

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

RAILOGEOMETRIAN VAIKUTUS POHJAPALON HITSAUKSEEN  
MODIFIOIDULLA MAG-HITSAUSPROSESSILLA

THE EFFECTS OF GROOVE GEOMETRY IN ROOT PASS WELDING WITH A  
MODIFIED MAG-WELDING PROCESS

Lappeenrannassa 29.4.2015

Visa-Valtteri Monto

Työn tarkastaja: Professori Jukka Martikainen

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>4</b>
1.1	Työn tausta.....	4
1.2	Työn tavoite ja rajaus.....	5
1.3	Työn toteutus .....	5
<b>2</b>	<b>MAG-HITSAUS</b> .....	<b>6</b>
2.1	Laitteisto .....	7
2.2	Tandem-hitsaus.....	12
2.3	Hitsausvirheet .....	13
2.4	Pohjapalon hitsaus .....	21
2.4.1	Hitsausvirheet pohjapalossa.....	23
<b>3</b>	<b>MODIFIOIDUT MAG-HITSAUSPROSESSIT</b> .....	<b>25</b>
3.1	Fronius CMT.....	25
3.2	Lincoln STT.....	26
3.3	ESAB Aristo SuperPulse .....	26
<b>4</b>	<b>KEMPPI WISE- TUOTEPERHE</b> .....	<b>28</b>
4.1	WiseRoot .....	28
4.1.1	WiseRoot+ .....	30
4.2	WisePenetration .....	32
4.3	WiseFusion .....	32
4.4	WiseThin.....	33
<b>5</b>	<b>TUTKIMUSOSUUS</b> .....	<b>34</b>
5.1	Tutkimussuunnitelma.....	34
5.1.1	Koesarja I.....	34
5.1.2	Koesarja II.....	34

5.2	Laitteistot ja materiaalit .....	34
5.3	Kokeet ja mittaukset .....	35
5.3.1	Koesarja I.....	35
5.3.2	Koesarja II.....	37
<b>6</b>	<b>TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>YHTEENVETO .....</b>	<b>49</b>
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>50</b>
	<b>LIITE</b>	

Liite I: Aineodistus ja analyysitodistus.

## 1 JOHDANTO

Hitsaustyön tuottavuuden ja laadun parantaminen on tärkeä tekijä hitsaavan teollisuuden kilpailukyvyn kehittämisessä. Halvan työvoiman maiden, kuten Kiinan ja Intian liittyttyä markkinoille, on kalliimman työvoiman maiden, kuten Suomen, hitsaavien yritysten keksittävä keinoja pysyä kilpailukykyisinä suuremmista kuluista huolimatta.

### 1.1 Työn tausta

Tuottavuuden parantamisen keinoja ovat hitsauksen jälkeisen työstön ja hitsausvirheiden välttäminen, mikä tarkoittaa tuotteen tekemistä kerralla valmiiksi ilman turhia työvaiheita, kuten roiskeiden poistoa, hitsien hiomista ja turhia taukoja. Useat hitsauskonevalmistajat ovatkin kehittäneet uusia modifioituja hitsausprosesseja, jotka nopeuttavat hitsausta, parantavat hitsien laatua ja vähentävät jälkityöstön tarvetta. Esimerkiksi Kemppi WiseRoot+ ja Fronius CMT vähentävät hitsauksen lämmöntuontia ja roiskeisuutta. Pienempi lämmöntuonti helpottaa hitsisulan hallintaa pohjapalon hitsauksessa vaikeissa hitsausasennoissa ja roiskeeton hitsaus vähentää tarvittavaa jälkityöstöä. Myös muun muassa ESAB, Lincoln, Miller, EWM ja SKS ovat kehittäneet omia modifioituja hitsausprosesseja.

Hitsaavassa teollisuudessa kohdataan tilanteita, joissa ei voida käyttää optimaalisia railogeometrian arvoja. Ilmarako saattaa vaihdella railojen huonon valmistustarkkuuden, tai huonon sovitustarkkuuden vuoksi. Tässä kandidaatintyössä etsitään railogeometrian ääriarvoja, joilla Kemppi WiseRoot+-hitsausprosessilla päästään hitsiluokkaa B vastaaviin hitsaustuloksiin. WiseRoot+:n toiminta perustuu hitsauksen aikaiseen automaattiseen jännitteen tarkkailuun ja hitsausvirran säätöön. Hitsauskoneen ohjausyksikkö havaitsee jännitteen avulla langan ja perusaineen oikosulun ja lisäainepisaran irtoamisen, jolloin virtaa säädetään pienemmäksi roiskeettoman lisäaineen siirtymisen varmistamiseksi. Lisäaineen siirryttyä sulaan virtaa nostetaan, jolloin valokaari syttyy uudelleen ja muotoilee hitsisulaa.

## 1.2 Työn tavoite ja raja

Työn tavoitteena oli etsiä Kemppi Oy:n kehittämälle WiseRoot+-hitsausprosessille hitsausparametreja ja sellaisia railogeometrian arvoja, joilla päittäisliitoksen pohjapalon hitsaus onnistuu virheettömästi. Lukkarin (2002, s. 12-14) mukaan mahdollisia väärästä railogeometriasta johtuvia hitsausvirheitä ovat muun muassa pohjapalon valuma, vajaa hitsautumissyvyys juuressa ja vajaa juuri. Työn teoriaosa käsittelee MAG-hitsausta, hitsausvirheitä, pohjapalon hitsausta ja erilaisia modifioituja MAG-hitsausprosesseja. Erityistä huomiota kiinnitetään Kemppi Oy:n Wise-tuoteperheeseen, johon kuuluvaa WiseRoot+-prosessia käytettiin tämän tutkielman hitsauskokeissa. Työ rajattiin koskemaan pohjapalkojen hitsausta perinteisellä MAG-hitsausprosessilla ja modifioituilla MAG-prosesseilla.

## 1.3 Työn toteutus

Työn teoriaosuus on toteutettu kirjallisuustutkimuksena, jonka lähteinä on käytetty hitsaustekniikan kirjoja, hitsausalan lehtijulkaisuja ja hitsauskonevalmistajien tuotetietoja. Työn tutkimusosuuden hitsauskokeet suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa. Hitsauskokeissa käytettiin Kemppi FastMig X 450 –virtalähdettä ja FastMig MXP 37 Pipe –langansyöttölaitetta, jossa oli asennettuna WiseRoot+-ohjelmisto. Kokeissa keskityttiin analysoimaan vain hitsien juuren puolta.

## 2 MAG-HITSAUS

MAG-hitsaus (Metal-arc active gas welding, metallikaasukaarihitsaus aktiivisella suojakaasulla) on terästen hitsaukseen tarkoitettu hitsausprosessi, jossa valokaari palaa automaattisesti syötettävän lisäainelangan ja työkappaleen välillä suojakaasun ympäröimänä. MAG-hitsauksessa käytetään hitsisulan kanssa reagoivaa aktiivista suojakaasua, joka voi olla argonin ja hapen, argonin ja hiilidioksidin, argonin, hapen ja hiilidioksidin seos, tai puhdas hiilidioksidi. Suojakaasu ympäröi valokaarta ja hitsisulaa suojellen niitä ympäristön ilmalta. (Lukkari, 1997, s. 159.)

MAG-hitsaus on hyvin monipuolinen hitsausprosessi laajojen hitsausarvojen säätömahdollisuuksien vuoksi. Yhdellä langanhalkaisijalla voidaan hitsata pienillä jännitteen ja virran arvoilla, eli lyhytkaarialueella ohutlevyjä, pohjapalkoja ja asentohitsejä, keskisuurilla jännitteen ja virran arvoilla, eli sekakaarialueella pystyhitsejä ylhäältä alaspäin, ja korkeilla virran ja jännitteen arvoilla, eli kuumakaarialueella paksuja levyjä ja jalko- ja alapienahitsejä suurella teholla. (Lukkari, 1997, s. 160 & s. 177.) Muita MAG-hitsauksen etuja on kuonattomuus, jolloin kuonasulkeumien vaara on pieni eikä kuonausta tarvitse tehdä, mahdollisuus säätää tunkeumaa virran arvoa muuttamalla, korkea tuottavuus ja edulliset lisäaineet. Jatkuva lisäaineensyöttö mahdollistaa katkeamattoman hitsauksen, jolloin hitsiin ei synny lisäaineen vaihtokohtia kuten puikkohitsauksessa. Jatkuva lisäaine myös helpottaa mekanisointia. (Lukkari, 1997, s. 177; Lepola & Makkonen, 2005, s. 103.)

MAG-hitsaus ei sovellu ulkotiloihin eikä vetoisiin tiloihin, sillä tuuli puhaltaa helposti suojakaasun pois hitsauskohdasta. Hitsauspistoolin koko ja muoto voi myös aiheuttaa ongelmia ahtaissa paikoissa hitsattaessa, ja puikkohitsauksessa käytettävään laitteistoon verrattuna mutkikas MAG-hitsauslaitteisto on hankala liikutella, vaatii enemmän huoltoa ja on alttiimpi häiriöille. Myös hitsausarvojen säätö on puikkohitsaukseen verrattuna vaikeampaa. MAG-hitsauksen lisäainevalikoima ei myöskään ole niin monipuolinen kuin puikkohitsauksen. (Lukkari, 1997, s. 177; Lepola & Makkonen, 2005, s. 103.)

## 2.1 Laitteisto

MAG-hitsauslaitteisto koostuu hitsausvirtalähteestä, langansyöttölaitteistosta, suojakaasulaitteistosta, monitoimijohdosta ja hitsauspistoolista. Hitsausvirtalähde muuttaa verkkovirran hitsaukseen sopivaksi virraksi ja syöttää virtaa monitoimijohtoa pitkin hitsauspistooliin tulevaan lisäainelankaan. Langansyöttölaitteisto syöttää lankaa monitoimijohtoa pitkin hitsauspistooliin, ja suojakaasulaitteisto suojakaasua monitoimijohtoa pitkin hitsauspistooliin. (Lukkari 1997, s. 177; Lepola & Makkonen, 2005, s. 104.) Kuvassa 1 on Kempin MIG/MAG-hitsauskone, jossa on erillinen irrotettava langansyöttölaite sijoitettuna virtalähteen päälle.



**Kuva 1.** Kemppi FastMig-hitsauskone (Kemppi, 2012a, s. 1).

MAG-hitsauksessa käytettävät hitsausvirtalähteet ovat vakiojännitteisiä inverttereitä tai tasasuuntaajia. Virtalähteiden ominaiskäyrät ovat lievästi laskevia, lähes vaakasuoria, jolloin hitsausvirran kasvaessa jännite alenee vain vähän, yleensä enintään 2-5 V/100 A. Lähes vakiona pysyvän jännitteen vuoksi saavutetaan itsesäätyvä valokaari. Valokaaren pituus pysyy vakiona, vaikka hitsauspistoolin etäisyys työkappaleesta muuttuu. Virtalähteissä on myös kuristin, eli induktanssin säätö, jonka tarkoitus on estää

lyhytkaarihitsauksessa tapahtuvien oikosulkujen aiheuttamien virtapiikkien nousemisen liian suureksi. Induktanssi hidastaa virran kasvua ja madaltaa virtapiikin huippua. Jos lyhytkaarihitsauksessa virtapiikkiä ei kuristeta tarpeeksi, aiheuttaa nopea virran kasvu hitsiainepisaroiden liian rajun irtoamisen lisäainelangan päästä, jolloin syntyy roiskeita. Induktanssi voidaan säätää vaihtamalla maadoituskaapelin paikkaa hitsausvirtalähteen virran ulosottopistokkeissa, joilla saavutetaan eri induktanssin arvoja. Joissain hitsausvirtalähteissä voi olla myös portaaton säätökytkin induktanssin säätöä varten. (Lukkari, 1997, s. 177-178.)

Hitsausarvot säädetään hitsausvirtalähteen etupaneelista. MAG-hitsauksessa säädetään vain jännitettä ja langansyöttönopeutta, hitsausvirta säätyy langansyöttönopeuden mukaan. Kaksinuppisäädössä langansyöttönopeutta ja jännitettä säädetään erillisistä säätimistä, jolloin tulee tietää niiden välinen sopiva suhde. Liian suuri langansyöttönopeus jännitteeseen nähden aiheuttaa lisäainelangan törmäämisen työkappaleeseen ja liian suuri jännite langansyöttönopeuteen nähden aiheuttaa valokaaren pidentymisen ja pahimmassa tapauksessa lisäainelangan sulamisen kiinni kosketussuuttimeen. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 122-123.) Synergisessä säädössä, eli yksinuppisäädössä jännite ja langansyöttönopeus säätävät oikeassa suhteessa toisiinsa nähden koneen muistissa olevan ominaiskäyrän, eli synergiakäyrän mukaisesti. Koneen käyttäjä siis säätää koneesta riippuen vain langansyöttönopeutta tai jännitettä. Hitsauskoneiden muistiin voidaan tallentaa itse luotuja synergiakäyriä, jolloin hitsausarvojen säätö helpottuu ja nopeutuu. (Lukkari, 1997, s. 211; Lepola & Makkonen, 2005, s. 123.)

Langansyöttölaitteiston tehtävä on purkaa lisäainelankaa lankakelalta, syöttää lankaa monitoimijohdon langanjohtimen läpi hitsauspistooliin ja sitä kautta valokaareen. Langansyöttölaitteisto voi olla sijoitettu kiinteästi virtalähteeseen, tai se voi olla erillään virtalähteestä, kuten isommissa, teollisuudessa käytettävissä hitsauskoneissa. Erillinen langansyöttölaitteisto voidaan sijoittaa esimerkiksi puomiin tai lattialle ulottuvuuden parantamiseksi. Lisäainelankakela kiinnitetään laakeroituun kannatinnapaan, jossa on säädettävä kitkajarru. Kitkajarrun tehtävä on pysäyttää lankakelan pyöriminen langansyöttöjärjestelmän pysähdyttyä. Liian löysälle säädetty kitkajarru aiheuttaa lisäainelangan purkautumisen lankakelalta. Langansyöttönopeutta säädetään langansyöttöpyörästä pyörittävän moottorin avulla, joka pitää langansyöttönopeuden



vakiona langansyöttövuoksen muutoksista huolimatta. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 105.)

Langansyöttöpyörästä koostuu syöttöpyöräparista, joista toinen pyörä on kytketty moottoriin ja toinen on painopyörä, jossa on puristuspaineen säätö. Tällaista pyörästä käytetään lähinnä pienissä hitsauskoneissa. Teollisuuskäyttöön suunnitelluissa hitsauskoneissa langansyöttöpyöristä molemmat voivat olla moottoriin kytkettyjä syöttöpyöriä ja syöttöpyörästä voi olla kaksi syöttöpyöräparia peräkkäin. Syöttöpyörien tyyppi valitaan käytettävän lisäainelangan paksuuden ja tyyppin mukaan. V-urallisia pyöriä käytetään teräksisillä lisäainelangoilla ja pehmeämmillä alumiinilangoilla käytetään U-urallisia pyöriä. Väärä uran koko aiheuttaa langan puristumista, mikä johtaa langan kuparipinnoitteen irtoamiseen ja mahdolliseen langanjohtimen tukkeutumiseen. Myös liian suuri puristuspaine aiheuttaa kuparin irtoamista ja lisäainelangan litistymisen, mikä saattaa johtaa syöttöhäiriöihin. (Lukkari, 1997, s. 184.)

Yleisin langansyöttölaitteiston tyyppi on työntävä langansyöttö, jossa hitsauskoneeseen sijoitettu syöttöpyörästä työntää lisäainelankaa langanjohtimeen ja hitsauspistooliin. Työntävässä langansyötössä monitoimijohdon enimmäispituus on viisi metriä, jota pidemmällä monitoimijohdon pituuksilla syöttöhäiriöitä voi ilmetä. Pehmeämpiä alumiinisia lisäainelankoja käytettäessä monitoimijohdon enimmäispituus on kolme metriä työntävällä langansyötöllä. Pehmeillä alumiinilangoilla käytetäänkin työntävää-vetävää langansyöttöä, jossa hitsauslaitteiston langansyöttöpyörästä lisäksi hitsauspistoolissa on erillinen vetävä langansyöttöjärjestelmä, joka mahdollistaa pidempien monitoimijohtojen häiriöttömän käytön. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 105.) Työntävän langansyöttölaitteen lisäksi voidaan käyttää myös välisyöttölaitetta, joka yhdistetään hitsauslaitteistoon esimerkiksi 20 m pituisella välikaapelilla. Välisyöttölaitteeseen liitetään vakiopituinen monitoimijohto ja hitsauspistooli. Välisyöttölaitteen avulla saavutetaan laaja ulottuvuus ilman virtalähteen siirtelyä. (Lukkari, 1997, s. 106.)

