LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Iiro Karvinen

LNG-KONTIN SISÄSÄILIÖN VALMISTUS

Työn tarkastajat: Professori Jukka Martikainen
DI Risto Toivanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Iiro Karvinen

LNG-kontin sisäsäiliön valmistus

Diplomityö

2017

87 sivua, 53 kuvaa, 10 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Jukka Martikainen
DI Risto Toivanen

Hakusanat: LNG, nesteytetty maakaasu, sisäsäiliö, kontti, kuljetus, kryogeeninen sovellus, spiraalihitsaus, hitsaus, Supra 316plus

Kaasun käyttö energialähteenä tulee ennusteiden mukaan lisääntymään tulevaisuudessa. Lisääntynyt kysyntä vaatii uusia keinoja kaasun jakeluun. Nesteyttämällä kaasun tilavuus saadaan pienennettyä 600 kertaisesti, mikä on suuri etu kuljetuksen kannalta. Mobiilien konttien avulla kaasua saadaan kuljetettua lähes kaikkialle maailmassa.

Diplomityössä tutkitaan uudenlaisen LNG-kontin sisäosan valmistusta hitsaamalla. Aluksi materiaalille suoritetaan hitsaus- ja mekaanisia kokeita, missä tutkitaan muutoksia mikrorakenteessa ja hitsausvirheitä. Prototyyppi valmistetaan kryogeenisiin sovelluksiin tarkoitetusta Supra 316plus ruostumattomasta teräksestä. Valmistusprosessi dokumentoidaan, mistä käy ilmi sisäsäiliön komponentit ja valmistusmenetelmät. Lisäksi suunnitellaan tuotantoa varten erillisen hitsauslinjan toimintaa ja sen vaatimia apulaitteita.

Valmistettu prototyyppi toimi odotusten mukaisesti, kun sille suoritettiin vesipainetesti ja venymämittauskoe. Tuotantoversioon suunnitellaan muutoksia, joiden avulla saadaan pienennettyä painoa ja helpotettua valmistusta.

ABSTRACT

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

Iiro Karvinen

Manufacturing the inner tank of an LNG container

Master's thesis

2017

87 pages, 53 figures, 10 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Jukka Martikainen
M.Sc. Risto Toivanen

Keywords: LNG, liquefied natural gas, inner tank, container, transportation, cryogenic application, spiral welding, welding, Supra 316plus

According to the estimates, the usage of gas as an energy resource is increasing in the future. Increased demand requests new methods for distribution. By liquefying the volume of gas can be decreased up to 600 times which is a huge benefit for logistics. With the mobile containers the distribution network is global and gas can be used almost everywhere in the world.

This master's thesis studies manufacturing a new LNG container's inner tank by welding. At first welding and mechanical tests are accomplished. Welding samples are examined for microstructure changes and welding errors. The prototype is welded Supra 316plus stainless steel that is designed for cryogenic applications. The manufacturing process is documented in which can be seen the components of the inner tank. For production welding line and its accessory units' functions are being researched.

The manufactured prototype worked as expected during the water pressure test and elongation measure experiment. However, there are about to be modifications in production version which decrease the weight and assist the manufacturing process.

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty osana LNGTainerin tuotekehitystä, missä olen saanut olla mukana. Kiitokset Jukka Martikaiselle, joka ohjasi ja tarkasti diplomityöni sekä Risto Toivaselle työn ohjaamisesta.

Tattista!

Iiro Karvinen
Karstulassa 18.7.2017

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ALKUSANAT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO 11
1.1 Työn tausta 11
1.2 Tavoite ja rajaus 12
1.3 Yritysesittely LNGTainer Oy 13
2 LNG-KONTIN ESITTELY 14
2.1 Kontin rakenne 14
2.2 Sisäsäiliön valmistuksen vaiheet ja vaihtoehdot 15
3 VIRANOMAISMÄÄRÄYKSET 18
3.1 Tukes 18
3.2 ASME 19
3.3 TPED 19
3.4 Kuljetusmääräykset 20
4 HITSAUSMENETELMÄT 22
4.1 Juurensuojaus 22
4.2 MIG-hitsaus pulssikaarella 23
4.3 TIG- ja kaksoiskaasu-TIG-hitsaus 24
4.4 Plasmahitsaus 26
4.5 Tuottavuus ja taloudellisuus 28
5 LAADUNVARMISTUS 30

5.1 Laadunhallintajärjestelmä (QMS) 30
5.2 SFS-EN ISO 3834 Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset 30
5.3 Hitsausohje (WPS) 34
5.3.1 Lämmöntuonti Q 36
5.4 Pätevyydet 37
5.5 Ainetta rikkomaton tarkastus (NDT) 38
5.5.1 Silmämääräinen tarkastus 39
5.5.2 Radiografinen kuvaus (RT) 40
6 ALUSTAVAT HITSAUSKOKEET JA TUTKIMUKSET 42
6.1 Ferriittipitoisuusmittaukset 42
6.2 Makro- ja mikrorakennetutkimus 43
6.3 Vetokokeet 43
7 SISÄSÄILIÖ 46
7.1 Alumiininen sisäsäiliö 46
7.2 Teräksinen sisäsäiliö 47
7.3 Lieriöosien valmistus 48
7.4 Päätyjen valmistus 49
8 TESTAUKSET, TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI 53
8.1 Testaukset 53
8.1.1 Painetestit 53
8.1.2 Typpitestit 54
8.1.3 Vesipainetestit 55
8.2 Makro- ja mikrorakenteet 56
8.3 Lämmöntuonti ja pWPS 66
9 TUOTANTOLINJAN SUUNNITTELU 67
9.1 Prototyyppisäiliön kokoonpanolinja 67
9.2 Segmenttityyppinen hitsauslinja 68

9.3 Spiraalityyppinen hitsauslinja 70

9.4 SWOT-analyysi tuotantolinjavaihtoehdoista 74

10 JOHTOPÄÄTÖKSET 77

10.1 Jatkokehitystoimenpiteet 78

11 YHTEENVETO 80

LÄHTEET 81

LIITE

LIITE I: Alustava hitsausohje pWPS

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

°C	Celsiusaste
A	Ampeeri
B	Kelan leveys [mm]
Bar	Baari, [100 000 N/m^2; 10^5 Pa]
C	Hiili
Cr	Kromi
D	Halkaisija [mm]
H22	Muokkauslujitetun ja osittain hehkutetun materiaalin toimitustila
Hz	Hertsi
I	Virta [A]
k	Terminen hyötysuhde
lx	Lux, valaistusvoimakkuus
mm	Millimetri
Mn	Mangaani
Mo	Molybdeeni
MPa	Megapascal
N	Typpi
Ni	Nikkeli
O	Hehkutetun materiaalin toimitustila
P	Fosfori
Q	Lämmöntuonti [kJ/mm]
$R_{p0.2}$	Myötöraja, 0,2-raja [N/mm^2]
R_m	Murtolujuus [N/mm^2]
S	Rikki
Si	Pii
U	Jännite [V]
v	Hitsausnopeus [mm/s; cm/min]
V	Tilavuus [m^3]
V	Voltti

ADR	European Agreement on the International Carriage of Dangerous Goods by Road, eurooppalainen sopimus vaarallisten aineiden maantiekuljetuksen osalta
AISI	American Iron and Steel Institute, Amerikan rauta ja teräs instituutti
ASME	The American Society of Mechanical Engineers, amerikkalainen standardi
BPVC	Boiler and Pressure Vessel Code, kattila ja paineastia koodisto
CMT	Cold Metal Transfer, metallin kylmäsiirtyminen, hitsausprosessi
EN	Eurooppalainen standardi
ET	Pyörrevirtatarkastus
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
HAZ	Heat Affected Zone, muutosvyöhyke
IIW	International Institute of Welding, kansainvälinen hitsausjärjestö
IMDG	International Maritime Dangerous Goods Code, kansainvälinen vaarallisten aineiden merikuljetussäännöstö
ISO	International Organization for Standardization, kansainvälinen standardi
IWE	International Welding Engineer, kansainvälinen hitsausinsinööri
IWS	International Welding Specialist, kansainvälinen hitsausneuvoja
IWT	International Welding Technologist, kansainvälinen hitsausteknikko
LNG	Liquefied natural gas, nesteytetty maakaasu
MAG	Metal Active Gas, metallikaasukaarihitsaus aktiivisella suojakaasulla
MIG	Metal Inert Gas, metallikaasukaarihitsaus inertillä suojakaasulla
MLI	Multilayer Insulation, monikerroseristekalvo
MT	magneettijauhetarkastus
NDT	Non-destructive testing, rikkomaton aineenkoetus
OHSAS	Occapational Health and Safety Assessment Series, työterveyden ja -turvallisuuden arviontisarja
PT	Tunkeumanestetarkastus
PS	Suurin sallittu käyttöpaine
pWPS	Preliminary Welding Procedure Specification, alustava hitsausohje
QMS	Quality Management System, laadunhallintajärjestelmä
RID	Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail, kansainvälinen vaarallisten aineiden rautatiekuljetusmääräykset
RT	Radiographic testing, radiografinen tarkastus
SFS	Suomen Standardisoimisliitto

TIG	Tungsten Inert Gas welding, volframi-inerttikaasukaarihitsaus
TPED	Transportable Pressure Equipment Directive, liikuteltavan painelaitteen direktiivi
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
UT	Ultraäänitarkastus
VAK	Vaarallisten aineiden kuljetusmääräys
VT	Visual testing, silmämääräinen tarkastus
WPS	Welding Procedure Specification, hitsausohje

1 JOHDANTO

Kaasuputket eivät yllä kaikkialle, mikä rajoittaa kaasun jakelua ja käyttöä energialähteenä. Ongelman helpottamiseksi kaasu voidaan nesteyttää ja kuljettaa tankkereilla terminaaleihin, joista nesteytettyä kaasua jaetaan eteenpäin käyttäjille. Yksi keino kaasun kuljetukseen on mobiili ISO-kontti, johon on rakennettu kaksoisvaippasäiliö. Kontteja kuljetetaan valmiiksi ympäri maailmaa meritse, maa- ja rautateitse, minkä ansiosta kaasun jakelu voidaan turvata lähes kaikkialle.

1.1 Työn tausta

Ensimmäinen prototyyppi valmistettiin alumiinisella myötävällä sisäsäiliöllä ja perliittieristeellä, mikä oli asennettu pahvista valmistettuihin hunajakennoihin. Kokonaisuus ei toiminut halutusti. Uudessa prototyypissä sisäsäiliön materiaalina käytetään ruostumatonta terästä ja se on luonteeltaan myötämätön. Eristysmateriaali uudessa prototyypissä on vaihdettu, lisäksi vakuumitason parantamiseksi pahvista on luovuttu. Nykyinen eristysratkaisu kestää paremmin kompressiota ja sillä saadaan sama säilymisaika vaatimattomammalla vakuumitasolla.

LNG (Liquefied natural gas, nesteytetty maakaasu) on maaperästä saatavaa fossiilista maakaasua, mikä on puhdistettu lähes puhtaaksi metaaniksi ja nesteytetty. Nesteytys tapahtuu kylmentämällä kaasu -162 °C:seen. Nesteenä kaasun tilavuus on 1/600, jolloin sen varastointi ja kuljetus ovat tehokkaampia toteuttaa. Maakaasun käytön yleistymiseen vaikuttaa sen öljyä alhaisempi hinta, varma saatavuus ja puhtaampi palamisprosessi, jolloin hiukkaspäästöt ovat pienempiä. Arvioiden mukaan öljyvarantojen loputtua kaasua riittää energiaksi vielä yli sadaksi vuodeksi. Öljyyn verrattuna hiilidioksidipäästöt ovat yli 20% pienemmät. Lisäksi maakaasusta ei synny palaessa lähes lainkaan rikkipäästöjä eikä näkyvää savua. (AGA 2016a, s. 3-4.)

Öljyn ja hiilen käyttö energialähteenä vähenee, samalla kun uusiutuvien energialähteiden ja kaasun käyttö lisääntyy. BP:n tekemässä ennusteessa kaasun vuosittainen kasvu on n. 1,6 % ja ohittaa hiilen käytön ollen toiseksi käytetyin energialähde vuoteen 2035 mennessä. (BP 2017, s. 15.)

Maailmalla investoidaan LNG-infrastruktuuriin, esimerkiksi terminaaleihin, konttialuksiin, tuotanto- ja nesteytyslaitoksiin sekä suuriin varastoihin. Näin mahdollistetaan kaasun käyttö ilman erillisiä putkilinjoja. Kaasu otetaan talteen ja siirretään erilliseen nesteytys- ja puhdistuslaitokseen. Puhdistettu ja nesteytetty kaasu eli LNG siirretään terminaaleihin välivarastointia varten, joista tapahtuu pienemmän mittakaavan jakelu käyttäjille. (AGA 2016a, s. 6-7.)

LNG:tä varastoidaan ja kuljetetaan kryosäiliöiden avulla. Kuljetus ja jakelu voidaan suorittaa laivoilla, joissa on suuria säiliöitä, erillisillä tankkiautoilla, LNG-perävaunuilla tai konttien avulla. LNG:n käyttö energialähteenä vaatii usein erillisen höyrystimen, jonka avulla neste muutetaan takaisin kaasuksi. Esimerkiksi voimalakäytössä siirtyminen LNG:n käyttöön on mahdollista hybridipolttimella, jolla voidaan hyödyntää sekä öljyä että kaasua. LNG:n käyttö polttoaineena ja energialähteenä on kasvamassa maantie- ja merikuljetuksissa sekä teollisuudessa. (AGA 2016a, s.4,7.)

1.2 Tavoite ja rajaus

Työn ensisijaisena tavoitteena on valmistaa LNG-kontin sisäsäiliö, joka on LNG-tiivis ja kestää käytön aiheuttamat rasitukset. Säiliön tankkaus ja tyhjennys voidaan luokitella yhdeksi käyttösykliksi. Käyttösyklin aikana tapahtuu lämpötila- ja painevaihtelua. Lämpötilavaihtelu aiheuttaa pituusmuutoksia sekä sisä- että ulkosäiliölle. Nesteen kaasuuntuminen nostaa painetta säiliön sisällä, mikä kuormittaa säiliön seinämiä. Lisäksi tavoitteena on suunnitella aihio tuotantolinjasta, minkä avulla voidaan valmistaa sisäsäiliö suoraan kelalta tulevasta materiaalista. Lisäksi verrataan spiraali- ja segmenttityyppisen hitsauslinjan ominaisuuksia.

Työ kattaa sisäsäiliön valmistuksen, testaukset ja niiden dokumentoinnin sekä tuotantolinjan aihioluonnostelman. Työssä ei tutkita välitilan eristystä, ulkosäiliön valmistusta, säilymisajan variointia eikä tankin ulkopuolista instrumentointia. Prototyypin ulkosäiliö on ostettu Liettuasta, missä sille tehtiin ensimmäisiin testituloksiin perustuen muutoksia. Tankin ulkopuolelle sijoitettava instrumentointi sisältää putkiston, varoventtiilit ja lämmönvaihtimen, joka toimii paineen nostatuslaitteistona.

1.3 Yritysesittely LNGTainer Oy

LNGTainer Oy on vuonna 2011 perustettu Helsingissä sijaitseva nesteytetyn maakaasun kuljetukseen tarkoitettujen tankkikonttien valmistukseen keskittynyt yritys. Tuotekehitys tapahtuu yrityksen sivutoimipisteessä Karstulassa. Yrityksellä ei ole vielä liikevaihtoa. Pääpaino on tuotekehityksessä ja liiketoimintasuunnitelman muodostamisessa ja sen toteuttamisessa. Pyrkimyksenä on valmistaa toimiva prototyyppi ja sopia pilottitankkien tekemisestä vuoden 2017 aikana. LNGTainer työllistää viisi toimihenkilöä. Suurin osa suunnittelusta ja valmistuksesta ostetaan alihankintana.

LNGTainerin uudenlainen LNG-kontti on käänteinen versio perinteisestä LNG-kontista, jossa sisäosa on painava paineastia. Käännetyssä rakenteessa ulkosäiliö toimii paineastiana ja eristys on sen sisäpuolella. Uudenlainen rakenne mahdollistaa suuremman tilavuuden ja nopeamman tankkausajan kevyemmän sisäosan vuoksi.

2 LNG-KONTIN ESITTELY

Prototyyppi on mitoitettu standardimittaiseen 40 jalan konttirunkoon. Markkinoilla on lisäksi 20 jalan kontteja. Kulmiin on sijoitettu konttikulmat, joista konttia voidaan nostaa ja lukita paikoilleen kuljetusta varten. Kuvassa 1 on esitetty LNGTainerin LNG-kontti maantiekuljetusvalmiudessa. Uudenlainen rakenne mahdollistaa suuremman tilavuuden ja pienemmän kokonaispainon verrattaessa perinteisiin LNG-kontteihin. Näiden ominaisuuksien voidaan olettaa olevan kontin tärkeimmät logistiset ominaisuudet. Lisäksi mahdollisuus yhdistää kontteja samaan putkistoon, matalat käyttökustannukset, nopea tankkaus- ja purkuaika, alhainen täytön aikainen hävikki ja pitkä säilötyn kaasun säilyntäaika ovat asiakkaita kiinnostavia ominaisuuksia. Myös korkea turvallisuusaste, tuoteominaisuuksien varioitavuus ja informaatiopalvelut ovat tärkeitä ominaisuuksia.

Kuva 1. LNGTainerin LNG-kontti kuljetuksessa.

2.1 Kontin rakenne

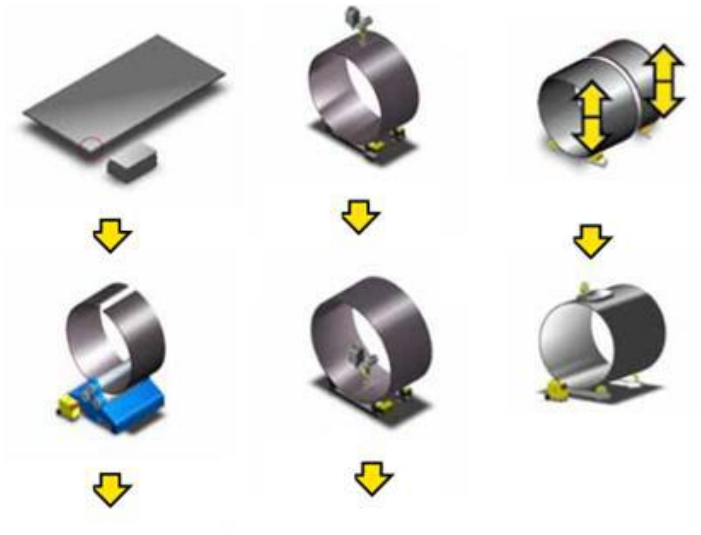
LNGTainerin LNG-kontin ero perinteiseen LNG-konttiin on paineastian käyttö ulkosäiliönä ja eriste, johon sisäsäiliö voi tukeutua. Perinteisessä LNG-kontissa on vankka ruostumattomasta teräksestä valmistettu sisäsäiliö, joka toimii paineastiana. Sisäsäiliön ulkopinta on vuorattu usealla MLI-kalvolla (Multilayer Insulation) ja ulkosäiliönä toimii ohuempi säiliö, minkä tehtävä on pitää vakuumi välitilassa. Sisäsäiliö on ripustettu ulkosäiliön sisäpinnasta, mikä aiheuttaa rakenteeseen lämpösillan ja lyhentää LNG:n

säilyntäaikaa. Lisäksi ripustuksien takia rakenne kestää huonosti tärinää, jota aiheutuu esimerkiksi maantie-ja merikuljetuksissa. Kuvassa 2 esitetään perinteinen LNG-kontti, jota siirretään konttikulmista rautatiekuljetusta varten. Kuvia 1 ja 2 verrattaessa molemmat LNG-kontit näyttävät ulkoisesti hyvin samanlaisilta.

Kuva 2. Perinteinen LNG-kontti (LNG Global 2017).

2.2 Sisäsäiliön valmistuksen vaiheet ja vaihtoehdot

Perinteisesti sisäsäiliö valmistetaan yli 6 mm paksuista teräslevysegmenteistä jauhekaarihitsaamalla. Materiaali on usein ruostumatonta terästä, esimerkiksi AISI (American Iron and Steel institute) 304L tai 316L laatua. Hiilen osuus halutaan minimoida kylmän käyttölämpötilan, jopa -196 °C, takia. Kelalta leikataan halutun pituisia levyjä, jotka mankeloidaan ympyrälle ja päät hitsataan toisiinsa, jolloin saadaan yksi segmentti sisäsäiliön lieriöosaa varten. Kuvassa 3 nähdään levyaihion pyöristys ja päiden hitsaus sekä kahden segmentin sovitus ja hitsaus.



Kuva 3. Levyaihion pyöristys ja hitsaus.

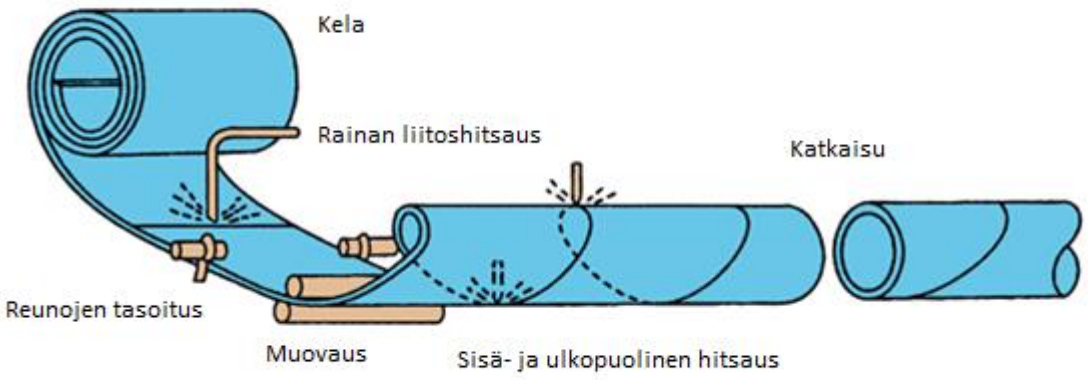
Segmentit asetetaan pyöritysrullastolle, jossa kehät hitsataan toisiinsa päittäisliitoksella. Lieriöosaan liitetään haluttu määrä segmenttejä, minkä jälkeen siihen liitetään päädyt. Toinen vaihtoehto on valmistaa kaksi säiliön puolikasta, jotka liitetään lopuksi yhteen. Kuvassa 4 on valmis lieriöosa, jonka sisällä on useita vahvikerenkaita ja kahdesta segmentistä valmistetut päädyt.

Kuva 4. Perinteinen sisäsäiliön lieriöosa, jonka sisällä vahvikerenkaat ja kahdesta segmentistä valmistetut päädyt (Emas Cryogenic 2012).

LNGTainerin sisäsäiliöstä on muutamia segmenttipohjaisia versioita, joissa materiaalina on käytetty 1 mm paksua profiloitua alumiinia, 2 mm paksua sileää alumiinia ja 2,5 mm paksua sileää ruostumatonta terästä. Valmistusvaiheet mukailevat perinteisen sisäsäiliön valmistusta, sillä erotuksella, että segmenttien ainevahvuus on pienempi ja käytössä on eri hitsausprosessi.

Segmenttipohjainen lieriöiden hitsaus voidaan korvata spiraalihitsauksella, jolloin säästytään segmenttien leikkaukselta, silloitushitseiltä ja tarkalta asemoinnilta. Lisäksi lieriöön ei tule useita T-liitoksia, joita syntyy segmenttien liittämisestä toisiinsa. Spiraalihitsausta käytetään yleisimmin vesi- ja kaasuputkien valmistuksessa. Rainan syöttökulmaa muuttamalla voidaan vaikuttaa valmistettavan putken ulkohalkaisijaan ja putken enimmäispituuteen vaikuttaa lähinnä valmistuslinjan pituus. (Revie 2015, s. 195-196; van Es et al. 2016, s. 288-289.)

Spiraalihitsauksessa kelalta tulevana raina ohjataan suoristinrullien lävitse reunojen tasoitukseen, minkä jälkeen oikean levyinen raina pyöristetään muotoilurullien avulla spiraalille. Kuvassa 5 nähdään yksinkertaistettu perusidea spiraalihitsauksesta. Tarkemmin spiraalihitsauksesta kerrotaan kappaleessa 9.3. (Steelpipe 2017.)



Kuva 5. Spiraalihitsauksen perusidea (Muokattu lähteestä Steelpipe 2017).

3 VIRANOMAISMÄÄRÄYKSET

LNG luokitellaan vaaralliseksi aineeksi sen kylmän olomuodon ja kaasuuntuessaan helpon syttyvyyden vuoksi (AGA 2014, s. 1). LNG:n kiehumispiste on -162 °C. Tätä korkeammassa lämpötilassa LNG alkaa kaasuuntua ja tilaan muodostuu ylipainetta (AGA 2014, s. 4). LNG-konttien on täytettävä erilaisia vaatimuksia, jotta niitä voidaan hyödyntää LNG:n kuljetuksessa. LNG-kontin ulkosäiliö luokitellaan paineastiaksi, mikä edellyttää rakenteen erillistä hyväksymistä. Tällä hetkellä ulkosäiliön ASME-luokitus ja tarkastus tehdään alihankkijan tiloissa Liettuassa valmistuksen yhteydessä.

3.1 Tukes

Tukes (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto) koostuu viidestä eri yksiköstä, joista teollisuusyksikkö valvoo tuotantolaitosten ja laitteistojen turvallisuutta, mihin kuuluu myös painelaitteet ja niitä käyttävät tuotantolaitokset. Tuoteyksikkö valvoo vaarallisten aineiden kuljetussäiliöitä. LNG-kontti kuuluu osaksi molempien yksiköiden valvonnan piiriin. (Tukes 2016a.)

Painelaitteen luokittelu suoritetaan seuraavien kriteerien perusteella:

1) Painelaitteen tyyppi, LNGTainerilla säiliö.
2) Suurin sallittu käyttöpaine (PS) ja tilavuus (V) tai nimellissuuruus (DN).
3) Sisällön luokittelu, kaasu vai neste.
4) Sisällön vaarallisuus: ryhmät 1 ja 2.

(Tukes 2003, s. 5.)

Säiliöllä tarkoitetaan kuorta, joka on suunniteltu ja valmistettu paineenalaista sisältöä varten. Säiliössä voi olla useampia kammioita. Kaasu käsittää lisäksi myös nesteytetyn kaasun. Sisällön ryhmä 1 ’’käsittää vaaralliset sisällöt, jotka määritellään kemikaaliasetuksen (675/1993) 3 §:ssä räjähtäviksi, erittäin helposti syttyviksi, helposti syttyviksi, syttyviksi, erittäin myrkyllisiksi, myrkyllisiksi tai hapettaviksi. Sisällön ryhmä 2 käsittää kaikki muut sisällöt, jotka eivät kuulu ryhmään 1.’’ (Tukes 2003, s. 6.)

