Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Niki Lankila

MODIFIOIDUN MAG-KAARIHITSAUSPROSESSIN HYÖDYNTÄMINEN RAILOTILAVUUDEN PIENENTÄMISESSÄ MEKANISOIDUSSA ORBITAALIHITSAUKSESSA

Työn tarkastajat: Professori Jukka Martikainen
IWE, DI Jyri Uusitalo

Työn ohjaajat: Professori Jukka Martikainen
IWE, DI Jyri Uusitalo

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
LUT Kone

Niki Lankila

Modifioidun MAG-kaarihitsausprosessin hyödyntäminen railotilavuuden pienentämisessä mekanisoidussa orbitaalihitsauksessa.

Diplomityö 2015

83 sivua, 30 kuvaa, 11 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: professori, TkT Jukka Martikainen
IWE, DI Jyri Uusitalo

Hakusanat: MIG/MAG-hitsaus, orbitaalihitsaus, modifioitu kaari, railotilavuus, railogeometria, hitsauskustannukset, hitsauksen laatu

Keywords: MIG/MAG-welding, GMAW, Orbital Welding, Modified Arc, Groove Volume, Groove Geometry, Welding Costs, Welding Quality

Länsimaisen työn hinta luo jatkuvan paineen hitsauksen tuottavuuden parantamiseen. MIG/MAG-hitsauksen tuottavuutta voidaan parantaa tehostamalla hitsausprosessia, vähentämällä hitsien lukumäärää ja pienentämällä hitsiaineen tarvetta. Eri virtalähdevalmistajat tuovat markkinoille hitsausprosesseja hitsauksen tehostamiseen, joilla pystytään korvata vähemmän tuottavia hitsaustyövaiheita. Hitsien lukumäärän vähentäminen on rakenteen suunnitteluun liittyvä tekijä ja hitsiaineen tarpeen pienentäminen voidaan toteuttaa railogeometrian muutoksilla tai tuotteen sopivalla suunnittelulla.

Diplomityössä on tutkittu 30 mm paksujen S355 rakenneteräsputkien hitsauksen tuottavuuden kasvattamista käyttäen nykyaikaisia modifioituja kaarihitsausprosesseja ja railotilavuutta pienentämällä. Työssä vertailtiin 30° ja 60° railokulmalla tehtyjä liitoksia. Railogeometrian muutoksen lisäksi diplomityössä vertailtiin eri menetelmien tehokkuutta putken pohjapalon hitsauksessa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
LUT Kone

Niki Lankila

Using Modified GMAW Process in Reduction of Weld Groove Volume with Mechanized Orbital Welding

Master's thesis 2015

83 pages, 30 figures, 11 tables and 2 appendices

Examiners: professor, Dr. Tech. Jukka Martikainen
IWE, M.Sc. Jyri Uusitalo

Keywords: MIG/MAG-welding, GMAW, Orbital Welding, Modified Arc, Groove Volume, Groove Geometry, Welding Costs, Welding Quality

Labor costs of western countries create constant need to improve productivity of welding. Productivity of GMAW can be improved by using more efficient processes, reducing the number of the welds and reducing the need of filler material. Different welding equipment manufacturers bring to the markets modern welding processes to improve productivity, which can replace less productive welding processes. Decreasing number of the welds is a matter of product design and the need for filler wire can be decreased by design and adjusting the groove geometry.

This master's thesis is focused on the welding of 30 mm thick S355 steel pipes welding productivity improvement. Productivity is improved by the use of modern modified arc welding processes and decreasing groove volume. Study compared joints with 30° and 60° groove angle and a modified arc welding processes were implemented to increase process productivity. In addition to the groove volume decrease and fill pass process productivity improvement studies were made to compare root welding procedures and the effect of the root pass welding to whole welding task productivity.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Kemppi Oy:n toimeksiantona putkihitsauksen tuottavuuden parantamiseksi. Työssä tutkittiin modifioitujen kaarihitsausprosessien ja kavennetun railokulman hyödyntämistä 30 mm seinämävahvuudella olevan rakenneteräsputken hitsauksessa. Diplomityön tekemisessä sain korvaamatonta apua ja tukea Kemppi Oy:n henkilöstöltä. Teknisiin ongelmiin sain apua ohjaajaltani Jyri Uusitalolta, hitsaustöissä Ismo Vartiaiselta sekä muissa ongelmissa Kempin hitsauslaboratorion henkilöstöltä Antti Kahrilta, Lauri Taimistolta, Tapani Dahlströmiltä, Esa Kunnakselta, Mika Kunnakselta sekä Marko Rantaselta.

Diplomityön valmiiksi saattamisesta haluan kiittää professori Jukka Martikaista, jonka kärsivällisyys riitti, vaikka diplomityö lopulta viivästyi työkiireiden takia. Opintojen ja tämän diplomityön tekemiseen olen saanut korvaamatonta tukea perheeltä, ystäviltä ja muilta läheisiltä, jotka ovat tukeneet minua opinnoissani ja vieneet ajatuksia muualle silloin, kun siihen on ollut mahdollisuus. Tämä opiskelun ja vapaa-ajan tasapainottaminen on ollut minulle korvaamatonta apua, joka mahdollisti joskus niin etäiseltä vaikuttaneen valmistumisen diplomi-insinööriksi.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ALKUSANAT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO
1 JOHDANTO ... 13
1.1 Työn tausta ... 13
1.2 Työn tavoite ja rajaus ... 13
1.3 Kemppi Oy ... 14
2 ORBITAALIHITSAUS ... 16
2.1 Periaate ... 16
2.2 Laitteisto ... 17
2.2.1 Hitsauslaitteisto ... 17
2.2.2 Orbitaalikuljettimet ... 19
2.3 Laatu ... 22
2.4 Hyödyt ja haasteet ... 23
2.4.1 Orbitaalihitsaus ja operaattorin pätevöinnit ... 24
2.4.2 Orbitaalihitsausasennot ... 24
2.4.3 Orbitaali-MIG/MAG-hitsaus ... 25
2.4.4 Orbitaalihitsauksen haasteet ja vaatimukset ... 26
3 MODIFIOIDUT KAARIHITSAUSPROSESSIT ... 28
3.1 Pulssitetut modifioidut prosessit ... 28
3.1.1 Aineensiirtymän hallintaa pulssihitsauksessa ... 28
3.2 Synergiset modifioidut valokaarihitsausprosessit ... 30
3.2.1 Tunkeuman kasvattaminen ... 30
3.2.2 Tunkeuman vakioiminen ... 31
3.2.3 Juuren hitsaus ... 32
3.2.4 Ohuet levypaksuudet ... 34
4 KAVENNETUN RAILON HITSAUS ... 36

4.1 Kavennetun railon vaatimukset ja haasteet ... 37
4.2 Kavennetun railon hyödyt ... 38
4.3 Laatu kavennetun railon hitsauksessa ... 41
5 HITSAUKSEN KUSTANNUKSET ... 43
5.1 Työkustannukset ... 44
5.2 Ainekustannukset ... 44
5.2.1 Hitsattavan materiaalin vaikutus hitsausainekustannuksiin ... 45
5.3 Konekustannukset ... 45
5.4 Energiakustannukset ... 46
5.5 Kunnossapitokustannukset ... 47
5.6 Laadusta aiheutuvat kustannukset ... 47
5.7 Hitsauskustannusten jakautuminen ... 48
6 HITSAUSKOKEET ... 50
6.1 Koejärjestely ja kokeiden suoritus ... 51
6.1.1 Perusmateriaali ... 51
6.1.2 Lisäaineet ... 51
6.1.3 Suojakaasu ... 52
6.1.4 Hitsauslaitteisto ... 52
6.1.5 Kokeiden suoritus ... 56
7 KOKEIDEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI ... 61
7.1.1 Makrohietutkimukset ... 62
7.1.2 Hitsausajat ... 65
7.2 pWPS ... 66
8 KUSTANNUSLASKELMAT ... 68
8.1.1 Perusaine- ja kunnossapitokustannukset ... 68
8.1.2 Työkustannukset ... 68
8.1.3 Suojakaasukustannukset ... 69
8.1.4 Lisäainekustannukset ... 70
8.1.5 Kokonaiskustannukset ... 72
9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSAIHEET ... 74
10 YHTEENVETO ... 77
LÄHTEET ... 78

LIITTEET

Liite 1. pWPS 30° liitokselle, jossa pohjapalko on hitsattu käsin

Liite 2. pWPS 60° liitokselle, jossa pohjapalko on hitsattu käsin

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

α	Railokulma
e	Kaariaikasuhde (%)
i_I	I-railon ilmarako
i_V	V-railon ilmarako
J	Jauheen ominaiskulutus (kg/lankakilo)
K_{En}	Energiakustannukset (€)
K_{Ja}	Hitsauksen jauhekustannukset (€)
K_{Ju}	Hitsauksen juuritukikustannukset (€)
K_{Ko}	Konekustannukset (€)
K_{Li}	Hitsauksen lisäainekustannukset (€)
K_{Su}	Hitsauksen suojakaasukustannukset (€)
K_{Ty}	Hitsauksen työkustannukset (€)
L	Hitsauspituus
H_{En}	Energian ostohinta (€/kWh)
H_{Ja}	Hitsausjauheen hinta (€/kg)
H_{Ju}	Juurituen hinta (€/m)
H_{Ko}	Koneen tuntihinta (€/h)
H_{Li}	Lisäaineen hinta (€/kg)
H_{Su}	Suojakaasun hinta (€/m^3)
H_{Ty}	Hitsaajan työtunnin hinta (€/h)
M	Hitsiainemäärä (kg)
N	Prosessin hyötyluku (%)
P	Valokaaren teho (kW)
PF	Putkihitsausasento ylämäkeen

PG	Putkihitsausasento alamäkeen
PK	Putkihitsausasento orbitaalihitsausta varten
P_0	Koneen tyhjäkäyntiteho (kW)
s_0	Ainepaksuus, jolla I-railo on taloudellisempi
T	Hitsiaineentuotto (kg/h)
V	Suojakaasun virtaus (l/min)

CEV	Hiiliekvivalentti
DN	Nominal Pipe Size
E	Energian ominaiskulutus (kWh/hitsiaine kg)
FFIP	Full Function in Place
FFO	Full Function Orbital
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HAZ	Heat Affected Zone
MAG	Metal-arc Active Gas Welding
MIG	Metal-arc Inert Gas Welding
pWPS	Preliminary Welding Procedure Specification
TIG	Tungsten Inert Gas WeldingWR+ WiseRoot+

1 JOHDANTO

Länsimaissa työn kustannukset ovat kasvaneet ja kustannusten kasvun myötä työn tuottavuuden kasvattamisen merkitys on kasvanut. Tuottavuutta voidaan kasvattaa useilla erilaisilla menetelmillä kuten prosessia tehostamalla, pienentämällä työaikaa ja vähentämällä työn virheitä. Tässä diplomityössä on käytetty näitä kaikkia kolmea putkihitsausliitoksen tuottavuuden kasvattamiseen. Prosessia on tehostettu käyttämällä modifioitua valokaarihitsausprosessia, työaikaa pienennetty käyttämällä mekanisointia ja kaventamalla railokulmaa sekä työn virheiden määrää on pienennetty mekanisointilaitteistolla. Putkihitsauksen tuottavuuden kasvattaminen kiinnostaa erityisesti pitkien maakaasu- ja öljyputkilinjojen rakennuksesta vastaavia yrityksiä. Putkia rakennetaan pitkiä matkoja mannerten välillä maalla ja merellä ja niissä on lukematon määrä hitsejä. Jos jokaista hitsiä pystytään tehostamaan, kokonaisvaikutus kasvaa huomattavaksi.

1.1 Työn tausta

Diplomityö on tehty vuonna 2015 huhtikuun ja lokakuun välisenä aikana Kemppi Oy:n hitsausteknologia ja palvelut –yksikölle. Työssä tutkittua modifioitua valokaarihitsausprosessia verrattiin olemassa oleviin perinteisiin MAG-hitsausprosesseihin (Metal-arc Active Gas Welding) orbitaalihitsauksessa ja luotiin pohjaa prosessin tulevalle markkinointiargumentaatiolle. Hitsauskokeilla testattiin prosessin tuomia etuja ja niiden vaikutusta hitsauksen kustannuksiin sekä hitsauskokeiden perusteella prosessille luotiin pWPS, jonka avulla tuotetta voidaan alkaa testata hitsaavassa tuotannossa.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Työn tavoitteena on tutkia modifioidun valokaarihitsausprosessin vaikutusta hitsattavaan railokulmaan 30 mm paksuilla putkilla mekanisoidussa orbitaalihitsauksessa ja selvittää railokulman pienentämisestä saavutettavan kustannussäästön suuruus hitsaavassa teollisuudessa. Kustannussäästöissä huomioidaan suorien rahallisten kustannusten lisäksi myös työstä kertyviä sekä piileviä kustannuksia. Lisäksi työssä tutkitaan mahdollisuutta hitsata pohjapalko käyttäen samaa mekanisointilaitteistoa. Lopuksi tehdyistä kokeista tehdään hitsaavaan tuotantoon soveltuva pWPS.

Työssä hitsaus on rajattu koskemaan ainoastaan orbitaalilaitteistolla mekanisoitua hitsausta, koska orbitaalilla hitsattaessa hitsataan kaikissa hitsausasennoissa ja saadaan tietoa prosessin soveltuvuudesta asentohitsaukseen. Työ on rajattu koskemaan ainoastaan suurien aineenvahvuuksien levyjä, koska railotilavuuden merkitys on suurempi suuren aineenpaksuuden levyillä verrattuna ohutlevyjen hitsaukseen. Teoriaosuus käsittelee orbitaalihitsauksen, modifioitujen valokaarihitsausprosessien, kavennetun railon ja hitsauksesta syntyvien kustannusten teoriaa.

1.3 Kemppi Oy

Kemppi Oy on Lahtelainen kaarihitsauksen laitevalmistaja ja kokonaisvaltaisten hitsausratkaisujen tuottaja. Kempin tuotantolaitokset sijaitsevat Asikkalassa, Chennaissa Intiassa sekä Lahdessa, jossa sijaitsee myös Kempin pääkonttori, tuotekehitys ja jossa tämä diplomityö on tehty. Kemppi on perheyritys, jonka omistaa Kempin suku ja se on perustettu vuonna 1949 nimellä Veljekset Kemppi Oy. Yritys valmisti alun perin erilaisia kärryjä, kiukaita, muita tarve-esineitä sekä hitsausmuuntajia. (Kemppi, 2013b) Myöhemmin yritys siirtyi pelkästään hitsauslaitteistojen valmistamiseen ja nykyisin Kemppi on keskittynyt ainoastaan kaarihitsausratkaisuihin. Kempin perusarvot koostuvat yrittäjyydestä, innovatiivisuudesta, rehellisyydestä ja yksilön kunnioittamisesta. Näistä arvoista on seurannut Kempin menestys markkinoilla ja vahva hitsausalan teknologiaosaaminen. Vuonna 2013 Kempin liikevaihto oli 111 miljoonaa euroa, josta noin 90 % tuli viennistä. Työntekijöitä Kempillä on noin 630. (Kemppi, 2013a.)

Kemppi on viime vuosina panostanut merkittävästi hitsauksen kokonaisratkaisujen kehittämiseen ja palveluliiketoiminnan kehittämiseen. Panostusta on tehty yritysostoilla ja uusien tuotteiden kehittämisellä. Kemppi on kehittänyt esimerkiksi Kemppi Arc System-järjestelmän hitsauksen kokonaisvaltaiseen hallintaan. (Kemppi, 2013c) Kempin ratkaisuliiketoiminta koostuu Kemppi Arc Systemistä, Wise-prosesseista, Match-toiminnoista, HumanWeldistä, ArcInfosta ja hitsausohjepaketeista, joilla asiakkaalle myydään kokonaisvaltainen hitsausratkaisu hitsauslaitteiden ja hitsauksen hallintatyökalujen kanssa. Kuvassa 1 on esitetty diplomityössä käytetty Kempin lippulaivatuote FastMig X. (Kemppi, 2013d.)

Kuva 1. Kemppi FastMig X-tuoteperhe (Kemppi, 2015).

2 ORBITAALIHITSAUS

Orbitaalihitsaus on erityisesti putkien hitsaukseen kehitetty menetelmä, joka on otettu käyttöön 1960-luvulla hydrauliikkaputkien hitsauksessa. Hitsauksessa elektrodia pyöritetään putken ympärillä ja virtaa ohjataan säätöyksiköllä samanaikaisesti. Orbitaalihitsauksella saavutettu lopputulos oli laadukkaampi ja tasaisempi kuin käsin suoritetulla hitsauksella. Orbitaalihitsaus yleistyi 1980-luvulla laitteiden kehityksen myötä ja nykypäivän orbitaalilaitteet ovat erittäin kehittyneitä. Orbitaalihitsauksen käyttö voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääryhmään: lisäaineettomaan ohuiden putkien TIG-hitsaukseen (Tungsten Inert Gas Welding), TIG-monipalkohitsaukseen prosessi- ja paineputkille sekä suurta sulatustehoa vaativien putkien MAG-täytelankahitsaukseen. (Mannion & Heinzman, 1999, s. 1-3; Bishop, 2008, s. 38.)

2.1 Periaate

Orbitaalihitsaus on menetelmä, jota käytetään erityisesti putkien hitsauksessa. Menetelmä sopii suurille ja suurien aineenpaksuuksien putkille, joita ei voida pyörittää tai liikuttaa hitsauksen aikana, vaan jotka pitää hitsata paikallaan. (Emmerson, 1999) Lisäksi orbitaalihitsaus sopii myös ohuemmille putkille ja sitä käytetään erityisesti silloin, kun hitsiin kohdistuu tarkat laatuvaatimukset. Orbitaalihitsauksessa poltinta liikutetaan paikallaan olevan putken ympärillä käyttäen putkeen kiinnitettävää kehää ja kuljetinta tai putken ympärille lukittavaa kuljetinta. Kuljetin voi olla malliltaan avoin tai suljettu. (Emmerson, 2000b) Orbitaalihitsaus on perinteisesti mielletty TIG-hitsauksen mekanisointiratkaisuksi, mutta se soveltuu myös muille kaarihitsausprosesseille kuten plasma- tai MIG/MAG-hitsaukseen, (Metal-arc Inert Gas Welding) jota on käytetty putkien hitsauksessa vuodesta 1969. Täytelanka-MAG-hitsausta orbitaalilaitteistolla käytetään erityisesti paksujen putkien hitsauksessa puikkohitsauksen sijasta. Täytelangan etu umpilankaan nähden on asentohitsauksen helppous. Orbitaalilaitteistolla kaariaikasuhdetta saadaan kasvatettua merkittävästi käsinhitsaukseen verrattuna. (Emmerson, 2000a.)

Orbitaalihitsauksella saavutetaan monissa tilanteissa suurempi tuottavuus kuin perinteisellä käsinhitsauksella. Tuottavuuden kasvaminen perustuu pääasiassa kaariajan kasvamiseen,

hitsausvirheiden vähenemiseen sekä mekanisointilaitteiston kykyyn tehdä työtä samalla tehokkuudella ilman taukoja. Hitsauksen mekanisointi ei kuitenkaan automaattisesti tarkoita tuottavuuden kasvamista ja tämä tulee huomioida myös orbitaalilaitteiston kohdalla. Hitsin geometria ja asetusajat vaikuttavat tuottavuuden kasvuun ja orbitaalilaitteiston käyttöönoton harkinnassa tulee huomioida orbitaalihitsauksen kokonaisvaikutus tuottavuuteen. (Emmerson, 1999.)

2.2 Laitteisto

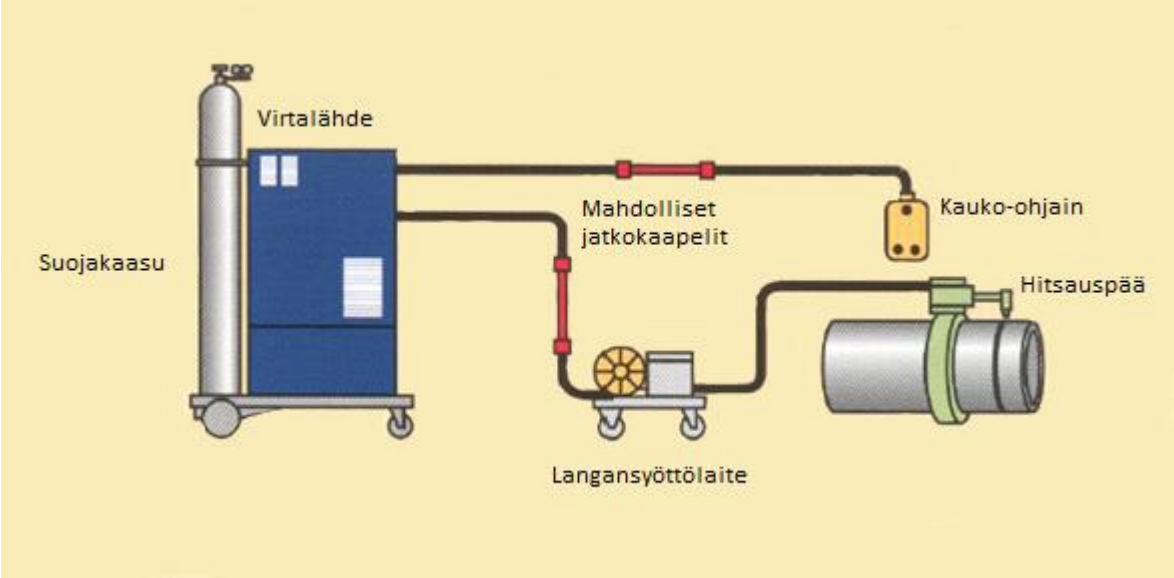
Orbitaalilaitteisto koostuu hitsausvirtalähteestä sekä virtalähteen oheislaitteista ja orbitaalikuljettimesta. Virtalähde voi olla joko TIG- tai MIG/MAG-virtalähde, kunhan poltin sopii valittuun kuljettimeen. Virtalähteen tehtävä on hallita valokaarta ja sen ominaisuuksia. Virtalähde säätää hitsausparametreja ja modernit virtalähteet kykenevät muuttamaan hitsausparametreja ennakkoon asetettuihin arvoihin hitsauksen aikana. Hitsausparametrien muuttaminen hitsauksen aikana on tärkeä ominaisuus orbitaalihitsauksen virtalähteelle, koska orbitaalilla hitsattaessa käydään läpi kaikki hitsausasennot. Eri hitsausasennoissa tarvitaan erilaisia hitsausarvoja sulan käyttäytymisen takia. Orbitaalikuljettimet ovat joko avoimia tai suljettuja. Suljetut mallit ovat suosittuja pienemmillä ainepaksuuksilla ja niiden etu on tiivis inertti kaasusuoja hitsin ympärillä. Suljetuilla orbitaalipäillä hitsattavat putkikoot ovat pienempiä kuin avoimilla päillä. Yleisesti ottaen suljetut hitsauspäät soveltuvat alle 150 mm halkaisijaltaan oleville putkille (Magnatech, 2015a). Avoimet hitsauspäät soveltuvat suuremmille putkille ja niissä kaasusuojauksen saavuttaminen on haastavampaa, mutta käsiteltävyys on helpompaa. (Mannion & Heinzmann, 1999.)

2.2.1 Hitsauslaitteisto

Orbitaalihitsaus ei rajoita hitsausprosessin valintaa merkittävästi. Suurin rajoitus koskee jauhekaarihitsausta, joka ei ole soveltuva orbitaalihitsauksessa vaadittuun asentohitsaukseen. Käytännössä kaikki muut kaarihitsausprosessit soveltuvat orbitaalihitsaukseen, mutta yleisimpiä ovat MIG/MAG-hitsaus ja TIG-hitsaus. Erityisesti nykyaikaiset MIG/MAG-prosessit ovat yleistyneet orbitaalihitsauksessa. Erityisesti suurille ja suurella seinämävahvuudella oleville putkille MIG/MAG-hitsaus soveltuu orbitaalihitsaukseen hyvin, koska se kykenee suurempaan sulatustehoon kuin perinteisesti orbitaalihitsauksessa käytetty TIG-hitsaus. (Hicken, 1993, s. 190.) Putken

seinämävahvuuden kasvaessa hitsausprosessin sulatustehon merkitys kasvaa, jotta hitsirailo saadaan täytettyä mahdollisimman tehokkaasti (Emmerson, 2000a).

MIG/MAG-hitsauslaitteet orbitaalisovelluksissa koostuvat perinteisestä MIG/MAG-kokoonpanosta. Kokoonpanon pääosat ovat virtalähde, langansyöttölaite ja hitsauspoltin. Orbitaalihitsaus ei välttämättä vaadi erityisesti orbitaalikäyttöön tehtyä MIG/MAG-laitteistoa, vaan siihen soveltuu myös perinteinen käsinhitsauskokoonpano, mutta tarkoitukseen kehitetyt virtalähteet tarjoavat hyödyllisiä lisäominaisuuksia. Mekanisointiin tarkoitettujen virtalähteiden suurin etu on orbitaalilaitteiston mahdollisuus ohjata virtalähteen toimintaa. Tällöin koko hitsi voidaan ohjelmoida laitteistoon ja laitteisto säätää hitsausparametreja automaattisesti. Perinteisellä virtalähteellä hitsaajan täytyy tehdä parametrien säätö hitsauksen aikana käsin tai virtalähteen muistikanavia käyttäen tai vaihtoehtoisesti pysäyttää hitsaus parametrien säädön ajaksi. (Emmerson, 1999.) Orbitaalihitsauksessa käytettäväksi soveltuu tavallinen käsihitsauspoltin ja langansyöttölaite. Kuvassa 2 on esitetty periaatekuva MIG/MAG-orbitaalilaitteistosta. (Emmerson, 1997.)



Kuva 2. Periaatekuva MIG/MAG-orbitaalihitsauslaitteistosta, jossa poltin pyörii putken ympärillä (mukaillen Emmerson, 2000a).