Kemppi Oy on kehittänyt SuperSnake-välisyöttölaitteen, jonka avulla lisäainelankaa voidaan syöttää jopa 30 m päähän langansyöttölaitteelta. SuperSnake-välisyöttölaite on muodoltaan kapea ja kevyt käsitellä, joten se on helppo kuljettaa vaikeisiin hitsauskohteisiin. Langansyöttönopeutta ja jännitettä voidaan säätää välisyöttölaitteesta,

jolloin hitsaajan ei tarvitse poistua hitsauspaikalta. SuperSnake on yhteensopiva Kemppi FastMig MXF-langansyöttölaitteen kanssa, ja siihen voidaan liittää mikä tahansa standardisoidulla Euro-liittimellä varustettu hitsauspistooli. SuperSnake on yhteensopiva Kemppi FastMig KMS-, FastMig Pulse ja Kemppi Pro –hitsauskoneiden kanssa. (Kemppi, 2012b, s. 1-2.) Kuvassa 2 on esitetty SuperSnake-välisyöttölaite. Välisyöttölaitteen muoto mahdollistaa sen helpon liikuttelun ahtaisiinkin paikkoihin.



**Kuva 2.** Kemppi SuperSnake –välisyöttölaite (Kemppi, 2012b, s. 1).

Monitoimijohtoa pitkin syötetään hitsausvirta, lisäainelanka ja suojakaasu hitsauspistooliin. Monitoimijohtoa pitkin kierrätetään myös mahdollinen hitsauspistoolin jäähdytysvesi. Monitoimijohdossa kulkee myös ohjausvirta hitsauspistoolilta hitsauslaitteistolle, jolla annetaan laitteistolle käsky aloittaa tai lopettaa langansyöttö, suojakaasunsyöttö ja hitsausvirransyöttö. Lisäainelanka kulkee monitoimijohdossa langanjohdinta pitkin, jonka tyyppi ja halkaisija valitaan käytettävän lisäainelangan mukaan. Langanjohdin on irrotettava ja vaihdettava osa. Teräksisillä lisäainelangoilla käytetään muovisia langanjohtimia tai terässpiraalijohtimia, alumiinisilla langoilla teflonjohtimia. Sopiva johtimen sisähalkaisija on 1,5 kertaa käytettävän lisäainelangan paksuus. Liian suuri langanjohtimen sisähalkaisija mahdollistaa langan aaltoilemisen ja taipumisen johtimen sisällä, jolloin lanka tulee epätasaisesti ulos hitsauspistoolista. (Lukkari, 1997, s. 184-185.) Hitsauksen aikana monitoimijohdon tulisi olla mahdollisimman suorana. Jyrkät mutkat monitoimijohdossa lisäävät lisäainelangan ja

langanjohtimen välistä kitkaa, josta voi aiheutua langansyötön häiriöitä ja urien kulumista langanjohtimen sisäpintaan. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 107.)

Hitsauspistoolissa langanjohdinta pitkin tuleva lisäainelanka kulkee kosketussuuttimen läpi, jonka avulla lisäainelankaan kytketään hitsausvirta. Suojakaasu johdetaan hitsauskohtaan kosketussuuttimen ympärillä olevan kaasusuuttimen kautta, ja pistoolin käyttökytkimen ohjausvirta antaa signaalin käynnistää tai lopettaa hitsaustoiminnot. Hitsauspistoolia jäähdytetään suojakaasun avulla tai erillisellä vesijäähdytyksellä. Vesijäähdytteisiä pistooleja käytetään suurella teholla kuumakaarialueella hitsattaessa. Hitsauspistoolissa voi olla myös kaukosäädin hitsausarvojen säätöä varten ja hitsaussavujen imutoiminto. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 107-108.)

Kosketussuuttimet valmistetaan seostamattomasta kuparista tai kupariseoksista, koska niiltä vaaditaan hyvää sähkönjohtavuutta, kuumuudenkestoa ja kulumisen kestoa. Suuttimen reiän halkaisija valitaan lisäainelangan halkaisijan ja hitsaustehon mukaan, yleensä 0,20-0,50 mm lisäainelangan halkaisijaa suurempi suuttimen reikä. Kosketussuuttimen valintaan vaikuttavat myös käytettävä suojakaasu, suuttimen koko ja materiaali, langan laatu ja etutaivutus, sekä pistoolin malli ja mekanisointiaste, eikä oikeanlaisen suuttimen valintaan ole yksikäsitteistä yleisohjetta, joten suuttimen koko tulisi valita työkohteen mukaan. Kosketussuuttimen ympärillä oleva kaasusuutin ohjaa suojakaasun hitsauskohtaan ja pitää suojakaasun virtauksen tasaisena. Hitsauksessa syntyvät roiskeet voivat tarttua kaasusuuttimen sisäpinnalle ja aiheuttaa suojakaasun virtaukseen pyörteitä, joka mahdollistaa ilman imeytymisen mukaan hitsaustapahtumaan. Kaasusuuttimen sisäpinta on pidettävä puhtaana, jotta suojakaasu virtaisi tasaisesti. (Lukkari, 1997, s. 187-189.)

Suojakaasu saadaan kaasupullosta tai kaasunjakeluverkosta. Suojakaasupulloon tai kaasuverkon ulosottoliittimeen liitetään paineenalennin, jotta voidaan säätää suojakaasun käyttöpainetta ja virtausmäärä sopivaksi. Virtaussäätimeen liitetty kaasuletku ohjaa kaasun magneettiventtilille, jonka avautumista ja sulkeutumista ohjataan hitsauspistoolin käyttökytkimen ohjausvirralla. Suojakaasu virtaa monitoimijohdon kautta hitsauspistooliin. (Lukkari, 1997, s. 189.)

Suojakaasun pääasiallinen tehtävä on suojata hitsisulaa, elektrodiä ja lisäainelangan päätä ilman typen ja hapen haitalliselta vaikutukselta. Riittämätön kaasusuojaus aiheuttaa hitsin pinnan hapettumista, huokosien muodostumista ja seosaineiden poisjalamista. Suojakaasu myös saa valokaaren palamaan lisäainelangan ja työkappaleen välillä halutulla tavalla ja jäädyttää hitsauspistoolia. Suojakaasun tyypillä on myös vaikutusta hitsauksen kaarityyppiin, valokaaren vakauteen, hitsausparametrien säädettävyyteen, hitsauksen nopeuteen, tunkeuman muotoon ja syvyyteen, hitsipalon muotoon, roiskeisuuteen, hitsin lujuusominaisuuksiin, sekä hitsauskustannuksiin ja tuottavuuteen. Suojakaasu vaikuttaa myös työturvallisuuteen hitsaussavujen koostumuksen kautta. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 110-111.)

MAG-hitsauksessa käytetään kaasuseosta, jossa on hitsisulan kanssa reagoiva komponentti, kuten happi, vety tai hiilidioksidi. Myös puhdasta hiilidioksidia käytetään MAG-hitsauksen suojakaasuna. Seoskaasujen pääkomponentti on usein argon, joka on inertti eli hitsisulan kanssa reagoimaton kaasu. Aktiivisen seoskaasun koostumus voi olla esimerkiksi  $\text{Ar} + 25 \% \text{CO}_2$  tai  $\text{Ar} + 2 \% \text{O}_2$ . Suojakaasun happi- tai hiilidioksidikomponentin tarkoitus on muodostaa hitsisulan pinnalle huonosti sähköä johtava oksidikalvo. Kalvon huono sähkönjohtavuus kohdistaa valokaaren pienelle alueelle, mikä saa valokaaren käyttäytymään vakaammin. Hitsattaessa terästä puhtaalla argonsuojakaasulla, johtaa koko hitsisulan pinta hyvin sähköä ja valokaaren kohdistaminen on vaikeaa. (Lepola & Makkonen, 2005 s. 103 & s. 113.)

MIG-hitsaus eroaa MAG-hitsauksesta käytettävän lisäainelangan ja suojakaasun osalta. MIG-hitsausta käytetään ei-rautametallien, esimerkiksi alumiinin hitsaukseen. MIG-hitsauksen suojakaasut ovat inerttisiä, eli hitsisulan kanssa reagoimattomia kaasuja, kuten argon ja helium ja niiden seokset. MIG-hitsauksessa ei synny ongelmaa hitsisulan sähkönjohtavuuden kanssa kuten teräksen MAG-hitsauksessa, joten puhtaalla argonsuojakaasulla saadaan erinomaiset hitsaustulokset. (Lepola & Makkonen, 2005 s. 103 & s. 113.)

## 2.2 Tandem-hitsaus

MIG/MAG-hitsauksesta kehitetyllä tandem-hitsausprosessilla saavutetaan perinteiseen MIG/MAG-hitsaukseen verrattuna jopa yli kaksinkertainen hitsausnopeus ja suurempi hitsiaineentuotto. Tandem-hitsauksessa käytetään kahta lisäainelankaa, joilla molemmilla

on omat langansyöttölaitteensa ja virtalähteensä. Langat syötetään yhteiseen kaasusuuttimeen, jossa on kaksi toisistaan eristettyä elektrodiä. Lankojen valokaaret palavat erillään toisistaan, mutta muodostavat yhteisen sulan. Tandem-hitsauksen kanssa hyvin samankaltaisessa twin arc –hitsausprosessissa käytetään kahta hitsauslankaa, joihin johdetaan hitsausvirta yhteisen virtasuuttimen kautta. Twin arc –prosessissa ei siis voida asettaa keskenään erilaisia hitsausparametreja molemmille langoille. (Weman & Lindén, 2006, s. 26.)

Tandem-hitsauksessa voidaan käyttää keskenään erilaisia lisäainelankoja ja molemmille langoille voidaan asettaa erilaiset hitsausparametrit. Säättömahdollisuuksien laajuus kuitenkin asettaa korkeammat vaatimukset hitsaajan ammattitaidolle kuin perinteinen MIG/MAG-hitsaus. Tandem-hitsauksen kaksi erillistä valokaarta voivat reagoida toistensa kanssa magneettisesti ja aiheuttaa häiriöitä hitsauksessa. Magneettisen vuorovaikutuksen aiheuttamia ongelmia voidaan ehkäistä suurentamalla elektrodien välistä etäisyyttä, tai käyttämällä pulssitusta. Elektrodien hitsausvirran pulssitus synkronoidaan siten, että toisen langan ollessa pulssin matalan virran vaiheessa, on toisessa langassa pulssin korkean virran vaihe. (Weman & Lindén, 2006, s. 121-122.)

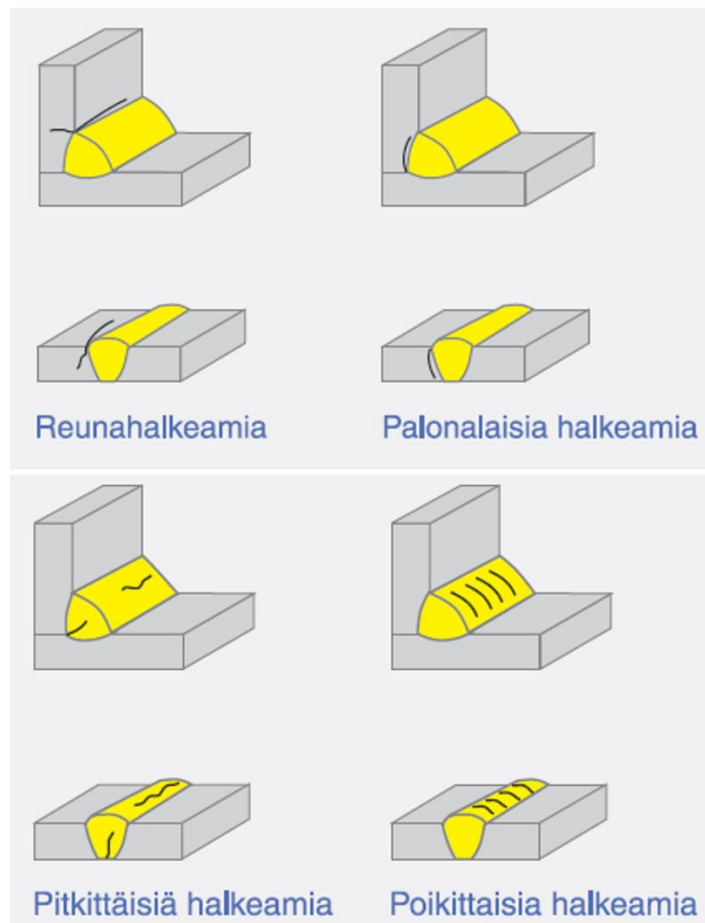
### 2.3 Hitsausvirheet

Hitsausvirhe, eli epäjatkuvuus tai poikkeama hitsin muodossa voi johtua virheestä hitsauksen suorituksessa, perusaineen rajoitetusta hitsattavuudesta, tai molempien yhteisvaikutuksesta. (Lukkari, 2002, s. 3; Ovako, 2012, s. 13). Hitsausvirheillä on suuri vaikutus valmiin tuotteen käyttöikään ja hitsausvirheet voivat vaikuttaa myös käytön aikana muiden vikojen ja vaurioiden syntymiseen. Hitsausvirheet tuotteessa eivät aina kuitenkaan johda tuotteen hylkäämiseen, ja tarpeettoman korkeat laatuvaatimukset nostavat työn vaikeutta ja kustannuksia. (Lukkari, 2002, s. 3-5.) Vaadittava hitsin laatutaso osoitetaan standardissa SFS-EN ISO 5817 (2014, s. 10) määritellyillä hitsiluokilla B, C, tai D, joista luokka B on vaativin. Hitsiluokan vaativuudesta riippuen tietyt hitsausvirheet sallitaan valmiissa tuotteissa rakenteen kestävyysvaatimusten ja olosuhteiden sallimissa rajoissa. Hitsiluokkien B, C ja D lisäksi standardi SFS-EN 1090-2 + A1 (2012, s. 51-52) määrittelee hitsiluokan B+, joka on hitsiluokka B tiukennetuilla laatuvaatimuksilla.

Hitsausvirheet on jaettu kuuteen pääryhmään: Halkeamiin, onteloihin, sulkeumiin, liittymisvirheisiin, muoto- ja mittavirheisiin ja muihin virheisiin. (SFS-EN ISO 6520-1, 2008, s. 8). Kuuden pääryhmän hitsausvirheet voidaan vielä luokitella kaksiulotteisiin ja kolmiulotteisiin virheisiin perustuen niiden muotoon ja niiden aiheuttamaan vaikutukseen hitsausliitoksessa. Kaksiulotteiset hitsausvirheet ovat erityisen vaarallisia, sillä ne ovat teräväkärkisiä. Kaksiulotteisia hitsausvirheitä ovat halkeamat, liitosvirheet ja vajaa hitsautumissyvyys. Kolmiulotteiset virheet, joihin kuuluvat sulkeumat, pyöreät huokokset ja pyöreäpohjaiset reunahaavat, ovat muodoltaan pallomaisia tai lieriömäisiä. Kolmiulotteiset virheet eivät ole niin vaarallisia kuin kaksiulotteiset virheet, sillä ne eivät johda halkeaman etenemiseen niin helposti kuin teräväkärkiset hitsausvirheet. (Lukkari, 2002, s. 3-4.)

Halkeamat ovat vaarallisin hitsausvirhetyyppi niiden kaksiulotteisuuden vuoksi (Lukkari, 2002, s. 4). Vaara halkeamien syntymiseen on olemassa jos hitsattavan materiaalin hitsattavuus on huono ja sitä hitsataan ilman erityistoimenpiteitä. Yleisimmät halkeamatyypit ovat kylmähalkeama eli vetyhalkeama, kuumahalkeama ja lamellirepeily. (Ovako, 2012, s. 10.) Hitsiluokat eivät salli minkään tyyppin halkeamia hitsatussa kappaleessa. Halkeamat poistetaan esimerkiksi kaaritaltauksella ja talttauksessa syntyneiden urien täyteen hitsaamisella. (Lukkari, 2002, s. 9.)

Yleisin halkeamatyyppi on kylmähalkeama eli vetyhalkeama, joka syntyy hitsiin sen jäähdytyttyä alle 150 °C:n lämpötilaan. Karkenevat teräkset ovat alttiita kylmähalkeilulle. Kylmähalkeama voi esiintyä perusaineen muutosvyöhykkeellä palonalaisena halkeamana, juurihalkeamana tai reunahalkeamana. Hitsiaineessa kylmähalkeama voi esiintyä poikittaisena halkeamana tai juurihalkeamana. Kylmähalkeama johtuu perusaineen muutosvyöhykkeen haurastumisesta, vedyn diffuusiosta hitsiin ja hitsissä vaikuttavista jännityksistä. (Ovako, 2012, s. 10.) Kuvassa 3 on esitetty erilaisia kylmähalkeaman esiintymismuotoja. Kuvasta huomataan, ettei kylmähalkeamat aina näy kappaleen pinnalle.