Suomessa suoritetaan paineastioille määräaikaistarkastukset, höyrykattiloille kahden vuoden ja muille rekisteröidyille paineastioille neljän vuoden välein. Painesäiliöille

suoritetaan käyttötarkastus ja sisäpuolinen tarkastus neljän vuoden välein, sekä painekoe kahdeksan vuoden välein. Käyttötarkastuksessa säiliö ja sen toimivuus tarkastetaan käyttöä vastaavissa olosuhteissa. Sisäpuolisessa tarkastuksessa säiliö tyhjennetään ja puhdistetaan, jotta sen kunto voidaan tarkastaa perusteellisesti. Painekokeessa tutkitaan mahdollisia vuotoja ja muodonmuutoksia paineen alla. (Tukes 2003, s. 11-12).

3.2 ASME

ASME (The American Society of Mechanical Engineers) on voittoa tavoittelematon vuonna 1880 perustettu jäsenyhdistys, mikä tunnetaan yleisesti amerikkalaisena standardinlaatijana. ASME:n mukaisia standardeja on noin 500. Suurin on paineastioita käsittelevä koodisto BPVC (Boiler and Pressure Vessel Code), mikä on hyväksytty yli sadassa maassa. LNG-kontti on ASME BPVC VIII-1 paineastialuokituksen mukainen, mikä mahdollistaa kontin maailmanlaajuisen käytön. Standardissa annetaan ohjeet paineastian muotoon, suunnitteluun, valmistukseen ja tarkastukseen. (ASME 2016b, s. 2,8,9.)

LNG-kontin osalta ASME-luokitus on paineastiana toimivassa ulkosäiliössä, mikä ostetaan alihankintana. ASME BPVC sertifiointi uusitaan tavallisesti kolmen vuoden välein. Auditoinnin voi suorittaa vain ASME:n määrittävä taho, lista hyväksytyistä tarkastuslaitoksista löytyy ASME:n www-sivuilta. ASME:n BPVC standardisarjasta julkaistaan uusi versio kahden vuoden välein, joista viimeisin on vuodelta 2015. (ASME 2016a, s. 1.)

3.3 TPED

TPED tulee sanoista Transportable Pressure Equipment Directive eli kuljetettavien painelaitteiden direktiivi. Direktiivin tarkoitus on mahdollistaa kuljetettavien painelaitteiden vapaa liikkuvuus yhtenäismarkkinoilla ja parantaa painekuljetusten turvallisuutta maa- ja rautateillä. Valmistaja merkitsee vaatimukset täyttävän tuotteen pii-merkinnällä (π). Kuljetettaville painelaitteille on suoritettava direktiivin mukaisesti määräaikais-, väli- ja ylimääräisiä tarkastuksia, jotta voidaan varmistaa laitteiden täyttävän turvallisuusvaatimukset jatkuvasti. (2010/35/EU, s. 1-4.)

TPED ei sisällä itsessään turvallisuusvaatimuksia, vaan viittaa niiden osalta eurooppalaiseen vaarallisten aineiden maantiekuljetussopimuksen ADR:n (European Agreement on the

International Carriage of Dangerous Goods by Road) lukuun 6.2, jossa esitetään paineastioiden rakennetta ja testausta koskevat määräykset. Uusiin kryoastioihin on merkittävä seuraavat hyväksyntämerkinnät selkeästi ja kestävillä kirjaimilla (ADR 2015 liite A, s. 314,315):

1) Valmistajan nimi tai merkki ja valmistusnumero.
2) Tekninen standardi, jota on käytetty suunnittelussa, valmistuksessa ja testauksessa.
3) Tyhjäpaino kilogrammoina.
4) Koepaine baareina.
5) Vesitilavuus litroina.
6) Käyttöönottotarkastuksen päivämäärä kuukauden tarkkuudella.
7) Tarkastuslaitoksen tunnus tai leima.
8) Pii-merkintä (π) ja YK-pakkaustunnus.

3.4 Kuljetusmääräykset

LNGTainerin LNG-kontille on hyväksyttynä seuraavat kansainväliset kuljetusmääräykset:

1) ADR, European Agreement on the International Carriage of Dangerous Goods by Road, eurooppalainen sopimus vaarallisten aineiden maantiekuljetusten osalta.
2) RID, Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail, kansainvälinen vaarallisten aineiden rautatiekuljetusmääräykset.
3) IMDG, International Maritime Dangerous Goods Code, kansainvälinen vaarallisten aineiden merikuljetussäännöstö.

(Logistiikan maailma 2016.)

ADR-sopimuksella tarkoitetaan eurooppalaista sopimusta vaarallisten tavaroiden kansainvälisten maantiekuljetuksien osalta. Säännöstön uusiutuminen tapahtuu kahden vuoden välein. ADR-sopimuksessa määritellään osapuolten vastuut ja velvollisuudet kuljetuksen aikana. Jäsenvaltioiden on tarkoitus sopeuttaa kansallinen lainsäädäntö yhtenäiseksi ADR-sopimuksen kanssa, jotta Eurooppaa voidaan pitää yhtenäisenä alueena vaarallisten aineiden maantiekuljetusten osalta. Suomessa vaarallisten aineiden kuljetusmääräyksistä käytetään termiä VAK-määräykset. (Logistiikan maailma 2016; Tukes 2016b.)

RID-määräykset ovat ADR-sopimuksen kaltainen kahden vuoden välein tarkastettava kokoelma vaarallisten aineiden kansainvälisestä rautatiekuljetuksesta. RID-määräykset ovat perustana Suomen kansallisiin rautatiekuljetusmääräyksiin. (Trafi 2017.)

IMDG-koodi kattaa maailmanlaajuisesti kansainväliset merikuljetukset ja se uusitaan kahden vuoden välein. Koodilla pyritään hallitsemaan vaarallisten aineiden kappaletavarakuljetusta, kontit, säiliöyhdistelmät, rautatievaunut ja kaikenlaiset rekat luokitellaan kappaletavarakuljetukseksi. Poikkeuksellisesti tietyillä maantieteellisillä alueilla, kuten Itämeri, Pohjanlahti ja Suomenlahti, voidaan soveltaa ADR-määräyksiä, joilla on tarkoitus helpottaa IMDG-koodin tiukkoja määräyksiä. (Logistiikan maailma 2016.)

Hyväksynnät mahdollistavat LNG:n maantie-, rautatie- ja merikuljetukset LNGTainerin uudenlaisella LNG-kontilla. Lisäksi on huomioitava maakohtaisia kansallisia kuljetusmääräyksiä. Esimerkiksi Suomessa kuljetettavien paineastioiden on täytettävä TPED:ssä esitetyt vaatimukset, mutta kuljetus Suomesta ulkomaille tai toisinpäin on mahdollista ilman TPED:iä.

4 HITSAUSMENETELMÄT

Nesteytetyn kaasun kylmä olotila vaatii käytetyltä materiaalilta hyvää kylmän sietokykyä. Kryogeenisissa sovelluksissa käytetään usein austeniittisia ruostumattomia teräksiä, koska niiden lujuus kasvaa lämpötilan laskiessa. Hitsauksessa on huomioitava syntyvän liitoksen ferriittipitoisuus. Ferriitti estää kuumahalkeilua, mutta heikentää liitoksen lujuutta kylmässä. Sisäsäiliötä hitsattaessa ferriittipitoisuutta on kontrolloitava materiaalien kemiallisilla koostumuksilla ja hitsausparametrejä muokkaamalla. (Friedrich et al. 2008, s. 3.)

4.1 Juurensuojaus

Tuotteen toimivuuden kannalta korroosionkestävyys on tärkeässä roolissa. Hitsauksen aikana perusmateriaali ja hitsit altistuvat lämmölle ja ilmalle, mikä voi aiheuttaa päästövärien syntymistä hitsausalueelle. Tämä heikentää hitsien korroosionkestävyyttä. Tästä syystä hitsauksen aikana syntyvien päästövärien minimoimiseksi käytetään inerttiä suojakaasua, kuten argonia. Päästövärien syntymiseen vaikuttaa hitsauksen lämmöntuonti, jäännöshappipitoisuus ja teräksen pinnan tila. (Amman 2012, s. 13-14.)

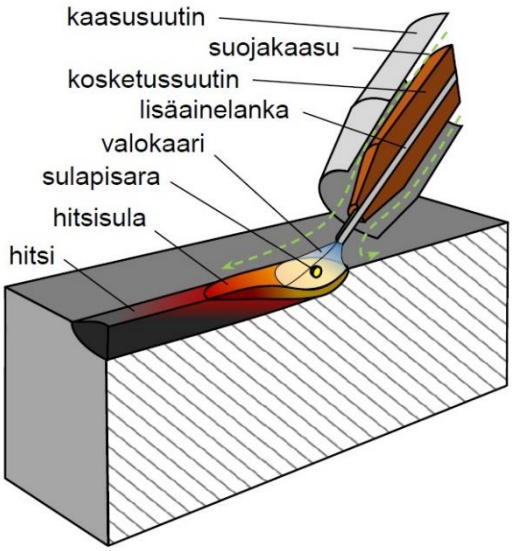
Juurensuojauksessa ilma syrjäytetään juurikaasun avulla. Tätä kutsutaan huuhteluksi. Yleisesti käytetyssä syrjäyttävässä huuhtelussa juurikaasu työntää ilman edestään. Tällöin ilman ja juurikaasun sekoittuminen on pientä, mikä nopeuttaa huuhteluaikaa. Huuhteluaikaan vaikuttaa huuhdeltava tilavuus ja kaasun virtaus. (Amman 2012, s. 17.)

Huuhtelun aikainen kaasun virtausnopeus on suurempi noin 5-10 l/min. Hitsauksen aikana virtaus on pienempi noin 2-3 l/min. Tarkoitus on välttää juuren puolista painetta, jottei sula kohoa ja aiheuta hitsausvirheitä. Juurikaasu on hyödyllistä jättää virtaamaan hitsauksen jälkeen, kunnes pinnan lämpötila on alle 250 °C. (AGA 2016b, s. 11.)

Aikaisempien hitsauksien perusteella sisäsäiliön hitsauksessa on perusteltua käyttää juurikaasua paremman liitoksen aikaansaamiseksi. Mikäli painetestien aikana sisäsäiliössä havaitaan vuoto, on juurikaasun käyttö korjaustilanteessa ongelmallista konstruktion rakenteen vuoksi. Juuren puolelle sijoitettavan juurensuojalaitteen käyttö ei ole mahdollista säiliöiden välitilassa olevan eristeen vuoksi.

4.2 MIG-hitsaus pulssikaarella

MIG-hitsaus (Metal Inert Gas welding) eli metallikaasukaarihitsaus on yksi yleisemmistä hitsausmenetelmistä, jos yleisyyttä mitataan käytetyn lisäaineen määrän mukaan. Syynä voidaan pitää hyvää tuottavuutta ja korkeaa mekanisointi- ja automatisointiastetta. MIG-hitsauksen periaate voidaan nähdä kuvasta 6. Prosessissa suojakaasu ympäröi valokaarta, joka palaa sulavan lisäainelangan ja työkappaleen välissä. Sula metalli siirtyy langan kärjestä hitsisulaan pieninä sulapisaroina. Samalla langansyöttölaite syöttää lisää lisäainelankaa tasaisella nopeudella hitsauspistoolin lävitse aina valokaareen saakka. [Ionix 2017a; Korjala 2007, s. 16.)

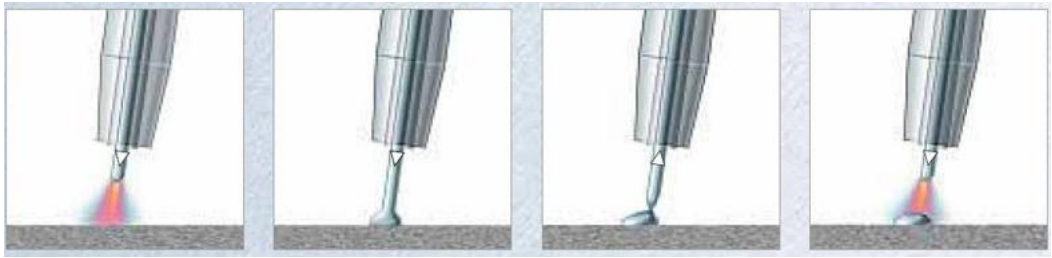


Kuva 6. MIG-hitsauksen periaate (Ionix 2017a).

Pulssihitsauksessa virtalähteen avulla kontrolloidaan virtapulsseja, joiden aikana lisäaineesta irtoaa sulapisaroita hitsauskaareen siten, että tapahtuma pysyy stabiilina ja roiskeettomana. Pulssitaajuus on yleensä 30 - 300 Hz. Yhden pulssin aikana kuuluu siirtyä vain yksi pisara lisäainetta. Toisin sanoen langansyöttönopeuden kasvaessa myös pulssitaajuus kasvaa. Pulssin aikainen virta on suurempi, mutta prosessin aikainen virran keskiarvo on kuitenkin pienempi verrattaessa perinteiseen kaasukaarihitsaukseen. Tämän ansiosta lämmöntuonti saadaan pidettyä pienempänä. (Esab 2000, s. 1,4.)

Froniuksen kehittämä CMT-menetelmä tulee englannin kielen sanoista cold metal transfer, kylmähitsaus. Tavalliseen MIG/MAG-hitsaukseen (Metal Active Gas welding) verrattuna

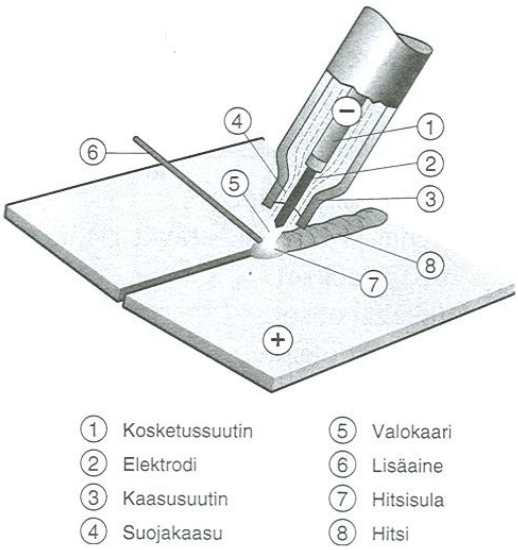
lämmöntuonti on pienempi ja lisäainelanka liikkuu edestakaisin. Kuvasta 7 nähdään CMT-menetelmän periaate sekä lisäainelangan syöttönopeuden ja –suunnan vaihtelu. Hitsaustapahtuma on nelivaiheinen. Aluksi lisäainelanka lähestyy hitsisulaa valokaaren palaessa. Langan koskettaessa hitsisulaa valokaari sammuu ja virta laskee. Samaan aikaan langansyöttösuunta käännetään taaksepäin, jolloin langan päästä irtoaa sulapisara. Pisaran irtoamisen jälkeen valokaari syttyy uudestaan ja lankaa syötetään kohti hitsisulaa. Tapahtumasarja toistuu noin 60 kertaa sekunnissa. Tämän ansiosta saadaan aikaan roiskeeton hitsausprosessi ja alhainen lämmöntuonti. (Fronius 2007, s. 3.)



Kuva 7. Froniuksen CMT-menetelmän hitsaustapahtuma ja aineensiirtyminen (Fronius 2007, s. 3).

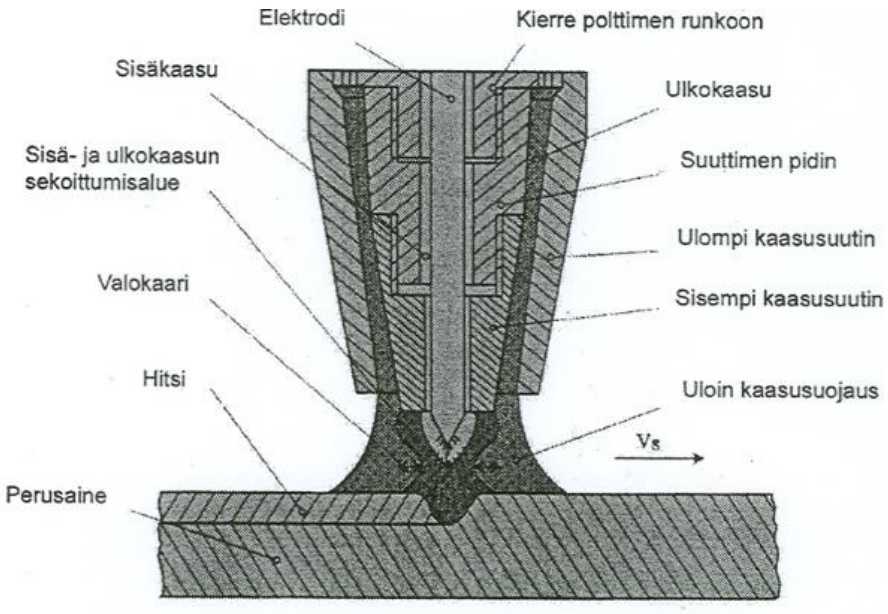
4.3 TIG- ja kaksoiskaasu-TIG-hitsaus

TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas welding) kuuluu kaasukaarihitsausprosesseihin, jossa valokaari palaa sulamattoman volframielektrodin ja työkappaleen välillä inertin suojakaasun ympäröimänä. Yleisesti käytettyjä suojakaasuja ovat argon, helium tai näiden seoskaasu. Suojakaasun tehtävä on suojata elektrodia hapettumiselta ja hitsisulaa sekä valokaarta niitä ympäröivältä ilmalta. Kuvassa 8 on esitetty TIG-hitsauksen periaate. Valokaaren lämpö sulattaa perusainetta, johon muodostuu hitsisula. Lisäaine syötetään suoraan hitsisulaan. TIG-hitsauksessa lisäaine tuodaan prosessiin erikseen, mikä mahdollistaa sulan ja tunkeuman hyvän hallittavuuden. (Korjala 2007, s. 27-28.)



Kuva 8. TIG-hitsauksen periaate (Korjala 2007, s. 28).

Kaksoiskaasuprosessin tarkoitus on lisätä perinteisen TIG-hitsauksen tuottavuutta mahdollistamalla suuremman hitsausnopeuden ja tunkeutumiskykyisemmän valokaaren. Kaksoiskaasu-TIG-hitsauksen toimintaperiaate on esitelty kuvassa 9. Prosessissa käytetään nimensä mukaisesti kahta eri suojakaasua: sisäkaasua, joka suojaa elektrodia ja mahdollistaa valokaaren tehokkaan ja rauhallisen palamisen, sekä ulkokaasua, joka suojaa valokaarta ilman vaikutuksilta. (Korjala 2007, s. 31.)



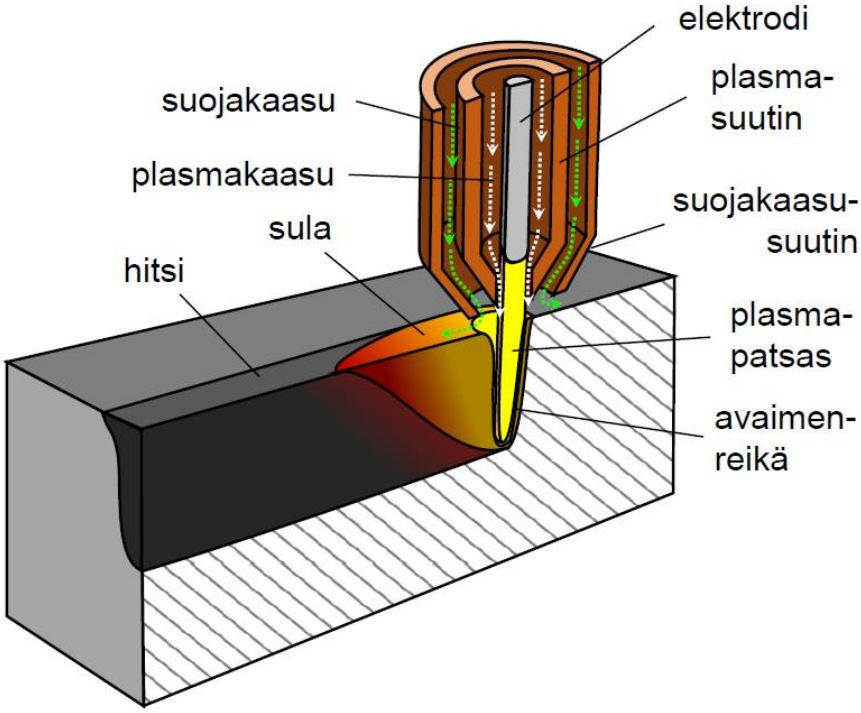
Kuva 9. Kaksoiskaasu-TIG-hitsauksen periaate (Korjala 2007, s. 32).

4.4 Plasmahitsaus

Hitsauslaitteistoon kuuluu virtalähde, hitsauspoltin, ohjausyksikkö, sytytyslaitteisto, jäähdytyslaite ja kaasunvirtauslaitteet. Virtalähde on tasasuuntaaja ja staattinen ominaiskäyrä on jyrkästi laskeva. Tällöin hitsausvirta pysyy vakiona jännitteen vaihtelusta huolimatta. Virtalähde muistuttaa paljon TIG-virtalähdettä, jota voidaankin käyttää plasmahitsaukseen. Mikäli halutaan käyttää lisäainetta, tarvitaan erillinen langansyöttölaite, joka syöttää hitsisulaan tavallisesti MIG/MAG-hitsauslankaa. (Lukkari 1997, s. 277-278; Ionix 2017b.)

Plasmahitsaus muistuttaa paljon TIG-hitsausta. Molemmissa valokaari palaa tyypillisesti sulamattoman volframielektrodin ja työkappaleen välillä, suojakaasun ympäröidessä valokaarta. Oleellisin ero prosessien välillä on valokaaren muoto, joka on plasmahitsauksessa kurotettu lähes sylinterimäiseksi ja TIG-hitsauksessa kartiomainen. Valokaaren muodon ansiosta plasmahitsaus on prosessina energiatiheä. Tämä mahdollistaa lävistävän hitsauksen, mikä ei ole mahdollista muilla kaasukaarihitsausprosesseilla. (Lukkari 1997, s. 272-273.)

Plasmahitsauspolttimessa on kaksi erillistä suutinta, plasma- ja suojakaasusuutin. Elektrodi sijaitsee plasmasuuttimen sisällä, jossa sitä ympäröi plasmakaasu, usein argon tai argon-seos. Kuvassa 10 on esitelty polttimen ja lävistävän plasmahitsauksen periaatetta. Plasmakaasun tehtävä on ionisoitua elektrodin ja työkappaleen välillä. Plasmasuuttimen seinämä kuitenkin jäähdyttää kaasun uloimman kerroksen, estäen lämpötilan nousun ja täten ionisoitumisen. Tämä ionisoitumaton kaasukerros, plasmakaasuvirtaus, toimii eristeenä plasman ja suuttimen välillä. Se ei kuitenkaan riitä suojelemaan hitsisulaa ympäröivältä ilmalta, lisäksi tarvitaan suojakaasua. Usein suojakaasu on käytännön syistä sama kaasu kuin plasmakaasu. Virtausmääriä verrattaessa suojakaasun virtaus on suurempi. (Lukkari 1997, s. 272-273; Ionix 2017b.)



Kuva 10. Lävistävän plasmahitsaus-prosessin periaate (Ionix 2017b).

Lisäaineen käyttö ei ole läheskään aina pakollista, mutta sen avulla voidaan kompensoida railonvalmistus- ja sovitusepätarkkuuksia. Lisäaine syötetään TIG-hitsauksen tapaan suoraan hitsisulaan. Lisäaineena toimii tavalliset tutut lisäainelangat, joita käytetään MIG/MAG- ja TIG-hitsauksessa (Ionix 2017b). Plasmahitsauksen etuja verrattaessa muihin kaasukaarihitsausprosesseihin ovat:

1) Elektrodi on suojassa plasmasuuttimen sisällä
2) Pienempi lämmöntuonti ja muodonmuutokset
3) Suurempi hitsausnopeus
4) Hitsin laatu ja ulkonäkö
5) Roiskeettomuus
6) Suuri tunkeuma (jopa yli 8 mm yhdellä hitsipalolla)
7) Vähemmän herkkä kaaren pituuden muutoksille.

(Ionix 2017b; Process welding systems 2009, s. 3-4.)

Etujen vastapainoksi plasmahitsauksen rajoituksiin voidaan laskea hitsausparametrien tarkkuutta vaativa säätäminen sekä suuret railonvalmistus- ja kappaleiden sovitustarkkuusvaatimukset. Lisäksi plasmahitsauksessa on suuremmat laiteinvestoinnit

kuin perinteisissä kaarihitsausprosesseissa. Taloudellinen käyttö vaatii usein suuren mekanisointi- tai automatisointiasteen. Plasmapoltin on monimutkaisempi ja vaatii usein vesijäähdytyksen. (Kapustka 2012, s. 38; Ionix 2017b.)

4.5 Tuottavuus ja taloudellisuus

Hitsauskustannuksien tiedostaminen on edellytys, jotta niitä voidaan hallita. Hitsauksen kokonaiskustannukset voidaan jakaa neljään osakustannukseen:

1) työkustannukset
2) hitsausainekustannukset: lisäaineet ja suojakaasut
3) konekustannukset: pääoma ja kunnossapito
4) energiakustannukset: hitsauskoneen kuluttama sähköenergia.

(Lukkari 2011a, s. 2.)

Näiden lisäksi hitsatun tuotteen kokonaiskustannuksiin kuuluvat mahdolliset esivalmistelut ja jälkikäsittelyt, kuten hitsausrailojen valmistus, raaka-aineen leikkaus ja lämpökäsittely. Hitsauskustannusten laskennassa voidaan käyttää apuna markkinoilta löytyviä tietokoneohjelmia. (Lukkari 2011a, s. 3-4.)

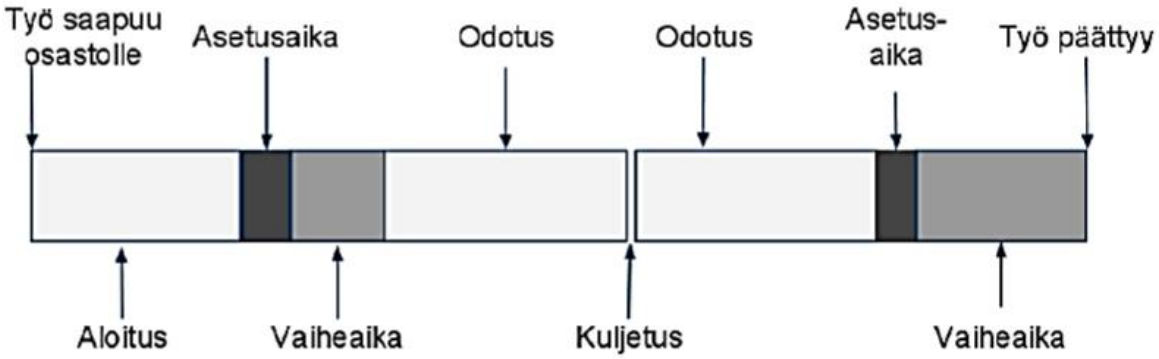
Yksi keino tuottavuuden parantamiseen on kustannusten alentaminen. Monissa sovelluksissa työkustannukset muodostavat suuren osan kokonaiskustannuksista. Tällöin työajan vähentäminen esimerkiksi valmiiksi esivalmistelluin kappalein tai suurentamalla hitsiaineentuottoa ja/tai kaariaikasuhdetta, parantaa tuottavuutta. Hitsiainemäärän pienentäminen nopeuttaa tuotteen valmistusaikaa ja säästää lisäainetta. Vaatimuksena on poikkipinta-alaltaan optimoitu railomuoto, oikean kokoinen a-mitta ja liitettävien osien tarkka sovitus, jolloin vältetään tarpeettoman suuret hitsit. Lisäksi mahdollisuuksien mukaan taivutettujen osien tai valmiiden profiilien käyttö hitsauksen sijaan. (Lukkari 2011a, s. 4.)