Erityisesti pulssihitsaus ja modifioidut kaariprosessit ovat parantaneet MIG/MAG-hitsauksen käytettävyyttä orbitaalihitsauksessa. Perinteisten kuuma- ja lyhytkaaren

ominaisuudet tekivät hitsauksesta haastavaa, koska niiden ominaisuudet eivät soveltuneet kaikkiin hitsausasentoihin riittävän hyvin. Ensimmäinen merkittävä kehitysaskel oli pulssihitsaus, jolla aineensiirtymä on hyvin hallussa. Pulssihitsaus on anteeksiantavampi ja helppokäyttöisempi käsinhitsauksessa. Lisäksi pulssihitsauksessa kaarijännite on pienempi, joka lyhentää valokaarta. Lyhyemmällä valokaarella sula jähmettyy nopeammin ja roiskeiden määrä vähenee, joka tekee asentohitsauksesta helpompaa. Modernit hitsausvirtalähteet ovat tuoneet markkinoille modifioidut lyhytkaariprosessit, joissa virtaa ja jännitettä hallitaan tarkasti hitsauksen aikana. Virtalähde tunnistaa oikosulut ja säätää hitsausparametreja sen mukaisesti. Tarkalla prosessin hallinnalla on päästy eroon lyhytkaarihitsauksen suurimmista ongelmista kuten roiskeista. (Emmerson, 1997.)

2.2.2 Orbitaalikuljettimet

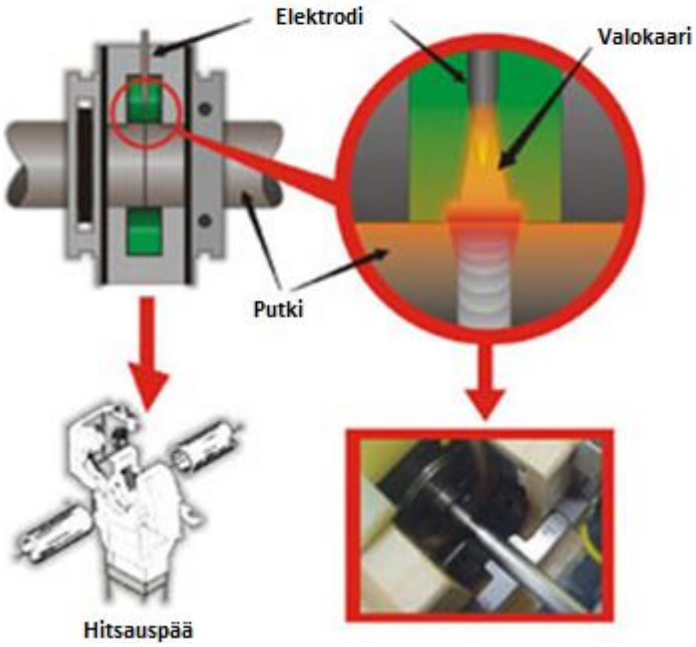
Orbitaalilaitteistot voidaan jakaa ryhmiin eri menetelmin. Yleisiä tapoja on jako FFIP, eli Full Function in Place, ja FFO, eli Full Function Orbital, tai avoimiin ja suljettuihin orbitaalilaitteistoihin (Emmerson, 1999). Nämä kaksi jakotapaa eivät sulje toisiaan pois, vaan jakavat orbitaalilaitteistot eri ominaisuuksien pohjalta kahteen pääryhmään. (Lukkari, 2005, s. 3-4.)

FFIP-orbitaalit kiinnittyvät tietyn kokoiseen putkeen nopeasti ja helposti. FFIP-orbitaali on suunniteltu tietylle putken halkaisijalle ja sen asentaminen on nopeaa avoimen rakenteen ja automaattisen keskityksen ansiosta. Orbitaalin runko pysyy paikallaan ja ainoastaan hitsauspoltin liikkuu putken kehällä erillisessä moduulissa. FFIP-orbitaalit sopivat ainoastaan tietylle putken halkaisijalle, mutta vaativat hyvin vähää suoraa putkea kiinnittyäkseen. Laitteistoa voidaan käyttää lähempänä putken mutkia, joka lisää käyttömahdollisuuksia. Orbitaalilaitteiston kiinnittäminen ei vaadi erillisiä työkaluja, vaan se voidaan asentaa käsin putken ympärille. FFIP-orbitaalin ominaisuudet eivät ole yhtä kattavat kuin FFO-orbitaaleissa. FFIP-orbitaalin ominaisuudet rajoittuvat pyöritysliikkeeseen, vaaputukseen sekä kaarijännitteen säätämiseen. (Emmerson, 1999; Westermans, 2010.)

FFO-orbitaalit ovat ominaisuuksiltaan FFIP-orbitaaleja monipuolisempia ja ne sisältävät usein pyöritysliikkeen, vaaputuksen ja kaarijännitteen säädön lisäksi langansyötön ja muita lisäominaisuuksia. FFIP-orbitaaleista poiketen FFO-orbitaalissa koko hitsauspää pyörii

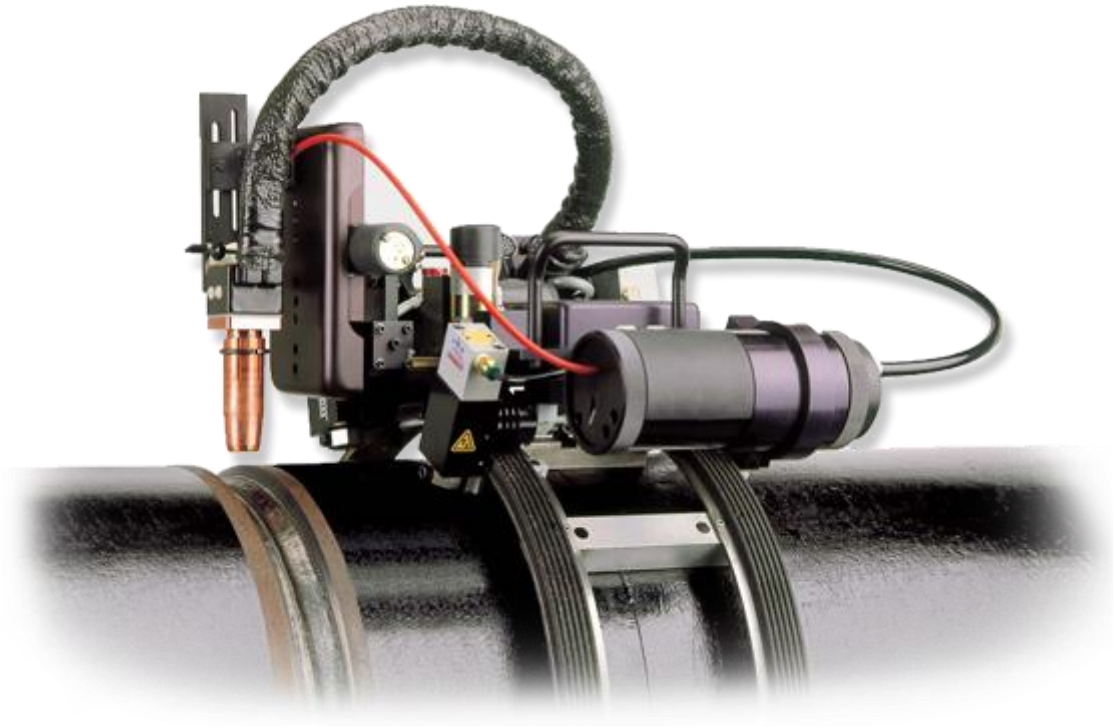
putken ympäri. FFO-orbitaaleissa hitsauspää kiinnitetään putken ympärille kiinteästi pannan tai suljetun kiinnitysrenkaan avulla. Kiinnityspantoja ja suljettuja järjestelmiä on erikokoisia putken halkaisijan mukaan. Orbitaalihitsausjärjestelmän panta kiinnitetään putkeen ensimmäisenä, jonka jälkeen hitsauspää kiinnitetään pantaan. FFO-orbitaalin asentaminen putken ympärille vie kauemmin aikaa kuin FFIP-orbitaalin ja vaatii pidemmän suoran putken osuuden, mutta FFO-orbitaali on monikäyttöisempi. Samaa hitsauspäätä voidaan käyttää eripaksuisille putkille vaihtamalla ainoastaan panta. Lisäksi FFO-orbitaalijärjestelmän ohjaus on monipuolisempi kuin FFIP-orbitaalin ohjaus. (Emmerson, 1999; Arc Machines Inc., 2015a.)

Suljetut orbitaalihitsauspäät lukitsevat putket paikalleen ja luovat railon ympärille suljetun tilan kaasua varten. Suljettu rakenne takaa paremman kaasusuojauksen hitsille ja tästä syystä suljettuja orbitaalipäitä käytetään erityistä puhtautta vaativissa hitsauskohteissa, kuten ruostumattoman teräksen, titaanin ja alumiinin putkiliitoksissa. Suljettu tila täytetään inertillä suojakaasulla ja suojakaasu yhdessä juurisuojakaasun kanssa takaa laadukkaan lopputuloksen molemmilta puolilta. TIG-hitsaus rajoittaa hitsattavan putken seinämäpaksuutta merkittävästi, mutta suljetut orbitaalihitsauspäät on tarkoitettu ensisijaisesti ohuille putkille, joiden hitseihin kohdistuu tarkat laatuvaatimukset. Suljetulla hitsauspäällä hitsattavien putkien seinämävahvuus vaihtelee yleisesti 0,4 mm ja 4 mm välillä. Myös paksummat seinämät ovat mahdollisia, mutta niiden hitsaus on harvinaista hitauden vuoksi. Suljettu orbitaalihitsauspää ei sovellu myöskään yhtä suurille putkien halkaisijoille kuin avoin hitsauspää käsiteltävyyden takia. Suljetun hitsauspään ulkohalkaisijat vaihtelevat 1,6 mm ja 170 mm välillä, koska rajoittava tekijä on hitsauspään käsiteltävyys paksummilla putkilla. Kuvassa 3 on esitetty suljetun orbitaalihitsauspään periaatekuva. (Lukkari, 2005, s. 3-4.)



Kuva 3. Suljetun orbitaalihitsauspään periaatekuva (mukaillen Arc Machines Inc., 2015b).

Avoimella hitsauspäällä varustettuja orbitaalilaitteistoja käytetään usein MAG-hitsauslaitteiston yhteydessä, jolloin hitsausprosessilta vaaditaan suurta sulatustehoa. Avoimessa versiossa poltin kiinnitetään hitsauskuljettimeen, joka kulkee putken ympärillä olevaa kiskoa tai pantaa pitkin. Pantoja on mahdollista tehdä myös pienemmille putkille, mutta pienillä putkilla suljetun järjestelmän kaasusuoja on parempi, joka puoltaa suljetun järjestelmän käyttöä, jos mahdollista. Avointa hitsauspäätä voidaan käyttää TIG-hitsauksen lisäksi myös MIG/MAG-hitsauksessa ja muissa kaarihitsausprosesseissa, koska avoin kuljetin mahdollistaa erilaisten hitsaupolttimien kiinnittämisen siihen. Kuvassa 4 on esitetty avoin MIG/MAG-orbitaalihitsauslaitteisto. (Lukkari, 2005, s. 3-4.)



Kuva 4. Avoin orbitaali-MIG/MAG-hitsauslaitteisto (Magnatech, 2015b).

2.3 Laatu

Orbitaalihitsaus kykenee tasalaatuiseen ja laadultaan erinomaiseen hitsaukseen. Mekanisointilaitteiston liike on tasaista ja oikein ohjelmoituna orbitaalilaitteisto kykenee hitsaamaan tarkasti pienellä lämmöntuonnilla. Kuljetusliikkeen tasaisuus ja valokaaren pituuden säilyminen ovat ensisijaiset edut orbitaalihitsauksessa käsinhitsaukseen verrattuna. Näistä on hyötyä erityisesti puolijohteiden sekä elintarvike- ja lääketieteen putkien hitsauksessa. Näissä sovelluskohteissa orbitaalihitsaus on monesti kustannustehokkain keino tuottaa riittävän laadukasta hitsiä. Korkealaatuisten hitsien lisäksi orbitaalihitsauslaitteiston laaduntuotto on tasaista ja oikeiden tehdyllä ohjelmalla hitsausvirheitä syntyy harvoin. Tasainen kuljetusliike, tasainen vaaputus ja tasaisena pysyvä kaarenpituus vähentävät hitsausvirheitä. Laatu pysyy tasaisena kaikissa hitseissä ja ainoa laatuun vaikuttava muutos on orbitaalilaitteiston kuluminen. Kuluma aiheuttaa muutoksia polttimen liikkeeseen ja muutokset voivat aiheuttaa virheitä. (Mannion & Heinzmann, 1999.)

Käsinhitsauksessa hitsaajan taidot vaikuttavat saavutettavaan laatuun enemmän kuin orbitaalihitsauksessa. Kuljetusliike ja sen muutokset ovat riippuvaisia hitsaajan taidosta, mutta orbitaali poistaa hitsaajan käden aiheuttamat muutokset hitsistä.

Orbitaalihitsauksessa hitsaajan ammattitaidolla ei ole yhtä suurta merkitystä laatuun kuin käsinhitsauksessa, koska orbitaalihitsauksessa operaattorin tehtävänä on seurata hitsaustapahtumaa ja sulan käyttäytymistä, mutta hyvin tehdyllä ohjelmalla operaattorin ei tarvitse tehdä suuria muutoksia parametreihin. Merkittävä etu putkien orbitaalihitsauksessa on ergonomian paraneminen ja huonon ergonomian vaikutuksen poistaminen hitsistä. Paikallaan olevien putkien hitsaaminen vaatii usein hitsaajan asennon vaihtamista, joka aiheuttaa useita aloituksia ja lopetuksia hitsiin. Aloitukset ja lopetukset ovat aina todennäköisiä paikkoja hitsausvirheille, jotka tulee tutkia hitsausvirheiden, kuten kuonasulkeumien ja huokosten, varalta. (AWS, 1999, s. 85-90.) Orbitaalilaitteisto kykenee hitsaamaan koko putken mitan yhdellä palolla tai haluttaessa putki voidaan hitsata kahdessa osassa, mutta aloituksien ja lopetuksien määrä jää käsinhitsausta pienemmäksi. (Mannion & Heinzmann, 1999.)

2.4 Hyödyt ja haasteet

Orbitaalihitsauksen hyödyt käsinhitsaukseen verrattuna perustuvat tuottavuuden kasvuun, laadun paranemiseen, tasalaatuun, joustavuuteen ja kevyempiin osaamisvaatimuksiin hitsaajaa kohtaan. Orbitaalin käyttöönotto ei kuitenkaan tarkoita automaattista tuottavuuden ja hitsauksen laadun kasvua, vaan käyttöönotossa tulee huomioida prosessiin kohdistuvat haasteet. Orbitaalihitsauksessa esiintyviä haasteita ovat esimerkiksi laitteiston asetusajat, railoon kohdistuvat vaatimukset ja laitteiston käyttöön vaadittu tila. (Emmerson, 1999; Mannion & Heinzmann, 1999.)

Tuottavuuden kasvu tarkoittaa merkittävää säästöä putkistojen hitsauksessa, koska putkilinjan rakentamisessa 49 % kustannuksista syntyy valmistuksen työkustannuksista (Yapp & Blackman, 2004, s. 89). Orbitaalihitsaus on useimmissa tapauksissa käsinhitsausta tuottavampi, koska hitsaus on mahdollista suorittaa yhdellä palolla, hyötysuhde kasvaa, jälkityöstön määrä vähenee ja mekanisointilaitteisto mahdollistaa suuremmat kuljetusnopeudet hitsausprosessien salliessa. Orbitaalihitsaukseen soveltuvalla sovelluksella orbitaalilaitteisto kykenee 70 prosentin hyötysuhteeseen, kun perinteinen käsinhitsaus kykenee ainoastaan 20-25 prosenttiin. Tuottavuuden kasvu ei kuitenkaan ole taattua, koska hitsattavan putken geometria, asetusajat ja hitsausparametrien säätäminen voivat pienentää tuottavuuden kasvua, joka mekanisointilaitteistolla olisi mahdollista. (Emmerson, 1999; Lukkari, 2005, s. 3; Mannion & Heinzman, 1999.)

2.4.1 Orbitaalihitsaus ja operaattorin pätevöinnit

Orbitaalihitsauksessa operaattoreiden tulee täyttää standardin EN 14732 vaatimukset, kun käsinhitsatessa hitsaajan tulee täyttää standardin EN 9606 vaatimukset. Vaatimukset eroavat toisistaan, koska orbitaalilaitteistossa laitteistoa käyttää operaattori, eikä hitsaaja. Operaattoriin kohdistuu erilaiset vaatimukset kuin käsinhitsaajaan, eikä heiltä vaadita samoja hitsiluokkia kuin käsinhitsaajalta. Operaattorin ja käsinhitsaajan eroista huolimatta orbitaalihitsauksessa noudatetaan standardin SFS-EN ISO 5817 mukaisia hitsiluokkia ja rajoja hitsausvirheille. Käytettävät hitsiluokat ovat B, C ja D, joista B on laadullisesti paras ja D huonoin. Käytännössä hitsausluokka D toteutuu perusteiltaan tyydyttävästi suoritetussa hitsauksessa ja luokat C ja B vaativat enemmän hitsauksellisesti. Hitsauksen yhteydessä tulee huomioida mahdollisesti vaadittu hitsiluokka. Jos liitokselta vaaditaan tiettyä hitsiluokkaa, tulee sen toteutuminen myös tarkastaa. Hitsiluokan määrää tuotteen suunnittelija tai standardi ja hitsiluokan toteutuminen tulee varmistaa rikkovilla ja/tai NDT-menetelmillä. NDT-menetelmien, hitsausvirheiden ja hitsiluokkien yhteys on esitetty standardissa ISO 17635. (SFS-EN ISO 5817, 2014, s. 8)

Operaattoreiden löytäminen on nykypäivänä helpompaa kuin taitavien käsinhitsaajien. Orbitaalilaitteistoon liittyvä investointi ei kuitenkaan automaattisesti vaadi uusia rekrytointeja, vaan olemassa olevat hitsaajat voidaan kouluttaa operaattoreiksi kohtuullisen helposti. Hitsaajalla on olemassa riittävä pohjatieto hitsausprosessista ja hitsaamisesta, joten koulutuksessa hitsaaja oppii käyttämään orbitaalilaitteistoa ja oppii tuntemaan orbitaalihitsauksen vaatimukset esimerkiksi railonvalmistelua kohtaan. (Emmerson, 1999; Lukkari, 2005, s. 6.)

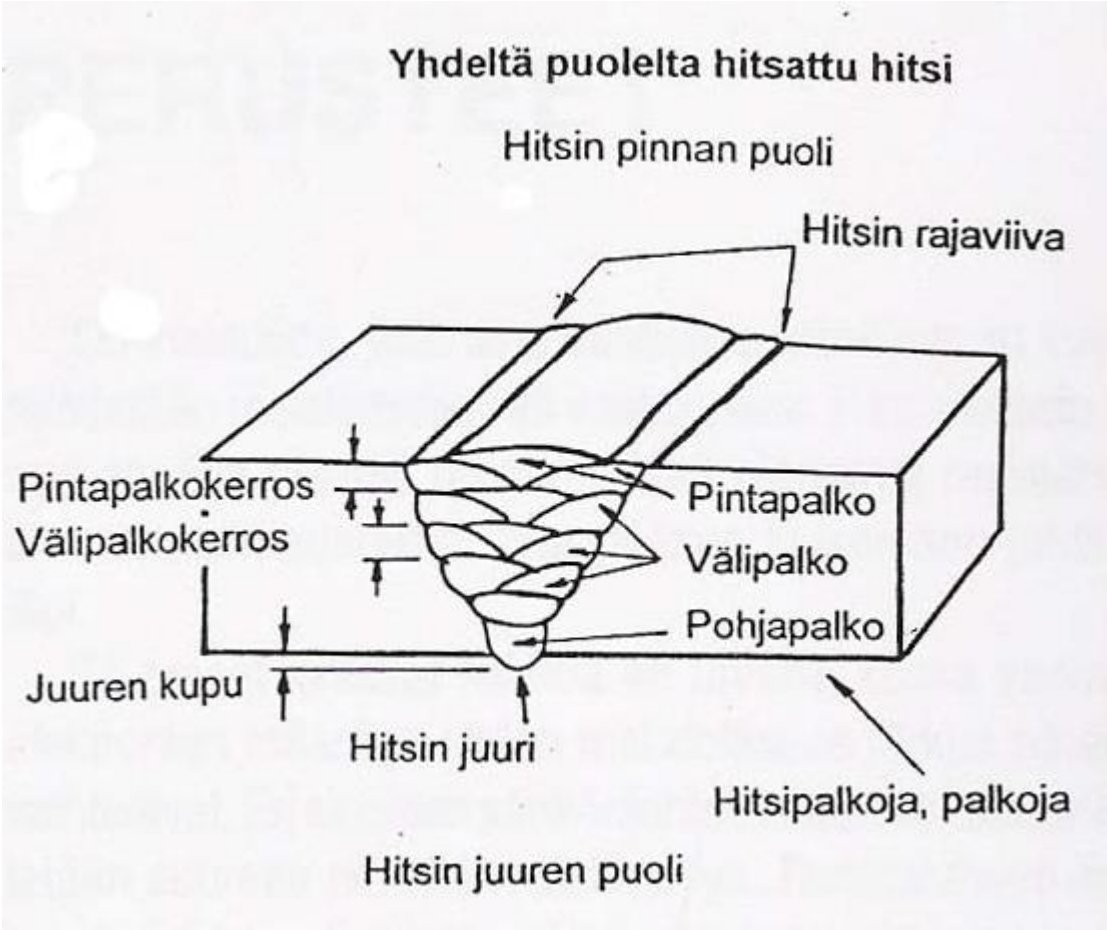
2.4.2 Orbitaalihitsausasennot

Orbitaalihitsausta käytetään pääsääntöisesti paikallaan hitsattaville putkille, joita ei voida pyörittää hitsauksen aikana. Koska putkea ei voida hitsata paikallaan, ei putkea voida hitsata jatkuvasti jalkoasennossa, joka olisi suotuisin hitsauksen lopputuloksen kannalta. Standardissa SFS-EN ISO 6947 on määritelty kiinteälle putkelle hitsausasennot, jotka ovat PH, PJ ja PK. Asennolla PH tarkoitetaan putken hitsausta ylämäkeen, asennolla PJ hitsausta alamäkeen ja asennolla PK koko putken ympäryksen hitsausta yhdellä palolla, jolloin hitsauksessa käydään läpi asennot PH ja PJ. Monissa tapauksissa hitsausprosessi määrää käytettävän hitsausasennon. Täytelangat hitsataan monesti ylämäkeen, jolloin

kuona tukee sulaa ja voidaan hitsata suurella teholla ilman sulan valumista. Umpilankaa hitsataan taas alamäkeen tuottavuuden kasvattamisen vuoksi. TIG-orbitaalihitsaus hitsataan pääsääntöisesti PK-asennossa, eli putken ympäri hitsataan täysi kierros. (SFS-EN ISO 6947, 2011, s. 8-19; Emmerson, 2000a.)

2.4.3 Orbitaali-MIG/MAG-hitsaus

Orbitaali-MIG/MAG-hitsaukseen soveltuvat yli 10 mm paksut putket ovat monipalkohitsausta. Putkien hitsauksessa pohjapalko hitsataan useissa tapauksissa käsin käyttäen TIG-, puikko- tai MIG/MAG-hitsausta. Hitsin osien jaottelu on esitetty kuvassa 5, johon on merkattu erikseen myös pohjapalko.



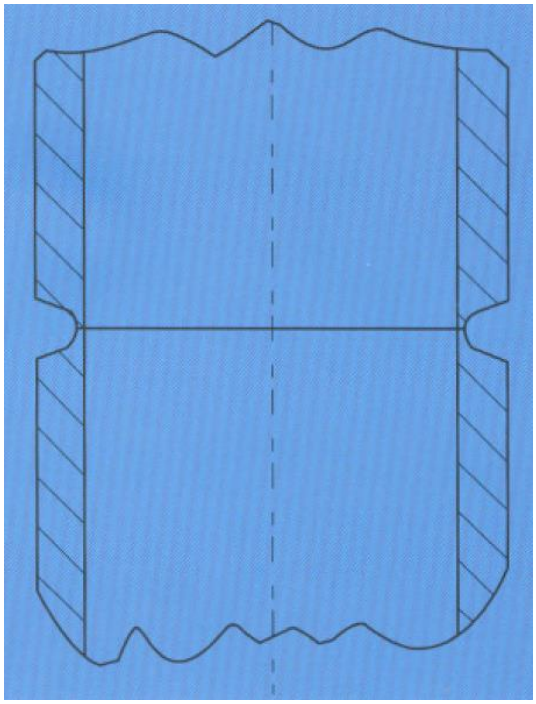
Kuva 5. Hitsin eri osat (Lukkari, 2002, s. 26).

Pohjapalossa on tärkeää saada luotettava liittymä ilman hitsausvirheitä ja erityisesti MIG/MAG-hitsauksessa käytetään usein modifioituja hitsausprosesseja, joilla tunkeuman hallinta on parempi. Pohjapalko on mahdollista hitsata myös mekanisoidusti, mutta se

vaatii mekanisointilaitteistolta mekaanista tarkkuutta ja riittäviä muita ominaisuuksia. Orbitaalilaitteisto otetaan käyttöön yleensä putken täyttöpalkojen hitsauksessa, jossa kaariaikasuhteen kasvattaminen tuottaa säästöjä. Täyttöpalkojen hitsauksessa käytetään orbitaalihitsauksessa pääsääntöisesti MIG/MAG-hitsausta ja erityisesti täytelankoja. Täytelangat soveltuvat asentohitsaukseen erinomaisesti ja suuren energiatiheyden vuoksi täytelankaa voidaan hitsata lähes poikkeuksetta puhtaalla kuumakaarella. Kuumakaari kasvattaa tuottavuutta ja pienentää liitosvirheen riskiä hitsissä. Täyttöpalkojen lukumäärä ja hitsausaika riippuu railogeometriasta ja hitsattavan putken paksuudesta. (SFS-EN ISO 6947, 2011, s. 8-19; Emmerson, 2000a.)