**Kuva 3.** Erilaisia kylmähalkeaman esiintymismuotoja hitsin alueella (Lukkari, 2002, s. 8).

Perusaineen muutosvyöhyke karkenee hitsauksessa tuodun lämmön vaikutuksesta ja muutosvyöhykkeen mikrorakenne muuttuu kovaksi ja hauraaksi martensiitiksi, mikä edesauttaa kylmähalkeaman syntyä. Syntyvän martensiitin kovuus riippuu perusaineen hiilipitoisuudesta. Mitä suurempi hiilipitoisuus, sitä kovempaa ja hauraampaa syntyvä martensiitti on. Syntyvän martensiitin määrään vaikuttaa teräksen hiilipitoisuuden ohella jäähtymisnopeus. Mitä korkeampi hiilipitoisuus ja teräksen seostus, sitä todennäköisemmin martensiittia syntyy muutosvyöhykkeelle. (Ovako, 2012, s. 10.)

Hitsiin liukeneva vety aiheuttaa osaltaan kylmähalkeaman. Vetyatomit hajoavat valokaareissa ioneiksi ja liukenevat hitsisulaan. Kun hitsin lämpötila laskee, vetyionit yhdistyvät vetyatomeiksi, jotka jäähtymisen edetessä kerääntyvät yhteen vetykaasuksi. Vetykaasu kerääntyy teräksessä oleviin mikrorakoihin ja kaasun paine nousee erittäin korkeaksi, jopa tuhansiin baareihin. Vedyn paineen vuoksi mikrorako kasvaa ja muuttuu halkeamaksi. Vetyä päätyy hitsiin lisäaineiden vetyä sisältävistä yhdisteistä, lisäaineen

pinnan epäpuhtauksista tai hitsausrailon epäpuhtauksista, kuten rasvasta, ruosteesta, maalista, lumesta ja jäästä, sekä ilman kosteudesta. (Ovako, 2012, s. 10.)

Hitsausliitokseen syntyy jännityksiä, kun paikallisesti kuumentunut kohta pyrkii laajenemaan, mutta ympäröivä kylmä materiaali estää laajenemisen ja kuuma alue tyssäytyy. Jäähtyessään teräs kutistuu, jolloin materiaaliin syntyy hitsin kohdalle vetojännityksiä. Materiaalin sisäiset jännitykset edesauttavat kylmähalkeamien syntyä. Jännityksien vaikutusta voi vähentää käyttämällä perusainetta pehmeämpää lisäainetta, joka ei kutistuessaan aiheuta suuria vetojännityksiä, hitsauksen aikaisella korotetulla työlämpötilalla, tai välittömästi hitsauksen jälkeen suoritettavalla myöstöllä eli jännityksenpoistohehkutuksella. Jännityksenpoistohehkutus tulisi suorittaa ennen hitsausliitoksen jäähtymistä 100 °C:seen, jotta hehkutuksella olisi vaikutusta kylmähalkeiluun. (Ovako, 2012, s. 11.)

Kylmähalkeilua voidaan ehkäistä käyttämällä terästä, jonka hitsattavuus on hyvä, eli hiiliiekvivalentti on matala. Mahdollisuuksien mukaan tulisi myös käyttää päittäisliitosta pienaliitoksen sijaan ja mahdollisimman pehmeää lisäainetta sisäisten jännityksien vähentämiseksi. Suuren lämmöntuonnin käyttäminen mahdollisuuksien mukaan pienentää kylmähalkeamariskiä. Vedyn joutuminen hitsausliitokseen tulisi estää käyttämällä mahdollisimman niukkavetyisiä lisäaineita, käyttämällä korotettua työlämpötilaa ja välipalkkolämpötilaa, pitämällä lisäaineet kuivina ja puhtaina, sekä puhdistamalla hitsausrailot liasta, maalista, rasvasta, ruosteesta, lumesta ja jäästä. Hitsausliitokseen joutunut vety voidaan poistaa hitsauksen jälkeisellä vedynpoistohehkutuksella. Vety poistuu, kun työkappaletta pidetään yli 150 °C:n korotetussa työlämpötilassa tarpeeksi pitkän aikaa. Vety poistuu työkappaleesta myös, jos jännityksenpoistohehkutus suoritetaan välittömästi hitsauksen jälkeen antamatta kappaleen jäähtyä alle 100 °C:seen. (Ovako, 2012, s. 11.)

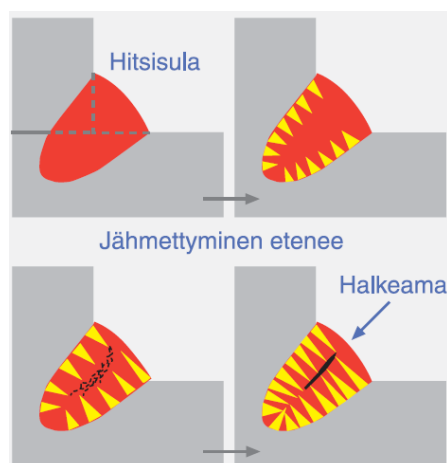
Kuumahalkeamat syntyvät yli 1200 °C:n lämpötiloissa hitsiaineen jähmettyessä (Ovako, 2012, s. 11). Kuumahalkeama syntyy yleisimmin hitsin keskilinjalle hitsin suuntaisesti, ja se voi avautua hitsin pinnalle tai jäädä piiloon aineen sisään. Kuumahalkeama voi esiintyä myös sularajalla tai 1-2 mm pituisena poikittaisena halkeamana muutosvyöhykkellä. Myös



hitsauksen lopetuskohtaan syntyvät kraatterihalkeamat voidaan luokitella kuumahalkeamiksi, sillä nekin syntyvät hitsiaineen jähmettyessä. (Lukkari, 2002, s. 5-6.)

Kuumahalkeaman synnyn aiheuttavat hitsiaineen kutistuminen jäähtyessään ja matalissa lämpötiloissa sulavien seosaineiden suotautuminen hitsipalon keskilinjalle. Kuumahalkeaman riskiä lisää myös kapea ja syvä hitsi, poikittaiset jännityksen hitsissä ja perusaineen sulaessa hitsiaineeseen seostuvat epäpuhtaudet. (Ovako, 2012, s. 12.)

Kun hitsin profiili on kapea ja syvä, alkaa hitsiaineen jähmettyminen hitsipalon reunoilta ja etenee lähes vaakasuorana kohti keskilinjaa. Jähmettymisen loppuvaiheessa keskelle jää sula alue, johon hitsisulan epäpuhtaudet suotautuvat. Kun hitsin jäähtymisestä johtuvat jännitykset alkavat vaikuttaa, voi hitsin keskilinjalla olla vielä sulia kalvoja, jolloin halkeama syntyy. Liian suuri hitsausnopeus aiheuttaa pitkän hitsisulan ja jähmettymisrintaman suuntautumisen kohti hitsin keskilinjaa, jolloin epäpuhtaudet voivat suotautua hitsin keskelle. Suuri tunkeuma lisää kuumahalkeamariskiä, sillä se lisää hitsiaineeseen sekoittuvan perusaineen määrää ja tekee hitsipalosta syvän ja kapean. (Lukkari, 2002, s. 6-7.) Kuvassa 4 on esitetty jähmettymisrintaman eteneminen ja halkeaman syntyminen syvässä ja kapeassa hitsissä.



**Kuva 4.** Hitsipalon ollessa kapea ja syvä, etenee jähmettyminen lähes vaakasuoraan kohti hitsipalon keskikohtaa, epäpuhtaudet suotautuvat palon keskelle ja halkeama syntyy (Lukkari, 2002, s. 6).

Kuumahalkeamariskiä voidaan pienentää pitämällä hitsin leveys suurempana kuin syvyys, jolloin hitsiaineen jähmettyminen suuntautuu hitsipalon pohjasta pintaa kohti. Myös hitsausnopeuden pienentäminen aiheuttaa tasaisemman jähmettymisen, jolloin epäpuhtauksien suotautumisen riski on pienempi. Tunkeuman pienentäminen auttaa parantamaan leveys/syvyys –suhdetta ja samalla vähentää epäpuhtauksia sisältävän perusaineen sekoittumista hitsisulaan. Kuumahalkeamariski pienenee, kun valitaan vähähiilinen ja vähän epäpuhtauksia sisältävä perusaine. Hitsausliitos tulisi suunnitella siten, että hitsiin syntyisi mahdollisimman vähän jännityksiä ja ilmarako on pieni. (Lukkari, 2002, s. 7.) Mangaani lisäaineessa sitoo haitallisia yhdisteitä muodostavan rikin manganisulfideiksi ja vähentää kuumahalkeamariskiä. (Ovako, 2012, s. 12.)

Kuten kuumahalkeamat, kraatterihalkeamat syntyvät kuuman hitsiaineen jäähtyessä ja jähmettyessä. Kraatterihalkeamia esiintyy hitsauksen lopetuskohtaan syntyvässä kraatterissa eli kuopassa vääränlaisen hitsauksen lopetustekniikan vuoksi. Halkeama voi olla hitsin suuntainen, poikittainen tai tähtimäinen. Kraatterihalkeaman syntyminen voidaan estää kuljettamalla valokaarta hieman taaksepäin ennen hitsauksen lopettamista ja täyttämällä kraatteri. (Lukkari, 2002, s. 6-9.)

Lamellirepeilyn aiheuttaa valssauksessa syntyneet materiaalin pinnan suuntaiset sulkeumajonot. Kun kappale hitsataan siten, että siihen vaikuttaa voimakkaita vetojännityksiä paksuussuunnassa, voivat sulkeumat revetä kappaleen sisällä. Mitä pidempiä kappaleessa olevat sulkeumat ovat, sitä pienempi on kappaleen sitkeys paksuussuunnassa. Lamellirepeilyä voidaan estää suurentamalla hitsaustehoa ja hitsaamalla koko levyn läpi. Myös railojen pinta-alan suurentaminen, oikeassa palkojärjestyksessä hitsaaminen, sekä alilujan ja sitkeän hitsiaineen käyttö puskurointihitsauksessa ehkäisevät lamellirepeilyä. (Ovako, 2012, s. 12.)

Onteloita syntyy hitsiin, kun hitsin jähmettyessä hitsiaineeseen jää kaasukuplia, jotka eivät ehdi poistumaan sulasta. Ontelot voivat esiintyä yksittäisinä pyöreinä tai pitkänomaisina huokosina tai huokosryhminä. (Ovako, 2012, s. 13.) Ontelot voivat jäädä piiloon hitsiaineen sisään tai avautua hitsipalon pinnalle. Onteloita muodostavat kaasut ovat ruostumattomien ja niukkaseosteisten terästen hitsauksessa happi, typpi ja vety. Onteloiden muodostuminen johtuu hitsiin jääneestä kaasusta, joka voi syntyä lisäaineen ja perusaineen

epäpuhtauksista kuten rasvasta, kosteudesta, maalista ja ruosteesta. Huono suojakaasusuojaus nostaa onteloiden syntymisen riskiä. Suojakaasusuojauksen häiriöt voivat johtua MAG-hitsauksessa likaantuneesta kaasusuuttimesta, vuodosta suojakaasulaitteistossa tai suojakaasun pois puhaltumisesta hitsauskohdasta työtilan vetoisuuden vuoksi. Liian voimakas suojakaasun virtaus voi myös aiheuttaa puutteellisen kaasusuojauksen. Myös liian suuri hitsausnopeus, liian pitkä valokaari ja liian pieni hitsausvirta altistavat onteloiden synnylle. Hitsisulan liian nopeaa jäähtymistä voidaan estää esikuumennuksella. (Lukkari, 2002, s. 10.)

Sulkeumat ovat hitsiaineen sisään jääneitä vieraan aineen palasia. Sulkeumat voivat koostua kuonasta, TIG-hitsauksessa käytettävästä elektrodista irronneesta volframista, vieraan metallin muodostamasta oksidista tai MIG/MAG-hitsauksessa kosketussuuttimesta irronneesta kuparista. Sulkeumat voivat esiintyä hitsissä yksittäin, jonossa tai ryhmissä. Kuparisulkeuma syntyy MIG/MAG-hitsauksessa, kun kosketussuutin ylikuumenee ja sulaa liian lyhyen suutinetäisyyden tai vesijähdytyksen häiriön vuoksi. Sulkeumien syntyminen voidaan estää käyttämällä paremmin kuumuutta kestävästä kosketussuutinta, varmistamalla pistoolin jäähdytyksen toimivuus, sekä pidentämällä suutinetäisyyttä, eli pienentämällä kaarijännitettä tai suurentamalla langansyöttönopeutta. (Lukkari, 2002, s. 11.)

Liitosvirheellä tarkoitetaan hitsipalon ja perusaineen tai hitsipalkojen huonoa yhteensulamista. Liitosvirhe syntyy, kun hitsausteho ei ole riittävä ja hitsisula pääsee valumaan sulamattoman ja kylmän perusaineen päälle estäen valokaarta sulattamasta perusainetta. Liian pieni hitsausteho johtuu liian pienestä virrasta ja liian suuresta hitsausnopeudesta. Liian pieni virta ilmenee liian lyhyenä valokaarena. Myös epäpuhtaudet railopinnoilla ja hitsauspalkojen pinnalla, tai liian kapea railo voivat aiheuttaa liitosvirheitä. Väärästä maadoituskaapelin paikasta johtuva magneettinen puhallus voi viedä valokaaren sivuun halutusta hitsauskohdasta ja aiheuttaa liitosvirheen. (Lukkari, 2002, s. 11-12.)

Kuten liitosvirhe, myös vajaa hitsautumissyvyys kuuluu liittymisvirheiden ryhmään. Vajaalla hitsautumissyvyydellä tarkoitetaan sitä, että hitsi ei ole tunkeutunut tarpeeksi syvälle liian pienen tunkeuman takia. Hitsautumissyvyys voi jäädä vajaaksi, jos juuripinta on liian korkea, ilmarako on liian pieni, railokulma on liian pieni, tai hitsattavat kappaleet

on sovittu toisiinsa väärin. Molemmilta puolilta hitsattavassa päittäishitsissä kappaleen vastakkaisille puolille tulevien hitsipalkojen tulisi kohdata toisensa kappaleen keskellä. Jos hitsausvirta ja hitsausenergia ovat liian pieniä, jää tunkeuma liian pieneksi, ja esimerkiksi päittäisliitoksen palot eivät kohtaa toisiaan. Myös liian paksun lisäainelangan käyttö aiheuttaa vajaan hitsautumissyvyyden. (Lukkari, 2002, s. 12.)

Muoto- ja mittavirheisiin kuuluvat reunahaavat, hitsipalon vääränlaiset muodot ja kappaleiden virheellisestä sovituksesta johtuvat mittavirheet (Lukkari, 2002, s. 13-15). Reunahaavat ovat koloja tai uria hitsipalon vieressä perusaineessa tai edellisessä hitsipalossa. Ne syntyvät, kun sulatettu perusaine tai edellisen palon lisäaine valuu pois eikä tuotu lisäaine pääse täyttämään syntynyttä koloa. Syitä reunahaavan syntymiseen ovat liian suuri hitsausvirta ja jännite, liian pitkä valokaari, väärä kuljetustekniikka tai väärä valokaaren suuntaus. Lisäainetta tulisi kuljettaa siten, että levitysliikettä tehdessä liike pysäytetään railon kyljen kohdalle tarpeeksi pitkäksi aikaa. Jos pienaliitoksessa valokaari suunnataan liikaa pystylevyyden, syntyy pystylevyyden reunahaava. Liian kapea railokulma V-railossa ja liian paksu lisäaine voivat aiheuttaa reunahaavan syntymisen railokylkiin. (Ovako, 2012, s. 14.)

Hitsipalon virheellinen muoto voi tarkoittaa liian korkeaa kupua, liian matalaa eli vajaata kupua, epätasaista hitsin pintaa, väärää a-mittaa, liian jyrkkää hitsipalon reunan ja perusaineen välistä kulmaa, epäsäännöllistä hitsipalon leveyttä, tai epäsäännöllistä palon pintaa. Hitsisula voi myös valua perusaineen pinnalle sulamatta kiinni perusaineeseen. Virheet hitsipalon muodossa johtuvat yleensä vääränlaisesta railogeometriasta, vääristä hitsausparametreista, sekä väärästä kuljetustekniikasta ja valokaaren suuntauksesta. Esimerkiksi vääränlainen hitsipalon kuvun muoto johtuu väärästä hitsiaineentuoton ja kuljetusnopeuden suhteesta. Liian suuri hitsiaineentuotto ja liian hidas kuljetusnopeus johtavat liian korkeaan kupuun. Väärä kuvun koko saattaa esiintyä myös juuren puolella. Korkea juurikupu syntyy, kun ilmarako on liian suuri, juuripinta liian matala, hitsausenergia on liian suuri ja kuljetusnopeus liian pieni. Hitsisula valuu liian suuren hitsausenergian vuoksi juuren puolelle ja muodostaa korkean kuvun. Vajaalla juurella taas tarkoitetaan juuren puolelta kourun muotoista pohjapalkoa, joka johtuu liian korkeasta juuripinnasta ja liian pienestä ilmaraosta, liian pienestä hitsausenergiasta, sekä liian

suuresta juurikaasun paineesta. Juuri jää vajaaksi kun hitsiaine kutistuu jäähtyessään ja muodostaa juuren puolelle matalan uran. (Lukkari, 2002, s. 13-15.)

