

Opinnäytetyö (AMK)

Tekniikka ja liikenne

Tuotantotalouden koulutusohjelma

Kevät 2014

Timo Kylä-Nikkilä

# MEKANISOITUJEN HITSAUSPROSESSIEN LAADUN KEHITTÄMINEN

– Ruostumattomat erikoisteräkset



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Tuotantotalouden koulutusohjelma

Kevät 2014 | 54

Tuomo Rautava, Ari-Pekka Löytökorpi

Timo Kylä-Nikkilä

# MEKANISOITUJEN HITSAUSPROSESSIEN LAADUN KEHITTÄMINEN

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää Stairon Oy:n eri lajien ruostumattomien terästen mekanoitujen MIG/MAG ja TIG -hitsausprosessien laatua, jotta se vastaisi paremmin nykyisten ja tulevien asiakkaiden tarpeita sekä hitsauksen laatustandardien vaatimuksia.

Hitsausprosessien, kuten muidenkin prosessien, laadun kehittäminen on suunnitelmallista toimintaa, jolla on vaikutus organisaation pitkän ja lyhyen aikavälin toimintaan. Vaativien hitsausliitosten kohdalla sallitaan erittäin vähäinen määrä hitsausvirheitä, minkä vuoksi laadunhallinta on erittäin tärkeää. Laadun varmistamiseksi ja valmistuskustannusten optimoimiseksi täytyy prosessin olla hyvin hallittu suunnittelusta lähtien. Asiakastytyväisyys, taloudellisuus, vaihtelun hallinta ja laaja materiaalitekniinen tietotaito ovat keskeisessä asemassa pyrittäessä menestymään nykyisessä teknologia- ja konepajateollisuudessa.

Työn teoriaosassa selvennetään mekanoitujen MIG/MAG ja TIG -hitsausprosessien eri variaatioita sekä eri suojaosakomponenttien ja lisäaineiden vaikutuksia lopulliseen hitsiin.

Käytännön osuudessa käydään läpi kehitysprojektin vaiheet alun suunnitteluvaiheesta käytännön testeihin ja alustavien WPS:ien (hitsausohjeiden) muodostumiseen asti. Lopuksi pohditaan projektin kulkua ja tuloksia sekä vaikutuksia yrityksen toimintaan.

Kehitysprojektin avulla Stairon Oy onnistui parantamaan hitsausprosessien laatua sekä nopeuttamaan hitsausprosessejaan saaden samalla kokemusta ja tietotaitoa korkeaseosteisten ruostumattomien austeniittisten ja austeniittis-ferriittisten (duplex) terästen hitsauksesta, hitsattavuudesta ja metallurgiasta.

ASIASANAT:

Mekanoitu hitsaus, orbitaalihitsaus, laadun kehitys, ruostumaton teräs

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Industrial Management Engineering

Spring 2014| 54

Tuomo Rautava, Ari-Pekka Löytökorpi

Timo Kylä-Nikkilä

## DEVELOPMENT OF QUALITY OF MECHANIZED WELDING PROCESSES

The aim of the thesis was to improve Stairon Ltd.'s quality of mechanized GMAW and GTAW welding processes for high alloyed austenitic and austenitic-ferritic stainless steels in order to meet the requirements of present and future customers as well as the welding quality standards.

In welding processes, such as in any other industrial processes, quality development and control are very determined operations which both have short and long-term effects on the whole organization and its competitiveness.

Demanding weld joints allow almost zero defects which places quality control and the whole welding process at a very high level of importance. To ensure the quality and to optimize manufacturing costs the whole process is required to be in control from the very beginning.

In the theoretical part, the mechanized GMAW and GTAW processes are introduced and the effects of different shielding gas components and filler materials are reviewed. In the practical part, the whole quality development process from the designing to the actual testing for creating the preliminary WPS' (Welding Procedure Specifications) are followed through.

The quality development project succeeded to fulfill its requirements to increase and speed up the welding processes at the same time giving the company more knowledge and experience on high alloyed austenitic and duplex steel welding, weldability and metallurgy.

### KEYWORDS:

Mechanized welding, Orbital welding, Quality Control, Stainless steel

# SISÄLTÖ

<b>KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
1.1 Työn tausta ja tavoitteet	8
1.2 Tutkimuksen esittely	9
1.3 Stairon Oy	9
<b>2 MEKANISOIDUT HITSAUSPROSESSIT</b>	<b>11</b>
2.1 MIG/MAG-saumahitsaus	11
2.2 TIG-orbitaalihitsaus	12
2.3 Pulssihitsaus	13
<b>3 SUOJAKAASUVALINTOJEN JA HITSAUSPARAMETRIEN VAIKUTUS HITSAUSLAATUUN</b>	<b>15</b>
3.1 Suojakaasut	15
3.1.1 Argon (Ar)	16
3.1.2 Helium (He)	16
3.1.3 Hiilidioksidi (CO <sub>2</sub> ) ja happi (O <sub>2</sub> )	16
3.1.4 Vety (H <sub>2</sub> )	17
3.1.5 Typpi (N <sub>2</sub> ) ja typpimonoksidi (NO)	18
3.1.6 Kaasuvirtaus	19
3.2 Kaarijännite, hitsausvirta ja langansyöttönopeus	19
3.3 Suutinetäisyys, hitsausnopeus ja polttimen kuljetusasento	20
<b>4 RUOSTUMATTOMIEN AUSTENIITTISTEN JA AUSTENIITTIS-FERRIITTISTEN TERÄSTEN OMINAISUUDET JA HITSATTAVUUS</b>	<b>21</b>
4.1 Austeniittiset teräkset	22
<b>Hitsattavuus</b>	<b>23</b>
4.2 Austeniittis-ferriittiset teräkset	24
4.2.1 Hitsattavuus	25
4.2.2 Korjaus- ja päällehitsaus	27
4.3 Kehitysprojektin teräslaadut	28
4.3.1 Duplex 2205 Code Plus Two (EN 1.4462)	28
4.3.2 Super Duplex 2507 (EN 1.4410)	29

4.3.3 254 SMO (EN 1.4547)	30
4.3.4 Nicrofer 3127 hMo - Alloy 31 (EN 1.4562)	30
<b>5 HITSUKSEN LAADUNVARMISTUS JA -HALLINTA</b>	<b>32</b>
5.1 SFS-EN ISO 3834 – Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset	32
5.1.1 Stairon Oy:lle suositeltavat keskeisimmät menettelyohjeet	33
<b>6 KÄYTÄNNÖN HITSAUSKOKEET JA KEHITYSTYÖ</b>	<b>35</b>
6.1 Aloitus	35
6.2 Mekanisoitu saumahitsaus	35
6.2.1 Aloitus	36
6.2.2 Hitsausohjelmien, suojakaasujen ja lisäaineiden yhteensovittaminen	37
6.2.3 Kokeiden suorittaminen	38
6.2.4 Tulokset	40
6.3 Orbitaalihitsaus	42
6.3.1 Aloitus	43
6.3.2 Hitsauskokeet	44
6.3.3 Tulokset	47
<b>7 YHTEENVETO</b>	<b>50</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>52</b>

## KUVAT

Kuva 1. Saumahitsaussolu.	11
Kuva 2. TIG-orbitaalihitsauslaitteisto.	13
Kuva 3. Epäväkaan valokaaren aiheuttama pintavirhe.	35
Kuva 4. Hitsi ilman valokaaren oireilua.	41
Kuva 5. Tasainen juuren tunkeuma.	41
Kuva 6. Hallitsematon tunkeuma.	42
Kuva 7. Hallitsematon sulan muodostuminen ja reunahaava.	43
Kuva 8. Sisäpuolen tunkeuma.	47
Kuva 9. Ulkopuolen hitsi.	48

## KUVIOT

Kuvio 1. Yleisimmät austeniittiset teräslaadut.	23
-------------------------------------------------	----

Kuvio 2. Yleisimmät austeniittis-ferriittiset teräslaadut.	25
Kuvio 3. Prosessikaavio saumahitsaus.	36
Kuvio 4. Orbitaalihitsaus prosessikaavio.	43

## TAULUKOT

Taulukko 1. Vedyn ja heliumin vaikutus kaarijänniteeseen.	18
Taulukko 2. Faasirakenteen muodostuminen nikkeli- ja kromipitoisuuden funktiona.	21
Taulukko 3. WRC-92–diagrammi.	27
Taulukko 4. Synergiakäyrät ja yhteensopivat suojakaasut ja lisäaineet.	37
Taulukko 5. Koehitsaustaulukko L18, 1.4410.	39
Taulukko 6. Esimerkki vastetaulukosta L <sub>8</sub> .	40
Taulukko 7. 254 SMO kokeissa käytettävät lisäaine, elektrodi ja suojakaasu.	44
Taulukko 8. Koehitsaustaulukko L27, 1.4547	45
Taulukko 9. Koehitsaustaulukko L9, 1.4547	46

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

DOE	Teollinen koesuunnittelu (Design of Experiments).
FCAW	Täytelankahitsaus (Flux Core Arc Welding).
HAZ--vyöhyke	Hitsin muutosvyöhyke (Heat Affected Zone).
Jäähtymisnopeus $t_{8/5}$	Jäähtymisnopeutta lämpötilavälillä 800-500 °C kuvaava suure.
MIG/MAG	Kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa suo- jakaasun ympäröimänä lisäaineen ja perusaineen välil- lä.
NDT–menetelmä	Hitsiä murtamaton testausmenetelmä (Non Destructive Testing).
PA	Jalkoasentohitsin tunnus.
PD	Yläpienahitsauksen tunnus.
PE	Lakiasentohitsin tunnus.
PF	Pystyasentoisen ylöspäinhitsauksen tunnus.
Taguchi–menetelmä	Japanilaisen tohtorin Genichi Taguchin kehittämä laa- tufilosofia
TIG	Kaasukaarihitsausprosessi sulamattomalla volframie- lektrodilla, jossa valokaaripalaa elektrodin ja perusai- neen välillä suojakaasun ympäröimänä.
PWPS	Alustava, esituotannollinen hitsausohje (Preliminary Welding Procedure Specification)
WPS	Hitsausohje (Welding Procedure Specification).

# 1 JOHDANTO

Teknologia- ja konepajateollisuus ovat toimialoina erittäin kilpailtuja, josta johtuen katteiden osuudet ovat näin ollen myös hillittyjä. Pysyäkseen kilpailukykyisenä ja saavuttaakseen etua markkinoilla on yrityksen panostettava korkeaan asiakastytyväisyyteen ja luotettavuuteen, korkeaan laatuun ja taloudelliseen toimintaan, joka osaltaan vaatii myös automaatiotason nostamista.

Laatu kokonaisuutena on itsessään enemmän kuin tekijöidensä summa. Se on kilpailutekijä, jolla on merkittävä vaikutus yrityksen talouteen ja julkiskuvaan. Jokainen riittämättömän laadun aiheuttama kustannus on suoraan pois yhtiön tuottamasta tuloksesta, kun taas laatusäästöillä on monesti jopa kerrannainen vaikutus tulokseen. Tuottavan teollisuuden virhekustannusten hallinta ja minimointi - niin sisäisten kuin ulkoisten – on erittäin tärkeää, kun tavoitellaan kilpailuetua haastavilla markkinoilla.

## 1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Opinnäytetyö on tehty toimeksiantona teknologiateollisuuden yritykselle Stairon Oy:lle tarkoituksena kehittää korkeaseosteisten ruostumattomien ja haponkestävien terästen mekanisoitujen hitsausprosessien laatua ja toimintaa. Taustalla on Stairon Oy:lle tehdyt tilaukset erilaisten prosessiteollisuuden ja merenkulun rikkipesureiden valmistuksesta, joissa laatuvaatimukset ovat erittäin tarkkoja ja valmistusmateriaalit vaativat hitsausprosessilta enemmän tarkkuutta perinteisiin niukkaseosteisiin teräksiin verrattuna.

Kehitystyötä tarvittiin, sillä kaikkien valmistettujen rakenteiden hitsit eivät täyttäneet niille asetettuja laatuvaatimuksia, joka puolestaan aiheutti merkittäviä lisäkustannuksia korjaushitsausten, tilausten viivästymisten, ylitöiden ja kärsivien asiakassuhteiden muodossa.

Kehittämishankkeen tavoitteena oli saada hitsausprosessit toimimaan niiltä vaadituilla tavoilla, sekä pienentää vaihteluja laadussa, jotta kaikki hitsit läpäisi-



sivät laatuselan ja korjaustöiltä välttyttäisiin. Samalla tarkoituksena oli TIG-orbitaalihitsauksen laajempi käyttöönotto tuotantoon muun muassa pesureiden putkien hitsauksessa.

## 1.2 Tutkimuksen esittely

Opinnäytetyö keskittyy hitsauksen laadunkehitystyöhön teollisen koesuunnittelun näkökulmasta suorittamalla hitsauskokeita vaadituilla materiaaleilla pyrkimyksenä testata ja erottaa laadulle merkittävät tekijät epäsovivista.

Koesuunnittelulla pyritään ensisijaisesti aikaansaamaan haluttu prosessi oleellisten yhteen laskeutuvien tekijöiden avulla. Teollisen koesuunnittelun toissijaisena tavoitetta, asioiden syy-seuraus-suhteiden selvittämistä, selvennetään työhön sisältyvien teoriaosuuksien avulla. Suunniteltujen kokeiden avulla etsitään luokusten ratkaisujen joukosta laadullisesti ja tuotannollisesti tehokkainta kombinaatiota, joista on tavoitteena johtaa lopulliset hitsausohjeet tuotantoon.

