavni parametri podvodnog zavarivanja su rotacija, vrijeme trajanja i tlak, slika 7. Zavarivanje trenjem spada u postupke zavarivanja tlakom, ne dolazi do taljenja materijala. Linija „taljenja“ i zona utjecaja topline su relativno male u usporedbi s elektrolučnim postupcima zavarivanja. Čvrstoća zavara je jednaka ili čak veća od čvrstoće osnovnog materijala, a problemi kao što su uključine i poroznost zavara su isključene. Međutim, postupak je osjetljiv na ekvivalent ugljika, povećanje CE rezultira povećanjem tvrdoće [25].



Slika 6. Podvodno zavarivanje trenjem [25]



Slika 7. Atmosfersko ronilačko odijelo [25]

Uz tehnike zavarivanja, primjenjuju se i tehnike mehaničkog spajanja. Sofisticirani podvodni hidraulički sistemi razvijeni su za mehaničko spajanje cjevovoda, a mogu se primjenjivati za popravak cjevovoda te upravljati s površine.

Priprema površine vrlo je bitna kod ovog postupka, cijev se mehanički obrađuje i nakon toga spaja s posebnim obujmicama. Priprema cijevi prikazana je na slici 8.



a)

b)

Slika 8. Sistem za podvodno mehaničko spajanje cjevovoda

a) Mehanička obrada i priprema cjevovoda

b) Kompletni sistem u realnim uvjetima, dubina vode 100 m

Primjena ROV u podvodnom zavarivanju istražuje se kroz nekoliko projekata. Kao već ranije napomenuto, Europski projekt ROBHAZ razvio je podvodno robotizirano zavarivanje trenjem. Neki od projekata kao npr. ARM provedeni su u svrhu podvodnog zavarivanja. Za podvodno elektrolučno zavarivanje potreban je sofisticirani kontrolni software koji bi osposobio pozicije uređaja i kontrolirao parametre zavarivanja [26].

3. RAZVOJ MJEŠAVINA PLINOVA ZA RONJENJE

Izvođenje podvodnih operacija zahtijeva dugotrajni boravak na mjestu izvođenja ispitivanja koje je najčešće locirano na velikim dubinama, zbog toga je potrebna dobra fizička kondicija ronioca kako bi na tim dubinama mogao izvoditi radove uz zadržanu koncentraciju. Ljudsko tijelo nije predodređeno za boravak u takvim uvjetima tlaka, pa je s toga teže zadovoljiti tražene zahtjeve. Disanje na velikim dubinama pod takvim pritiskom uzrokuje niz promjena u organizmu koje se reflektiraju kao raznorazni poremećaji ili mogu čak,

u krajnjem slučaju, rezultirati smrću. Inhaliranja zraka ili nekih drugih mješavina plinova za ronjenje uzrokuje jedan od najpoznatijih efekta tzv. DSC („Decompressing Sickness“). Ostale pojave koje mogu nastupiti poznate su pod nazivima; „toksičnost kisika na središnji živčani sustav“, „narkoza uzrokovana dušikom“, „toksičnost pluća kisikom“ i „hipoksija“, s njima su upoznati samo stručnjaci, iako je efekt tih pojava gotovo jednako štetan kao i DSC. Kod amaterskog ronjenja ovakve se opasnosti izbjegavaju jednostavnim izbjegavanjem većih dubina. Očito je da takve metode nisu izbor u slučaju komercijalnog ronjenja. Osim saturacijskog ronjenja koje uvelike rješava ovaj problem, ali također uzrokuje visoke troškove, u novije vrijeme na raspolaganju su raznorazne plinske mješavine za ronioce koje se koriste na raznim dubinama s ciljem obavljanja eksperimentalnog rada. Za tehničko i komercijalno ronjenje, čisti kisik se obično zamjenjuje s nekim od mješavina plinova prikazanih u tablici 1.

Ime mješavine	Kompozicija
Nitrox	kisik i dušik
Heliox	helij i kisik
Heliar	helij i zrak, udio kisika manji od 21 %
Helitrox	helij i Nitrox, udio kisika veći od 21 %
Trimix	helij, dušik i kisik
Hydreliox	vodik i helij, ravnoteža kisika manja od 4 %
Hydrox	vodik i kisik, ravnoteža kisika manja od 4 %
Neox	neon i kisik

Tablica 1. Mješavine plina najčešće korištene u komercijalnom ronjenju (zavarivanju)