Tasomainen sovitusrvirhe ja kulmapoikkeama ovat kappaleiden virheellisestä sovituksesta ja hitsauksen aiheuttamista muodonmuutoksista johtuvia hitsausvirheitä. Lisäksi tasomaisen sovitusrvirheen syntymiseen vaikuttavat poikkeamat hitsattujen levyjen muodossa. Tasomaisella sovitusrvirheellä tarkoitetaan esimerkiksi sitä, etteivät päittäisliitoksella toisiinsa hitsattavat levyt ole samassa tasossa toisiinsa nähden, mutta ovat kuitenkin samansuuntaiset. Kulmapoikkeama on virhe hitsattavien kappaleiden välisessä kulmassa, esimerkiksi tahaton kulma päittäisliitoksella hitsattavien levyjen välillä. Huomion kiinnittäminen hitsausjärjestykseen estää hitsauksesta johtuvia muodonmuutoksia. Myös esitaivutus tai hitsattavien osien asettaminen ennakkokulmaan estää hitsauksen muodonmuutoksista johtuvan kulmapoikkeaman syntymistä. Hitsauksen aiheuttamat muodonmuutokset taivuttavat esitaivutetuista tai ennakkokulmaan asetetuista kappaleista hitsatun valmiin osan haluttuun muotoonsa. (Lukkari, 2002, s. 14.)

Muut virheet ovat hitsausvirheitä, joita ei voida luokitella halkeamiksi, onteloiksi, sulkeumiksi, liittymisvirheiksi tai muoto- ja mittavirheiksi. Tällaisia virheitä ovat esimerkiksi sytytysjäljet, roiskeet, hionnassa syntyneet jäljet, talttausjäljet, hitsattujen kiinnittimien jättämät jäljet, palkojen kohdistusvirheet ja silloitusvirheet. MAG-hitsauksessa sytytysjälkiä voi aiheuttaa huonosta maadoituksesta johtuvat pienet maadoittimessa palavat valokaaret ja valokaaren sytyttäminen tai sammuttaminen sellaisessa kohdassa, joka jää näkyviin valmiissa kappaleessa. Valokaari tulisi sytyttää ja sammuttaa mahdollisuuksien mukaan sellaisessa kohdassa, joka jää hitsin alle. Roiskeet johtuvat vääristä hitsausarvoista. MAG-hitsauksessa virran ja jännitteen väärä suhde toisiinsa nähden ja liian matala induktanssi voivat aiheuttaa roiskeita. Maadoituskaapelin virheellinen sijoitus työkappaleessa aiheuttaa magneettista puhallusta, joka voi myös johtaa roiskeisiin. (Lukkari, 2002, s. 15.)

#### 2.4 Pohjapalon hitsaus

Pohjapalko on ensimmäinen hitsattava palko usealla palolla hitsattavassa hitsausliitoksessa. Onnistunut pohjapalko on edellytys koko hitsausliitoksen onnistumiselle. Hitsattaessa pohjapalkoa juureen voidaan käyttää apuna hitsin juuren

puolelle kiinnitettävää juuritukea, joka voi olla valmiiseen kappaleeseen jäävä tai hitsauksen jälkeen irrotettava tuki. Useimmat hitsausliitokset kuitenkin hitsataan ilman juuritukea, esimerkiksi putkien päittäisliitosten hitsauksessa juurituen käyttö voi olla mahdotonta. (Jeffus, 2011, s. 129-130.)

Juurituen tehtävä on tukea hitsisulaa, muotoilla hitsipalkoa juuren puolella ja estää ilman pääsy juuren puolelta hitsaustapahtumaan. Hitsauksen jälkeen irrotettavat juurituot valmistetaan keraamista, kuparista tai ruostumattomasta teräksestä. Kuparisia juuritukia käytetään rautametallien hitsauksessa ja ruostumattomasta teräksestä valmistettuja ei-rautametallien hitsauksessa. Hitsausliitokseen jäävä juurituki on valmistettava materiaalista, joka on ominaisuuksiltaan samanlaista perusaineen kanssa, sillä perusaine, lisäaine ja juurituen valmistusmateriaali sekoittuvat toisiinsa hitsaustapahtumassa. Kappaleeseen jäävä juurituki mahdollistaa suuremman hitsausenergian käytön ja siten varmemman läpihitsautumisen. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 172; s. 392.) Myös keraamista juuritukea käyttämällä voidaan hitsata suuremmilla hitsausarvoilla ja siten varmistaa läpihitsautuminen, sillä juuritukien valmistukseen käytettävät keraamit kestävät hyvin kuumuutta. (Jeffus, 2011, s. 129.) Käytettäessä hitsauksen jälkeen irrotettavaa, perusaineesta eroavasta materiaalista, kuten kuparista valmistettua juuritukea, on hitsausarvot säädettävä siten, ettei juurituki sula ja sekoitu hitsiaineeseen muodostaen sulkeumia. (Hicks, 1999, s. 55.)

Alumiinifolionauhasta valmistettuja juuriteippejä voidaan käyttää sellaisissa kohteissa, joissa kiinteää juuritukea ei voida käyttää, esimerkiksi säiliöiden hitsauksessa. Juuriteippi poistetaan kappaleesta hitsauksen jälkeen. Juuriteipissä on liimapinta, jolla se kiinnitetään perusaineeseen juuren puolelle. Teipin keskiosa on osittain sulavaa ainetta, lasikuitua tai pehmeää massaa, joka muodostaa hitsisulaa tukevan kuonan, mutta ei seostu sulaan. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 172.) Juuriteippejä valmistetaan myös kuumankestävillä keraameilla pinnoitettuina (Hicks, 1999, s. 55).

Putkien hitsauksessa voidaan käyttää rengasmaista, putken sisään sijoitettavaa juuritukea, joka jännittyy kiinni putken sisäseinämään. Rengasmaisen juurituki on katkaistu vinosti keskeltä, jolloin se mukautuu erilaisiin putken halkaisijoihin ja pysyy kiinni putken sisäseinämissä. Rengasmaisen juurituki voi olla irrotettava keraamista valmistettu, tai valmiiseen kappaleeseen jäävä tuki. (Hicks, 1999, s. 56.)

#### 2.4.1 Hitsausvirheet pohjapalossa

Pohjapalon hitsausvirheet johtuvat virheellisestä hitsauksen suoritustekniikasta ja vääristä hitsausparametreista. Pohjapalon hitsaukselle tyypillisiä virheitä ovat liitosvirhe hitsin juuressa, vajaa hitsautumissyvyys juuressa, vajaa juuri, korkea juurikupu, juurenpuolen reunahaava, reunahaava railokyljessä ja pohjapalon valuma. (SFS-EN ISO 6520-1, 2008, s. 19-26; Lukkari, 2002, s. 11-14.) Näiden virheiden lisäksi pohjapalon hitsauksessa voi syntyä muita hitsausprosessille tyypillisiä hitsausvirheitä, kuten halkeamia, huokosia, sulkeumia, roiskeita ja sytytysjälkiä. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 134-135.)

Hitsin juuressa sijaitseva liitosvirhe tarkoittaa sulamatonta juuripintaa. Liitosvirhe syntyy kun hitsisula pääsee vyörymään kylmälle railopinnalle ja estää valokaarta sulattamasta perusainetta. Hitsisula pääsee vyörymään valokaaren edelle kun hitsausnopeus on liian pieni, hitsausvirta on liian suuri verrattuna hitsausnopeuteen, railo on liian kapea tai käytetään vääränlaista lisäaineen kuljetustekniikkaa. Toisaalta liian suuri hitsausnopeus ja liian pieni virta laskevat hitsausenergian määrää, mikä heikentää perusaineen sulatustehoa ja altistaa liitosvirheille. Myös liian pitkä valokaari, epäpuhtaudet juuripinnoilla ja magneettinen puhallus altistavat liitosvirheelle. Vääränlaisesta maadoitusjohdon sijoituspaikasta johtuva magneettinen puhallus vie valokaaren sivuun halutusta hitsauskohdasta, mikä voi aiheuttaa toisen juuripinnan jäämisen sulamattomaksi. (Lukkari, 2002, s. 11-12.)

Vajaalla hitsautumissyvyydellä juuressa tarkoitetaan sitä, etteivät toinen tai molemmat railon kyljet ole sulaneet, koska hitsi ei ole tunkeutunut riittävän syvälle. Vajaa juuri ja juuren vajaa hitsautumissyvyys vaikuttavat samankaltaisilta hitsausvirheiltä, mutta vajaassa juuressa juurisärmät ovat sulaneet. Vajaa hitsautumissyvyys johtuu väärästä railogeometriasta, kuten liian kapeasta ilmaraosta, liian kapeasta railokulmasta ja liian korkeasta juuripinnasta. Myös riittämätön hitsausenergia ja hitsausvirta, sekä liian paksu lisäainelanka aiheuttavat hitsautumissyvyuden jäämisen vajaaksi. Pohjapalon vajaata hitsautumissyvyyttä voidaan estää käyttämällä oikeaa railomuotoa, sopivia hitsausparametreja sekä ohuempaa lisäainelankaa. (Lukkari, 2002, s. 12.) Juurituen käyttö estää hitsautumissyvyuden jäämistä vajaaksi ja liitosvirheen syntymistä. Esimerkiksi kiinteän, rakenteeseen jäävän juurituen käyttö mahdollistaa suuremman sulatustehon

käytön pohjapalon hitsauksessa ilman hitsisulan valumisvaaraa ja läpipalamisvaaraa. (Lepola & Makkonen, 2005, s. 392.)

Vajaa juuri tarkoittaa matalaa uraa pohjapalossa juuren puolella. Ura syntyy kun hitsiaine kutistuu jäähtyessään. Vajaa juuri johtuu liian korkeasta juuripinnasta, liian kapeasta ilmaraosta, liian pienestä hitsausenergiasta ja liian suuresta juurikaasun paineesta. (Lukkari, 2002, s. 14.)

Kun juurikupu ulkonee liikaa perusaineen tasosta, kutsutaan hitsausvirhettä korkeaksi juurikuvuksi. Korkeaa juurikupua kutsutaan joskus juuren valumaksi. Korkea juurikupu jaetaan kolmeen ryhmään: paikalliseen korkeaan juurikupuun, jatkuvaan korkeaan juurikupuun ja läpivalumaan. Liian matala juuripinta, liian suuri ilmarako, liian suuri hitsausenergia ja liian hidas kuljetusnopeus altistavat korkean juurikuvun syntymiselle. (Lukkari, 2002, s. 13.)

Juurenpuolen reunahaava voi syntyä liian korkean juuripinnan, liian pienen ilmaraon, liian pienen hitsausenergian tai liian suuren juurikaasun paineen vuoksi. Reunahaavalla hitsin juuressa tarkoitetaan juuren puolella pohjapalon toisessa reunassa tai molemmilla reunoilla näkyviä uria. Reunahaava voi syntyä pohjapalon hitsauksessa myös railokylkiin. Railokyljen reunahaava syntyy liian suuren hitsausvirran ja vääränlaisen kuljetustekniikan vuoksi. Valokaarta tulisi kuljettaa siten, että levitysliikkeessä pysähtytään hetkeksi railokyljelle. Liian pitkä pysähtyminen railokyljelle ja liian laaja levitysliike voivat myös aiheuttaa reunahaavan. (Lukkari, 2002, s. 13.)

Pohjapalon valuma syntyy kun sula hitsiaine valuu perusaineen pinnalle sulamatta siihen kiinni. Valuma johtuu liian hitaasta kuljetusnopeudesta hitsiaineentuottoon nähden ja virheellisestä lisäaineen kuljetuksesta. (Lukkari, 2002, s. 14.)



### 3 MODIFIOIDUT MAG-HITSAUSPROSESSIT

MAG-hitsausprosessin modifioinnilla tarkoitetaan hitsausprosessin ominaisuuksien muuttamista ohjelmiston tai mekaanisten laitteiden avulla. Ominaisuuksien muuttaminen voi tapahtua seuraamalla hitsaustapahtumaa automaattisesti ja muuttamalla hitsausparametreja automaattisesti hitsauksen aikana. Modifioiduilla MAG-hitsausprosesseilla pyritään pieneen lämmöntuontiin, roiskeettomuuteen, mahdollisuuteen hitsata ohuita kappaleita, sekä nopeampaan ja tuottavampaan pohjapalkojen hitsaukseen. Tässä luvussa esitellään joidenkin tunnettujen hitsauskonevalmistajien kehittämiä modifioituja MAG-hitsausprosesseja. Luvussa keskitytään Froniuksen, Lincolnin ja ESABin modifioituihin prosesseihin, mutta mainittujen hitsauskonevalmistajien lisäksi modifioituja hitsausprosesseja ovat kehittäneet muun muassa hitsauskonevalmistajat Cloos (CP, Cold Process), Miller (RMD, Regulated Metal Deposition), EWM (coldArc) ja SKS (Micromig). Luvussa 4 keskitytään Kemppi Oy:n Wise-tuoteperheeseen, joka koostuu modifioiduista hitsausprosesseista, sekä hitsausta avustavista tuotteista.

Pohjapalkojen hitsauksessa pyritään korvaamaan TIG-hitsaus ja perinteinen MAG-lyhytkaarihitsaus nopeammilla modifioiduilla MAG-prosesseilla. Esimerkiksi Kempin WiseRoot-prosessi on jopa kolme kertaa TIG-hitsausta nopeampi pohjapalkojen hitsauksessa. WiseRoot on myös perinteistä MAG-lyhytkaarihitsausta 10-25 % nopeampi pohjapalkojen hitsauksessa ja pohjapalkojen hitsaaminen on helpompaa WiseRootilla kuin perinteisellä lyhytkaarihitsauksella. (Kumpulainen, Tihinen & Laitinen, 2011, s. 8.)

#### 3.1 Fronius CMT

Fronius CMT (Cold Metal Transfer) on Froniuksen kehittämä modifioitu MIG/MAG-hitsausprosessi, jonka lämmöntuonti on matala. CMT mahdollistaa roiskeettoman hitsauksen, kaarijuoton, alumiinin ja teräksen eripariliitoksien hitsaamisen ja jopa vain 0,3 mm paksujen teräskappaleiden hitsaamisen. CMT:n toiminta perustuu lisäänelangan takaisinvetämiseen oikosulun tapahtuessa. Prosessinohjauksen havaitessa oikosulun, hitsausvirran arvoa lasketaan ja lisäänelankaa vedetään hieman takaisin päin, jolloin pisara irtoaa lisäänelangan päästä. Lisäänelangan takaisinvetoja tapahtuu jopa 90 kertaa sekunnissa. (Fronius, 2007, s. 2-3.)

Fronius CMT:n langansyöttölaitteisto koostuu työntävästä langansyöttölaitteesta, monitoimijohdon keskivaiheella olevasta lisäainelangan puskurivarastosta ja hitsauspistoolin vetävästä langansyöttölaitteesta. Työntävä langansyöttölaite syöttää lankaa tasaisesti ja hitsauspistoolin vetävä langansyöttö pulssittaa langansyötön. Lisäainelangan puskurivarasto estää vetävän langansyötön pulssitusta repimästä lankaa työntävästä langansyöttölaitteesta. (Fronius, 2007, s. 4.)

### 3.2 Lincoln STT

Lincoln STT (Surface Tension Transfer) on modifioitu lyhytkaariprosessi, joka soveltuu ohuiden kappaleiden hitsaamiseen ja pohjapalkojen hitsaukseen ilman juuritukea. STT-prosessin toiminta perustuu virran automaattiseen säätämiseen hitsauksen aikana. Lisäainelangan osuessa työkappaleeseen syntyy oikosulku, jonka ohjausjärjestelmä havaitsee. Oikosulun tapahtuessa jännitettä pienennetään nopeasti, jotta varmistetaan hyvä kontakti lisäainelangan ja työkappaleen välille. Lisäainepisara irrotetaan langasta suurentamalla virran arvoa. Ohjausjärjestelmä seuraa sähköisesti lisäainepisaran kuroutumista irti langan päästä ja laskee virran arvoa juuri ennen pisaran irtoamista roiskeiden välttämiseksi. Pisaran irtoamisen jälkeen virta nostetaan huippuarvoonsa hitsisulan ja liitoskohdan kuumentamiseksi ja oikosulun estämiseksi. Lopuksi virta laskee huipputasosta takaisin taustajännitteen arvoon käyttäjän asettamalla nopeudella. (Lincoln Electric, 2013, s. 1-2.)