Teoriaosuudet kattavat esittelyt mekanisoidusta MIG/MAG-saumahitsauksesta sekä TIG-orbitaalihitsauksesta ja niiden operointiperiaatteista pääpiirteittäin, eri hitsausparametrien vaikutuksista hitsiin ja hitsausvirheiden syntyyn, pesurissa käytettävien materiaalien ominaisuuksista ja hitsattavuudesta sekä laadunvarmistusmenetelmien pääperiaatteista.

## 1.3 Stairon Oy

Stairon Oy on Turun Pansiossa sijaitseva kansainvälinen teknologiateollisuuden pk-yritys, joka valmistaa erilaisia prosessiteollisuuden laitteistokokonaisuuksia ruostumattomasta ja haponkestävästä teräksestä sekä alumiinista eri teollisuuden aloilla toimiville asiakkaille. Yhteistyökumppaneina toimivat muun muassa Outotec, Metso, Wärtsilä ja Andritz. Stairon työllistää noin 70 henkilöä, ja liikevaihto noin 10 miljoonaa euroa tilivuonna 2012. (Kauppalehti 2013.)

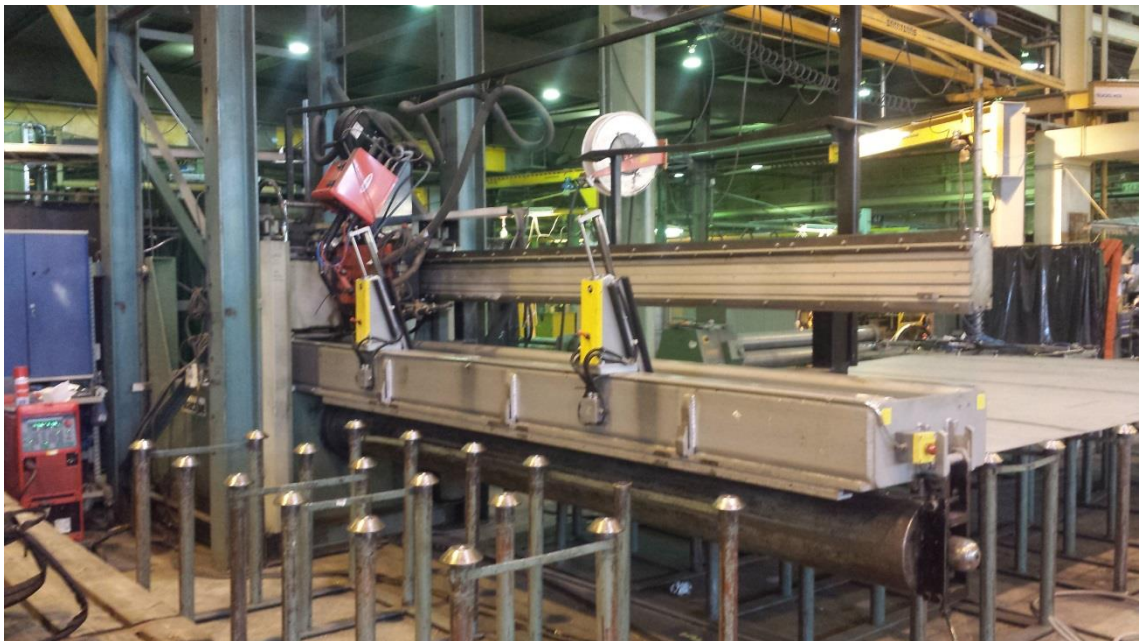
Stairon perustettiin kaupan yhteydessä vuoden 2009 toukokuussa, kun konepajakonserni Metso myi Metso Paper Turku Works -yksikkönsä neljälle aikaisemmalle työntekijälleen sekä naantalilaiselle konepajayhtiö Sepimalle. Metson Turun yksikön entinen tuotantopäällikkö, Tapio Hussi, siirtyi Staironin toimitusjohtajaksi ja samalla uuden yrityksen pääomistajaksi. Uudesta nimestä huolimatta, Stairon Oy:llä on siis vahva tietotaito ja toiminnallinen kokemus useamman vuosikymmenen takaa, aina Metson yksikköä edeltäneen Valmet Oy Pansion Telakan ajoista 60-luvulta saakka. (Stairon Oy 2013.)

## 2 MEKANISOIDUT HITSAUSPROSESSIT

Kehitystyö keskittyy kahteen Stairon Oy:n mekanoituun hitsausprosessiin: MIG/MAG-saumahitsaukseen ja TIG-orbitaalihitsaukseen, joissa molemmissa käytetään menetelmäjä pulssihitsausta.

### 2.1 MIG/MAG-saumahitsaus

Mekanisoidun saumahitsauksen etuina ovat suuri hitsausnopeus ja tuottavuus sekä helppo valokaaren ja sulan hallinta. Saumahitsaussolu (Kuva 1.) on tarkoitettu suurien levyateriaalien PA/1G-jalkoasentoisten päittäisliitosten hitsaukseen yhtä tai useampaa palkoa käyttäen.



Kuva 1. Saumahitsaussolu.

Hitsauslaitteistona käytetään Fronius TPS 3200 -virtalähdettä sekä VR4000-langansyöttölaitteistoa. Kuljetuslaitteisto on erikseen suunniteltu ja rakennettu solun käyttötarkoitusta varten. Kuljetus- ja hitsauslaitteiston ohjaukseen käytetään Kemec Weldin valmistamaa ohjausyksikköä, jonka avulla voidaan hallita tavanomaisimpia hitsaus- ja kuljetusparametreja. Levyjen kohdistukseen käytetään

tään erillistä paineilmakäyttöistä prässä, joka puristaa levyt kuparista juuritukea vasten.

Fronius TPS -laitteiston etuna on muun muassa materiaalikohtaisten synergiakäyrien käyttö, joiden avulla operaattorin tehtäväksi jää perusaineen, ainevahvuuden ja liitosmuodon määrittäminen laitteistoon. Koneen säätäminen suoritetaan käyttäen yhtä säätönappia, jolla voidaan muuttaa valittua parametria, jonka perusteella koneen ohjauselektronikka huolehtii synergisesti muiden parametrien ja muuttujien säätäytymisestä. (Fronius International GmbH 2013.)

Rikkipesureiden valmistuksessa käytetyt erikoisteräkset vaativat Froniukselta erikseen valmistetut synergiakäyrät tietyille lisäaine- ja suojakaasukoostumuksille.

## 2.2 TIG-orbitaalihitsaus

Mekanisoidun TIG-hitsauksen etuina ovat korkeatasoinen jälki ja korkea tuottavuus. Tasaisten saumojen ansiosta estyvät epäpuhtauksien ja virtaavien aineiden tarttumisen hitsiin. Sulan hallinta varsinkin ruostumattomilla erikoisteräksillä on paikoin haastavaa elektrodin kiertäessä kappaleen kokonaisuudessaan ympäri, tarkoittaen kaikkien liitostyyppiin kuuluvien hitsausasentojen suorittamista. Sulan hallinnan avuksi asentokohtaiset parametrit voidaan säätää tarkasti jakamalla putken osat eri sektoreihin.



Kuva 2. TIG-orbitaalihitsauslaitteisto.

ESAB C2002i:n etuna ovat virran ja langansyötön pulssitoiminnot (kaksoispulssi) ja niiden manuaalisäätö, jonka avulla säätää voi niin pulssiaikaa kuin taajuuttakin. Järjestelmä tallentaa jokaisesta hitsistä täydellisen dokumentaation koneen arkistoon ja samalla myös laskee sektorikohtaiset keskiarvot hitsausparametreille, helpottaen laadunvalvontaa. Järjestelmä osaa generoida ohjelma-karttoja yleisimmille materiaaleille käyttäjän antamien tietojen perusteella putken halkaisijasta, materiaalista, ainevahvuudesta ja liitoksesta. (ESAB Oy 2013.)

### 2.3 Pulssihitsaus

Molemmissa edellä mainituissa menetelmissä käytetään pulssitettua valokaarta hitsausprosessissa, jotta muun muassa materiaalien lämmöntuontirajat eivät ylittyisi ja asentohitsauksen sulanhallinta olisi helpompaa. Pulssitettu valokaari sallii myös suuremmat kuljetus- ja langansyöttönopeudet, jotka sopivat hyvin mekanisoituihin hitsausprosesseihin.

Pulssihitsauksessa aineensiirtyminen valokaaresta sulaan tapahtuu suihkumaisesti pisaramuodossa syöttämällä perusvirran (taustavirta) päälle virtapulsseja (huippuvirta) suurella taajuudella (50-350 Hz). Jokainen pulssi muodostaa lisäaineesta yhden pisaran ilman oikosulkua. Taajuus vaikuttaa syntyneiden pisaroiden lukumäärään ja lopulliseen lämmöntuontiin. Pulssihitsauksen laadussa oleellista on muodostuneiden sulapisaroiden hallittu siirtymä, joka saavutetaan tarkasti huolellisesti valmistetuilla synergiakäyrillä. (Lukkari 2002, 171-172.)

Pulssihitsauksen avulla lämmöntuonti on pienempi ja hallitumpi kuin kuumakaa-rihitsauksessa saavuttaen kuitenkin saman tunkeuman. Pienemmän hitsausenergian vuoksi kaari on helpommin hallittavissa ja vetelyitä esiintyy vähemmän. Pulssin käyttö sallii myös suuremman lisäainepaksuuden samalla nostaen prosessin tuottavuutta. (Lukkari 2002, 171-172.)

Paksumpi lisäaine rajoittaa myös huokosten muodostumista, sillä näin lisäaineen pinta-ala kasvaa railotilavuuteen nähden, minkä vuoksi hitsistä saavutetaan tiiviimpi, sillä sulaan jää vähemmän epäpuhtauksia. (Lukkari 2002, 171-172.)

### **3 SUOJAKAASUVALINTOJEN JA HITSAUSPARAMETRIEN VAIKUTUS HITSAUSLAATUUN**

Käytettävälle prosessille, materiaalille sekä menetelmälle yhteensopivat hitsausparametrit muodostavat lopullisen laadun merkittävimmät tekijät mekanioidussa hitsauksessa.

#### **3.1 Suojakaasut**

Suojakaasun päätehtävänä on suojata sulaa reagoimasta ilman ja sen epäpuhauksien kanssa sekä edesauttaa valokaaren ihanteellista palamista. Kaasusuojauksen puuttuessa tai ollessa riittämätön ilman sisältämä happi hapettaa sulan sekä typpi ja kosteus muodostava huokosia huonontaan näin hitsin mekaanisia ominaisuuksia. Suojakaasun vaikutus hitsaustapahtuman eri vaiheissa on hyvin laaja, joten sen vaikutus laadullisiin tekijöihin on merkittävä, erityisesti hitsattaessa korkeaseosteisia teräksiä. Suojakaasuvalinnoilla on suora vaikutus seuraaviin tekijöihin:

- valokaaren ominaisuudet
- sulan suojaus
- tunkeuma
- roiskeiden muodostuminen
- hitsin mekaaniset ja metallurgiset ominaisuudet
- hitsin profiili ja ulkonäkö
- kuljetusnopeus
- tuottavuus
- lisäaineen siirtyminen
- huurujen muodostuminen
- elektrodin suojaus (TIG). (Lukkari 2002, 196-197.)

Vaikka MIG/MAG-hitsaus ja TIG-hitsaus ovatkin eri menetelmiä, kyseessä on kummassakin tapauksessa kaasukaarihitsausprosessi, jossa suojakaasun osuus on tärkeää. MIG/MAG-hitsauksesta poiketen TIG-hitsauksessa elektrodi ei sula, joten kuumaa volframia estetään hapettumasta inertin suojakaasun avulla. (ESAB Oy 2013.)

### 3.1.1 Argon (Ar)

Argon on lähes kaikkien suojakaasujen pääkomponentti. Se on inertti kaasu, joka ei reagoi kemiallisesti sulan kanssa ja sopii siksi pääkomponentiksi useimpiin suojakaasuyhdisteisiin. (Suojakaasukäsikirja 2010, 5.)

### 3.1.2 Helium (He)

Helium on argonin tapaan inertti kaasu, jota käytetään yleisesti joko puhtaana tai argon-seosteisena. Heliumin avulla saavutetaan suurempi kaarienergia, jonka avulla saadaan aikaan syvämpi tunkeuma ja mahdollistetaan suuremman hitsausnopeuden käyttö. Tämä on eduksi mekanisoiduissa hitsausprosesseissa. Heliumilla haittapuolena on sen aikaansaama valokaaren herkkyys pituudenmuutoksille vaikuttaen myös kaarijännitteeseen. (Suojakaasukäsikirja 2010, 6.)

### 3.1.3 Hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>) ja happi (O<sub>2</sub>)

Hiilidioksidi ja happi ovat aktiivikaasuja, jotka reagoivat hitsisulan kanssa kemiallisesti. Ruostumattomien terästen hitsauksessa puhtaan argonin käyttö tekee valokaaresta epävakaa, jolloin kaaren liikehdinnän vakauttamiseksi ja tasaisen aineensiirtymisen varmistamiseksi suojakaasuun tarvitaan lisäksi hapettava komponentti. (Lukkari 2002, 198-201.)