Hitsiaineentuoton suurentaminen tarkoittaa, että tuotetaan samassa aikayksikössä suurempi hitsiaineen määrä. Hitsiaineentuottoa voidaan parantaa valitsemalla tehokas hitsausprosessi ja –asento, suosimalla jalkoasentoa ja suurentamalla virtaa. Mahdollisuuksien mukaan mekanisointi, automatisointi ja usean hitsauspään käyttö parantavat hitsiaineentuottoa ja täten lyhentävät työaikaa ja parantavat tuottavuutta. (Lukkari 2011a, s. 4-5.)

Kaariaikasuhdetta voidaan suurentaa vähentämällä sivuaikoja, näin tuottavuus paranee. Pyrkimyksenä on tehdä kerralla laadukasta ja virheetöntä hitsiä, jolloin jälkityön osuus on mahdollisimman pieni. Esimerkiksi roiskeiden vähentäminen valitsemalla työhön soveltuva hitsausprosessi ja siihen kunnolliset hitsausparametrit. Laitteiston säännöllinen huolto, jotta se on pääsääntöisesti käyttövalmis. Kunnollisien kappaleenkäsittelylaitteiden käyttäminen, jotta luoksepäästävyys hitsaukselle paranee. (Lukkari 2011a, s 6.)

Suunnitteluvaiheessa määräytyy jopa yli 70 % hitsattujen rakenteiden kustannuksista. Tärkeimpänä voidaan mainita materiaalin valinta, mikä määrittelee esimerkiksi käytetyn materiaalin paksuuden ja siten painon, tarvittavan hitsiainemäärän ja mahdolliset esi- tai jälkikäsittelyt. Optimoimalla rakenne ja sen liitokset voidaan saavuttaa paino- ja kustannussäästöjä. (Lukkari 2011a, s. 7-8.)

Läpimenoajalla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu tuotteen valmistamiseen. Hitsauksen osalta läpimenoaikaa voidaan lyhentää suunnittelemalla tuote niin, että siinä hyödynnetään toistuvuutta eikä sen asentoa tarvitse muuttaa useasti työvaiheen aikana. Yleisesti ottaen työvaiheiden määrä on syytä minimoida, jotta asetus- ja odotusajat ovat lyhyitä ja vaiheajan osuus suuri. Kuvassa 11 on esitetty teoreettinen läpimenoaika. (Piiroinen 2013, s. 16.)



Kuva 11. Työvaiheiden vaikutus läpimenoaikaan (Piiroinen 2013 s. 16).

5 LAADUNVARMISTUS

Standardien SFS-EN ISO (Suomen standardisoimisliitto, eurooppalainen standardi ja kansainvälinen standardi) 9001 (Laadunhallintajärjestelmän vaatimukset) ja SFS-EN ISO 3834-2 (Metallien sulahitsauksen kattavat laatuvaatimukset) perusteella voidaan luoda laatujärjestelmä. Tämän avulla tuotteelle ja toiminnalle annetaan edellytykset täyttää niille asetetut laatukriteerit ja tyydyttää asiakastarpeet. Standardien tarkoitus on toimia työkaluina järjestelmän luomista varten.

5.1 Laadunhallintajärjestelmä (QMS)

Laadunhallintajärjestelmällä tarkoitetaan laatuun liittyvää hallintajärjestelmää, joka on osa organisaation johtamisjärjestelmää. Keskeisiä asioita ovat asiakastarpeiden ymmärtäminen ja sitä kautta yrityksen tekemisen ohjaaminen oikeaan suuntaan. Laatutavoitteet saavutetaan koordinoiduilla toimenpiteillä ja prosesseilla, joiden avulla organisaatiota ja sen toimintaa ohjataan. (SFS 2016, s. 10-12.)

Yhtiön tulevaa tuotantoa ja toimintaa varten luodaan sertifioitu laadunhallintajärjestelmä ISO 9001:2015 standardin pohjalta. Hitsaus ostetaan proto- ja pilottisäiliöihin alihankintana, joten standardin 3834-2 sisällyttäminen ja sertifiointi tapahtuvat vasta pilottivaiheen jälkeen. Näiden lisäksi myöhemmin tullaan sertifioimaan EN ISO 14001 ympäristöjärjestelmä ja EN OHSAS 18001 työterveys- ja työturvallisuusjärjestelmät. Uudistuneen standardin ISO 9001:2015 tärkeitä asioita yhtiön laadunhallintajärjestelmään ovat organisaation ja sen toimintaympäristön ymmärtäminen, sidosryhmien tarpeiden ja odotusten ymmärtäminen sekä jatkuva parantaminen ja mahdollisuuksien käsittely.

Sisäsäiliötä valmistavalta alihankkijalta edellytetään standardin 3834-2 sertifikaattia. Lisäksi LNGTainerille jää oikeus valmistuksessa käytettävään dataan, kuten esimerkiksi alustavaan hitsausohjeeseen (pWPS).

5.2 SFS-EN ISO 3834 Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset

Standardisarjassa SFS-EN ISO 3834 esitetään metallien sulahitsauksen kolme eri tasoista laatuvaatimusta:

1) EN ISO 3834-2 Kattavat laatuvaatimukset

2) EN ISO 3834-3 Vakiolaatuvaatimukset
3) EN ISO 3834-4 Peruslaatuvaatimukset

Taulukossa 1 on esitetty vaatimukset eri laatuvaatimustasoille. LNG-kontti luokitellaan paineastiaksi, minkä vuoksi on perusteltua käyttää standardin SFS-EN ISO 3834-2:2006 kattavia laatuvaatimuksia.

Taulukko 1. Standardin SFS-EN ISO 3834-1 esittämät vaatimukset eri laatuvaatimustasoille (SFS-EN ISO 3834-1 2006, s.14).

Nro.	Kohde	ISO 3834-2	ISO 3834-3	ISO 3834-4
1	Vaatimusten katselmus	Katselmus vaaditaan		
		Pöytäkirja vaaditaan	Pöytäkirja saatetaan vaatia	Pöytäkirjaa ei vaadita
2	Tekninen katselmus	Katselmus vaaditaan		
		Pöytäkirja vaaditaan	Pöytäkirja saatetaan vaatia	Pöytäkirjaa ei vaadita
3	Alihankinta	Käsitellään kuten valmistaja tietylle alihankitulle tuotteelle, palvelulle ja/tai toiminnalle. Lopullinen vastuu jää kuitenkin valmistajalle.		
4	Hitsaajat ja hitsausoperaattorit	Pätevöintiä vaaditaan		
5	Hitsauskoordinoija	Vaaditaan		Ei erityisiä vaatimuksia
6	Tarkastushenkilöstö	Pätevöintiä vaaditaan		
7	Tuotanto- ja testauskalusto	Sopivaa ja käytettävissä vaatimusten mukaisesti esivalmistukselle, prosessin toteuttamiselle, testaukselle, kuljetukselle ja nostotehtäville yhdessä turvalaitteiden ja suojavaatetusten kanssa		
8	Laitteiden huolto	Vaaditaan tuotteen vaatimustenmukaisuuden saavuttamiseksi ja ylläpitoon		Ei erityisiä vaatimuksia
		Dokumentoidut suunnitelmat ja raportteja vaaditaan	Raportteja suositellaan	

Taulukko 1 jatkuu. Standardin SFS-EN ISO 3834-1 esittämät vaatimukset eri laatuvaatimustasoille (SFS-EN ISO 3834-1 2006, s.14).

<table>
<tr><td>9</td><td>Laitteiden kuvaus</td><td colspan="2">Luettelo vaaditaan</td><td>Ei erityisiä vaatimuksia</td></tr>
<tr><td rowspan="2">10</td><td rowspan="2">Tuotantosuunnitelma</td><td colspan="2">Vaaditaan</td><td>Ei erityisiä vaatimuksia</td></tr>
<tr><td>Dokumentoidut suunnitelmat ja raportteja vaaditaan</td><td>Raportteja suositellaan</td><td>Ei erityisiä vaatimuksia</td></tr>
<tr><td>11</td><td>Hitsausohjeet (WPS)</td><td colspan="2">Vaaditaan</td><td>Ei erityisiä vaatimuksia</td></tr>
<tr><td>12</td><td>Hitsausohjeiden hyväksyntä</td><td colspan="2">Vaaditaan</td><td>Ei erityisiä vaatimuksia</td></tr>
<tr><td>13</td><td>Hitsausaineiden eräkohtainen testaus</td><td>Jos vaaditaan</td><td colspan="2">Ei erityisiä vaatimuksia</td></tr>
<tr><td>14</td><td>Hitsausaineiden varastointi ja käsittely</td><td colspan="2">Vaaditaan lisäainetoimittajien suositusten mukaiset menettelyt</td><td>Lisäainetoimit-tajan suositusten mukaisesti</td></tr>
<tr><td>15</td><td>Perusaineiden varastointi</td><td colspan="2">Vaaditaan suojausta ympäristön vaikutukselta, tunnistettavuuden tulee säilyä varastoinnin aikana</td><td>Ei erityisiä vaatimuksia</td></tr>
<tr><td rowspan="2">16</td><td rowspan="2">Hitsauksen jälkilämpökäsittely</td><td colspan="2">Varmistetaan, että tuotestandardin tai spesifikaation vaatimukset on täytetty</td><td rowspan="2">Ei erityisiä vaatimuksia</td></tr>
<tr><td>Vaaditaan ohje ja pöytäkirja sekä pöytäkirjan jäljitettävyys tuotteeseen</td><td>Vaaditaan ohje ja pöytäkirja</td></tr>
<tr><td>17</td><td>Tarkastus ja testaus ennen hitsausta, hitsauksen aikana ja hitsauksen jälkeen</td><td colspan="2">Vaaditaan</td><td>Jos vaaditaan</td></tr>
<tr><td rowspan="2">18</td><td rowspan="2">Poikkeamat ja korjaavat toimenpiteet</td><td colspan="2">Ohjaustoimenpiteitä sovelletaan</td><td rowspan="2">Ohjaustoimen-piteitä sovelletaan</td></tr>
<tr><td colspan="2">Vaaditaan menettelyohjeita korjaukseen ja/tai oikaisemiseen</td></tr>
</table>

Taulukko 1 jatkuu. Standardin SFS-EN ISO 3834-1 esittämät vaatimukset eri laatuvaatimustasoille (SFS-EN ISO 3834-1 2006, s.14).

19	Mittaus- ja testauslaitteiden kalibrointi tai kelpuutus	Vaaditaan	Jos vaaditaan	Ei erityisiä vaatimuksia
20	Tuotannonaikainen tunnistus	Jos vaaditaan		Ei erityisiä vaatimuksia
21	Jäljitettävyys	Jos vaaditaan		Ei erityisiä vaatimuksia
22	Laatuasiakirjat	Jos vaaditaan		

Hitsaus luokitellaan standardin ISO 9000 mukaan erityisprosessiksi. Tämä tarkoittaa, että hitsaus vaatii jatkuvaa tarkkailua ja dokumentoitujen toimintaohjeiden, kuten WPS, noudattamista. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry 2008c, s. 1.)

LNGTainerille oleellisia laatuvaatimuksia sisäsäiliön osalta ovat (SFS-EN ISO 3834-2 2006, s. 6-22.):

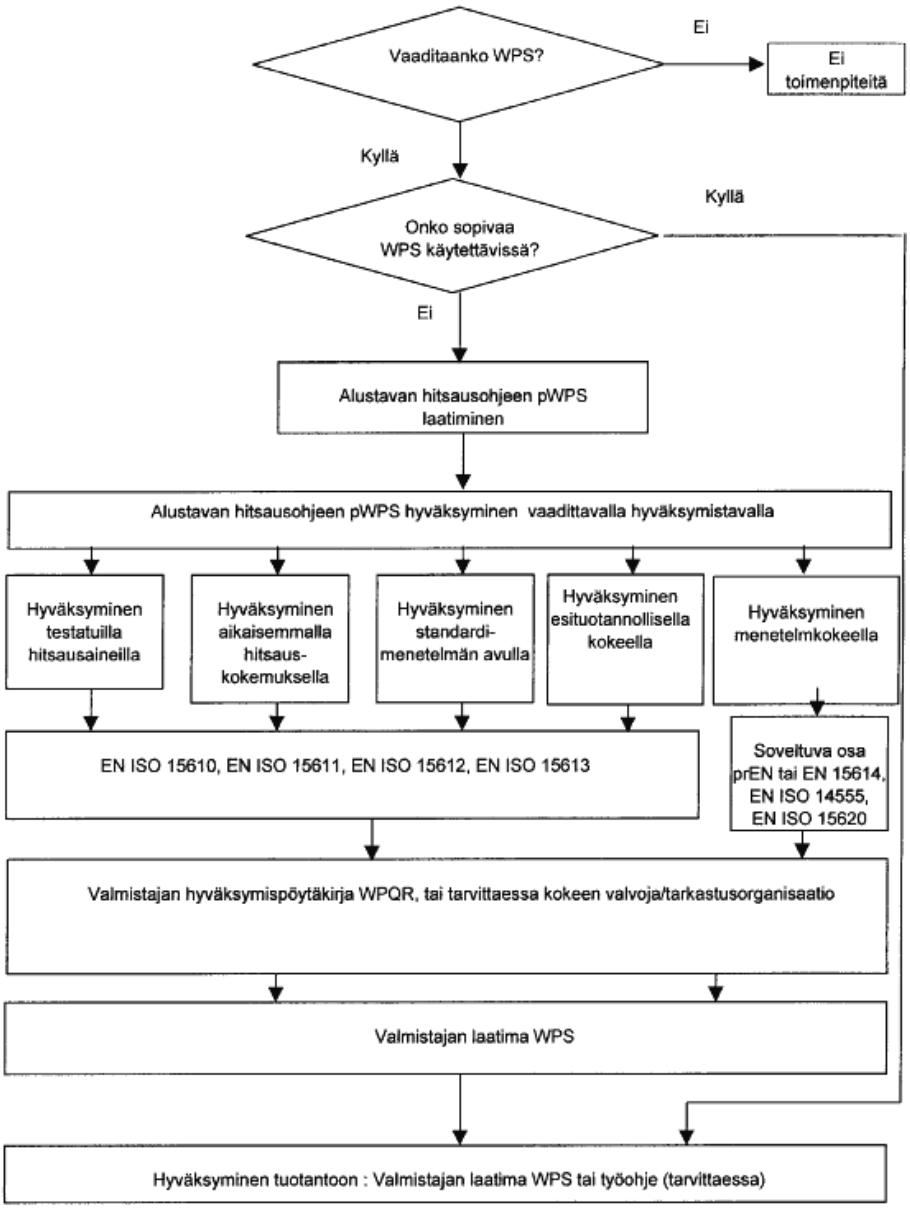
1) Vaatimusten katselmus, jossa sovitaan etukäteen käytettävä tuotestandardi, lakisääteiset vaatimukset ja viranomaisvaatimukset, sekä valmistajan kyky täyttää edellä mainitut vaatimukset.
2) Tekninen katselmus, jossa kartoitetaan hitsausohjeiden tarpeellisuus ja hyväksymistapa, tarkastus- ja testausmenetelmät sekä niiden laajuus, hitsausjärjestys, hitsiluokat ja hyväksymisrajat.
3) Alihankinta, varmistuttava alihankkijan kyvyistä täyttää vaaditut laatuvaatimukset.
4) Hitsaushenkilöstön voimassa olevat pätevyydet, hitsaajilla EN ISO 9606 ja hitsauskoordinoijilla EN 14731 mukainen.
5) Tarkastus- ja testaushenkilöstöllä EN ISO 9712 mukainen pätevyys.
6) Laitteiden sopivuus käyttötarkoitukseen ja niiden oikeaoppinen kunnossapito ja huolto.
7) Tuotantosuunnitelma ja EN ISO 15609-1 mukaiset hitsausohjeet, joista käy ilmi tuotteen yksityiskohtainen valmistus, kuten työvaiheiden tunnistus ja suoritusjärjestys.
8) Hitsausaineiden ja perusaineen varastointi toimittajien antamien vaatimusten mukaisesti niin, että materiaali ei vahingoitu ja tunnistettavuus säilyy.

9) Tarkastus ja testaus, ennen hitsausta, sen aikana ja sen jälkeen. Hitsaajien pätevyydet, hitsausohjeiden ymmärtäminen ja soveltuvuus, olennaiset hitsausparametrit, silmämääräinen tarkastus, annettujen hyväksymiskriteerien täyttyminen ja sopiva merkintätapa.
10) Poikkeamat ja korjaavat toimenpiteet.
11) Mittaus-, tarkastus- ja testauslaitteiden kalibrointi ja kelpuutus ovat valmistajan vastuulla. Suoritettava laitteille, joita käytetään tuotteen laadun arvioimiseen.
12) Tunnistettavuus ja jäljitettävyys kohdistetaan perusaineeseen, hitsin valmistukseen ja sijaintiin rakenteessa sekä tarkastajiin.
13) Laatuasiakirjojen säilytys vähintään 5 vuotta, materiaalitodistukset, hitsausainetodistukset, hitsausohjeet ja niiden hyväksymispöytäkirjat, huoltoraportit, pätevyystodistukset, tuotantosuunnitelma, mittauspöytäkirjat ja mahdolliset poikkeamaraportit.

5.3 Hitsausohje (WPS)

Hitsausohjeella (WPS, Welding Procedure Specification) tarkoitetaan asiakirjaa, jossa esitetään tietyn hitsaussovelluksen muuttujat toistettavuuden varmistamiseksi. Kyseisiä muuttujia ovat muun muassa hitsausparametrit, -asento, -prosessi, railomuoto jne. Hitsausohjeen avulla varmistetaan hitsauksen oikeanlainen suoritus. Näin voidaan varmistaa, että hitsille asetetut laatuvaatimukset täyttyvät. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry 2008a, s. 1.)

Standardin EN ISO 3834-2 (2006) mukaan valmistaja laatii ja hyväksyttää hitsausohjeet ja varmistaa, että niitä käytetään oikein tuotannossa. Ennen tuotannon aloittamista alustavat hitsausohjeet on hyväksytettävä. Kuvassa 12 on esitetty kulkukaavio WPS:n hyväksymiseksi. Käytettyjä hyväksymistapoja ovat muun muassa menetelmäkoe, testatut hitsausaineet, aikaisempi hitsauskokemus, standardihitsausohje ja esituotannollinen koe. (SFS-EN ISO 15607 2004, s. 16.)



Kuva 12. Kulkukaavio hitsausohjeen (WPS) laatimiselle ja hyväksymiselle (SFS-EN ISO 15607 2004, s. 26).

Hitsiluokalla tarkoitetaan hitsin laadun kuvaamista tietyn hitsausvirheen tyypin, määrän ja koon mukaan. Hitsit jaetaan standardin SFS-EN ISO 5817 mukaan kolmeen eri hitsiluokkaan B, C ja D, joista B on laadukkain. Hitsiluokan valinta tehdään sovellusstandardin perusteella tai suunnittelijan, valmistajan ja käyttäjän määrityksen mukaan. (SFS-EN ISO 5817 2014, s. 12.)

Hitsiluokkaa valittaessa on tiedostettava yhteys valmistus- ja tarkastuskustannuksiin. Joskus onkin perusteltua käyttää eri hitsiluokkia saman tuotteen tai rakenneosan eri

hitsausliitoksille. Hitsausvirheiden havaitseminen ja määritys voi vaatia useamman rikkomattoman aineenkoetusmenetelmän käyttöä. Standardissa SFS-EN ISO 5817 annetaan tarkat raja-arvot hitsiluokkien sallimille hitsausvirheille. (METSTA 2016, s. 14-16.)

5.3.1 Lämmöntuonti Q

Lämmöntuonnilla (Q) tarkoitetaan hitsiin tuotua lämpömäärää pituusyksikköä kohti ja se ilmoitetaan yleensä yksikössä kJ/mm. Lämmöntuonti Q voidaan laskea seuraavasti (Lukkari 2007, s. 8.):

$$Lämmöntuonti\ Q = k\ x\ E = \frac{k\ x\ U\ x\ I\ x\ 10^{-3}}{v} \qquad (1)$$

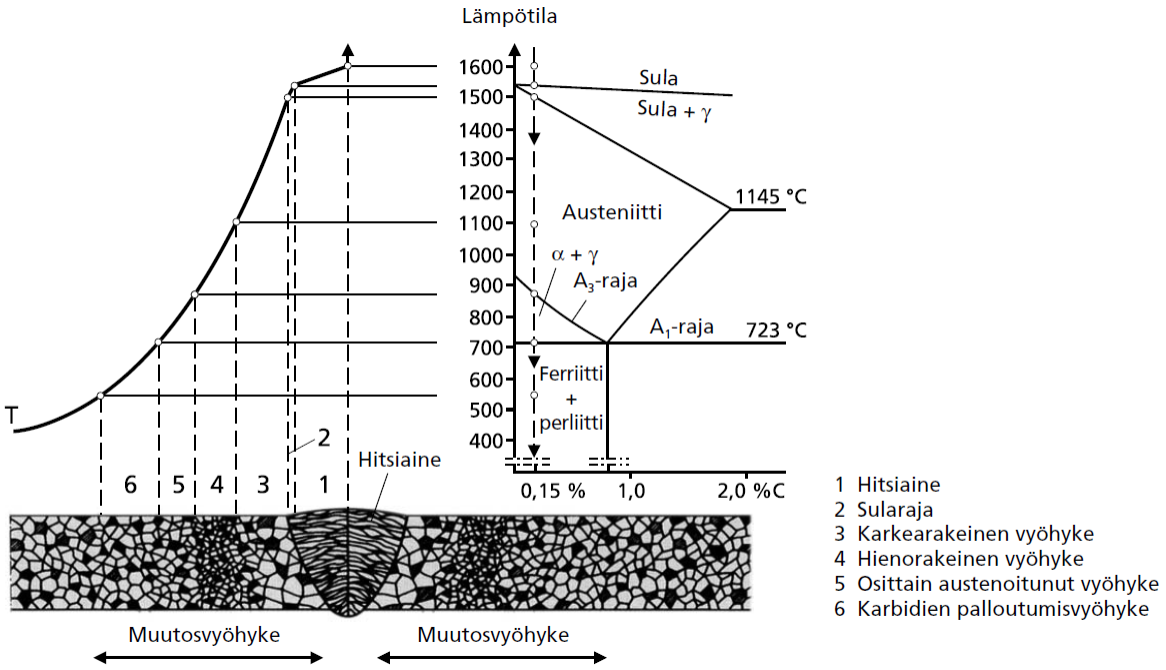
Yhtälössä 1 k on terminen hyötysuhde, E on hitsausenergia, U on kaarijännite [V], I on hitsausvirta [A] ja *v* on hitsausnopeus [mm/s].

Termisellä hyötysuhteella k kuvataan kuinka paljon hitsausenergiasta menee hitsattavaan kappaleeseen. K on suhteellinen arvo, suurin arvo on 1, jolloin hitsausprosessin aikana säteilemällä tapahtuva lämpöhäviö on pienin. Alla on luoteltuna termiset hyötysuhteet yleisille hitsausprosesseille:

1) Jauhekaarihitsaus 1
2) MIG/MAG- ja puikkohitsaus 0,8
3) TIG- ja plasmahitsaus 0,6

(Lukkari 2007, s. 8).

Lämmöntuonnilla ja jäähtymisajalla voidaan vaikuttaa hitsausliitoksen ja muutosvyöhykkeen kide- ja mikrorakenteeseen. Paksu materiaali jäähtyy nopeammin kuin ohut. Kuvassa 13 on kuvattu teräksen, jonka hiilipitoisuus on 0,15 %, hitsin eri vyöhykkeet. Aina ei ole mahdollista löytää kaikkia vyöhykkeitä. Lämmöntuontiin vaikuttaa kaavan 1 lisäksi myös perusaine ja sen paksuus sekä hitsausasento. (Ovako 2012, s. 4,6.)



Kuva 13. Hitsausliitoksen vyöhykkeet (Ovako 2012, s. 4).

Liiallisella lämmöntuonnilla on yhteys hitsausvirheisiin ja suuriin muodonmuutoksiin. Lisäksi suurentunut raekoko heikentää iskusitkeyttä. Tästä syystä suositellaan esikuumennuksen ja korotetun työlämpötilan käyttöä kovien ja hauraiden mikrorakenteiden välttämiseksi. Terästen valmistajat antavat usein ohjearvoja heidän materiaaliensa hitsaukseen ja lämmöntuontiin. (Ovako 2012, s. 9,16.)

5.4 Pätevyydet

Standardi SFS-EN ISO 3834-2 edellyttää, että valmistajalla on käytettävissä riittävä ja pätevä henkilöstö tuotannon suunnitteluun, suorittamiseen ja valvontaan. Henkilöstöllä tarkoitetaan hitsaajia, hitsausoperaattoreita ja hitsauskoordinoijia. Hitsaajien ja hitsausoperaattoreiden tulee olla pätevöitettyjä heille tarkoitettuun työhön. Pätevyys ja tietämys voidaan hankkia koulutuksen, harjoittelun ja tarkoituksenmukaisen kokemuksen kautta. Pätevyyden osoittamiseksi vaaditaan usein pätevyyskoe. Esimerkiksi kaasukaarihitsauksen pätevyyskokeessa pätevyysalueen muuttujia ovat (SFS-EN ISO 9606-1 2013, s. 22.):

1) Hitsausprosessi
2) Tuotemuoto (levy tai putki)
3) Hitsilaji (päittäishitsi, pienahitsi)
4) Lisäaineryhmä

5) Lisäainetyyppi
6) Mitat, ainevahvuus ja putken ulkohalkaisija
7) Hitsausasento
8) Hitsin yksityiskohdat (juuritukivariaatiot, vetävä tai työntävä hitsaus, palkokerrosten määrä, hitsaus yhdeltä tai molemmilta puolilta).

Tavallisesti pätevyyskoe antaa pätevyyden vain yhteen hitsausprosessiin. Suorittamalla yhdistelmäkokeen on mahdollista saada pätevyys kahdelle tai useammalle hitsausprosessille yhdellä hitsauskokeella. Hyväksytystä pätevyyskokeesta laaditaan pätevyystodistus, johon merkitään kaikki oleelliset muuttujat. (SFS-EN ISO 9606-1 2013, s. 22,56.)