Koncept ovakvog pristupa uvijek je isti: sa stajališta ronioca i njegove sigurnosti – smanjenje povećanog udjela dušika u krvi, sprječavanje nastanka narkoze uzrokovane dušikom, smanjenje toksičnosti kisika, poboljšavanje mentalne pribranosti ronioca, a sa stajališta troškova za podvodne aktivnosti cilj je produljivanje vremena koje roniac može provesti u obavljanju radova i postizanje što većih dubina, te smanjenje vremena dekompresije. Međutim, nabrojani uvjeti su usko povezani i dosta je teško specificirati optimalnu mješavinu. Na primjer, povećan udio kisika u mješavini smanjuje vrijeme dekompresije, ali ujedno povećava opasnost od toksičnosti kisikom. Također je smanjena dubina ronjenja. U dubinama od otprilike 120 m, mješavina plina bi trebala sadržavati 10 % kisika, ali ukoliko bi roniac pokušao roniti na tu dubinu koristeći navedenu mješavinu, na dubini od nekoliko metara on bi se onesvijestio i umro. Taj će efekt nastupiti zbog toga jer je za disanje pod tim tlakovima nedovoljna mala količina kisika. Pri manjim tlakovima udio kisika mora biti znatno veći, ovisno o stvarnom tlaku. Ljudsko tijelo za održavanje vitalnih funkcija mora imati određenu količinu kisika. Taj udio kisika je rezultat u postocima u mješavini plina i tlaku na kojem se odvija ronjenje. Uz to, dubina ronjenja definira potrebnu mješavinu. Za vrijeme spuštanja na određenu dubinu, koriste se posredne mješavine plina koje se optimirano razlikuju od onih koje se primjenjuju na određenoj dubini na kojoj se radi. Također se pri izronu ne koriste mješavine plinova koje se koriste na radnim dubinama.

Primjena Nitrox mješavina danas je uobičajena u praksi za provođenje podvodnih aktivnosti na manjim dubinama. Koncept korištenja Nitrox mješavina ne povećava udio kisika, već smanjuje udio dušika u mješavini koja se udiše. Taj koncept je od velike važnosti, budući da je dušik uzrok mnogih problema ronioca pri manjim dubinama urona (uzrokuje narkozu dušikom i kako se rastvara u tkivu vodi do DSC). U osnovi, Nitrox mješavinu čini bilo koja mješavina koja u sebi sadržava više od 21 % kisika. Korištenjem Nitrox mješavina za ronjenje produžava se vrijeme boravka ronioca na određenoj dubini u usporedbi sa ostalim mješavinama. Međutim, ne smiju se zanemariti moguće poteškoće. Korištenje Nitroxa ne eliminira rizik od DCS-a., ukoliko se roniac ne pridržava ograničenja dubine i vremena koje smije provesti na tim dubinama. Ukoliko se ne poštuju pravila, može se pojaviti toksičnost kisika. Općenito, toksičnost kisikom je glavni ograničavajući faktor. Kisik je neophodan za održavanje vitalnih funkcija, ali preveliki udio kisika može štetno utjecati na

ljudski organizam, uzrokujući čak i smrt. Toksičnost može nastupiti u 2 oblika: kao toksičnost pluća ukoliko se Nitrox mješavine udišu u dužem vremenskom periodu, ili kao CNS toksičnost ukoliko je roniac izložen djelomično visokim pritiscima kisika. Kalkulacije koje se odnose na Nitrox mješavine nisu previše kompleksne, ali moraju biti poznate osnovne procedure za kalkulaciju mješavina plinova za ronjenje. Kalkulacije su bazirane na zakonima plinova (Opći plinski zakon, Charles'-ov zakon, Boyle-ov zakon, Henry-ev zakon i Dalton-ov zakon). Osim ručne kalkulacije za plan ronjenja, danas je dostupan software koji se koristi za proračun podataka za ronjenje.

Trimix mješavina je druga po redu mješavina plinova koja se koriste pri komercionalnom ronjenju. Ova se mješavina uglavnom koristi na dubinama većim od 40 m, i sadrži dušik, kisik i helij. Trimix se koristi od sredine prošlog stoljeća, a njegove prednosti odmah su prepoznate zajedno s njegovim nedostacima.

Glavni razlog korištenja mješavina koje sadrže helij su redukcija udjela dušika u mješavini, smanjenje vremena dekompresije, smanjenje mogućnosti pojave narkoze uzrokovane dušikom, smanjenje gustoće inhaliranog plina u svrhu retencije ugljičnog dioksida i poboljšavanje sigurnosti zavarivača. Priprema mješavine je prilično kompleksna u usporedbi s pripremom Nitrox mješavine. Zbog povećane vodljivosti uzrokovane helijem, bitno je korištenje drugih plinova za popunjavanje (kao npr. argon). Kompleksne ronilačke procedure gdje se primjenjuje helij su primarno povezane s poteškoćama koje se javljaju s povećanjem dubine, kada se koristi puno opreme. Dublji zaroni zahtijevaju veće iskustvo, vještinu i više znanja ronioca.