Kaasukaarihitsausprosesseissa valokaari voidaan jakaa kolmeen osaan: positiiviseen elektrodiin eli anodiin (lisäaine), katodiseen alueeseen, joka muodostuu

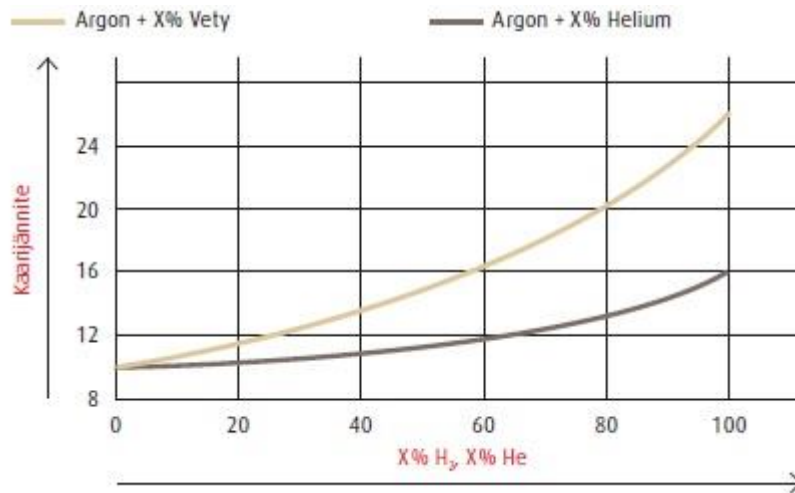


yhdestä tai useammasta katodipisteestä perusaineessa, ja kaariplasmaan. Aktiivikaasua tarvitaan vakauttamaan liikehdintä näiden pisteiden välillä. (Suojakaasukäsikirja 2013, 5.)

Hapettavana komponenttina voidaan käyttää kumpaakin aktiivikaasua yhdessä tai erikseen. Hapen hapettamiskyky on hiilidioksidiin nähden noin kolminkertainen, joka aiheuttaa suuremman seosainekadon sulaan. Hiilidioksidilla saavutetaan happeen verrattuna parempi hitsin ulkonäkö ja geometria, mikä johtuu sulan pintajännityksen ja hapettumismäärän eroista, jotka vaikuttavat sulan juoksevuteen. Hiilidioksidin avulla saadaan myös parempi tunkeuma, sillä sen avulla saavutetaan suurempi kaarijännite ja -paine. Hiilidioksidi kuitenkin lisää oksidisulkeumien ja huokosten muodostumista varsinkin hitsattaessa austeniittis-ferriittisiä teräksiä, joten pitoisuudet kaasuseoksessa tulee pitää pieninä. (Suojakaasukäsikirja 2010, 5; Westin 2013.)

#### 3.1.4 Vety ( $H_2$ )

Vetyä voidaan käyttää muun muassa TIG-suojakaasun seoskomponenttina austeniittisten ruostumattomien terästen hitsauksessa. Heliumin tapaan vety mahdollistaa suuremman kaarienergian (Taulukko 1) ja mahdollistaa suuremman kuljetusnopeuden ja tunkeuman. Vedyn avulla saavutetaan myös hitsin jouhevampi liittyminen perusaineeseen samalla vähennetään sulan hapettumista. (Suojakaasukäsikirja 2010, 6.)



Taulukko 1. Vedyn ja heliumin vaikutus kaarijänniteeseen. (Suojakaasukäsikirja 2010, 6)

Duplex-teräksiä hitsattaessa vedyn käyttöä suojakaasussa ei suositella, sillä yhdistettynä suureen ferriittipitoisuuteen ylimääräinen vety voi aiheuttaa vetyhaurautta. (Duplex ruostumattomien terästen hitsaus 2004, 8.)

Juurensuojakaasuun lisättyä vedystä on hyötyä sen oksideja pelkistävän vaikutuksen vuoksi. Kuitenkin austeniittis-ferriittisten terästen juurensuojauksessa on suositeltavaa käyttää puhdasta argonia tai tyyppiä niiden soveltuessa tehtävään paremmin. (Suojakaasukäsikirja 2010, 6.)

### 3.1.5 Typpi (N<sub>2</sub>) ja typpimonoksidi (NO)

Tyyppiä käytetään tyypiseosteisten austeniittisten sekä duplex-terästen yhtenä suojakaasukomponenttina estämään hitsauksen aikana tapahtuvaa typpikatoa ja samalla parantamaan hitsin mekaanisia ominaisuuksia ja korroosionkestoa sekä ehkäisemään delfa-ferriittin muodostumista. (Tseng & Chou 2002, 55, Suojakaasukäsikirja 2010, 6.)

Pieniä, noin 0,03 %, typpimonoksidipitoisuuksia käytetään ehkäisemään otsonin muodostumista hitsauksen aikana. Lisäyksellä ei ole muuta vaikutusta hitsaus-

tapahtumaan, joissakin tapauksissa typpimonoksidi voi helpottaa kaaren hallintaa. (Suojakaasukäsikirja 2010, 6.)

### 3.1.6 Kaasuvirtaus

Kaasuvirtauksen tulee olla riittävän suuri, jotta se syrjäyttää ilman kaaritulasta ympäröivän ilman virtauksista huolimatta. Liian suurilla virtausarvoilla kaasuvirtaus muuttuu turbulenttiseksi, jolloin pyörteinen virtaus sekoittaa ilmaa kaaritiilaan. (Lepola 2006, 22.)

Hitsauskäsikirjoissa ilmoitettavien virtauksien laskukaavoissa on otettava huomioon, että ohjearvot koskevat puhdasta argonia, jolloin käytettäessä kevyempiä komponentteja, kuten heliumia, on tilavuusvirran oltava noin kaksinkertainen ja heliumvaltaisilla seoksilla yli kolminkertainen. (Lepola 2006, 121.)

### 3.2 Kaarijännite, hitsausvirta ja langansyöttönopeus

Valokaaren pituus on suoraan verrannollinen kaarijännitteeseen. Suuri kaarijännite suhteessa langansyöttöön kehittää pitkän valokaaren, joka vaikuttaa laajempaan alueeseen perusaineessa. Tämän vuoksi sula leviää laajemmalle alueelle muodostaen hitsistä leveän ja matalakupuisen. Liian suuri syöttönopeus kaarijännitteeseen nähden taas pienentää kaaren tehoa sulattaa lisäainetta. (Lepola 2006, 22.)

Valokaaren pituudella on myös suora vaikutus hitsin tunkeumaan, suuri kaarijännite pienentää tunkeumaa. Virran lisääminen huonon tunkeuman kompensoimiseksi lisää kaaren sulatustehoa, joka puolestaan nostaa lämmöntuontia. Suuri kaarijännite nostaa sulan lämpötilaa tehden siitä herkkäliikkeisen ja vaikeasti hallittavan. Suurella kaarijännitteellä on lisäksi seuraavat vaikutukset:

- laajempi HAZ-vyöhyke
- huokosten muodostuminen
- herkkyys reunahaavalle

- suuttimen tukkeutuminen
- roiskeet
- kaaren ääni on pehmeä. (Lepola 2006, 22.)

Synergisiin hitsauskoneisiin hitsausvirran ja langansyötön suhde kaarijännitteeseen on optimoitu, ja parametrit muuttuvat synergisesti yhtä muuttujaa muutettaessa. Materiaalikohtaisista synergiaikäyristä huolimatta kaarijännitteeseen joudutaan välillä tekemään muutoksia johtuen lisäainelankojen välisistä eroista niiden seossuhteissa eri valmistajien välillä. Tämän vuoksi hitsausohjelman valmistajan suosituksia tulisi noudattaa hitsausvirheiden välttämiseksi, vaikka standardi sallisikin poikkeavan lisäainekoostumuksen. (Karjalainen 2013.)

### 3.3 Suutinetäisyys, hitsausnopeus ja polttimen kuljetusasento

Vapaalangan pituutta säädellään suuttimen etäisyydellä. Vapaalangan pidentyessä sähkövastus kasvaa, jolloin osa kaarienergiasta hukkuu vastauksen aiheuttamaan vapaalangan lämpenemiseen pienentäen tunkeumaa. Vastaavasti suutinetäisyyttä pienentämällä virta kasvaa ja samalla saadaan aikaan parempi tunkeuma. (Lepola 2006, 22.)

Kuljetusnopeuden vaikuttaa hitsin tunkeumaan, palon muotoon ja lämmöntuontiin. Pienellä kuljetusnopeudella valokaari palaa ylimääräisen sulan päällä, jolloin tunkeumaa ei välttämättä muodostu riittävästi. Sula voi myös vyöryä edelle muodostaen liitosvirheen. Pieni hitsausnopeus suurentaa lämmöntuontia ja laajentaa HAZ-vyöhykettä. Liian suuri hitsausnopeus aiheuttaa riittämättömän tunkeuman sekä epätasaisen aineensiirtymän ja palkomuodon. Suuri hitsausnopeus on myös riski huokosten ja onteloiden muodostumiselle. (Lepola 2006, 124.)

Umpi- ja metallitäytelangoilla hitsattaessa käytetään lähes poikkeuksetta työntävää kolvin asentoa, jotta pistoolista virtaava suojavaasu antaisi riittävän kaasusuojan. Työntävä kolvin asento myös laajentaa lämmöntuontialuetta hitsin edelle madaltaen hitsikupua. (ESAB Oy 2013.)

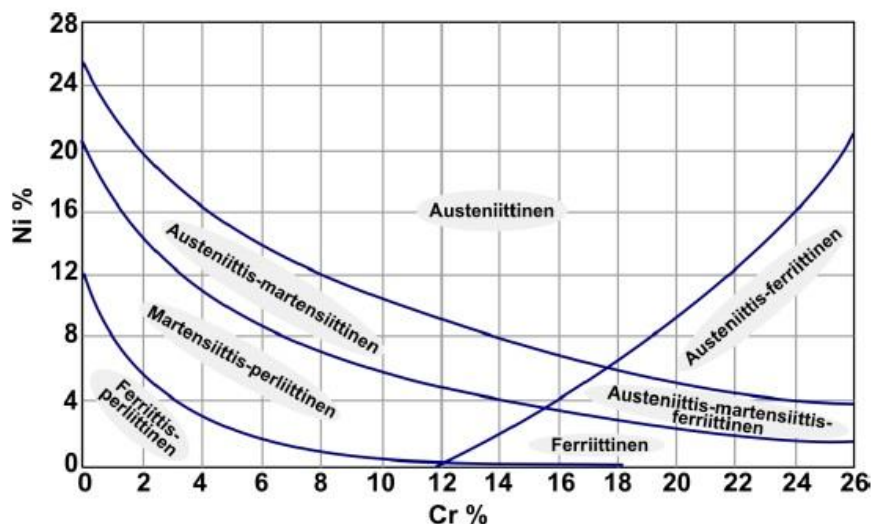
## 4 RUOSTUMATTOMIEN AUSTENIITTISTEN JA AUSTENIITTIS-FERRIITTISTEN TERÄSTEN OMINAISUUDET JA HITSATTAVUUS

Ruostumattomat teräkset ovat korkeintaan 1,2 % hiiltä sisältäviä rautaseoksia, joihin on lisätty kromia vähintään 10,5 %, jotta se muodostaisi materiaalin pintaan stabiilin kromioksidi-passiivikalvon suojaamaan korroosiolta. Muita yleisiä seosaineita ovat kromin lisäksi nikkeli, molybdeeni sekä typpi. (Lukkari 2012.)

Ruostumattomat teräkset jaetaan neljään pääluokkaan pääseostuksen mukaan:

- austeniittiset
- austeniittis-ferritiittiset
- ferritiittiset
- martensiittiset ruostumattomat teräkset. (MET 2001, 15.)

Taulukossa 2 esitetään faasirakenteen muodostumisen kromin ja nikkelin seosmäärien funktiona.



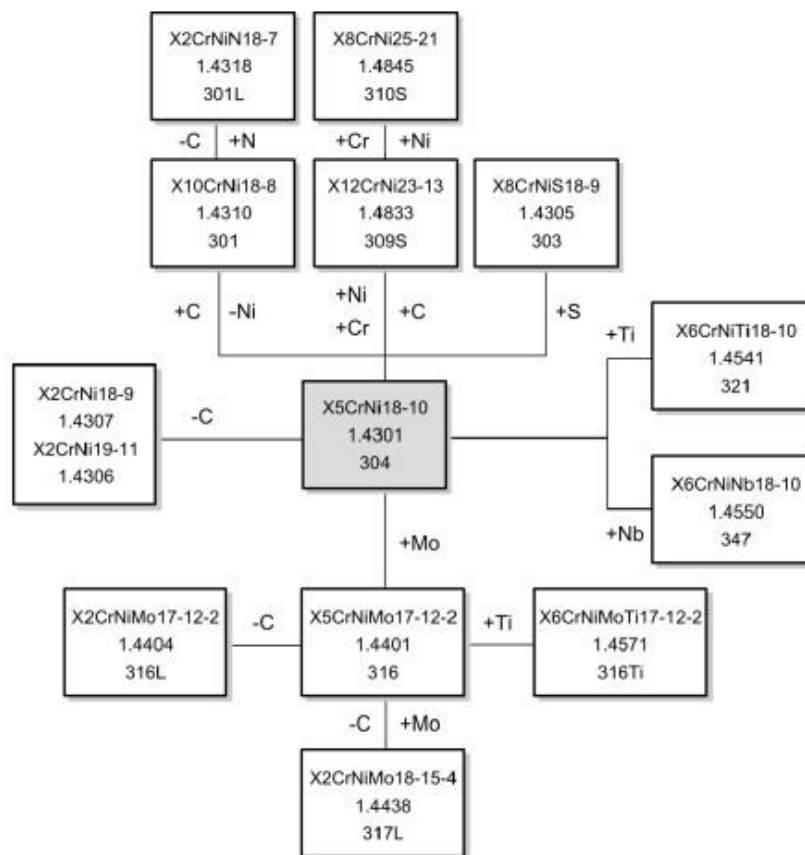
Taulukko 2. Faasirakenteen muodostuminen nikkeli- ja kromipitoisuuden funktiona (MET 2001, 12.).