Yleiset osaamisvaatimukset edellyttävät hitsauskoordinoijilta riittävää teknistä osaamista, jotta varmistutaan heidän soveltuvuudesta suoriutua tehtävistään. Vaaditun osaamisen laajuuden päättää valmistusorganisaatio, mihin vaikuttaa annettujen tehtävien vaativuus ja vastuu. Osaaminen voi koostua teoreettisesta tiedosta, koulutuksesta ja kokemuksesta. Lisäksi on olemassa erityiset osaamisvaatimukset vastuulliselle hitsauskoordinoijalle, jolta edellytetään tuotannon monimutkaisuudesta riippuen joko kattavaa, erityistä teknistä osaamista tai teknistä perusosaamista. (SFS-EN ISO 14731 2006, s. 12,14.)

Kansainvälisen hitsausjärjestön (IIW) suosituksien pohjalta on hitsauskoordinoijille laadittu eritasoisia koulutuksia, joita ovat kansainvälinen hitsausinsinööri (IWE), hitsausteknikko (IWT) ja hitsausneuvoja (IWS). Hitsauskoordinoijat, jotka täyttävät koulutuksien vähimmäisvaatimukset, ovat perustellusti pätevöitettyjä vastuullisiksi hitsauskoordinoijiksi. (SFS-EN ISO 14731 2006, s. 16.)

5.5 Ainetta rikkomaton tarkastus (NDT)

Ainetta rikkomaton tarkastus suoritetaan valmiille hitsille, jonka laatu halutaan varmistaa mahdollisista hitsausvirheistä. Tarkastuksesta käytetään lyhennettä NDT (Non-destructive testing). Yleisesti käytetyt tarkastusmenetelmät ja niiden lyhenteet on ilmoitettu taulukossa 2. NDT ei ole tae, etteikö hitsausvirheitä voi esiintyä, vaan niillä saadaan lisävarmuutta, että hitsin laatuvaatimukset ovat kunnossa. (METSTA 2016, s. 19; SFS-EN 12062 1998, s. 6.)

Taulukko 2. Ainetta rikkomattomat tarkastusmenetelmät ja niiden lyhenteet (SFS-EN ISO 9712 2012, s.18).

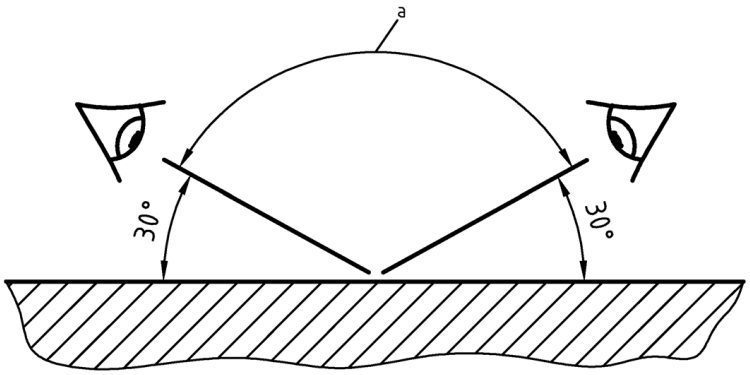
Tarkastusmenetelmä	Lyhenne
Pyörrevirtatarkastus	ET
Magneettijauhetarkastus	MT
Tunkeumanestetarkastus	PT
Radiografinen tarkastus	RT
Ultraäänitarkastus	UT
Silmämääräinen tarkastus	VT

Tarkastusmenetelmien valintaan vaikuttaa oletettujen hitsausvirheiden tyyppi ja sijainti, materiaali ja liitosmuoto. Esimerkiksi alle 8 mm päittäisliitetyn austeniittisen teräksen sisäisten virheiden tarkastukseen käytetään radiografista kuvausta ja pintavirheisiin yleisesti silmämääräistä ja tunkeumanestetarkastusta. (SFS-EN 12062 1998, s. 8.)

Tarkastuslaajuus sovitaan osapuolten kesken tai käytetään valitun menetelmän standardissa ilmoitettua laajuutta. Tarkastuksen suorittaa tuotannosta riippumaton tarkastusorganisaatio, jonka toiminta on laadunvalvontajärjestelmän mukaisesti valvottua. (SFS-EN 12062 1998, s. 6.)

5.5.1 Silmämääräinen tarkastus

Silmämääräinen tarkastus voidaan suorittaa, kun luoksepäästävyys ja valaistusvoimakkuus ovat vaaditulla tasolla. Suorassa tarkastuksessa ilman apuvälineitä on tarkastusetäisyys korkeintaan 600 mm ja katselukulma yli 30 ° tarkastettavasta pinnasta ja valovoimakkuus vähintään 350 lx. Tarkastus peilien tai kameroiden avulla on perusteltua, jos vaadittua luoksepäästävyyttä ei voida saavuttaa. Kuvassa 14 on havainnollistava kuva vaaditusta luoksepäästävyydestä silmämääräistä tarkastusta varten. (SFS-EN ISO 17637 2011, s. 8.)



Kuva 14. Vaadittu luoksepäästävyys silmämääräistä tarkastusta varten (SFS-EN ISO 17637 2011, s. 8).

Hitsien silmämääräinen tarkastus voidaan suorittaa ennen hitsausta, sen aikana tai valmiille hitsille, kun fyysinen luoksepäästävyys on mahdollista. Silmämääräisesti voidaan havaita pintavirheet, kuten esimerkiksi pintaan ulottuva halkeama tai ontelo, mutta ei sisäisiä virheitä. Ennen hitsausta tarkastetaan, että valmisteltu railo täyttää hitsausohjeessa määritellyt vaatimukset. Hitsauksen aikana jokainen palkokerros tarkastetaan ennen seuraavan palon hitsaamista. Valmiin hitsin tarkastusta varten hitsin pinta puhdistetaan kuonasta, jotta hitsausvirheitä ei jää peittoon kuonan alle. Tarkastetaan, että hitsin profiili, mitat, juuri ja pinnat ovat hyväksymisstandardissa määriteltyjen rajojen sisällä. (SFS-EN ISO 17637 2011, s. 10,12.)

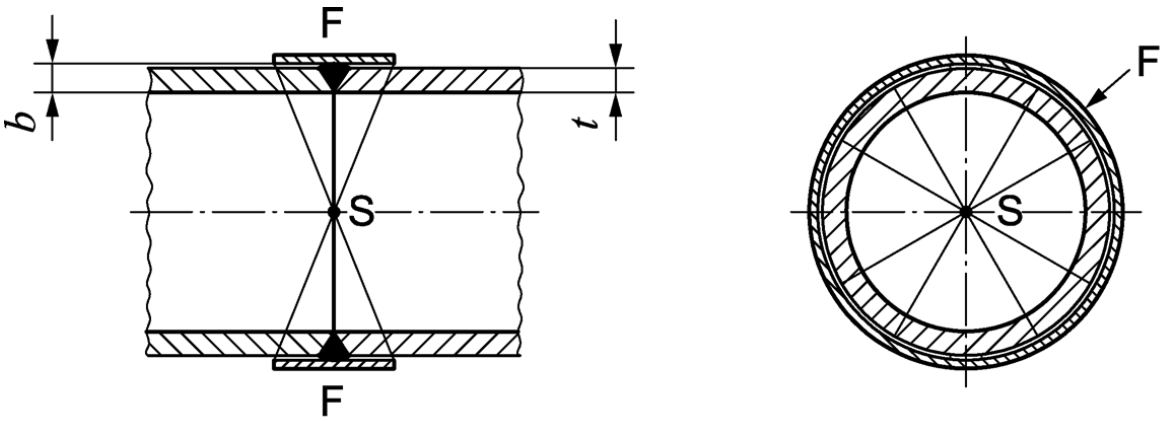
5.5.2 Radiografinen kuvaus (RT)

Radiografinen kuvaus (RT), yleisesti röntgenkuvaus, on yksi NDT-menetelmä eli ainetta rikkomaton tarkastusmenetelmä. Siinä kappaleeseen kohdistetaan ionisoivaa säteilyä ja kappaleen takana olevalle filmille tallentuu läpäisseen säteilyn voimakkuus. Enemmän säteilyä läpäisseet kohdat erottuvat filmistä tummina juovina. Filmejä voidaan verrata vertailukuvaston filmeihin. Menetelmällä havaitaan hyvin hitsin sisäisten kolmiulotteiset virheet, kuten huokoset, sulkeumat ja muotovirheet. Tasomaisten virheiden havaitseminen voi olla epävarmaa, riippuen niiden sijainnista röntgensäteen suuntaan. (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry 2008b, s. 5.)

Prototyypin hitseille suoritetaan täysi (100%) radiografinen kuvaus. Tarkoitus on kartoittaa omaa tietämystä ja varmistaa liitoksien laatu ennen vesipainetestejä. Kuvauksen suorittaa

sertifioitu kolmas osapuoli noudattaen standardin SFS-EN ISO 17636-1 ohjeita (SFS-EN ISO 17636-1 2013, s. 1-60).

Kuvassa 15 on esitelty keskeiskuvauksen periaate kaarevalle tarkastuskohteelle yhden seinämän läpi, S on säteilylähde ja F on filmi. Filmit asetetaan kehälle tarpeeksi limittäin, jotta koko alue tulee varmasti kuvatuksi. Sisäsäiliölle suoritettava radiografinen kuvaus hyödyntää keskeiskuvasta, näin voidaan nopeuttaa kuvaukseen kuluvaa aikaa. (SFS-EN ISO 17636-1 2013, s. 16.)



Kuva 15. Keskeiskuvaus kaarevalle tarkastuskohteelle yhden seinämän läpi (SFS-EN ISO 17636-1 2013, s. 22).

Röntgenkuvaus voidaan suorittaa myös digitekniikalla. Tällöin filmin sijaan käytetään fosforilevyä, joka toimii detektorina. Fosforilevy toimii fotostimuloivana valoaineena, josta voidaan päätellä absorboituneen säteilyn määrä. Tulosten tarkasteluun tarvitaan digitaalinen detektorilaitteisto, joka muuttaa ionivoisan säteilyn analogisiksi signaaleiksi. Signaalit muutetaan digitaalisiksi ja siirretään tietokoneelle tarkastelua varten. Tietokoneella nähdään digitaalinen kuva, joka vastaa radiografisen energian jakaumaa. (SFS-EN ISO 17636-1 2013, s. 12.)

6 ALUSTAVAT HITSAUSKOKEET JA TUTKIMUKSET

Ennen LNG-kontin sisäsäiliön prototyypin hitsauksen aloitusta materiaalille suoritettiin hitsauskokeita. Kokeissa käytettiin Outokummun kehittämää Supra 316plus (EN 1.4420) terästä. Teräkseen seostettu typpi lisää materiaalin lujuutta kryogeenisessa lämpötilassa. Lopuksi verrattiin viittä eri koekappaletta, joista neljä oli hitsattu MIG:llä ja yksi TIG:llä. Hitsaukset suoritettiin kolmen eri tahon toimesta: Pohjolan Konepaja Froniuksen CMT-pulssi, Suisto Engineering automaatti-TIG ja EWM MIG-pulssi sekä SSV-Tanks Kempin MIG-pulssi.

Koekappaleista mitattiin ferriittipitoisuudet, valmistettiin hieet mikro- ja makrokuvia varten sekä valmistettiin koesauvat vetokoetta varten. Hietutkimus suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston metallurgian laboratoriossa, jossa koekappaleista valmistettiin hieet ja niistä otettiin tarvittavat kuvat. Vetokoe suoritettiin ja koesauvat valmistettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston tiloissa. Kokeiden tarkoitus oli auttaa hitsausmenetelmän ja hitsaava tahon valinnassa prototyyppiä varten.

6.1 Ferriittipitoisuusmittaukset

Kovuuskoetta ei vaadita standardin ISO 15614 mukaan, koska käytetty materiaali kuuluu austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin. Austeniittisuus varmennettiin mittaamalla koehitsien ferriittipitoisuudet, mitkä on ilmoitettu taulukossa 3. IIW:n suositus ferriittipitoisuudelle kryogeenisissa kohteissa on enintään 0,5 %. Suositellun rajan ylitys johtaa sitkeyden heikentymiseen. (Lukkari 2009, s. 22.)

Taulukko 3. Koekappaleiden ferriittipitoisuudet (Heikkinen 2016).

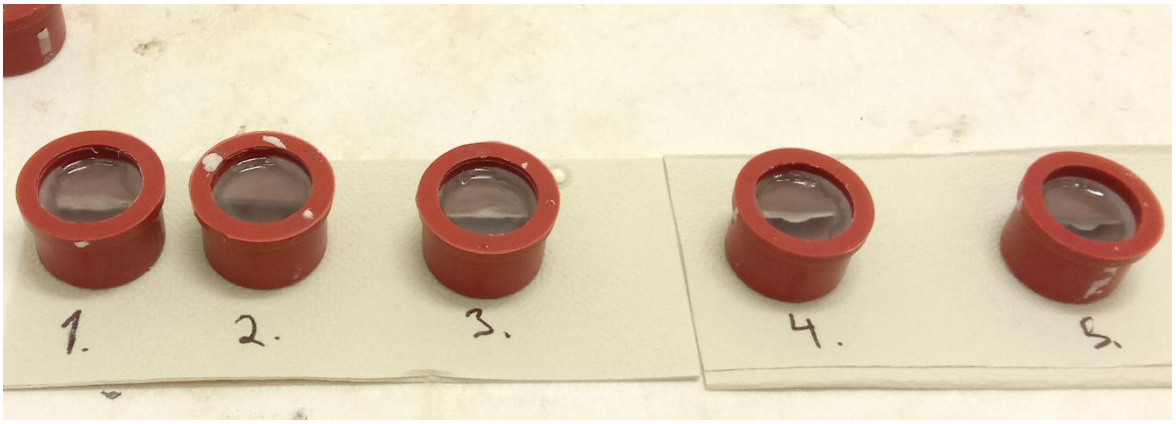
Koekappale [1-5]	Ferriittipitoisuus [%]
1. Fronius CMT-pulssi MIG	0.07
2. Polysoude PC automaatti pulssi-TIG	0.05
3. EWM pulssi-MIG	0.05
4. Kemppi pulssi-MIG lasikuitu juurituki	0.06
5. Kemppi pulssi-MIG kupari juurituki	0.05

Ferriittipitoisuuden mittaus voidaan suorittaa hyödyntäen ferriitin magneettisuutta, käyttämällä esimerkiksi Magne Cage tai Feritscope nimisiä laitteita. Laitteiden käyttö edellyttää tietyn kokoista tasopintaa ja kalibrointia varten kalibrointinäytteen, jonka ferriittipitoisuus tiedetään. (Lukkari 2009, s. 20.)

6.2 Makro- ja mikrorakennetutkimus

Koekappaleista valmisteltiin hieet, joista otettiin makro- ja mikrokuvat. Koekappaleiden kuvat ja niiden analysointi ovat nähtävissä kappaleessa 8.2. Makrokuvien avulla tarkasteltiin syntynyttä hitsiä ja mahdollisia hitsausvirheitä. Mikrokuvien avulla nähtiin hitsin, perusaineen ja muutosvyöhykkeen mikrorakenteet ja voitiin analysoida metallurgiaa.

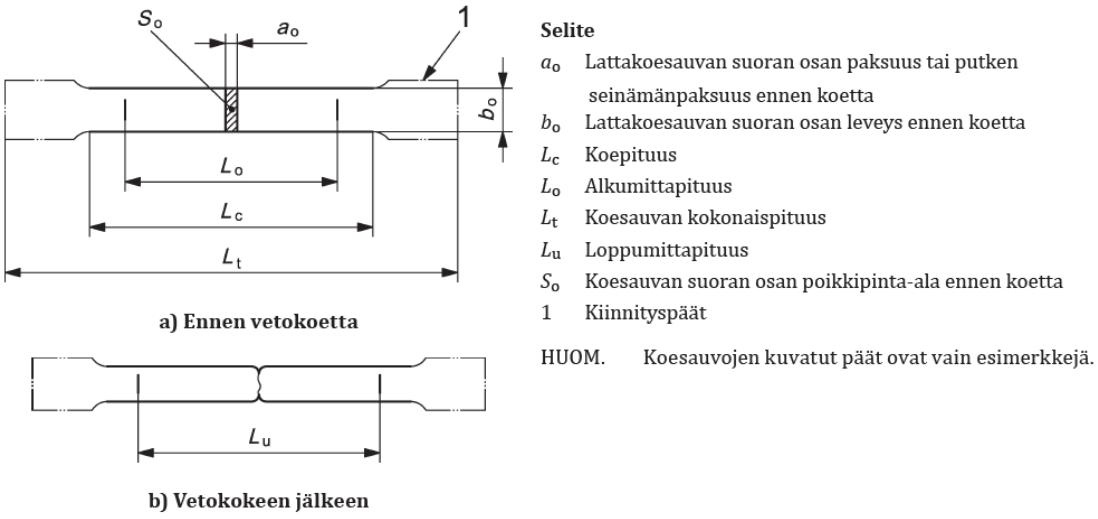
Hieet leikattiin koekappaleista siten, että keskelle jäi hitsi ja molemmille puolille perusainetta. Yksittäinen hie on noin 30 mm leveä ja 20 mm korkea. Kuvassa 16 nähdään koekappaleista leikatut hieet, jotka on upotettu hartsiseokseen pienen ainevahvuuden vuoksi. Koekappaleiden numerointi 1-5 on nähtävissä taulukossa 3 sivulla 40.



Kuva 16. Hartsiseokseen upotetut koekappaleista leikatut hieet kuivumassa.

6.3 Vetokokeet

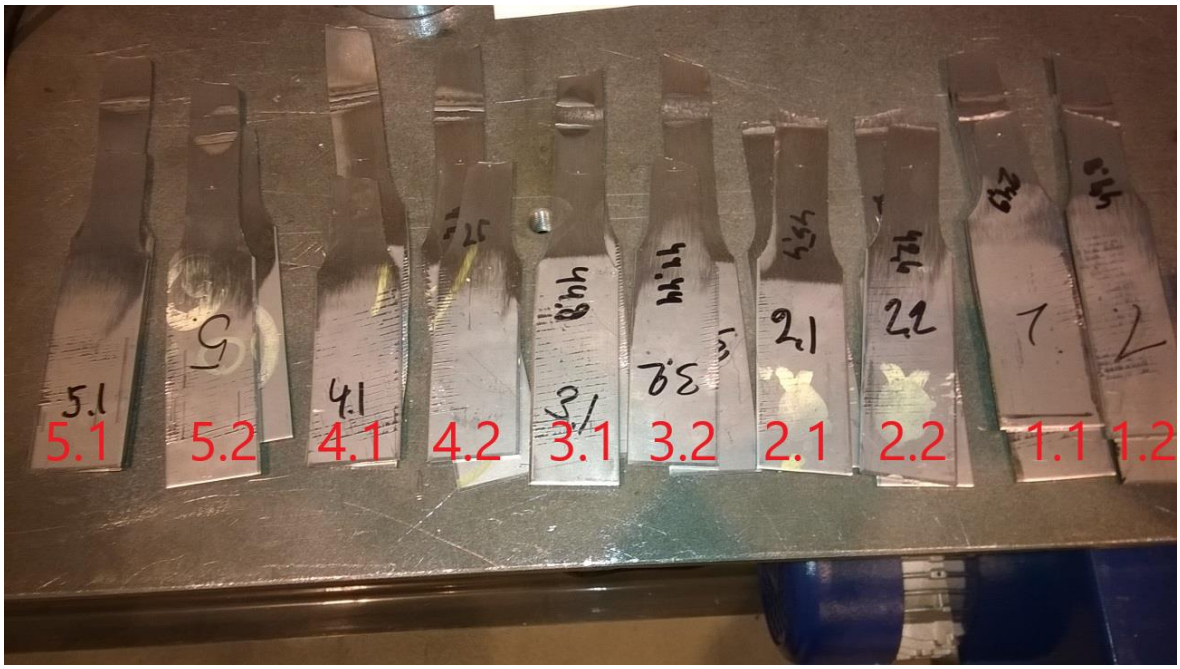
Koekappaleiden vetokoesauvat koneistettiin ja vetokoe suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston tiloissa. Jokaisesta koekappaleesta tehtiin kaksi vetokoesauvaa. Vetokoesauvat valmisteltiin ja vetokoe suoritettiin standardin SFS-EN ISO 6892-1 ohjeiden mukaan. Kuvassa 17 on esitetty teoreettinen kuva vetokoesauvasta ennen ja jälkeen kokeen.



Kuva 17. Vetokoesauva ennen ja jälkeen vetokokeen (SFS-EN ISO 6892-1 2016, s. 34).

Vetokokeessa koesauvaa vedetään yleensä huoneenlämmössä katkeamiseen asti. Huonelämpötilalla tarkoitetaan + 10 – + 35 °C. Valvotuissa olosuhteissa kokeet tehdään lämpötilassa + 23 °C ± 5 °C (SFS-EN ISO 6892-1 2016, s. 34).

Koekappaleiden numerointi on nähtävissä taulukossa 3 kappaleessa 6.1. Vetokoesauvat on esitetty vetokokeen jälkeen kuvassa 18. Molemmat koekappaleen 2 vetosauvat murtuivat hitsistä ja muut perusaineesta.



Kuva 18. Vetokoesauvat kokeen jälkeen (Hiltunen 2017).

Vetokokeiden tulokset ovat esitettynä taulukossa 4. Murtolujuutta verrattaessa koekappaleissa ei ole suurta eroavaisuutta. Pienin murtolujuus 671,3 MPa oli TIG:llä hitsatussa kappaleessa 2, joka murtui hitsistä. Suurin murtolujuus 744,6 MPa oli lasikuituista juuritukea vasten MIG:lla hitsatussa koekappaleessa 4. Limittäisliitos venyi huomattavasti enemmän kuin muut koekappaleet ennen murtumaa, jopa 71,2 %. MIG:llä hitsattujen muiden koekappaleiden keskimääräinen venymä on noin 39 % ja TIG:llä hitsatun venymä on noin 25 %.

Taulukko 4. Vetokokeiden tulokset (Hiltunen 2017).

Koesauva Numero	Myötöraja $R_{p0.2}$ [N/mm^2]	Murtolujuus R_m [N/mm^2]	Murtovenymä A [%]	Murtuman sijainti
1.1	496,4	733,5	71,2	Perusaine
1.2	499,6	732,2	-	Perusaine
ka	498	732,9	71,2	
2.1	464,8	671,3	21,8	Hitsi
2.2	474,5	715,3	30,0	Hitsi
ka	469,6	693,3	25,9	
3.1	482,3	725,0	38,2	Perusaine
3.2	472,0	716,3	38,1	Perusaine
ka	477,2	720,7	38,1	
4.1	480,3	735,6	-	Perusaine
4.2	494,4	744,6	38,9	Perusaine
ka	487,4	740,1	38,9	
5.1	491,7	728,1	43,7	Perusaine
5.2	490,5	726,8	38,9	Perusaine
ka	491,1	727,4	41,3	

7 SISÄSÄILIÖ

Sisäsäiliö asennetaan vankemman paineastian sisään. Tässä tapauksessa paineastiana toimii 7 mm paksusta ruostumattomasta teräksestä AISI 304 valmistettu ulkosäiliö. Ulkosäiliön tarkoitus on kantaa paineen aiheuttamat kuormat ja toimia suojana heikommalle sisäsäiliölle. Ulkosäiliölle suoritetaan vesipainetarkastus 8 baarin asti ja hitsien radiografinen kuvaus. Säiliöiden välitila on eristetty ja vakumoitu paremman eristyskyvyn aikaansaamiseksi. Välitilan eriste ja vakuumi parantavat tankissa olevan LNG:n säilyntäaikaa.

Prototyypissä käytettävän teräksisen sisäsäiliön valmistaa Saarijärvellä toimiva SSV-Tanks. Perusteena valinnalle ovat mm. tuotantokapasiteetti, aikaisempi kokemus säiliöiden valmistuksesta ja mahdollisuus tukea tuotekehitystä.

7.1 Alumiininen sisäsäiliö

Tavoitteena on valmistaa kevyt säiliö, joka tukeutuu vankempaan paineastiana toimivaan ulkosäiliöön. Tällöin voidaan maksimoida sisäosan hyötytilavuus. Kevyt alumiininen sisäosa johtaa lämpöenergiaa paremmin kuin painavampi teräksinen. Täten sisäsäiliö jäähtyy nopeammin tankatessa ja LNG:tä kaasuuntuu prosessin aikana vähemmän. Näin voidaan nopeuttaa tankkausta ja pienentää tankkauksen aikana tapahtuvaa häviötä.

Alumiininen sisäsäiliö valmistettiin hitsaamalla 2 mm paksuista levyistä ja kahdesta 4 mm paksuista päätykupista. Materiaalina käytettiin alumiinia 5754 H22. H22 tarkoittaa muokkauslujitettua ja osittain hehkutettua toimitustilaa. Materiaalin valintaprosessi oli puutteellinen kiireen sekä muiden toimituslaatujen heikon saatavuuden vuoksi. Testien aikana toimitustila H22 osoittautui toimimattomaksi. Hitsauksen aikainen lämmöntuonti pehmensi perusainetta hitsin vierestä. Paineen nousun aikana pehmentynyt perusaine virui, kunnes siihen tuli reikä. Tämän vuoksi ulkopuolinen yritys suoritti pehmeäksihehkutuksen, jotta rakenteesta saatiin kauttaaltaan tasalaatuinen. Hehkutuksen jälkeinen toimitustila O mahdollisti sisäsäiliön paineen nousun aina 6 baarin asti.

Levyt taivutettiin ympyrälle ja silloitushitsattiin päädyistä. Taivutetut levyt hitsattiin toisiinsa kehähitsein. Säiliön vaipan osalta jokaisessa liitoksessa käytettiin juurikaasua. Toisen päätykupin hitsauksessa juurikaasun käyttö ei ollut mahdollista, sillä sisäsäiliössä ei

ollut valmistuksen aikana miesluukkua. Myöhemmin painetestien yhteydessä säiliöön valmistettiin erillinen miesluukku, josta säiliötä pääsi korjaushitsaamaan.

Testeissä huomattiin sen hetkisen alumiinisen sisäsäiliön toimimattomuus. Tämän takia seuraava sisäsäiliö valmistetaan vankemmaksi ja eristysratkaisua muutetaan. Tarkoitus on kasvattaa toiminnan turvamarginaalia ja valmistaa toimiva tuote, jota voidaan myöhemmin optimoida. Materiaalin vaihto alumiinista teräkseen kasvattaa sisäsäiliön massaa, mutta parantaa lujuutta ja helpottaa hitsausta.

7.2 Teräksinen sisäsäiliö

Teräksinen sisäsäiliö valmistetaan austeniittisesta ruostumattomasta teräksestä Supra 316plus EN 1.4420, mikä hyväksyttiin osaksi eurooppalaista standardia EN 10028-7 vuoden 2016 heinäkuussa (Outokumpu 2017). Valinta perustuu materiaalin hyvään lujuuteen käyttölämpötilassa, edellisen sisäsäiliön testituloksiin ja FEM-analyysiin (Finite Element Method). FEM-analyysissä tutkittiin materiaalin käyttäytymistä painevaihtelussa ja käyttölämpötila-alueella +50‑-162 °C. Taulukosta 5 nähdään Supra 316plus tavanomainen kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet. Typpi suosii vahvasti austeniittia ja parantaa lujuutta, etenkin kylmässä. Rikkipitoisuutta ei ole ilmoitettu, joten epäpuhtaus voidaan olettaa olemattoman pieneksi. Rikki heikentää korroosionkestävyyttä ja lisää kuumahalkeiluriskiä. (Lukkari 2011b, s. 4.)