Hitsausprosessin lämmöntuontia voidaan säätää taustajännitteen (Background current) ja huippuvirran laskunopeuden avulla (Tail-out speed). Huippuvirran laskunopeutta säätämällä voidaan vaikuttaa lämmöntuontiin karkeasti ja taustajännitteen avulla lämmöntuontia voidaan hienosäätää. (Lincoln Electric, 2013, s. 2.)

### 3.3 ESAB Aristo SuperPulse

Aristo SuperPulse on jatkokehitemmä ESABin Pulse/Pulse-prosessista. MIG/MAG-pulssihitsaukseen perustuva SuperPulse-prosessi yhdistää pulssikaarialueen lyhyt- tai kuumakaarialueeseen ja pienentää hitsauksen lämmöntuontia. Pulssi/lyhytkaarialue mahdollistaa alumiinin roiskeettoman hitsauksen, ohuiden teräskappaleiden hitsauksen, ohuiden kappaleiden kaarijuoton, sekä parantaa pohjapalkojen hitsauksen tuottavuutta korvaamalla hitaan TIG-hitsauksen. (Paul, 2014.)

SuperPulsen pulssi/kuumakaarialue mahdollistaa tuottavamman asentohitsauksen. Hitsausvirran ollessa kuumakaarivaiheessa saavutetaan tasainen tunkeuma ja korkea hitsausnopeus, kun pulssivaiheessa lämmöntuontia rajoitetaan. (Paul, 2014.)

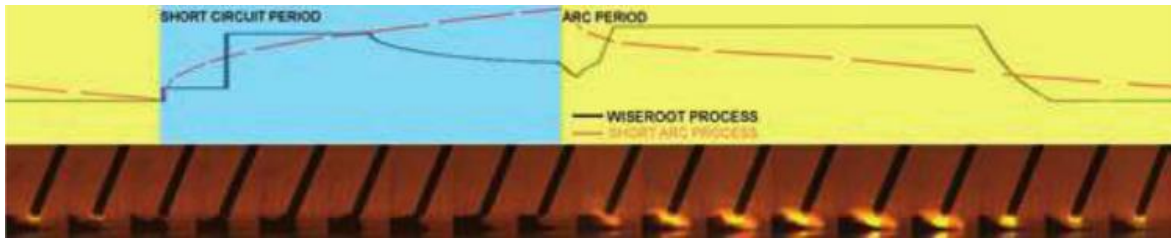
## 4 KEMPPI WISE- TUOTEPERHE

Kemppi Oy:n kehittämä Wise-tuoteperhe koostuu erilaisista modifioiduista MIG/MAG-hitsausprosesseista, sekä hitsausta avustavista toiminnoista, joilla pyritään parantamaan hitsaustyön tuottavuutta ja laatua. Wise-tuoteperheen tuotteet perustuvat ohjelmistoihin, joita voidaan asentaa hitsauskoneisiin ostettaessa hitsauskone tai jälkikäteen käyttäen Kemppi DataGun –asennustyökalua. (Kemppi, 2010, s. 3.) Wise-tuotteiden kanssa yhteensopivia hitsauskoneita ovat FastMig Synergic ja FastMig Pulse, sekä automatisoituun hitsaukseen tarkoitettut KempArc Synergic ja KempArc Pulse. (Kemppi, 2010, s. 12.)

### 4.1 WiseRoot

WiseRoot on pohjapalkojen hitsaukseen suunniteltu modifioitu MAG-lyhytkaariprosessi, jonka toiminta perustuu tarkkaan virran ja jännitteen arvojen ohjaukseen hitsauksen aikana. WiseRoot ei vaadi juuritukea pohjapalon hitsauksessa. WiseRoot myös sallii suuret ilmaraon vaihtelut, ja prosessia käyttämällä voidaan pienentää railotilavuutta ja siten vähentää lisäainekustannuksia. Prosessi soveltuu myös asentohitsaukseen. (Kemppi, 2010, s. 5; Uusitalo, 2011, s. 5-6.) WiseRoot myös poistaa jälkityöstön tarpeen pohjapalon hitsauksessa. Prosessilla on mahdollista saavuttaa lähes roiskeeton hitsaus ja kolme kertaa suurempi hitsausnopeus verrattuna pohjapalkojen hitsaukseen käytettyyn TIG-hitsausprosessiin. Prosessi on myös 10-25 % tavallista MAG-hitsausta nopeampi, ja sen lämmöntuonti on 10 % pienempi kuin tavallisessa MAG-hitsauksessa. Pohjapalkojen hitsaus on myös helpompaa WiseRootilla kuin tavallisella MAG-lyhytkaarilla. (Kumpulainen, Tihinen & Laitinen, 2011, s. 8.)

WiseRoot-prosessin virtakäyrästä voidaan erottaa kaksi vaihetta: oikosulkuvaihe ja valokaarivaihe. Oikosulkuvaiheessa lisäainetta siirtyy hitsisulaan ja valokaarivaiheessa hitsisulaan tuodaan lämpöä. (Uusitalo, 2011, s. 5.) Kuvassa 5 on esitetty WiseRootin virtakäyrä ja suurnopeuskameran kuvaa hitsaustapahtumasta. Kuvassa on myös tavallisen MAG-lyhytkaarihitsauksen virtakäyrä vertailukohtana.



**Kuva 5.** WiseRoot-prosessin virtakäyrä ja suurnopeuskameran kuvaa hitsaustapahtumasta. Sininen alue kuvaa oikosulkuvaihetta, jonka jälkeen alkaa valokaarivaihe. Kuvassa on myös tavallisen MAG-lyhytkaarihitsauksen virtakäyrä merkittynä katkoviivalla. (Uusitalo, 2011, s. 5.)

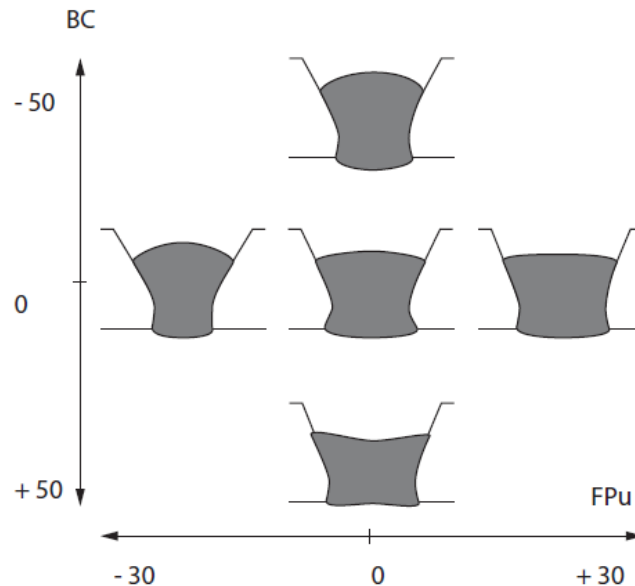
Oikosulkuvaiheessa lisäainelangan osuessa hitsisulaan ja muodostaessa oikosulun, hitsausvirtaa kasvatetaan nopeasti. Virta pidetään halutulla tasolla, jolloin pinch-voima saa lisäainepisaran kuroutumaan irti lisäainelangan päästä. Virtaa heikennetään pisaran irtikuroutumisen varmistamiseksi. Hitsauskone havaitsee pisaran kuroutumisen ja juuri ennen pisaran irtoamista virtaa pienennetään roiskeiden vähentämiseksi. Tavallisessa MAG-lyhytkaarihitsauksessa virran arvo kasvaa oikosulun aikana ja lisäainepisara irtoaa korkean virran arvon vuoksi räjähdysmäisesti aiheuttaen roiskeita. (Uusitalo, 2011, s. 5.)

Valokaarivaihe alkaa, kun valokaari syttyy virran arvon ollessa matala. Valokaaren syttyttyä virran arvoa nostetaan. Valokaarivaihe muotoilee hitsisulaa ja varmistaa riittävän tunkeuman. Valokaarivaiheen lopuksi virta pienennetään valitulle pohjavirtatasolle, jonka jälkeen alkaa uusi oikosulkuvaihe. (Uusitalo, 2011, s. 5.)

WiseRootin pääasiallinen säädettävä hitsausparametri on langansyöttönopeus, joka vaikuttaa hitsausenergiaan ja lämmöntuontiin. Lisäksi voidaan säätää pohjavirtatason arvoa (Base Current, BC), joka vaikuttaa hitsausenergiaan. Mitä suurempi pohjavirran arvo, sitä suurempi lämmöntuonti. Lisäksi voidaan säätää muotoilupulssin arvoa (Forming Pulse, Fpu). Muotoilupulssin arvon kasvattaminen lisää tunkeumaa, mutta liian suuri arvo tekee hitsisulasta rauhattoman ja vaikeuttaa sulan hallintaa. (Kemppi, 2011, s. 7.)

Kuvasta 6 nähdään WiseRoot-prosessin pohjavirtatason (BC) ja muotoilupulssin (Fpu) vaikutus pohjapalon muotoon. Pohjavirtatason ollessa liian suuri hitsattaessa liitoksia, joiden ilmarako on suuri, aiheuttaa korkea lämmöntuonti hitsisulan vetäytymistä sisään

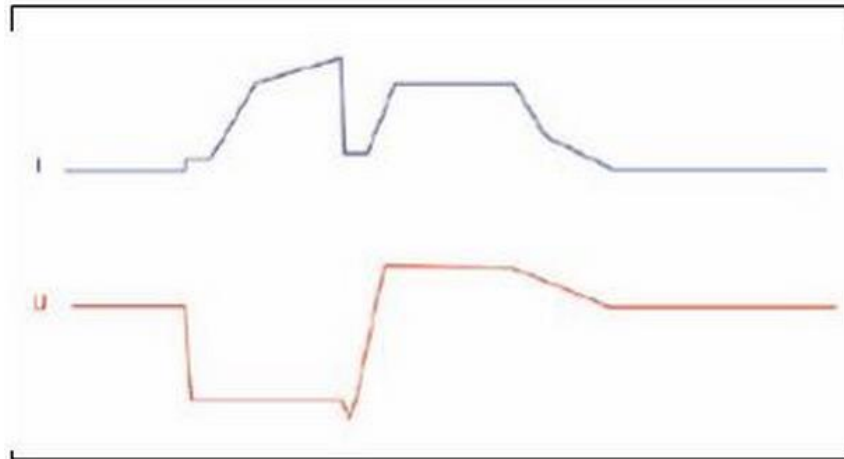
juuren puolelta, jolloin juuri jää vajaaksi. Muotoilupulssin arvon säätäminen suuremmaksi saa aikaan matalamman hitsikuvun.



**Kuva 6.** Pohjavirran (BC) ja muotoilupulssin (FPU) arvojen vaikutus pohjapalon muotoon WiseRoot-prosessissa (Kemppe, 2011, s. 8).

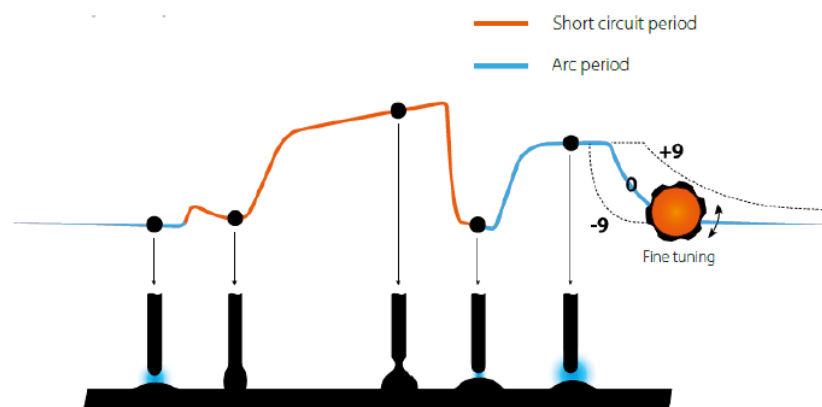
#### 4.1.1 WiseRoot+

WiseRoot+ on jatkokehitemmä WiseRoot-prosessista. WiseRoot+:n ja WiseRootin toimintaperiaatteet ovat samanlaiset. Hitsauskone havaitsee lisäänelangan ja työkappaleen kontaktin aiheuttaman oikosulun ja nostaa hallitusti hitsausvirtaa. Hitsauskone havaitsee lisäänepisaran kuroutumisen irti lisäänelangan päästä ja laskee hitsausvirran arvoa roiskeiden estämiseksi, jolloin lisäänepisara irtoaa virran arvon ollessa pieni. Pisaran irrottua alkaa valokaarivaihe, jossa virran arvoa kasvatetaan. Valokaarivaiheen muotoilupulssi tuo lämpöä hitsisulaan siirtämättä lisääinettä. (Kumpulainen, 2013, s. 33.) WiseRootin ja WiseRoot+:n erona on hitsauskoneen keino huomata oikosulun syntyminen. WiseRoot+ havaitsee oikosulun erillisen jännitteenmittauskaapelin avulla, kun WiseRoot ennakoii oikosulun syntymistä. (Uusitalo, 2015.) Kuvasta 7 nähdään virran ja jännitteen käyttäytyminen yhden oikosulkuvaihe-valokaarivaihe –kierron aikana.



**Kuva 7.** WiseRoot+-prosessin virta- ja jännitekäyrät. Hitsauskone havaitsee muutokset jännitteessä ja säättää virran arvoa niiden perusteella. (Kumpulainen, 2013, s. 33.)

WiseRoot+-prosessin hitsausparametrien säätö on helppoa. Ohjelmaan syötetään käytettävän suojakaasun tyyppi ja lisäainelangan paksuus, jonka jälkeen valitaan vain langansyöttönopeus. Hitsauskone asettaa muut parametrit käytettävän lisäainelangan ja suojakaasun perusteella. Lisäksi hitsauksen lämmöntuontia voidaan säätää hienosäädön avulla. (Kumpulainen, 2013, s. 34.) Toisin kuin WiseRoot-prosessi, WiseRoot+ käyttää vain yhtä hienosäätöä. Hienosäätö vaikuttaa valokaarivaiheen pituuteen. Kuvasta 8 nähdään hienosäädön vaikutus valokaarivaiheeseen. Hienosäädön ollessa suurimmassa arvossaan +9, on valokaarivaihe pisimmillään ja lämmöntuonti on korkeimmillaan. Pienimmällä hienosäädön arvolla -9, saavutetaan pienin lämmöntuonti.



**Kuva 8.** Hienosäädön vaikutus WiseRoot+-prosessin valokaarivaiheeseen (short circuit period = oikosulkuvaihe, arc period = valokaarivaihe, fine tuning = hienosäätö) (Uusitalo, 2014).

Hienosäädöllä voidaan vaikuttaa juuritunkeumaan. Hitsattaessa liitoksia suurella ilmarajoilla, voi liiallinen lämmöntuonti aiheuttaa hitsisulan romahtamista sisäänpäin juuren puolelta, jolloin juuri jää vajaaksi. Tällöin voidaan hienosäädön arvoa säätää miinukselle, jolloin lämmöntuonti vähenee. Kun hitsin ilmarajo on pieni, voidaan käyttää hienosäädön plus-puolta railon reunojen sulamisen varmistamiseksi. (Kumpulainen, 2013, s. 34.)

#### 4.2 WisePenetration

MIG/MAG-hitsauksen virtalähteet ovat usein vakiojännitelähteitä, jolloin vakiona pysyvän jännitteen ansiosta valokaaren pituus pysyy samana hitsauksen aikana riippumatta vapaalangan pituudesta. Vapaalangan pituuden kasvaessa lisäainelangan resistanssi kasvaa ja hitsausvirta pienenee. Hitsausvirran pieneneminen johtaa hitsaustehon pienenemiseen, mistä voi seurata liitosvirheitä, vajaata hitsautumissyvyyttä, epätasaista hitsautumissyvyyttä ja roiskeita. Vapaalangan pituus voi vaihdella hitsauksen aikana muun muassa näkyvyysongelmien, huonon ulottuvuuden, hitsattavan kappaleen suunnitteluvirheiden, sekä liitoksen mitta- ja geometriapoikkeamien vuoksi. (Uusitalo, 2011, s. 6-7.)