#### 4.1 Austeniittiset teräkset

Austeniittiset teräslaadut ovat pääosin 16–25 % Cr, >6 % Ni -seosteisia. Nikkelin seostamisen tarkoituksena on saada austeniittinen faasimuutos pysyväksi ferriittistä kiderakennetta suosivasta kromista ja lämpötilasta huolimatta. Mikäli korkea nikkelpitoisuus ei ole toivottu ominaisuus, voidaan austeniittinen kiderakenne varmistaa myös mangaaniseostuksella. Vähänikkelisten mangaaniseosteisten terästen käytössä on kuitenkin usein ilmennyt korroosionkesto-ongelmia. Austeniittisestä teräsluokasta tekee käytetyimmän sen ominaisuudet, esimerkiksi:

- helppo hitsattavuus verrattuna muihin laatuihin
- erinomainen korroosionkesto (superaustenniittiset teräkset)
- erinomainen muovattavuus
- suuri sitkeys matalissa lämpötiloissa. (Kyröläinen & Lukkari 2002, 15.)

Austeniittisillä teräksillä on myös huonotkin puolensa: hitsaus aiheuttaa paljon muodonmuutoksia. Tämän lisäksi austeniittiset teräkset muokkauslujittuvat helposti tehden lastuamisesta ongelmallista ja ne ovat altistuvat helpommin jännityskorroosiolle. Kuviossa 1 esitetään yleisimmät austeniittiset teräslaadut ja niiden eroavuudet seostuksissa. (Väisänen & Paro 2000.)



Kuvio 1. Yleisimmät austeniittiset teräsalaadut (Cunat 2007.).

## Hitsattavuus

SFS-EN 1011-3 -standardi jakaa austeniittiset teräkset kahteen pääryhmään: vakioteräkset ja erikoisteräkset. Vakioteräkset sisältävät pienen määrän ferriittiä ja joiden hitsauksessa käytetään ferriittiä sisältäviä lisäaineita. Erikoisteräkset eivät sisällä lainkaan ferriittiä ovat niin sanottuja superausteniittisiä teräksiä, joiden hitsauksessa käytetään puhtaasti austeniittisiä lisäaineita. (Lukkari 2012)

## Vakioteräkset

Austeniittisten vakioterästen hitsauksessa todetaan nykyisin harvoin ongelmallaneita. Suuretkaan (yli 5,5 kJ/mm) lämmöntuontiarvot eivät vaikuta hitsin ominaisuuksiin tai kuumahalkeilutaipumukseen. Tämä johtuu perus- ja lisäaineen sisältämästä ferriitistä, joka estää tehokkaasti kuumahalkeilua sitomalla epä-

puhtauksia (rikki ja fosfori) tehokkaammin kuin austeniitti. Käytettävien lisäaineiden tulee olla yliseosteisia, jotta korroosionkesto-ominaisuudet säilyvät vähintään perusaineen tasoisena. (Kyröläinen & Lukkari 2002, 71, 78 & 141)

Vakioterästen ongelmana ovat suuret hitsausmuodonmuutokset, joita ehkäisemään kappaleet tulee kiinnittää ja silloittaa huolella. Paineastioiden ja suurien käyttölämpötilojen rakenteiden hitsien ferriittipitoisuus tulee B-luokan hitseissä arvioida diagrammien avulla, sillä ferriittipitoisuus vaikuttaa huomattavasti hitsin iskutkeyteen poikkeuksellisissa olosuhteissa. (Kyröläinen & Lukkari 2002, 141-145.)

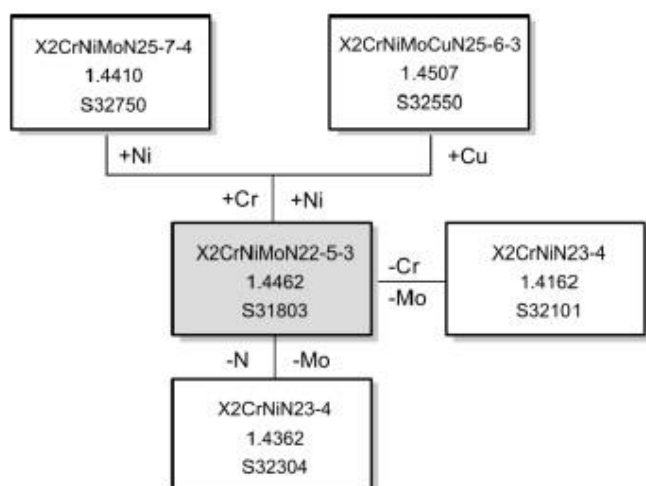
### **Erikoisteräkset**

Austeniittisiä erikoisteräksiä hitsattaessa lisäaineina käytetään nikkeliseosteisia lankoja, jolloin riski kuumahalkeiluun kasvaa. Tämän vuoksi vakioteräksiin nähdessä huomattavasti tarkempia lämmöntuontirajoja on syytä noudattaa laadukseen lopputuloksen varmistamiseksi. Erikoisterästen käytössä keskeistä on korroosiokestävyys, joka on varmistettava hitsauksen yhteydessä. (Kyröläinen & Lukkari 2002, 141-145.)

#### 4.2 Austeniittis-ferriittiset teräkset

Uusin ruostumattomien terästen ryhmä ovat austeniittis-ferriittiset teräkset, yleisnimityksiltään duplex-teräkset, joiden mikrorakenne muodostuu austeniittistä ja ferriitistä vaihdellen 30-70 % välisellä seossuhteella (nykyiset laadut yleensä 50-50%-suhteella). Duplex-teräkset ovat moniseosteisia (Cr, Ni, N, Mo, Cu, Si, W), ja ne voidaan luokitella seosaineiden mukaan omiin alalajeihin; lean, standard, super ja hyper. Kuvio 2 esittää yleisimmät duplex-laadut ja niiden seossuhteet. (Kyröläinen & Lukkari 2002, 198.)





Kuvio 2. Yleisimmät austeniittis-ferriittiset teräslaadut (Cunat 2007.).

Duplex-teräkset ovat taloudellinen vaihtoehto austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin verrattuna johtuen korroosionkestävyyden vaatimista pienemmistä seossuhteista sekä paremmista mekaanisista ominaisuuksista. Hyvien mekaanisten ominaisuuksien vuoksi duplex-teräkset pystyvät parantamaan rakenteiden kestävyttä vähentäen samalla painoa. Duplex-terästen ominaisuuksia ovat esimerkiksi

- korkeat piste- ja jännityskorroosio-ominaisuudet, kuten myös korroosionkesto yleistestikin
- korkeat mekaaniset ominaisuudet
- kulutuksen kesto (Kyröläinen & Lukkari 2002, 198.)

#### 4.2.1 Hitsattavuus

Nykyisten 50/50 % austeniittis-ferriittisten teräslaatuojen hitsattavuus lähenee austeniittisten laatuojen tasoa verrattuna vanhempilaatuisiin duplex-teräksiin, joiden ferriittipitoisuus on suuri, jopa 70 %. Ferriittipitoisuuden vuoksi kuumahalkailua ja hitsausmuodonmuutoksia ei juurikaan esiinny austeniittisten laatuojen tapaan. (Kyröläinen & Lukkari 2002, 199-218.)

Duplex-teräksillä jäähtymisnopeus vaikuttaa liitokseen muodostuvaan mikrorakenteeseen huomattavasti enemmän kuin austeniittisilla teräksillä. Hitsattaessa HAZ-vyöhyke muuttuu ferriitiksi, jonka jälkeen hitsin jäähtyessä ferriitistä alkaa diffuusion välityksellä muodostua austeniittia. Diffuusioprosessin hitaudesta johtuen pieni lämmöntuonti edistää ferriittisen faasirakenteen muodostumista ja vastaavasti hidask jäähtymisnopeus (suuri lämmöntuonti) edistää austeniittisen rakenteen muodostumista. (Lukkari 2005 12, 13 & 17.)

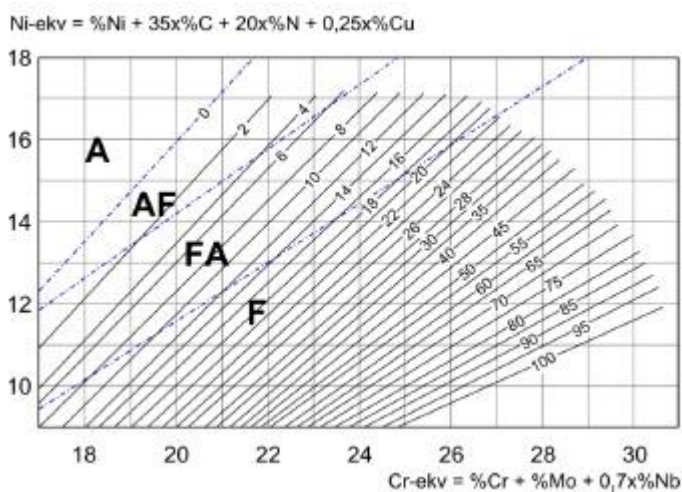
Pieni lämmöntuonti edistää muun muassa sigmafaasin syntymistä ja ferriitin raekoon kasvua, jonka vaikutuksesta sitkeys ja korroosionkestävyys heikentyvät ja taipumus vetyhalkeiluun kasvaa. Myös pienestä lämmöntuonnista johtuva nitridien erkautuminen aiheuttaa korroosionkesto-ominaisuuksien heikentymistä. Lämmöntuonnin alarajan alittamista voidaankin pitää huomattavasti kriittisempänä tekijänä verrattuna ylärajan ylitykseen. (Lukkari 2005 12, 13 & 17.)

Suuren lämmöntuonnin ongelmana duplex-teräksillä on lujuuden heikkeneminen ja jännityskorroosioriskin kasvaminen, joka johtuu austeniitin määrän lisääntymisestä. Toisaalta kasvanut austeniitin määrä parantaa hitsin iskutheyksominaisuuksia. Kuitenkin yleisimmän duplex-teräksen (1.4462) yläraja voidaan ylittää paksuilla materiaaleilla terästehdas Sandvikin tutkimusten mukaan jopa aina yli 5,0 kJ/mm saakka ilman mekaanisten ominaisuuksien ja korroosionkeston heikkenemistä. (Lukkari 2005 12, 13 & 17.)

Oma lukunsa ovat super duplex-teräkset, joiden lämmöntuonti tulee kuitenkin rajata voimakkaasti myös 1,5 kJ/mm ylärajaan, ohuilla materiaaleilla jo 1,0 kJ/mm rajaan. Nikkeli- ja typpiyliseosteisten lisäaineiden käyttö auttaa pitämään ferriittipitoisuuden matalana edistämällä austeniitin muodostumista pienemmällä lämmöntuonnilla. (Lukkari 2005 12, 13 & 17.)

Korkeaseosteisten lisäaineiden käyttö kaikilla duplex-teräksillä on erittäin suotavaa, sillä täysin perusainetta vastaavat lisäaineet nostavat ferriittipitoisuuden erittäin korkeaksi (>70 %), joka aiheuttaa hitsiin edellä mainittuja laatuvirheitä. Ferriittipitoisuuden arviointiin voidaan käyttää WRC-92-diagrammia (Taulukko

3) kromi- ja nikkeli-ekvivalenttien avulla. (Ruostumattomien duplex-terästen hitsaus 2012, 6 & 7.)



Taulukko 3. WRC-92–diagrammi. (Ruostumattomien duplex-terästen hitsaus 2012, 7)

#### 4.2.2 Korjaus- ja päällehitsaus

Vähäiset pintavirheet (roiskeet, kuona ja oksidijäämät) voidaan korjata hiomalla ja kiillottamalla minimissään MESH-arvoltaan 320 olevalla RST-laikalla. Kiillottuksen jälkeisen peittauksen voi suorittaa esimerkiksi peittaustahnalla. Pintavirheitä ei tule korjata TIG-elektrodin avulla sulattamalla hitsiä uudelleen. Menetelmän käyttö aiheuttaa ferriittipitoisuuden kasvua, joka johtaa aikaisemmin mainittuihin korkean ferriittipitoisuuden hitsausvirheiden muodostumiseen. (Duplex ruostumattomien terästen hitsaus 2006, 16.)

Suurten pinnan alla olevien virheiden poistaminen vaatii voimakkaamman hionnan käyttäen karkeampaa laikkaa. Virheen poiston jälkeen alueen voi täyttää esimerkiksi puikkohitsausta tai plasmakaarta käyttäen. Plasmakaaren käytön ongelmana on sen aiheuttama suuri roiskeiden määrä. Hiilikaaritaltausta ei tule käyttää, sillä se nostaa aineen hiilipitoisuutta. Korjaushitsausta on mahdollista käyttää samaan kohteeseen ainakin viidesti ilman perusaineeseen muodostuvien haittavaikutusten syntymistä. (Duplex ruostumattomien terästen hitsaus 2006, 16.)