2.4.4 Orbitaalihitsauksen haasteet ja vaatimukset

Vaikka orbitaalihitsaus on tasalaatuinen ja tehokas keino putkien korkealaatuiseen hitsaamiseen, vaatii se myös riittävää tietotaitoa ja esivalmistelua onnistuakseen. Orbitaalilaitteistot ovat yksinkertaisia mekanisointilaitteita, jotka suorittavat vain tiettyä ennalta ohjelmoitua hitsausohjelmaa, eivätkä kykene sopeutumaan liitoksessa oleviin muutoksiin, jotka käsinhitsaaja pystyy korjaamaan hitsauksen aikana muuttamalla hitsaustapaa. Tästä syystä liitoksen huolellinen valmistelu on ensisijaisen tärkeää orbitaalihitsauksessa. Railon geometrian tulee pysyä samana kaikissa liitoksissa, railojen on oltava puhtaita ja laitteisto tulee asemoida aina tukevasti samaan asentoon. Käytännössä tämä tarkoittaa putkien orbitaalihitsauksessa sitä, että putkeen tehtävä railonvalmistelu tulee tehdä esimerkiksi sorvaamalla tai putkien viistämiseen kehitetyllä laitteella. Railojen pinnat tulee puhdistaa ennen hitsausta kaikista epäpuhtauksista ja rasvasta käyttämällä ruostumattomasta teräksestä valmistettua harjaa ja vahvaa liuotinta. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että 3 mm paksut putket kyetään hitsata yhdellä palolla, mutta paksummat putket hitsataan yleensä usealla palolla. Pienemmillä putkilla V-railo pienellä ilmaraolla on toimiva ratkaisu, mutta orbitaalihitsauksessa U-railo on paras ratkaisu hitsauksen kannalta. Kuvassa 6 on esitetty putkien orbitaalihitsaukseen hyvin soveltuva U-railosovite. (Emmerson, 1999; Lukkari, 2005, s. 4.)



Kuva 6. Orbitaalihitsaukseen hyvin soveltuva U-railo (Emmerson, 1999).

Orbitaalihitsaus on erittäin tehokas ja helppokäyttöinen menetelmä oikeassa sovelluskohteessa. Järjestelmän hankintaa suunniteltaessa tulee kuitenkin harkita tarkkaan laitteistosta saatavat hyödyt ja sen hinta. Investointia suunnittelevan tulee suhtautua varauksella lupauksiin, joissa luvataan suuria hitsausnopeuksia tai suurta tuottavuutta. Nämä asiat eivät ole riippuvaisia ainoastaan mekanisointilaitteistosta, vaan niihin vaikuttaa myös fysiikan lait, liitosten valmistelujen laatu ja olemassa olevat laitteet. Laitteiston hankinnan yhteydessä ei tule säästellä railovalmistelun laitteista, vaan olemassa olevien koneiden tulee kyetä tasalaatuiseen railovalmistukseen tai yrityksen tulee investoida myös valmisteluun liittyviin tuotteisiin. Orbitaalilaitteistojen valmistajat tarjoavat usein myös kannettavia laitteita railon valmisteluun hitsausta varten. Laitteilla kyetään viistämään erikokoisia putkia aina pienistä alle 20 mm putkista suuriin lähes 1000 mm halkaisijaltaan oleviin putkiin. Laitteiden kannettavuus on riippuvainen putken koosta. Alle 20 mm putkille soveltuva kone on yhdellä kädellä käsiteltävä käsityökalu, kun lähes 1000 mm halkaisijalle tehdyn koneen käsittely vaatii nostoapua esimerkiksi siltanosturilta. Lisäksi viisteytykseen on kehitetty yksinkertainen kulmahiomakoneesta kehitetty versio, jolla kyetään viistämään levyjä ja putkia, mutta sen tarkkuus ei ole orbitaalihitsaukseen erityisen hyvä. (Emmerson, 1999; PW-Tools.)

3 MODIFIOIDUT KAARIHITSAUSPROSESSIT

Kaarihitsausprosessien kehitystä ajaa tuottavuuden kasvattamisen tarve sekä hitsauksen helpottaminen ilman, että hitsauksen laatu kärsii. Työ käsittelee MIG/MAG-hitsausta, joka on yksi maailman käytetyimmistä hitsausprosesseista, joten kappale käsittelee ainoastaan MIG/MAG-hitsauksen modifioituja hitsausprosesseja. MIG/MAG-hitsauksen perinteiset kaarityypit ovat pulssikaari, lyhytkaari, sekakaari ja kuumakaari, mutta nykyaikaiset hitsausvirtalähteet kykenevät muuttamaan hitsauksen parametreja hitsauksen aikana, jolloin valokaaren ominaisuudet eroavat perinteisistä kaarityypeistä. Modifioituja prosesseja on kehitetty eri käyttötarkoituksiin, mutta niiden hitsausominaisuudet pohjautuvat usein johonkin perinteiseen kaarityyppiin, jota modifioidaan tarkoitukseen sopivaksi. (Norrish, 2013, s. 33-35.)

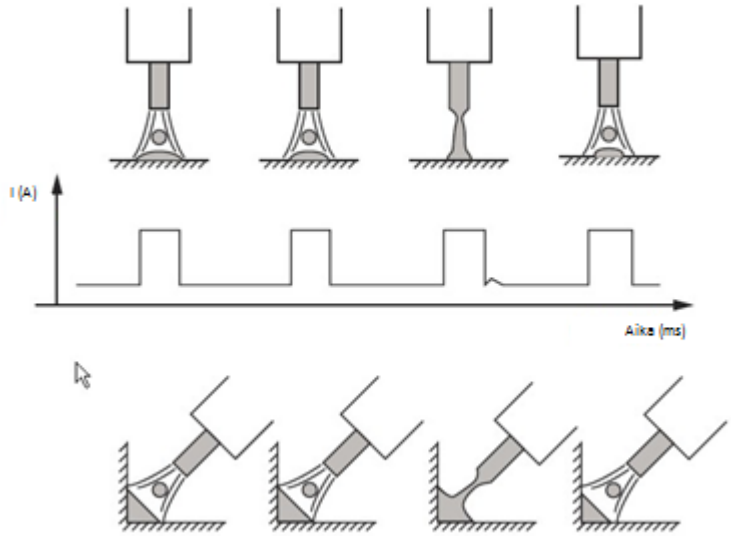
3.1 Pulssitetut modifioidut prosessit

Laitevalmistajat ovat kehittäneet perinteisen pulssihitsauksen pulssimuotoa hitsauksen helpottamiseksi. Tavoitteena on ollut hyvin hallittava hitsaustapahtuma, pieni lämmöntuonti ja mahdollisimman vähän roiskeita. Hitsausolosuhteet ja hitsausparametrit asettavat kuitenkin rajoitteita aineensiirtymän ja lämmöntuonnin hallintaan perinteisellä yksittäisistä pulsseista koostuvalla hitsausprosesseilla. Virtalähteiden ohjauksen kehityksen myötä pulssihitsauksen hitsausominaisuuksia on kehitetty helpottamaan hitsaajan työtä ja parantamaan lopputulosta. (Egerland, 2012, s. 34-35.)

3.1.1 Aineensiirtymän hallintaa pulssihitsauksessa

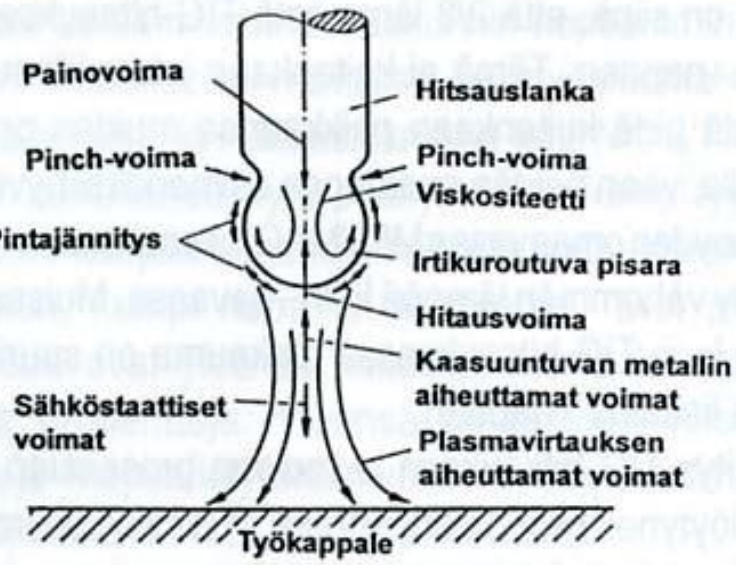
Pulssihitsauksen aineensiirtymän hallinnalla pyritään parantamaan hitsausominaisuuksia tai lisäämään hitsauksen tuottavuutta. Hitsausominaisuuksien parantamisella tarkoitetaan esimerkiksi asentohitsauksen helpottamista tai hitsausvirheiden vähentämistä. Asentohitsausta voidaan helpottaa lyhentämällä hitsausvalokaarta, jolloin sula pienenee ja sulanhallinta asennossa helpottuu. Lyhyellä hitsausvalokaarella saadaan hitsausenergia kohdistettua paremmin railoon, joka pienentää kokonaislämmöntuontia ja lisää tunkeumaa. Usein kaarta lyhentävät modifioidut prosessit vähentävät myös hitsausparametrien säätötarvetta. Erityisesti valokaaren pituuden hienosäädön, eli jännitteen hienosäädön, tarve vähenee lyhyemmän kaaren ansiosta. Kuvassa 7 on esitetty aineensiirtymän

hallintaan kehitetty modifioitu prosessi, jossa osa aineensiirtymästä tapahtuu oikosulussa. Tällä saadaan hitsisulaa pienennettyä ja helpotettua asentohitsausta sekä kasvatettua tehotiheyttä valokaaressa. (Kemppi, 2013a.)



Kuva 7. Modifioitu pulssihitsausprosessi aineensiirtymän hallintaan (mukaillen Kemppi a).

Kohdistetulla kaarella voidaan hitsata kapeampaa railoa. Lisäksi hallitulla kaarella, jonka pituus pysyy lyhyenä, saavutetaan etuja haastavien nikkelipohjaisten lisäaineiden kanssa, joilla on taipumusta tarttua virtasuuttimeen. Jos lisäainelanka tarttuu suuttimeen, langansyöttö häiriintyy ja valokaaren mitta alkaa kasvaa. Tämä aiheuttaa helposti hitsausvirheitä ja lisää lämmöntuontia. Aineensiirtymän hallinnalla voidaan myös pyrkiä suurempaan tuottavuuteen tehostamalla lisäaineen sulatustehoa. Perinteisessä pulssihitsauksessa lisäaine siirtyy pisaroina yksi pisara pulssia kohden. Modifioiduilla prosesseilla aineensiirtymää muokataan jatkuvammaksi suihkumaiseksi siirtymäksi, joka kasvattaa sulatustehoa. Kasvanut sulatusteho mahdollistaa hitsausnopeuden kasvattamista, joka kasvattaa hitsauksen tuottavuutta lyhentyneinä hitsausaikoina. Modifioiduilla prosesseilla voidaan pulssihitsauksen hitsausnopeutta kasvattaa jopa 48 % teräksillä (Lorch, s. 76). Kohdistettu kaari ja hallittu aineensiirtymä kasvattavat hitsausprosessin tehotiheyttä ja lisäävät kaaripainetta. Kaaripaine muodostuu valokaaressa olevista voimista, joita on esitetty kuvassa 8. Kaaripaineen merkittävimmät komponentit ovat sähköstaattiset- ja plasmavirtauksen aiheuttamat voimat.



Kuva 8. Kaaripaineeseen vaikuttavat voimat (Lukkari, 2002, s. 72).

Kaaripaineen kasvu kasvattaa hitsin tunkeumaa, joka hitsausnopeuden kasvattamisen lisäksi mahdollistaa suurien aineenpaksuuksien levyjen hitsaamisen yhdellä palolla kuin perinteinen kuuma- tai lyhytkaari. Modifioiduilla pulssihitsausprosesseilla on mahdollista hitsata jopa 15 mm paksujen teräslevyjen päittäisliitos yhdellä palolla. (Kemppi a; Lorch, s. 74-78.)

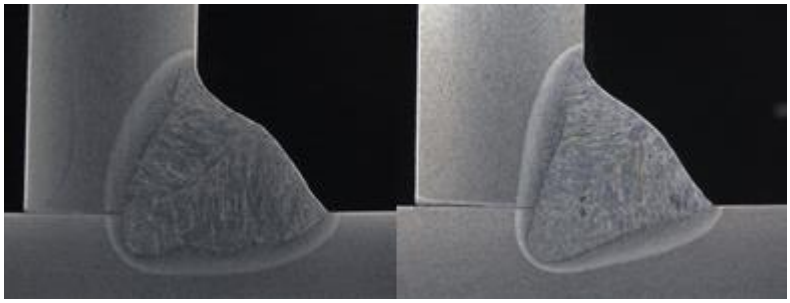
3.2 Synergiset modifioidut valokaarihitsausprosessit

Synergisille valokaarihitsaushitsausprosesseille on tarjolla enemmän erilaisia modifioituja valokaarihitsausprosesseja kuin pulssitetuille valokaarihitsausprosesseille. Modifioidut prosessit tavoittelevat pääsääntöisesti kahta eri lopputulosta: suurempaa tuottavuutta pitkiin hitseihin paksuille levyille tai parempaa tunkeuman hallintaa juuripalon ja ohuiden levyjen hitsaukseen. Modifioidut prosessit voidaan karkeasti jakaa kahteen pääryhmään. Ensimmäinen on kaarihitsausprosessien variantit ja toinen on kaarihitsausprosessiin lisätyt funktiot, jotka muuttavat prosessin toimintaa. (Kemppi b; Rosado et. al., 2008, s. 1-2.)

3.2.1 Tunkeuman kasvattaminen

Tunkeuman kasvattaminen perustuu usein hitsausvalokaaren kaaripaineen nostamiseen. Kasvanut kaaripaine painaa metallisulaa syvemmälle perusaineeseen, jolloin tunkeuma

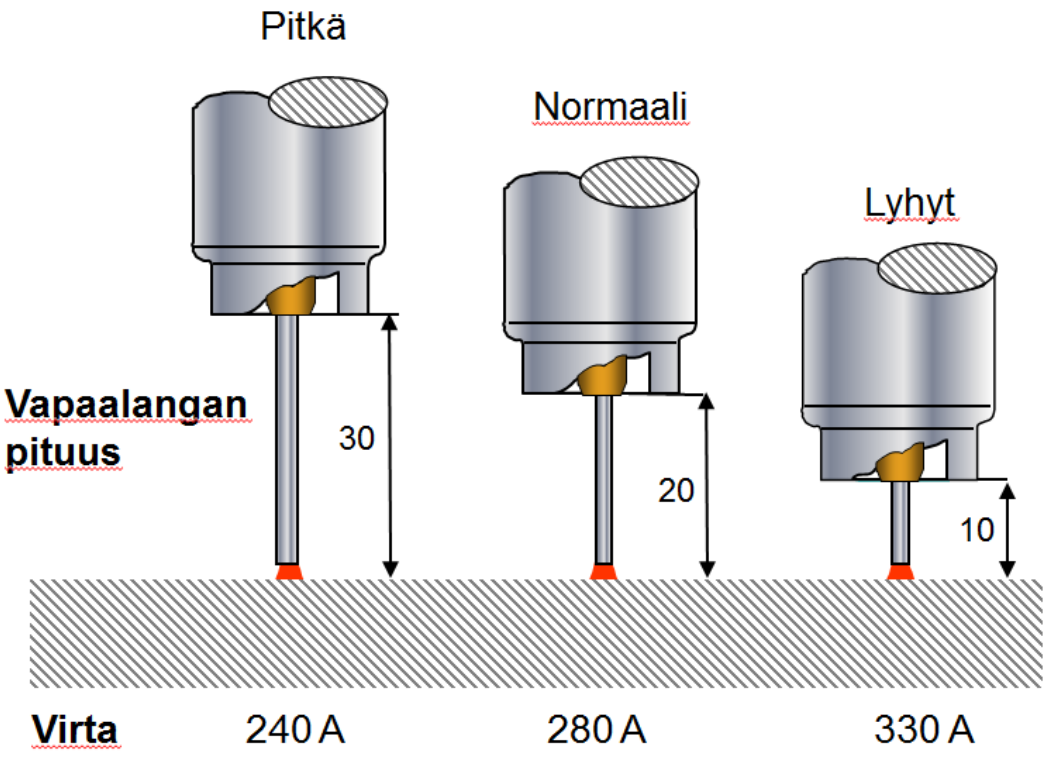
kasvaa. Syvempi tunkeuma mahdollistaa suuremmat hitsausnopeudet tai pienemmän lämmöntuonnin vastaavaan perinteiseen hitsausprosessiin verrattuna. Kaaripaineen nostaminen toteutetaan lyhyellä ja tarkasti kohdistetulla kaarella, jolloin valokaaren energiatiheys kohdistuu pienelle alueelle hitsissä. Lyhyt valokaari vähentää myös hitsausparametrien säätötarvetta. Lyhyellä valokaarella ja modifioidulla prosessilla hitsaustapahtuma ei ole yhtä herkkä suutinetäisyyden vaihtelulle hitsauksen aikana ja roiskeiden määrä vähenee. Kohdistamalla valokaari tarkasti kyetään MAG-hitsauksen railokulmaa kaventamaan merkittävästi ja pienentämään hitsiaineen määrää. Valokaaren lämpö ei kohdistu railon reunoihin laajalle alueelle, vaan lämpövaikutus kohdistuu kapealle hitsattavalle alueelle, jolloin lämmöntuonti kohdistuu ainoastaan halutulle alueelle ja lämmöntuonti pysyy pienenä. Kuvassa 9 on esitetty perinteisen MAG-kuumakaaren ja modifioidun kuumakaaren makrohiekuvat. MAG-kuumakaari on vasemmalla ja modifioitu kaariprosessi oikealla. Kuvista näkee modifioidun kaariprosessin kapeamman ja syvemmän tunkeumaprofiilin. (Kemppi b; Lorch, s. 79; EWM, 2013a.)



Kuva 9. MAG-kuumakaaren ja modifioidun kuumakaaren tunkeumaprofiilin ero. MAG-kuumakaari oikealla ja modifioitu kuumakaari vasemmalla. (Mukaillen Kemppi b.)

3.2.2 Tunkeuman vakioiminen

MIG/MAG-hitsaus on pääsääntöisesti vakiojännitteellistä hitsaamista, jossa hitsausvirtalähteeseen asetetaan haluttu jännite- ja langansyöttöarvo. Vakiojännitteellisyys perustellaan valokaaren itsesäätyvyydellä. Virtalähde säilyttää nämä arvot vakiona, mutta vapaalangan pituuden muutokset kasvattavat lisäainelangan aiheuttamaa vastusta, jolloin valokaaren hitsausvirta pienenee. Esimerkki tästä pienenemisestä on esitetty kuvassa 10.



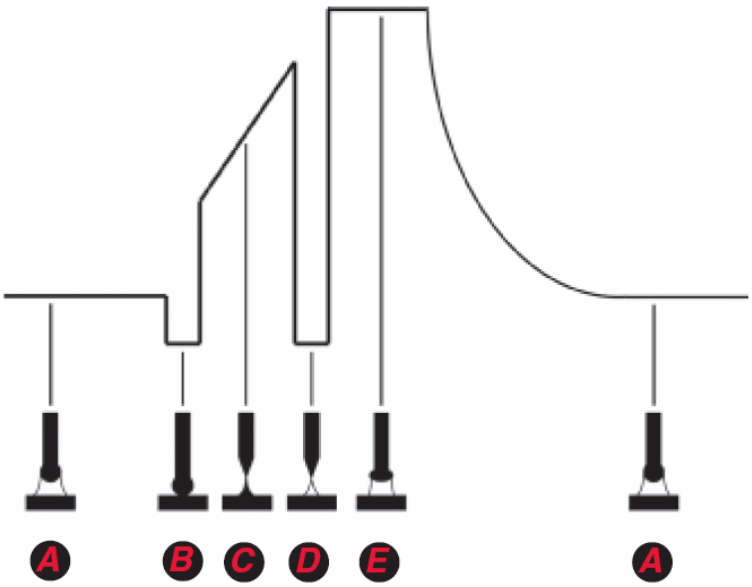
Kuva 10. Hitsausvirran muutos vapaalangan pituuden mukaan (mukaillen Kemppi c).

Vapaalangan pituus voi kuitenkin vaihdella hitsauksen aikana monista eri syistä, jolloin hitsausvirta putoaa. Syitä voi olla hitsaajan heikko ammattitaito, hitsausliitoksen luoksepäästävyys, hitsausliitoksen epätasaisuudet ja kulmien epätasainen kuljetus. Hitsausvirran putoamisesta voi aiheutua hitsausvirheitä kuten vajaata hitsautumissyvyyttä ja liitosvirhettä. Lisäksi virran putoaminen voi muuttaa kaarityyppiä esimerkiksi kuumakaaresta sekakaareen, jolloin roiskeiden määrä lisääntyy. Virtalähdevalmistajat ovat vastanneet tähän ongelmaan muuttamalla MIG/MAG-hitsauksen toimintaperiaatetta siten, että virtalähteeseen asetetaan haluttu hitsausvirta ja jännite. Tällöin virtalähde säilyttää nämä arvot vakiona ja muuttaa langansyöttönopeutta vapaalangan pituuden muutosten mukaan. (Kemppi c.)

3.2.3 Juuren hitsaus

Juuripalon MAG-hitsauksen helpottaminen on tärkeää hitsaavalle teollisuudelle. Juuripalot on perinteisesti hitsattu käsin TIG-hitsauksella, joka vie paljon aikaa eikä ole tehokasta. MAG-hitsauksessa ongelmana on ollut pohjapalon ylisuuri tunkeuma tai vajaa hitsautumissyvyys. Virtalähdevalmistajat ovat kehittäneet tähän tarkoitukseen juuripalon

hitsausprosesseja, jotka ovat modifioituja lyhytkaariprosesseja. Useilla laitevalmistajilla on omat prosessit, kuten WiseRoot+ (WR+), STT, SpeedRoot ja root Arc. Juuren hitsauksessa lämmöntuonti ja aineensiirtymä täytyy olla hyvin hallittua. Perinteisessä lyhytkaarihitsauksessa ongelmaksi muodostuivat oikosulussa tapahtuva virran ja jännitteen nousu, joita virtalähdevalmistajat pyrkivät hallitsemaan. Juuren hitsaukseen tehdyissä hitsausprosesseissa ei yleensä ole jännitteen säätöä ollenkaan, vaan kone säätää jännitettä mitatun tai arvioidun kaarijännitteen pohjalta. Prosessissa sulanut langanpää ajautuu oikosulkuun ennen sulan irtoamista ja virtalähde kasvattaa hitsausvirtaa prosessissa. Kun hitsausvirta saavuttaa ennalta määrätyn tason, laskee virtalähde virtatason alas, jotta oikosulun aukeaminen tapahtuu roiskeettomista ja pehmeästi. Tämän jälkeen virtaa kasvatetaan, jotta sulaan tuodaan tarvittavaa lämpöä ilman aineensiirtymää ja kierto alkaa alusta. Juuripalon hitsausprosessit estävät hitsausvirheitä juuripalossa, mahdollistavat hyvän sulan hallinnan, vähentävät roiskeita ja mahdollistavat halvemmat lisäaine- ja suojakaasuvalinnat. TIG-hitsaukseen verrattuna juuripalon hitsausprosessit ovat moninkertaisesti nopeampia ja mahdollistavat alamäkihitsauksen. Kuvassa 11 on esitetty juuripalon hitsausprosessin virtakäyrä. (Rosado et. al., 2008, s. 10-12; Kemppi d; Lorch, s. 82.)

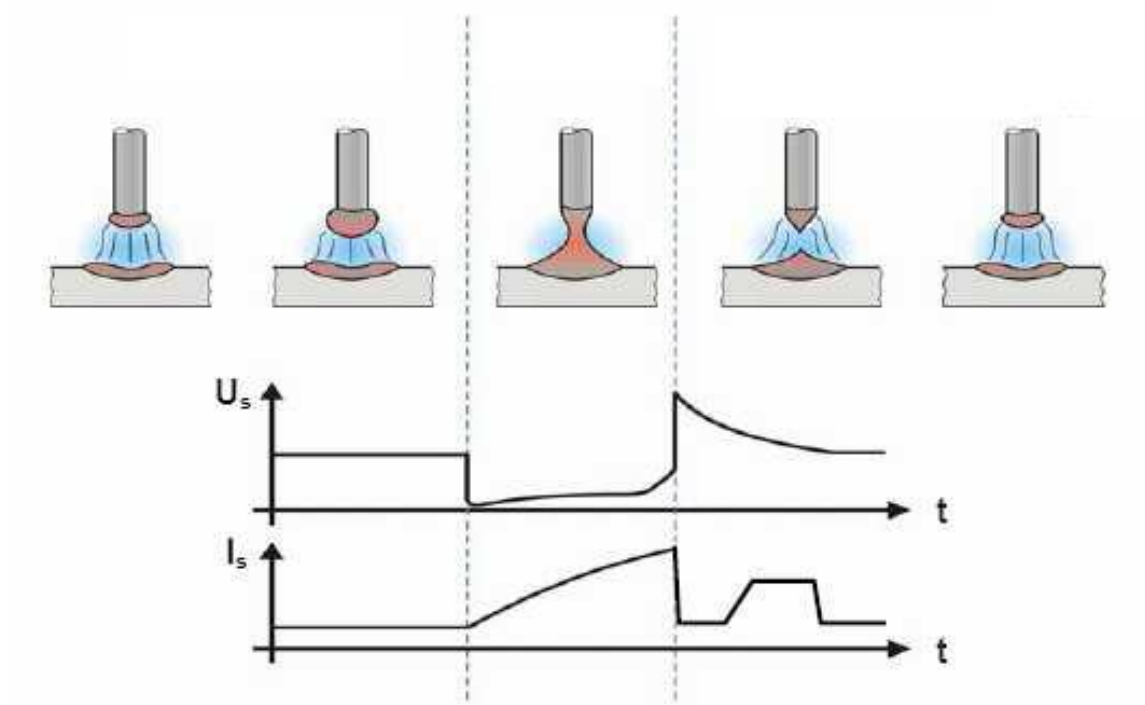


Kuva 11. Juuripalon hitsaukseen kehitetyn modifioidun kaariprosessin virtakäyrä ja valokaaren tila (mukaillen Rosado et. al., 2008, s. 10-12).