Uz prednosti, Trimix (helij) ima također svojih nedostataka. Glavni problem ronjenja sa plinskom mješavinom koja sadrži helij je HPNS („High Pressure Neurological Syndrome“). Na nastanak tog stanja upućuju grčevi i gubitak koordinacije pokreta, a pojavljuje se na dubinama većim od 120 m. Drugi problem koji se može pojaviti, iako je dosta rijedak, je pojava grčenja zglobova, tj. pojava ukočenosti slična artritisu, a koja može nastupiti kod urona. Budući da helij ima malu molekularnu masu, 2, 6 puta će brže izaći iz tkiva za razliku od dušika. Zbog toga je potrebno započeti dekompresiju na većim dubinama nego što je slučaj s korištenjem zraka. Vrijeme dekompresije može se smanjiti korištenjem Nitroxa i kisika na manjim dubinama. Budući da su kalkulacije Trimixa više



kompleksne nego kod Nitroxa, upotrebljavaju se objavljene tablice podataka ili software paketi kao što su npr. Deco Planner, Abbys, GAP ili slični. Bazirano na unesenim parametrima, dobiju se svi ostali potrebni parametri. Međutim uvijek je moguća ručna kalkulacija. Ukoliko se primjenjuje ručna kalkulacija, koriste se isti principi kao kod Nitrox mješavina. Samo su dvije osnovne mješavine za podvodne aktivnosti ovdje navedene i kratko opisane. Druge mješavine se rjeđe koriste, ili se koriste samo u eksperimentalne svrhe. Potrebno je izvrsno poznavanje teorije ronjenja, zajedno sa strogim propisima svih sigurnosnih procedura i zakona.

4. ZAKLJUČAK

U podvodnom zavarivanju i ispitivanju, potreban je kontinuiran i znanstveni pristup radu kako bi se dobili rezultati koji se mogu primijeniti u realnim uvjetima i na praktičnim zadacima. Za postizanje visoke kvalitete „mokrih“ zavara zaslužan je razvoj novih tehnologija zavarivanja, izvora struje, ronilačke opreme i dodatnog materijala, kao i bitna poboljšanja u edukaciji zavarivača. Podvodno mokro zavarivanje, zajedno s podvodnim ispitivanjem zadobili su kreditibilnost i profesionalno

su prihvaćeni. Razvoj alternativnog podvodnog zavarivanja ili ispitivanja pronalazi se u raznoraznim autonomnim ili daljinski upravljanim sistemima, ali s posebnim naglaskom na činjenicu da je u nekim situacijama nemoguće zamijeniti ronioce. Podvodno mokro zavarivanje i ispitivanje su od velike važnosti i bitan su alat za održavanje i popravke pomorskih objekata. Štoviše, kroz razvoj tehnologije i opreme, njihova se primjena dalje usavršava, pogotovo uz pomoć ROV- a i AUV-a. Istraživanja sadašnjih projekata prisutna su na području usavršavanja i edukacije ronioaca, na razvoju dodatnih materijala za zavarivanje ugljičnih čelika, visokočvrstih i nehrđajućih čelika, na razvoju tehnika mokrog zavarivanja, na razvoju adekvatnih izvora struje, na razvoju opreme za nerazorna ispitivanja, na razvoju prikladne organizacijske sheme za ronioce i tima na površini, na daljnjoj automatizaciji i predstavljanju ROV i AUV, na tehnologiji na većim dubinama, također na standardizaciji i certifikaciji. U Hrvatskoj su R&D aktivnosti provedene na svim tim područjima istraživanja i očekuje se da postignuti rezultati imaju potpunu primjenjivost u realnim uvjetima.