Päällehitsaus voidaan suorittaa kaikkia menetelmiä käyttäen, mutta suositeltavaa on käyttää menetelmiä, joilla on suurin hitsiaineen tuotto. Päälle- ja korjaushitsatessa perusaineen sekoittuminen hitsiin tulee olla mahdollisimman vähäistä. Tämä tarkoittaa, että jokaisen palkokerroksen tulisi hitsautua edellisen päälle välttämällä valokaaren ja perusaineen koskettamista. Tästä johtuen on syytä pitää erityistä huomiota käytettäessä korkeatuottoisia menetelmiä. (Duplex ruostumattomien terästen hitsaus 2006, 16.)

### 4.3 Kehitysprojektin teräslaadut

Kehitystyön materiaalit lukeutuivat austeniittiseen ja austeniittis-ferriittiseen pääluokkaan. Projektissa tutkittavat materiaalit olivat Duplex, Super Duplex, 254 SMO ja Alloy 31.

#### 4.3.1 Duplex 2205 Code Plus Two (EN 1.4462)

Duplex on nimensä mukaan austeniittis-ferriittinen teräs, joka koostuu seuraavanlaisesta seoksesta: 0,02 % C, 0,17 % N, 22,0 % Cr, 5,7 % Ni, 3,1 % Mo. (Duplex Stainless Steel 2013, 1.)

Hitsauksen suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon HAZ -rajan faasimuutokset, jotta kiderakenne säilyy duplex -teräksiltä vaaditussa vähintään 30/70-suhteessa. Faasimuutosten estämiseksi hitsaamista materiaalin lämmöntuonti-alueen ylärajoilla (0,5 – 2,5 kJ/mm) tulisi välttää, jotta jäähtymisnopeus ei hidastuisi. Materiaaliominaisuuksien säilyttämiseksi hitsauksen jälkeinen välitön puhdistaminen ja välipalkolämpötilan rajaaminen alle 150 °C on välttämätöntä. Pulssitettu hitsaus on suositeltua varsinkin kaasukaarihitsausprosesseissa lämmöntuonnin rajaamiseksi ja sulan siirtymisen hallitsemiseksi. (How to Weld Type 2205 Code Plus Two Duplex Stainless Steel 2006, 2 & 8.)

#### 4.3.2 Super Duplex 2507 (EN 1.4410)

Super Duplex on korkeaseosteinen austeniittis-ferriittinen teräs, joka koostuu seoksesta: 0,02 % C, 0,27 % N, 25,0 % Cr, 7,0 % Ni, 4,0 % Mo. (Duplex Stainless Steel 2013, 1.)

Kuten duplexillakin, hitsaamista materiaalin lämmöntuontirajojen ala- ja ylärajoilla (0,2 – 1,5 kJ/mm) tulee välttää hitsin HAZ-vyöhykkeen faasimuutosten vuoksi. Myös alle 150 °C välipalkolämpötila sekä hitsiä edeltävä ja jälkeinen puhdistus tulee ottaa huomioon. Hitsiä edeltävä puhdistus voidaan suorittaa käyttämällä asetonia. Puhdistus on tärkeää varsinkin tarkan laatuselan läpi käyvissä saumoissa, sillä epäpuhtaudet voivat lisätä huokoisuusriskiä korkeaseosteiselle materiaalille, jolla on muutenkin taipumusta huokosten muodostukseen. Mahdollisimman tarkka railonvalmistus on erittäin suositeltavaa. (Duplex ruostumattomien terästen hitsaus 2006, 6, 9, 10, 11 & 12.)

Valokaaren vakaudenhallinta on super duplexilla paikoin hankalaa, varsinkin käytettäessä suojakaasuja, joista puuttuu aktiivikomponentti happi tai hiilidioksidi. Nämä komponentit vakauttavat valokaaren vaeltelua anodi- ja katodipisteiden välillä. (Westin 2013, Duplex ruostumattomien terästen hitsaus 2006, 6.)

Aktiivikomponenttien lisäyksessä on kuitenkin riskinä huokosten muodostuminen, sillä varsinkin hiilidioksidi lisää huokoisuusriskiä jopa pieninäkin pitoisuuksina suojakaasussa. Voestalpine Böhler Welding GmbH:n kevään 2013 tutkimuksen mukaan 0,5 %:n CO<sub>2</sub> / O<sub>2</sub> lisäys Ar + 30 %:n He-seosteiseen suojakaasuun on riittänyt vakauttamaan kaaren ja samalla ehkäisemään huokosten muodostusta. Mikäli hitsaus suoritetaan PE, PD tai PF -asunnoissa on syytä käyttää FCAW-menetelmää (täytelankahitsaus) huokoisuuden välttämiseksi. (Westin 2013.)

#### 4.3.3 254 SMO (EN 1.4547)

254 SMO on korkeaseosteinen ruostumaton superausteniittinen teräs, joka koostuu seoksesta: 0,01 % C, 0,18 % N, 20,0 % Cr, 18,0 % Ni, 6,1 % Mo, 1,0 % Cu, 1,0 % Mn, 0,8 % Si. (Duplex Stainless Steel 2013, 1.)

254 SMO:n korroosionestokyky heikkenee oleellisesti, mikäli hitsausta edeltävä puhdistus laiminlyödään. Asetoni on puhdistukseen soveltuva aine. Hitsatessa tulisi käyttää ”yliseostettuja” lisäaineita, jotta vältyttäisiin hitsauksen aikana su-  
lassa tapahtuvalta molybdeenikadolta ja siitä aiheutuvalta korroosioheikkoudel-  
ta. 254 SMO:n hitsauksen tulisi tapahtua mahdollisimman pienellä lämmön-  
tuonnilla (materiaalin yläraja 1,0 kJ/mm), välipalkolämpötilan tulee antaa laskea  
alle 100 °C ja hitsi tulee puhdistaa myös hitsauksen jälkeen. Mikäli passivointia  
käytetään, tulisi se tapahtua 20–40 % typpihapossa 50-60 °C lämpötilassa noin  
30 minuuttia. (Type 254 SMO 2013, 6-7.)

Austeniittisten terästen tapaan 254 SMO on helposti hitsattava materiaali MIG/MAG ja FCAW -menetelmillä. TIG-hitsauksessa tunkeuman ja aineensiir-  
tymisen hallinta voi olla haastavaa, varsinkin hitsattaessa paksuseinäisiä  
putkia. Tässä tapauksessa riittävän työntävä elektrodin asento ja kummaltakin  
puolelta tarkasti valmistettu railo voivat olla ratkaisu. Myös vety- tai heliumseok-  
sen lisääminen suojakaasuun kasvattaa kaarienergiaa ja näin ollen parantaa  
tunkeumaa.

#### 4.3.4 Nicrofer 3127 hMo - Alloy 31 (EN 1.4562)

Alloy 31 on korkeaseosteinen austeniittinen ruostumaton teräs, joka on suunnit-  
teltu superausteniittisten terästen ja nikkelseosten välille. Alloy 31 koostuu  
seoksesta: 31 % Ni, 27% Cr, 0,015 % C, 2,0 % Mn, 0,3 % Si, 1,2 % Cu, 6,6 %  
Mo, 0,02 % P, 0,01 % S. (Nicrofer 3127 hMo – alloy 31 2006, 10.)

Alloy 31:n hitsaus on helposti hallittavissa kaasukaarihitsausmenetelmillä. Mo-  
lemmilla menetelmillä tulee välttää lämmöntuontirajan (0,8 kJ/mm) ja välipalko-

lämpötilan (150 °C) ylittämistä. Peittäus ei ole välttämätöntä, mikäli sitä ei erikseen vaadita, jos hitsin puhdistus hoidetaan välittömästi hitsauksen jälkeen kuumalle hitsille. (Nicrofer 3127 hMo – alloy 31 2006, 10-11.)

## 5 HITSUKSEN LAADUNVARMISTUS JA -HALLINTA

Laadunvarmistus on suunniteltua ja järjestelmällistä työtä tehtävänänsä lopullisen tuotteen laatuvaatimusten täyttymisen varmistaminen. Erityisesti offshore- ja painelaitesektoreiden hitsaavassa tuotannossa hitsausprosesseilla ja niiden suorittamisella on suora vaikutus valmistettavien tuotteiden kustannuksiin ja laatuun. Hitsaavalle yritykselle hitsausvirhe on liiketoimintariski. Tämän vuoksi laatuvaatimukset täyttävä tehokkaasti suoritettu hitsaus on erittäin tärkeää. (Lindewald 2013, 4.)

Valmistettaessa vaativia hitsausliitoksia on hitsausprosessin jatkuva tarkkailu ja dokumentoitujen toimintaohjeiden noudattaminen ehdotonta. Hitsit tarkastetaan ja testataan eri menetelmillä (pääasiassa NDT-menetelmillä) mahdollisten hitsausvirheiden havaitsemiseksi. Suoritettu NDT-tarkastusprosessi lisää luotettavuutta, mutta ei kuitenkaan ole täysi takuu virheettömyydestä. Laadullisesti merkittävin tekijä hitsausprosesseissa on hitsauksen suorittaminen oikealla tavalla, ei tarkastaminen. Muun muassa näistä edellä mainituista syistä johtuen ISO 9000 -standardi luokittelee hitsauksen erikoisprosessiksi, jonka vuoksi hitsauksen laatuvaatimuksia koskeva standardisarja ISO 3834 laadittiin. (Lindewald 2013, 4.)

### 5.1 SFS-EN ISO 3834 – Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset

ISO 3834 –standardi on tarkoitettu hitsauksen laadunvarmistukseen yrityksiin, jotka valmistavat korkean laatuvaatimusten hitsattavia rakenteita. Standardin ensimmäinen osa antaa perusteet laatuvaatimusten valintaan, standardit 2, 3 ja 4 esittävät hierarkkisesti kaikille kolmelle laatuvaatimustasolle asetetut vaatimukset ja viides standardi esittää laatuvaatimusten osoittamiseen tarvittavat asiakirjat. (Lindewald 2013, 4.)

Kaikkia standardien määrittämiä asioista ei tarvitse suorittaa, sillä ne ovat osaltaan tarkoitettu eräänlaisiksi ohjenuoriksi, joista voidaan valita yritykselle tarpeellisimpien kohtien implementointi. Kuitenkin kaikille laatuvaatimustasoille on



yhteistä vaatimus pätevoitettyistä hitsaajista, NDT-tarkastajista sekä hitsauskoordinoijista (lukuun ottamatta peruslaatuvaatimustasoa). (Lindewald 2013, 9.)

Yrityksen kannalta on tärkeää osata valita standardien laatuvaatimusten esittämät kohdat oikein, jotta välttyttäisi turhalta ja raskaalta dokumentaatiotyöltä. Mutta kuitenkin valita ne kohdat, joiden avulla yrityksessä voidaan varmistaa kokonaisvaltainen laadunhallinta standardien ja asiakkaan edellyttämällä tavoil-la.

#### 5.1.1 Stairon Oy:lle suositeltavat keskeisimmät menettelyohjeet

Kattavan laatuvaatimusstandardi ISO 3834-2:n sisältämät keskeisimmät asiat, joiden ympärille Stairon Oy:n hitsauksen laadunhallinta tulee kehittyä:

- tekninen katselmus
- hitsaushenkilöstön ja -koordinoijien pätevyysvaatimukset
- hitsien tunnistettavuus ja jäljitettävyys
- laatupoikkeamien systemaattinen käsittely
- tarkastus ja testaus (Lindewald 2013, 4.).

Teknisen katselmuksen avulla on tarkoitus selvittää yrityksen kykyä valmistaa tilattu tuote. Samalla myös tarkistetaan vaatimukset ja määräykset, joita tuotteelta, hitsausprosesseilta ja hitsareilta vaaditaan. Oikein suoritettu tekninen katselmus on hallitun, riskittömän ja kustannustehokkaan valmistusprosessin kulmakivi. (Lindewald 2013, 11.)

Tuotevastuulain mukaan tuotteen valmistaja on veloitettu korvaamaan aiheutetut vahingot, jotka ovat syntyneet virheellisestä tuotteesta. Näissä tilanteissa hitsauskoordinoitihenkilöstön vastuu ja merkitys korostuvat. Tämän vuoksi hitsaus ja operaattorihenkilöstöllä tulee olla voimassa olevat pätevyystodistukset, joiden avulla varmistetaan, että hitsaajat osaavat ja noudattavat hitsausohjeita. Hitsauskoordinaattorin tulee valvoa, että hitsausohjeita noudatetaan ja tarvittaessa puuttua kaikkiin esiintyviin epäkohtiin. (Lindewald 2013, 16.)

Poikkeamien systemaattisella käsittelyllä estetään viallisten rakenteiden päätyminen käyttöön. Poikkeamien syyt tulee analysoida ja dokumentoida sekä suorittaa korjaavat toimenpiteet vastaavien poikkeamien ehkäisemiseksi. Hitsit tulisi olla tunnistettavissa ja kohdistettavissa perusaineisiin, tarkastettaviin kohteisiin, hitsaajiin sekä tarkastajiin. (Lindewald 2013, 20.)

Ennen hitsausta on tarpeellista tarkistaa ja testata suojakaasujen, lisäaineiden ja perusaineiden yhteensopivuus ja hitsausohjeiden paikkansapitävyys, varsinkin uusien materiaalilaatujen kohdalla, mikäli näitä ei ole asiakkaan toimesta määritelty.