3.2.4 Ohuet levypaksuudet

Modifioitujen prosessien kehitys ohuille levyille on toinen tärkeä MIG/MAG-hitsauksen kehityssuunta, koska perinteisesti MIG/MAG-hitsausprosessi mielletään ensisijaisesti paksumpien materiaalien hitsaukseen soveltuvaksi. Laajentamalla käyttöaluetta saadaan tehokas ja nopea hitsausprosessi otettua käyttöön myös ohuilla levyillä, joiden hitsaukseen on perinteisesti käytetty hitaampia prosesseja, kuten TIG-hitsausta. Virtalähdevalmistajat ovat pyrkineet luomaan lämmöntuonnilta pienemmän hitsausprosessin, joka kyettäisiin toteuttamaan ilman langansyötön hienomekaanista hallintaa. Tavoitteena on löytää virtalähteen ohjauksella saavutettava pienen lämmöntuonnin prosessi alle 1mm paksuille levyille, joka on roiskeeton. (Goecke, 2005, s. 1; Rosado et. al., 2008, s. 12-14.)

Ohuiden levyjen modifioidut prosessit ovat modifioituja lyhytkaariprosesseja kuten juuripalolle kehitetyt hitsausprosessit. Ohuiden levyjen modifioidut prosessit perustuvat myös jännitteen mittaamiseen tai arviointiin ja virran säätöön jännitearvojen perusteella. Virtakäyrä on samankaltainen kuin juuripalon prosessissa, mutta jännitearvot ovat hieman juuripalkoprosessien vastaavia korkeampia. Tämä johtuu valokaaren sytytyksen tärkeydestä ohuilla levyillä. Oikosulun jälkeen valokaaren tulee syttyä roiskeettomasti ja vakaasti hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi. Lisäksi valokaaren sytytyksen jälkeen prosessin sulanhallinta tulee olla kunnossa ja prosessin tulee sulattaa langan kärki mahdollisimman nopeasti hyvän hitsaustuloksen saavuttamiseksi, jonka jälkeen jännitetaso lasketaan alas turhan lämmöntuonnin välttämiseksi. Tämä vaatii suurempaa lämmöntuontia kuin juuripalkohitsaukseen kehitetyissä prosesseissa. Langan kärjen sulatukseen käytetty lämmityspulssi on suurin ero juuripalkojen hitsaukseen tehtyjen modifioitujen prosessien ja ohutlevyprosessien välillä. Kuvassa 12 on esitetty ohutlevyjen hitsaukseen kehitetyn modifioidun prosessin virta- ja jännitekäyrät sekä niitä vastaava valokaaren tila. (Rosado et. al., 2008, s. 12-14.)

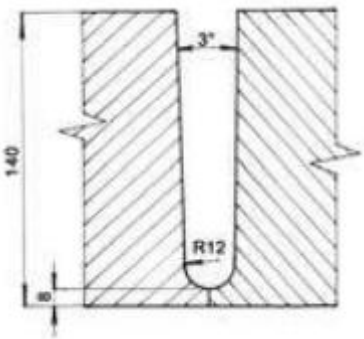


Kuva 12. Ohutlevyjen hitsaukseen kehitetyn modifioidun prosessin virta- ja jännitekäyrät sekä niitä vastaava valokaaren tila (mukaillen Rosado et. al., 2008, s. 13).

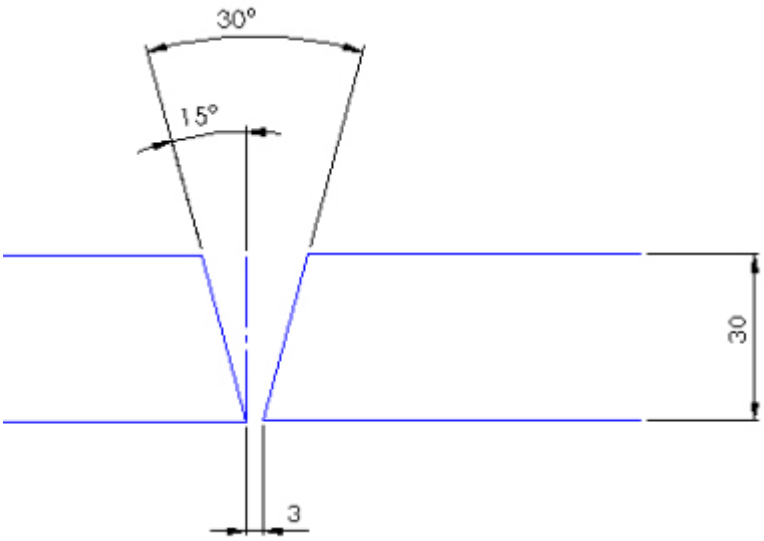
Modifioidun prosessin käytöllä ohutlevyjen hitsauksessa saavutetaan useita etuja, kuten vähemmän roiskeita ja pienempi lämmöntuonti kuin perinteisellä lyhytkaarella. Pienempi lämmöntuonti parantaa usein hitsin metallurgista laatua ja vähentää liitoksen muodonmuutoksia. Lisäksi modifioidut prosessit mahdollistavat halvempien lisäaineiden ja suojakaasujen käytön hitsauksessa, jolloin saavutetaan kustannussäästöjä. Hitsauksen ja säädön helppous on merkittävä tekijä modifioiduissa prosesseissa, joka on ohutlevyprosesseissa huomioitu. Prosessit ovat helppoja säätää ja säädettäviä parametreja on vähän, jolloin hitsaajien koulutustarve pienenee. (EWM, 2013b; Lorch, 2015, s. 84-85.)

4 KAVENNETUN RAILON HITSAUS

Kavennetun railon hitsaus ja kapearailohitsaus ovat yleisiä ja tärkeitä menetelmiä suurten aineenvahvuuksien putkien ja levyjen liittämisessä. Kapealla railokulmalla saavutetaan tuottavuuden kasvua ja vähennetään hitsin sisäisiä jännityksiä. Nykyaikaiset menetelmät ovat tehokkaita, mutta vaativat paljon ammattitaitoa ja kokeita, jotta niiden toiminta saadaan riittävän varmaksi ja luotettavaksi. Kavennetun railon hitsaamisen kehitystoimet ovat keskittyneet prosessin luotettavuuden, sulatustehon ja uusien materiaalien liittämiseen. (Häßler et. al., 2015, s. 71) Kavennetulle railokulmalle ei kuitenkaan ole vakiintunut termistöä. Käytettyjä termejä ovat kavennettu railokulma, kapean railon hitsaus ja kapearailohitsaus. Monessa kohteessa on kuitenkin tarpeellista tehdä ero kapean railokulman ja kapearailohitsauksen välille, koska kapearailohitsauksella tarkoitetaan yleisesti sädehitsauksessa käytettyä I-railoa. Kapearailohitsauksesta puhutaan, kun kappaleen aineenvahvuus kasvaa riittävästi ja hitsattavat levyt ei ole enää ohtulevyjä. Kavennetun railokulman ja kapearailohitsauksen ero on railomuodossa ja railokulmassa. Kapearailohitsauksella tarkoitetaan perinteisesti I-railoa tai hyvin kapeaa U-railoa, jossa on pieni ilmarako suhteessa ainepaksuuteen, kun kavennetulla railokulmalla tarkoitetaan esimerkiksi perinteistä V-railoa, jossa railokulmaa on kavennettu merkittävästi. Tavanomainen V-railokulma on 60° ja kavennetussa railokulmassa se on $<30^{o}$. Kuvassa 13 on esitetty kapearailohitsauksessa käytetty U-railo ja kuvassa 14 työn kannalta oleellinen kavennettu railokulma 30° railokulmalla. (Lukkari, 2011, s. 15-16.)



Kuva 13. Kaperailohitsauksessa käytetty U-railo (Lukkari, 2011, s. 16).



Kuva 14. 30° railokulmalla oleva kavennettu hitsausrailo.

4.1 Kavennetun railon vaatimukset ja haasteet

Kavennetun railon käyttö on kannattavaa paksuilla levyillä, joissa railonvalmistelu on pakollista lähes poikkeuksetta. Railot tehdään sovelluskohteesta riippuen koneistamalla tai leikkaamalla. Kavennetun railon geometria vaatii tarkkaa valmistelua, joten se koneistetaan kappaleisiin. Koneistus voi olla työlästä erityisesti paksuilla ja suurilla kappaleilla, jolloin se aiheuttaa merkittäviä kustannuksia. Lisäksi koneistettavan railon geometria määrää valmistelun hintaa. Erityisesti U-railon valmistus on vaativaa ja kallista, verrattuna perinteiseen V-railoon. (Lukkari, 2011, s. 16.)

Hitsauksen kannalta suurimmat haasteet kohdistuvat railon hitsattavuuteen ja railon luoksepäästävyyteen. Kapeassa railossa valokaaren oikea kohdistaminen on tärkeää ja valokaaren kohdistaminen vaikuttaa myös hitsin laatuun merkittävästi. Kavennetussa railossa liitosvirhe syntyy helposti, jonka jälkeen hitsi ei usein täytä asiakkaan vaatimaa hitsiluokkaa. Erityisesti liitosvirhettä syntyy herkästi railon seinämissä, koska valokaari ei MIG/MAG-hitsauksessa leviä riittävästi ja aineensiirtymä tapahtuu lähinnä keskellä valokaarta. Keskellä valokaarta on myös suurin kaaripaine, joka lisää tunkeumaa. Yleisesti hitseissä vaaditaan noin 0,5 – 1 mm seinämätunkeumaa, jotta hitsin laatu on hyväksyttävä. Railon seinämien sulattamiseen on kehitetty erilaisia prosesseja, joilla pyritään kohdistamaan kaarta railon seinämiin. Näitä ovat erilaiset polttimien pyöritykset, heilutukset ja useammalla eri reunoihin kohdistetulla valokaarella hitsaaminen.

Liitosvirhettä voi syntyä myös palkojen välillä, jos palkojen välinen lämpötilaero on liian suuri. Lämpöjakaumaa ja tunkeumaa hallitaan kavennetussa railossa hitsipalon geometrialla. Palon pitää levitä kaaripaineen vaikutuksesta riittävästi railon seinämille, jolloin lämpövaikutus sulattaa railon seinämät ja liitosvirhettä ei synny. Palon geometriaa hallitaan prosessin hitsausparametreilla ja hitsin lämmöntuonnilla. Tunkeumaa voidaan helpottaa myös esilämmityksellä, jos perusaineen metallurgia sen sallii. (Agrawal & Ghosh, 2010, s. 1251-1252; Häßler et. al., 2015, s. 71-74.)

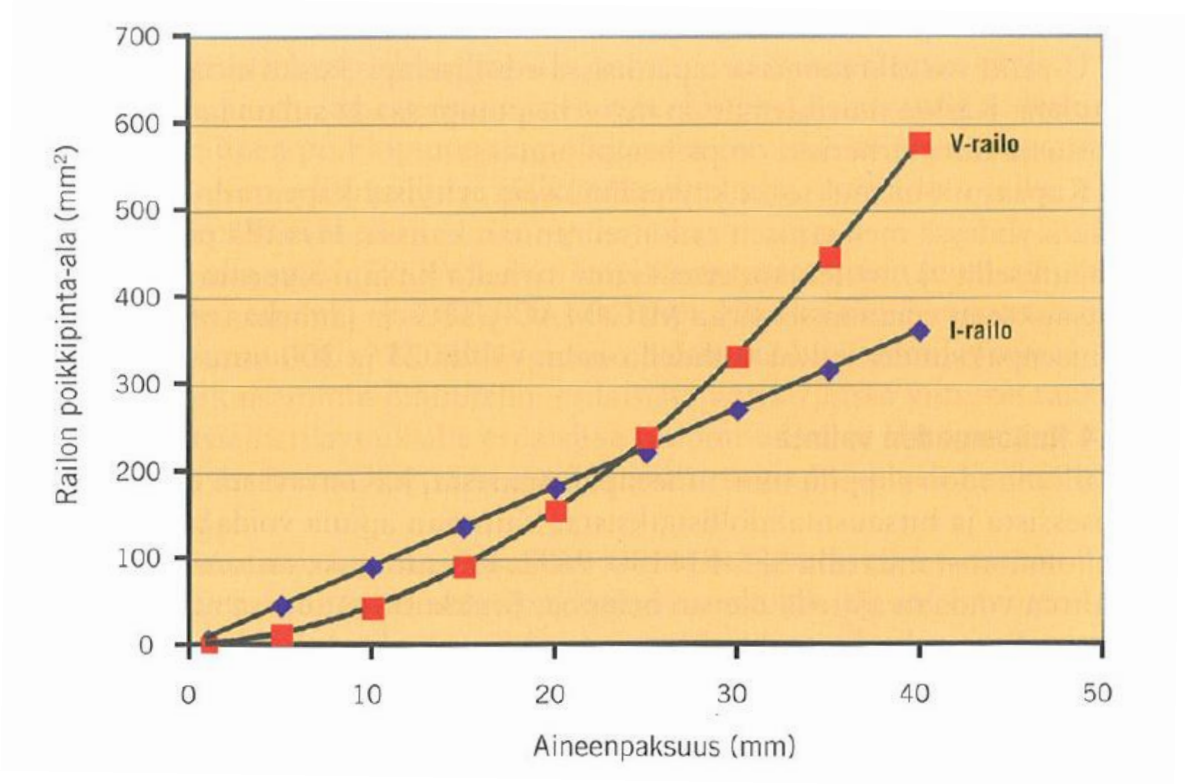
Railon ja hitsin luoksepäästävyys vaikuttavat moneen asiaan. Paksun levyn hitsaus kapeassa railossa ei onnistu perinteisillä hitsauspolttimilla, vaan vaatii erilaista ja kapeampaa rakennetta hitsauspolttimelta. Käytännössä erikoishitsauspolttimen käytön tarpeen määrää railokulma ja materiaalipaksuus. MIG/MAG-prosessilla vapaalangan pituus voi kasvaa suhteettoman pitkäksi kapeassa ja syvässä railossa, jolloin virran säätämiseksi tarvitaan virtalähteeltä modifioituja valokaarihitsausprosesseja. Kapeassa railossa ja paksuilla materiaaleilla on mahdollista, että MIG/MAG-hitsauksessa polttimen kaasuholkki törmää perusmateriaaliin ja suutinta ei saada riittävän lähelle hitsipalkoa. Selkeää rajaa ainepaksuudelle tai railokulmalle, jolloin erikoispolttimet ovat tarpeellisia, ei kyetä määrittelemään, koska eri valmistajien polttimet eroavat mitoiltaan toisistaan. Liitoksen luoksepäästävyys tulee tarkastaa hitsausta aloittaessa esimerkiksi käsin. Tämä vaikuttaa vapaalangan pituuden lisäksi myös hitsin kaasusuojaukseen, joka on tärkeä hitsin metallurgisen laadun kannalta. Vapaalangan pituus voi kasvaa kavennetussa railossa, koska hitsauspolttimen kaasuholkki ei mahdu hitsattavaan railoon sisään ja virtasuuttimen etäisyys työkappaleesta kasvaa. Riittävä kaasusuojaus on erittäin tärkeää erityisesti ruostumattomilla teräksillä, alumiineilla ja muilla hapelle erittäin herkillä metalliseoksilla. Myös niukkaseosteiset teräkset vaativat kaasusuojauksen, mutta ne eivät ole niin herkkiä pienille määrille happea. Kaasusuojaus vaikuttaa myös valokaaren vakauteen ja suorituskykyyn hitsauksen aikana. Myös hitsin jälkikäsittely vaikeutuu kavennetun railon takia merkittävästi. Työkalujen saaminen railoon voi olla haastavaa. (Häßler et. al., 2015, s. 71-72; TWI, 2015.)

4.2 Kavennetun railon hyödyt

Kavennetun railon käytöllä saavutetaan kaksi merkittävää etua: tuottavuuden kasvu railotilavuuden pienentymisen ansiosta sekä hitsin pienemmät sisäiset jännitykset ja

muodonmuutokset. Sisäisen jännitykset ja hitsin muodonmuutokset jäävät pienemmäksi HAZ-vyöhykkeen (Heat Affected Zone) pienenemisen ansiosta, koska hitsiin ei tarvitse tuoda niin paljon lämpöä pienentyneen railotilavuuden myötä. (Häßler et. al., 2015, s. 71.)

Railotilavuutta pienentämällä voidaan pienentää tarvittavaa hitsiainemäärää erityisesti paksuilla materiaaleilla. Railotilavuuden pienentäminen tuottaa kustannussäästöjä pienentyneen hitsiainemäärän myötä ja työmäärän pienenemisenä. Työmäärä pienenee palkomäärän vähentyessä sekä esi- ja jälkityön pienenemisenä. Railokulma tulee valita aina mahdollisimman pieneksi, jolla hitsaustyö pystytään suorittamaan asetettujen laatuvaatimusten mukaan. Valitsemalla pieni railokulma säästetään työkustannuksissa ja lisäainekustannuksissa. Railomuodon ja railokulman valintaan vaikuttaa työn suoritettavuuden lisäksi myös valittu hitsausprosessi ja ainepaksuus. Kuvassa 15 on esitetty kuva 9 mm ilmaraolla olevan I-railon ja 40° 1 mm ilmaraolla olevan V-railon poikkipinta-alan ja aineenpaksuuden riippuvuudesta. (Stenbacka, 2011, s. 74-78)

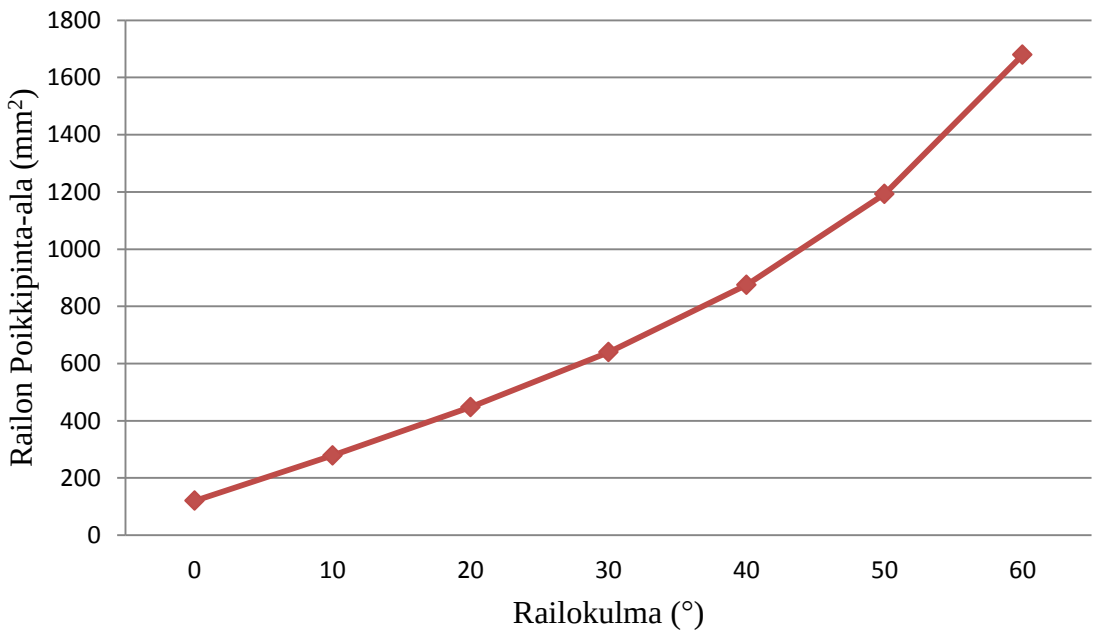


Kuva 15. I-railon ja V-railon poikkipinta-alan ja aineenpaksuuden riippuvuus (Stenbacka, 2011, s. 75).

Kuvasta 15 nähdään, että pienillä ainepaksuuksilla V-railon hitsaaminen on taloudellisesti kannattavampaa, mutta suuremmilla paksuuksilla I-railo muuttuu merkittävästi kannattavammaksi. I-railon poikkipinta-ala on suoraan verrannollinen aineenpaksuuteen, kun V-railon poikkipinta-ala on verrannollinen aineenpaksuuden neliöön. Aineenpaksuus, jolla I-railosta tulee pinta-alaltaan pienempi kuin V-railosta, voidaan laskea seuraavasti (Stenbacka, 2011, s. 74):

$$s_0=(i_I-i_v)/\tan(\alpha/2) \tag{1}$$

Kaavassa 1 s_0 on aineenpaksuus, jonka jälkeen I-railo on poikkipinta-alaltaan pienempi kuin V-railo, i_I on I-railon ilmarako, i_V on V-railon ilmarako ja α on railokulma V-railossa. I-railo asettaa kuitenkin rajoitteita kaarihitsauksen suorituskyvylle ja erityisesti suoritustekniikalle, joten kuvassa 16 on esitetty perinteisesti kaarihitsauksessa käytetyn V-railon railokulman vaikutus railon poikkipinta-alaan kokeellisessa osuudessa käytetyllä 30 mm levyllä, jossa ilmarako on 4 mm. (Stenbacka, 2011, s. 74.)



Kuva 16. Railokulman vaikutus railon poikkipinta-alaan 30 mm aineenvahvuudella.

Lopullisen hitsin sisäisiin jännityksiin ja muodonmuutoksin kyetään vaikuttamaan monella eri keinolla, mutta railogeometria on erinomainen keino siihen. Jännityksiä voidaan hallita

hitsausparametreista johtuvalla lämmöntuonnilla, jota pienentämällä kyetään pienentämään muodonmuutoksia. Lisäksi lämmöntuonti vaikuttaa myös sisäisten jännitysten syntyyn. Kaventamalla railokulmaa kyetään vaikuttamaan hitsin lopputulokseen. Kaventamalla railokulmaa railopinnat lähestyvät yhdensuuntaisuutta, joka pienentää vetojännitystilaa ja muodonmuutoksia (TWI, 2015). Hitsin jännitykset ja muodonmuutokset muodostuvat lämmöntuonnin, palkojen lukumäärän ja hitsiaineen määrän perusteella, joka tulee ottaa huomioon lopullisessa hitsissä. Railokulma tulee valita siten, että railo saadaan hitsattua luotettavasti ilman liitosvirhettä, mutta railokulma on mahdollisimman pieni hitsauksen tuottavuuden parantamiseksi sekä jännitysten pienentämiseksi (Stenbacka, 2011, s. 74). Vaikka railotilavuutta pienentämällä voidaan laskea lämmöntuontia, liian pieni määrä palkoja aiheuttaa hitsiin vääristymiä. Yleisenä nyrkkisääntönä voidaan pitää, että juuripalko ei saa täyttää hitsirailosta yli puolta sen tilavuudesta, jos kavennetulla railolla halutaan pienentää hitsin muodonmuutoksia. (Ghosh et. al., 2010, s. 43-52.)

4.3 Laatu kavennetun railon hitsauksessa

Kavennetun railon hitsaus on perinteistä 60° railoa haastavampaa. Erityisesti liitosvirheet railopintojen ja hitsipalon välissä ovat yleisiä hitsausvirheitä, kun hitsausrailoa kavennetaan. Liitosvirheiden estämiseksi hitsausprosesseja on pyritty kehittämään siten, että ne levittävät hitsauspalkoa ja kohdistavat valokaarta railopintoihin enemmän. Hitsauspalkoa ja valokaaren lämpöä kyetään levittämään esimerkiksi käyttämällä pulssihitsausta, jolloin valokaaressa kyetään hetkellisesti korottamaan jännitettä ilman lämmöntuonnin merkittävää kasvua, joka levittää lämpöä ja hitsipalkoa railossa. Lisäksi polttimen liikuttamiseen on kehitetty erilaisia sovelluksia, jossa hitsauspolttimen kärkeä heilutetaan, pyöritetään tai vaaputetaan railopintojen välillä. (Cui et. al., 2014, s. 297; Iwata, Murayama & Kojimo, 2008, s. 15; TWI, 2015.) Kavennetussa railossa tulee myös kiinnittää huomiota palkojen väliseen liittymään, koska kapea railo vaikeuttaa hitsin valmistelua ja jälkityöstöä. (Agrawal & Ghosh, 2010. s. 1251.)

Jos hitsausvirheet kyetään välttämään, saadaan kavennetun railon hitsauksella laadukas hitsi, jonka muodonmuutokset ja sisäiset jännitykset ovat pieniä. Pienet sisäiset jännitykset vähentävät hitsin muodonmuutoksia, erityisesti taipumia, merkittävästi. Taipumien hallinnalla päästään mittatarkkoihin ja tarkoilla sovitteilla hitsattaviin rakenteisiin, joka vähentää monessa tapauksessa railotilavuutta. Railotilavuuden pieneneminen tuottaa

säästöjä erityisesti lisäainekustannuksissa. Muodonmuutosten väheneminen aiheuttaa suurimmat hyödyt suurissa rakenteissa, joihin tulee suuria hitsejä isolla lämmöntuonnilla. Pienet kulmavääristymät hitsissä kertaantuvat rakenteessa kauempana, joka haittaa osien sovitteita. Kulmavääristymän korjaaminen vaatii usein lisätyötä tai seuraava sovite vaatii enemmän hitsiainetta railon täyttämiseen. Kavennetun railon hitsausta käytetään yli 10 mm paksujen putkien hitsaukseen, joka on lähes poikkeuksetta monipalkohitsausta. Useiden palkojen hitsaus kasvattaa lämmöntuontia ja päällekkäiset hitsipalot normalisoivat edellisiä palkoja. Normalisoinnilla tarkoitetaan hitsauksen lämmöntuonnin aiheuttamien raekokomuutosten palauttamista lähemmäksi alkuperäistä tilannetta. Normalisointi vaikuttaa myös materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. (AWS, 2001, s. 129.) Lämmöntuonnin merkitys riippuu hitsattavasta materiaalista, mutta usein esimerkiksi paksuissa putkissa käytetyt teräkset ovat niukkaseosteisia teräksiä, joten lämmöntuonti ei aseta suuria haasteita metallurgisesti. (Ghosh et. al., 2010, s. 43.)