WisePenetration on suunniteltu pitämään hitsausvirta vakiona muuttuvasta vapaalanganpituudesta huolimatta muuttamatta itse hitsausprosessia. Tasainen hitsausvirta ja tasainen hitsausteho mahdollistavat koko hitsin läpi vaadittuna pysyvän tunkeuman, ja hitsausparametrien pitämisen tarkasti hitsausohjeen mukaisina. WisePenetration sallii hitsausvirran muutokset vapaalangan pituuden muuttuessa, mutta vapaalangan pituuden ylittäessä sallitun arvon, ohjelma alkaa vaikuttamaan hitsausvirtaan. (Uusitalo, 2011, s. 7.)

#### 4.3 WiseFusion

WiseFusion on MIG/MAG-kuumakaarihitsaukseen ja pulssihitsaukseen suunniteltu toiminto, joka pitää valokaaren lyhyenä vapaalangan pituuden muuttuessa ja helpottaa hitsisulan hallintaa asentohitsauksessa. WiseFusion-toiminto valvoo virta-jännitekäyrää ja muodostaa kapean ja lyhyen valokaaren, jonka energiatiheys on tavallista pulssi- tai kuumakaarihitsauksen valokaarta suurempi. Suuri energiatiheys ja kapean valokaaren mahdollistama suurempi hitsausnopeus pienentävät hitsauksen lämmöntuontia. WiseFusion mahdollistaa tasaisen laadun kaikissa hitsausasennoissa ja helpottaa



hitsausparametrejen säätöä, sillä kerran asetetut parametrit toimivat kaikissa tilanteissa. (Kempfi, 2010, s. 11; Uusitalo, 2011, s. 7.)

#### 4.4 WiseThin

Kempfi WiseThin on ohutlevyjen hitsaukseen ja kaarijuottoon suunniteltu modifioitu MIG/MAG-lyhytkaari prosessi. WiseThin-prosessilla on mahdollista korvata laserhitsaus ohutlevyjen hitsauksessa, sillä WiseThin-prosessin lämmöntuonti on samaa suuruusluokkaa kuin laserhitsauksen. WiseThinillä saavutetaan 5-25 % matalampi lämmöntuonti kuin perinteisellä MIG/MAG-lyhytkaarihitsauksella. Matala lämmöntuonti mahdollistaa myös suurlejuusterästen hitsaamisen. Ohutlevyjen hitsauksessa modifioitujen MIG/MAG-hitsausprosessien etuna verrattuna laserhitsaukseen ovat ilmarakojen väljemmät toleranssivaatimukset, sillä laserhitsausprosessit ovat huomattavasti arempia ilmaraon vaihteluille. WiseThin vähentää hitsauksen roiskeisuutta myös sinkkipinnoitettuja levyjä hitsattaessa, sekä vähentää tarvetta kappaleiden jälkityöstöön. Matalan lämmöntuonnin ansiosta hitsisula on helppo hallita, vaikka ilmarako ja railogeometria vaihtelisikin. (Uusitalo, 2011, s. 6; Kempfi, 2010, s. 7.)

WiseThin-prosessin toimintaperiaate on hyvin samankaltainen kuin WiseRootin. Virtaa ja jännitettä tarkkaillaan hitsauksen aikana ja parametreja säädetään automaattisesti roiskeettoman hitsaustuloksen ja alhaisen lämmöntuonnin saavuttamiseksi. (Uusitalo, 2011, s. 6.)

## 5 TUTKIMUSOSUUS

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää Kemppi WiseRoot+-prosessille hitsausparametreja ja sellaisia railogeometrian arvoja, joilla pohjapalon hitsaus onnistuu siten, että standardin SFS-EN ISO 5817 (2014) määrittelemän hitsiluokan B vaatimukset täyttyvät. Hitsauskokeiden ensimmäisessä osiossa etsittiin sopivia ilmaraon arvoja 2 mm:n juuripinnalla, ja toisessa osiossa etsittiin sopivia juuripinnan arvoja ilman ilmarakoa.

### 5.1 Tutkimussuunnitelma

Kaikki koehitsit hitsataan käsinhitsauksena ilman levityслиikettä pystyasennossa ylhäältä alaspäin (hitsausasento PG/3G). Liitosmuotona on päittäisliitos V-railoon, jonka railokulma on  $60^\circ$ . Kokeissa hitsataan vain pohjapalkko.

#### 5.1.1 Koesarja I

Ilmaraon ääriarvoja etsittäessä juuripinnan korkeutena on 2 mm. Kokeet aloitetaan hitsaamalla pohjapalkko railoon, jonka ilmarako levenee, jolloin saadaan selville suurin ilmaraon leveys, jolla hitsaus onnistuu hitsausparametreja muuttamatta. Kun sellainen ilmaraon leveys on löytynyt, jolla hitsaus ei enää onnistu virheettömästi, tutkitaan hienosäädön vaikutusta kyseisellä ilmaraon leveydellä.

#### 5.1.2 Koesarja II

Juuripinnan korkeuden vaikutusta hitsaustulokseen tutkitaan hitsaamalla pohjapalkkoja railoon, jonka ilmaraon leveys on 0 mm, ja juuripinnan korkeutta muutetaan. Kokeet aloitetaan ilman juuripintaa, jonka jälkeen hitsataan koekappaleet 1 mm, 2 mm, 3 mm ja 4 mm juuripinnalla.

### 5.2 Laitteistot ja materiaalit

Hitsauskokeissa käytetty virtalähde oli Kemppi FastMig X 450 ja langansyöttölaite oli FastMig MXP 37 Pipe, jossa oli asennettuna WiseRoot+-toiminto. Suojakaasuna käytettiin puhdasta hiilidioksidia. Lisäainelangaksi valittiin ESAB OK Autrod 12.51, jonka halkaisija oli 1,2 mm. Kuvassa 9 on esitetty kokeissa käytetty hitsauslaitteisto.



**Kuva 9.** Hitsauskokeissa käytetty Kemppi FastMig X 450 –virtalähde ja FastMig MXP 37 Pipe –langansyöttölaite.

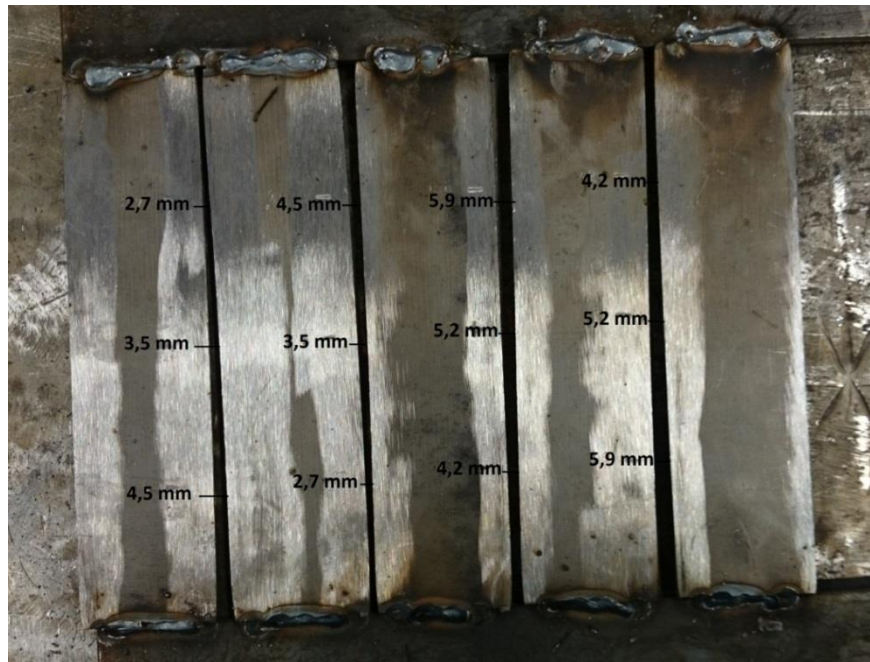
Kokeissa käytetty perusaine oli S355-lujuusluokan rakenneterästä. Perusaineen aineostodistus on liitteessä I. Hitsattavien levyjen paksuus oli 8 mm ilmarakokeissa ja 12 mm juuripintakokeissa. Railomuotona oli V-railo 60° railokulmalla. Railot valmistettiin plasmaleikkauksella, jonka jälkeen oksidikerros poistettiin juuripinnoilta ja juuren puolelta hiomalla. Juuripinnat valmistettiin hiomalla.

### 5.3 Kokeet ja mittaukset

Hitsauskokeet voidaan jakaa kahteen osaan, koesarjaan I ja koesarjaan II. Koesarjassa I tutkittiin ilmaraon leveyden vaikutusta hitsaukseen juuripinnan ollessa 2 mm. Koesarjassa II tutkittiin juuripinnan korkeuden vaikutusta ilmaraon ollessa 0 mm.

#### 5.3.1 Koesarja I

Ilmaraon maksimiarvon etsintä aloitettiin valmistamalla koekappale, johon voitiin hitsata useampi koe, jossa ilmarako levenee. Kuvassa 10 on ilmaraon suurimman mahdollisen arvon etsintään käytetty koekappale, johon on merkitty kappaleesta mitatut ilmaraon leveydet. Koekappaleen juuren puolelle hitsattiin jäykistelevy, jolla varmistettiin ilmarakojen pysyminen halutussa leveydessä lämmön aiheuttamasta vääntelystä huolimatta. Jäykistelevy näkyy kuvassa 11.



**Kuva 10.** Ilmaraon arvojen etsintään käytetty koekappale. Kuvaan on merkitty kappaleesta mitatut ilmaraon leveydet.



**Kuva 11.** Koekappaleen juuren puolelle hitsattu jäykistelevy. Jäykistelevyyn leikattiin urat railojen kohdalle.

Kokeessa 1.1 hitsattiin pohjapalko koekappaleeseen, jonka ilmaraako leveni 2 mm:stä 5 mm:iin. Ennen virallisia hitsauskokeita suoritetun testihitsien perusteella langansyötön arvoksi valittiin 3,5 m/min ja hienosäädön arvoksi +3,5. Koe toistettiin koekappaleella 1.2 samoilla hitsausparametreilla. Kokeessa 2.1 tutkittiin hitsauksen onnistumista ilmaraolla,

joka leveni 4 mm:stä 6 mm:iin. Kokeissa käytettiin langansyöttönopeutta 3,5 m/min ja hienosäädön arvoa +3,5. Koe toistettiin samoilla hitsausparametreilla koekappaleella 2.2.

Kun sellainen ilmaraon leveys löytyi, jolla hitsausvirheitä ilmeni, hitsattiin seuraavat kokeet kyseisellä ilmaraon leveydellä. Koe 3.1 hitsattiin 4 mm:n ilmaraolla, langansyöttönopeuden ollessa 3,5 m/min. Hitsauksen aikana hienosäädön arvoa pienennettiin täysi askel kymmenen sekunnin välein. Hitsauksen aloituskohdassa hienosäädön arvo oli 0,0 ja lopetuskohdassa -7,0. Koe toistettiin koekappaleella 3.2, jonka hitsauksessa käytettiin langansyöttönopeutta 3,9 m/min ja hienosäädön aloitusarvona -3,0. Hienosäätöä pienennettiin hitsauksen aikana täysi askel kymmenen sekunnin välein. Hitsauksen lopetuskohdassa hienosäädön arvo oli -9,0. Kokeen 3.2 jälkeen suoritettiin koe 3.3 samoilla hienosäädön arvoilla, mutta langansyöttönopeus muutettiin arvoon 3,0 m/min.

Kokeessa 3 saatujen tuloksien perusteella päätettiin hitsata vastaavat kokeet 5 mm ilmaraolla. Kokeessa 4.1 käytettiin langansyöttönopeutta 3,7 m/min ja hienosäädön arvoa muutettiin kymmenen sekunnin välein täysi askel. Hienosäädön aloitusarvo oli -3,0 ja hitsauksen lopussa -9,0. Kokeessa 4.2 langansyöttönopeutta pienennettiin arvoon 3,2 m/min. Hienosäätöä muutettiin samoin kuin kokeessa 4.1. Koe 4.3 suoritettiin langansyötön arvolla 4.2 m/min ja hienosäätöä muutettiin samoin kuin kokeissa 4.1 ja 4.2.

Ilmaraon pienintä leveyttä tutkittiin kahdella identtisellä koekappaleella 5.1 ja 5.2, joiden juuripinnan korkeus oli 2 mm ja ilmarako leveni 0 mm:stä 2 mm:iin. Koe suoritettiin samoilla hitsausparametreilla molempiin suuntiin, sekä levenevään että kapenevaan ilmarakoon. Kokeessa käytettiin langansyöttönopeutta 5,2 m/min ja hienosäädön arvoa +9,0. Hienosäätö asetettiin maksimiarvoonsa suurimman mahdollisen juuritunkeuman saavuttamiseksi.

### 5.3.2 Koesarja II

Juuripinnan korkeuden suurimman arvon etsiminen aloitettiin koekappaleella 6, johon ei valmistettu juuripintaa. Koe suoritettiin ilman ilmarakoa. Kokeessa pohjapalkko hitsattiin useassa osassa sopivien hitsausparametrien määrittämiseksi. Ensimmäinen osa, koe 6.1, hitsattiin 6,2 m/min langansyöttönopeudella ja hienosäädön arvolla 0,0. Koe 6.2 hitsattiin langansyöttönopeudella 5,2 m/min ja hienosäädön arvolla +5,0. Kokeessa 6.3 käytettiin

suurimpia WiseRoot+-ohjelman sallimia hitsausarvoja, langansyöttönopeutta 6,0 m/min ja hienosäädön arvoa +9,0. Koe 6.4 hitsattiin langansyöttönopeudella 5,2 m/min ja hienosäädön arvolla +9,0. Koe 6.5 hitsattiin langansyöttönopeudella 4,5 m/min ja hienosäädön arvolla +9,0. Koe 6.6 hitsattiin langansyöttönopeudella 3,75 m/min ja hienosäädön arvolla +9,0.

Kokeessa 7 juuripinnan korkeudeksi valittiin 1 mm. Kokeet suoritettiin ilman ilmarakoa. Pohjapalkko hitsattiin kahdessa osassa sopivien hitsausparametrejen määrittämiseksi. Kokeessa 7.1 käytettiin langansyöttönopeutta 4,5 m/min ja hienosäädön arvoa +9,0. Kokeen 7.1 tuloksien perusteella koe 7.2 suoritettiin käyttäen langansyöttönopeutta 5,2 m/min ja hienosäädön arvoa +9,0.

Taulukkoon 1 on koottu koesarjassa I käytetyt hitsausparametrit. Koesarjan II hitsausparametrit on koottu taulukkoon 2. Hitsausnopeus laskettiin mittaamalla sekuntikellolla hitsaukseen kulunut aika ja jakamalla hitsin pituus kaariajalla. Virran ja jännitteen arvot saatiin hitsauskoneen tallentamista hitsausparametreista.

*Taulukko 1. Koesarjassa I käytetyt hitsausparametrit.*

Kokeen numero	Ilmarako [mm]	Juuri-pinta [mm]	Hitsausnopeus [mm/min]	Langansyöttönopeus [m/min]	Hienosäätö	I [A]	U [V]
1.1	2-5	2	182	3,50	+3,5	140	16,8
1.2	2-5	2	206	3,50	+3,5	139	16,9
2.1	4-6	2	160	3,50	+3,5	142	16,4
2.2	4-6	2	164	3,50	+3,5	143	16,9
3.1	4	2	164	3,50	0,0 – -7,0	147	15,6
3.2	4	2	171	4,00	-3,0 – -9,0	172	14,8
3.3	4	2	164	3,00	-3,0 – -9,0	131	15,2
4.1	5	2	157	3,70	-3,0 – -9,0	159	15,5
4.2	5	2	142	3,20	-3,0 – -9,0	140	15,2
4.3	5	2	179	4,20	-3,0 – -9,0	167	16,1
5.1	0-2	2	158	5,20	+9,0	200	18,5
5.2	0-2	2	150	5,20	+9,0	198	18,3

*Taulukko 2. Koesarjassa II käytetyt hitsausparametrit. Viivalla merkityjä parametreja ei mitattu.*

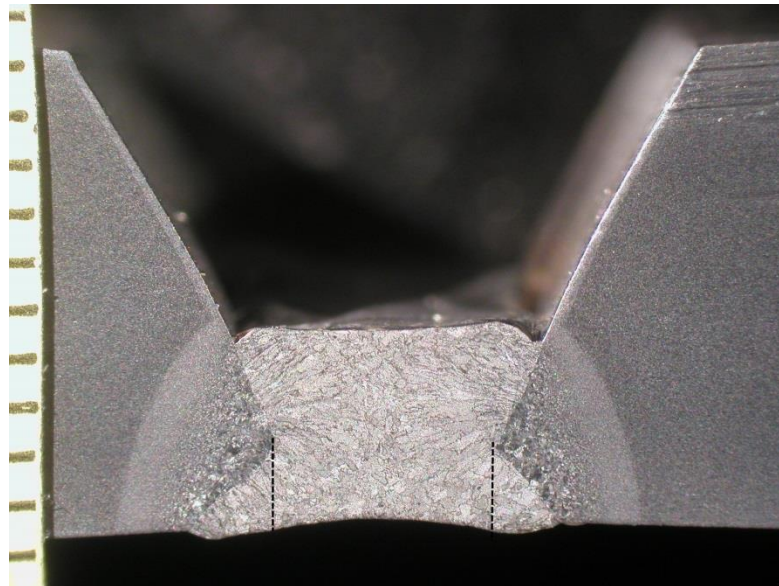
Kokeen numero	Ilmarako [mm]	Juuri-pinta [mm]	Hitsausnopeus [mm/min]	Langansyöttö-nopeus [m/min]	Hienosäätö	I [A]	U [V]
6.1	0	0	163	5,20	0,0	-	-
6.2	0	0	171	5,20	+5,0	-	-
6.3	0	0	163	6,00	+9,0	-	-
6.4	0	0	158	5,20	+9,0	-	-
6.5	0	0	164	4,50	+9,0	-	-
6.6	0	0	168	3,75	+9,0	-	-
7.1	0	1	165	4,50	+9,0	185	17,4
7.2	0	1	163	5,20	+9,0	200	18,5

## 6 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Molempien koesarjojen tulokset olivat oletetunlaisia. Liian leveällä ilmaraolla juuri jää vajaaksi ja liian korkealla juuripinnalla ja kapealla ilmaraolla hitsausteho ei riitä, jolloin hitsautumissyvyys juuressa jää vajaaksi.

### 6.1 Koesarja I

Kokeissa 1.1 ja 1.2 havaittiin käytetyillä hitsausparametreilla juuren jäävän vajaaksi ilmaraon leveyden ollessa 4 mm. Juuripinnat olivat sulaneet, mutta juuren puolelle muodostui matala ura. Standardin SFS-EN ISO 5817 (2014, s. 26) mukaan hitsiluokassa B juuren puolella olevan uran syvyys saa olla 8 mm paksulla levyllä enintään 0,4 mm. Koesarjan I hitseissä railopinnat sulivat niukasti. Tunkeumaa railopinnoilla saisi syvemmäksi käyttämällä levitysliikettä tai suurentamalla hitsaustehoa langansyöttönopeutta lisäämällä. Kuvassa 12 on koekappaleesta 1.1 otettu hiekuva. Hie otettiin kohdalta, jossa ilmaraon leveys oli 4 mm.

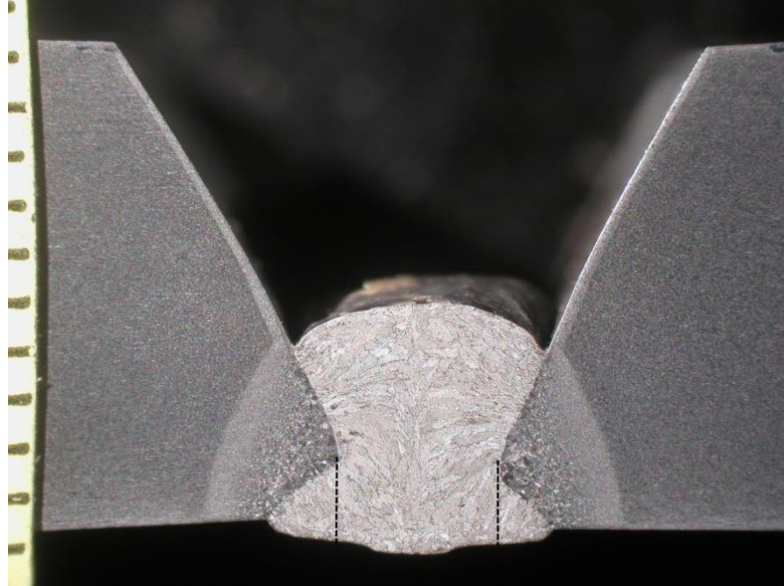


**Kuva 12.** Koekappaleesta 1.1 otettu hiekuva. Hie otettiin kappaleesta kohdalta, jossa ilmaraon leveys oli 4 mm. Juuripinnan korkeus oli 2 mm.

Kokeessa 3.2 testattiin hienosäädön vaikutusta kääntämällä hienosäätöä pienemmälle täysi askel kymmenen sekunnin välein hitsauksen aikana. Hienosäädön arvosta -7,0 alkaen

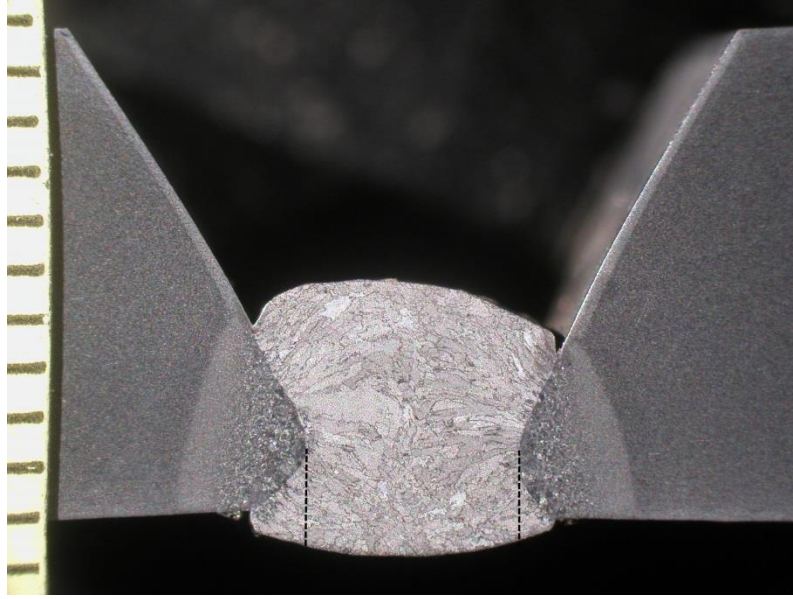


juurikuvun korkeus täytti hitsiluokan B vaatimukset. Kuvassa 13 on kappaleesta 3.2 otettu hiekuva. Hie otettiin kappaleesta kohdalta, jossa hienosäädön arvo oli -7,0.



**Kuva 13.** Koekappaleesta 3.2 otettu hiekuva. Hie otettiin kappaleesta kohdalta, jossa hienosäädön arvo oli -7,0. Ilmaraon leveys oli 4 mm ja juuripinnan korkeus 2 mm.

Kokeessa 4 tutkittiin hienosäädön vaikutusta hitsaukseen, kun ilmaraon leveys oli 5 mm. Paras tulos saatiin kokeessa 4.3, kun langansyöttönopeus oli 4,2 m/min ja hienosäätö -8,0. Kuvassa 14 on hiekuva, joka on otettu kappaleesta 4.3 kohdalta, jossa hienosäädön arvo oli -8,0.



**Kuva 14.** Kappaleesta 4.3 otettu hiekuva. Hie otettiin kappaleesta kohdalta, jossa hienosäädön arvo oli -8,0. Ilmaraon leveys oli 5 mm ja juuripinnan korkeus 2 mm.

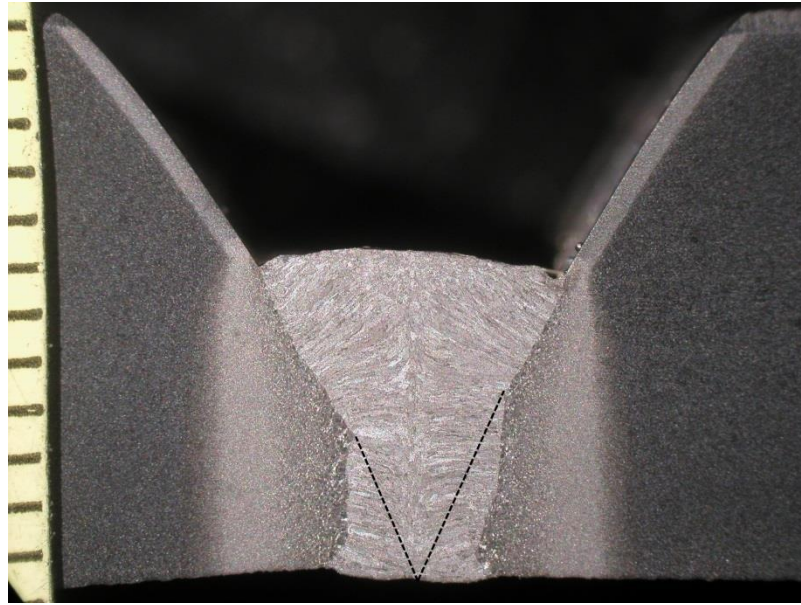
Kokeissa 5.1 ja 5.2 tutkittiin hitsaustulosta, kun ilmarako muuttuu välillä 2 mm – 0 mm. Koe 5.1 hitsattiin levenevään ilmarakoon ja koe 5.1 kapenevaan ilmarakoon. Kokeiden tuloksissa ei havaittu eroja. Kokeissa havaittiin hitsautumissyvyyden jäävän vajaaksi kun ilmaraon leveys oli 0,5 mm. Kapeamman ilmaraon vuoksi railo oli kapea, jonka vuoksi railopinta suli kokeessa 5 paremmin kuin muissa koesarjan I kokeissa. Kuvassa 15 on koekappaleesta 5.1 otettu hiekuva. Hie on otettu kohdalta, jossa ilmaraon leveys oli 0,5 mm ja hitsautumissyvyys juuressa oli riittämätön.



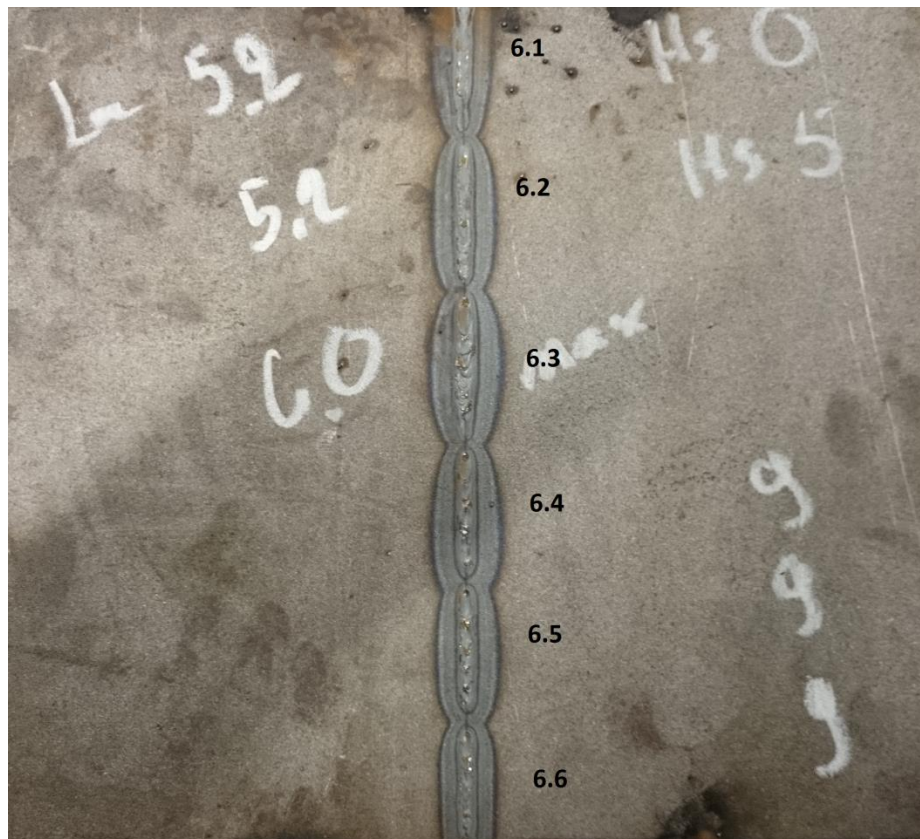
**Kuva 15.** Koekappaleesta 5.1 otettu hiekuva. Hie otettiin kappaleesta kohdalta, jossa ilmaraon leveys oli 0,5 mm. Juuripinnan korkeus oli 2 mm.

## 6.2 Koesarja II

Juuripinnan korkeuden ääriarvoja tutkivat kokeet aloitettiin hitsaamalla pohjapalkko koekappaleeseen 6 ilman juuripintaa ja ilman ilmarakoa. Pohjapalkko hitsattiin useassa osassa koekappaleeseen parhaiden hitsausparametrien löytämiseksi. Kokeessa havaittiin tunkeuman riittävän niukasti juuripinnan korkeudella 0 mm. Hitsipalkojen pinnat olivat epätasaisia juuren puolelta sekä pinnan puolelta. Kuvassa 16 on kokeen 6.2 hitsistä otettu hiekuva. Kokeessa 6.2 saavutettiin koesarjan 6 suurin tunkeuma ja paras hitsipalon muoto sekä juuren että pinnan puolelta. Kuvassa 17 on esitetty koekappaleen 6 juuren puoli. Koehitsien hitsipalot olivat epätasaisia juuren puolelta ja joidenkin hitsien aloitus- ja lopetuskohdissa hitsautumissyvyys oli riittämätön.

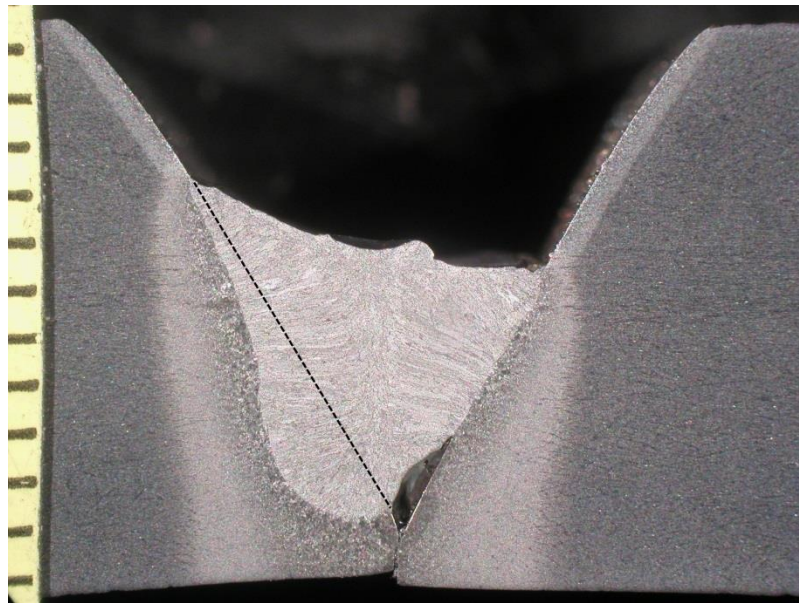


**Kuva 16.** Kokeen 6.2 hiekuva. Kokeessa 6.2 saavutettiin koesarjan 6 suurin tunkeuma ja paras hitsipalon muoto juuren puolella. Ilmaraon leveys oli 0 mm ja juuripinnan korkeus 0 mm.



**Kuva 17.** Koekappaleen 6 juuren puoli. Koesarjan paras tulos saavutettiin kokeessa 6.2, jossa ilma-araon leveys oli 0 mm ja juuripinnan korkeus 0 mm.

Juuripinnan suurimman korkeuden tutkimista jatkettiin kokeella 7, jossa hitsattiin samaan koekappaleeseen kaksi pohjapalkoa eri hitsausparametreilla. Kokeessa 7.1 havaittiin hitsautumissyvyyden jäävän vajaaksi koko hitsin pituudelta langansyöttönopeudella 4,50 m/min. Hienosäädön arvoksi valittiin maksimiarvo +9,0 mahdollisimman suuren tunkeuman saavuttamiseksi. Kokeessa 7.2 langansyöttönopeutta suurennettiin arvoon 5,2, jolloin tunkeuma saatiin riittäväksi. Kokeessa käytettiin hienosäädön arvoa +9,0. Kokeessa 7.2 juuripinnat sulivat joissain hitsin kohdissa, mutta hitsiin syntyi kohtia, joissa tunkeuma jäi vajaaksi. Valokaaren kohdistaminen tarkasti railon keskelle oli vaikeaa, ja valokaaren kohdistuksen pienten muutosten vuoksi juuripinnat eivät sulaneet. Kuvassa 18 on esitetty koehitsistä 7.2 otettu hiekuva. Hie otettiin kohdasta, jossa juuripinta ei sulanut riittämättömän tunkeuman ja virheellisen valokaaren kohdistuksen vuoksi.