## 6 KÄYTÄNNÖN HITSAUSKOKEET JA KEHITYSTYÖ

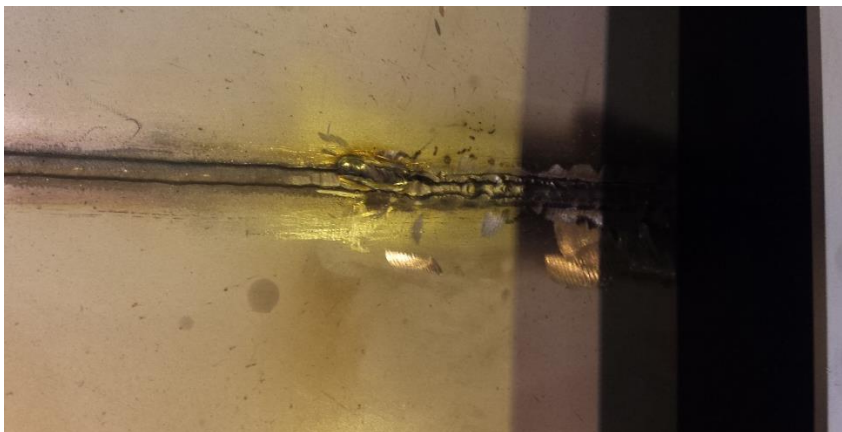
### 6.1 Aloitus

Hitsauskokeet ja suunnitelmat tehtiin soveltamalla teollisen koesuunnittelun periaatteita. Teollinen koesuunnittelu (Design of Experiments, DOE) on tehokas erilaisten prosessien, tuottavuuden ja laadun kehittämisen menetelmä, jossa suunnitelluilla ja suoritetuilla kokeilla selvitetään prosessiin vaikuttavia merkittäviä muuttujia ja pyritään optimoimaan nämä tekijät.

Koesuunnittelun käyttö on kannattavaa tutkittaessa tilanteita, joissa on useita eri muuttujia sekä, kun ajalliset ja taloudelliset resurssit eivät riitä tutkimaan kaikkien muuttujien yhdistelmävaikutuksia. Päämääränä on lopputulokseen vaikuttavien epäolennaisten ja olennaisten muuttujien erottaminen toisistaan. (Karjalainen 1992, 167)

### 6.2 Mekanisoitu saumahitsaus

Saumahitsauksessa laatuongelmina olivat epävakaa valokaari ja sen aiheuttama ajoittainen heikko tunkeuma ja pinnanlaatu (Kuva 3) sekä röntgenkuvissa esiintyvät huokokset.



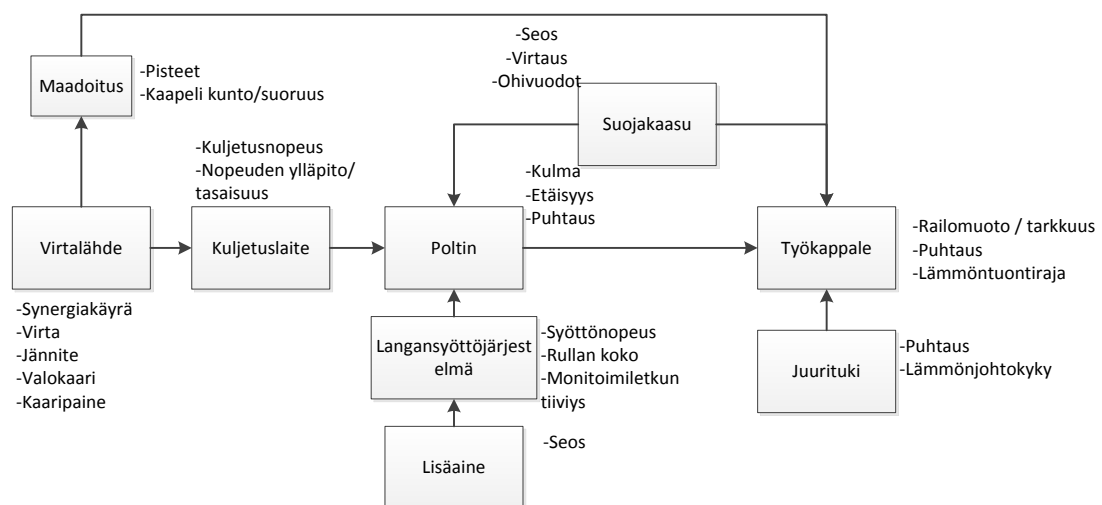
Kuva 3. Epävakaan valokaaren aiheuttama pintavirhe.

Hitsattavat levyt olivat ainevahvuudeltaan 3-5 mm ja alun perin hitsaus suoritettiin yhdellä palolla V-railoa käyttäen. Laatuvirheiden ehkäisemiseksi yhden palon hitsistä oli luovuttu ja siirrytty käyttämään levyjen molemmin puolista hitsiä X-railolla. Kahden puolen hitsin etuna oli valokaaren vaeltelun hillitseminen ja huokosvapaan hitsin saavuttaminen.

Ongelmana oli kuitenkin tuottavuuden puolittuminen kahden puolen hitsin vielessä kaksi kertaa pidemmän ajan valmistaa johtuen muun muassa työläästä levyjen kääntämisestä. Myöskään valokaaren epävakaas ei täysin kadonnut, sillä pintavirheitä esiintyi edelleen. Tosin epävakaan kaaren aiheuttamat virheet olivat uutta menetelmää käyttäen pienempiä, sillä X-railon avulla voitiin käyttää pienempiä hitsausarvoja. Tämä kuitenkin tarkoitti, että ongelmaan ei ollut löydetty ratkaisua, vaan ainoastaan työläämpi menetelmä, jonka avulla virheitä voitiin hillitä niiden yhä esiintyessä.

### 6.2.1 Aloitus

Jotta prosessiin vaikuttavat muuttujat olisi helposti tunnistettavissa, pyrittiin hitsausprosessi kuvaamaan mahdollisimman selkeästi, mutta kuitenkin riittävän yksityiskohtaisesti palvelukseen käyttötarkoitustaan. Tässä apuna käytettiin prosessikaaviota (Kuvio 3), johon kirjattiin prosessiin vaikuttavia muuttujia.



Kuvio 3. Prosessikaavio saumahitsaus.

Näitä muuttujia käytettiin apuna suunniteltaessa suoritettavia kokeita.

## 6.2.2 Hitsausohjelmien, suojakaasujen ja lisäaineiden yhteensovittaminen

Hitsausvirtalähteenä käytettävään Froniukseen on erikseen ohjelmoitu materiaali-kohtaiset hitsausohjelmat tietyille suojakaasu- ja lisäainekoostumuksille. Laadun ja synergiakäyrien moitteettoman toiminnan varmistamiseksi näitä hitsausohjelmia käyttäessä tulee käyttää mahdollisimman vähän koostumukseltaan ohjelmavalmistajan suosituksista poikkeavia suojakaasuja ja lisäaineita.

Materiaaleille ja hitsausohjelmille soveltuvat lisäaineet ja suojakaasut kasattiin taulukoksi (Taulukko 4), jonka perusteella voitiin määrittää, mitä hitsausohjelmaa voitiin millekin materiaalille käyttää ja millä suojakaasulla ja lisäaineella.

Materiaali	Suojakaasu (Ohjelma)	Lisäaine (1,2mm)	Ohjelma ja paikka
<b>SUPERDUPLEX (1.4410)</b>	MISON 2He - Ar + 30% He + 2% CO <sub>2</sub>	Avesta 2507-P100	P1277 (SP1 & 1,0)
	Helicon - Ar + 30% He + 0,5% CO <sub>2</sub>	Lincoln LNM Zeron 100X	P1532 (SP1 & 1,2)
	100% Ar	OK Autrod 2509	
	Ar + 0,5% CO <sub>2</sub>		
<b>DUPLEX (1.4462)</b>	MISON 2He - Ar + 30% He + 2% CO <sub>2</sub>	Avesta 2209 / Avesta 2205	P1277 (SP1 & 1,0)
	MISON 2- Ar + 2% CO <sub>2</sub> + 0,03% NO	Lincoln LNM Zeron 100X	P1532 (SP1 & 1,2)
	Cronigon S2 - Ar + 2% O <sub>2</sub>		
<b>SMO (1.4547)</b>	MISON 2He - Ar + 30% He + 2% CO <sub>2</sub> (P0624)	Avesta P12	P0624 (SP2 & SP)
	Ar + 5% He + 5% H <sub>2</sub> + 0,05% CO <sub>2</sub> (P0624)	Avesta P16	
		ThyssenKrupp ERNICKRMO-13	
<b>ALLOY 31 / UNS (1.4562)</b>	100% Ar (P0888 tai P1195)	Avesta P16	P0888 (SP & 1,2)
	Varigon He50 - Ar + 50% He (P0624)	HAS 59 MIG Metrode	P1195 (SP1 & SP)
	MISON 2He - Ar + 30% He + 2% CO <sub>2</sub>		P0624 (SP2 & SP)

Taulukko 4. Synergiakäyrät ja yhteensopivat suojakaasut ja lisäaineet.

Hitsausohjelmia valittaessa on ymmärrettävä käyttöpaneelin rajallisuus tallennuspaikkojen suhteen, jonka vuoksi osa ohjelmista on tallennettu poikkeavan lisäainevahvuuden paikalle hieman harhaanjohtavasti. Kaikki ohjelmat ovat teh-

ty 1,2 mm:n lisäainevahvuudelle. Käytettäessä tätä ohuempia tai paksumpia lisäaineita, on otettava huomioon, että synergiakäyrä voi olla riittämätön tai vastaavasti liian laaja. Tämän ei kuitenkaan vielä aiheuta ongelmia käytettäessä 1,0 mm:n lisäaineita. (Karjalainen 2014.)

Huomattavaa tehdyssä taulukossa oli, että suojakaasuvalinnoista puuttui super duplexin, duplexin ja alloy 31:n kohdalla näille tehtyjen aikaisempien WPS:ien vaatima suojakaasu Mison N<sub>2</sub> (Ar + 30 % He + 1,8 % N<sub>2</sub> + 0,03 % NO). Aikaisemmasta tuotantokäytöstä huolimatta Mison N<sub>2</sub> -suojaakaasua ei otettu mukaan koehitsaukseen, sillä kaasu poikkeaa Froniuksen määrittämistä suosituskaasuista sekä kaasu ei sisällä aktiivikomponenttia, joka varsinkin duplex-terästen hitsauksessa aiheuttaa jo aikaisemmin todettua epävakaata valokaarta.

### 6.2.3 Kokeiden suorittaminen

Aluksi kokeet suoritettiin hyödyntämällä teolliseen koesuunnitteluun liittyvää Taguchi-menetelmää, jossa käytettiin L<sub>18</sub>-ortogonaalimatriisia käyttäen seitsemää tekijää kolmessa eri tasossa.

Matriisien käytön edut tulevat hyvin esille, kun tekijöitä ja tasoja on paljon. Esimerkiksi ortogonaalimatriisi L<sub>18</sub>:ssa on seitsemän tekijää kolmessa eri tasossa ja kokeita kokonaisuudessaan 18 kappaletta, mutta ilman matriisin käyttöä kokeita olisi suoritettava 3<sup>7</sup>:ää vastaava määrä eli 2187 kappaletta. Näiden 18 kokeen avulla voidaan saavuttaa yli 90 % todennäköisyydellä sama tulos kuin tutkimalla kaikki 2187 eri yhdistelmää. (Karjalainen 1992, 22.)

Taulukko (5) esittää Super Duplex 1.4410 -materiaalin koesuunnitelman. Tutkitavat muuttujat on valittu kokeen tekijöiksi, ja muut prosessiin vaikuttavat tekijät vakioitu. Samaa matriisia on sovellettu kaikkien neljän materiaalin koesuunnitelmissa perustana edellä mainitut prosessikaavio, yhteensopivuustaulukko sekä aikaisemmin käytetyt WPS:t.

Koe nro.	Tekijä							Tulos
	Virta (A)	Suojakaasu	V-railo (°)	Asetoni puhd.	Lisäaine	Jännite (V)	Kulj.nop. (mm/min)	
1	220	Helicon	55	Kyllä	OK Autrod 2509	25	370	Y1
2	200	Argon	55	Kyllä	2507-P100	30	430	Y2
3	180	Mison 2He	55	Kyllä	LNM Zeron 100X	35	400	Y3
4	180	Mison 2He	60	Kyllä	OK Autrod 2509	25	430	Y4
5	220	Helicon	60	Kyllä	2507-P100	30	400	Y5
6	200	Argon	60	Kyllä	LNM Zeron 100X	35	370	Y6
7	200	Mison 2He	65	Kyllä	OK Autrod 2509	30	370	Y7
8	180	Helicon	65	Kyllä	2507-P100	35	430	Y8
9	220	Argon	65	Kyllä	LNM Zeron 100X	25	430	Y9
10	200	Helicon	50	Ei	OK Autrod 2509	35	430	Y10
11	180	Argon	50	Ei	2507-P100	25	370	Y11
12	220	Mison 2He	50	Ei	LNM Zeron 100X	30	400	Y12
13	180	Argon	60	Ei	OK Autrod 2509	30	400	Y13
14	220	Mison 2He	60	Ei	2507-P100	35	370	Y14
15	180	Helicon	60	Ei	LNM Zeron 100X	25	430	Y15
16	200	Argon	65	Ei	OK Autrod 2509	35	430	Y16
17	220	Mison 2He	65	Ei	2507-P100	25	400	Y17
18	180	Helicon	65	Ei	LNM Zeron 100X	30	370	Y18

Taulukko 5. Koehitsaustaulukko L18, 1.4410.