5 HITSAUKSEN KUSTANNUKSET

Hitsauskustannusten merkitys on nostanut viimeaikoina merkitystään kaikessa hitsaavassa tuotannossa. Merkitys on kasvanut kiristyneen kilpailun, uuden tekniikan käyttöönoton ja kustannusten alentamiseen kohdistuvan paineen takia. Vaikka hitsaus toimii usein pelkkänä yksittäisenä valmistusvaiheena tuotteessa, on sen merkitys kustannuksiin usein suuri. Hitsauskustannuksista puhuttaessa huomio kohdistuu hitsaustuotannon tuottavuuteen. Tuottavuus voidaan käsittää pääoman tuottavuutena tai tuotannon tehokkuutena, jossa tuottavuus määritellään tuotannon panosten ja tuotosten suhteena. (Stenbacka, 2011, s. 3-21.)

$$Tuottavuus = Tuotantotulos/Resurssipanos \quad (2)$$

Kaavan 2 voidaan laskea tuotannon tehokkuuteen liittyvää tuottavuutta. Kaava vaikuttaa yksinkertaiselta, mutta tuotantotulos ja resurssipanos sisältävät kohteesta riippuen paljon muuttujia, joiden arviointi on usein haastavaa. Panokset voivat olla esimerkiksi kustannuksia, työtä, koneita ja materiaalia. Tulokset taas esimerkiksi tuotteen arvoa, tuotteiden lukumäärää ja tuotettua määrää. Pelkästään hitsaukseen liittyviä tuottavuuden mittareita on useita, mutta erityisesti sulatusteho on termi, josta puhutaan usein. Sulatustehoa voidaan kuitenkin soveltaa ainoastaan hitsaukseen, jossa käytetään lisäainetta. Sulatusteho ei kerro aina koko totuutta hitsauksen tuottavuudesta. (Stenbacka, 2011, s. 3-4.)

Hitsauskustannukset voidaan jakaa karkeasti viiteen pääryhmään:

- Työkustannukset
- Ainekustannukset
- Konekustannukset
- Energiakustannukset
- Kunnossapitokustannukset

Hitsauksen kokonaiskustannukset ovat näiden viiden alakustannuksen summa ja kustannukset lasketaan yleisesti metriä tai tuotetta kohden. (Stenbacka, 2011, s. 84.)

5.1 Työkustannukset

Työkustannukset ($K_{Ty)}$ sisältävät kaikki hitsaukseen liittyvät työt. Karkea laskenta työkustannuksille tehdään kertomalla tehtäväaika tuntikustannuksella. Tuntikustannus pitää sisällään kaikki työntekijän palkat, sosiaalimaksut, lomakorvaukset ja terveydenhoitokulut. Lisäksi tuntikustannukseen voidaan sisällyttää yrityksen yleiskustannuksia kertomalla kustannus tietyllä prosenttiluvulla. (Stenbacka, 2011, s. 84.)

$$K_{Ty} = (M * T) * (100/e) * H_{Ty} \tag{3}$$

Kaavalla 3 lasketaan hitsaustyön kustannukset. Kaavassa M on hitsiainemäärä, T hitsiaineentuotto, e kaariaikasuhde ja H_{Ty} hitsaajan työtunnin hinta. Työkustannukset ovat MIG/MAG-hitsauksessa yleensä noin 60-80 % kokonaistyökustannuksista. Työkustannukset muodostuvat kaariajan kustannuksista ja sivuaikojen kustannuksista. Kaariaikaa voidaan lyhentää vähentämällä hitsattavaa ainemäärää tai tehostamalla hitsausprosessia. Hitsiainemäärää voidaan pienentää vähentämällä hitsien lukumäärää, railon poikkipinta-alaa pienentämällä, käyttämällä katkohitsausta, tarkalla railovalmistuksella tai parantamalla hitsausliitoksen hyötysuhdetta. Hitsausprosessia voidaan tehostaa oikealla prosessivalinnalla, hitsausasennon valinnalla, mekanisoinnilla, hitsaajien koulutuksella sekä työolosuhteiden optimoimisella. Erityisesti kaariaikasuhteella on suuri merkitys hitsauksen kustannuksiin. Kaariaikasuhde muodostuu kaariajasta ja hitsauksen sivuajoista. Sivuaikojen pienentäminen on tehokas tapa tehostaa tuotantoa. Sivuaikoja voidaan pienentää lyhentämällä kappaleen käsittelyyn menevää aikaa, kiinnittimien parantaminen, automatisoimalla kappaleenkäsittelyä, työaseman tehostamisella, mekanisoimalla tuotantoa, torjumalla hitsauksen häiriöitä ja ergonomian parantamisella. Lisäksi hitsin jälkikäsittelyä vähentämällä voidaan tehostaa tuotantoa. (Stenbacka, 2011, s. 90-100.)

5.2 Ainekustannukset

Hitsaavan teollisuuden ainekustannukset muodostuvat perusaineen hinnasta ja hitsauksen ainekustannuksista. Hitsauksen ainekustannukset koostuvat lisäainekustannuksista K_{Li}, suojakaasukustannuksista K_{Su}, hitsausjauhekustannuksista K_{Ja} ja mahdollisista juuritukikustannuksista K_{Ju}. Jauhekustannukset liittyvät ainoastaan jauhekaarihitsaukseen ja suojakaasukustannukset kaasu- ja kaasukaarihitsaukseen. Juuritukea käytetään

pohjapalon hitsauksen helpottamiseksi. Ainekustannusten laskukaavat on esitetty alla: (Stenbacka, s. 87-88.)

$$K_{Li} = M * (100/N) * H_{Li} \tag{4}$$

$$K_{Su} = (M * 0{,}06 * V * H_{Su})/T \tag{5}$$

$$K_{Ja} = J * M * H_{Ja} \tag{6}$$

$$K_{Ju} = L * H_{Ju} \tag{7}$$

Hitsausainekustannusten kaavoissa 4-7 N on prosessin hyötyluku, H_{Li} on lisäaineen hinta, V kaasun virtaus, H_{Su} suojakaasun hinta, J jauheen ominaiskulutus, H_{Ja} jauheen hinta, L hitsin pituus ja H_{Ju} juurituen hinta. Lisäksi ainekustannuksiin vaikuttavan perusmateriaalin hinnan määrää toimittaja. Perusmateriaalin hintaan kyetään vaikuttamaan hankkimalla perusmateriaali mahdollisimman halvalla ja vaihtamalla perusmateriaali halvempaan, jos mahdollista. (Stenbacka, s. 87-88.)

5.2.1 Hitsattavan materiaalin vaikutus hitsausainekustannuksiin

Hitsausainekustannusten osuus kokonaiskustannuksista vaihtelee merkittävästi hitsattavan materiaalin mukaan. Yleisesti ottaen niukkaseosteisten terästen käsinhitsauksessa hitsausainekustannusten osuus kokonaiskustannuksista on pieni, keskimäärin 5-10 %. Materiaalin vaihtuessa esimerkiksi ruostumattoman teräksen tai nikkeliseosteisten terästen seoksiin, nousevat hitsausainekustannukset merkittävästi. Ruostumattoman teräksen 316L 1.0 mm MAG-hitsauslanka on yli 6 kertaa kalliimpaa kuin vastaava rakenneteräkselle S355 soveltuva hitsauslanka (Turun Hitsauskone Oy, 2015; Industria webshop, 2015). Enemmän seostetuilla ja harvinaisemmilla materiaaleilla ero on vielä suurempi. (Stenbacka. 2011. s. 84-100.)

5.3 Konekustannukset

Hitsauskoneiden kustannukset koostuvat koneen hankinta- ja tuntikustannuksista. Kustannukset vaihtelevat konepajan hitsauslaitteiston perusteella, mutta käsinhitsauksessa niiden kustannukset jäävät kohtalaisen pieneksi osaksi hitsauksen kokonaiskustannuksia

verrattuna mekanisoituun tai erityisesti robotisoituun hitsaukseen. Käsinhitsauksessa konekustannukset ovat arviolta 5-10 %. Robotisoidussa hitsaussolussa konekustannusten osuus kokonaiskustannuksista voi ylittää jopa 60 % laitteistoon sidotun suuren pääomakustannuksen takia. Kevyt mekanisointi parantaa hitsauksen tuottavuutta robottihitsausta pienemmillä investoinneilla, joten sen konekustannukset asettuvat robotti- ja käsinhitsauksen väliin. Kevyt mekanisoinnissa koneinvestointi kasvaa ainoastaan mekanisointilaitteen verran käsinhitsaukseen verrattuna, joten euromääräinen investointi ei kasva merkittävästi, mutta hitsauskustannusten lasku kasvattaa investoinnin osuutta kokonaiskustannuksista. Konekustannuksissa huomioidaan kaikkien hitsaukseen liittyvien koneiden kustannukset. Näitä ovat esimerkiksi hitsauslaitteisto, mekanisointilaitteet, kiinnittimet, käsittelylaitteet sekä esi- ja jälkityöstön laitteet. Kustannukset lasketaan kuoletusajan, korkokustannusten, kunnossapidon ja arvioidun käyttöajan pohjalta seuraavasti:

$$K_{Ko} = (M/T) * (100/e) * H_{Ko} \tag{8}$$

Kaavassa 8 K_{Ko} on konekustannukset ja H_{Ko} koneen tuntihinta. (Stenbacka, 2011, s. 85-89.)

5.4 Energiakustannukset

Energiakustannukset ovat usein kokonaishitsauskustannuksista pienin osa. Niiden osuus vaihtelee yhden ja kahden prosentin välillä, joten ne jätetään monissa laskelmissa huomiotta niiden pienuuden vuoksi. Energiakustannukset muuttuvat pääasiassa kaariajan ja energiakulutuksen pohjalta, ellei hitsauslaitteiston energian tyhjäkäyntikulutus ole merkittävä. Näissä tapauksissa myös tyhjäkäyntikulutus huomioidaan laskuissa, jolloin laskukaava muuttuu monimutkaisemmaksi. Nykyaikaisissa invertterivirtalähteissä energian ominaiskulutus E on noin 3kWh/hitsiainekilo. Energiakustannukset voidaan laskea seuraavasti:

$$K_{En} = E * M * H_{En} \tag{9}$$

$$K_{En} = M * [P * P_0 * (100 - e)/e] H_{En}/T \tag{10}$$

Kaavoissa 9 ja 10 K_{En} on energiakustannukset, H_{En} on energian ostohinta, P on valokaaren teho ja P_0 on koneen tyhjäkäyntiteho. Energiakustannusten laskemiseen käytetään yleensä kaavaa 9 sen yksinkertaisuuden ja energiakustannusten pienen merkityksen vuoksi. (Stenbacka, 2011, s. 84-89.)

5.5 Kunnossapitokustannukset

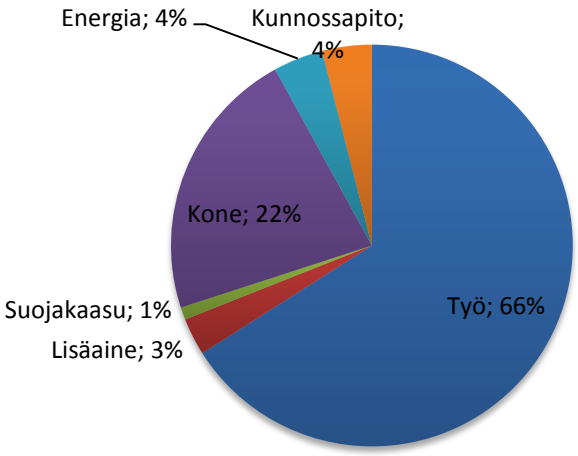
Kunnossapitokustannusten merkitys hitsauksen kokonaiskustannuksiin on hyvin pieni energiakustannusten tavoin. Kunnossapitokustannukset ovat yleensä noin 1-2 % ja niiden laskeminen yleisellä kaavalla on vaikeaa. Kustannukset koostuvat laitteiden, kiinnittimien ja tilojen kunnossapidosta. Kunnossapitokustannukset lasketaan yritys- ja hitsauskohdekohtaisesti yrityksen kokemuksen perusteella tai kertomalla muut kustannukset vakiolla kunnossapitokertoimella. Tämä kerroin voi olla esimerkiksi 1,02. (Stenbacka, 2011. s. 84-89.)

5.6 Laadusta aiheutuvat kustannukset

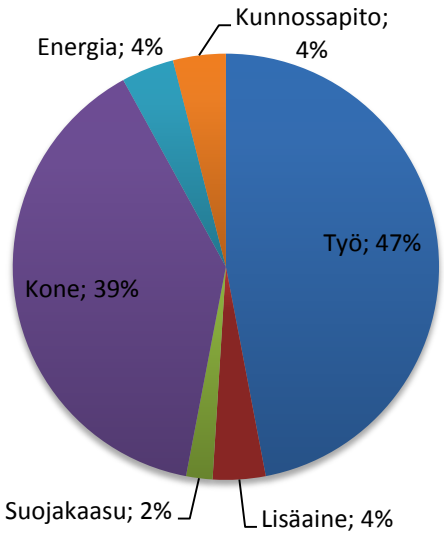
Hitsauksen laatu määräytyy käytännössä kuudesta eri tekijästä, jotka ovat perusaine, rakenteen muotoilu, mitoitus, hitsausmenetelmät, työpajakäytännöt ja tarkastustoimenpiteet. Yleisesti ottaen 70 % laadusta määräytyy jo suunnittelijan pöydällä, joka monesti tarkoittaa myös sitä, että suurin osa kustannuksista määräytyy suunnittelijan toimesta. Laatuvaatimusten tulee olla riittävät, mutta ei liioitellut. Riittävät laatuvaatimukset torjuvat asiakkaiden reklamaatioita ja kannustavat kerralla valmiin tuotteen hitsaamiseen. Erityisesti reklamaatiot ja tuotteiden vauriot aiheuttavat aina suuria jälkikustannuksia yritykselle. Liialliset laatuvaatimukset vuorostaan vaativat aina enemmän laadunvarmistusta, joka lisää työkustannuksia. Korkeat laatuvaatimukset tai luokkavaatimukset hitsissä eivät kuitenkaan automaattisesti tarkoita vahvempaa ja laadukkaampaa hitsiä. Myös laadukkaalla suunnittelu työllä voidaan säästää työvaiheita, tai pienentää vaadittavan käsityön määrää, joka säästää kustannuksia. (Stenbacka, 2011, s. 15-18.)

5.7 Hitsauskustannusten jakautuminen

Hitsauskustannukset jakautuvat käsinhitsauksessa ja mekanisoidussa-/robotisoidussa hitsauksessa eri tavalla. Eri kustannusten merkitys kokonaiskustannuksiin muuttuu laitteiston hinnan ja työkustannusten suuruuden perusteella. Kuvassa 17 on esitetty länsimaissa käsin MAG-hitsatun tuotteen kustannusjakauma ja kuvassa 18 vastaavan robotisoidun hitsauksen kustannusjakauma. (Stenbacka, 2011, s. 92-95.)

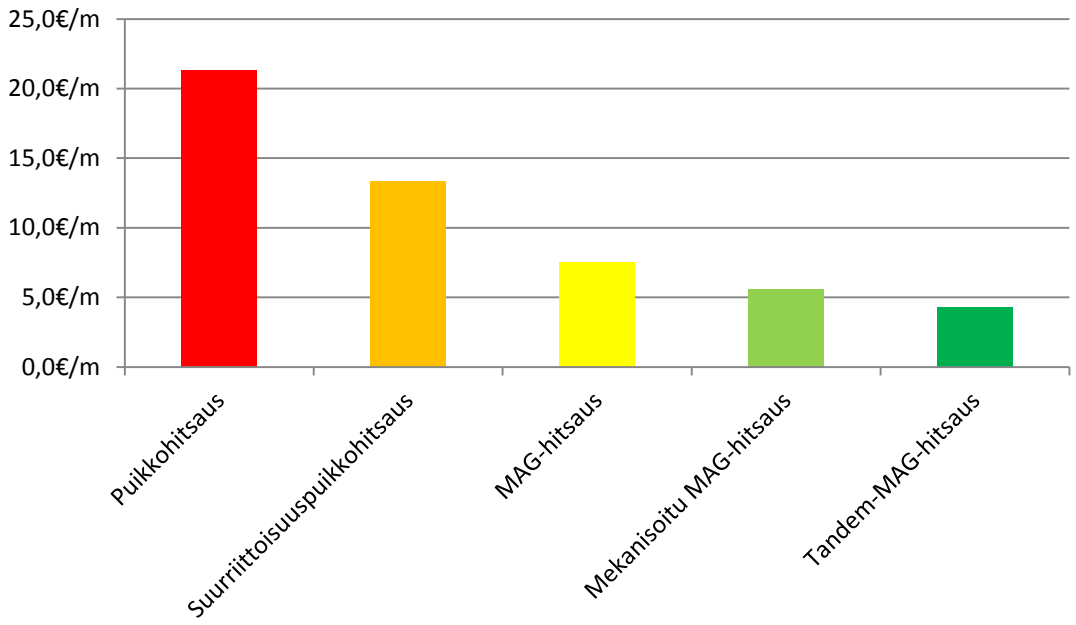


Kuva 17. Käsin MAG-hitsatun hitsin kustannusjakauma (mukaillen Stenbacka, 2011, s. 93).



Kuva 18. Robotisoidusti MAG-hitsatun tuotteen kustannusjakauma (mukaillen Stenbacka, 2011, s. 95).

Hitsauskustannukset vaihtelevat myös eri hitsausprosessien välillä merkittävästi. Hitsattua metriä kohden syntyvät kustannukset muuttuvat hitsausainekustannusten ja prosessin tehokkuuden mukaan. Kuvassa 19 on esitetty puikkohitsauksen, suurriitoisuus-puikkohitsauksen, MAG-hitsauksen, mekanisoidun MAG-hitsauksen ja Tandem-MAG-hitsauksen kustannukset metriä kohden 4 mm alapienahitsille, jonka poikkipinta-ala on 16 mm^2. (Stenbacka, 2011, s. 96-100.)



Kuva 19. Hitsausprosessien hitsauskustannukset metriä kohden (mukaillen Stenbacka, 2011, s. 99).

Kuvasta 19 on helppo nähdä, että mekanisoidulla hitsauksella saadaan metriä kohden kertyviä kustannuksia laskettua merkittävästi. Tälle ehtona on kuitenkin riittävä hitsauksen määrä. Liian lyhyillä yksipalkohitseillä ei välttämättä saada mekanisoinnista vastaavanlaisia etuja, koska mekanisointilaitteiston asetusaika voi olla niin suuri, että kasvaneella hitsausnopeudella ei saada kurottua asetusaikaa umpeen. Näissäkin tapauksissa oikein asetetun mekanisointilaitteiston tasalaatuisuus on kuitenkin käsihitsausta edellä.

6 HITSAUSKOKEET

Työn kokeellisessa osuudessa tutkittiin putken päittäishitsauksessa perinteisen 60° railokulmaan viistetyn liitoksen ja kavennetun railon 30° railokulmaan viistetyn liitoksen hitsauksen tuottavuutta rakenneteräs S355:n MAG-hitsauksessa. Kokeissa haettiin putken orbitaalihitsaukseen soveltuvat hitsausparametrit pohjapalon ja täyttöpalkojen hitsaukseen, joiden pohjalta hitseille tehtiin pWPS. Hitsauskokeet suoritettiin Kemppi Oy:n hitsauslaboratorion ja hitsauskoulun tiloissa.

Kokeissa vertailtiin perinteisesti putkenhitsauksessa käytettyä 60° railoa ja kavennettua railoa, jonka railokulma oli 30°. Railonvalmistelu oli toteutettu sorvaamalla railot putkiin ja koneistamalla levyihin, jotta railovalmistelun laatu on riittävän korkea mekanisoituun hitsaukseen. Hitsauksen tuottavuutta vertailtiin kellottamalla hitsaus- ja asetusaikoja putken hitsauksen aikana. Työtä varten hitsattiin liitoksia seuraavalla tavalla:

- Liitos 30° railokulmalla siten, että kaikki palot hitsattiin mekanisoidusti ja pohjapalko modifioidulla kaariprosessilla. Täyttöpalot mekanisoidusti modifioituja hitsausvalokaariprosesseja hyödyntäen
- Liitos 30° railokulmalla siten, että kaikki palot hitsattiin mekanisoidusti ja pohjapalko juuritukea vasten. Täyttöpalot mekanisoidusti modifioituja hitsausvalokaariprosesseja hyödyntäen
- Liitos 30° railokulmalla siten, että pohjapalko hitsattiin käsin modifioidulla kaariprosessilla ja loput palot mekanisoidusti. Täyttöpalot mekanisoidusti modifioituja hitsausvalokaariprosesseja hyödyntäen
- Liitos 60° railokulmalla siten, että pohjapalko hitsattiin käsin modifioidulla kaariprosessilla ja loput palot mekanisoidusti. Täyttöpalot mekanisoidusti modifioituja hitsausvalokaariprosesseja hyödyntäen

Hitsausparametrien haku aloitettiin hitsaamalla railogeometrialta putkia vastaavia levyjä eri hitsausasennoissa, joiden pohjalta hitsausparametrien haku aloitettiin putkille. Pohjapalot hitsattiin modifioidulla WiseRoot+ MAG-hitsauksella PG-asennossa ja täyttöpalot täytelanka-MAG-hitsauksella PF-asennossa. Hitsauskokeissa tehtiin oletus, että

täyttöpalkojen hitsausaika on 30° railokulman liitoksessa sama riippumatta pohjapalon hitsaustavasta. Oletus pohjautuu siihen, että pohjapalon hitsaus WiseRoot+-prosessilla luo riittävän vahvan pohjapalon täyttöpalkojen hitsausta varten suurilla tehoilla, joten palkojen poikkipinta-alan erot WiseRoot+:lla ja juuritukea käyttäen jää pieneksi.

6.1 Koejärjestely ja kokeiden suoritus

Hitsauskokeet suoritettiin Kempin hitsauskoulun tiloissa käyttäen orbitaalilaitteistoa ja Kempin hitsausvarusteita. Käytetyistä laitteista virtalähteet olivat markkinoilta löytyviä tuotteita, mutta orbitaalihitsauslaitteet prototyyppejä, jotka eivät vastaa täysin markkinoilla olevia tuotteita.

6.1.1 Perusmateriaali

Perusmateriaali kokeissa oli rakenneteräs S355K2, jota käytettiin sekä putkena että levynä. Levyä käytettiin hitsausparametrien hakuun ja lopulliset hitsauskokeet hitsattiin orbitaalihitsauksena putkelle. Käytetyt levyt olivat mitoiltaan 400x1000x30 mm. Näiden 1000 mm pitkät sivut viistettiin ja kaksi levyä hitsattiin viistetyistä sivuista yhteen päittäisliitoksena. Kokeissa käytetty putki vastaa 14” putkea tai eurooppalaisittain DN350. Putken ulkohalkaisija oli 355,6 mm ja kokeissa käytettiin 30 mm seinämävahvuudella olevaa putkea. Putkeen sorvattiin kokeita varten 15° ja 30° viistekulmat, jolloin railon kokonaiskulmaksi tulee 30° tai 60°. Taulukossa 1 on esitetty perusaineen todellinen ainestodistuksen mukainen kemiallinen koostumus ja hiiliekvivalentti CEV, jota käytetään niukkaseosteisten terästen hitsattavuuden arviointiin.

Taulukko 1. Perusaineen kemiallinen koostumus ainestodistuksen mukaisesti.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	CEV
0,17%	0,22%	1,53%	0,009%	0,005%	0,02%	0,002%	0,02%	0,43

6.1.2 Lisäaineet

Lisäaineita putken hitsauksessa käytettiin kahta erilaista. Pohjapalot hitsattiin 1,2 mm Esab AutRod 12.51 umpilangalla ja täyttöpalot 1,2 mm Nittetsu SF3-AM jauhetäytelangalla. Lisäaineiden kemialliset koostumukset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Lisäainelankojen kemiallinen koostumus (Esab, 2015; NST, 2010).

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
AutRod 12.51	0,10%	0,72%	1,11%	0,13%	0,012%		
SF3-AM	0,06%	0,30%	1,27%	0,011%	0,005%	0,26%	0,95%

6.1.3 Suojakaasu

Suojakaasuna käytettiin kaikissa hitsauksissa argonin ja hiilidioksidin seosta. Suojakaasu oli Air Liquiden valikoimasta Arcal 5. Suojakaasu soveltuu seostamattomien tai niukkaseosteisten terästen MAG-hitsaukseen. Suojakaasu on myös vaatimus joillekin jauhetäytelangoille. Kokeissa käytetyn SF3-AM-langan vaatimuksissa mainitaan ainoastaan hiilidioksidin ja argonin seoskaasu. Arcal 5 kaasussa on 18 % hiilidioksidia ja 82 % argonia. (Air Liquide, 2009.)

6.1.4 Hitsauslaitteisto

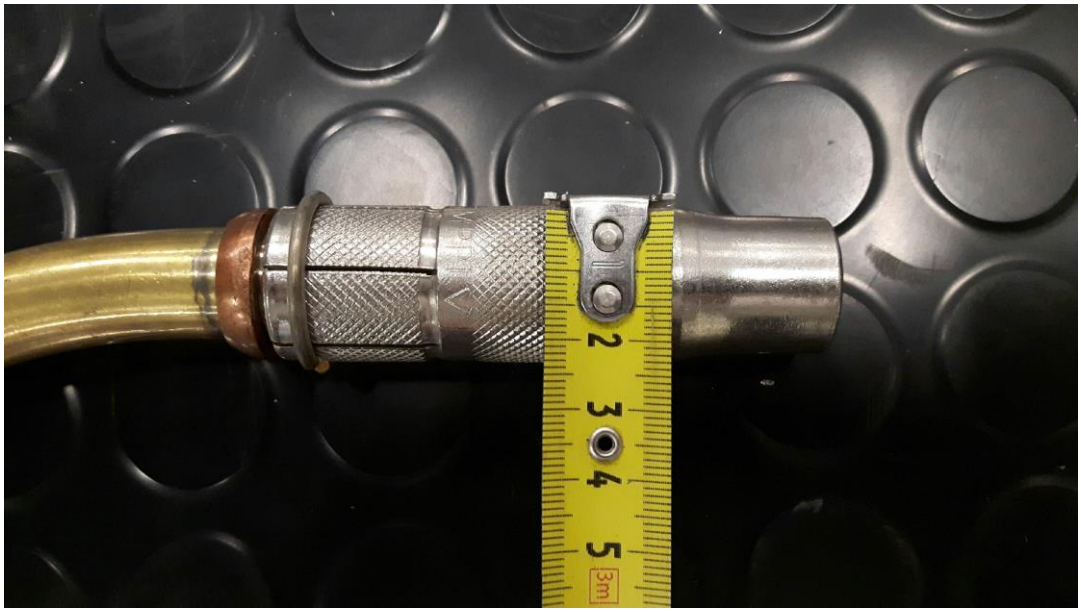
Hitsauslaitteisto koostui Kempin hitsaus- ja mekanisointilaitteistosta. Virtalähteenä hitsauksessa käytettiin Kemppi FastMig X-virtalähdettä, jossa käytettiin kahta langansyöttölaitetta. Langansyöttölaitteet olivat malliltaan MXP37 ja MXF65. Kuvassa 20 on esitetty koepaikka, hitsauslaitteet ja hitsattavien kappaleiden kannatteluun tehty teline.

