

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

VEDENALAINEN HITSAUS

UNDERWATER WELDING

Lappeenrannassa 23.11.2015

Samuli Laamanen

Tarkastaja Yliopisto-opettaja Raimo Suoranta

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Samuli Laamanen

Vedenalainen hitsaus

Kandidaatintyö

2015

23 sivua, 9 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja(t): Yliopisto-opettaja Raimo Suoranta

Hakusanat: vedenalainen hitsaus, wet welding, dry welding, SMAW, FCAW, SFSW, friction stud welding

Tässä kandidaatintyössä esitellään ensin vedenalainen hitsaus yleisesti. Työssä käydään läpi vedenalaisen hitsauksen eri pääalueet ja niissä käytetyt hitsaustekniikat, sekä tarkastellaan veden vaikutusta hitsiin. Työ sisältää myös materiaali esimerkkejä, joita vedenalaisessa hitsauksessa käytetään.

Vedenalainen hitsaus toimii asennus- ja korjaushitsauksena. Hitsausprosessit, joita työssä käsitellään, ovat puikko-, täytelanka- ja kitkahitsaus. Näitä hitsaustekniikoita käytetään märkähitsauksessa, mikä poikkeaa selvästi kuivassa ympäristössä tapahtuvaan hitsaamiseen, jossa hitsi ei pääse välittömästi kosketukseen veden kanssa.

Työn tarkoituksena on antaa informaatiota vedenalaisesta hitsauksesta ja sen hyödyntämisestä hitsaustekniikassa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Samuli Laamanen

Underwater welding

Work of Candidate

2015

23 pages, 9 figures and 1 table

Examiner(s): University teacher Raimo Suoranta

Keywords: underwater welding, wet welding, dry welding, SMAW, FCAW, SFSW, friction stud welding

Underwater welding is introduced in the beginning of the candidate work. Work includes main areas of underwater welding and the welding techniques which are used in underwater welding, and scrutinize water's effects to the weld. The work includes material examples which are used in underwater welding.

Underwater welding is used for repair and assembly. Manual metal arc welding, flux cored arc welding and friction welding are the welding techniques which are introduced in this work. This techniques are used in the wet welding where weld is straight away contact with surrounding water.

The aim of the work is to introduce and give a common information about underwater welding.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	VEDENALAINEN HITSAUS YLEISESTI	6
2.1	Märkähitsaus	6
2.2	Kuivahitsaus	8
3	VEDEN VAIKUTUS METALLIN HITSATTAVUUTEEN	11
4	HITSAUSPROSESSIT JA MATERIAALI ESIMERKIT	13
4.1	Puikkohitsaus	13
4.1.1	Puikkotyypit esimerkit	13
4.2	Täytelankahitsaus	15
4.2.1	Varusteet	16
4.3	Kitkahitsaus ja 7055 alumiiniseos	16
4.3.1	Kitkatapitushitsaus	17
5	YHTEENVETO	20
	LÄHTEET	21

1 JOHDANTO

Työssä käydään läpi vedenalaista hitsausta, siihen liittyviä menetelmiä ja materiaaleja, joita vedenalaisessa hitsauksessa käytetään. Tarkoituksena on selvittää mitä vedenalainen hitsaus on ja missä sitä sovelletaan. Merkittävänä tekijänä hitsausprosessissa on ympäristö, sillä hitsausprosessi toimii eritavalla vedenalla, kuin maan päällä hitsatessa. Tämän takia on kehitetty tekniikoita, joilla hitsausta voidaan suorittaa kuivassa ympäristössä, vaikka ollaankin veden alla. Hitsaus kuitenkin onnistuu myös ilman erillistä eristystä vedestä, jolloin hitsi on välittömästi veden kanssa kosketuksissa. Vedenalainen hitsaus on tästä johtuen jaettuna kahteen eri luokkaan, jotka ovat märkä- ja kuivahitsaus.

Vedenalaista hitsausta käytetään hyvin paljon vedenalaisissa rakennelmissa, ja siksi se on hyvin tärkeä menetelmä. Kuitenkin veden alla suoritettava hitsaus on syvissä vesissä vaarallista ja myös kustannukset ovat korkeat tekniikasta riippuen. Siksi hitsaajan työturvallisuutta on parannettu erilaisten laitteiden kehityksen myötä, kuten esimerkiksi kauko-ohjattavien hitsauslaitteistojen avulla, jolloin hitsaajan itse ei tarvitse olla hitsauspaikalla.

Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, jossa hyödynnetään erilaisia tietokantoja lähteiden etsimisessä. Tietoa voidaan hyödyntää artikkeleista, raporteista ja muista tieteellisistä teksteistä.

2 VEDENALAINEN HITSAUS YLEISESTI

Vedenalaista hitsausta käytetään, kun tehdään korjaus- tai asennushitsausta esimerkiksi öljytankkereihin ja öljynporauslauttoihin (Modern welding, 2014). Vedenalainen hitsaus jaetaan kahteen ryhmään, märkä- ja kuivahitsaus. Näissä on erona se, että märkähitsauksessa hitsi on kosketuksissa veden kanssa hitsauksen aikana, kun taas kuivahitsauksessa vesi pääsee hitsin kanssa kosketuksiin, kun hitsausprosessi on suoritettu.