Kokeiden suorittamisen jälkeen hitseille tehtiin silmämääräinen tarkastus ja saumojen avaaminen. Näiden kokeiden ja tarkastusten jälkeen tulokset syötettiin vastetaulukkoon, jotta eri tekijöiden merkittävyys hitsausprosessiin voitiin todeta. Vastetaulukkoon lasketaan tekijöiden eri tasojen maksimi- ja minimivasteiden erotus. Mitä suurempi vaste-ero on, sitä enemmän kyseinen tekijä vaikuttaa ominaisuuteen. Taulukko (6) näyttää esimerkin kahdessa tasossa olevan seitsemän tekijän  $L_8$ -ortogonaalimatriisin vastetaulukon toimintaperiaatteesta.

TEKIJÄ	TEKIJÖIDEN EROTTELU KOETULOKSISTA	VASTE	VASTEIDEN EROTUS
A1	$A1 = \frac{1}{4} x (Y1+Y2+Y3+Y4)$	25,50	2,00
A2	$A2 = \frac{1}{4} x (Y5+Y6+Y7+Y8)$	23,50	
B1	$B1 = \frac{1}{4} x (Y1+Y2+Y5+Y6)$	29,00	9,00
B2	$B2 = \frac{1}{4} x (Y3+Y4+Y7+Y8)$	20,00	
C1	$C1 = \frac{1}{4} x (Y1+Y2+Y7+Y8)$	27,50	6,00
C2	$C2 = \frac{1}{4} x (Y3+Y4+Y5+Y6)$	21,50	
D1	$D1 = \frac{1}{4} x (Y1+Y3+Y5+Y7)$	23,25	2,50
D2	$D2 = \frac{1}{4} x (Y2+Y4+Y6+Y8)$	25,75	
E1	$E1 = \frac{1}{4} x (Y1+Y3+Y6+Y8)$	28,25	7,50
E2	$E2 = \frac{1}{4} x (Y2+Y4+Y5+Y7)$	20,75	
F1	$F1 = \frac{1}{4} x (Y1+Y4+Y5+Y8)$	20,75	7,50
F2	$F2 = \frac{1}{4} x (Y2+Y3+Y6+Y7)$	28,25	
G1	$G1 = \frac{1}{4} x (Y1+Y4+Y6+Y7)$	24,75	0,50
G2	$G2 = \frac{1}{4} x (Y2+Y3+Y5+Y8)$	24,25	

Taulukko 6. Esimerkki vastetaulukosta  $L_8$  (Junttila 2007, 59.).

Vasteiden perusteella merkittävimmät parametrit saatiin selville ja näin saatujen tietojen perusteella koetulosten laadukkaimpien hitsien parametreja optimoitiin tapauskohtaisesti hienosäätönä, esimerkiksi valokaaren pituuden tai kaaripaineen ohjausarvoa säätämällä. Tämän jälkeen hitsit tarkastettiin pintatarkastuksena sekä hiomalla hitsit auki, jonka jälkeen laadukkaimmat hitsit röntgenkuvattiin.

#### 6.2.4 Tulokset

Uusien päivitettyjen WPS:ien (Liitteet 1, 2, 3, 4 & 5) avulla voitiin palata aikaisemmin käytössä olleeseen yhden palon hitsiin V-railoa käyttäen, joka nopeuttaa hitsausprosessia huomattavasti.

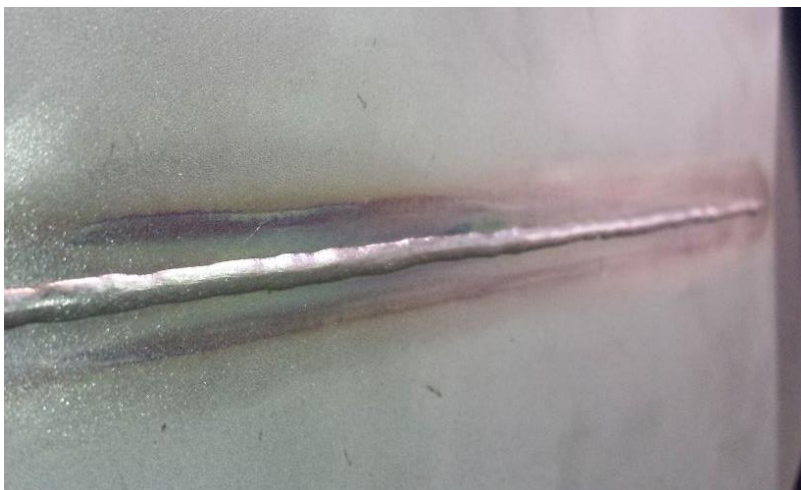
Röntgenkuvat ja muut suoritettut NDT-testit osoittivat saumojen olevan kaikkien kokeiden kattaneiden materiaalien osalta laatuvaatimusten mukaisia. Valokaaren epävakauudesta ja tämän aiheuttamasta ajoittain vajaan tunkeumasta (Ku-



vat 6 ja 7) päästiin eroon käyttämällä hiilidioksidiseosteista aktiivista suojakaasua.



Kuva 4. Hitsi ilman valokaaren oireilua.



Kuva 5. Tasainen juuren tunkeuma.

Hiilidioksidin määrällä seoksessa uskotaan olevan vaikutusta huokosten muodostumiseen, mutta huokoisuuden syntymisen syihin suoritettut kokeet eivät anna yksiselitteistä vastausta, sillä testit osoittavat huokoisuuden vähentyvän myös käytettäessä esipuhdistusta asetonilla, joten kyseessä voi hyvin olla näiden tekijöiden yhteisvaikutus, joka on huokosten muodostumisen ehkäisyn kannalta enemmän kuin toistensa summa.

Lämmöntuonnin korottamisella oletetaan myös olevan vaikutus ehkäistä huokosia ja sulkeumia, jolloin perusaineessa olevat raskaammat oksidit ehtivät nousta pois sulasta ennen hitsin jäähtymistä.

### 6.3 Orbitaalihitsaus

Orbitaalihitsauslaitteisto oli verrattain uusi hankinta ja varsinaista osaamista laitteen käyttöön sekä sen monipuoliseen parametrien säätöön ei ollut. Orbitaalihitsausta oli tarkoitus soveltaa valmistettavien pesureiden pienemmissä putkistoissa. Ennen tuotannollista käyttöönottoa oli esituotannollisissa hitseissä esiintyneet laaturvirheet ehkäistävä. Näitä virheitä oli muun muassa sulan vaikea hallittavuus, reunahaavan muodostuminen ja heikko tunkeuma (Kuvat 8 ja 9).



Kuva 6. Hallitsematon tunkeuma.

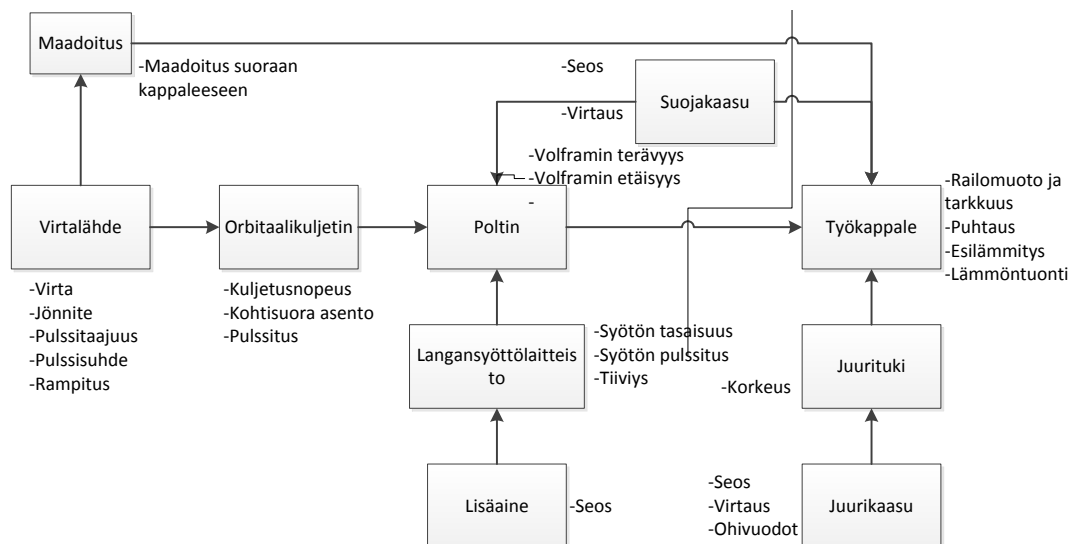


Kuva 7. Hallitsematon sulan muodostuminen ja reunahaava.

Orbitaalihitsaukselle tarkoitettuna sovelluskohteena oli 60,3 mm:n halkaisijan putkistot, joissa materiaalina toimi seinämävahvuudeltaan 2,8 mm oleva 254 SMO.

### 6.3.1 Aloitus

Työ aloitettiin eri muuttujien kartoittamisella prosessikaavion (Kuvio 4) avulla, kuten saumahitsauksessakin.



Kuvio 4. Orbitaalihitsaus prosessikaavio.

Materiaali	Suojakaasu	Lisäaine (1,0mm)	Elektrodi (2,4mm)
254 SMO (1.44547)	100% Ar (Ar + 2% H <sub>2</sub> + 0,03% NO) Mison H <sub>2</sub>	ESAB OK Autrod 19.82  (Avesta P12) (Avesta P16)	Trafimet TR0012-24

Taulukko 7. 254 SMO kokeissa käytettävät lisäaine, elektrodi ja suojakaasu.

Ajankäytön rajallisuudesta, muuttujien suuresta määrästä sekä valmistajien suosituksista johtuen käytettävä lisäaine, elektrodi ja suojakaasu pidettiin kokeiden aikana seoksiltaan muuttumattomina. Nämä aineet ovat listattu taulukkoon (7).

### 6.3.2 Hitsauskokeet

Kokeet suunniteltiin ortogonaalimatriiseja hyödyntäen, kuten saumahitsauksesakin. Orbitaalihitsauksen ollessa verrattain uusi menetelmä Staironilla, aikaisempia tietoja WPS:istä ei voitu hyödyntää. Osakseen tästä johtuen jouduttiin käyttämään useampia eri tasoja tekijöiden kohdalla, jotta eri parametrien vaikutuksen voitaisiin selkeästi todeta. Ortogonaalimatriisiksi päädyttiin valitsemaan yhdeksän tekijän ja kolmen tason L<sub>27</sub>-matriisi, joka on kompromissina suoritettavien kokeiden ja tekijöiden tasojen määrän välillä.

Kokeet suoritettiin taulukon (8) mukaisesti ja tämän jälkeen laskettiin jokaiselle tekijälle vasteet. Vaste-erotukset jäivät hyvin samanlaisiksi tekijöiden välillä. Langansyötön merkitys jäi vähäiseksi, kun taas railon viistekulmalla, tausta- ja huippuvirran suhteella oli eniten merkittävyyttä prosessiin.

Ko e nr o.	Tekijä									Tu- los
	Huippu- virta (A)	Tausta- virta (A)	V - rai- lo (°)	Huip- pusyöttö (cm/min)	Taustasyöt- tö(cm/min)	Pulssi- aika (s)	Taus- ta- aika (s)	Kulj.nop . (mm/mi n)	Elektro- din kärjen muoto	
1	70	35	50	25	20	0.10	0.15	70	Terävä	Y1
2	70	35	50	25	25	0.25	0.30	90	Terävä	Y2
3	70	35	50	25	30	0.40	0.45	110	Terävä	Y3
4	70	50	60	30	20	0.10	0.15	90	Terävä	Y4
5	70	50	60	30	25	0.25	0.30	110	Terävä	Y5
6	70	50	60	30	30	0.40	0.45	70	Terävä	Y6
7	70	65	70	35	20	0.10	0.15	110	Terävä	Y7
8	70	65	70	35	25	0.25	0.30	70	Terävä	Y8
9	70	65	70	35	30	0.40	0.45	110	Terävä	Y9
10	85	50	60	35	20	0.25	0.45	70	Terävä	Y10
11	85	50	60	35	25	0.40	0.15	90	Terävä	Y11
12	85	50	60	35	30	0.10	0.30	70	Terävä	Y12
13	85	65	70	25	20	0.25	0.45	90	Terävä	Y13
14	85	65	70	25	25	0.40	0.15	110	Terävä	Y14
15	85	65	70	25	30	0.10	0.30	90	Tylppä	Y15
16	85	35	50	30	20	0.25	0.45	110	Tylppä	Y16
17	85	35	50	30	25	0.40	0.15	70	Tylppä	Y17
18	85	35	50	30	30	0.15	0.30	110	Tylppä	Y18
19	100	65	70	30	20	0.40	0.30	70	Tylppä	Y19
20	100	65	70	30	25	0.10	0.45	90	Tylppä	Y20
21	100	65	70	30	30	0.25	0.15	70	Tylppä	Y21
22	100	35	50	35	20	0.40	0.30	90	Tylppä	Y22
23	100	35	50	35	25	0.10	0.45	110	Tylppä	Y23
24	100	35	50	35	30	0.25	0.15	90	Tylppä	Y24
25	100	50	60	25	20	0.40	0.30	110	Tylppä	Y25
26	100	50	60	25	25	0.10	0.45	70	Tylppä	Y26
27	100	50	60	25	30	0.25	0.15	110	Tylppä	Y27

Taulukko 8. Koehitsaustaulukko L27, 1.4547

Kokeen jälkeen suunniteltiin seuraava koe vaikuttavimpien tekijöiden perusteella. Vähemmän vaikuttavat tekijät vakioitiin muuttumattomiksi. Suoritettujen ko-

keiden aikana käytettiin hitsausohjelmassa selkeyden vuoksi vain yhtä sektoria. Tämä aiheuttaa varsinkin pienillä putkilla perusaineen voimakkaan lämpenemisen kahden ensimmäisen putken neljänneksen jälkeen, jonka vaikutuksesta lämmöntuonti kasvaa liian suureksi. Yhden sektorin käytön vuoksi myös kuvun ja tunkeuman hallinta vaikeutuvat, sillä samat parametrit ovat käytössä putken eri osissa hitsausasennosta riippumatta. Nämä ongelmat ovat kuitenkin helposti hallittavissa hienosäätövaiheessa, kun putken hitsausohjelma jaetaan useampiin sektoreihin, jolloin eri hitsausasentojen parametrikohmainen säätö on mahdollista.