Taulukko 5. Supra 316plus, tavanomainen kemiallinen koostumus prosentteina ja mekaaniset ominaisuudet (Muokattu lähteestä Outokumpu 2016, s. 9).

	C	Si	S	Cr	Ni	Mo	Mn	N	$R_{p\,0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
Supra 316plus	<0,03	0,45	-	20,30	8,60	0,70	1,80	0,20	350 *	650+*

*EN mukaiset minimiarvot

Outokummun suosituksien mukaisesti hitsauksessa käytetään nikkelipohjaista Avesta P12-0-Nb lisäainetta, johon on seostettu kromia ja molybdeenia. Lisäaine toimitetaan 1,0 mm paksuisena 15,0 kg kelana. Lisäaineen kemiallinen koostumus, myötöraja ja murtolujuus on ilmoitettu taulukossa 6. Lisäaineen perusainetta suuremmat kromi- ja nikkelipitoisuudet

estävät hitsin köyhtymistä. Nikkeli suosii austeniittia ja helpottaa austeniittisen liitoksen syntymistä. Lisäksi molybdeeni parantaa lujuutta ja pistekorroosiokestävyyttä. (Lukkari 2011b, s. 4.)

Taulukko 6. Avesta P12-0-Nb/EN ISO 18274 S Ni 6660 (NiCr22Mo10W3) lisäainelangan kemiallinen koostumus prosentteina, myötöraja ja murtolujuus (Muokattu lähteestä Voestalpine Böhler Welding Nordic AB materiaalitodistus 2016).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	W	Al	Nb	Fe
0,013	0,03	<0,1	0,005	0,001	22,3	10,16	63,8	2,93	0,20	0,06	0,31
$R_{p\,0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]										
420	700										

Päämitoiltaan sisäsäiliön halkaisija on 2286 mm, pituus 11 950 mm ja kokonaismassa 2250 kg, mikä on alle puolet verrattuna perinteisten LNG-konttien sisäosiin. Pienemmän päädyn halkaisija on 2180 mm ja siihen liitetään erillinen vahvikepanta lukituspaloja varten sekä kartio-osa, jolla se sovitetaan suurempaan lieriöosaan.

7.3 Lieriöosien valmistus

Segmenteistä koottavan prototyypin sisäsäiliön lieriöosan levyt leikkuutetaan kelasta ulkopuolisella toimijalla. Lieriöosa koostuu 9 segmentistä, joista yhden leveys 1155 mm. Leikatut levyt taivutetaan halutun säteen mukaan ympyrälle ja päät liitetään kiinni toisiinsa siltahitsein ennen varsinaista hitsausta. Ensimmäinen segmentti sovitetaan ja hitsataan kiinni päätyyn. Näin rakenteesta saadaan tarpeeksi tukeva ja seuraavien segmenttien hitsaus konstruktioon on helpompaa. Vaippalevyt hitsataan toisiinsa kehäliitoksin. Valmistuksen aikana lieriön pyöritys suoritetaan pyöritysrullan ja U-profiilisen tukiraudan avulla kuvan 19 mukaisesti.

Kuva 19. Sisäsäiliö pyöritysrullien päällä.

Lopullisena tavoitteena on ottaa käyttöön hitsauslinjasto, missä sisäsäiliön lieriöosa voidaan valmistaa spiraalihitsaamalla kelasta valmiiksi lieriöksi. Tällöin säästytään välityövaiheilta, joita segmenttipohjainen valmistus sisältää. Samalla nopeutetaan läpimenoaikaa, alennetaan kustannuksia ja vakioidaan hitsien laatua.

7.4 Päätyjen valmistus

Prototyypin päädyt valmistetaan segmenteistä, koska valmistusmateriaalista ei ole saatavilla tarpeeksi suurta yksittäistä aihiota. Kuvassa 20 on esitetty kolmesta palasta hitsattu päätyaihio ja kuvassa 21 sen muovausta painosorvaamalla. Tavoitteena on valmistaa pääty yhdestä aihiosta. Tällöin säästytään ylimääräisiltä työvaiheilta, kuten segmenttien leikkauksilta, hitsaukselta ja hitsien tarkastuksilta. Lisäksi yhdestä aihiosta valmistetun päädyn voidaan olettaa olevan kauttaaltaan tasaluja. Avattavan puolen päätyyn tehdään paikat kahdelle yhteelle, sekä lisätään vahvikepanta ja kartiokaulus, kuva 22, jonka avulla voidaan maksimoida tilavuutta ja ohittaa ulkosäiliössä oleva pulttikehä. Kiinteän puolen päätyyn tulee miesluukku, valmis miesluukku on esitetty kuvassa 23.

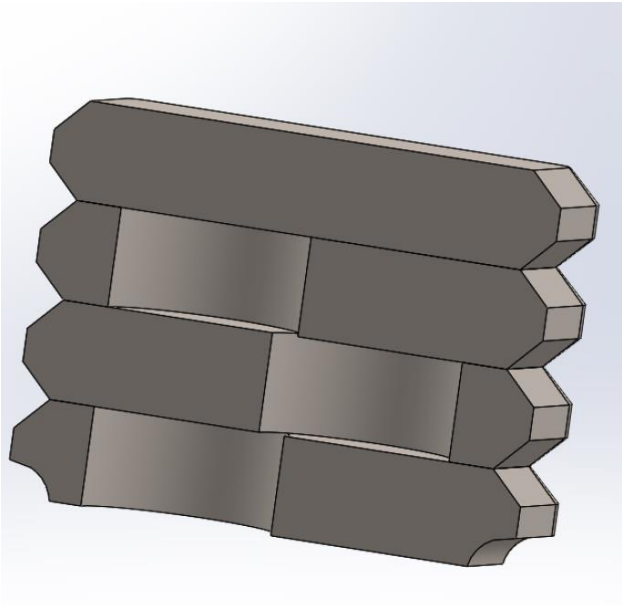
Kuva 20. Päätyaihio kahdella hitsillä ennen muovausta.

Kuva 21. Päätyaihion muovausta painosorvaamalla.

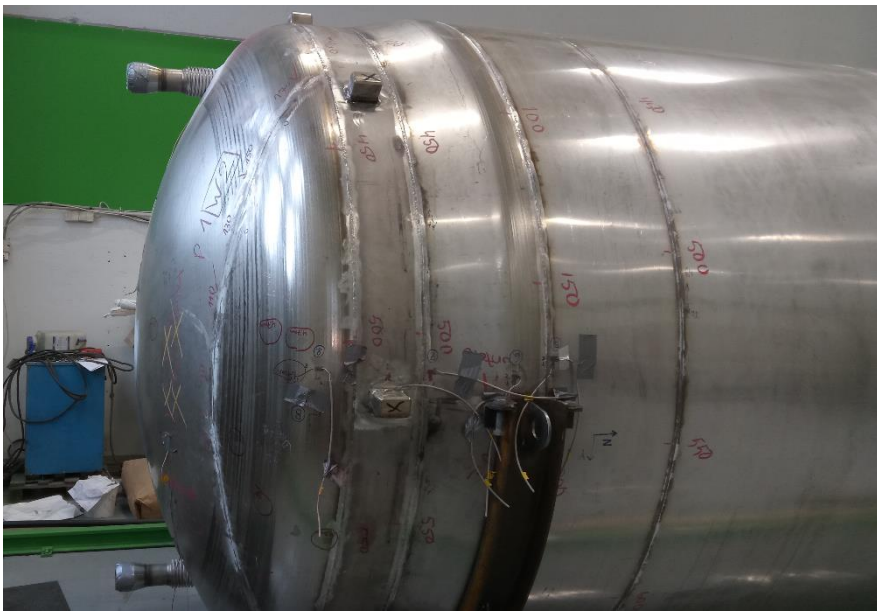
Kuva 22. Toiseen päätyyn liitettävä kartiokaulus.

Kuva 23. Miesluukku toisessa päädyssä.

Sisäsäiliöön avattavan päädyn puoleiseen vahvikepantaan hitsataan kahdeksan lukituspalaa. Lukituspalat valmistetaan neljästä 15 mm paksusta levystä tulppahitsaamalla, koska Supra 316plus materiaalista ei ole saatavilla 60 mm paksua levyä. Kuvassa 24 on poikkileikkauskuva lukituspalasta, missä nähdään levyjen viisteet ja tulppahitsauskohdat. Hitsauksen jälkeen lukituspalat koneistetaan, jotta palojen mitat ovat samat. Valmis pääty lieriöön kiinnitettynä on esitetty kuvassa 25.



Kuva 24. Poikkileikkauskuva tulppahitsattavasta lukituspalasta.



Kuva 25. Avattavan päädynpuoleinen sisäsäiliön pääty, jossa yhteet, vahvikepanta lukituspaloineen ja kartiokaulus.

8 TESTAUKSET, TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Sisäsäiliön hitsien tiiveys tarkastetaan tunkeumanesteellä sekä ilmatiiveys- tai vesipainekokeella ennen kuin se laitetaan ulkosäiliön sisään. Sisäsäiliölle tehdään painetestejä ilmalla ja vedellä sekä typpitesti, jossa ulko- ja sisäsäiliön välinen välitila alipaineistetaan vakuumipumpulla. Tarkoituksena on saada säiliö kestämään 6 baarin ylipaine ja välitilan noin 1 baarin alipaine.

8.1 Testaukset

LNG-kontin prototyypille suoritetaan joukko testejä ennen ja jälkeen kokoonpanon. Ulkosäiliön paineen kesto varmennetaan alihankkijalla paineistamalla se vedellä. Sisäsäiliön tiiveys varmennetaan ennen sen asennusta ulkosäiliön sisään. Teräksiselle sisäsäiliölle suoritetaan erillinen vesipainetesti, minkä yhteydessä seurataan säiliön venymistä venymäliuskojen avulla. Valmiille kokoonpanolle suoritetaan paine- ja kylmäainetestit. Paineistus tehdään ilmalla ja kylmäainetestissä säiliön sisäosa täytetään osittain nestemäisellä typellä, jolloin sisäsäiliö kylmenee noin -196 °C:seen.

8.1.1 Painetestit

Painetestissä sisäsäiliötä rasitettiin ylipaineella täyttämällä se ilmalla. Alumiininen sisäsäiliö ei kestä painetta ilman ulkosäiliön ja eristeen tukea, joten paineistus tehdään kokoonpanon jälkeen. Paineistus suoritetaan ilmalla testin nopeuttamisen ja eristeen suojaamisen vuoksi. Vedellä täyttö on ongelmallista, koska vuototilanteessa vesi pääsee säiliöiden välitilaan ja pilaa kastelemalla eristeen sekä pahvikennot. Lisäksi puutteellisen viemäröinnin vuoksi säiliön vesi pitäisi valuttaa pihalle.

Alumiininen sisäsäiliö ei kestänyt painetta toivotusti. Tämän takia sille suoritettiin lämpökäsittely, jonka tarkoitus oli lisätä alumiinin sitkeyttä ja tasata mekaanisia ominaisuuksia. Lämpökäsittelyn jälkeen alumiini oli pehmeämpää ja kesti paremmin muokkausta. Taulukkoon 7 on koottu alumiinisen sisäsäiliön painetestien loppupaineet sekä testiin kulunut aika. Lämpökäsittely suoritettiin painetestien 11 ja 12 välisenä aikana. Kahdessa viimeisessä painetestissä käytettiin suurempaa syöttöletkua, koska vuotokohdat hidastivat paineen nousua merkittävästi. Suuremmalla syöttöletkulla saavutettiin haluttu 6 baarin paine, mutta sisäsäiliössä oli silti vuotokohtia.

Taulukko 7. Painetestien tulokset alumiiniselle sisäsäiliölle.

Lukumäärä	Päivämäärä	Paine [bar]	Aika [min]	Kommentti
1	24.11.2015	1,8	139	Välitilassa alipaine
2	28.11.2015	1,6	71	
3	30.11.2015	1,7	125	
4	1.12.2015	2,2	152	
5	1.12.2015	2,4	153	
6	2.12.2015	2,8	94	
7	3.12.2015	1,5	93	Miesluukku rikki
8	3.12.2015	2,1	148	
9	4.12.2015	2,0	147	
10	5.12.2015	1,0	45	Miesluukku rikki
11	5.12.2015	2,5	110	Paineen pito 2,5 bar
12	11.12.2015	2,2	292	Sisätankin venytys pehmeäksihehkutuksen jälkeen
13	12.12.2015	3,0	204	
14	13.12.2015	3,3	192	
15	14.12.2015	3,9	254	
16	15.12.2015	5,0	279	
17	16.12.2015	5,3	320	
18	17.12.2015	6,0	193	Käytössä iso täyttöletku
19	18.12.2015	6,0	196	Käytössä iso täyttöletku

Painetestien jälkeen sisäsäiliöstä etsittiin ja paikattiin löydetyt vuotokohdat, lisäksi mitattiin sisäsäiliön sisämitat. Hitsien taakse asennetut lasikuitupalat mahdollistivat korjaushitsauksen ilman, että eristeen pahvikennot kärsivät liikaa. Korjaushitsien laatu ei kuitenkaan ollut tarpeeksi hyvä, syynä voidaan pitää epäedullisia hitsausolosuhteita. Korjaus tapahtui sisäsäiliön ollessa ulkosäiliön sisällä, minkä takia hitsin toista puolta ei voitu suojata juurikaasulla tai puhdistaa epäpuhtauksista.

8.1.2 Typpitestit

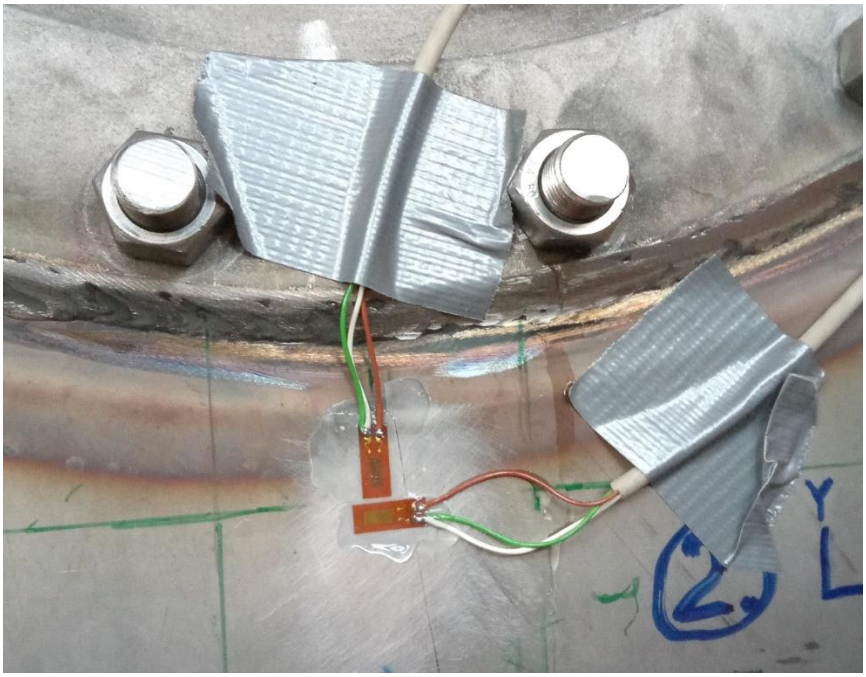
Typpitesti alumiinisella sisäsäiliöllä suoritettiin ulkona. Ennen typen laittoa välitila alipaineistettiin vakuumipumpulla. Vuotokohtien vuoksi sisäsäiliön sisään asennettiin ruostumattomasta teräksestä tehty 500x250x9000 mm laari. Nestemäinen typpi valutettiin laariin erillisestä typpikontista teräsletkulla LNG-kontin päädyssä olevan alayhteen kautta. Typpitestin tarkoituksena oli tiputtaa konstruktion lämpötila vastaamaan käyttölämpötilaa -162 °C ja havainnoida mahdollisia tapahtumia.

Testin aikana typpi jäähdytti säiliön nopeasti, mutta paineen nousua ei tapahtunut. Syynä voidaan pitää välitilan vakuumin ja eristeen toimivuutta, minkä takia typpi ei pääse kaasuuntumaan. Tämän jälkeen säiliö paineistettiin ilmalla aina 6 baariin asti.

8.1.3 Vesipainetestit

Teräksiselle sisäsäiliön prototyypille suoritettiin vesipainetesti ja venymämittaus yhdessä VTT:n kanssa. Testin tarkoitus oli varmistaa säiliön kestävyys ja todentaa FEM-analyysimallin oikeellisuus. Testiä varten sisäsäiliölle rakennettiin tukikaaret, jotta täytön ja testin aikainen lisääntynyt massa ei riko sisäsäiliötä.

Testissä sisäsäiliö täytettiin vedellä ja paineistettiin 7.2 baariin asti. Sisäsäiliöön kiinnitettiin 23 venymäliuska-anturia, joiden avulla tarkasteltiin säiliön mittamuutoksia. Kuvassa 26 näkyvät X- ja Y-suuntaiset venymäliuska-anturit kiinnitettyinä sisäsäiliön miesluukun puoleiseen päätyyn. Kuvassa 27 on vesipainetestin testijärjestelmä, jossa vesi ohjattiin säiliöön alayhteestä. Yläyhde oli auki, jotta säiliön sisällä oleva ilma pääsi työntymään pois veden edeltä.



Kuva 26. X- ja Y-suuntaiset venymäliuska-anturit säiliön miesluukun puoleisessa päädyssä.

Kuva 27. Sisäsäiliön vesipainetestijärjestely.

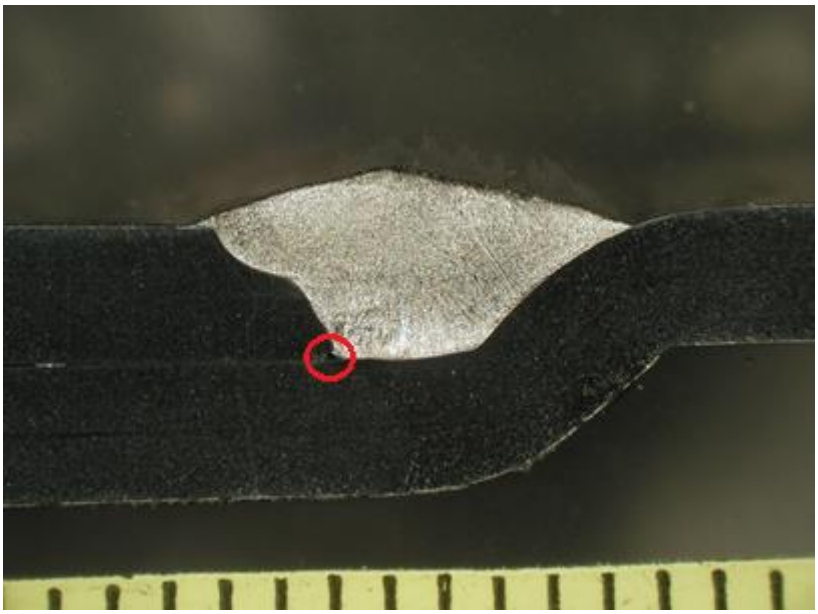
Testissä sisäsäiliö paineistettiin kolme kertaa. Ensin 7.2 baarin ja sen jälkeen kaksi kertaa 7.1 baarin ylipaineeseen. Kolmannen paineistuksen tarkoitus oli todentaa toisen paineistuksen arvot ensimmäisen ja toisen paineistuksen tuloksien eroavaisuuksien vuoksi. Eroa toisen ja kolmannen paineistuksien tuloksissa ei juuri ollut. Ensimmäisen ja toisen testin erot selittyvät ensimmäisen paineen nousun yhteydessä tapahtuvasta muokkauslujittumisesta.

Vesipainetestin yhteydessä suoritetun venymäliuskamittauksen tulokset mukailivat FEM-mallia, mutta niiden avulla mallia pystyttiin tarkentamaan entisestään. Suurin ero havaittiin päätyjen osalta, koska mallissa päädyt olivat tasapaksuja. Muovauksen aikana päädyn ainevahvuus pienenee, mitä ei ollut huomioitu alkuperäisessä FEM-mallissa. Testin jälkeen päädyn ainevahvuus tarkastettiin ultraäänimittauksella ja mallia päivitettiin.

8.2 Makro- ja mikrorakenteet

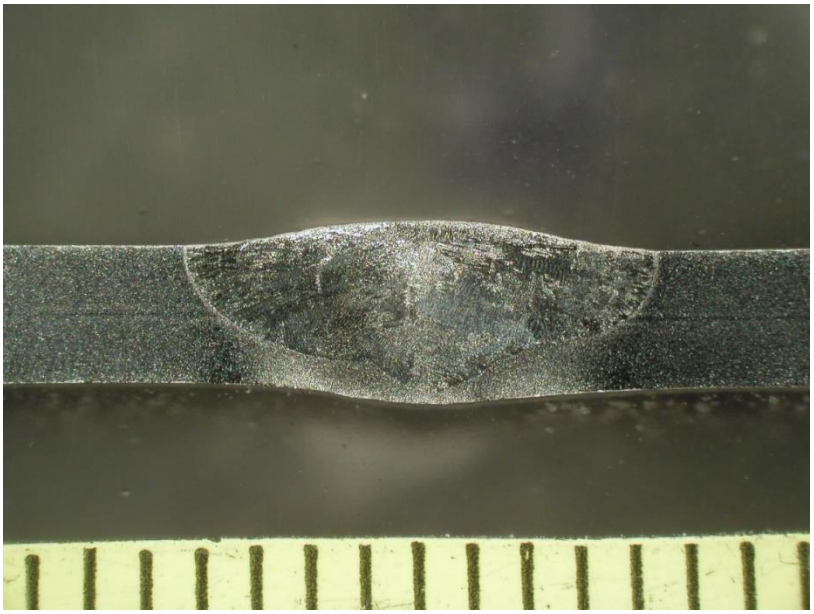
Tässä kappaleessa tarkastellaan koekappaleiden makro- ja mikrorakenteita hieistä otettujen valokuvien avulla. Kuvassa 28 on Froniuksella hitsattu limittäisliitos, jossa limitetyn levyn perusaine ei ole sulanut juuri ollenkaan ja hitsin vasemmassa alareunassa on onkalo, joka on

merkattu punaisella ympyrällä. Liitoksessa ei ole havaittavissa suuria muodonmuutoksia. Hitsauskokeiden aikana oli havaittavissa huono tunkeuma, mikä johtui puutteellisesta ohjelmakannasta. Levyn reunaa viistämällä ennen hitsausta on mahdollista päästä eroon hitsin vasemmassa alareunassa näkyvästä onkalosta.



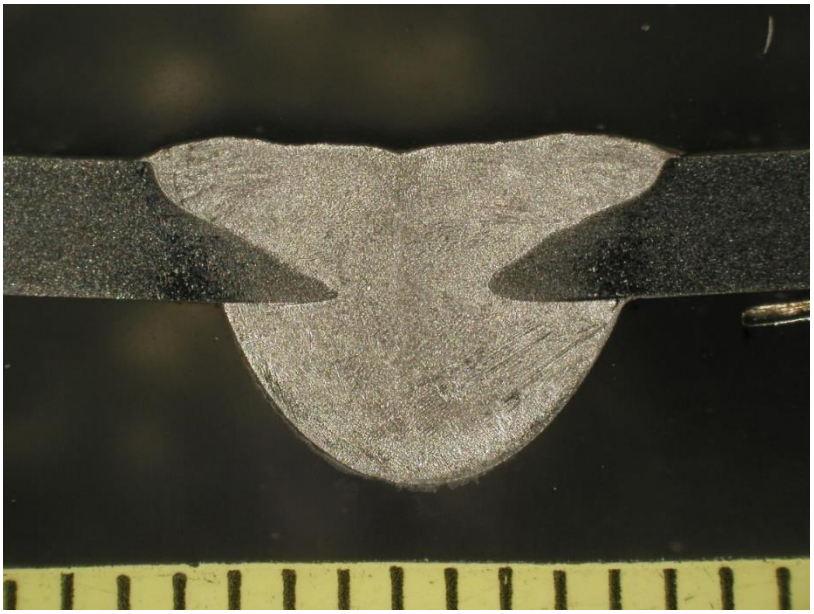
Kuva 28. Makrokuva Fronius CMT pulssi-MIG. Sulamaton onkalo hitsin vasemmassa alareunassa, alempi limitetty levy ei ole juurikaan sulanut. (Heikkinen 2016.)

Kuvassa 29 huomataan hitsausvirhe. Hitsi ei ole sulanut läpi, vaan tunkeuma on jäänyt vajaaksi. Saman koekappaleen vetokokeissa vetokoesauva meni rikki hitsistä eikä perusaineesta, toisin kuin muissa koekappaleissa. Hitsigeometria on syvyyden ja leveyden osalta hyvä. Levyissä ei ole huomattavissa vääntymiä, joten lämmöntuonti on pysynyt hyvällä tasolla.



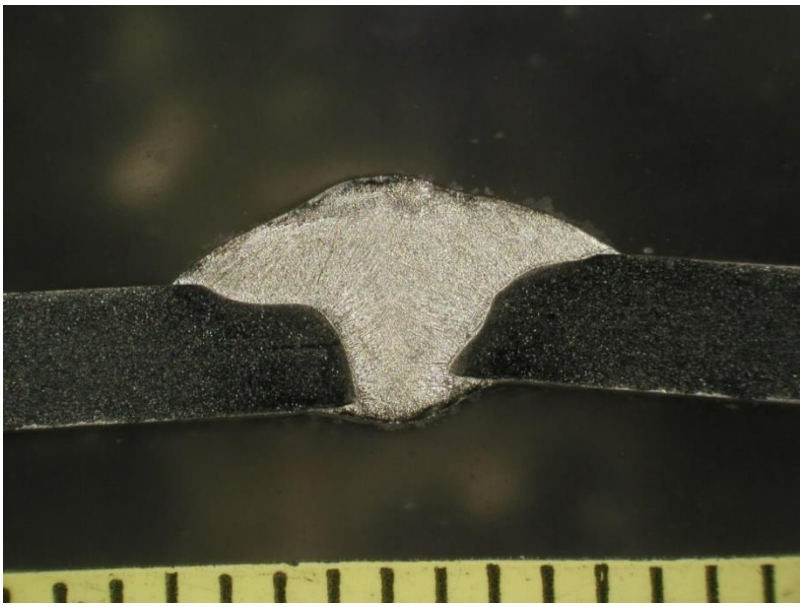
Kuva 29. Makrokuva automaatti pulssi-TIG Polysoude PC 600 HW. Tasainen kupu ja hyvä hitsigeometria, mutta hitsi on läpisulamaton. (Heikkinen 2016.)