Kuva 20. Koejärjestelyn hitsauslaitteet ja koekappaleiden teline.

Molemmissa langansyöttölaitteissa oli oma kaasujäähdytteinen hitsauspoltin, joka oli malliltaan Kemppi PMT-MN. MN-pääte tulee sanoista multi neck, jossa samaan poltinrunkoon voidaan vaihtaa erilaiset kaulat tarkoituksen mukaan. Pohjapalon hitsauksessa käytettiin erityisesti siihen tarkoitettua kevytrakenteisempaa kaulaa pienellä kaasuholkilla ja täyttöpaloissa raskaampaan käyttöön tarkoitettua kaulaa, jossa on tehokkaampi jäähdytys ja suuri kaasuholkki suojauksen varmistamiseksi. Kuvassa 21 on esitetty kavennetun railon hitsaukseen käytetty kapearailokaula ja kaasuholkki.

Kuva 21. Pohjapalon hitsauksessa käytetty hitsauspoltinkaula ja kapearailosuutin.

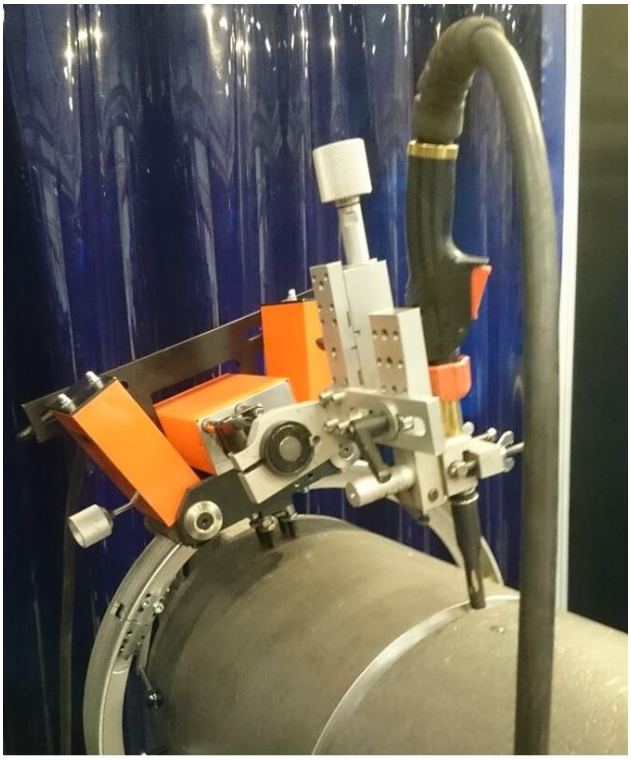
Kuvassa 22 täyttöpalkojen hitsauksessa käytetty poltinkaula, joka takaa paremman kaasusuojan, mutta ei mahdu syvälle railoon.



Kuva 22. Täyttöpalkojen hitsauksessa käytetty hitsauspoltinkaula ja kaasuholkki.

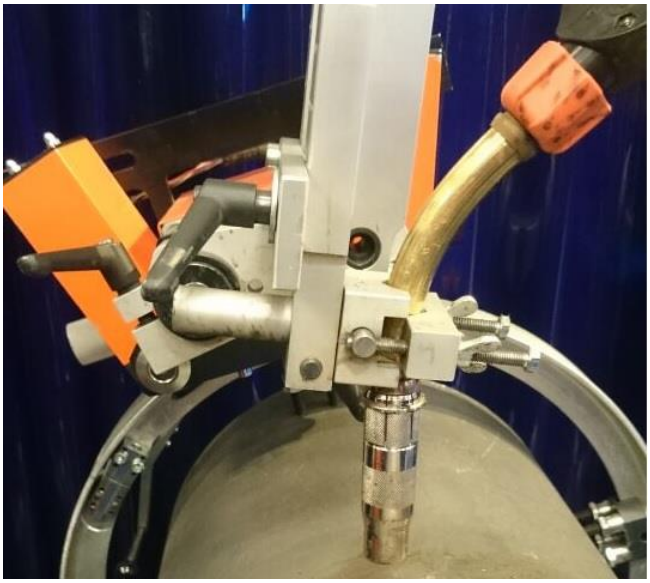
Mekanisointiin käytettiin Kempin prototyyppi orbitaalikuljetinta ja kiskoa, jotka kiinnitettiin putken ympärille. Orbitaalikuljettimen kaukosäätimestä kyetään säätämään hitsauksen aikana levitysliikettä, polttimen kohdistusta sivuttain, kuljetusnopeutta,

hitsausvirtaa ja hitsausjännitettä. Lisäksi orbitaalikuljettimesta pystytään säätämään polttimen etäisyyttä mekaanisesti. Hitsauksen aikana erityisesti sivuttaista kohdistusta tulee hienosäätää railon ja valokaaren mukaan. Lisäksi kuljetusnopeuden säädöllä voidaan hallita hitsaustapahtumaa tilanteen vaatiessa. Kuvassa 23 on esitetty pohjapalon hitsaukseen käytetty poltinvarustus ja mekanisointilaitteiston kuljetin ja kiinnityspanta.



Kuva 23. Pohjapalon hitsaukseen käytetty poltinvarustus ja koejärjestely.

Kuvassa 23 nähdään Kempin kavennetun railon hitsaukseen suunniteltu kaasuholkki ja sen sisällä on kavennetun railon hitsaukseen tarkoitettu virtasuutin. Kaasuholkki eroaa perinteisestä kaasuholkista kapeammalla ja pidemmällä rakenteella. Lisäksi kaasuholkki kapenee päätä kohden, jotta kaasuholkki mahtuu kapeampaan railoon. Sekä kaasuholkki, että virtasuutin on pinnoitettu keraamipinnoitteella, jotta hitsauksesta aiheutuvat roiskeet eivät tartu niihin kiinni. Lisäksi pinnoite estää valokaaren syttymisen kaasuholkin ja virtasuuttimen välille, koska se ei johda sähköä. Kuvassa 24 on esitetty täyttöpalkojen hitsaukseen käytetty suurempi polttimen kaula suuremmalla kaasuholkilla. Polttimessa näkyy myös asentohitsauksen aiheuttamia roiskeita.

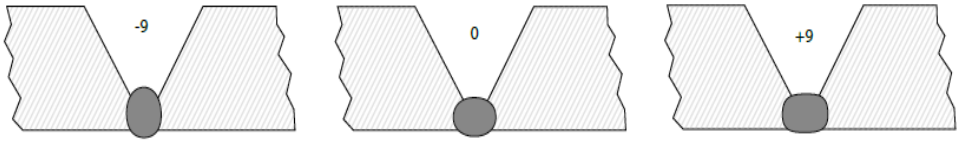


Kuva 24. Täyttöpalkojen hitsaukseen käytetty raskaampi poltinkaula.

6.1.5 Kokeiden suoritus

Hitsauskokeita suoritettiin teollisuudessa tyypillisesti käytetyille tilanteilla ja railoille, joiden pohjalta eri menetelmien tuottavuutta kyetään vertailemaan. Kokeissa hitsattiin 30° railo siten, että täyttöhitsaus tehtiin aina mekanisoidusti orbitaalilaitteistolla. Pohjapalkojen hitsauksessa kokeissa hitsattiin kolme eri variaatiota. Kokeissa hitsattiin a) pohjapalko käsin WiseRoot+-prosessilla, b) mekanisoidusti orbitaalilaitteistolla käyttäen WiseRoot+-prosessia ja c) mekanisoidusti orbitaalilaitteistolla juuritukea käyttäen. Tämän lisäksi 60° asteen railoon hitsattiin pohjapalko käsin WiseRoot+-prosessia käyttäen ja täyttöpalot mekanisoidusti orbitaalilaitteistolla. Kokeista kellotettiin hitsaukseen kuluneet asetus- ja kaariajat, joista saadaan eri menetelmille ja tapauksille kaariaikasuhteet sekä hitsausajat. Täyttöpalkojen osalta oletettiin, että hitsausaika on sama pohjapalon hitsausmenetelmästä riippumatta, joten 30° railossa täyttöaika on sama kaikissa tapauksissa. Oletukseen päädyttiin, koska WiseRoot+:lla saatiin riittävän vahva pohjapalko, jonka päälle pystyi hitsaamaan täyttöpalot mekanisoidusti ilman läpipalamista. Virtalähteelle annettava Fine tuning arvo on virtalähteessä synergisen prosessin ja WiseRoot+:n hienosäätöarvo. Synergisessä hitsauksessa Fine tuning on jännitteen, eli kaarenpituuden, hienosäätöarvo. Hienosäätö toimii perinteisen ”kaksinuppisäädön” jännitesäädön kanssa vastaavalla tavalla, mutta säätää vaan virtalähdevalmistajan perusasetuksesta jännitettä ylöspäin tai alaspäin. WiseRoot+:lla jännite käyttäytymiseen ei voida vaikuttaa, vaan jännite ohjataan virtalähteen mittaaman jännitearvon perusteella. Tällöin Fine tuning säätää prosessin

lämmöntuontia. Lämmöntuontia säädetään virtaa muuttamalla. Kuvassa 25 on esitetty Fine tuning-parametrin vaikutus WiseRoot+-prosessilla.



Kuva 25. Fine tuning-parametrin vaikutus WiseRoot+-prosessilla palkomuotoon (Kemppi d).

Taulukossa 3 on esitetty täysin mekanisoidusti hitsatun 30° railokulmalla olleen liitoksen hitsausparametrit joka palolle. Taulukossa esitettyjen parametrien lisäksi täyttöpaloissa käytettiin vakioasetusten lisäksi Kempin WiseFusion ja WisePenetration toimintoja. WiseFusionin asetusarvo oli 20 %, jolloin 20 % aineensiirtymästä tapahtuu oikosulussa. Suurempi WiseFusion-arvo tarkoittaa lyhyempää ja kohdistetumpaa kaarta. WisePenetrationin asetusarvo oli 0 %. WisePenetrationin asetusarvo 0 % tarkoittaa, että hitsausvirtalähde pitää virtalähteelle asetetun virta-arvon vakiona. 30° railokulmalla varustetuissa liitoksissa ilmarako oli 4,0-4,5 mm lukuun ottamatta juuritukea vasten hitsattua pohjapalkoa, jossa ilmarako oli 4,5 – 5,0 mm. Taulukoissa olevat palot 1a ja 1b tarkoittavat pohjapalkoa, jonka hitsaamiseen käytetään kaksia eri hitsausparametreja. Putken yläosassa lähellä jalkoasentoa langansyöttöä on vähemmän ja sulaa pyritään levittämään, ettei sula valahda railosta läpi. Näillä parametreillä hitsataan 60° putkesta, jonka jälkeen vaihdetaan suuremmalle langansyöttöarvolle tunkeuman lisäämiseksi, mutta lämmöntuontia pienennetään, jottei sula valu railosta takaisin vaan jähmettyy mahdollisimman nopeasti.

Taulukko 3. Mekanisoidusti hitsatun 30° railokulman liitoksen hitsausparametrit.

Palko nro	Hitsaus-prosessi	Langansyöttö-nopeus	Fine tuning	Kuljetus-nopeus	Vaaputus-leveys	Kaasun virtaus	Vapaalangan pituus
1a	135 (WR+)	3,30 m/min	+9,0	35 cm/min	3-4 mm	17 l/min	18-23 mm
1b	135 (WR+)	4,0 m/min	-7,0	20 cm/min	2-3 mm	17 l/min	18-23 mm
2	136	7,0 m/min	0	25 cm /min	3 mm	20 l /min	18-23 mm
3	136	7,5 m/min	0	25 cm /min	6 mm	20 l /min	18-23 mm
4	136	7,5 m/min	0	25 cm /min	7 mm	20 l /min	18-23 mm
5	136	7,5 m/min	0	25 cm /min	9 mm	20 l /min	18-23 mm
6	136	7,5 m/min	0	20 cm /min	11 mm	20 l /min	18-23 mm
7	136	7,5 m/min	0	20 cm /min	11 mm	20 l /min	18-23 mm
8	136	7,5 m/min	0	15 cm /min	13 mm	20 l /min	18-23 mm

Taulukossa 4 on esitetty käsin hitsatun pohjapalon hitsausarvot. Hitsausarvot on esitetty ainoastaan pohjapalolle, koska täyttöpalkojen hitsausarvot oletetaan olevan samat kuin taulukossa 3 on esitetty. Käsinhitsatessa vapaalangan pituus on lyhyempi, koska polttimella pääsee lähemmäs railon pohjaa. Mekanisointilaitteen vaaputusliikkeen rajoitukset pakottavat pidempään vapaalankaan, joka on epäedullinen hitsaustuloksen kannalta. Mekanisointilaitteisto kykenee vaaputtamaan poltinta ainoastaan täysin horisontaalisesti, kun hitsaaja kykenee myös kallistamaan poltinta, jolloin railossa on enemmän liikkumavaraa.

Taulukko 4. Käsinhitsatun 30° railon pohjapalon hitsausparametrit.

Palko nro	Hitsaus-prosessi	Langansyöttö-nopeus	Fine tuning	Kuljetus-nopeus	Vaaputus-leveys	Kaasun virtaus	Vapaalangan pituus
1a	135 (WR+)	3,3 m/min	+5,0	25 cm/min	2-3 mm	17 l/min	14-18 mm
1b	135 (WR+)	4,0 m/min	-4,0	25 cm/min	1-2 mm	17 l/min	14-18 mm

Taulukossa 5 on esitetty juuritukea vasten hitsatun 30° railon hitsausparametrit. WiseRoot+:aan verrattuna täytelangalla hitsattaessa pohjapalkoon vaaditaan ainoastaan yhdet hitsausparametrit ja tarvetta hitsausparametrien vaihdolle kesken hitsausta ei ole tarvetta. Aikaisemmissa 30° railoissa ilmarako oli 4,0-4,5 mm, mutta juuritukea vasten ilmarakoa jouduttiin kasvattamaan 1 mm arvoon 4,5 – 5,0 mm.

Taulukko 5. Juuritukea vasten hitsatun 30° railon pohjapalon hitsausparametrit.

Palko nro	Hitsaus-prosessi	Langansyöttö-nopeus	Fine tuning	Kuljetus-nopeus	Vaaputus-leveys	Kaasun virtaus	Vapaalangan pituus
1	136	7,0 m/min	0	23 cm/min	2 mm	23 l/min	25-30 mm

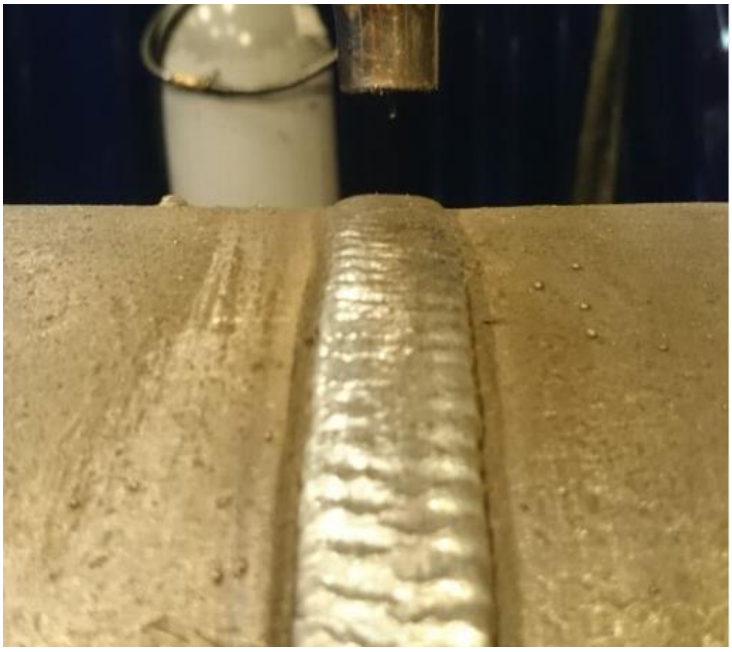
Taulukossa 6 on esitetty 60° asteen railokulmalla varustetun putkiliitoksen kaikki hitsausparametrit. Pohjapalko on hitsattu käsin WiseRoot+-prosessilla ja täyttöpalot MAG-hitsauksella käyttäen jauhetäytelankaa. Liitoksen ilmarako oli silloituksen jälkeen 2,0 – 2,5 mm ja siihen hiottiin käsin 1,0 – 1,5 mm juuripinta. 30° asteen railoissa juuripintaa ei tarvittu, koska jyrkän railoseinämän vuoksi railossa on riittävästi sulaa tukevaa perusmateriaalia pohjapalon hitsausta varten, mutta 60° asteen railossa se täytyy hioa liitokseen käsin.

Taulukko 6. 60° railokulman liitoksen hitsausparametrit.

Palko nro	Hitsaus-prosessi	Langansyöttö-nopeus	Fine tuning	Kuljetus-nopeus	Vaaputus-leveys	Kaasun virtaus	Vapaalangan pituus
1a	135 (WR+)	3,30 m/min	+5,0	25 cm/min	3-4 mm	17 l/min	18-23 mm
1b	135 (WR+)	4,0 m/min	-3,0	25 cm/min	2-3 mm	17 l/min	18-23 mm
2	136	7,0 m/min	0	25 cm/min	3 mm	20 l/min	18-23 mm
3	136	7,5 m/min	0	25 cm/min	5 mm	20 l/min	18-23 mm
4	136	7,5 m/min	0	20 cm/min	9 mm	20 l/min	18-23 mm
5	136	7,5 m/min	0	13 cm/min	15 mm	20 l/min	18-23 mm
6	136	7,5 m/min	0	20 cm/min	8 mm	20 l/min	18-23 mm
7	136	7,5 m/min	0	20 cm/min	8 mm	20 l/min	18-23 mm
8	136	7,5 m/min	0	20 cm/min	8 mm	20 l/min	18-23 mm
9	136	7,5 m/min	0	20 cm/min	8 mm	20 l/min	18-23 mm
10	136	7,5 m/min	0	20 cm/min	8 mm	20 l/min	18-23 mm
11	136	7,5 m/min	0	15 cm/min	8 mm	20 l/min	18-23 mm
12	136	7,5 m/min	0	15 cm/min	8 mm	20 l/min	18-23 mm
13	136	7,5 m/min	0	10 cm/min	15 mm	20 l/min	18-23 mm

7 KOKEIDEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Hitsauskokeita varten ei ollut valmiita WPS:iä tai pWPS:iä. Parametrihaku jouduttiin tekemään kokemukseen pohjautuen. Tavoitteena oli silmämääräisesti ja makrohietutkimuksen mukaan hyväksyttävä hitsi. Makrohiekuvasta tarkastettiin hitsin tunkeuma ja etsittiin mahdollisia liitosvirheitä sekä sulkeumia. Hitseille ei tehty rikkovaa aineenkoetusta tai muita tutkimuksia. Juha-Pekka Keltanen (2015) on tehnyt vuonna 2015 diplomityön ”Narrow Gap flux-cored arc welding of high strength shipbuilding steels” vastaavalla railokulmalla hitsatuista liitoksista, joille on tehty hyväksytty menetelmäkoe. Onnistuneen menetelmäkokeen pohjalta oletettiin, että tässä työssä sille ei ole tarvetta, vaan voidaan olettaa mekaanisten ominaisuuksien säilyvän hyväksyttävällä tasolla myös perinteisellä rakenneteräksellä. (Keltanen, 2015) Kuvassa 26 on esitetty 30° railokulmalla olevan hitsin pinta sekä pinnan profiili ja kuvassa 27 60° railokulmalla olevan liitoksen pinta sekä pinnan profiili. Täytelangalla pyrittiin hitsaamaan railot täyteen mahdollisimman pienellä palkolukumäärällä, joka aiheutti hitsin pintaan suomumaisen kuvion. Jos hitsille asetetaan hitsiluokkavaatimuksia tai muita laatuvaatimuksia, ei suomumainen hitsin pinta ole hyväksyttävä, jolloin vaaputusliikettä pitää kaventaa ja palkojen lukumäärää kasvattaa. Diplomityön tuottavuusvertailussa suomumainen hitsin pinta oli hyväksyttävä.



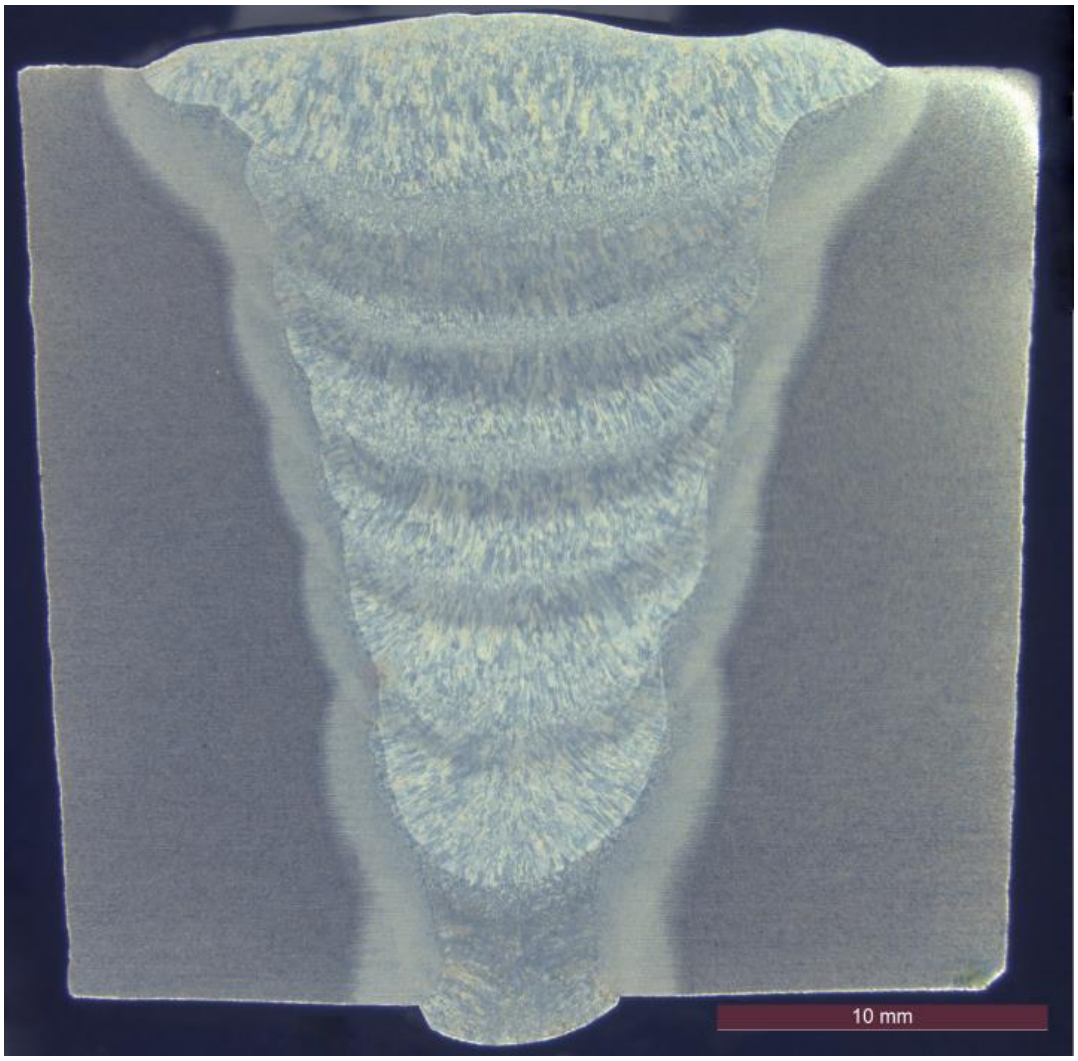
Kuva 26. 30° railokulmalla olevan hitsin pinta ja pinnan profiili.

Kuva 27. 60° railokulmalla olevan hitsin pinta ja pinnan profiili.