Toisen kokeen koesuunnitelmaan (Taulukko 9) tekijöiksi valittiin juurituen korkeus, kuljetusnopeus ja hitsausvirta. Hitsausvirran arvona käytettiin huippuvirran arvoa, jonka perusteella laskettiin taustavirran arvo ensimmäisen kokeen tulosten perusteella. Hyväksi huippu-tausta-virtasuhteeksi havaittiin noin 65/35.

Koe nro.	Tekijä			Tulos
	Huippuvirta (A)	60° V -railo juurituki (mm)	Kulj.nop. (mm/min)	
1	80	1	95	Y1
2	80	2	100	Y2
3	80	3	105	Y3
4	85	1	100	Y4
5	85	2	105	Y5
6	85	3	95	Y6
7	90	1	105	Y7
8	90	2	95	Y8
9	90	3	100	Y9

Taulukko 9. Koehitsaustaulukko L9, 1.4547

Toinen koe antoi hyviä tuloksia, joista parhaan parametrikombinaation tulosta lähdettiin optimoimaan jakamalla ohjelma sektoreihin eri hitsausasentojen kohdalla.

Ohjelma jaettiin kuuteen eri sektoriin. Sektoreiksi valittiin 0.200, 0.400, 0.600, 0.800 ja 1.100 (täyden ympyrän ollessa 1.000). Kahden ensimmäiseen sektoriin

nostettiin hieman virtoja ja huippulangansyöttöä riittävän kuvun ja tunkeuman saavuttamiseksi.

Seuraavilla lakiasentoa käytävillä sektoreilla taustalangansyöttöä vähennettiin lisäaineen liiallisen palloutumisen ehkäisemiseksi, jotta lisäainetta ei tippuisi elektrodiin. Samanaikaisesti hitsausvirtaa laskettiin. Lakiasentojen jälkeen hitsattaessa pystyasennossa ylöspäin taustalangansyöttöä lisättiin ja virtaa vähennettiin reunahaavan ehkäisemiseksi perusaineen lämmitessä. Viimeinen sektori ohjelmoitiin kulkemaan aloituskohdan yli, sillä aloituksen esilämmityksestä johtuen aloituskohdan hitsiin ei muussa tapauksessa muodostu riittävää kupua.

### 6.3.3 Tulokset

Kokeiden perusteella ohjelmoidulla uudella hitsausohjelmalla saavutettiin riittävä tunkeuma hitsin koko matkalta (Kuva 11) sekä hitsistä saatiin kuvultaan tassisempi (Kuva 12) ja samalla reunahaava voitiin ehkäistä. Hitsausohjelmaan perustuva esituotannollinen hitsausohje on liitteenä (6).



Kuva 8. Sisäpuolen tunkeuma.



Kuva 9. Ulkopuolen hitsi.

Orbitaalihitsauslaitteisto on erittäin herkkä muutoksille, mikäli jotakin parametria muutetaan. Käytettävän elektrodin on oltava mahdollisimman symmetrinen ja keihäsmäinen ilman tasoitettua kärkeä, jotta vältytään sumuiselta ja toispuoleiselta valokaarelta. Elektrodi tulee myös kohdistaa huolellisesti noin 2-3 mm:n etäisyydelle perusaineesta asetettuna keskelle railoa.

Myös railolla ja juurituen korkeudella on huomattava vaikutus reunahaavan ja tunkeuman hallintaan. Railo tulee valmistaa mahdollisimman huolella symmetriiseksi, jonka jälkeen kaikki jäyste tulee hioa pois perusaineesta. Juurituen korkeus tulee varmistaa tarkasti, jotta saavutetaan riittävä, mutta tasainen tunkeuma juuren puolelle. V-railon sijaan suotavampaa olisi käyttää J-railoa, mikäli muotoa on mahdollista valmistaa, jotta voitaisiin tehokkaammin ehkäistä reunahaavan syntyä.

Puhtaan argonin käytön sijaan suojakaasun olisi hyvä olla vetyseosteinen, jotta tunkeuma olisi helpommin hallittavissa ja saavutettaisiin lisäaineen jouhevampi yhtyminen perusaineeseen. Juurikaasun käytössä tulee ottaa huomioon hitsattavan putken sisäpuolen tilavuus ja riittävä aloituskaasun määrä, jotta juurikaasun paine saadaan putkeen riittäväksi.

Yleisesti ottaen orbitaalilaitteiston toiminta kokeiden aikana ei ollut luotettavuudeltaan sellaisella tasolla, jolla voisi hitsata sarjatuotannossa 254 SMO:n kal-



taista materiaalia korkeilla laatuvaatimuksilla. Tämä johtuu laitteiston kyvystä toistaa täysin samanlaista hitsiä kuin edellinenkin. Toistokyky ei kuitenkaan ole täysin näin yksiselitteinen, sillä prosessiin vaikuttavia muuttujia on huomattavan paljon (saavutettu railon symmetria ja puhtaus, elektrodin muoto ja kohdistus, hitsin aloituskohta yms.) ja kaikkia näitä muuttujia ei suoritettujen kokeiden mit-takaavassa voitu selvittää.

## 7 YHTEENVETO

Laadulla on keskeinen rooli yrityksen tuottavuudessa, kilpailukyvyssä ja julkivassassa. Hitsaavan teollisuuden laatu koostuu useista pienistä tekijöistä, joten on ensiarvoisen tärkeää, että merkityksettömiltäkin tuntuvat asiat suoritetaan perusteellisesti, sillä hitsauksessa laatu ei synny tarkastamalla, vaan huolellisella ja osaavalla työn suorittamisella. Mahdollisten korjaustarpeiden ilmeneminen osoittaa, että järjestelmällistä työtä tietyn laatutason saavuttamiseksi ja ylläpitämiseksi ei hallita riittävän hyvin.

Hitsauksen laadunkehityksessä tärkeintä on keskittyä tuotantoprosessin laadun parantamiseen. Tämä tarkoittaa olemassa olevien virheiden korjaamista ja mahdollisten virheiden ennaltaehkäisyä. Jotta prosessia voidaan parantaa, tulee prosessin eri vaiheet sisäistää ja ymmärtää eri muuttujien ja menetelmien vaikutukset lopulliseen tulokseen.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää Stairon Oy:n ruostumattomien erikois-terästen mekanisoituja hitsausprosesseja laadullisesta näkökulmasta, jotta ne vastaisivat paremmin asiakkaiden laatuvaatimuksia. Työn tuloksena saumahitsauksessa suoritettut kokeet osoittivat, että materiaalien EN 1.4410, 1.4462, 1.4547 ja 1.4562 päittäisliitokset ovat mahdollista suorittaa V-railon avulla yhtä palkoa käyttämällä ilman pintavirheitä ja röntgenillä havaittavia sisäisiä virheitä.

Orbitaalihitsauksen osalta kokeet saavuttivat materiaalin EN 1.4547 hitsauksessa pinta- ja juuripuolen laadukkaan hitsin, joka pintapuolisella tarkastuksella on laatuvaatimukset täyttävä. Orbitaalilaitteiston herkkyydestä ja lukuisten muuttujien yhteisvaikutuksesta aiheutuva epävarma toistokyky voi olla materiaalin 1.4547 kohdalla laajamittaisen tuotantokäytön esteenä. Tämän suhteen prosessi vaatisi yksityiskohtaisempaa tarkastelua, joka ei valitettavasti työlle asetetussa mittakaavassa ollut mahdollista.

Työ oli kokonaisuudessaan erittäin mielenkiintoinen ja kohdeprosessit ehtivät tulla erittäin tutuksi tänä aikana. Usean tuotantoprosessin käsitteleminen yhtäaikaisesti onnistui loppujen lopuksi vaivattomammin kuin alussa voitiin uskoa. Työssä mukana olleen Stairon Oy:n henkilöstön tietotaso perinteisistä hitsausprosesseista ja materiaaleista sekä eri menetelmistä oli todella korkealla ja tätä kautta pystyin laajentamaan tietoa myös omaan ammatilliseen osaamiseen.

Työstä ja Stairon Oy:stä ja kokonaisuudessaan positiivinen kuva, vaikka yritys kävi työn aikana läpi suuria organisaatiomuutoksia. Työstä jäi ehkä hieman häiritsemään täysin selkeän vastauksen puuttuminen orbitaalihitsauksen toistokyvylle, jota ei ollut mahdollista selvittää työlle määriteltyjen resurssien puitteissa.

## LÄHTEET

- Cunat, P. The Euro-Inox Handbook of Stainless Steel. Brysseli, Saksa: Euro-Inox.
- Duplex ruostumattomien terästen hitsaus 2006. Böhler Welding Group Nordic AB. Vantaa.
- Duplex Stainless Steel 2013. Outokumpu Oy. Esitemateriaali.
- ESAB Oy 2013. Aristo MechTig C2002i – Orbital Welding Power Source. Viitattu 7.12.2013. [www.esab.com](http://www.esab.com) > Products > Welding Automation > Aristo MechTig C2002i.
- ESAB Oy 2013. TIG-hitsaus. Viitattu 9.12.2013. [www.esab.fi](http://www.esab.fi) > Hitsautietoa > Hitsausmenetelmät.
- ESAB Oy 2013. Welding Parameters and Techniques. Viitattu 12.12.2013. [http://www.esabna.com/EUWeb/MIG\\_handbook/592mig7\\_1.htm](http://www.esabna.com/EUWeb/MIG_handbook/592mig7_1.htm)
- Fronius International GmbH 2013. Trans Puls Synergic 3200. Viitattu 5.12.2013 [www.fronius.com](http://www.fronius.com) > Welding Technology > Products > Arc Welding > Power Sources > MIG/MAG.
- How to Weld Type 2205 Code Plus Two Stainless Steel. 2006. Outokumpu Oy. Schaumburg.
- Junttila, S. 2013. Insinööri työ. Sula-ajan merkitys juotoksen kaasukuplamäärään ja leikkauslujuuteen höyryfaasijuottamisessa.
- Karjalainen, E. 1992. Teollinen koesuunnittelu. Hollola: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- Karjalainen, E. 2002. Six Sigma: Uuden syköpolven johtamis- ja laatumenetelmä. Hollola: Quality Knowhow Karjalainen Oy.
- Karjalainen, S. 2013-2014. Asiantuntija, Pronius Oy. Haastattelut.
- Kauppalehti 2013. Stairon Oy. Viitattu 15.11.2013 [www.kauppalehti.fi](http://www.kauppalehti.fi) > Yritykset.
- Kyröläinen, A. & Lukkari, J 2002. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- Lepola, P. 2006. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Werner Söderström Oy.
- Lindewald, C 2013. Hitsauksen laadun ja tehokkuuden parantaminen hyödyntäen standardia SFS-EN ISO 3834. Tampere: Teknologiainfo Teknova Oy.
- Lukkari, J 2012. IWE: Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. PowerPoint.
- Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka perusteet ja kaarihitsaus. Helsinki: Edita Prima Oy.
- Lukkari, J. 2005. Lämmöntuonti ja hitsausenergia: Osa 3. Hitsaus uutiset 1/05. ESAB Oy. Helsinki.
- MET 2001. Raaka-ainekäsikirja – Muokatut teräkset. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- Nicrofer 3127 hMo – alloy 31. 2006. ThyssenKrupp VDM. Werdohl.
- Ruostumattomien duplex-terästen hitsaus. 2012. ESAB Oy. Helsinki.
- Stairon Oy 2013. Historia. Viitattu 19.11.2013 [www.stairon.fi](http://www.stairon.fi) > Yritys > Historia.

Suojakaasukäsikirja 2010. Suojakaasukäsikirja. Oy Aga Ab.

Tseng, K.H. & Chou, C.P. 2001. Effect of nitrogen addition to shielding gas on residual stress of stainless steel weldments. Science and Technology of Welding and Joining 1/2002.

Type 254 SMO 2013. Outokumpu Oy. Itasca.

Westin E. 2013. Asiantuntija. Voestalpine Böhler Welding Austria GmbH. Haastattelu.

Väisänen J. & Paro, J. 2000. Superausteniittisen ruostumattoman teräksen ja duplex-teräksen lastuttavuus. Espoo: Otamedia Oy.