Kuvassa 30 nähdään raju läpisulaminen, mahdollisesti liian suuren hitsausenergian, juurikaasun virtausnopeuden ja pienen kuljetusnopeuden vuoksi. Lisäksi kuvun keskilinjalla on havaittavissa pieni painauma.

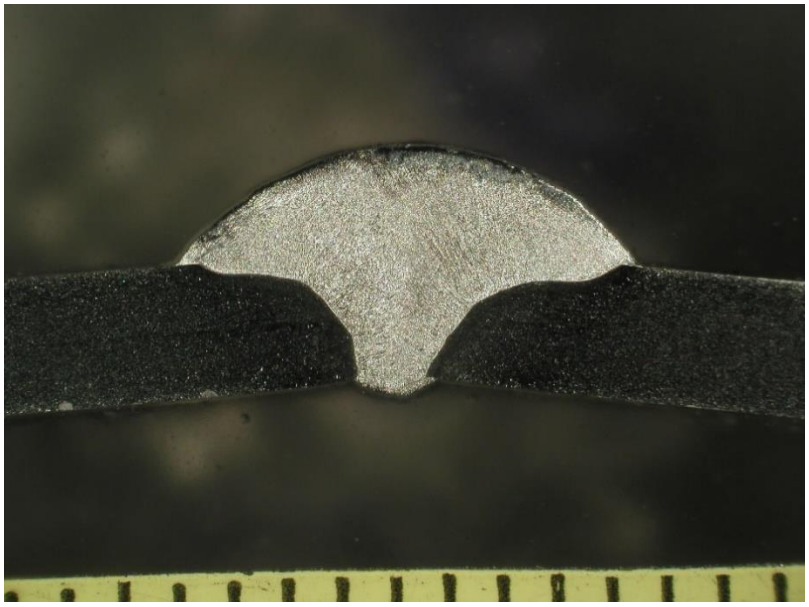


Kuva 30. Makrokuva EWM Alpha Q 330 Puls, pulssi-MIG. Raju läpisulaminen, juuren puolelle syntynyt iso kupu, keskilinjalla nähtävissä painauma hitsin pinnalla. (Heikkinen 2016.)

Kuvissa 31 ja 32 on samanoloiset hitsigeometriat. Hitsauksen aikana kummassakin on käytetty samoja hitsausarvoja, mutta erilaisia juuritukia ja hitsausnopeutta. Molemmissa on havaittavissa pientä vääntymistä ja korkeahko kupu. Muuten hitsit ovat hyvin läpisulaneet. Kuvan 31 koekappaleessa on pieni sovitusvirhe, levyt eivät ole samalla tasalla.



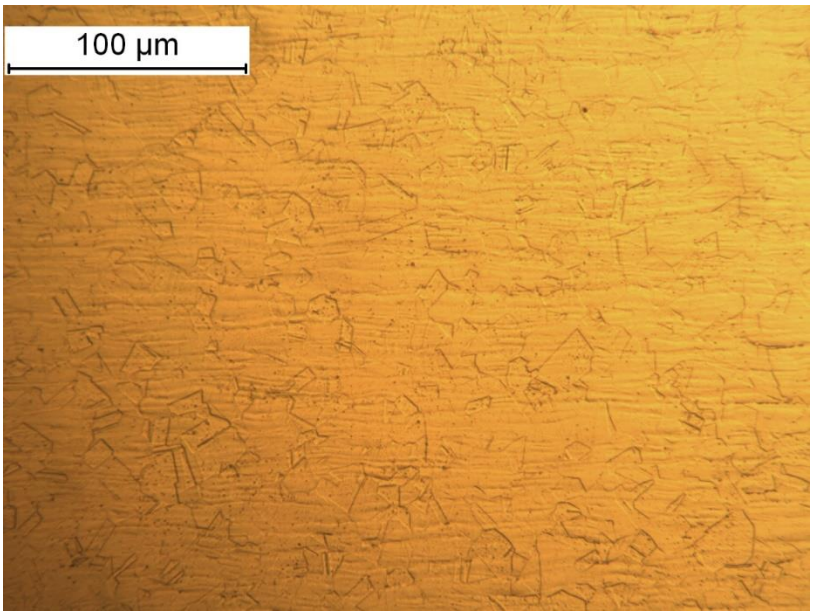
Kuva 31. Makrokuva pulssi-MIG lasikuitutukea vasten. Pieni sovitusvirhe ja levyjen vääntyminen lämmöntuonnin vaikutuksesta. (Heikkinen 2016.)



Kuva 32. Makrokuva pulssi-MIG kuparitukea vasten. Levyjen vääntyminen lämmöntuonnin vaikutuksesta. (Heikkinen 2016.)

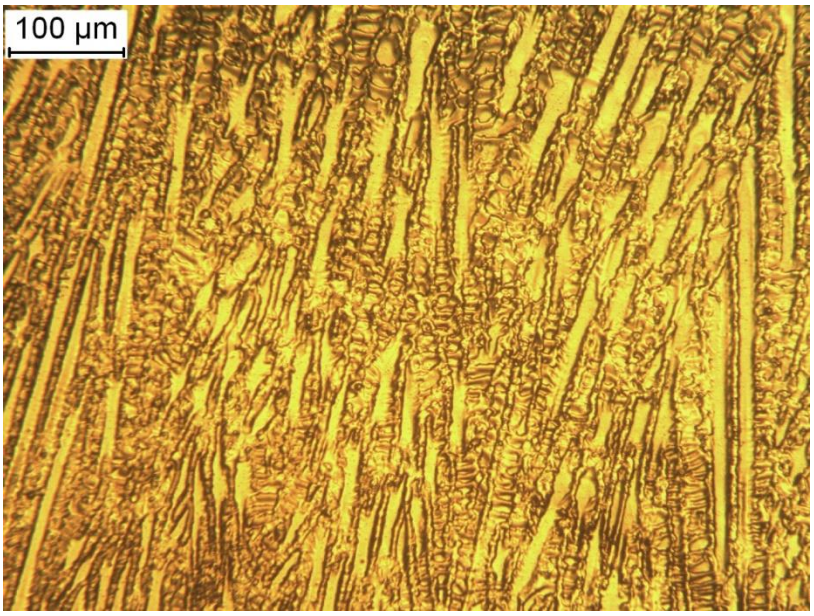
Kuvissa 33-43 on esitetty mikrokuvat koekappaleiden perusaineesta, muutosvyöhykkeistä (Heat Affected Zone, HAZ) ja hitseistä. Mikrohietutkimuksen tarkoitus on selvittää syntyneen hitsausliitoksen ja sen lähialueiden metallurgiaa.

Kuvassa 33 nähdään perusaineen Supra 316plus austeniittinen mikrorakenne. Perusaineeseen seostettu typpi on voimakas austeniitin muodostaja. Lisäksi seostettu typpi alentaa hitsin ferriittipitoisuutta, mutta samalla kuumahalkeiluriski kasvaa. (Lukkari 2009, s. 20.)

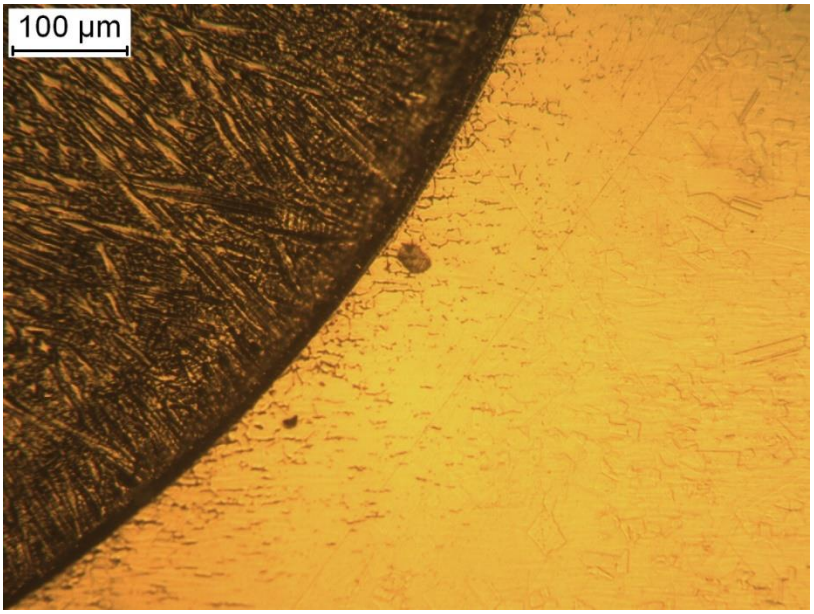


Kuva 33. Mikrokuva Supra 316plus perusaineesta, austeniittia (Heikkinen 2016).

Kuvissa 34 ja 35 Froniuksella hitsatun koekappaleen hitsi ja HAZ. Hitsissä havaitaan dendriittinen austeniittinen mikrorakenne. HAZ-alueella näkyy kaksi tummentumaa lähellä sularajaa, joista isompi on todennäköisesti likaa ja pienempi mahdollisesti karbidierkauma.

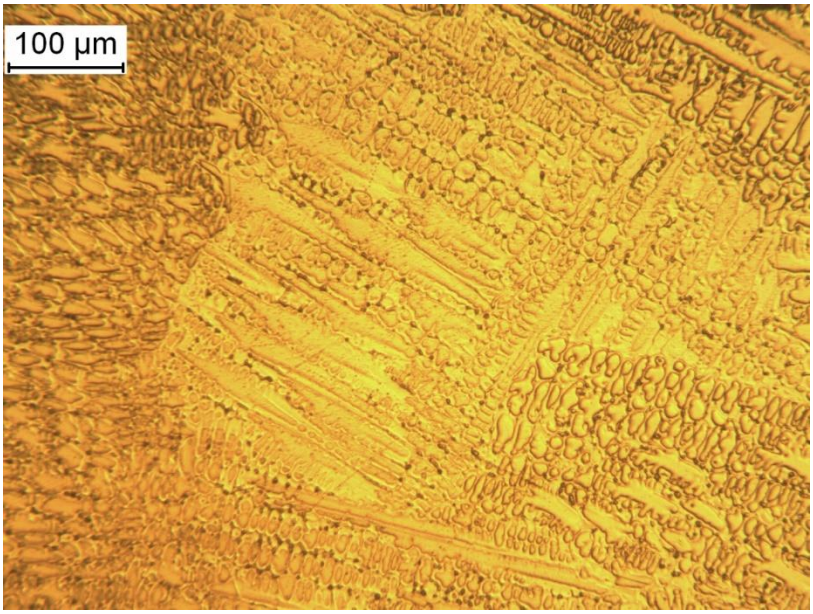


Kuva 34. Mikrokuva hitsistä, Fronius CMT pulssi-MIG. Dendriittinen rakenne, austeniittia (Heikkinen 2016).

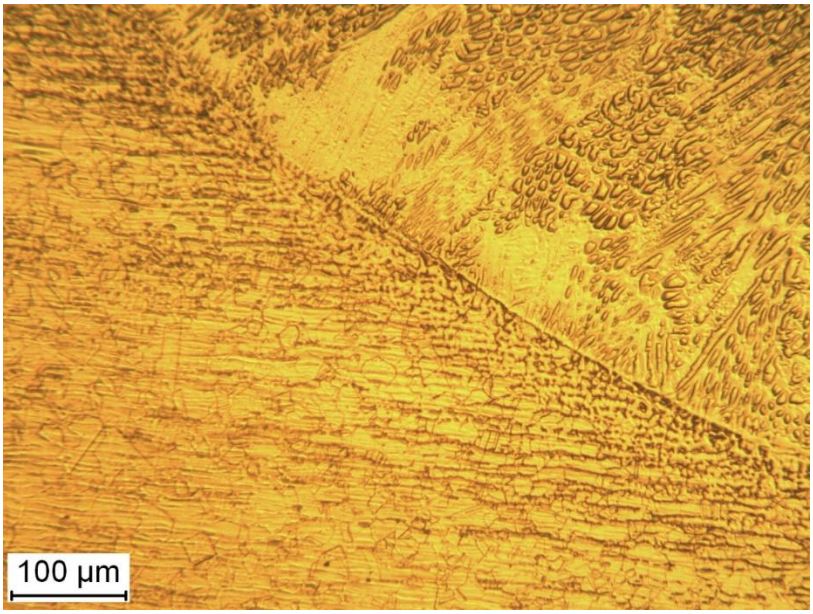


Kuva 35. Mikrokuva sularajasta, Fronius CTM pulssi-MIG (Heikkinen 2016).

Kuvassa 36 TIG:llä hitsatussa hitsissä on havaittavissa hienojakoinen, melko tasainen mikrorakenne. Kuvan 37 HAZ on pieni ja siitä voidaan erottaa vain hienorakeinen vyöhyke.

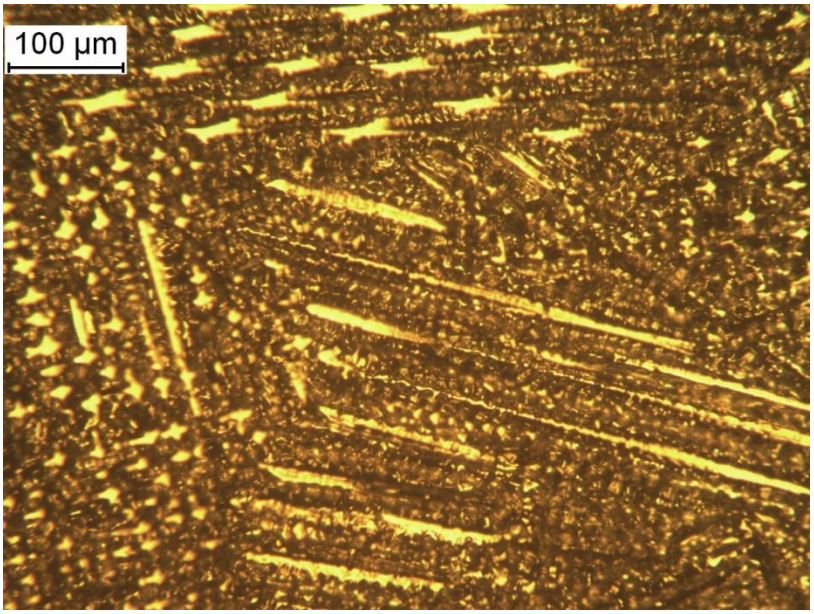


Kuva 36. Mikrokuva hitsistä, automaatti pulssi-TIG Polysoude PC 600 HW, austeniittia (Heikkinen 2016).

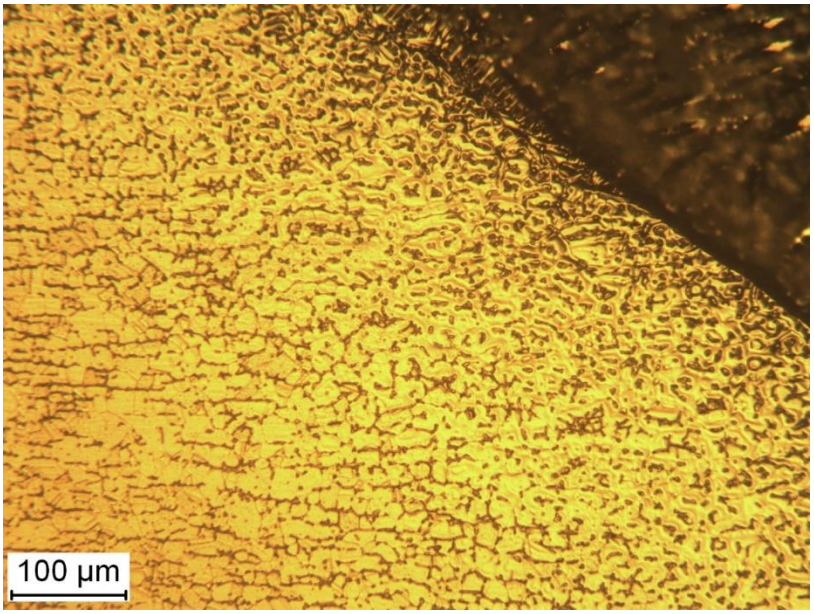


Kuva 37. Mikrokuva sularajasta, automaatti pulssi-TIG Polysoude PC 600 HW (Heikkinen 2016).

Kuvan 38 hitsissä on suurempia austeniittirakeita ja dendriittien muodostumista. Kuvassa 39 HAZ:ssa ja hitsin sularajalla voidaan nähdä deltaferriittiä.

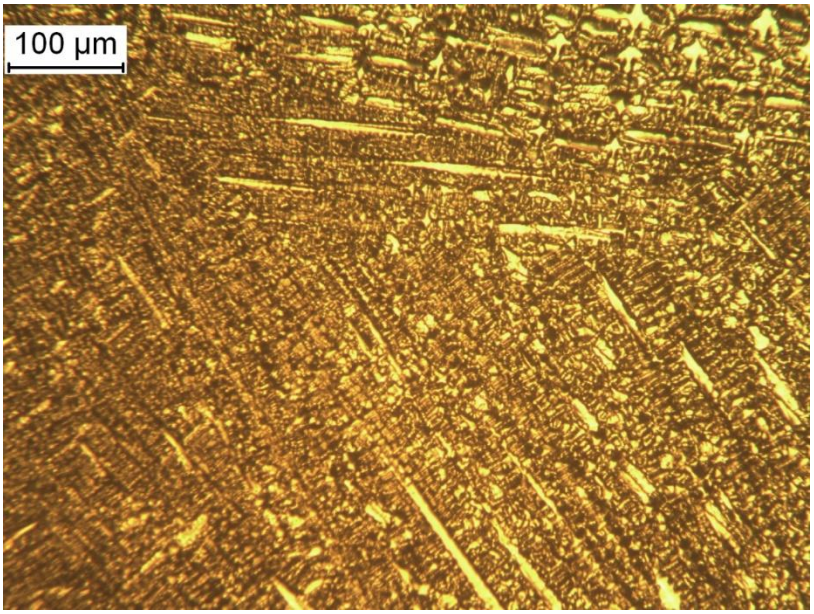


Kuva 38. Mikrokuva hitsistä, EWM Alpha Q 330 Puls, pulssi-MIG, austeniittia (Heikkinen 2016).

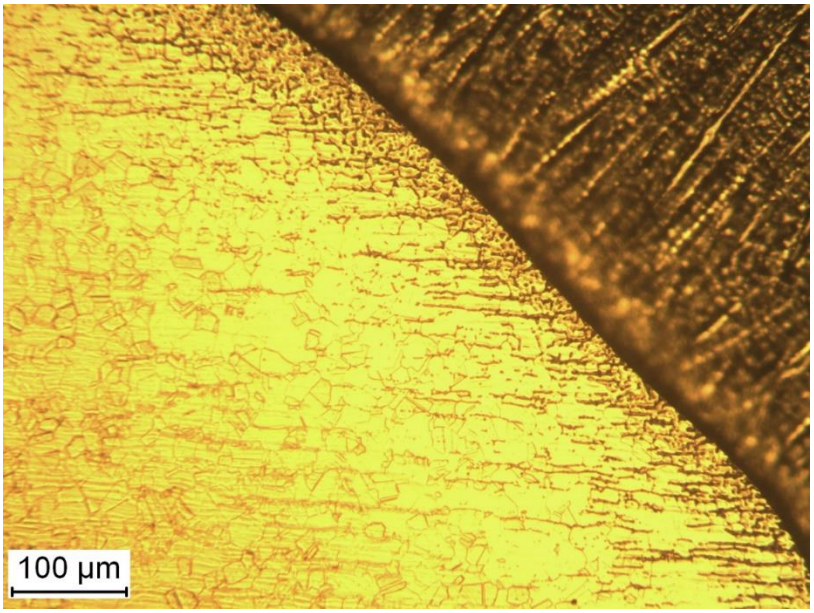


Kuva 39. Mikrokuva sularajasta, EWM Alpha Q 330 Puls, pulssi-MIG, deltaferriittiä (Heikkinen 2016).

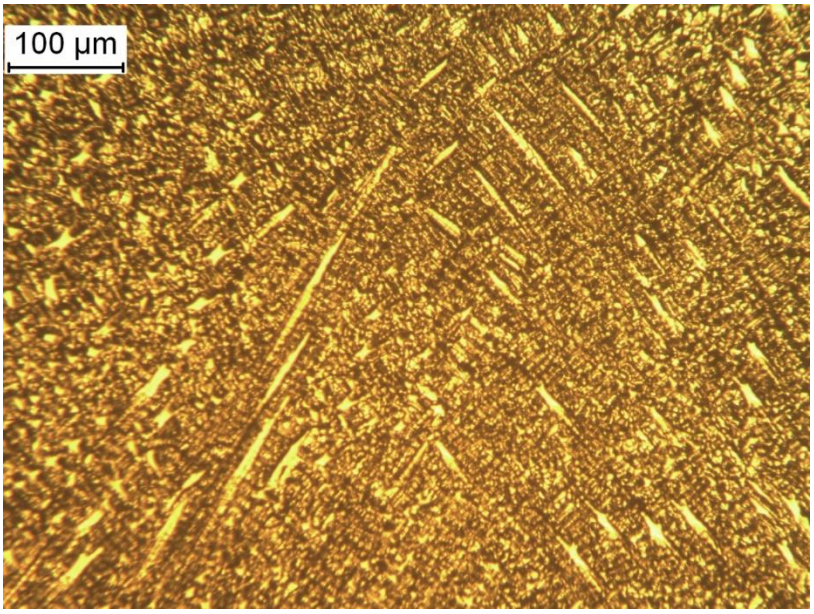
Kuvien 40 ja 42 hitsien austeniittiset mikrorakenteet ovat lähes identtiset, koska hitsausmenetelmä, -virta ja –jännite olivat samat. Verrattaessa kuvan 38 mikrorakenteeseen ovat kuvien 40 ja 42 mikrorakenteet hienorakeisempia. Kuvan 41 HAZ:n sularajan läheisyydessä on havaittavissa pieni määrä deltaferriittiä, mutta ei läheskään yhtä paljon kuin kuvassa 39.



Kuva 40. Mikrokuva hitsistä, pulssi-MIG lasikuitutukea vasten, austeniittia (Heikkinen 2016).

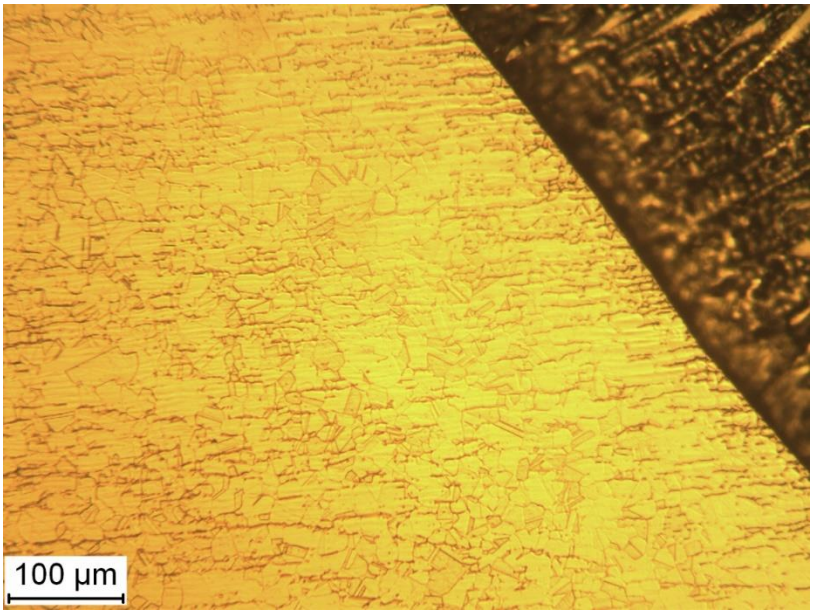


Kuva 41. Mikrokuva sularajasta, pulssi-MIG lasikuitutukea vasten (Heikkinen 2016).



Kuva 42. Mikrokuva hitsistä, pulssi-MIG kuparitukea vasten, austeniittia (Heikkinen 2016).

Kuvan 43 HAZ:ssa ei ole nähtävissä deltaferriittiä eikä karbideja.



Kuva 43. Mikrokuva sularajasta, pulssi-MIG kuparitukea vasten (Heikkinen 2016).

Kaikkien koekappaleiden hitsit ovat rakenteeltaan pääosin austeniittisia. MIG:llä hitsattujen hitsien mikrokuvat ovat saman näköisiä, mutta Froniuksen CMT:llä hitsatun koekappaleen mikrokuva hitsistä (kuva 34) eroaa ulkonäöltään muista.

8.3 Lämmöntuonti ja pWPS

Hietutkimus ja mikrorakenneanalyysi osoittavat, että koekappaleiden osalta lämmöntuonnin vaikutuksesta MIG:llä hitsattaessa tapahtuu suurempaa rakeenkasvua kuin TIG:llä hitsattaessa. Lisäksi kuvissa 39 ja 41 on nähtävissä deltaferriitin muodostumista hitsin sularajalle koekappaleissa 3 ja 4. Syynä voi olla hitsin liian nopea jäähtyminen ja korkea työlämpötila.

Laskennalliset lämmöntuonnit ovat nähtävissä koekappaleille kaavan 1 mukaan laskettuna taulukossa 8. Koekappaleen 3 hitsauksessa on käytetty yli kaksinkertaista virtaa verrattaessa muihin MIG:llä hitsattuihin koekappaleisiin.

Taulukko 8. Koekappaleiden laskennalliset lämmöntuonnit.

	I [A]	U [V]	v [mm/s]	k	Q [kJ/mm]
1	72	22	6,3	0,8	0,20
2	85	9	2,83	0,6	0,16
3	150	22	6,2	0,8	0,43
4	65	23	4,66	0,8	0,26
5	65	22	3,6	0,8	0,32

Prototyypin valmistushitsauksesta kerätään hitsausarvot ja –parametrit talteen, joiden avulla luonnostellaan pWPS. Liitteessä I on prototyypin alustava hitsausohje, joka on laadittu yleisellä tasolla segmenttien hitsausta varten. Seuraavasta sisäsäiliöstä on tarkoitus saada entistä kevyempi ja mahdollisesti jo spiraalihitsaamalla valmistettu.

Osa valmistuksen aikaisista hitsausarvoista poikkeaa koekappaleiden arvoista sisäsäiliön muodon ja koon vuoksi. Lisäksi lieriöosaan hitsataan eri paksuisia osia, kuten päädyt, kartio-osa ja vahvikerengas, joiden hitsauksessa käytetään suurempaa virtaa ja jännitettä.

9 TUOTANTOLINJAN SUUNNITTELU

Sisäsäiliön lieriöosa voidaan valmistaa joko erillisistä segmenteistä tai spiraalihitsaamalla kelalta tuleva raina oikean pituiseksi ja leikkaamalla päädyt suoriksi. Prototyyppi valmistetaan segmenteistä. Tässä kappaleessa esitellään prototyyppisäiliön kokoonpanolinja sekä vaihtoehdot segmentti- ja spiraalityyppisistä hitsauslinjoista.