5. LITERATURA

- [1] D. Bingham, T. Drake, A. Hill, R. Lott, The Application of Autonomous Underwater Vehicle Technology in the Oil Industry-Vision and Experiences, FIG XXII International Congress Washington, 2002.
- [2] M. Pett, Wet Welding-Significant Advances in Quality, Welding and Metal Fabrication, 4/2000.
- [3] S. Kralj, Z. Kožuh, I. Garašić, Electrodes for Underwater Wet Welding, Proceedings of International Conference Welding&Joining 2000, Tel Aviv, Israel, 2000.
- [4] S. Kralj, Z. Kožuh, I. Garašić, L. Dorn, Influence of the Environment on the Parameters in Underwater Wet Welding, Welding and Cutting, 2/2003.
- [5] M. D. Rowe, S. Liu, T. J. Reynolds, The Effect of Ferro-alloy Additions and Depth on the Quality of Underwater Wet Welds, Welding Journal, August 2002.
- [6] J. Bartzsch, S. Daniel, B. Bouaifi, U. Draugelates, Investigation of Underwater Welding of Stainless Steels, Stainless Steel World Conference, 1999.

- [7] R. T. Brown, K. Masabuchi, Fundamental Research on Underwater Welding, Welding Journal, June, 1975.
- [8] D. Ogden, T. Joos, Specification Stirrs Underwater Electrode Development, Welding Journal, August 1990.
- [9] S. Liu, T.J Reynolds, Innovative Consumables for Quality Underwater Wet Welds, Underwater Intervention, New Orleans, 2002.
- [10] R. C. de Medeiros, S. Liu, A Predictive Electrochemical Model for Weld Metal Hydrogen Pickup in Underwater Wet Welds, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1998.
- [11] P. Szelagowski, Underwater Welding-Present State and Developmental Trends, Welding & Cutting, 2/1991.
- [12] T. C. West, G. Mitchell, E. Lindberg, Wet Welding Electrode Evaluation for Ship Repair, Welding Journal, August 1990.
- [13] A. Sanchez Osio, S. Liu, D.L.Olson, S. Ibarra, Underwater Wet Welding Consumables for Offshore Applications, Proceedings of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1993.



- [14] T. C. West, W. E. Mitchell, R. I. Murray, Effects of Water Temperature on Cracking of Wet-Welded Carbon Steel, *Welding Journal*, October 1996.
- [15] ..., Electric Arc Welding Power Sources, NEMA EW 1-1988, National Electrical Manufacturers Association, Washington, USA.
- [16] K. Schmidt, G. Kozig, J. A. S. Ross, H. L. Green, Safety of Wet Welding with Increased Open Circuit Voltages, GKSS Report 91/E/30 1991., IIW Doc. No. SCUW 151-94.
- [17] P. Hiltunen, Underwater MMA Welding Using Covered Electrodes, *Kemppi Pronews* 3/2002.
- [18] I. M. Richardson, A Review of Underwater Welding Processes, IIW Doc. SCUW 202-3.
- [19] P. Hart, I.M. Richardson, J.H. Nixon, The Effect of Pressure on Electrical Performance and Weld Bead Geometry in High Pressure GMA Welding, IIW Doc. SCUW 187-00.
- [20] R. Murray, Underwater Electrical Safety for Divers, *Underwater*, July/August, 2004.
- [21] ..., Revolutionary New Welding System Removes Welding Skills, www.specialwelds.com, Newsletter 2003.
- [22] ..., Class A Repair for Offshore Platform, *Underwater Contractor International*, July/August, 2003.
- [23] K. Yushchenko, Yu. Gretsii, Underwater Wet Arc Semi-Automatic Welding in Repair of Pipelines, *Int. Conference on Pipeline Repairs*, March 5-6 2001, Australia.
- [24] Yu. Gretsii, V. Ya. Kononenko, Wet Mechanized Underwater Welding with a Self-Shielding Flux-Cored Wire, *Int. Conf. on Underwater Welding*, 1991, New Orleans, USA.
- [25] R. Murray, J. Couch, Underwater Friction Stud Welding for Military and Commercial Use, *Underwater*, Jan/Feb 2004.
- [26] T. Larkum, *Advanced Robotics Underwater*, General Robotics Limited, 2003.
- [27] O. Førli, H. Meidell, A Review of NDT in the Offshore Scene, *Proceedings of 7th European Conference on Non-Destructive Testing*, Copenhagen, 1998.
- [28] D. Markučič, Development of Ultrasonic Underwater Inspection Methodology, Doctoral Dissertation, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 1998.
- [29] L. Goldberg, Diversity in Underwater Inspection, *Materials Evaluation*, March 1996.
- [30] S. Kralj, Z. Kožuh, Z. Belinić, I. Garašić, Underwater Activities in Maintenance of Naval Objects, *Proceedings of International Conference on Oil and Gas Engineering*, Zadar, Croatia, 2003.
- [31] A. Hansen, J. Hatlø, Remotely Operated Ultrasonics for Sub-Sea Applications, *Proceedings of 7th European Conference on Non-Destructive Testing*, Copenhagen, 1998.