7.1.1 Makrohietutkimukset

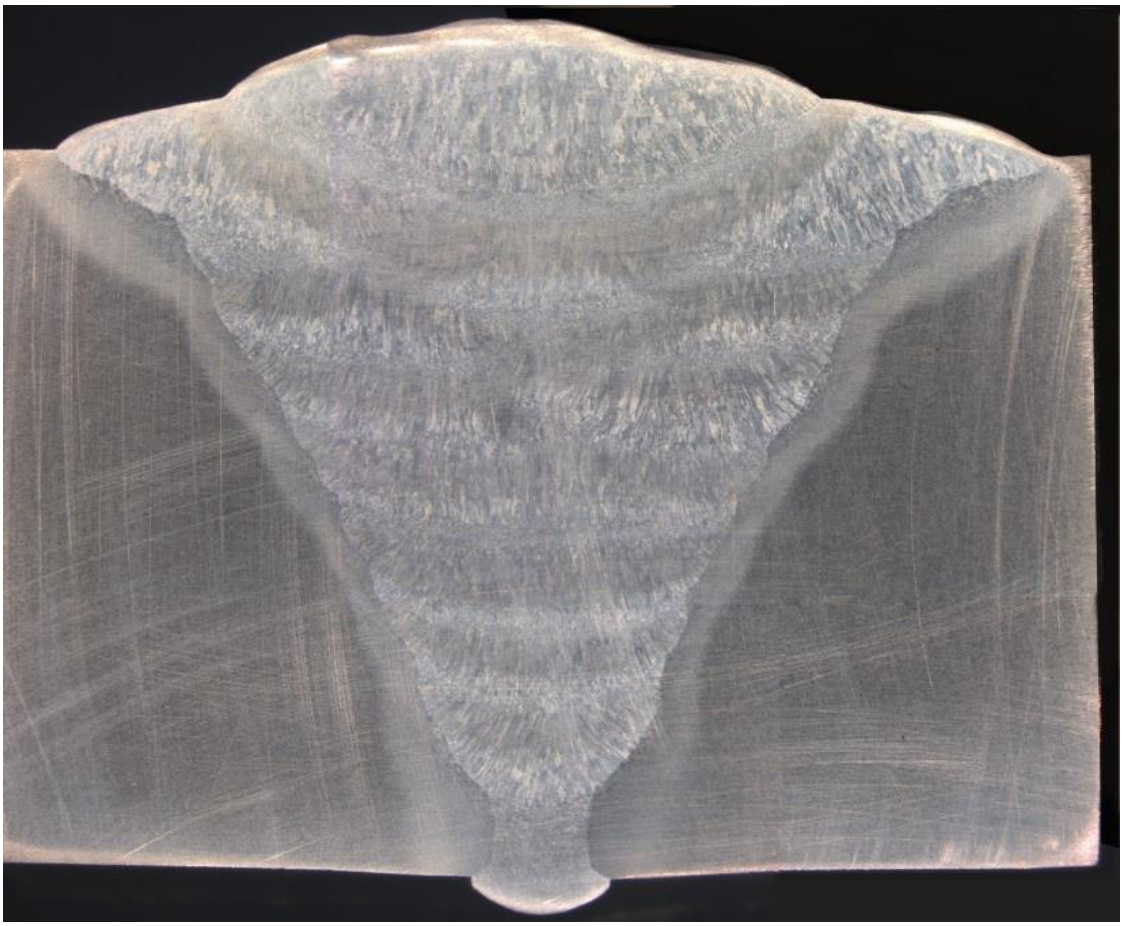
Hitseissä suurimmat haasteet liittyivät pohjapalon liittymän hallintaan ja jauhetäytelangalle tyypillisiin kuonasulkeumiin. Pohjapalon hitsausparametrien hakeminen vei paljon aikaa, mutta lopputulos on luotettava ja laadultaan erinomainen. Täyttöpalkojen osalta haasteet

liittyivät ainoastaan kuonasulkeumiin palkorajoilla. Kuonasulkeumien estämiseksi palkoja hiottiin ja hitsausvirtaa kasvatettiin. Lopullisia hitsausparametreja ei parannettu suurimman mahdollisen tuottavuuden ehdoilla, joten kehitettävää jäi tuotantohitsausta ajatellen. Hitsausvirheiden osalta 30° railo on oletetusti 60° railoa huomattavasti vaativampi. Kapeammassa railossa liitosvirheen riski on huomattavasti suurempi etenkin pohjapalossa ja suoritustekniikkaan kohdistuu tarkat vaatimukset onnistuneen lopputuloksen takaamiseksi. Erityisesti mekanisoitu juuripalon hitsaus vaatii tarkkaan testatun menetelmän ja sopivat hitsausvarusteet onnistuakseen. Käsinhitsatessa taitava hitsaaja pystyy mukautumaan sulan käytökseen ja suoritus on varmempi. Kuvassa 28 on esitetty 30° railon makrohiekuva, jossa pohjapalko on hitsattu käsin WiseRoot+-prosessilla ja täyttöpalot jauhetäytelangalla.



Kuva 28. 30° railolla hitsatun liitoksen makrohiekuva.

Kuvassa 29 on esitetty 60° railokulmalla hitsatun liitoksen makrohiekuva. Kuvan 28 ja kuvan 29 liitokset ovat muilta osin toisiaan vastaavat, mutta railokulma on kasvanut. Kasvanut railokulma heijastuu hitsin poikkileikkaukseen ja palkomäärään. Molemmissa makroihieissä materiaalivahvuus on sama 30 mm. Kuvassa 28 on asteikko, mutta kuvaan 29 sitä ei pystytty tehdä. Kuvan 29 makrohiekuva on koostettu neljästä eri kuvasta, koska makrokuvauslaitteiston optiikka asetti rajoitteita kuvattavan kappaleen koolle. Tästä syystä käytetty ohjelma ei suostu laittamaan mittakaavaa kuvaan.



Kuva 29. 60° railolla hitsatun liitoksen makrohiekuva.

Kuvan 28 hitsin poikkileikkaus on huomattavasti kapeampi kuin kuvassa 29 esitetyssä 60° railon makrohieessä, jonka juuri on hitsattu myös WiseRoot+-prosessilla ja täyttöpalot jauhetäytelangalla. Suoritusteknisesti hitsit on vertailukelpoiset, mutta poikkileikkaus ja hitsausaika eroavat merkittävästi toisistaan. Kapeammassa 30° railokulman liitoksessa hitsattiin 8 palkoa ja leveämmässä 60° railokulman liitoksessa hitsattiin 13 palkoa. Kapeammassa 30° liitoksessa palkomäärä on 39 % pienempi kuin perinteisessä 60° railokulman liitoksessa. Palkomäärän ero näkyi myös liitosten hitsausajassa. 30° liitoksen

hitsausaika on kokonaisuudessaan 4 h 58 min ja leveämmän 60° liitoksen hitsausaika on kokonaisuudessaan 7 h 55 min. Kokonaishitsausaika on kapeammalla 30° liitoksella 37 % lyhyempi kuin leveämmän 60° liitoksen. Kokonaishitsausajan muutos korreloi hyvin liitosten välisen palkomäärän muutoksella oletetusti. Korrelaatio oli oletettavissa, koska kokonaishitsausaika määräytyy suurelta osin hitsattavien palkojen lukumäärän pohjalta ja railogeometrian muutoksesta ei voida suoraan sanoa lopullista palkomäärää. Erityisesti ohuemmilla ainevahvuuksilla railogeometrian muutokset eivät välttämättä vaikuta palkolukumäärään ollenkaan, jolloin muutokset kokonaishitsausajassa jäävät pieniksi. Koska täyttöpalkojen hitsausparametrit ovat lähes samat kaikissa paloissa voidaan olettaa, että jokaisen palon kokonaisaika on sama. Tarvittavat esi- ja jälkityöstöt ovat samoja palkojen välillä ja täten kokonaishitsausaika kasvaa samassa suhteessa palkomäärän kanssa.

7.1.2 Hitsausajat

Kokeita hitsattaessa oletettiin, että pohjapalot ovat tilavuudeltaan saman suuruisia riippumatta pohjapalon hitsaustavasta. Täten voitiin olettaa myös täyttöpalkojen lukumäärän olevan sama ja täyttöpalkojen hitsausajan olevan sama kaikissa tapauksissa. Tällä saatiin pienennettyä hitsattavien kokeiden määrää merkittävästi. Taulukossa 7 on esitetty kaikkien hitsattujen kokeiden kokonaisaika, kaariaika ja kaariaikasuhde. Kaikissa 30° liitoksissa täyttöpalkojen hitsausajan oletetaan olevan sama.

Taulukko 7. Hitsauskokeiden kokonaishitsausaika, kaariaika ja kaariaikasuhde.

	Kokonaishitsausaika	Kaariaika	Kaariaikasuhde
30° railo, pohjapalko mekanisoidusti	301,03 min	60,95 min	20,25 %
30° railo, pohjapalko käsin	297,98 min	59,08 min	19,83 %
30° railo, pohjapalko juurituella	292,9 min	61,12 min	20,87 %
60° railo, pohjapalko käsin	474,98 min	116,15 min	24,45 %

Taulukosta 7 nähdään, että käsinhitsatulla pohjapalolla kaariaikasuhde muuttuu merkittävästi 30° ja 60° liitoksen välillä siten, että 60° liitoksen kaariaikasuhde on parempi. 30° liitos hitsattiin kokonaisuudessaan ensimmäisenä, joten 60° liitoksen kohdalla laitteiston käyttö ja tarvittavat asetukset sujuivat nopeammin. Voidaan olettaa, että 30° liitoksella päästään lähes samaan kaariaikasuhteeseen kuin 60° liitoksessa. Tällöin kokonaishitsausajan etu on vielä suurempi kapeammalla liitoksella. Olettaen, että 30° liitoksella saavutettaisiin sama kaariaikasuhde, putoaisi kokonaishitsausaika lähes tunnilla arvoon 4 tuntia ja 2 minuuttia alkuperäisestä 4 tunnista ja 58 minuutista. Tällä oletuksella 30° asteen liitoksen hitsaus on lähes 50 % nopeampaa kuin perinteisesti käytössä olevan 60° railokulman liitoksen. Molemmat liitokset ovat silmämääräisen tarkastelun ja makrohiekuvan perusteella hyväksyttäviä. Tarkkaa hitsiluokkavaatimusta ei diplomityön kohdalla asetettu hitseille. Putkityömailla kuitenkin vaatimuksena on usein jopa hitsiluokka B. Tuotantohitsausta varten tavoitteena tulisi olla hitsiluokka B tai C. Kapeamman 30° railokulman liitoksessa kokonaislämmöntuonti on myös huomattavasti pienempi palkomäärän takia, jonka merkitys korostuu erityisesti lujempia putkiteräksiä hitsattaessa.

7.2 pWPS

Diplomityön hitsauskokeista tehtiin yrityksen jatkokäyttöä varten pWPS:t, jotta putkihitsaussovelluksiin on pohjatietoa, jota voidaan tarvittaessa jalostaa asiakkaan tarpeita varten. pWPS on hyvä työkalu hitsauksessa ja se on erinomainen työkalu lopullista

WPS:ää tehdessä. pWPS ei kuitenkaan oikeuta hitsaamaan hyväksyttyjä hitsejä, vaan pWPS:n mukaiseen hitsiin pitää tehdä vaadittavat testaukset hyväksytysti, jotta se voidaan muuntaa menetelmäkokeen avulla WPS:ksi. Diplomityön teettäneen yrityksen käytössä riittää pelkät pWPS:t, koska hitsaukset koskevat ainoastaan laitteistojen testaamista, eikä lopullisten tuotteiden hitsausta. pWPS:ssä on kirjattu ylös kaikki hisauslaitteen hitsausparametrit ja kuljetusnopeus, joiden perusteella hitsausta voidaan tehdä.

pWPS-pohjassa ei ole valmista paikkaa kuljettimeen asetettaville parametreille, joten pWPS:n lisätietokenttään joudutaan kirjaamaan paljon tietoa tai tieto pitää siirtää seuraavalle käyttäjälle jossain muussa dokumentissa. Pelkillä hitsausparametreilla ja kuljetusnopeudella ei kuljettimen asetuksia kyetä asettamaan oikeiksi, jotta hitsi onnistuu. Lopullinen pWPS 30° ja 60° liitokselle, jossa pohjapalko hitsataan käsin on esitetty liitteissä 1 ja 2.

8 KUSTANNUSLASKELMAT

Kustannuslaskelmissa otetaan huomioon työ-, lisäaine- ja kaasukustannukset. Laskelmien kaavoja jouduttiin soveltamaan tapauskohtaisesti, koska ne eivät soveltuneet suoraan kokeiden kaikkiin tapauksiin.

8.1.1 Perusaine- ja kunnossapitokustannukset

Perusaine oli kaikissa hitseissä sama, joten sen kustannukset ovat lähes identtiset. Ero tulee pääasiassa koneistettavan railon aiheuttamasta materiaalihukasta, mutta sitä voidaan pitää mitättömänä osana perusmateriaalin hintaa. Lisäksi koneistustyön hinnassa ei ole merkittävää muutosta erilaisia viistekulmia koneistettaessa. Kokeissa käytettiin myös samaa hitsauslaitteistoa, joten kone- ja kunnossapitokustannukset ovat samat lukuun ottamatta koneen käyttötunteihin tulevaa eroa. Nämä jätettiin kuitenkin huomiotta, koska työssä on tarkoitus keskittyä railokulman aiheuttamiin materiaali- ja työkustannuksiin. Kunnossapidon eroa ei kuitenkaan voida järkevästi arvioida ja koneelle ei ole tuntikustannusta ilmoitettu sisäisessä käytössä. Alihankintaa tehdessä koneille kuitenkin määrätään tuntihinta, joten tällöin konekustannukset putoavat suhteessa hitsausaikaan.

8.1.2 Työkustannukset

Työkustannusten laskemiseen käytetään hieman muokattuja kaavoja kappaleesta 5, koska tiedossa on kaikkien hitsien ja työvaiheiden ajat, joten tuntikohtaisia kustannuksia voidaan kertoa suoraan käytetyllä ajalla. Taulukossa 8 on esitetty hitsauskokeissa hitsattujen liitoksien työkustannukset ja niiden laskentaan käytetyt muuttujat.

Taulukko 8. Hitsauskokeiden työkustannukset ja laskentaan käytetyt muuttujat.

	Tuntihinta [€/h]	Työaika [h]	Työkustannukset [€]
30° Liitos, pohjapalko mekanisoidusti	35 €/h	5,017 h	175,60 €
30° Liitos, pohjapalko käsin	35 €/h	4,966 h	173,81 €
30° Liitos juurituella	35 €/h	4,882 h	170,87 €
60° Liitos, pohjapalko käsin	35€/h	7,916 h	277,07 €

8.1.3 Suojakaasukustannukset

Suojakaasun kustannukset laskettiin soveltaen hitsauksesta kerättyä dataa ja kappaleessa 5 esitettyä laskukaavoja. Kaikista kokeita varten tehdyistä hitseistä on kerätty kaariaika ja tiedetään asetettu kaasuvirtaus. Laskennassa kaasukustannukset on laskettu kertomalla kaariajalla kaasuvirtaus ja kaasun hinta. Kaasua kuluu hitsauksen lisäksi myös esi- ja jälkikaasuina, mutta näiden ajat ovat mitättömiä. Esi- ja jälkikaasut ovat joitain sekunteja yhteensä ja yhden hitsin aika oli 2-5 min, joten esi- ja jälkikaasuja voidaan pitää mitättöminä. Suojakaasukustannuksia laskettaessa kaasuvirtauksena on käytetty arvoa 20 l/min, jota käytettiin täyttöpalkojen hitsauksessa. Pohjapalon hitsaus vei huomattavasti vähemmän aikaa, joten käyttämällä suurempaa virtausta, voidaan kompensoida esi- ja jälkikaasuaikoja. Taulukossa 9 on esitetty suojakaasukustannukset ja niiden laskennassa käytetyt muuttujat.

Taulukko 9. Suojakaasukustannukset ja niiden laskennassa käytetyt muuttujat.

	Kaasun litrahinta [€/l]	Kaasuvirtaus [l/min]	Kaariaika [min]	Suojakaasu-kustannukset [€]
30° Liitos, pohjapalko mekanisoidusti	0,0115 €/l	20 l/min	60,95 min	14,02 €
30° Liitos, pohjapalko käsin	0,0115 €/l	20 l/min	59,08 min	13,59 €
30° Liitos juurituella	0,0115 €/l	20 l/min	61,12 min	14,06 €
60° Liitos, pohjapalko käsin	0,0115 €/l	20 l/min	116,15 min	26,71 €

8.1.4 Lisäainekustannukset

Lisäainekustannusten laskennassa haasteena on täyttöpalkoihin käytetyn jauhetäytelangan kulutuksen laskeminen. Kappaleessa 5 esitetyt kaavat eivät sovellu suoraan jauhetäytelangalle, koska hitsiaineen tilavuudesta on haastavaa arvioida sulatettua lankamäärää. Jauhetäytelangan massasta iso osa on sisällä olevaa jauhetta, joka ei kuitenkaan muutu hitsiaineeksi langan sulaessa, vaan suojaavaksi kuonaksi. Langan hinnoittelu pohjautuu kuitenkin kilohintaan, jolloin vaadittaisiin lankavalmistajalta tietoa millä suhteella sulatettu lankakilo muuttuu hitsiaineeksi. Tätä tietoa Nittetsu ei kuitenkaan ole langasta kertonut, joten sulatettu lankamäärä jouduttiin arvioimaan eri menetelmällä. Lopulta menetelmäksi valittiin kaariajalla ja langansyöttönopeudella laskettu kulutettu lankamäärä metreissä ja punnitsemalla 20 m lankaa, jotta saadaan sulatettu kilomäärä. 20 m valikoitui punnittavaksi määräksi, koska se on kohtalaisen pieni määrä lankaa eikä aiheuta kustannuksia, mutta siinä kuitenkin kyetään pienentämään metrikohtaista virhettä langan painossa. Pohjapalko, joka hitsattiin umpilangalla, voidaan arvioida myös hitsimäärän perusteella käyttäen kappaleen 5 kaavoja, mutta yksinkertaisuuden ja mahdollisen sekoittumisen täyttöpalkojen kanssa takia sekin arvioitiin samalla menetelmällä kuin täyttöpalot. Taulukossa 10 on esitetty lisäainekustannusten laskennan muuttujat ja lopulliset kustannukset.

Taulukko 10. Lisäainekustannukset ja niiden laskennassa käytetyt muuttujat.

	Kaari-aika [min]	Langan-syöttö-nopeus [m/min]	Langan paino metriä kohden [kg/m]	Käytetty lanka-määrä [kg]	Lisäaineen kilohinta [€/kg]	Juurituen hinta [€]	Lisäaine-kustannukset [€]
30° Liitos, pohjapalko mekanisoidusti	30 min	3,7 m/min	0,00887 kg/m	0,98 kg	2 €/kg	0,00 €	1,96 €
30° Liitos, pohjapalko käsin	27 min	3,7 m/min	0,00887 kg/m	0,89 kg	2 €/kg	0,00 €	1,78 €
30° Liitos, pohjapalko juurituella	7,5 min	7,5 m/min	0,00736 kg/m	0,41 kg	4 €/kg	5,83 €	7,47 €
30° Liitos, täyttöpalot	237 min	7,5 m/min	0,00736 kg/m	13,08 kg	4 €/kg	0,00 €	52,32 €
60° Liitos, pohjapalko käsin	23 min	3,7 m/min	0,00887 kg/m	0,75 kg	2 €/kg	0,00 €	1,5 €
60° Liitos, täyttöpalot	418 min	7,5 m/min	0,00736 kg/m	23,07 kg	4 €/kg	0,00 €	92,28 €

Taulukosta 10 voidaan huomata, että pohjapalon hitsauksen lisäainekustannukset eivät vaihtele merkittävästi ja lisäainekustannusten osuus on lähes mitätön kokonaiskustannusten kannalta. Koska lisäainekustannukset ovat laskettu käyttäen kaariaikaa, muuttuvat ne samassa suhteessa kaariajan kanssa. Sama pätee myös taulukossa 10 laskettuihin kaasukustannuksiin, jossa käytetään kaariaikaa. Lähes kaikki hitsauksen kustannukset ovat sidonnaisia kokonaishitsausaikaan ja kaariaikaan. Railokulman muutos vaikuttaa suoraan hitsattavaan ainemäärään, joka vaikuttaa hitsausaikoihin. Tämä yhteys ei kuitenkaan ole

suoraviivainen. Erityisesti pienemmillä ainepaksuuksilla yhteys ei ole suoraviivainen, koska railotilavuutta merkittävämpi tekijä on vaadittu palkomäärä. Sama pätee myös paksuilla materiaaleilla, mutta niissä palkomäärä seuraa tarkemmin railotilavuutta.

8.1.5 Kokonaiskustannukset

Kokonaiskustannuksilla tarkoitetaan tässä tapauksessa kappaleissa 8.1.2, 8.1.3 ja 8.1.4 laskettuja osakustannuksia. Taulukossa 11 on esitetty yhdistetyt kustannuslaskelmat kaikille hitsatuille koetapauksille.

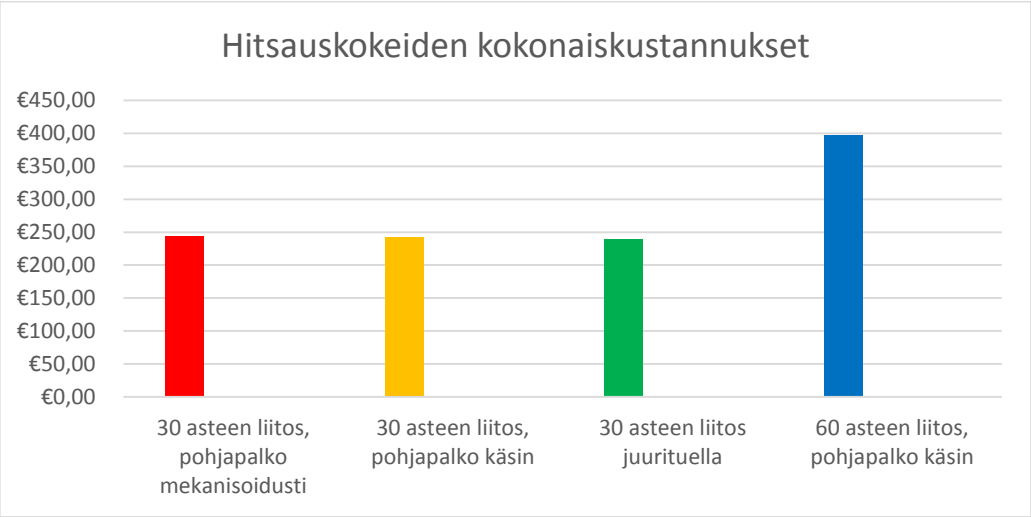
Taulukko 11. Hitsauskokeiden kokonaiskustannukset ja niiden muuttujat.

	Työ-kustannukset [€]	Kaasu-kustannukset [€]	Lisäaine-kustannukset [€]	Kokonais-kustannukset [€]
30° Liitos, pohjapalko mekanisoidusti	175,60 €	14,02 €	54,28 €	243,90 €
30° Liitos, pohjapalko käsin	173,81 €	13,59 €	54,10 €	241,50 €
30° Liitos juurituella	170,87 €	14,06 €	59,79 €	244,72 €
60° Liitos, pohjapalko käsin	277,07 €	26,71 €	93,78 €	397,56 €

Taulukosta 11 nähdään, että kokonaiskustannukset pienenevät merkittävästi halvimman kavennetun railon tapauksen ja perinteisen 60° railokulmalla olevan liitoksen välillä. Kokonaiskustannukset ovat noin 40 % pienemmät, jota voidaan pitää merkittävänä. Huomioitavaa on kuitenkin, että vaikka railokulma pieneni 66,7 %, kustannukset pienenivät vain 40 %. Pohjapalon hitsaus eri menetelmillä ei kuitenkaan säästänyt kustannuksia merkittävästi ja pohjapalon hitsauksen menetelmä tulee valita saatavilla olevien resurssien mukaan. Jos työmaalla on taitava hitsaaja, joka hitsaa käsin pohjapalot tasalaatuisesti ja varmasti, tulee menetelmä säilyttää. Mekanisoitu pohjapalon hitsaus on

haastava tapaus ja vaatii lähes täydellistä railovalmistusta, koska mekanisointilaitteisto ei kestä railon muutoksia erityisen hyvin, vaikka hitsausprosessi sen pystyisi paikkaamaan. Juurituen käyttäminen on erittäin hyvä ja varma tapa hitsata pohjapalko, jos se on mahdollista. Juurituen käyttö ei kuitenkaan ole mahdollista kaikilla työmailla. Esimerkiksi pitkiin putkilinjoihin ei keraamista juuritukea pystytä asentamaan, vaan niissä asia pitää ratkaista toisella tavalla.

Jos kokonaiskustannuksista verrataan keskenään vertailukelpoisia tapauksia, on kavennettu railo 39 % halvempi kuin perinteinen liitos. Kappaleessa 7 on mainittu, että voidaan olettaa, että kavennetulla 30° railokulmalla varustettu liitos kyetään hitsaamaan samalla kaariaikasuhteella kuin leveämpi 60° railokulman liitos. Tässä tapauksessa kustannukset putoavat kaariaikasuhteen kanssa samassa suhteessa ja 30° railokulmalla varustetun liitoksen, jossa pohjapalko hitsataan käsin, kustannukset putoavat 195,84 euroon. Tällöin kavennettu railo on 51 % halvempi kuin perinteinen 60° liitos. Kuvassa 30 on esitetty hitsattujen kokeiden kustannukset kuvaajassa.



Kuva 30. Hitsauskokeiden kokonaiskustannukset.

Jo taulukosta 11 näki, että leveämmän 60° railokulmalla olevan liitoksen hitsauskustannukset ovat merkittävästi suuremmat kuin kavennetulla railolla. Lisäksi kavennetun railon tapauksessa pohjapalon hitsausmenetelmällä ei saada merkittävää säästöä aikaiseksi, joten pohjapalon suoritusvarmuus on merkitsevä tekijä. Kuva 30 visualisoi saman vaikutuksen, jolloin ero on nähtävissä yhdellä silmäyksellä.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSAIHEET

Railokulmaa kaventamalla kyetään saavuttamaan merkittäviä kustannussäästöjä hitsaustöissä. Liitosta ei voida kuitenkaan MIG/MAG-hitsauksessa kaventaa paksuilla materiaaleilla loputtomasti, koska se kasvattaa hitsausvirheiden riskiä.

Railokulman kaventamisella saadaan liitoksen tilavuutta pienennettyä ja hitsattavan aineen tarve vähenee. Tämä säästää kaikissa hitsausaikaan liittyvissä kustannuksissa, koska usein liitoksen hitsaamiseen käytetty aika pienenee liitoksen kaventamisen myötä. Railokulman kaventamisella 60 asteesta 30 asteeseen saavutetaan merkittäviä säästöjä työ-, lisäaine- ja kaasukustannuksissa. Puhtaan liitoskohtaisen kustannussäästön lisäksi hitsattaessa tulee huomioida myös hitsauksen virheprosentti. Jos epäonnistuneiden liitosten määrä saadaan pidettyä kurissa ja liitoskohtaista kustannusta saadaan laskettua, saavutetaan kokonaissäästöjä. Hitsaavassa teollisuudessa tuleekin keskittyä kokonaissäästöihin, eikä pelkkiin liitoskohtaisiin säästöihin. Vaikka liitoskohtaisia säästöjä saavutettaisiin, mutta virhetaajuus kasvaa selkeästi, voi uusi menetelmä jäädä vanhaa merkittävästi kalliimmaksi korjaustöistä aiheutuneiden kustannusten myötä. Virhetaajuuteen ei kuitenkaan voi ottaa kantaa suoraan ilman laajamittaista hitsausmenetelmän testausta. Yksittäisellä kokeella saadaan tietoa vain yksittäistapauksesta ja sen myötä ei voida tarkasti ottaa kantaa menetelmän kykyyn sietää muutoksia olosuhteissa. Esimerkiksi ilmankosteus, lämpötila tai railonvalmistuksen tarkkuus voivat pienienkin muutosten myötä aiheuttaa ongelmia liitoksessa, jotka vaativat lisää korjaustyötä. Tästä syystä hitsauksen laatua tulee valvoa myös jatkossa, eikä luottaa yksittäiseen kokeeseen ja sen tuloksiin.