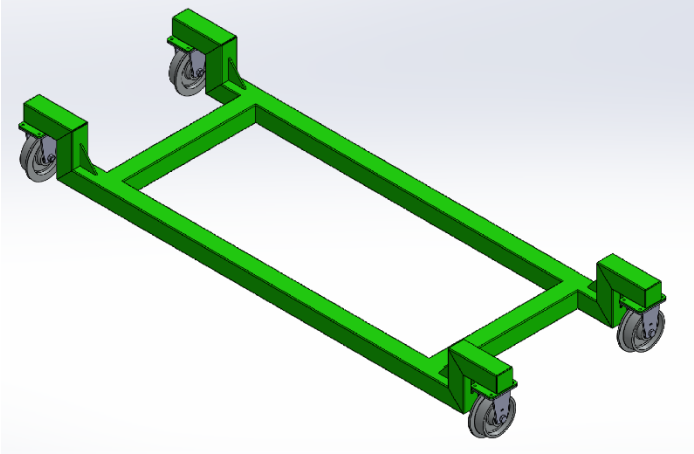
9.1 Prototyyppisäiliön kokoonpanolinja

Prototyyppi kokoonpannaan yhtiön tuotekehitysyksikössä Karstulassa. Kuvassa 44 on esitetty kokoonpanon ajaksi päädystä avonainen ulkosäiliö kiskoradalle liikuteltavien kelkkojen päälle. Kiskot on pultattu lattiaan niin kauas toisistaan, että niiden väliin mahtuu peruuttamaan kuorma-autolla ja ulkosäiliö voidaan nostaa lavetilta kelkkojen päälle. Kokoonpantu LNG-kontti nostetaan kulmistaan hallissa olevien siltanosturien avulla lavetin päälle kuljetusta varten.

Kuva 44. Ulkosäiliö kokoonpanoradalla kelkkojen päällä.

Kiskot valittiin niiden profiilin perusteella. Valintaan vaikuttivat kiskon pään leveys ja kiskon korkeus. Valitun kiskoprofiilin 30E1 kiskon pään leveys on 60,3 mm ja korkeus on 108 mm. Korkeus haluttiin pitää matalana, jotta ulkosäiliö ei nouse liian korkealle ja kokoonpano on helpompaa. Kiskon pään leveyteen vaikutti kiskopyörien juoksupinnan leveys (60 mm). Lisäksi suunniteltiin erillinen kelkka, joita valmistettiin kaksi kappaletta.

Kelkan suunnittelussa pyrittiin minimoimaan ulkosäiliön nousu lattiapinnasta ja pitämään kelkan rakenne yksinkertaisena. Kuvassa 45 on 3D-malli suunnitellusta kelkasta. Kelkan putkiosissa käytettiin samaa RHS-profiilia (120x120x6) sekä tuki- ja kiinnikelevyissä 10 mm paksua levyä.



Kuva 45. RHS-putkesta valmistetun kelkan 3D-malli.

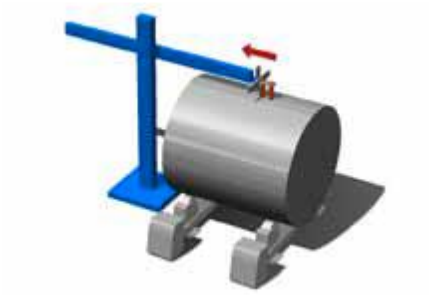
Ulkosäiliön sisälle rakennetaan tukijärjestelmä, jonka avulla sisäsäiliö saadaan keskitettyä kokoonpanon ja eristeen asennusta varten. Päätyihin asennetaan erilliset tukikupit, joita vasten sisäsäiliö painautuu asennuksen yhteydessä. Avattavan päädyn lukitusjärjestelmä yhdessä tukikuppien kanssa pitää sisäsäiliön paikallaan eristeen asennuksen ajan. Lisäksi ne auttavat siirtämään kuljetuksen aikaisia kiihtyvyydestä aiheutuvia aksiaalisia voimia sisäsäiliöltä kestävämpään ulkosäiliöön. Lukitusjärjestelmä estää sisäsäiliön rotaation.

9.2 Segmenttityyppinen hitsauslinja

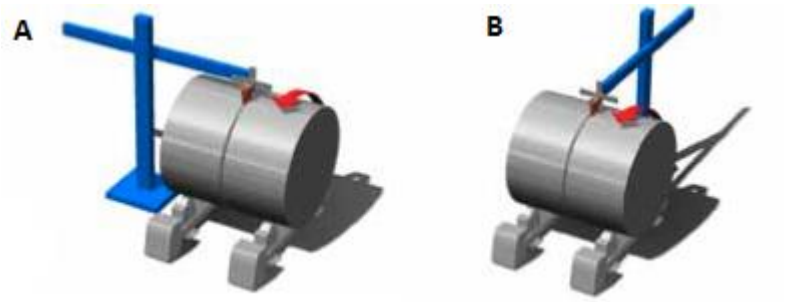
Hitsausta varten toimitetaan määrämittaan kelalta leikatut levyt, jotka mankeloidaan ennen hitsausta halutulle säteelle. Hitsauslinjaa varten tarvitaan apulaitteet kappaleen käsittelyyn ja hitsaukseen. Tarpeellisia apulaitteita ovat muun muassa mankeli, pyöritys- ja tukirullasto, siltanosturi, hitsaustorni ja mekaaninen railonseuranta. Hitsattaessa käsin hitsaustorni ja railonseurantalaitteisto eivät ole pakollisia.

Yksittäiset segmentit silloitushitsataan päittäin käsin ja silloitushitsit hiotaan perusaineen tasalle. Silloitushitsatun segmentin pituushitsi voidaan suorittaa ennen segmentin sovitusta osakokoonpanoon tai segmentin ja osakokoonpanon välisen kehähitsin hitsauksen jälkeen.

Kuvissa 46 ja 47 on esitetty segmentin pituus- ja kehähitsien hitsaukset käyttäen hitsaustornia ja puomia.



Kuva 46. Hitsaustornin ja puomin käyttö segmentin pituushitsin hitsauksessa (Pema 2010, s. 3).

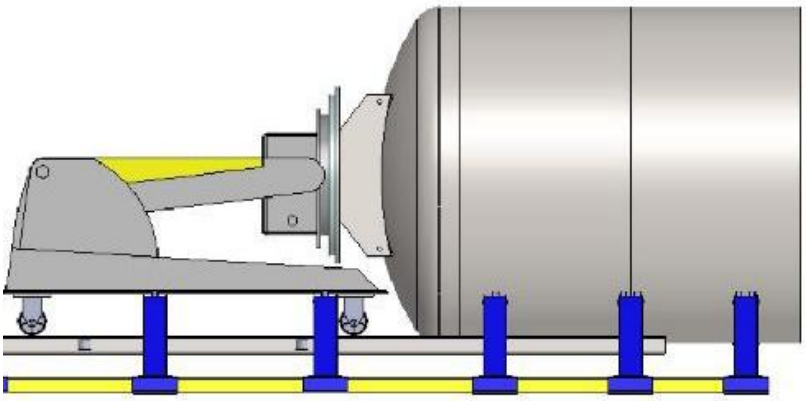


Kuva 47. Hitsaustornin ja puomin käyttö segmenttien välisen kehähitsin hitsauksessa (Pema 2010, s. 3).

Hitsaustorni voidaan asettaa kiskoradalle säiliön viereen, kuvan 47b mukaisesti, jolloin hitsattava säiliö voi olla paikoillaan tuki- ja pyöritysrullien päällä. Kuvan 47a tilanteessa osakokoonpanoa täytyy siirtää poispäin hitsaustornista, kun hitsataan seuraavaa segmenttiä.

Hitsattavan materiaalin paksuus vaikuttaa segmenttien sovitukseen. 2,5 mm paksujen segmenttien asemointia ja sovitusta voidaan helpottaa sisäpuolisella lattaraudalla, mikä kiertää segmentin kehän. Lattaraudan avulla korvataan segmenttikehien välinen siltahitsaus. Molemmat segmentit silloitushitsataan yhteiseen lattarautaan ja kehäsuuntainen päittäisliitos voidaan hitsata koskemattomaan materiaaliin. Tavoitteena on välttää epäjatkumoa hitsausrailossa ja täten hitsausvirheitä.

Kehien hitsaus suoritetaan päittäishitsauksella jalkoasennossa niin, että poltin pysyy vakioasemassa hitsaustornin puomin päässä ja säiliötä pyöritetään. Säiliön pyöritys voidaan suorittaa pyöritysrullien tai käännetyn pyörityspöydän avulla. Käännetyn pyörityspöydän käyttö vaatii erillisten korvakkeiden hitsaamista säiliön päätyyn, joiden avulla se voidaan kiinnittää pyörityspöytään. Kuvassa 48 on havainnollistettu käännetyn pyörityspöydän idea.



Kuva 48. Käännetyn pyörityspöydän käyttö.

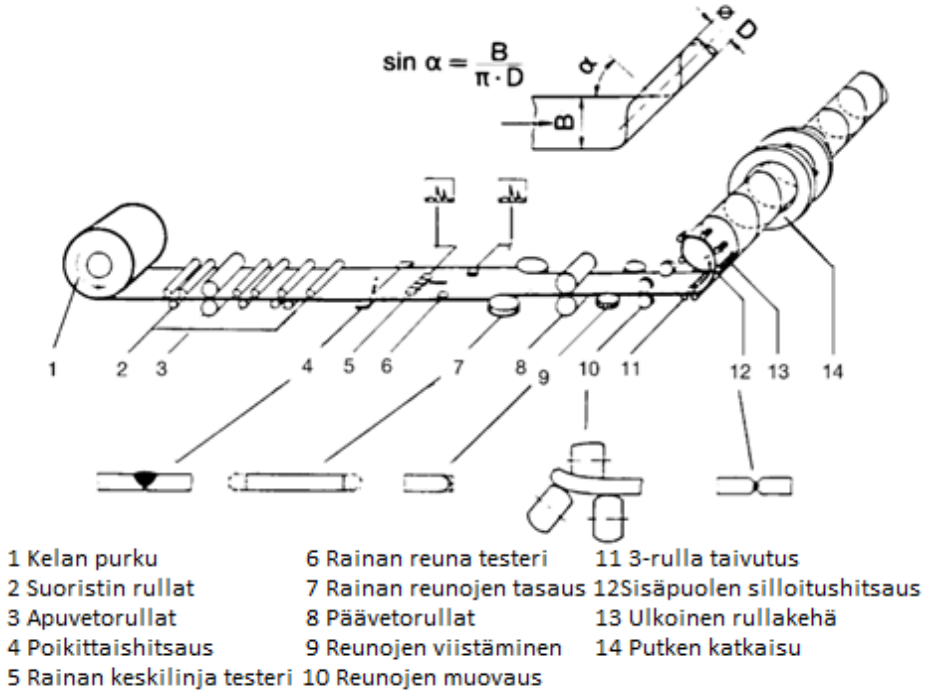
Päädyt voidaan hitsata joko yksittäisiin segmentteihin, joihin liitetään segmenttejä yksi kerrallaan tai valmiiseen lieriöosaan. Päädyn hitsaus ensimmäiseen segmenttiin on perusteltua, koska se jäykistää rakennetta. Tällöin viimeisessä vaiheessa hitsataan yhteen kaksi säiliön puolikasta tai miesluukullinen pääty muuten valmiiseen säiliöön. Jälkimmäinen vaihtoehto mahdollistaa helpommin juurikaasun käytön, koska matka hitsausliitokseen on lyhyempi. Tällöin ei tarvita pitkiä kaapeleita ja kaasukengän sijoittaminen yläosaan helpottuu.

9.3 Spiraalityyppinen hitsauslinja

Spiraalihitsaus mahdollistaa jatkuvan hitsauksen. Lisäksi spiraalimuodossa oleva hitsi on kauttaaltaan tasaluja eikä säiliöön synny T-hitsausliitoksia. Spiraalihitsausta käytetään yleisesti kaasu-, vesi- ja öljyputkien valmistuksessa. Syynä voidaan pitää tuotannon nopeutta ja säädeltävyyttä. Rainan syöttökulmaa muuttamalla voidaan saman levyisestä rainasta valmistaa eri kokoisia putkia. Perinteisesti spiraalihitsauslinjoilta tulevat teräsputket ovat ainevahvuudeltaan yli 6 mm ja hitsaus suoritetaan jauhekaarella. (Revie 2015, s. 195-196.)

Putkien valmistuksessa on käytössä kaksi erillistä tapaa. Toisessa putki muovataan ja silloitushitsataan linjalla, mutta lopullinen hitsaus suoritetaan toisaalla. Toisessa hitsaus tapahtuu heti muovauksen jälkeen, jolloin linjalta saadaan valmista putkea. Näistä jälkimmäinen on yleisempi tapa. (Brensing & Sommer 2004 s. 56.)

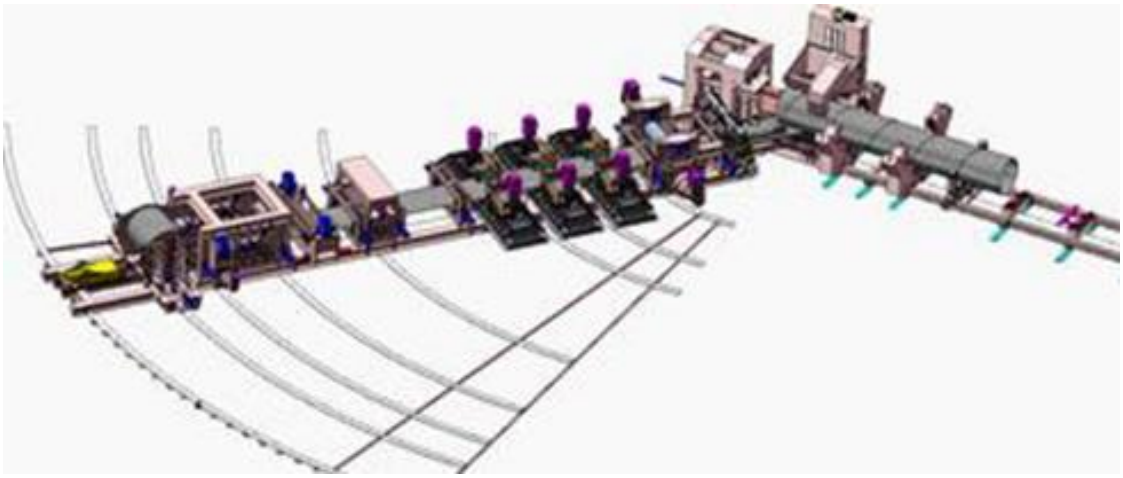
Tuotannossa kelalta tuleva raina hitsataan lieriöksi. Yksinkertaisemmillaan linja vaatii rainan esikäsittelyn, putken muovauksen ja hitsauksen sekä määrämittaan katkaisun. Kuvassa 49 on esitettynä spiraalihitsauksen pääperiaate ja syöttökulman α laskentakaava, kun tiedetään rainan leveys B ja haluttu ulkohalkaisija D. Kela asetetaan kelanpurkulaitteistoon, josta rainaa vedetään suoristinrullien lävitse. Suoristetun rainan reunat tasoitetaan, jonka jälkeen toleranssimitoissa oleva raina asemoidaan ja taivutetaan rullien avulla halutulle halkaisijalle. Spiraalille muovattu raina hitsataan ja leikataan lopuksi haluttuun mittaan. (van Es et al. 2016, s. 288-289.)



Kuva 49. Spiraalihitsauksen periaate ja syöttökulman muodostus (Muokattu lähteestä Brensing & Sommer 2004 s. 58).

Hitsauslinja noudattaa spiraalihitsauksen pääperiaatetta, sillä erolla, että hitsaus tapahtuu ainoastaan säiliön sisällä alaosassa. Tällöin hitsauksessa voidaan käyttää jalkoasentoa,

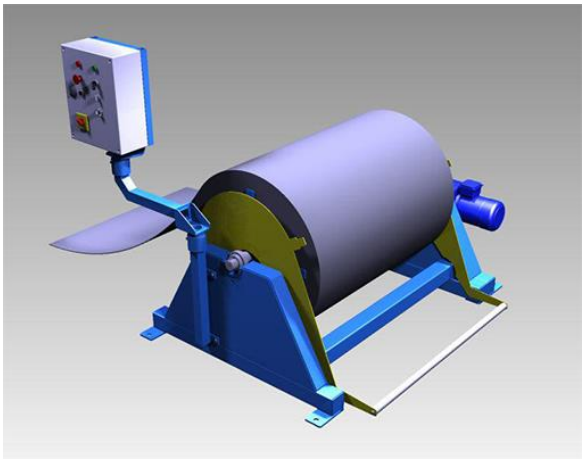
jolloin minimoidaan hitsausvirheiden mahdollisuus (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys 2008a, s. 4). Liitoksen yksinkertaisuuden vuoksi testataan hitsauksen mahdollisuutta kevyesti mekanisoituna. Pyrkimyksenä on säästää robotin hankintakuluissa sekä radan rakennuskuluissa. Kuvassa 50 on esimerkkikuva spiraalityyppisestä hitsauslinjasta, jossa nähdään apulaitteiden kiinnitys kiskoon ja syöttökulman säätömahdollisuus linjaa kääntämällä.



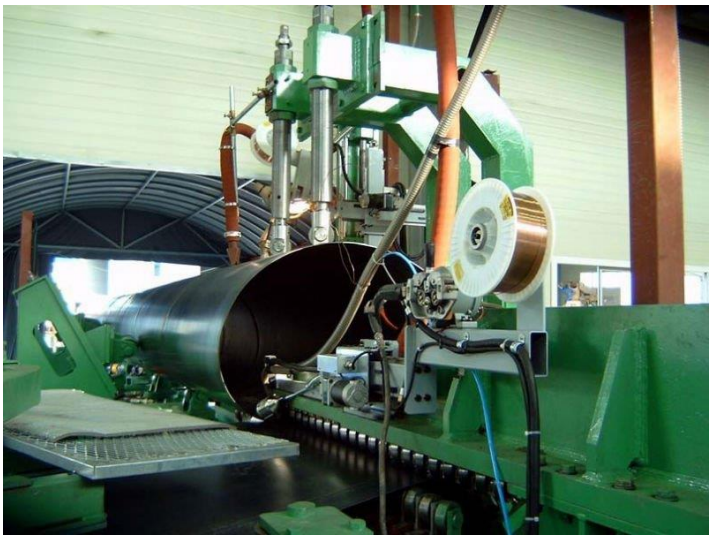
Kuva 50. Esimerkkikuva spiraalityyppisestä hitsauslinjasta.

Aluksi valitaan komponentteja, joiden avulla spiraalihitsaus kelalta tulevasta rainasta säiliön lieriöosaksi on mahdollista. Linjaan tarvitaan seuraavia apulaitteita:

1) Kelan purkulaitteisto, joko passiivinen tai moottorikäyttöinen. Esimerkkimalli RP 125/6 S kuvassa 51.
2) Rainan vetorullat, jotka vetävät rainaa kelalta ja syöttävät sitä taivutukseen.
3) Muovausrullat tai –pyörät, joiden avulla rainaa taivutetaan. Esimerkki kuvassa 52.
4) Rullakehä, jota vasten raina painautuu ja varmistaa oikean halkaisijan.
5) Rullarata tai –kuljetin lieriön hitsattua osaa varten. Esimerkki kuvassa 53.
6) Hitsauslaitteisto ja railonseuranta.
7) Katkaisulaitteisto, jolla leikataan lieriön päät suoriksi, esimerkiksi plasmaleikkuri.



Kuva 51. Kelan purkuhaspeli RP 125/6 S (SS-työstö 2017).



Kuva 52. Puomiin asennetut muovausrullat (Hangzhou Reliance Machinery Co., Ltd. 2017).

Kuva 53. Rullarata hitsattua lieriötä varten (Pipe Coating Technologies 2015).

Edellisten apulaitteiden lisäksi tarvitaan asema päätyjen hitsaukseen ja asemointiin. Lisäksi rainan reunojen tasoitus ennen taivutusta voi olla tarpeellista, jotta varmistetaan toleranssien mukainen rainan leveys. Lisäksi on syytä huomioida rainan ja railon puhdistus ennen hitsausta. Pääperiaate päätyjen hitsauksen osalta on samanlainen kuin segmenttityyppisellä linjalla. Päätyjen asemoinnissa ja hitsauksessa voidaan hyödyntää sisäpuolista lattarautaa, jolloin lieriön ja päädyn välisessä hitsissä vältytään silloitushitseiltä. Lisäksi saadaan suurennettua ainevahvuutta, mikä helpottaa hitsausta.

Päätyjen silloituksen jälkeen lieriöosaa pyöritetään pyöritysrullien avulla ja molemmat päädyt hitsataan samanaikaisesti, jolloin saavutetaan nopeampi läpimenoaika ja päätyjen hitsit ovat tasalaatuiset. Yhtäaikainen hitsaus ilman ylimääräisä apulaitteita edellyttää saman kokoisia päätyjä, jotta hitsausnopeus pysyy samana. Ellei sitten todenneta, että erikokoiset päädyt voidaan hitsata yhtäaikaisesti, kun lieriön pyöritysnopeus on vakio.

Putkistoyhteiden hitsaus voidaan suorittaa etukäteen toiseen päätyyn tai lopuksi muuten valmiiseen sisäsäiliöön. Sama koskee miesluukkua, jos se pidetään tuotantoversiossa. Valmis sisäsäiliö puhdistetaan ja peitataan ennen loppukokoonpanoa.

Hitsauslinjan hinta nousee nopeasti, kun siihen lisätään komponentteja. Karkeana verrokkina voidaan pitää perinteisiä suuremman ainevahvuuden spiraalihitsauslinjastoja, joiden hinnat ovat usein yli miljoona euroa. Kyseisillä linjastoilla hitsattua spiraaliputkea valmistuu noin 0,5 - 2 m/min, rainan leveydestä ja putken halkaisijasta riippuen.

9.4 SWOT-analyysi tuotantolinjavaihtoehdoista

SWOT-analyysissä tuotantolinjoja verrataan keskenään omissa taulukoissaan neljän eri kategorian mukaan vahvuudet (strengths), heikkoudet (weaknesses), mahdollisuudet (opportunities) ja uhat (threats). Analyysissä vahvuuksiin ja heikkouksiin kirjataan sisäisiä asioita, mahdollisuuksiin ja uhkiin ulkoisia asioita. Tavoitteena on tehdä yksinkertainen ja käytännönläheinen nelikenttäanalyysi. (Suomen Riskienhallinta yhdistys 2017.)

Taulukossa 9 on segmenttityyppisen hitsauslinjan SWOT-analyysi. Nykyiseltä alihankkijalta löytyy segmenttipohjaiselle valmistukselle vaadittavat apulaitteet ja ammattitaitoa tuotannon kehittämiseen, kun sarjakoko kasvaa. Verrattuna

spiraalihitsaukseen on läpimenoaika hitaampi, mikä johtuu useammasta työvaiheesta, jotka vaativat levyjen liikuttelua ja käsityötä. Hitaamman läpimenon vuoksi tuotantomäärien lisääminen vaatii lisää lattiapinta-alaa, jossa segmenttejä voidaan valmistella ja kokoonpanohitsata samanaikaisesti. Työvaiheiden samanaikainen suorittaminen vaatii työntekijämäärän kasvattamista, mistä koituu ylimääräisiä kuluja. Segmenttien valmistelu vaatii levyjen mankelointia, asemointia, sovitusta ja silloitushitsausta. Silloitushitsaus ja niiden jälkikäsittelyhionta vievät paljon aikaa ja ovat epäjatkuvuuskohtia tuotantohitsaukselle. Apulaitteiden yleisyys helpottaa alihankintaverkoston kasvatusta, mikäli hitsataan MIG:llä. Plasmahitsaavia konepajoja on huomattavasti vähemmän, mikä johtuu suuremmista laiteinvestoinneista ja osittain tiedon puutteesta plasmahitsauksen osalta.

Taulukko 9. Segmenttityyppisen hitsauslinjan SWOT-analyysi.

Vahvuudet	Heikkoudet
1) Testattu ja löytyy kokemusta 2) Toimintavarma 3) Toiminnan aloitusnopeus 4) Pieni investointi pakollisiin apulaitteisiin 5) Alihankinnan käyttäminen	1) Hidas läpimenoaika 2) Ohuen materiaalin asemointi hankalaa 3) Paljon käsityötä, esimerkiksi asemointi ja silloitushitsaus 4) Monta erillistä työvaihetta, levyn leikkaus, mankelointi, silloitus-hitsaus, tuotantohitsaus jne. 5) Laatuongelmat
Mahdollisuudet	**Uhat**
1) Hitsauksen tehostaminen ja laadun parantaminen plasmahitsauksella 2) Segmenttien yhtäaikainen valmistus eri työpisteillä 3) Alihankintaverkoston kasvattaminen	1) Tuotannon kasvattaminen vaatii paljon lattiapinta-alaa. 2) Paljon käsityötä, työvoimapulan vaikutus tuotantoon 3) Tuotantomäärän vaihtelu, kuinka tasata kuormaa

Taulukossa 10 esitetään spiraalityyppisen hitsauslinjan SWOT-analyysi. Spiraalille muovaava ja samalla hitsaava linjasto mahdollistaa nopeamman läpimenoajan, tasaisen laadun ja lieriön mittamuutokset. Korkean mekanisointi-/automatisointiasteen ansiosta kelalta tuleva raina saadaan valmiiksi lieriöksi yhdellä linjastolla, jolloin kappaleen liikutteluun ja asetusten säätämiseen ei kulu ylimääräistä aikaa. Linja kootaan erillisistä komponenteista, jotka tulevat eri toimittajilta, minkä takia tuotannon aloitus vaatii linjan testikäyttöä ja kalibrointia. Lisäksi linjan alkuinvestoinnit ovat segmenttityyppistä hitsauslinjaa suuremmat. Toimivan hitsauslinjan monistaminen uusiin toimitiloihin pitäisi onnistua hyvin. Täten tuotantomäärien kasvattaminen on mahdollista nopealla aikataululla. Yksittäisen komponentin rikkoutuminen voi aiheuttaa koko linjan seisahtumisen ja tuotantokatkoksen.

Taulukko 10. Spiraalityyppisen hitsauslinjan SWOT-analyysi

Vahvuudet	Heikkoudet
1) Jatkuva hitsaus ja yhtenäinen hitsi 2) Vähän työkappaleen liikuttelua 3) Edullinen hitsausliitoksen suunta 4) Korkea mekanisointiaste ja tasainen laatu 5) Halkaisijan säätö käyttämällä vakioleveätä rainaa muuttamalla rainan syöttökulmaa 6) Pituuden säätö leikkaamalla lieriö haluttuun pituuteen 7) Nopea läpimenoaika	1) Alkuinvestoinnit 2) Linjan kokoaminen erillisistä komponenteista. Komponenttien synkronointi 3) Tuotannon aloitus vaatii linjan testikäyttöä 4) Vähäinen kokemus
Mahdollisuudet	**Uhat**
1) Tuotannon kasvattaminen ja suuri volyymi 2) Reaaliaikaisen röntgenin liittäminen linjastoon 3) Hitsauslinjan monistus	1) Linjan käynnistys ja säätäminen, mahdollisten ongelmien paikallistaminen ja korjaaminen 2) Komponentin rikkoutuminen aiheuttaa mahdollisesti linjan seisahtumisen

10 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ruostumattomasta teräksestä valmistettu sisäsäiliö toimii konstruktiossa varmemmin kuin alumiininen. Syynä voidaan pitää rakenteen lujuusmitoitusta, niin myödön kuin väsymisen osalta. Alumiininen prototyyppi on myötävä ja teräksinen myötämätön eli se kestää paineen ilman ulkosäiliön tukea.