**Kuva 18.** Koekappaleesta 7.2 otettu hiekuva. Hie otettiin koekappaleesta kohdalta, jossa juuripinnat eivät sulaneet epätasaisen tunkeuman ja virheellisen valokaaren kohdistuksen vuoksi. Ilmaraon leveys oli 0 mm ja juuripinnan korkeus 1 mm.

Kuvassa 19 on koekappaleen 7 juuren puoli. Kokeessa 7.1 tunkeuma oli riittämätön liian pienen langansyöttönopeuden vuoksi. Kokeessa 7.2 juuripinnat sulivat joissain hitsin kohdissa, mutta pienet muutokset valokaaren kohdistuksessa aiheuttivat hitsautumissyvyyden jäämisen vajaaksi juuressa.



**Kuva 19.** Koekappaleen 7 juuren puoli. Ilmaraon leveys oli 0 mm ja juuripinnan korkeus 1 mm.

Kuvissa 17 ja 19 esiintyvä katkonainen tunkeuma ja hitsien epätasaisuus johtuu riittämättömästä hitsausenergiasta. Hitsausenergia riittää paikoitellen juuripinnan läpihitsautumiseen, mutta pienet muutokset valokaaren kuljetuksessa suuntaavat valokaaren liiaksi railopinnalle, jolloin juuri jää vajaaksi, tai hitsipalkoon tulee epätasainen pinta juuren puolelle.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokeiden perusteella voidaan todeta, ettei Kemppi WiseRoot+ sovellu pohjapalon hitsaukseen ilman ilmarakoa, jos railossa on juuripinta. Koesarjan I perusteella ilma-araon leveyden tulisi olla vähintään 1 mm hitsausvirheettömän pohjapalon varmistamiseksi, jos juuripinnan korkeus on 2 mm. Ilmaraon suurin kokeissa tutkittu leveys, jolla hitsaus onnistui ilman levitysvirheitä oli 5 mm. Hienosäädön arvon pienentäminen voisi mahdollistaa leveämpien ilmarakojen käytön. Levitysvirheitä käyttämällä pohjapalon hitsaus onnistuisi vielä leveämmillä ilmarakoilla. Matalampaa juuripintaa käyttämällä kapeampi ilmarako olisi mahdollinen.

Koesarjan II perusteella pohjapalkko voidaan hitsata ilman ilmarakoa, jos käytetään teräväreunaista railoa, eli railoa 0 mm juuripinnalla. Juuripinnan korkeuden ollessa 1 mm hitsautumissyvyys jäi vajaaksi juuressa, jolloin juuripinnat eivät sulaneet.

Kokeissa havaittiin, että WiseRoot+-prosessilla voidaan hitsata pohjapalkko raiioon, jonka ilmarako on 1 – 5 mm, ja juuripinnan korkeus on 1 - 2mm. Käyttökelpoisten ilma-araon leveyksien väli on suuri verrattuna Welding Alloys Groupin (2011, s. 2) suosittelemaan TIG-hitsauksessa käytettävään 2 – 3 mm:n ilmarakoon. Kokeissa havaittiin myös pohjapalon hitsauksen onnistuvan samoilla hitsausarvoilla ilma-araon leveyksillä 2 – 4 mm. Toisaalta jos olisi käytetty pienempää hienosäädön arvoa, olisi ilma-araon vaihteluväli saatu suuremmaksi. Laaja hitsausprosessin sallima ilma-araon vaihteluväli helpottaa hitsattavien kappaleiden sovitusta vähentämällä vaadittavaa sovitustarkkuutta. Myöskään lämpölaajenemisen aiheuttama ilma-araon muuttuminen ei aiheuta ongelmia hitsauksessa.

Kemppi Oy ilmoittaa WiseRoot+-hitsausprosessilla hitsattavien raiiojen ilma-araon leveydeksi 1,5 – 4 mm, kun railomuotona on V-railo 50° - 60° railokulmalla, 2 mm korkealla juuripinnalla. Teräväreunaisella, eli juuripinnattomalla V-railolla suositellaan käytettäväksi vähintään 3,5 mm leveää ilmarakoa. (Uusitalo, 2014.) Ero saatiin tutkimustuloksiin selittyä hitsauskonevalmistajan asettamilla varmuusrajoilla railogeometrian mitoissa. Valmistaja haluaa varmistaa, että asiakas onnistuu suositelluilla railogeometrian arvoilla.

Tuottavuuden näkökulmasta kapea ilmarako ja korkea juuripinta ovat edullisia. Kapea ilmarako ja korkea juuripinta pienentävät railon poikkipinta-alaa ja siten vähentävät liitokseen tarvittavaa hitsiainetta, jolloin hitsauskustannukset pienenevät ja hitsaustyö nopeutuu. Liiallinen ilmaraon kaventaminen ja juuripinnan korottaminen kuitenkin vaativat hitsausprosessilta suurempaa tunkeumaa ja myös virheiden, kuten juuren vajaan hitsautumissyvyyden ja vajaan juuren riski kasvaa. Tuottavuuden parantamiseksi on tärkeää minimoida hitsausvirheiden vuoksi hylättävien kappaleiden määrä, sekä hitsausvirheiden korjaamisen aiheuttama lisätyö. Noudattamalla tutkittuja ja toimivaksi havaittuja hitsausohjeita ja railogeometrioiden arvoja, saadaan hitsaus onnistumaan virheettömästi.

Jatkotutkimuksissa voitaisiin syventyä tutkimaan WiseRoot+-hitsausprosessin toimivuutta sellaisissa hitsirailoissa, joiden juuripinnan korkeus on 2 mm ja ilmarako vaihtelee välillä 0 – 2 mm. Tutkimuksilla voitaisiin selvittää, voidaanko erilaisilla lisäainelangan paksuuksilla ja eri suojakaasulla saavuttaa parempi tunkeuma ja siten mahdollistaa kapeamman ilmaraon käyttäminen. WiseRoot+-prosessilla voidaan käyttää suojakaasuna puhtaan hiilidioksidin lisäksi argon-hiilidioksidi-seoskaasua. Lisäksi voitaisiin tehdä tätä työtä vastaava tutkimus jonkin toisen hitsauskonevalmistajan modifioidulla pohjapalon hitsaukseen tarkoitettulla MAG-hitsausprosessilla ja verrata sitä WiseRoot+:lla saatuihin tuloksiin. Kemppi WiseRoot+-prosessia voitaisiin verrata esimerkiksi Fronius CMT-prosessiin, jonka toimintaperiaate on hyvin erilainen verrattuna muihin modifioituihin prosesseihin.



## 8 YHTEENVETO

MIG/MAG-hitsaus on monipuolinen hitsausprosessi, jolla voidaan laajojen hitsausarvojen säätömahdollisuuksien vuoksi hitsata yhdellä lisäainelangan paksuudella monia eri ainepaksuuksia. Jatkuva lisäaine ja kuonattomuus ovat MIG/MAG-hitsauksen etuja puikkohitsaukseen verrattuna. Monet valmistajat ovat kehittäneet modifioituja MIG/MAG-hitsausprosesseja laajentaakseen entisestään prosessin käyttömahdollisuuksia. Modifioituja hitsausprosesseja ovat kehittäneet muun muassa Kemppi, Fronius, Lincoln ja ESAB.

Modifioidut prosessit mahdollistavat sellaiset hitsaustyöt, joiden tekeminen perinteisellä MIG/MAG-hitsauksella on hidasta ja vaikeaa. Esimerkiksi pohjapalon hitsaukseen suunnitellut modifioidut prosessit tekevät hitsauksesta helpompaa, nopeuttavat hitsaustyötä verrattuna TIG-hitsaukseen ja perinteiseen MIG/MAG-hitsaukseen, sekä vähentävät jälkityöstön, kuten hitsien hionnan tarvetta.

Hitsausprosessien modifioinnilla tarkoitetaan MIG/MAG-hitsauksessa kaarityypin muuttamista keinotekoisesti. Modifioitu Kemppi WiseRoot+-prosessi perustuu hitsauksen aikaiseen jännitteen valvontaan ja jännitteen muutosten perusteella tehtävään automaattiseen hitsausvirran säätämiseen. Hitsauskoneen havaitessa oikosulun lisäainelangan ja perusaineen välillä, hitsausvirtaa pienennetään roiskeettoman lisäaineen siirtymisen varmistamiseksi. Fronius CMT taas perustuu langansyötön pulssitukseen hitsauksen aikana. Oikosulun tapahtuessa lisäainelankaa vedetään hieman takaisin, jolloin lisäainepisara irtoaa langan päästä.

Hitsauskokeissa tutkittiin railogeometrian ääriarvoja pohjapalon hitsauksessa Kemppi WiseRoot+-prosessilla. Kokeiden perusteella juuripinnan korkeuden ollessa 2 mm, sopiva ilmarakon leveys on 1 – 5 mm. Hitsaus onnistui parametreja muuttamatta, vaikka ilmarakon leveys 2 mm hitsauksen aloituskohdasta. Liian kapea ilmarako aiheuttaa juuren vajaan hitsautumissyvyyden ja liian leveä ilmarako vajaan juuren. Pohjapalkko voidaan hitsata myös teräväreunaiseen railoon 0 mm ilmarakolla. Juuripinnan käyttö ilmarakottomassa railossa aiheuttaa juuren vajaan hitsautumissyvyyden.

## LÄHTEET

David Paul. Esab Aristo SuperPulse expands pulse MIG/MAG. [ESABin WWW-sivuilla]. [Viitattu 19.12.2014]. Saatavissa: <http://www.esab.com/global/en/news/ESAB-Aristo-SuperPulse-expands-pulse-MIGMAG.cfm>

Fronius. 2007. CMT: Cold Metal Transfer [verkkodokumentti]. Päivitetty 10.7.2007 [viitattu 19.12.2014]. 8 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.digitalweldingsolutions.com/CMT.pdf>

Hicks, J. 1999. Welded Joint Design. Woodhead Publishing. 141 s.

Jeffus, L. 2011. Welding: Principles and Applications. 7. painos. Cengage Learning. 972 s.

Kemppi. 2010. Wise [verkkodokumentti]. Päivitetty 2.9.2010 [viitattu 2.1.2015]. 12 s. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPIWeb/DS\\_Wise\\_AD728\\_1215\\_EN.pdf/\\$file/DS\\_Wise\\_AD728\\_1215\\_EN.pdf](http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPIWeb/DS_Wise_AD728_1215_EN.pdf/$file/DS_Wise_AD728_1215_EN.pdf)

Kemppi. 2011. Wise and Match software [verkkodokumentti]. Päivitetty 26.8.2011 [viitattu 7.1.2015]. 26 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.rapidwelding.com/files/Kemppi%20Wise,Match%20Software%20Manual.pdf>

Kemppi. 2012a. FastMig [verkkodokumentti]. Päivitetty 14.5.2012 [viitattu 29.11.2014]. 4 s. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPIWeb/DS\\_FastMig\\_KM\\_KMS\\_%20AD709\\_1212\\_FI.pdf/\\$file/DS\\_FastMig\\_KM\\_KMS\\_%20AD709\\_1212\\_FI.pdf](http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPIWeb/DS_FastMig_KM_KMS_%20AD709_1212_FI.pdf/$file/DS_FastMig_KM_KMS_%20AD709_1212_FI.pdf)

Kemppi. 2012b. SuperSnake GT02S/GT02SW [verkkodokumentti]. Päivitetty 15.5.2012 [viitattu 14.12.2014]. 2 s. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPIWeb/DS\\_SuperSnake\\_AD711\\_1213\\_FI.pdf/\\$file/DS\\_SuperSnake\\_AD711\\_1213\\_FI.pdf](http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/DocsPIWeb/DS_SuperSnake_AD711_1213_FI.pdf/$file/DS_SuperSnake_AD711_1213_FI.pdf)

Kumpulainen, J., Tihinen S. & Laitinen, R. 2011. Ultralujien terästen hitsaus uusilla MAG-menetelmillä. Hitsaustekniikka 2/2011. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys ry. S. 6-12.

Kumpulainen, J. 2013. WiseRoot+ uudistaa pohjapalkojen MAG-hitsauksen. Kemppi ProNews 2013. Lahti: Kemppi Oy. S. 33-36.

Lepola, P. & Makkonen, M. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY. 429 s.

Lincoln Electric. 2013. Surface Tension Transfer (STT) [verkkodokumentti]. Päivitetty 13.8.2013 [viitattu 19.12.2014]. 4 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf>

Lukkari, J. 1997. Hitsaustekniikka: Perusteet ja kaarihitsaus. 4. painos. Helsinki: Opetushallitus. 292 s.

Lukkari, J. 2002. Hitsien laatu ja hitsausvirheet. Hitsausuutisissa julkaissut artikkelit, osat 1-5 [verkkodokumentti]. Helsinki: Oy ESAB. [Viitattu 18.11.2014]. 15 s. Saatavissa: [http://www.tooloutlet.fi/upload/File/Hitsien\\_laatu\\_ja\\_hitsausvirheet.pdf?rnd=1333530538](http://www.tooloutlet.fi/upload/File/Hitsien_laatu_ja_hitsausvirheet.pdf?rnd=1333530538)

Ovako. 2012. Ovakon terästen hitsaus [verkkodokumentti]. Päivitetty 9.3.2012 [viitattu 12.11.2014]. 64 s. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.ovako.com/PageFiles/320/Ovakon\\_terasten\\_hitsaus\\_15724.pdf](http://www.ovako.com/PageFiles/320/Ovakon_terasten_hitsaus_15724.pdf)

SFS-EN ISO 6520-1. 2008. Hitsaus ja lähiprosessit. Geometrinen hitsausvirheiden luokittelu metallisissa materiaaleissa. Osa 1: Sulahitsaus. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 52 s.

SFS-EN 1090-2 + A1. 2012. Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 198 s.

SFS-EN ISO 5817. 2014. Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (Paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat. 3. Painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 60 s.

Uusitalo, J. 2011. Wise-prosessit hitsaajan apuna. Hitsaustekniikka 6/2011. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. S. 5-7.

Uusitalo, J. 2014. WiseRoot+ -kandidaatintyö [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Visa-Valtteri Monto. Lähetetty 28.11.2014 klo 11.01 (GMT +0200). Liitetiedosto: WiseRoot+ presentation\_EN.pdf

Uusitalo, J. 2015. WiseRoot+ -kandidaatintyö [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Visa-Valtteri Monto. Lähetetty 12.1.2015 klo 9.36 (GMT +0200). Liitetiedosto: Novel tailored welding arcs help welders meet quality and productivity demands.pdf

Welding Alloys Group. 2011. WARod. Root pass TIG welding without backing gas [verkkodokumentti]. Päivitetty 16.2.2011 [viitattu 10.2.2015]. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://www.welding-alloys.com/uploads/tx\\_akcatbase/WARod\\_brochure\\_v10211.PDF](http://www.welding-alloys.com/uploads/tx_akcatbase/WARod_brochure_v10211.PDF)

Weman, K. & Lindén, G. 2006. Mig Welding Guide. Woodhead Publishing. 320 s.



**AINESTODISTUS TEST REPORT**

EN 10 204-3.1 (2004)

2 / 3  
878610-001  
23.10.2012

Päivämäärä / Date  
24.10.2012  
MLK

Valmistaja / Consignor  
RUUKKI STAINLESS STEEL &  
ALUMINIUM OY

Tilaaja / Purchaser  
RUUKKI METALS OY

Valmistajan nimi / Name of the Manufacturer  
Jalokeraaminen huppuhietäisi  
Oxygen steel, continuous casting

Asiakkaan merkki / Shipping mark  
Lisävaatimukset / Additional requirements

Tilauksen Order No.  
4500512370

Valmistajan nimi / Name of the Manufacturer  
RUUKKI LASER, HSF FINE GRAIN STEEL FOR LASER/PLASMA CUTTING

Asiakkaan merkki / Shipping mark

Tilauksen Order No.  
4500512370

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	TM	52	398	464	33	52	0.5							

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

Item	Subst. kind and cert. test No.	Tilaus / Order No.	Tilaus / Order No.	Tensile test		Yield strength		Elongation		Reduction of area		Impact test	Char. test No.	Temp. °C	Heat treatment	Temp. °C
				Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength	Yield strength	Tensile strength							
010	58965	041	157	-020	168	193	155	172								

**Raabe Steel Works**  
Testing and Inspection

*JAAKKO JUUSO*  
JAAKKO JUUSO  
Authorized inspection representative  
Yhtiön nimi / Company Name: RUUKKI METALS OY  
Korppakka Hagstedtin Office: HELSINKI

Puhelin Telephone: 020 5911  
+358 20 3811

Fax: P.O. Box 99  
FIN-52101 RAAHI

Telekopio Telefax: 020 592 2736  
1 20 592 2736

Y-tunnus Business ID: 2389445-7

Tämän todistuksen, että toimitus on tilausvahvistuksen mukainen.  
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order confirmation.