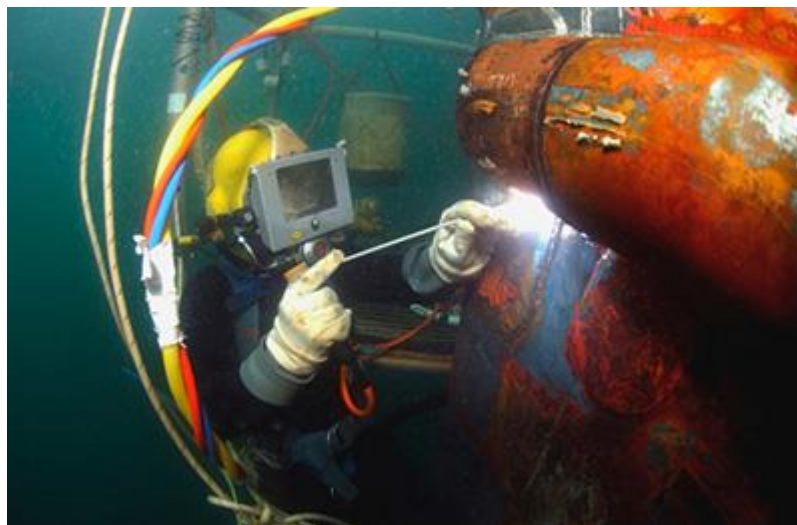
Märkä- ja kuivahitsaus käyvät läpi suuria muutoksia tutkimuksissa ja sovelluksissa. Jokainen hitsausprosessi vaatii insinööreiltä ja esimiehiltä päättäväisyyttä valita oikea hitsaustapa, mikä olisi mahdollisimman optimaalinen valinta hitsausprosessin kannalta. (Water Welders, 2014.) Taulukossa 1 märkä- ja kuivahitsausta on vertailtu toisiinsa nähden tuomalla esiin olennaisia tekijöitä vedenalaisessa hitsauksessa.

Taulukko 1. Vedenalainen märkä- ja kuivahitsaus: vertailu toisiinsa nähden (Water Welders, 2014).

Tyyppi	Kustannus	Vaarallisuustaso	Näkyvyys	Hitsin vahvuus	Käyttöosuus
Märkä	Edullinen	Korkea	Vähäinen	Hieman heikompi	20 %
Kuiva	Kallis	Keskitaso	Selkeä	Vahva	80 %

2.1 Märkähitsaus

Märkähitsauksessa tarvittavat varusteet ovat yleensä puikkohitsausprosessiin kuuluvat varusteet ja vesitiiviit elektrodit. Valaistus, telineet ja käsityökalut helpottavat hitsausprosessissa. Märkähitsauksessa etuna on se, että veden alla hitsaaja voi työskennellä esteettömästi missä tahansa osassa monimutkaista rakennelmaa, missä muut veden alla toteutetut tekniikat voivat tuottaa ongelmia. Esimerkkinä paikkaus, joka voidaan suorittaa nopeasti ja alhaisin kustannuksin. (McClellan & Dean, 2002, s. 82.) Kuvassa 1 hitsaaja on suorittamassa märkähitsausprosessia, joka on veden alla suoritettava liittämismenetelmä.



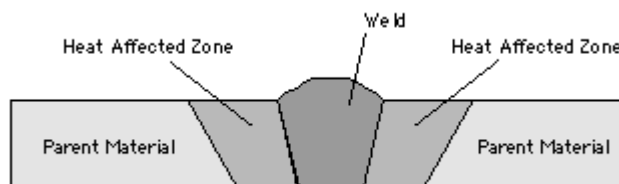
Kuva 1. Puikkohitsausta veden alla (Opli, 2014).

Hitsaajan saavuttua hitsauspisteelle, hän varmistaa, että ympäristössä ei ole prosessia vaarantavia tekijöitä. Ennen hitsaamista hitsaaja varmistaa, että metallin pinta on puhdas. Hitsausprosessin alkuvaihe voi kestää useita päiviä ennen sen aloittamista. Kun hitsaaja on valmis, hän antaa merkin ryhmälleen ja aloittaa hitsauksen. Tyypillisesti märkähitsauksessa käytetään tasavirtaa, jossa sähkövirta on 300–400 A. (Water Welders, 2014.)

Puikkohitsaus (SMAW) ja täytelankahitsaus (FCAW) ovat märkähitsauksen yleisimmät hitsaustekniikat. Märkähitsaus suoritetaan 100 metrin syvyydessä suojaetuilla elektrodeilla tai täytelankahitsauksella. Vedenalaisessa ympäristössä hitsin jääntymisarvot ovat paljon korkeammat märkähitsauksessa, kuin kuivahitsauksessa. Lämpötila välillä 500–800 °C, hitsi voi jäähtyä jopa 415–56 °C/s. Tämä aiheuttaa hitsatussa metallissa ja HAZ:ssa muokattavuuden menettämistä. Märkähitsauksessa hitsit ovat yleensä hyvin huokoisia, jonka voivat aiheuttaa vety, hiilimonoksidi tai vesihöyry. Vaikuttavimmat ilmiöt tähän ovat veden syvyys, elektrodin suojaus ja valokaaren stabiilius. Märkähitsauksen laatu on parantunut viime vuosien aikana kaupallisesti saatavilla olevien elektrodien ja erikoistäytelankojen vuoksi. (Labanowski, Fydrych & Rogalski, 2008, s. 12–13.)

Kuvassa 2 on esitettyä HAZ:in sijainti hitsiin nähden. HAZ on alue, johon hitsauksen tuoma lämpö vaikuttaa. Sen koko riippuu hitsauksessa käytetystä sähkövirran määrästä, perusaineen paksuudesta ja hitsausnopeudesta. HAZ altistuu primääriselle

rekristallisoitumiselle. Muutokset ominaisuuksissa riippuvat eniten perusaineen mikrorakenteesta. (NSW HSC Online, 2015.)



Kuva 2. HAZ:in sijainti suhteessa hitsiin (NSW HSC Online, 2015).

HAZ:in metallurgia voi olla heikkoa, riippuen metalliseoksen laadusta ja hitsauksen jälkeisestä jäähtymisnopeudesta. Joissakin metalleissa on mahdollista esiintyä haurasta martensiittia HAZ:ssa, mikä voi vaikuttaa vakavasti metallin käyttäytymiseen. (NSW HSC Online, 2015.)

Märkähitsauksen haasteet (Oates, 1996, s. 460):

- Valokaaren epästabilius korostuu korkeassa paineessa siten, että valokaari supistuu ja energiatiheys kasvaa
- Magneettisen puhalluksen mahdollisuus kasvaa
- Paineen nousu aiheuttaa hitsatussa metallissa mangaanin ja piin hupenemista, ja kasvattaa hiilen ja hapen määrää.
- Ympäröivä vesi toimii jatkuvana jäädyttimenä, joka saa aikaan ennenaikaista jäähtymistä hitsissä

2.2 Kuivahitsaus

Kammiossa suoritettava kuivahitsaus edesauttaa korkealaatuisen hitsin tuottamiseen, mutta kustannukset ovat hyvin korkeat. Säiliössä on lähes sama ilmanpaine kuin maanpäällä eli hitsaus tapahtuu lähes samanlaisessa olosuhteessa kuin maanpäällä. Tämä menetelmä on kuitenkin kaikista kallein, mikä johtuu pääasiallisesti konstruktion kustannuksista ja paineensäätöventtiilin sijoittamisesta. (Masubuchi, Gaudiano & Reynolds, 1983, s. 53.) SMAW, GMAW, FCAW ja TIG ovat yleisimmät kuivahitsauksen tekniikoita. Maksimisyvyys, jossa manuaalista korkeapaine hitsausta voidaan tehdä, on 300 m. (Labanowski et al., 2008, s. 14.) Kuvassa 3 on esimerkki paineenalennus kammioista, jossa voidaan suorittaa kuivahitsaus.



Kuva 3. AYSAN paineenalennus kammio (Water Welders, 2011).

Kuivahitsauksen viisi menetelmää ovat (Majumbar, 2006, s. 40):

- Kuivassa ympäristössä suoritettava hitsaus (Dry habitat welding)
- Kammiossa (Dry chamber welding)
- Pienessä suljetussa tilassa (Dry spot welding)
- Säiliössä, jossa vallitsee lähestulkoon atmosfäärissä oleva ilmanpaine (Dry welding at one atmosphere)
- Arkkupato (Cofferdam welding)

Kuivassa ympäristössä suoritettavassa hitsauksessa kammio on kooltaan niin suuri, jotta hitsaaja mahtuu sinne kokonaan (Kemplon Engineering, 2015). Arkkupato on taas nimensä mukaan arkkumainen ja yleensä hitsattu metallinen rakennelma. Arkkupato on esitettynä kuvassa 4. Arkun reunat eristävät ympäröivän veden ja arkussa olevan hitsaajan toisistaan. (Core-IRM, 2015.)



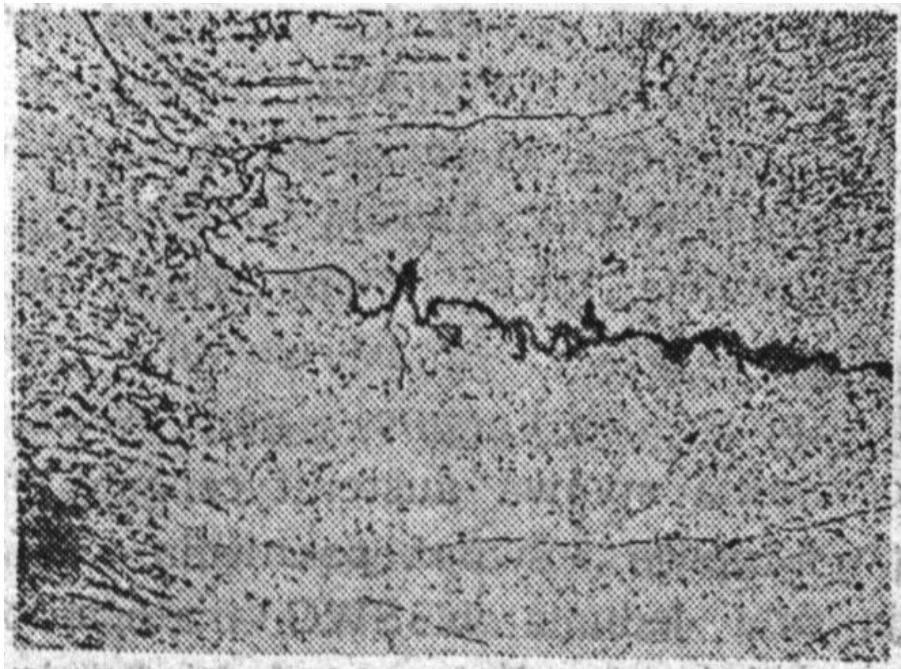
Kuva 4. Arkkupato pumpataan kuivaksi (Core-IRM, 2015).

Arkkuja käytetään yleensä öljylauttojen, siltojen, aallonmurtajien ja muiden vedenympäroivien rakenteiden rakentamisessa ja korjaamisessa. (Core-IRM, 2015.)

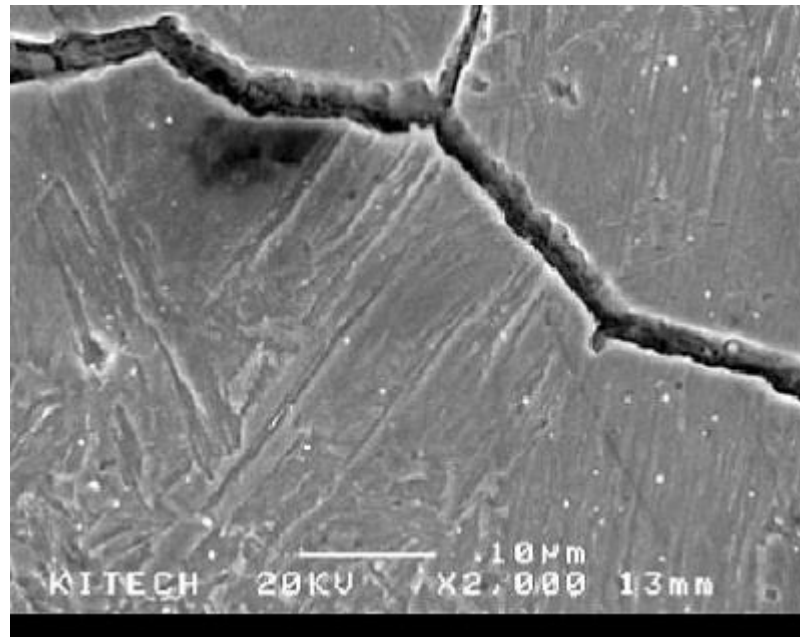
3 VEDEN VAIKUTUS METALLIN HITSATTAVUUTEEN

Korkeampi paine, vedyn pitoisuus hitsissä ja suurempi jäähtymisnopeus tekevät veden alla hitsaamisesta haastavampaa, kuin maanpäällä hitsaaminen. On todistettu, että kohonneen paineen aiheuttama valokaaren epästabiilius, vedyn läsnäolo ja hauras mikrorakenne hitsissä ovat halkeaman muodostumisen syytä. (Labanowski et al., 2008, s. 14.)

Käytetyimmät materiaalit vedenalaisessa hitsauksessa ovat hiiliteräs, austeniitti, duplex ruostumaton teräs ja hienoraeteräs eli luja hitsattava teräs. Metallin hitsattavuuden määräävät vedenalaisessa ympäristössä metallin kyky vastustaa kylmä- tai kuumahalkeilua. Lujan hienoraeteräksen (HSLA) ongelma hitsauksessa on sen herkkyys kylmähalkeilulle, kun taas kuumahalkeilua esiintyy täysin austeniittisissa ruostumattomissa teräksissä. (Labanowski et al., 2008, s. 15.) Kuvassa 5 on mikrorakennekuva kuumahalkeamasta ja kuvassa 6 kylmähalkeamasta.



Kuva 5. Mikrorakennekuva kuumahalkeamasta hitsatussa austeniittisessä teräksessä (Labanowski et al., 2008, s. 15).



Kuva 6. Mikrorakennekuva kylmähalkeamasta bainiitissä HAZ:n alueella (JWJ, 2014).

Lujien terästen hitsausliitoksissa esiintyvä kylmähalkeilu on vedyn aiheuttama (vetyhalkeama). On kolme tapaa, joilla halkeilua voidaan estää: Vähentämällä vedyn pitoisuutta, kovemalla mikrorakenteella HAZ:ssa ja pienentämällä jäännösjännityksiä hitsiliitoksessa. Vedyn pitoisuutta saadaan vähennettyä valitsemalla oikeat hitsausparametrit, joilla saadaan minimoitua hitsisulaan jäävän vedyn määrä. (Labanowski et al., 2008, s. 15.)

4 HITSAUSPROSESSIT JA MATERIAALI ESIMERKIT

Vedenalaisen hitsausprosessin valintaan merkittävin kriteeri on se onko kyseessä märkä- vai kuivahitsaus. Yleisimpiä hitsausprosesseja ovat esimerkiksi puikkohitsaus (SMAW), täytelankahitsaus (FCAW) ja kitkatapitushitsaus. Esimerkiksi puikkohitsausta käytetään korjaus- ja asennushitsauksissa ja täytelankahitsausta käytetään, jos kyseessä on pitkä hitsi.

4.1 Puikkohitsaus

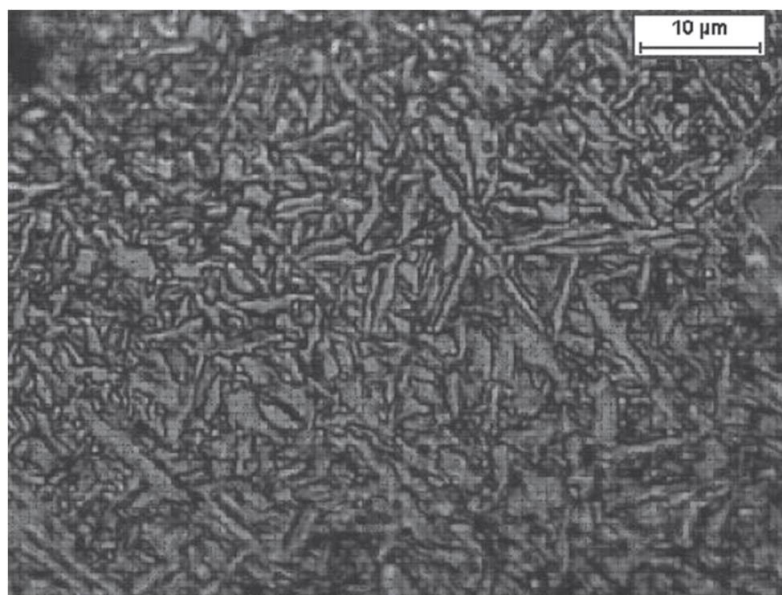
Puikkohitsausta (SMAW) käytetään yleensä vedenalaisessa märkähitsauksessa. Sitä käytetään avomerellä olevien rakennelmien korjauksessa, joita ovat esimerkiksi laiturit, laivat ja putkistot. Puikkohitsauksessa hitsin laatu on heikkoa, kun se suoritetaan märkähitsauksena. Tästä johtuen märkä puikkohitsaus soveltuu hiiliteräksisiin rakennelmiin, jotka eivät ole niin kriittisiä hitsausvaatimuksiltaan. Puikkohitsauksessa varusteet ovat lähestulkoon samanlaiset, kuin maan päällä. Merkittävin eroavaisuus on elektrodeissa, jotka on kehitetty märkähitsausta varten. Lisäksi teholähteitten tulee olla helposti siirrettävissä, kun tehdään pitkiä hitsejä. (Keenan, 1993, s. 9–11.)

Märkähitsauksena suoritettussa puikkohitsauksessa valokaari palaa ilmakehien ympäröimänä, jotka muodostuvat puikon sulaessa. Vastuslämpö valokaaren palaessa, saa aikaan puikon päällysteen höyrystymisen. Valokaaren takana oleva hitsisula kohtaa välittömästi ympäröivän veden, jolloin seurauksena on hitsin nopea jäähtyminen eli sammuminen. (Keenan, 1993, s. 11.)

4.1.1 Puikkotyyppi esimerkit

Märkähitsauksessa käytettävien puikkojen tulee olla suojattuna veden imeytymiseltä vedenkestävällä suojalla. Vedenkestävyys ja puikkojen säilytys ovat tärkeitä tekijöitä, jotta saataisiin mahdollisimman hyvän laatuista hitsejä. Van den Brink ja Boltje osoittavat, että nouseva absoluuttinen kosteus puikon päällysteessä kasvattaa vedyn esiintymistä, josta seuraa vetyhalkeilua hitsissä, kuten myös maan päällä suoritettavassa puikkohitsauksessa. Suojapäällysteitä on monia erityyppisiä, joita esimerkiksi ovat muovi, kumi, vaha ja lakka. (Rowe & Liu, 2001, s. 388.)

Suojapäälysteiset rutiilipuikot ovat kaikista yleisimpiä märkähitsauksessa. Westin ja Goochin mukaan rutiilityypin puikolla saadaan aikaan stabiili valokaari ja hyvä hitsipalon ulkomuoto. Märkähitsauksen kulutushyödykkeistä rutiilipuikkojen päälystäminen on kehittämisen keskipisteenä. Sanchez-Osio tutki titaania, booria ja kalsiumkarbonaattia rutiilipuikon suojapäälysteen lisäaineena. Kun päälyssuojan lisäaineena käytetään titaania tai booria ja hitsaus suoritetaan 10 m syvyydessä, saadaan hitsin mikrorakenteesta 60 % neulakiteiseksi ferriitiksi. Tämä löytö on mieltä herättävää, koska määrit hitsit ovat mikrorakenteeltaan tyypillisesti vähän tai ei ollenkaan neulakiteistä ferriittiä. Hyvä neulakiteinen ferriitti tuo rakenteeseen suuremman lujuuden ja ensiluokkaisen iskunkestävyyden verrattuna perinteiseen ferriittiseen mikrorakenteeseen. Rowen ja Liun (2001, s. 388) teoksessa Murzin ja Russo havaitsivat, että kalsiumfluoridin käyttö suojapäälysteen lisäaineena vähentää vedyn esiintymistä hitsatussa metallissa. (Rowe & Liu, 2001, s. 388.) Kuvassa 7 on esimerkki ferriittisestä mikrorakenteesta, joka on kiderakenteeltaan neulamaista.



Kuva 7. Hitsatun metallin mikrorakenne kuva, jossa ferriitti on kiderakenteeltaan neulamaista (Robledo, Gomez & Barrada, 2011, s. 70).

Gooch raportoi, että rautaoksidi tyyppisillä puikoilla vetyhalkeilun esiintyminen on harvinaisinta kaikkiin muihin ferriittisiin teräksiin nähden. Rautaoksidipuikoilla epäkohtana on se, että iskunkestävyys on alhainen verrattuna hitsiin, johon on käytetty rutiilipuikkoa. Pope selvitti, että lisäämällä nikkeliä selluloosapäälysteiseen puikkoon saadaan hitsistä lujempaa

ja sitkeämpää. Nostattamalla nikkeliäpitoisuus 0:sta 3 %:iin, saadaan Charpy'n iskukitkeydeksi 43 J lämpötilassa 0 C⁰, joka on verrattavissa rutiilipuikon iskukitkeyden arvoihin. Sellupäällysteisetpuikot, joissa on käytetty nikkeliä lisäaineena, voi myöhemmin kehityksen myötä tulla vähävetäisemmiksi, kuin mitä rutiilipuikot. (Rowe & Liu, 2001, s. 388–389.)

4.2 Täytelankahitsaus

Vedenalaisen hitsauksen teknologian kysyntä on noussut johtuen nopeasta laivaston resurssien kehittymisestä, ja näin ollen täytelankahitsausta (FCAW) on sovellettu vedenalaiseen hitsaukseen korkean tehokkuutensa vuoksi. Vedenalaisen hitsin palon geometria on tärkeässä osassa, koska se määrää hitsiliitoksen mekaaniset ominaisuudet. Täytelankahitsauksen ennustettavuus on mahdollista sen parametrien vuoksi, joita ovat esimerkiksi valokaari, jännite ja kuljetusnopeus. Prosessia voidaan yksinkertaistaa hyödyntämällä matemaattisia malleja ja koeajoista saatuja arvoja. (Shi, Zheng & Huang, 2013, s. 1978.)

Ympäristönä vesi tekee täytelankahitsauksesta hyvinkin erilaisen verrattuna maan päällä suoritettuna. Merkittävänä tekijöinä ovat valokaaren käyttäytyminen, metallin siirtyminen, hitsausmetallurgia ja mekaaniset ominaisuudet. Myös valokaaren seuraaminen on hankalaa, johtuen veden kuplinnasta. Liun tutkimuksen mukaan hitsaushöyryt, valon absorboituminen, aaltoilu ja heijastukset vaikuttavat todella paljon valokaaren vääristymiseen. Kaikista tutkimuksista huolimatta FCAW:ssä valokaaren fysiikka on epäselvää. (Jia et al., 2013, s. 1371.)

Rowen ja Liun (2001, s. 394) teoksessa Van den Brink ja Sipkes havaitsivat, että täytelankahitsausta voitaisiin hyödyntää ferriittisten ja austeniittisten ruostumattomien terästen hitsaamisessa. Ohut kuonakerros toimii hyvänä suojana hitsille vettä vastaan. Brydon ja Nixon raportoivat, että FCAW:ssä rutiilitäytteiset langat ilman suojakaasua ovat toimiva ratkaisu vedenalaisessa hitsaamisessa. Rutiilitäytelankojen hyödyntäminen FCAW:ssä on verrattavissa rutiilipuikon tuomiin etuihin. FCAW:ssä on potentiaalia korkeaan lisäaineen tuontiin ja sen automatisointi on mahdollista. (Rowe & Liu, 2001, s. 394.)

Täytelankahitsauksessa voidaan hitsata jatkuvasti keskeyttämättä pitkiäkin hitsejä, kun taas esimerkiksi puikkohitsauksessa puikon loputtua hitsaus keskeytyy, jonka seurauksena hitsiin syntyy epäjatkuvuuskohta. Lisäksi täyteaineiden kaavojen kombinaatioilla ja lankayhdistelmillä voidaan saada aikaiseksi kuona-kaasu reaktio mikä ei ainoastaan paranna hitsipalon geometriaa, vaan myös vähentää vedyn ja hapen pitoisuuksia hitsatussa teräksessä. (Lucas & Cooper, 1998, s. 105.)

4.2.1 Varusteet

Ainutlaatuinen ominaisuus täytelankahitsauksen langansyöttöjärjestelmässä on se, että se voi olla täysin upotettuna veteen, paitsi ohjauspaneeli ja virtalähde. Langansyöttösäiliö on täytetty vedellä ylläpitämään tasapainoa hydrostaattisen paineen kanssa, kun toimitaan veden alla 40 m:stä syvemmälle. Ajomoottori ja alennusvaihte ovat eristettynä umpinaiseen koteloon, joka on täytetty sähköä eristävällä nesteellä. Langan kela on kapasiteetiltään 3,5 kg, joten uuden lankakelan vaihtaminen veden alla onnistuu hitsaajalta tai sukeltajalta. (Lucas & Cooper, 1998, s. 106.)

4.3 Kitkahitsaus ja 7055 alumiiniseos

FSW eli kitkahitsaus pyörivällä työkalulla on yksi vedenalaisen hitsauksen sovelluksista. Yksi materiaali esimerkki, johon FSW:tä on sovellettu, on lämmönkestävällä maalilla suojattu 7055 alumiiniseos, jonka Zn-pitoisuus (sinkingipitoisuus) on 8 % tai jopa 14 %. Seoksen mekaaniset ominaisuudet ovat kehittyneet paljon. Suurlujuus alumiiniseokset sinkillä ylikyllästettyinä ovat todella herkkiä vastaanottamaan hitsauksen tuottaman lämmön. (Qingzhao et al., 2014, s. 97.) Kuvassa 8 vesialtaassa tapahtuu kitkahitsauspyörivällä työkalulla.



Kuva 8. Veden alla suoritettava kitkahitsaus pyörivällä työkalulla (Clark, 2004).

Jotta lämpö saataisiin redusoitua, on perinteisen FSW:n tilalle kehitetty SFSW (Submerged friction stir welding), jossa kappale on upotettuna nesteeseen. Neste voi olla nestemäistä tyyppiä tai vettä. Sakurada oli ensimmäinen, joka käytti upotusta alumiini 6061:n pyörivässä kitkahitsauksessa. Tulokset osoittivat, että kitkan tuottama lämpö riittää näytteen hitsaamiseen, vaikka näyte oli upotettuna veteen. Thomas jatkoi tätä tekniikkaa kehittääkseen FSW:n hitsin vahvuutta 6061 alumiiniseoksessa. Vedenalaisen kitkahitsauksen kehityksessä on keskitytty parantamaan hitsin lujuutta, mutta vesijähdytyksen vaikutus tuo esiin korroosion kestävyuden hitsissä. (Qingzhao et al., 2014, s. 97.)

4.3.1 Kitkatapitushitsaus

Kitkatapitushitsauksessa sauvamainen tappi liitetään kitkavoiman avulla hallitusti kappaleen pinnalle. Pyöriminen ja alaspäin painava voima saa aikaan kitkalämpöä, jonka vaikutuksesta materiaalit plastisoituvat ja liittyvät toisiinsa. Alaspäin painava voima tiivistää liitoksen, kun pyöriminen loppuu. Hitsausaika on noin 4 sekuntia 10 mm halkaisijalla olevalle tapille. Hitsin laatu on yleensä hyvä. Kitkatapitushitsauksessa on mahdollista yhdistää monia eri materiaalikombinaatioita. Tästä esimerkkinä ovat niukkahiilisen teräksen liittäminen niukkaseosteiseen teräkseen, sekä ruostumattoman teräksen, nikkelseosteisen teräksen tai alumiinin liittäminen hiiliteräkseen. Vedenalainen kitkatapitushitsaus toimii jälkiasennuksena, jolla saadaan hitsattua anodiseen suojaukseen tarvittavia materiaaleja,

kuten esimerkiksi sinkki. Tapit, joita kitkatapitushitsauksessa käytetään, ovat muodoltaan kartiomaisia ja ne hitsataan sinkkilevyissä olevien reikien läpi suojattavaan kohteeseen. Näin saadaan varmistettua samalla tapin ja sinkin elementinliitos. (TWI, 2015.)

Kitkatapitushitsauksen laitteisto on kehitetty siirrettäväksi, joten hitsausprosessi voidaan suorittaa lähes missä vain. Tämä edesauttaa hitsaajaa, jos hitsaajan työpiste sijaitsee esimerkiksi avomerellä ja vedenalla. Siirrettävälaitteisto on kevyempi ja pienempi, kuin tehtaassa käytetyt suuret kitkahitsauskoneet suurineen komponentteineen. (HubPages, 2015.)

Kannettavassa kitkatapitushitsaustyökalussa on moottori, mikä pyörittää tappia suurella nopeudella, ja mäntä, joka kohdistaa tarvittavan voiman tappiin. Yksikkö toimii hydraulisesti tai pneumaattisesti. Kuvassa 9 on esitettyä vedenalainen kitkatapitushitsaus, jossa hitsaaja käyttää kitkatapitushitsaustyökalua. Hitsaaja tarvitsee myös pidikejärjestelmän, mikä pitää työkalun työkappaleessa vakaana. Yleisin kiinnitystapa on magneettinen tai imu tasaisilla pinnoilla, ja putkien kanssa käytetään taas ketju- tai leukakiinnitystä. (HubPages, 2015.)



Kuva 9. Vedenalainen kitkatapitushitsaus (Garasic & Kozuh, 2015, s. 18).

Kitkatapitushitsausta on yleinen vedenalla suoritettava hitsausprosessi. Vedenalla hitsatessa veden aiheuttama nopea jäähtymisnopeus saadaan estettyä suojaamalla tappi jollakin

suojapeitteellä. Pneumaattisella työkalulla suoritettava kitkatapitushitsaus on mahdollista suorittaa vedenalla noin 20 metrin syvyydessä, kun taas hydraulisella hitsausprosessi voidaan suorittaa syvemmällä. Hydraulijärjestelmä on yleensä kauko-ohjattava, jonka avulla hitsausprosessi voidaan suorittaa yli 300 metrin syvyydessä. Tänä päivänä suunnitelluilla laitteistoilla on mahdollista päästä tuhannen metrin syvyyteen. (HubPages, 2015.)

5 YHTEENVETO

Vedenalaista hitsausta käytetään paljon avomerillä öljynporauslautoilla, putkistojen rakentamisessa ja satamassa laivan rakennuksessa. Vedenalla toteutettu hitsaus on pääosin asennus ja korjaushitsaamista. Vedenalainen hitsaaminen luokitellaan märkä- ja kuivahitsaukseksi. Märkähitsauksessa hitsi on suoraan kosketuksissa veden kanssa, mikä taas vaikuttaa hitsin laatuun, kuten esimerkiksi huokoisuus voi olla runsaampaa. Kuivahitsaus taas on kustannuksiltaan kalliimpi, mutta hitsin laatu saadaan pidettyä parempana, kuin märkähitsauksessa. Kuivahitsaus suoritetaan erilaisten kammioiden avulla eristyksessä ympäröivästä vedestä. Kuivahitsauksessa hitsi on kosketuksissa ympäröivän veden kanssa vasta hitsausprosessin jälkeen.

Märkähitsauksessa yleisimmät hitsausmenetelmät ovat puikko-, täytelanka- ja kitkahitsaus. Näistä puikkohitsaus kuitenkin on yleisin ja varmasti edullisin menetelmä. Kitkatapitushitsauksessa kehitettyjen laitteistojen avulla voidaan päästä hyvinkin syvälle, yli 300 m syvyyteen, kun taas puikolla hitsaaminen siellä ei ole mahdollista ainakaan ilman erilaista painekammiota. Täytelankahitsauksen etuna puikkohitsaukseen on sen hitsausprosessin jatkuvuus, eikä epäjatkuvuuskohtia hitsiin synny. Myös erilaisten täytelanka-aineiden kombinaatioilla voidaan hyvin vaikuttaa hitsin laatuun.

Vedenalaista hitsausta kehitetään edelleen, esimerkiksi hitsin laadun kontrollointia ja hitsaus laitteistoja parannetaan. Myös kuivahitsauksessa olevien erilaisten kammioiden kehittäminen tulee olemaan suuressa osassa vedenalaista hitsausta, jotta hitsaajien työympäristö saadaan mahdollisimman turvalliseksi. Kammioiden siirtoa ja asentamista tullaan kehittämään tulevaisuudessa yksinkertaisemmaksi, jotta kuivahitsauksen kustannuksia saataisiin alhaisemmaksi. Vedenalaista hitsausta tullaan edelleen käyttämään avomerillä ja laivanrakennusteollisuudessa.

LÄHTEET

Clark, T. 2004. Analysis of Microstructure and Corrosion Resistance of Underwater Friction Stir Processed 304L Stainless Steel. Microstructure-Properties Relationship. [FSRL www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 2004. [Viitattu 10.2.2015]. Saatavissa: http://fsrl.byu.edu/microstructure_research_analysis_corrosion.html

Core-IRM. 2015. Cofferdam Projects. [Core-IRM www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 2015. [Viitattu 30.9.2015]. Saatavissa: <http://www.core-irm.com/2013/840/cofferdam-projects/>

Garasic, I. & Kozuh, Z. 2015. Underwater Welding and Cutting. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.10.2015]. Saatavissa: https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1435134788-0-underwaterweldingandcuttinggarasickozuh_rev1.pdf

HubPages. 2015. Friction Stud Welding, Business and Employment. [HubPages www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 17.8.2011. [Viitattu 3.11.2015]. Saatavissa: <http://hubpages.com/business/friction-stud-welding>

Jia, C., Zhang, T., Maksimov, S. & Yuan, X. 2013. Spectroscopic Analysis of the Arc Plasma of Underwater Wet Flux-Cored Arc Welding. s. 1370–1377.

JWJ. 2014. The Effects of Microstructure on Cold Crack in High-Strength Weld Metals. [JWJ www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 31.12.2014. [Viitattu 28.2.2015]. Saatavissa: <http://www.e-jwj.org/journal/view.php?number=2031561>

Keenan, P. 1993. Thermal Insulation of Wet Shielded Metal Arc Welds. 71 s.

Kemplon Engineering. 2014. Fundamentals of Underwater Welding. [Kemplon Engineering www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 29.9.2015. [Viitattu 30.9.2015]. Saatavissa: <http://kemplon.com/fundamentals-of-underwater-welding/>

Labanowski, J., Fydrych, D. & Rogalski, G. 2008. Underwater Welding – A Review. *Advances in Material Science*, 8:3. s. 11–22.

Lucas, W. & Cooper, M. 1998. Underwater FCA Wet Welding. *Underwater Wet Welding and Cutting*. 113 s.

Majumbar J. D. 2006. *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering* 3. Underwater Welding – Present Status and Future Scope. s. 39–48.

Masubuchi, K., Gaudiano A. V. & Reynolds T. J. 1983. *Underwater Welding. Technologies and Practices of Underwater Welding*. s. 49–70.

McClellan, R. & Dean M. S. 2002. *U.S. Navy Underwater Cutting & Welding Manual*. Direction of Commander, Naval Sea Systems Command. 200 s.

Modern Welding. Underwater welding Modern. [Modern Welding [www-sivuilla](http://www.sivuilla.fi)]. [Viitattu 11.11.2014]. Saatavissa: <http://www.modernwelding.net/underwater-welding.shtml>

NSW HSC Online. 2015. *Joining Metals. Engineering Studies*. [NSW HSC Online [www-sivuilla](http://www.sivuilla.fi)]. Päivitetty 2015. [Viitattu 30.9.2015]. Saatavissa: http://www.hsc.csu.edu.au/engineering_studies/hsc/metals/3817/joining_metals.htm

Oates W. R. 1996. *Welding Handbook, Volume 3 - Materials and Applications*. Part 1. 8. painos. American Welding Society (AWS). 513 s.

Opli. 2013. Motorised Zoom Lens Helps Improve the Quality of Underwater Welding. [Opli [www-sivuilla](http://www.sivuilla.fi)]. Viimeksi päivitetty 27.2.2015. [Viitattu 28.2.2015]. Saatavissa: http://www.opli.net/opli_magazine/imaging/2013/motorised-zoom-lens-helps-improve-the-quality-of-underwater-welding/

Qingzhao, W., Yong, Z., Keng, Y. & Sheng, L. 2014. Corrosion behavior of spray formed 7055 aluminum alloy joint welded by underwater friction stir welding. *Materials and Design*, 2015. 68. s. 97–103.

Robledo, D., Gomez, J. & Barrada, J. 2011. Development of A Welding Procedure for MIL A46100 Armor Steel Joints Using Gas Metal Arc Welding. s. 65–71.

Rowe, M. & Liu, S. 2001. Science and Technology of Welding and Joining, Recent Developments in Underwater Wet Welding, 6:6. s. 387–396.

Shi, Y., Zheng, Z. & Huang, J. 2013. Sensitivity Model for Prediction of Bead Geometry in Underwater Wet Flux Cored Arc Welding. s. 1977–1984.

TWI. 2015. What is friction stud welding. [TWI [www-sivuilta](http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-friction-stud-welding/)]. [Viitattu 27.10.2015]. Saatavissa: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-friction-stud-welding/>

Water Welders. 2011. Dry or wet welding? Similarities, differences and objectives. [Waterwelders [www-sivuilla](http://www.waterwelders.com/dry-or-wet-welding-similarities-differences-and-objectives/)]. Viimeksi päivitetty 2014. [Viitattu 11.11.2014]. Saatavissa: <http://waterwelders.com/dry-or-wet-welding-similarities-differences-and-objectives/http://www.underwaterweldingschools.info/blog/>