Hitsauskoekappaleiden osalta voidaan todeta, että säiliön hitsaus Supra 316plus:sta on mahdollista sekä TIG:llä että MIG:llä, vaikka TIG:llä hitsatussa kappaleessa tunkeuma jäi noin yhden millimetrin vajaaksi. Hitsauskokeiden koekappaleissa pysyttiin hitsiin muodostuneen ferriitin osalta hyväksytyllä alueella. Syntyneet liitokset olivat pääosin austeniittisia, mikä on etu kryogeenisissa lämpötiloissa. Kuumahalkeilua tai häiritsevää karbidien muodostumista ei ilmennyt.

Segmenttipohjainen prototyyppi hitsattiin onnistuneesti MIG:llä, mutta lisäaineen kulutus oli odotettua suurempaa. Segmenttipohjainen valmistus on läpimenoajaltaan hidas ja vaatii paljon käsityötä mm. silloitushitsauksen sekä levyjen asemoinnin ja sovituksen takia. Prototyypin tekeminen kestää yleensä kauemmin kuin valmiin tuotteen sarjatuotanto. Voidaan olettaa, että tuotteen vakiintuminen ja sarjamäärän kasvatus nopeuttavat läpimenoaikaa ja lisäävät mekanisoinnin mahdollisuutta.

Prototyypin alustavaa hitsausohjetta voidaan joutua muokkaamaan seuraavaa säiliötä varten, vaikka prototyyppiä voidaan pitää onnistuneena. Seuraavaa säiliötä varten suoritetaan optimointikierros, jonka tavoitteena on kevyempi ja valmistusystävällisempi ratkaisu. Nykyinen lukitusjärjestelmä ja sen vaatima vahvikelevy, toisen päädyn kartio-osa ja lieriön ainevahvuus ovat osana optimointikierrosta.

Supra 316plus teräksen rajallinen saatavuus tuotti lisätyötä päätyjen ja lukituspalojen osalta. Päädyt jouduttiin valmistamaan kolmesta palasta ja lukituspalat neljästä. Syynä voidaan pitää materiaalin uutuutta ja pientä käyttöä, minkä vuoksi ainevahvuuksien saatavuus ja aihiokoot ovat rajallisia. Supra 316plus hyväksyttiin osaksi eurooppalaista standardia EN 10028-7 vuoden 2016 heinäkuussa (Outokumpu 2017).

Spiraali- ja segmenttityyppisen hitsauslinjan osalta vertailu on karkea. Esimerkiksi spiraalihitsauksen osalta hitsin metrimäärään vaikuttaa käytetyn rainan leveys. Hitsauksen määrä vaikuttaa suoraan läpimenoaikaan ja kustannuksiin. Kapean rainan käyttö lisää myös kelan vaihtotarvetta, jonka jälkeen raina täytyy ajaa uudelleen linjan läpi ja varmistaa, että ensimmäisen kierroksen halkaisija on mittatoleranssissa.

Spiraalihitsauksen avulla säästytään työvaiheilta, jotka ovat segmenttipohjaisessa valmistuksessa pakollisia, kuten levyjen leikkaus, erillinen mankelointi ja segmenttien asemointi. Spiraalityyppinen hitsauslinja sisältää edelliset toimenpiteet, mikä mahdollistaa nopeamman läpimenoajan ja sitä kautta paremman tuottavuuden. Segmenttipohjainen valmistus soveltuu paremmin alihankintaan, koska spiraalihitsauslinjastoa voidaan pitää erittäin tuotekohtaisena ja etenkin Suomessa harvinaisena. Toiseksi yleensä spiraalihitsauslinjat on suunniteltu paksummalle materiaalille, yli 6 mm, ja hitsausprosessina käytetään jauhekaarta. Toimiva spiraalihitsauslinja mahdollistaa tasaisen laadun ja nopeamman läpimenoajan, mutta on investointina segmenttityyppistä hitsauslinjaa suurempi.

Spiraalityyppisen hitsauslinjan rakentaminen voi tuntua yksinkertaiselta muutaman pääkomponentin liittämiseltä yhtenäiseksi linjaksi. Laadukkaan ja toimintavarman hitsauslinjan toteutus vaatii kuitenkin useiden viikkojen testiajoa ja parametrien säätämistä. Linjan apulaitteisiin vaikuttaa keloilla olevan rainan mittatarkkuus ja puhtaus. Suurella todennäköisyydellä rainan reunoja on suoristettava ja pinta puhdistettava ennen hitsausta.

Prototyypin kokoonpanoa varten rakennettu kiskorata ja siihen soveltuvat kaksi kelkkaa toimivat käytössä hyvin. Kiskoradan leveys ja kelkat mahdollistavat helpon ja nopean LNG-kontin noston ja laskun hallissa olevien siltanostureiden avulla. Kuorma-auto mahtuu peruuttamaan kiskojen väliin, jolloin nosto lavetille tai lavetilta voidaan suorittaa hallin sisällä.

10.1 Jatkokehitystoimenpiteet

Prototyypin valmistuksessa levyjen paikoitus osoittautui vaikeaksi. Jatkossa kokeillaan mahdollisuutta käyttää lattarautaa juurenpuolella. Näin hitsausliitokseen saadaan suurempi ainepaksuus helpottamaan hitsausta ja paikoitusta, päästään eroon juurikaasun käytöstä ja

kehähitsi voidaan hitsata neitseelliseen aineeseen, jossa siltahitsit eivät häiritse hitsausprosessia. Kehitysideoita segmenttipohjaisen LNG-kontin valmistukseen:

1) Lisäaineen kulutuksen minimointi. Nikkelipohjaisen lisäaineen suuri kulutus ja kallis kilohinta nostavat kustannuksia. Lisäainetta kului prototyyppiin noin 50 kg.
2) Plasmahitsauksen käyttömahdollisuuden kartoitus. Tarkoitus säästää lisäainetta, mahdollisesti parantaa hitsin laatua ja tuottavuutta.
3) Suurempi aihio päätyjä varten, jotta voidaan välttää kaksi hitsiä ja niiden röntgentarkastus.
4) Lukituspalojen tai -järjestelmän optimointi. Prototyypin lukitusjärjestelmä on työläs ja kallis.

Kokoonpanoradan valmistus ulkosäiliön ja sisäsäiliön asennusta varten. Prototyyppiä varten rakennettu kiskorata ja kelkat mahdollistavat ulkosäiliön liikuttamisen radalla. Lisäksi tarvitaan apulaite, joka ohjaa sisäsäiliötä ja nopeuttaa kokoonpanoa. Prototyypin yhtä kokoonpanoa varten ei käytetä aikaa ja resursseja erillisen apulaitteen rakentamiseen.

Hitsauskokeet spiraalisäiliölle avaimenreikä-plasmahitsauksen osalta ilman lisäainetta tuotantoversion kaltaiseen koekappaleeseen. Koejärjestelyn vaativuuden takia, koekappaleen suuret dimensiot ja liitoksen asemointi, voidaan suorittaa koehitsaus suorille levyille, kuten aiemmissa hitsauskokeissa.

11 YHTEENVETO

Alumiinista valmistetun sisäsäiliön käyttö ei toiminut silloisella hunajakennoihin lukitulla perliittieristeellä. Paineen alaisena perliitti painui kasaan, eikä sisäsäiliö saanut tarvittavaa tukea ulkosäiliöstä. Painetestien lopussa sisäsäiliöön tuli enää pieniä vuotokohtia, mutta tavoiteltu 6 baarin ylipaine saavutettiin ja kylmäkoe nestemäisellä typellä voitiin suorittaa.

Ennen segmenttipohjaisen teräksestä valmistettavan sisäsäiliön valmistusta tarkasteltiin useita materiaaleja. Valitulle Supra 316plussalle, mikä lujenee kylmässä, mutta ei menetä elastisuutta, suoritettiin sarja koehitsauksia ja koekappaleille vetokokeet. Koekappaleiden hitsausliitokset pysyivät kaikki austeniittisina, mikä oli niiden perusedellytys, koska säiliö luokitellaan kryoastiaksi. Deltaferriittiä pyritään välttämään sen kylmähaurauden vuoksi kryogeenisissa lämpötiloissa. Vetokokeissa yhden koekappaleen vetosauvat murtuivat hitsistä ja muut perusaineesta.

Segmenttipohjainen prototyyppi hitsattiin MIG:llä. Säiliölle suoritettiin täysi radiografinen kuvaus sertifioidun kolmannen osapuolen toimesta. Kuvantamisen jälkeen tehtiin yhdistetty vesipainetesti ja venymämittauskoe. Vesipainetestillä varmennettiin sisäsäiliön toimivuus paineenalaisena. Teräksinen prototyyppi sisäsäiliö läpäisi vesipainetestin moitteettomasti. Testin alussa tavoitepaineeksi valittu 6,5 baaria ylitettiin ja lopullinen ylipaine oli 7,2 baaria, minkä jälkeen paine nostettiin vielä kaksi kertaa 7,1 baarin tasolle. Vesipainetestin yhteydessä suoritetulla venymämittauskokeella todennettiin olemassa olevan FEM-mallin oikeellisuus.

Spiraalityyppisen hitsauslinjan suunnittelussa käsitellään apulaitteita, joiden avulla säiliön lieriöosa voidaan valmistaa. Pääkomponenteiksi voidaan luokitella kelanpurkulaitteisto, rainan muovausasema ja hitsausasema. Näiden lisäksi tarvitaan plasmaleikkuri lieriön katkaisuun ja rullarata. Lisäksi tarvitaan asema päätyjen hitsaukseen. Verrattuna segmenttityyppiseen hitsauslinjaan ovat investoinnit suurempia, mutta läpimenoaika on lyhyempi ja lieriöosan hitsien laatu on tasaisempi.

LÄHTEET

2010/35/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 16.6.20110 kuljetettavista painelaitteista sekä neuvoston direktiivien 76/767/ETY, 84/525/ETY, 84/526/ETY, 84/527/ETY ja 1999/36/EY kumoamisesta. EUVL N:o L 165, 30.6.2010.

ADR. 2015. European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. ECE/TRANS/242 (Vol.I). [Viitattu 24.4.2017]. Saatavissa: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/adr/adr2015/ADR2015e_WEB.pdf

AGA. 2014. Käyttöturvallisuustiedote LNG nesteytetty maakaasu. [verkkodokumentti]. [Viitattu 5.2.2017]. Saatavissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/LNG_Nesteytetty_maakaasu634_124701.pdf

AGA. 2016a. Nesteytetty maakaasu. [verkkodokumentti]. [Viitattu 11.3.2017]. Saatavissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20LNG%20Brochure%20FI634_169000.pdf?v=1.0

AGA. 2016b. Pienoisopas. Ruostumattoman teräksen MIG/MAG-hitsaukseen. [Viitattu 21.3.2017]. Saavatissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20Stainless%20Steel%20MIG%20MAG%20Welding%20Brochure%20105x210%20FI634_122435.pdf?v=1.0

Amman, T. 2012. Juurensuojaus. Hitsaustekniikka, 2012. Vol. 62: 1. S. 13-20.

ASME. 2016a. Information and procedures for obtaining ASME Boiler and Pressure Vessel certificates of authorization and certification mark under sections I, IV, VIII DIV. 1, VII DIV. 2, VIII DIV. 3, X and XII. [verkkodokumentti]. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/ResourceFiles/Shop/Certification%20%26%20Accreditation/BPV-Certification/BPV-Certification_Form_New-Application.pdf

ASME. 2016b. Standards & certification. [verkkodokumentti]. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/ResourceFiles/AboutASME/Who%20We%20Are/Standards_and_Certification/ASME_Codes_and_Standards-Examples_of_Use_for_Mechanical_Engineering_Students.pdf

BP. 2017. Energy Outlook 2017. [verkkodokumentti]. [Viitattu 22.5.2017]. Saatavissa: https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2017/bp-energy-outlook-2017.pdf

Brensing, K-H. & Sommer, B. 2004. Steel Tube and Pipe Manufacturing Processes. [verkkodokumentti]. [Viitattu 4.5.2016]. Saatavissa: http://www.smrw.de/files/steel_tube_and_ pipe.pdf

EMAS Cryogenic. 2012. [video]. [Viitattu 12.3.2017]. Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=rH6TMqkCIL8

Esab. 2000. Pulsed MIG-welding. [verkkodokumentti]. [Vittattu 30.1.2017]. Saatavissa: http://www.electrik.org/forum/index.php?act=attach&type=post&id=20708

Friedrich, N., Posch, G., Tösch, J., Ziegerhofer, J. & Berger, W. 2008. Welding of austenitic stainless steels for cryogenic LNG applications. [verkkodokumentti]. [Viitattu 19.12.2016]. Saatavissa: https://app.aws.org/mwf/attachments/6/240506/Friedrich_et_al.pdf

Fronius. 2007. CMT: Cold Metal Transfer. [verkkodokumentti]. [Viitattu 17.2.2017]. Saatavissa: http://www.digitalweldingsolutions.com/CMT.pdf

Hangzhou Reliance Machinery Co., Ltd. 2017. Spiral welded pipe mill, spiral welded pipe production line. [Weiku:n www-sivuilla]. Päivitetty 23.3.2017. [Viitattu 23.3.2017]. Saatavissa: http://www.weiku.com/products/10263421/Spiral_welded_pipe_mill_spiral_welded_pipe_production_line.html

Heikkinen, A. 2016. LUT ferriittipitoisuuden määritys ja koekappaleiden hieiden teko ja kuvaus.

Hiltunen, E. 2016. LUT vetokokeiden suoritus ja dokumentointi.

Ionix. 2017a. MIG/MAG-Hitsaus. [Ionixin www-sivuilla]. Päivitetty 29.1.2017. [Viitattu 29.1.2017]. Saatavissa: http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/kaarihitsaus/migmag-hitsaus/

Ionix. 2017b. Plasmahitsaus. [Ionixin www-sivuilla]. Päivitetty 29.1.2017. [Viitattu 29.1.2017]. Saatavissa: http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/plasmatyosto/plasmahitsaus/

Kapustka, N. 2012. Arc welding capabilities at EWI. [verkkodokumentti]. [Viitattu 1.2.2017]. Saatavissa: https://ewi.org/eto/wp-content/uploads/2010/06/Arc-Welding-at-EWI-2012.pdf

Korjala, K. 2007. Hitsaussuojakaasujen tehokas ja taloudellinen käyttö. [verkkodokumentti]. [Viitattu 13.2.2017]. Saatavissa: http://www.woikoski.fi/sites/default/files/Hitsaussuojakaasujen%20tehokas%20ja%20taloudellinen%20k%C3%A4ytt%C3%B6%20KK.PDF

LNG Global. 2017. Hitatchi High-Tech AW Cryo, Inc. LNG Transport Tanks. [LNG Globalin www-sivuilla]. Päivitetty [10.3.2017] [Viitattu 11.3.2017] Saatavissa: http://www.lngglobal.com/hitachi-high-tech-aw-cryo-lng-transport-tanks.html

Logistiikan maailma. 2016. Kansainväliset kuljetusmääräykset. [Logistiikan maailman www-sivuilla]. Päivitetty 20.6.2016. [Viitattu 5.2.2017]. Saatavissa: http://www.logistiikanmaailma.fi/wiki/Kansainv%C3%A4liset_kuljetusm%C3%A4%C3%

Lukkari, J. 1997. Hitsaustekniikka. Perusteet ja kaarihitsaus. 2. tarkistettu painos. Helsinki, Oy Edita Ab. 292 s. ISBN 951-719-469-2.

Lukkari, J. 2007. Työkaluja hitsauskoordinoijalle hitsausten suunnittelua varten. Hitsaustekniikka, 2007. Vol. 57: 2. S. 2-17.

Lukkari, J. 2009. Käytännön hitsausmetallurgiaa. Hitsausuutiset, 2009. Vol. 43: 1. S.18-22.

Lukkari, J. 2011a. Hitsaustalous ja tuottavuus. Hitsaustekniikka, 2011. Vol. 61: 3. S. 2-8.

Lukkari, J. 2011b. Ruostumattomat teräkset ja hitsaus – lyhyt oppimäärä -. Hitsaustekniikka, 2011. Vol. 62: 4. S. 4-12.

METSTA. 2016. Hitsiluokat ja hyväksymisrajat. [Viitattu 15.3.2017]. Saatavissa: http://www.sfsedu.fi/files/132/METSTA_Hitsiluokatjahyvaksymisrajat_2016.ppt

Outokumpu. 2016. Outokumpu stainless grades to meet your needs. [verkkodokumentti]. [Viitattu 6.2.2017]. Saatavissa: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/ Outokumpu-4622-316plus-brochure.pdf

Outokumpu. 2017. Outokumpu Supra 316plus and core 4622 accepted into European standard EN 10028-7. [Outokummun www-sivuilla]. Päivitetty 22.5.2017. [Viitattu 22.5.2017]. Saatavissa: http://www.outokumpu.com/en/news-events/press-release/Pages/Outokumpu-720283.aspx

Ovako. 2012. Ovakon terästen hitsaus. [verkkodokumentti]. [Viitattu 20.3.2017]. Saatavissa: http://www.ovako.com/PageFiles/320/Ovakon_terasten_hitsaus_15724.pdf

Pema. 2010. Welding column & booms. [verkkodokumentti]. [Viitattu 30.3.2017]. Saatavissa: http://www.sveiseeksperten.no/sites/sveiseeksperten.no/files/Pema%20Sveise soyler.pdf

Piiroinen, T. 2013. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettavuuteen. 1. painos. Kuopio, Savonia-ammattikorkeakoulu, HitNet. 65 s. ISBN 978-952-203-2177-8

Pipe Coating Technologies. 2015. Pipe coating equipment by Garneau. [Pipe Coating Technologies:n www-sivuilla). Päivitetty 22.6.2015. [Viitattu 23.3.2017]. Saatavissa: http://www.pipecoatingtechnologies.com/sitemap/styled/styled-2/

Process Welding Systems. 2009. Plasma welding summary. [verkkodokumentti]. [Viitattu 1.2.2017]. Saatavissa: http://www.processwelding.com/newsletters/PlasmaSummary.pdf

Revie, R. W. 2015. Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 856 s.

SFS. 2016. Johdanto laadunhallinnan ISO 9000 –standardeihin. [verkkodokumentti]. [Viitattu 7.2.2017]. Saatavissa: http://www.sfsedu.fi/files/126/ISO_9000_kalvosarja_oppilaitoksille_2016.ppt.

SFS-EN 12062. 1998. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Yleisohjeet metallisille materiaaleille. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 18. s. Vahvistettu 26.1.1998

SFS-EN ISO 14731. 2006. Hitsauksen koordinointi. Tehtävät ja vastuut. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 27. s. Vahvistettu 18.12.2006.

SFS-EN ISO 15607. 2004. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 30. s. Vahvistettu 19.04.2004.

SFS-EN ISO 17636-1. 2013. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Radiografinen kuvaus. Osa 1: Röntgen- ja gammakuvaus filmitekniikalla. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 60. s. Vahvistettu 04.03.2013.

SFS-EN ISO 17637. 2011. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Sulahitsausliitosten silmämääräinen tarkastus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 18. s. Vahvistettu 28.3.2011

SFS-EN ISO 3834-1. 2006. Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset. Osa 1: laatuvaatimustason valintaperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 26. s. Vahvistettu 13.2.2006.

SFS-EN ISO 3834-2. 2006. Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset. Osa 2: Kattavat laatuvaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 24. s. Vahvistettu 13.2.2006.

SFS-EN ISO 5817. 2014. Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 60. s. Vahvistettu 31.3.2014

SFS-EN ISO 6892-1. 2016. Metallien vetokoe. Osa 1. Vetokoe huoneenlämpötilassa. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 63. s. Vahvistettu 5.8.2016.

SFS-EN ISO 9606-1. 2013. Hitsaajan pätevyyskoe. Sulahitsaus. Osa 1: teräkset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 76. s. Vahvistettu 18.11.2013.

SFS-EN ISO 9712. 2012. Rikkomaton aineenkoetus. NDT-henkilöiden pätevöinti ja sertifiointi. Yleisperiaatteet. 2012. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 64. s. Vahvistettu 13.8.2012.

SS-työstö 2017. Tuotteet. (SS-työstön www-sivuilla). Päivitetty 14.3.2017. [Viitattu 14.3.2017.] Saatavissa: http://ss-tyosto.fi/tuotteet/purkuhaspeli-rp-1256-s/

SSV-Tanks. 2016. Alustava hitsausohje 18.10.2016.

Steelpipe. 2017. Spiral Welding Mills. (Steelpipe:n www-sivuilla). Päivitetty 14.3.2017. [Viitattu 14.3.2017]. Saatavissa: http://www.steelpipe.co.nz/about-steelpipe/process/mills/

Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. 2008a. Hitsauksen teoriaopetus A.6 Hitsauksen suoritus 1. [verkkodokumentti]. [Viitattu 27.1.2017]. Saatavissa: http://mandata.pp.fi/Hitsaus/ Artikkelit/A6.pdf

Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. 2008b. Hitsauksen teoriaopetus B.8 Tarkastus ja testaus. [verkkodokumentti]. [Viitattu 27.1.2017]. Saatavissa: http://mandata.pp.fi/Hitsaus/ Artikkelit/B8.pdf

Suomen Hitsausteknillinen yhdistys ry. 2008c. Hitsauksen teoriaopetus B.9 Laadunvarmistus hitsauksessa. [verkkodokumentti]. [Viitattu 9.2.2017]. Saatavissa: http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/B9.pdf

Suomen Riskienhallintayhdistys. 2017. Nelikenttäanalalyysi – SWOT. [srhy:n www-sivuilla]. Päivitetty 10.4.2017. [Viitattu 10.4.2017]. Saatavissa: http://www.pk-rh.fi/index.php?page=swot

Trafi. 2017. Vaarallisten aineiden rautatiekuljetukset. [Trafin www-sivuilla]. Päivitetty 6.3.2017. [Viitattu 3.4.2017]. Saatavissa: https://www.trafi.fi/liikennejarjestelma/vaaralliset_aineet/vak _rautatiekuljetukset

Tukes. 2003. Painelaitteet. [verkkodokumentti]. [Viitattu 5.2.2017]. Saatavissa: http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_oppaat/painelaiteopas.pdf

Tukes. 2016a. Organisaatio. [Tukesin www-sivuilla]. Päivitetty 19.8.2016. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: http://tukes.fi/fi/Tietoa-meista/tietoa-TUKESista/

Tukes. 2016b. VAK-Vaarallisten aineiden kuljetus. [Tukesin www-sivuilla]. [Viitattu 28.3.2017]. Saatavissa: http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Kemikaalit-ja-kaasu/Vaarallisten-aineiden-kuljetus/

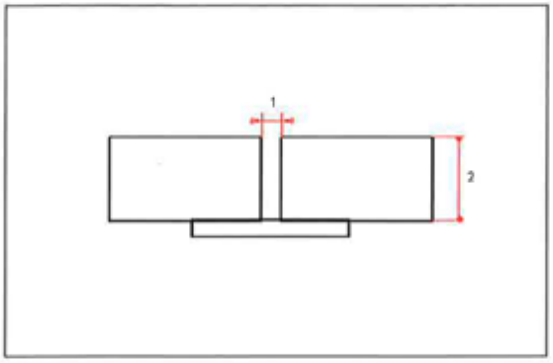
Van Es, S.H.J., Gresnigt, A.M., Vasilikis, D. & Karamanos, S.A., 2016. Ultimate bending

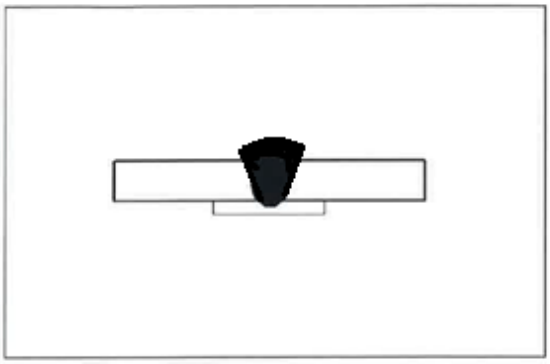
Voestalpine Böhler Welding Nordic AB. 2016. Materiaalitodistus 11.08.2016.

ALUSTAVA HITSAUSOHJE pWPS

Menet.koep. nro/ WPQR No.
Asema/ Status
Hyv.tapa/ Approval by
Käyttöalue/ Operat.range

Laatija/ Made by **Kari Kömi**
Päivämäärä/ Date **18.10.2016 Saarijärvi**
Hyv.stand./ Standard





	Perusaine/ Parent metal	Luokitus/ Classification ISO 15608	Paksuus Thickness (t)	Halkaisija Outside diam.
A	1.4420	8	2,5 - 2,5	-
B	1.4420	8	2,5 - 2,5	-

Lisäaineen käsittely/ Spec. backing or drying

	Koostumus / Composition	Standardi/ Standard	Luokitus / Classification	Virt.nop./ Flow rate l/min
Suojakaasu/ Shielding gas	**Mison N2**	**EN ISO 14175-Z-ArC+N**	**M12**	**15**
Juurikaasu/ Backing gas	**Ar**	**SFS-EN ISO 14175**	**I1**	**3-6**

Juuren yks.kohdat/ Back

Railon valm./ Groove prep. **Plasma, Hionta**
Railon puhd./ Groove cleaning **Hionta**

Palko Run	Prosessi Process	Lisäaine Filler metal	Mitta Size	Hitsaus-virta Current (A)	K.jännite Voltage (V)	Vap.lanka-pituus	Nap. Pol.	Kuij.nop. Trav.speed (cm/min)	S.nop F. Speed	L.tuonti Heat in* (kJ/cm)
1	**135**	**AVESTA P12-0-Nb EN ISO 18274 S Ni 6660 (NiCr22Mo10W3)**	**1**	**65-110**	**20-24**	**10-15**	**DC+**	**20-35**		**1,8-6,3**

Hitsauspros./ Process **131 MIG-hitsaus**
Tuotemuoto **P**
Asento/ Position **PA Jalkohitsaus**
Volframielektrodi/ Electrode
Mittausmen./ Method
Aika, lämpötila/ Time, Temp
Jälkilämpökäs./ Post Heat
Kuum.men./ Heating method
Hitsausteknikka/ Weld.Tech.

Liitosmuoto **BW**
Kor. työlämpö/ Preheat temp
Palk.väl.työlämpö/ Interp. temp
Kuumennusnop.*/ Heating rate
Jäähtymisnop.*/ Cooling rate

*Jos vaadittu/ If required

Lisätietoja/ Further Information

Pulssi käytössä.
Kuparinen juurituki jossa kaasutasku johon johdetaan juurikaasu.