Railokulman kaventaminen kasvatti riskiä hitsausvirheiden osalta, joka oli myös odotettavissa jo ennen testejä. Kirjallisuuskatsauksen perusteella tuli selväksi, että kavennettu railo kasvattaa riskiä erityisesti liitosvirheen osalta. Hitsauskokeet onnistuttiin kuitenkin tekemään ilman liitosvirheitä, koska niiden torjumiseen kiinnitettiin huomiota kokeiden aikana. Liitosvirhettä torjuttiin esimerkiksi palkojen välisellä hionnalla, riittävän leveällä levitysliikkeellä ja käyttämällä riittävän isoa hitsaustehoa liitosvirhealueiden sulattamiseksi. Lisäksi käytössä oli Kempin modifioitu valokaariprosessi, jolla kyettiin kasvattamaan tunkeumaa ja estämään vapaalangan pitenemisen aiheuttama virran lasku.

Lopullisista koekappaleista ei löydetty liitosvirheitä, vaikka makrohieitä tehtiin useita. Hieistä kävi kuitenkin ilmi, että kuonasulkeumat olivat melko yleisiä täyttöpaloissa. Sulkeumien riski on aina olemassa jauhetäytelankoja käytettäessä ja niiden löytyminen liitoksista ei ollut yllätys. Liitosvirhettä kyetään torjumaan kasvattamalla hitsausnopeutta ja hitsaustehoa, jotta sula ei pääse vyörymään valokaaren eteen sekä suuri hitsausteho työntää kuonan ulos sulasta.

Muita hitsausvirheitä ei koekappaleista löytynyt, joten pWPS:n hitsausparametrit ovat lähellä lopullisia hitsausparametreja. Kuonasulkeumien torjuntaan tulee kuitenkin kiinnittää huomiota ja yrittää torjua niitä mahdollisuuksien mukaan. Kokeita hitsattaessa tuli myös selväksi, että pohjapalon hitsaus putkiin on haastavaa ja vaatii ammattitaitoa riippumatta hitsaustavasta. Pohjapalon hitsaus käsin on suoritusteknisesti vaativaa, mutta ammattitaitoiselle hitsaajalle pohjapalko ei ole liian suuri haaste. Mekanisoidusti pohjapalon hitsauksessa on paljon epävarmuustekijöitä ja erityisesti railonvalmistukseen ja laitteiston asettamiseen tulee kiinnittää erittäin paljon huomiota. Mekanisointilaitteisto ei kestä railonvalmistuksen vaihtelua lähes ollenkaan ja valokaaren keskitys railossa tulee olla kohdallaan koko hitsin ajan. Suurimmat haasteet mekanisoidussa juuren hitsauksessa olivat putken yläreunassa jalkoasennossa, koska tällöin valokaaren tunkeuma puskee sulan helposti läpi liitoksesta. Erityisen tärkeää on kiinnittää huomiota vaaputusparametreihin jalkoasennon läheisyydessä. Juurituen käyttö on varmaa ja tehokasta pohjapalkoa hitsattaessa, mutta keraamista juuritukea ei ole aina mahdollista asettaa pitkiin putkilinjoihin. Näissä tapauksissa tulee harkita esimerkiksi kiinteän juurituen koneistamista toiseen putkeen. Juurituki tuo hitsaukseen aina lisäkustannuksia. Keraaminen juurituki aiheuttaa metrikohtaisen kustannuksen ja sen asentaminen voi olla haastavaa. Kiinteä juurituki taas aiheuttaa materiaalihukkaa ja sen koneistaminen tuottaa kustannuksia. Putkien täyttöpalkojen hitsauksessa käytetään yleisesti kahta erilaista menetelmää. Täyttöpalot hitsataan joko jauhetäytelangalla ylämäkeen tai umpilangalla alamäkeen. Menetelmät eriävät merkittävästi toisistaan ja tässä työssä keskityttiin ainoastaan jauhetäytelangalla ylämäkeen hitsaukseen. Jauhetäytelangalla kyetään hitsaamaan puhtaalla kuumakaarella, joka torjuu liitosvirheen riskiä. Kääntöpuolena liitosvirheriskin pienenemiselle on kuonasulkeumariski. Umpilangalla ei kuonasulkeumia juuri synny, koska lanka ei itsessään tuota kuonaa.

Suoritettuihin kokeisiin jäi vielä kehitettävää yrityksen kannalta. Vaikka tehdyt koehitsit olivat pääsääntöisesti virheettömiä, pystyy hitsausmenetelmää kehittää vieläkin varmemmaksi. Kehitettävää jäi erityisesti pohjapalon hitsauksen varmuuteen sekä täyttöpalkojen tuottavuuden kasvattamiseen sekä kuonasulkeumariskin pienentämiseen. Selkeitä jatkokehitettäviä asioita hitsauskokeissa on:

- Hitsausnopeuden ja langansyöttönopeuden ylärajan etsiminen tuottavuuden kasvattamiseksi
- Kuonasulkeumariskin pienentäminen estämällä sulan vyöryminen valokaaren edelle
- Railonvalmistuksen kehittäminen siten, että mekanisoitu pohjapalon hitsaus olisi varma menetelmä
- Palkomäärän ja lämmöntuonnin optimointi
- Menetelmän testaus lujemmille putkiteräksille
- Umpilangalla täyttöpalkojen hitsauksen testaus
- Menetelmäkokeen tekeminen koekappaleista

Kokeet olivat talouspainotteisia, joten suorat jatkotutkimukset tämän asian tiimoilta on liian spesifejä asiakastapauksia. Osa jatkotutkimusaiheista liittyy edellä olevan listan asioihin. Erityisesti railokulman vaikutusta lujemmilla putkiteräksillä tulee tutkia, koska lujat putkiteräkset kasvattavat suosiotaan jatkuvasti. Myös orbitaalihitsauslaitteiden jatkokehitys adaptiiviseen suuntaan on tärkeä askel mekanisointiprojektien onnistumisen kannalta. Lisäksi pWPS ja WPS-dokumentaatiota tulisi kehittää mekanisoidulle hitsauksella soveltuvammaksi. Mekanisoidussa hitsauksessa kuljettimen parametrit ovat tärkeässä osassa onnistunutta kokonaissuoritusta ja tämänhetkiseen dokumentaatioon näitä ei suoraan voi liittää.

10 YHTEENVETO

Kirjallisuuskatsauksen perusteella orbitaalihitsaus on tunnettu ja vanha sovellus putkihitsauksen saralla. Orbitaalihitsaus mielletään usein TIG-hitsaukseksi, mutta paksujen putkilinjojen hitsauksessa MIG/MAG-hitsauksen ja orbitaalikuljettimen yleistyminen on ollut merkittävää. MIG/MAG-hitsauksella päästään merkittävästi suurempaan tuottavuuteen kuin TIG-hitsauksella ja sen hyödyntäminen on kannattavaa viimeistään, kun putken paksuus ylittää 5 mm. Tuottavan MIG/MAG-hitsauksen ja railokulman pienentämisellä kyetään ennestään tehostamaan prosessia ja pienentämään hitsausaikaa. Paksujen putkien hitsauksessa prosessin tehostaminen on äärimmäisen tärkeää putkilinjojen hitsauksessa.

Hitsauskokeissa hitsattiin kahta erilaista railokulmaa: perinteistä 60° railokulmaa sekä kavennettua 30° railokulmaa. WisePenetration- ja WiseFusion-prosessien yhdistäminen mahdollisti railokulman kaventamisen täyttöpaloissa. Tarkasti kohdistettu hitsausvalokaari, jonka hitsausvirta pysyy vakiona takaa virheettömän hitsaustuloksen. Kavennetun railon kohdalla tutkittiin erilaisia pohjapalon hitsausmenetelmiä. Pohjapalkoja hitsattiin käyttäen WiseRoot+-prosessia käsin ja mekanisoidusti sekä juuritukea käyttäen jauhetäytelangalla. Perinteinen leveämpi railo hitsattiin ainoastaan käsin WiseRoot+-prosessilla. Kaikki hitsausmenetelmät onnistuttiin suorittamaan hyväksyttävästi, mutta eri menetelmissä esiintyi kuitenkin käytännön haasteita, joihin tulee jatkossa kiinnittää huomiota.

Diplomityössä onnistuttiin tutkimaan railokulman kaventamisen ja modifioitujen valokaariprosessien yhdistämisellä saavutettavia kustannussäästöjä. Kustannussäästöt ovat sidonnaisia lyhentyneeseen hitsausaikaan lähes lineaarisesti, joten kaikki hitsausaikaa lyhentävät toimet tulee ottaa käyttöön hitsaavassa teollisuudessa, jos ne eivät kasvata hitsauksen virhetaajuutta. Yhdistämällä modifioitu valokaariprosessi ja kavennettu railokulma, saavutettiin hitsauksessa jopa 50 % kustannussäästöjä, joita voidaan pitää teollisuuden kannalta erittäin merkittävänä säästönä. Lisäksi järjestelmän käytön helppous tukee järjestelmän käyttöönottoa hitsaavassa teollisuudessa.

LÄHTEET

Agrawal, B.P. & Ghosh, P.K. 2010. Thermal Modeling of Multipass Narrow Gap Pulse Current GMA Welding by Single Seam per Layer Deposition Technique. Materials and Manufacturing Processes, Volume 25. s. 1251-1268.

Air Liquide. 2009. Teollisuuskaasut. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.8.2015]. Saatavissa: http://www.airliquide.fi/file/otherelement/pj/6b/c9/b9/bf/2011-11%20teollisuuskaasuesite6236653299051886302.pdf

Arc Machines Inc. 2015a. Model 79 Series. Full-Function Weld Heads. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 23.4.2015]. Saatavissa: http://www.arcmachines.com/sites/default/files/product-brochures/M79_E.pdf

Arc Machines Inc. 2015b. Soudage TIG orbital du systme de propulsion d'un satellite. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.4.2015]. Saatavissa: http://www.arcmachines.com/node/1951

AWS. 1999. Design and Planning Manual for Cost-Effective Welding. United States of America: American Welding Society. 137 s.

AWS. 2001. Welding Handbook. Volume 1. Ninth Edition. United States of America: American Welding Society. 894 s.

Bishop, M. 2008. Welding more with less. The FABRICATOR. 2/2008. s. 38-39.

Cui, H.C. Jiang, Z.D. Tang, X.H. & Lu, F.G. 2014. Research on narrow-gap GMAW with swing arc system in horizontal position. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 74. s. 297-305.

Egerland, S. 2012. Controlled Gas Metal Arc Welding Processes an Assessment on Development. PetroMin PIPELINER. 3/2012. s. 34-49,

Emmerson, J. 1997. Welding Pipe with GMAW and FCAW. Tube & Pipe Journal, January/February 1997.

Emmerson, J. 1999. Multipass Orbital Welding of Pipe. The Tube & Pipe Journal, Vol 10, January/February 1999.

Emmerson, J. 2000a. Considering GMAW FCAW for Orbital Applications. Practical Welding Today. May/June 2000.

Emmerson, J. 2000b. Orbital Narrow Gap MCW Pipe Welding. Welding & Metal Fabrication. September 2000.

ESAB. 2015. OK AutRod 12.51. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.8.2015.] Saatavissa: http://www.esab.fi/fi/fi/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410121&tab=2

EWM. 2013a. forceArc / forceArc puls. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: https://www.ewm-group.com/en/innovationen/migmag.html

EWM. 2013b. coldArc® / coldArc puls. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: https://www.ewm-group.com/en/innovationen/migmag.html

Ghosh, P.K. Devakumaran, K. & Pramanick, A.K. 2010. Effect of Pulse Current on Shrinkage Stress and Distortion in Multipass GMA Welds of Different Groove Sizes. Welding Journal, Volume 89. s. 43-53.

Goecke, S.F. 2005. Low Energy Arc Joining Processes for Materials Sensitive to Heat. EWM HIGHTEC WELDING GmbH, Mündersbach. 5 s.

Hicken, G.H. 1993. ASM Handbook. Volume 6. Welding, Brazing, and Soldering. USA. 1389 s.

Häßler, M. Rose, S. Füssel, U. & Schneider, H.I. 2015. TIG narrow gap welding – new approaches to evaluate and improve the shielding gas coverage and the energy input. Weld World. Volume 59. s. 71-76.

Industria webshop. 2015. Hitsauslanka OK Aristorod 12.50 Esab. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 7.5.2015]. Saatavissa: http://webshop.industriacenter.fi/product/176/hitsauslanka-ok-aristorod-1250-esab

Iwata, S. Murayama, M. & Kojima, Y. 2008. Application of Narrow Gap Welding Process with High Speed Rotating Arc to Box Column Joints of Heavy Thick Plates. JFE GIHO. Volume 21. s. 15-19.

Keltanen, J-P. 2015. Narrow Gap flux-cored arc welding of high strength shipbuilding steels. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 121 s.

Kemppi. 2013a. Kemppi tänään. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/en/akp.nsf/frameset/frameset?opendocument&refquery=http%3A//www.kemppi.com/inet/kemppi/fi/akp.nsf/WEB_Nav%3Fopenview%26cat%3DKemppi%26expand%3D10&main=/inet/kemppi/contman.nsf/0/95C80EAA5FCDB5A2C22571950036CC4D

Kemppi. 2013b. 1949. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/en/akp.nsf/frameset/frameset?opendocument&refquery=http%3A//www.kemppi.com/inet/kemppi/fi/akp.nsf/WEB_Nav%3FOpenView%26cat%3DKemppi&main=/inet/kemppi/contman.nsf/0/89D204394E9B4DAAC22571950038AD42

Kemppi. 2013c. 2000-luku. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.4.2015]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/en/akp.nsf/frameset/frameset?opendocument&refquery=http%3A//www.kemppi.com/inet/kemppi/fi/akp.nsf/WEB_Nav%3Fopenview%26cat%3DKemppi%26expand%3D4&main=/inet/kemppi/contman.nsf/0/319F29B16EE2202AC225719500377CDF

Kemppi. 2013d. Ratkaisuliiketoiminta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.4.2015]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/fi/akp.nsf/frameset/Frameset?OpenDocument&left=/inet/kemppi/fi/akp.nsf/WEB_Nav?OpenView&navcat=Solutions&main=/inet/kemppi/contman.nsf/0/00D30A5575D582DFC22576420038E812?opendocument&top=/inet/kemppi/fi/akp.nsf/Top?ReadForm&topcat=Solutions

Kemppi. 2015. FastMig X. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.8.2015]. Saatavissa: http://fastmigx.kemppi.com/

Kemppi a. WiseFusion-koulutusmateriaali. [Viitattu 20.5.2015]. Saatavissa: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Kemppi b. Uudet Modifioidut kaarihitsausprosessit-koulutusmateriaali. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Kemppi c. WisePenetration-koulutusmateriaali. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Kemppi d. WiseRoot+-koulutusmateriaali. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Kemppi e. WiseThin+-koulutusmateriaali. [Viitattu 21.5.2015]. Saatavissa: Intranet yrityksen sisäisessä käytössä, vaatii salasanan.

Lorch. The Principle Quality. 148s. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 20.5.2015]. Saatavissa: http://www.lorch.biz/fileadmin/blaetterkatalog/Industriebuch_EN_Auflage4/blaetterkatalog/pdf/complete.pdf

Lukkari, J. 2011. Kapearailojauhekaarihitsaus järeiden paineastioiden valmistuksessa. Hitsaustekniikka. 3/2011. s. 15-18.

Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka – Perusteet ja kaarihitsaus. 4. Tarkastettu painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 292 s.

Lukkari, J. 2005. Orbital-TIG – a great way to join pipes. Svetsaren. 1/2005. s. 3-6.

Magnatech. 2015a. WELD HEADS 800 SERIES. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.11.2015]. Saatavissa: http://www.magnatechllc.com/head-800-series.php

Magnatech. 2015b. PIPELINER II WELD HEAD. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.4.2015]. Saatavissa: http://www.magnatechllc.com/images/products/pipeliner-lg.png

Mannion, B. & Heinzman, J. 1999. Orbital Tube Welding. Flow Control. December 1999.

Norrish, J. 2013. Process Modification in Gas Metal arc Welding for Enhanced Performance. Australasian Welding Journal, Volume 58. s. 33-38.

NST. 2010. NSSW SF-3AM. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.8.2015]. Saatavissa: http://nst.no/produkter/r%C3%B8rtrader/lavlegert-r%C3%B8rtrad/nittetsu-sf-3am/

PW-Tools. Viistekoneet putkelle. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.8.2015]. Saatavissa: http://www.pwtools.fi/viistekoneet_putkelle.php

Rosado, T. Almeida, P. Pires, I. Miranda, R. & Quintino, L. 2008. Innovations in Arc Welding. 18s.

SFS-EN ISO 5817. 2014. Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (Paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat. Helsinki: suomen Standardoimisliitto SFS. 60s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN ISO 6947. 2011. Hitsit. Hitsausasennot. Helsinki: suomen Standardoimisliitto SFS. 43s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

Stenbacka, N. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. 1. painos. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. 159 s.

Turun Hitsauskone Oy. 2015. Haponkestävä 316L 1.0mm 12.5kg mig-hitsauslanka. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 7.5.2015]. Saatavissa: http://www.hitsikauppa.fi/haponkestava-316l-10mm-125kg-mighitsauslanka-p-1174.html

TWI. 2015. What is narrow gap welding?. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.5.2015]. Saatavissa: http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-narrow-gap-welding/

Westermans. 2010. Full Function in Place Orbital Pipe Welding Heads. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 23.4.2015]. Saatavissa: http://www.westermans.com/downloads/ffip_datasheet.pdf

Yapp, D. & Blackman, S.A. 2004. Recent Developments in High Productivity Pipeline Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Volume 26. s. 85-97.

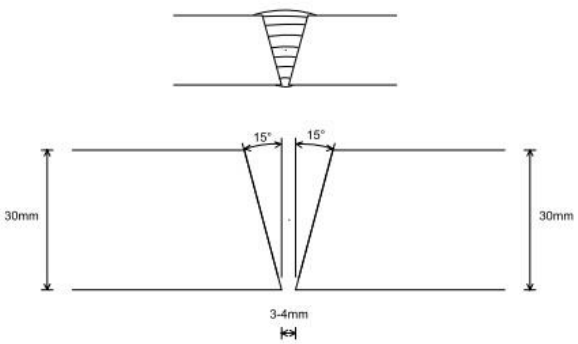
pWPS 30° liitokselle, jossa pohjapalko on hitsattu käsin.

KEMPPI The Joy of Welding	PRELIMINARY WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (pWPS)	pWPS no: K-orbital 003 Ref.: Date: Rev: 1

Prod. by:	Niki Lankila	Client:	Kemppi	Ref. stand:	EN ISO 15609-1
Project:	General	Ref. spec.:		Exam. body:	Kemppi
Location:	Lahti	Ref. Proc.:			

Welding process	1	135	2	136	3	
Shielding gas type		Ar+18%CO2		Ar+18%CO2		
Weaving (yes/no)		Yes max: 4 mm		Yes max: 13 mm		max: mm

Purging gas type	l/min
Welding positions	PG PF
Joint type	BW
Joint preparation	Machining
Cleaning method	Brushing
Backing	nb
Single/Double	Single side welding
Back gouging	
Flux designation	
Flux handling	
Tungsten electrode	mm
Torch angle	15 °
Stand off distance	mm
Nozzle diameter(s)	mm
Tack welding proc.	Rev:



Identification of parent metal I: CE max: C max: PCM max: II: CE max: C max: PCM max:

Part	Name/Grade	Standard	Group	Delivery cond.	Thickness range [mm]	Diameter range [mm]
I	S355 J2H	EN 10216-3	1.2		28,00 - 32,00	350,00 - 360,00
II					-	-

Identification of filler metal

Index	Trade name	Classification	Group	Filler handling
1	OK Autrod 12.51	ISO 14341-A G3Si1		
2	Nittetsu SF3-AM	ISO 17632-A T 46 2 Z P M 2 H5		
3				

Welding Parameters Equipment: FastMig X

Pass no.	Index	Dia. [mm]	Welding process	Wire feed speed [m/min]	Current [A]	Voltage [V]	Current / Polarity	Transfer Mode	Welding speed [mm/min]	Run Out Length [mm]	Gas [l/min]	Heat input [kJ/mm]
1a		1,20	135	3,20 - 3,40	130 - 170	13,0 - 15,5	DC+		350, - 400,	18-23	13-15	0,2 - 0,4
1b		1,20	135	3,90 - 4,10	170 - 210	11,0 - 14,0	DC+		320, - 360,	18-23	13-15	0,2 - 0,4
2		1,20	136	6,90 - 7,10	175 - 210	19,0 - 22,0	DC+		280, - 300,	18-25	15-18	0,5 - 0,8
3-4		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		280, - 300,	18-25	15-18	0,6 - 0,8
5-7		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		280, - 300,	18-25	15-18	0,6 - 0,8
8		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		240, - 260,	18-25	15-18	0,6 - 1,0
				-	-	-			-			-
				-	-	-			-			-
				-	-	-			-			-

Heat treatment Method: Room temperature

Preheat min: 20 °C Interpass temp. max: °c Heat treatment proc.: Temp. control:

PWHT min: °C max: °C Soaking: min/mm min Heating rate: °C/h Cooling rate: °C/h

Remarks:
-Root pass is welded by hand and other passes with orbital equipment
-Passes 1a and 1b are welded with WiseRoot+. 1a is first 60 degrees and 1b the rest
1a FineTuning +9,0 1b FineTuning -7,0
-Passes 2-8 WiseFuison 20% WisePenetration 0%

Additional info enclosed (Yes/No):

Date/Signature:

Approved:

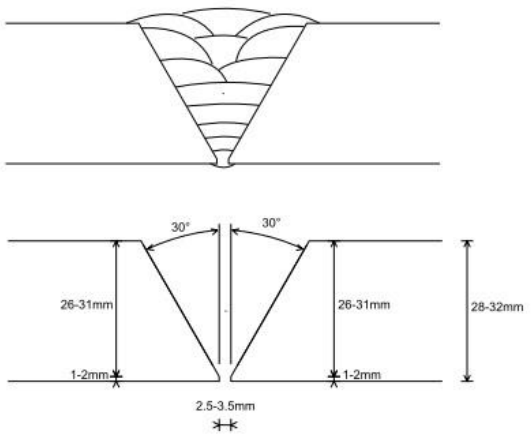
pWPS 60° liitokselle, jossa pohjapalko on hitsattu käsin.

KEMPPI The Joy of Welding	PRELIMINARY WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (pWPS)	pWPS no: K-orbital 004 Ref.: Date: Rev: 1

Prod. by:	Niki Lankila	Client:	Kemppi	Ref. stand:	EN ISO 15609-1
Project:	General	Ref. spec.:		Exam. body:	Kemppi
Location:	Lahti	Ref. Proc.:			

Welding process	1	135	2	136	3	
Shielding gas type		Ar+18%CO2		Ar+18%CO2		
Weaving (yes/no)		Yes max: 4 mm		Yes max: 15 mm		max: mm

Purging gas type	l/min
Welding positions	PF PG
Joint type	BW
Joint preparation	Machining
Cleaning method	Brushing
Backing	nb
Single/Double	Single side welding
Back gouging	
Flux designation	
Flux handling	
Tungsten electrode	mm
Torch angle	15 °
Stand off distance	mm
Nozzle diameter(s)	mm
Tack welding proc.	Rev:



Identification of parent metal I: CE max: C max: PCM max: II: CE max: C max: PCM max:

Part	Name/Grade	Standard	Group	Delivery cond.	Thickness range [mm]	Diameter range [mm]
I	S355 J2H	EN 10216-3	1.2		28,00 - 32,00	350,00 - 360,00
II					-	-

Identification of filler metal

Index	Trade name	Classification	Group	Filler handling
1	OK Autrod 12.51	ISO 14341-A G3Si1		
2	Nittetsu SF3-AM	ISO 17632-A: T46 4 Z P M 2 H5		
3				

Welding Parameters Equipment: FastMig X

Pass no.	Index	Dia. [mm]	Welding process	Wire feed speed [m/min]	Current [A]	Voltage [V]	Current / Polarity	Transfer Mode	Welding speed [mm/min]	Run Out Length [mm]	Gas [l/min]	Heat input [kJ/mm]
1a		1,20	135	3,20 - 3,40	130 - 170	13,0 - 15,5	DC+		350, - 400,	16-22	13-15	0,2 - 0,4
1b		1,20	135	3,90 - 4,10	170 - 210	11,0 - 14,0	DC+		320, - 360,	16-22	13-15	0,2 - 0,4
2		1,20	136	6,90 - 7,10	175 - 210	19,0 - 22,0	DC+		280, - 300,	18-25	15-20	0,5 - 0,8
3-4		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		280, - 300,	18-25	15-20	0,6 - 0,8
5		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		250, - 270,	18-25	15-20	0,6 - 0,9
6-7		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		280, - 300,	18-25	15-20	0,6 - 0,8
8-10		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		220, - 250,	18-25	15-20	0,7 - 1,1
11-		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		200, - 230,	18-25	15-20	0,7 - 1,2
13		1,20	136	7,00 - 8,00	185 - 220	19,0 - 22,0	DC+		150, - 180,	18-25	15-20	0,9 - 1,5

Heat treatment Method:

Preheat min: °C Interpass temp. max: °c Heat treatment proc.: Temp. control:

PWHT min: °C max: °C Soaking: min/mm min Heating rate: °C/h Cooling rate: °C/h

Remarks:
-Root pass is welded by hand and other passes with orbital equipment
-Passes 1a and 1b are welded with WiseRoot+. 1a is first 60 degrees and 1b the rest
1a FineTuning +5,0 1b FineTuning -3,0
-Passes 2-13 WiseFuison 20% WisePenetration 0%

Additional info enclosed (Yes/No):

Date/Signature:

Approved: