LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

KAARITYYPIN JA SUOJAKAASUN VAIKUTUS ROISKEISUUTEEN TERÄKSEN MAG-HITSAUKSESSA

INFLUENCE OF ARC TYPE AND SHIELDING GAS TYPE TO SPATTERING IN MAG-WELDING OF STRUCTURAL STEEL

Niko Hyppänen, 27.3.2015
Tarkastaja: Professori Jukka Martikainen

SISÄLLYSLUETTELO

SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1 JOHDANTO 5
1.1 Työn tausta 5
1.2 Työn tavoite ja rajaus 5
2 MAG-HITSAUS 7
2.1 Menetelmä ja laitteisto 7
2.2 Edut ja rajoitukset 12
2.3 Suojakaasut 13
2.3.1 Hiilidioksidi 15
2.3.2 Happi 15
2.3.3 Argonpohjaiset suojakaasut 15
2.4 Kaarityypit 16
2.4.1 Lyhytkaari 17
2.4.2 Sekakaari 17
2.4.3 Pulssikaari 18
2.4.4 Kuumakaari 19
2.5 Modifioidut kaarityypit 20
2.5.1 Kemppi WiseFusion™ 20
3 VIRHEET JA ROISKEISUUS MAG-HITSAUKSESSA 22
3.1 Roiskeisuus 22
4 KOKEELLINEN OSUUS 26
4.1 Hitsausparametrit 28
4.1.1 Hitsausenergia ja lämmöntuonti 30
5 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI 32
5.1 Roiskeisuuden analysointi 32
5.2 Tunkeuman analysointi 37
6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSAIHEET 40
7 YHTEENVETO 42

LÄHTEET **44**

LIITTEET

Liite I: Ainestodistus

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

E	Hitsausenergia [kJ/mm]
I	Hitsausvirta [A]
k	Terminen hyötysuhde hitsauksessa
Q	Lämmöntuonti [kJ/mm]
t	Aika [s; ms]
U	Jännite [V]
v	Hitsausnopeus [mm/s; cm/min]

Ar	Argon
CO_2	Hiilidioksidi
CMT™	Cold Metal Transfer, Froniuksen erikoiskaarisovellus
IAC™	Intelligent Arc control, Migatronic:n erikoiskaarisovellus
He	Helium
MAG-hitsaus	Kaasukaarihitsaus aktiivisella suojakaasulla, Metal Active Gas Welding
MIG-hitsaus	Kaasukaarihitsaus inertillä suojakaasulla, Metal Inert Gas Welding
Mn	Mangaani
O_2	Happi
PA	Jalkoasento
Si	Pii
STT™	Surface Tension Transfer, Lincoln Electric:n kehittämä erikoiskaarisovellus
T.I.M.E.	Erikoishitsaussovellus, Transferred Ionised Molten Energy
135	Umpilanka MAG-hitsauksen numerotunnus

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan suojakaasun ja kaarityypin vaikutusta roiskeisuuteen teräksen MAG-hitsauksessa (Metal Arc Gas Welding). Tämän työn kokeet suoritetaan Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa. Työssä käsitellään MAG-hitsauksen teoriaa, roiskeisuutta sekä esitellään kokeellinen osuus. Saatuja koetuloksia analysoidaan ja vertaillaan työn lopussa löydettyihin teorioihin ja pohditaan mahdollisia syitä roiskeisuuden syntyyn. Teoriaosuudessa käsitellään MAG-hitsausta menetelmänä, sen laitteistoa, etuja ja rajoituksia, tyypillisimpiä suojakaasuja ja kaarityyppejä sekä esitellään nykyaikaisia modifioituja hitsaussovelluksia. Kokeellisessa osuudessa esitellään koejärjestelyt, käytetyt parametrit ja laitteet sekä mahdollisia huomioita kokeiden suorittamiseen liittyen.

1.1 Työn tausta

Teollisuudessa MIG/MAG-hitsaus on merkittävässä roolissa tuotteiden valmistuksessa. Laadun merkitys kasvaa lainsäädännön, asiakasvaatimusten ja standardein kiristymisen myötä, jolloin tuotteiden valmistuksessa sallitaan entistä vähemmän hitsausvirheitä. Hitsausvirheitä sallitaan tuotteissa, mutta niiden sallittavuus eri hitsiluokissa riippuu niiden tyypistä, koosta, luonteesta ja määrästä. Roiskeisuus ei ole vaarallisin hitsausvirhe, mutta se on silti suuri ongelma teollisuudessa johtuen siitä aiheutuvasta jälkityöstöstä. Roiskeisuus aiheuttaa ongelmia lopulliseen hitsiin, jos suuri määrä isoja roiskeita jää railon pinnalle hitsipalkojen väliin. Roiskeisuus aiheuttaa eniten ongelmia visuaalisella puolella, sillä roiskeiden ollessa liian suuria, joudutaan ne hiomaan pois ja kappaleen pinta joudutaan viimeistelemään uudestaan. Hiominen ja pinnan viimeistely on aikaa vievää ja se lisää huomattavasti tuotteen valmistusaikaa, sekä tuo lisäkustannuksia. Roiskeita voidaan vähentää optimaalisilla työolosuhteilla, hitsausparametreilla, materiaali- ja suojakaasuvalinnoilla.

1.2 Työn tavoite ja rajaus

Harjoitustyössä tutkitaan roiskeiden muodostumista teräksen MAG-hitsauksessa. Työssä keskitytään vain teräksen MAG-hitsaukseen (nro. 135). Roiskeisuuden tutkimisessa käytetään kolmea (3) eri kaarityyppiä ja kahta (2) eri suojakaasua. Tutkittavat kaarityypit

ovat kuumakaari, pulssikaari, sekä Kemppi Oy:n erikoiskaarisovellus WiseFusion™. MAG-hitsauksessa käytettävien suojakaasujen tulee olla sulan kanssa reagoivia aktiivisia kaasuja. Tutkittavat suojakaasut ovat kolmikomponenttisuojakaasu, AGAn Corgon 3, jonka koostumus on Ar (argon) + 5 % O_2 (happi) + 5 % CO_2 (hiilidioksidi) ja yleisesti teollisuudessa käytetty argon-pohjainen aktiivisuojakaasu Mison 18, Ar + 18 % CO_2. Materiaali, jota käytetään kokeissa roiskeisuuden tutkimiseen, on tavallinen rakenneteräs (S355 MC). Työn tavoitteena on tutkia ja selvittää mahdollisia syitä ja ratkaisuja roiskeiden muodostumiselle ja niiden vähentämiselle. Käytännön kokeissa pyritään selvittämään suojakaasujen ja kaarityyppien yksittäisiä ja keskinäisiä vaikutuksia roiskeiden muodostumiseen. Tulosten perusteella pyritään luomaan jonkinlainen arvio mikä aiheuttaa roiskeisuutta ja mikä vähentää niitä. Työssä tehtävissä hitsauksissa ei pyritä hitsaamaan minkään hitsiluokan sallimien virheiden ja vaatimusten mukaan, vaan tavoitteena on saavuttaa kuusi (6) onnistunutta hitsiä ja tutkia edellä kuvailtua ongelmaa niiden pohjalta.

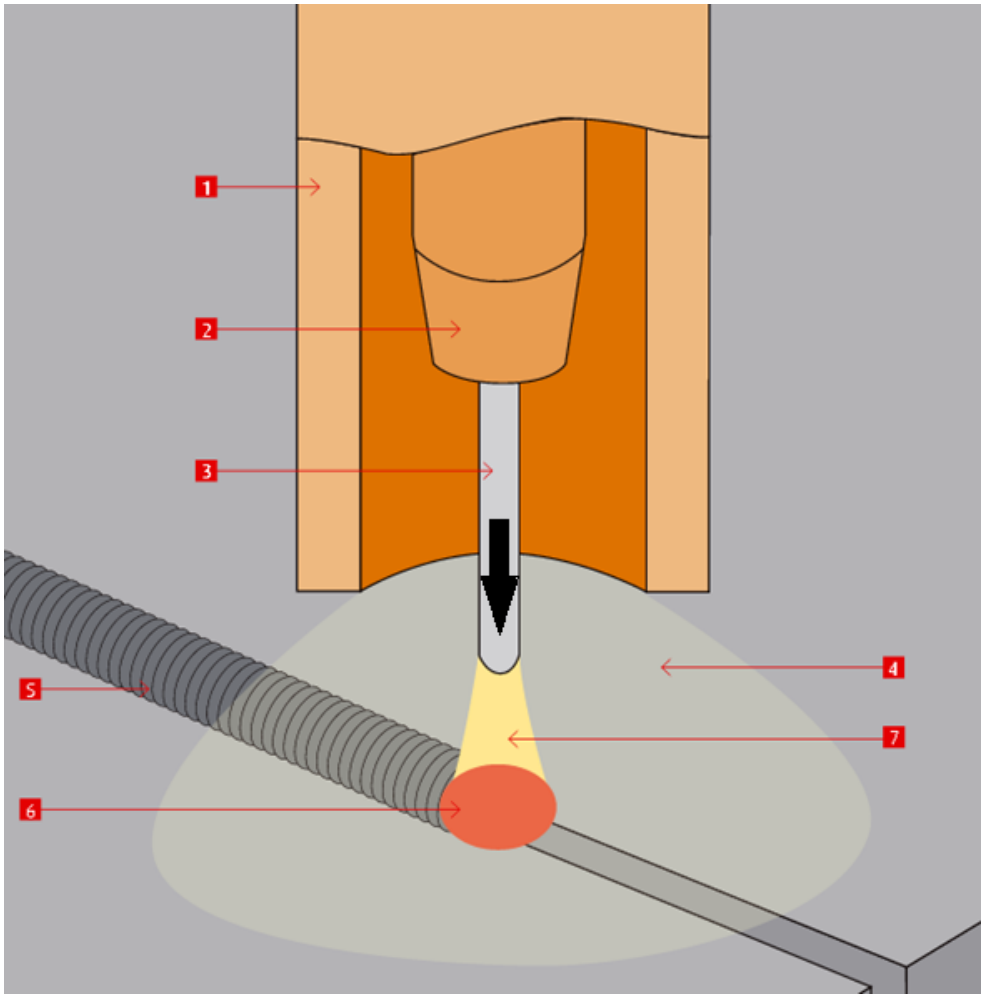
Käytännön kokeissa materiaali ja asento pysyvät koko ajan samana. Suojakaasuista ja kaarityypeistä muodostetaan yhteensä kuusi (6) erilaista yhdistelmää, joita vertaillaan ja analysoidaan harjoitustyön lopussa. Roiskeisuus määritellään erikseen, joka helpottaa roiskeisuuden tutkimista ja roiskeiden mekaanista laskemista työkappaleesta. Kokeellisen osuuden hitsaukset suoritetaan mekanisoidusti puomilla alapienana jalkoasennossa (PA). Mekanisoinnin avulla hitsausnopeus ja polttimen etäisyys saadaan pidettyä mahdollisimman vakioituna kaikkien kuuden eri hitsauskokeen ajan.

2 MAG-HITSAUS

MAG-hitsaus on yksi kaasukaarihitsausprosesseista, joka kuuluu nykyisin yleisimpiin hitsausprosesseihin. Hitsausprosessissa käytetään sulan kanssa reagoivaa aktiivista suojakaasua (Metal-arc Active Gas Welding) ja prosessi soveltuu seostamattomien ja niukkaseosteisten terästen hitsaamiseen. MAG-hitsauksen yleistymiseen on vaikuttanut prosessille tyypillinen riittoisa ja automaattisyöttöinen lisäaine, sekä hitsausprosessin mekanisoinnin ja automatisoinnin helppous. (ESAB, 2014.)

2.1 Menetelmä ja laitteisto

Kaasukaarihitsauksessa kappaleiden sulattaminen ja yhteen liittäminen tapahtuu valokaaren avulla, joka palaa lisäainelangan ja työkappaleen välissä suojakaasuvirtauksen sisällä. Lisäainelankaa syötetään automatisoidusti lisäainekelalta hitsauspistoolin kautta kosketussuuttimen läpi hitsisulaan/railoon. Hitsausvirta kulkee virtalähteestä lisäainelangan kautta hitsattavaan kappaleeseen. Lisäainelangan osuessa hitsattavaan työkappaleeseen syntyy oikosulku, jolloin valokaari syttyy. Korkean oikosulkuvirran myötä osa lisäainelangasta sulaa ja siirtyy valokaaren sulattamaan hitsisulaan pisarana tai ilman oikosulkua pisarasuihkuna. Hitsisulaan siirtyvän lisäaineen muoto riippuu suuresti käytettävistä hitsausparametreista, sillä ne määrittävät prosessin kaarityypin ja sen myötä lisäaineen siirtymistavan. Suojakaasu vaikuttaa myös kaarityyppiin, sillä joillakin suojakaasuista ei voida saavuttaa aina tiettyä kaarityyppiä, vaikka parametrit olisivat oikeanlaiset. Esimerkiksi kuumakaarta ei voida saavuttaa jos suojakaasuna käytetään puhdasta hiilidioksidia (CO_2), vaan kaarityyppi hiilidioksidin kanssa muuttuu kuumakaaresta pitkäkaareksi ja lisäaineen siirtymisominaisuudet muuttuvat täysin (Lukkari, 1997, s.167). Kuvassa 1 on esitetty MAG-hitsauksen periaatteellinen kuva, jossa on esitetty prosessin pääkohtia ja toimintaperiaate. (Lukkari, 1997, s. 159.)



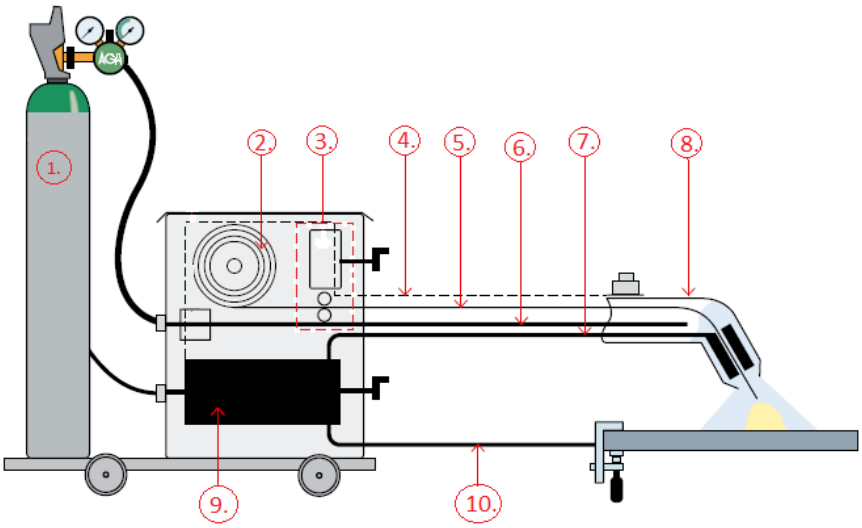
Kuva 1. Kaasukaarihitsauksen toimintaperiaate, jossa 1. kaasusuutin, 2. kosketussuutin, 3. lisäainelanka, 4. suojakaasu, 5. valmis hitsi, 6. hitsisula, 7. valokaari (mukaillen Oy AGA Ab, 2014, s. 4).

Hitsausparametrit voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään. Ensimmäisen ryhmän parametrit vaikuttavat suoranaisesti muodostuvaan hitsiin ja toisen ryhmän parametrit vaikuttavat toissijaisesti hitsiin. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvia parametreja ovat mm. hitsausvirta, jännite ja hitsausnopeus, joiden suurin vaikutusalue on muodostuvan hitsin muoto, koko ja tunkeuma. Jännitteen suuruus vaikuttaa valokaaren pituuteen sekä syntyvän palon leveyteen. Jännitteen ollessa liian suuri hitsiin voi muodostua esimerkiksi reunahaavaa, kun taas liian pieni jännite aiheuttaa ongelmia valokaaren sytytyksen kanssa (Weman, 2012, s. 91). Hitsausvirta ja hitsausnopeus vaikuttavat syntyvän hitsin tunkeumaan. Suuri virta kasvattaa tunkeumaa ja vähäinen virta pienentää sitä. Suurella hitsausvirralla saadaan aikaan kapea ja syvä hitsi, mutta alhaisemmalla virralla hitsi leviää enemmän ja tunkeuma jää pienemmäksi. Sama sääntö koskee hitsausnopeutta, eli suuri

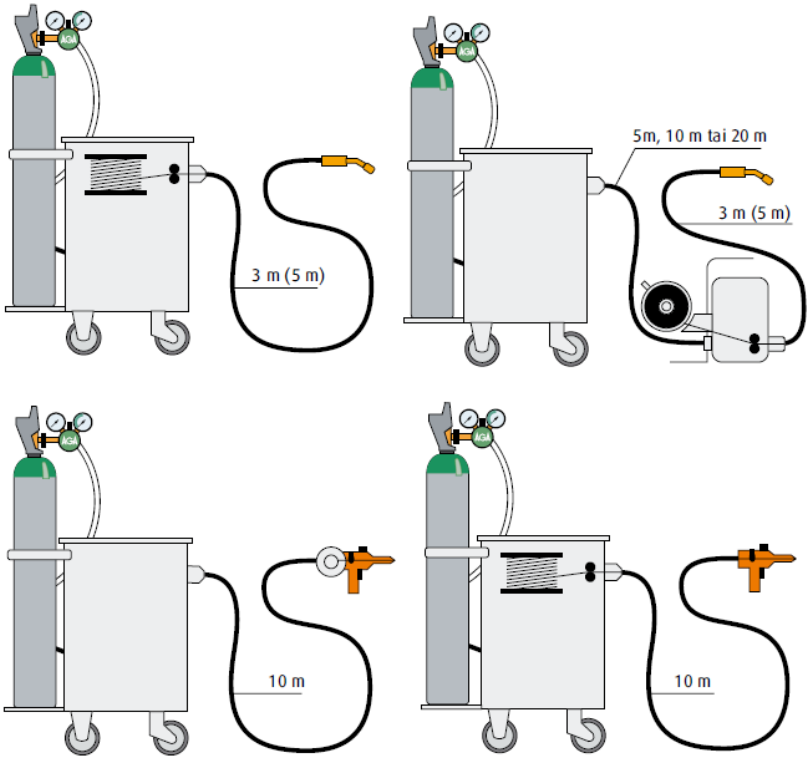
hitsausnopeus parantaa tunkeumaa ja alhainen hitsausnopeus vähentää tunkeumaa ja levittää syntyvää palkoa. (Weman, 2012, s. 91–92; Karadeniz, Ozsarac & Yldiz, 2007, s. 649–650.)

Toisessa ryhmässä vaikuttavia parametreja ovat mm. vapaanlangan pituus, suojakaasun virtausnopeus, poltinkulma ja hitsaussuunta (Karadeniz et al., 2007, s. 649–650). Vapaanlangan pituus vaikuttaa hitsausvirtaan ja täten myös tunkeumaan. Vapaanlangan ollessa pitkä, hitsausvirta pienenee ja samalla tunkeuma pienenee. Jos vapaanlanka on liian lyhyt, kosketussuutin ja lisäainelanka saattavat hitsautua kiinni toisiinsa valokaaren suuren lämpötilan vaikutuksesta. (Weman, 2012, s. 92.) Poltinkulmalla ja hitsaussuunnalla pyritään vaikuttamaan syntyvän palon muotoon kasvattamalla tai vähentämällä kaaripainetta. Työntävällä poltinkulmalla saadaan aikaan leveä hitsi, sillä kaaripaine ”puhaltaa” sulaa eteenpäin ja samalla levittää sulaa, eikä sula kerkeä sulattamaan perusainetta yhtä tehokkaasti, kuin esimerkiksi vetävällä kulmalla. Poltinkulman ollessa pystyasennossa, saadaan hitsiin hieman enemmän tunkeumaa, sillä kaaripaine painaa sulaa perusainetta kohti ja tästä syystä sula tunkeutuu syvemmälle. Vetävällä kulmalla saadaan aikaan paras tunkeuma. Vetävässä liikkeessä kaaripaine puhaltaa sulaa samanaikaisesti sekä alas- että taaksepäin, jolloin palosta muodostuu syvä ja kapea. (Lukkari, 1997, s. 208–209; Weman, 2012, s. 93.) Kaasun virtausnopeudella vaikutetaan prosessin kaarityyppiin, palon kokoon ja muotoon sekä roiskeisuuteen (Lukkari, 1997, s. 208).

MAG-hitsauksessa käytettävä laitteisto koostuu normaalisti virtalähteestä, langansyöttölaitteistosta, langan- ja kaasunjohtimista, hitsauspistoolista, suojakaasupullosta ja letkuista, sekä erilaisista kaapeleista, kuten esimerkiksi maadoituskaapelista (Kemppi Oy, 2013a). Kuvassa 2 on esimerkki laitteiston osista ja komponenteista. Kuvassa on esitelty vain yksi laitekokonaisuus, mutta laitteistorakenteita on erilaisia. Esimerkiksi langansyöttöyksikkö voi olla erillisenä yksikkönään laitteen muusta rungosta, pistoolissa itsessään voi olla pieni lisäainekela tai pistoolissa on lankaa työntävä ja vetävä yksikkö Erilaisia laitekokonaisuuksia on esitelty kuvassa 3. (Oy AGA Ab, 2014, s. 6.)



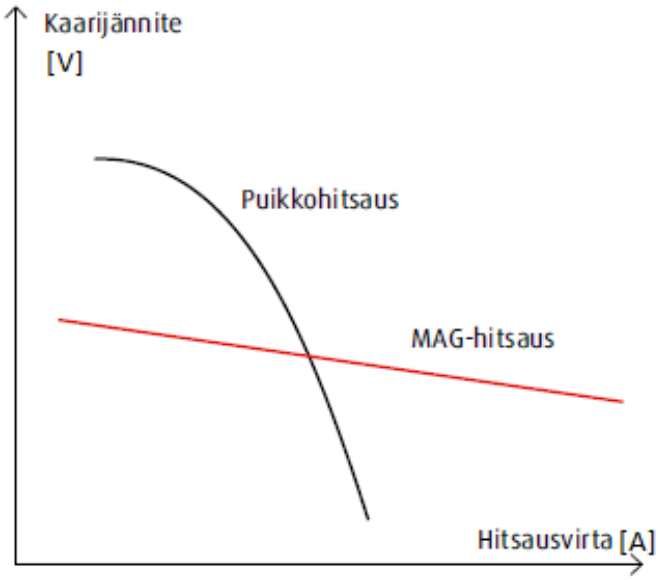
Kuva 2. MAG-hitsauslaitteiston perusosat; 1. suojakaasu, 2. lisäainelanka, 3. langansyöttölaitteisto, 4. ohjauskaapeli, 5. langanjohdin, 6. suojakaasuletku, 7. virtajohdin, 8. hitsauspistooli, 9. virtalähde (tasasuuntaaja), 10. maadoituskaapeli (mukaillen Oy AGA Ab, 2014, s. 6).



Kuva 3. Erilaisia MAG-hitsauslaitekokonaisuuksia (Oy AGA Ab, 2014, s. 7).

Virtalähteenä MAG-hitsauksessa käytetään tasajännitesuuntaajaa, toiselta nimeltään vakiojännitevirtalähde (Lukkari, 1997, s. 160), jonka ominaiskäyrä on lähes vaarasuora.

Vaakasuoralla ominaiskäyrällä pystytään ylläpitämään helposti prosessin vaatima vakaa valokaari, sillä valokaaren pituuden kasvaessa kaarijännite voidaan pitää lähes vakiona ja samalla virtalähde optimoi valokaarta haluttuun suuntaan säätämällä hitsausvirran suuruutta. Hitsauspistoolin työntyessä lähemmäksi hitsattavaa kappaletta jännitteen arvo laskee hetkellisesti, koska valokaari lyhenee. Virtalähde kasvattaa virtaa hetkellisesti, sillä virtalähde pyrkii ylläpitämään vakiojännitettä. Prosessin jännite kasvaa, kun valokaaren etäisyys työkappaleesta kasvaa. Tällöin virtalähde pyrkii hetkellisesti laskemaan virran arvoa ja täten korjaamaan jännitteen arvoa. Kuvassa 4 on esitetty MAG-hitsaukselle tyypillinen ominaiskäyrä ja vertailuna samassa kuvassa on esitetty puikkohitsauksen ominaiskäyrä. (Oy AGA Ab, 2014, s. 5.)



Kuva 4. Puikko- ja MAG-virtalähteiden ominaiskäyrät (mukaillen Oy AGA Ab, 2014, s. 5).

MAG-hitsauksen tavallinen virta-alue vaihtelee 80–380 A välillä ja jännite 15–50 V välillä. Lukkari (1997, s. 167) ilmoittaa teoksessaan ohjeellisiksi jännitteen ja virran käyttöarvoiksi MAG-hitsauksessa 10–40 V ja 50–400 A, kun taas AGAn (Oy AGA Ab, 2014) suositusarvot ovat jännitteelle 15–50 V ja virralle 50–600 A. Hitsausparametreihin vaikuttavia tekijöitä ovat mm. materiaalin paksuus, lisäaine, suojakaasu sekä hitsausasento. Hitsauksen siirtyessä mekanisoituun tai automatisoituun hitsaukseen, voidaan käyttää suurempia hitsausvirtoja, mutta käsinhitsauksessa hitsiaineentuotto on normaalisti 2–7 kg/h. (Lukkari, 1997, s. 160; Oy AGA Ab, 2014.)

Hitsauspistoolilla suunnataan ja hallitaan hitsaustapahtumaa. Monitoimijohdin yhdistää polttimen ja hitsausvirtalähteen toisiinsa. Suojakaasu, hitsauslisäaine ja hitsausvirta kulkevat monitoimijohdinta pitkin hitsauspolttimeen ja tämän läpi työkappaleeseen ja hitsiin. Hitsauspoltin koostuu karkeasti polttimen rungosta, liipaisimesta, kosketussuuttimesta, kaasuholkista ja tiivisteistä. Lisäainelankaan kytkeytyy virta, kun polttimen liipaisin painetaan alas. Tässä vaiheessa langansyöttölaite aloittaa langan syöttämisen, suojakaasu alkaa virrata ja valokaari syttyy lisäaineen osuessa työkappaleeseen. (Lukkari, 1997, s. 185–187.)

Kosketussuutin on hitsauspolttimen kärjessä sijaitseva kuparinen suutinholkki, joka on yhteydessä monitoimijohdinta pitkin kulkevaan virtajohtimeen sekä lisäainelankaan. Kosketusuutin kytkee hitsauksen alkaessa virran lisäainelankaan. Kosketussuuttimia on paljon erityyppisiä ja kokoisia. Koko ja muoto vaihtelevat käyttötarkoituksen ja lisäaineen paksuuden mukaan. (Lukkari, 1997, s. 186–188.)

Lisäaineena MAG-hitsauksessa käytetään lisäainelankaa, joka voi olla joko umpi- tai täytelankaa. Lisäaineen tulisi olla vastaavaa materiaalia hitsattavan materiaalin kanssa. Tyypillinen langansyöttönopeus MAG-hitsauksesa on 4–16 m/min. Langansyöttölaite syöttää lankaa vakionopeudella, jotta virtalähde pystyisi säätämään virta-jännitearvoja sopivalla tavalla ja ylläpitämään optimaalisen valokaaren. Hitsausvirta ja langansyöttönopeus ovat toisistaan riippuvaisia, sillä langansyöttönopeuden kasvaessa kasvaa myös hitsausvirta. Ohuilla lisäainelangoilla on suurempi langansyöttönopeus, sillä niiden virtatiheys on paksuja lankoja suurempi ja tästä syystä ne sulavat paksuja lankoja nopeammin. (Lukkari, 1997, s. 161–162.)

2.2 Edut ja rajoitukset

MAG-hitsausta käytetään hitsaavassa teollisuudessa yleisesti jo lähes koko maailmassa. Syitä MAG-hitsauksen (sekä MIG-hitsauksen) yleistymiselle voidaan pitää sen lisäaineen automaattista syöttöä ja lisäaineen riittoisuutta. Toinen merkittävä tekijä ko. prosessin yleistymiselle on sen helppo automatisoitavuus sekä robotisoitavuus, mikä johtuu lisäaineen riittoisuudesta ja automaattisyötöstä. (Kurşun, 2011, s. 955.) Muita etuja MAG-hitsauksessa ovat:

- prosessilla voidaan hitsata kaikissa asennoissa

- kuonaton lisäaine
- laaja parametrien säätömahdollisuus
    - yhdellä langan paksuudella voidaan hitsata laajalla virta/jännitealueella
- hyvä tuottavuus
    - käsinhitsauksessa n. 2–7 kg/h
    - automatisoidussa hitsauksessa 8–20 kg/h
- soveltuu useiden rauta- ja ei-rautametallien hitsaamiseen

(Lukkari, 1997, s. 177; Weman, 2012, s. 75.)

Vaikka MAG-hitsaus on suosittu prosessi maailmalla, on sillä myös haittoja. Prosessi vaatii täydellisen suojauksen ilman haitallisilta kaasuilta, joten suojauksen täytyy olla moitteeton ja jatkuva koko hitsauksen ajan. Tämä hankaloittaa mm. ulkona työskentelyä vetoisuuden ja esimerkiksi kosteuden takia. Lisäksi laitteisto on monimutkainen ja sen huoltaminen on haastavaa. Liikuteltavuus on rajoitetumpaa kuin esim. puikkohitsauksessa, sillä laitteisto on kookkaampi ja kaasukaarihitsaus vaatii suojakaasun toimiakseen. (Lukkari, 1997, s. 177; Weman, 2012, s. 75.) Vaikka MAG-hitsauksessa eräänä etuna on parametrien laaja säätömahdollisuus, niin tämä voi myös hankaloittaa hitsaamista, sillä oikeiden parametrien löytäminen saattaa joskus olla vaikeaa ja etenkin uusia materiaaleja hitsattaessa ei aina tiedetä parhaita mahdollisia parametriasetuksia ko. materiaalille. (Kurşun, 2011, s.955–956.)

2.3 Suojakaasut

Suojakaasu voi olla joko inertti tai aktiivinen. Inertti suojakaasu on passiivinen osa hitsausprosessia, ja näitä kaasuja ovat esimerkiksi argon ja helium. Aktiivinen suojakaasu reagoi sulan kanssa ja pyrkii vaikuttamaan valokaaren toimintaan ja aineensiirtymiseen prosessin aikana. Aktiivisia suojakaasuja ovat esimerkiksi happi ja hiilidioksidi Suojakaasulla pyritään vaikuttamaan ainakin seuraaviin asioihin:

- Hitsausprosessin suojaus
- Aineensiirtyminen
- Valokaaren vakaus
- Hitsin pinnanlaatu
- Metallurgiset ja mekaaniset ominaisuudet
- Hitsin profiili

- Hitsausnopeus

(Lukkari, 1997, s. 197; Oy AGA Ab, 2014, s. 11; Oy AGA Ab, 2013, s. 4.)

Suojakaasun eräänä tehtävänä on suojata hitsausprosessia ja hitsisulaa hapettumiselta. Ympäröivässä ilmassa on paljon haitallisia aineita, jotka vaikeuttavat hitsaamista ja saattavat aiheuttaa virheitä hitsaamisen aikana. Ilman happi, typpi ja vety esiintyvät atmosfäärissä epäedullisissa muodoissa hitsaamisen kannalta ja kuumassa ne reagoivat hitsisulan muiden aiheiden kanssa. Suojauksen puutos ja ympäröivän ilman haitalliset aineet aiheuttavat hitsissä huokosia, voimakasta hapettumista ja seosaineiden, kuten Piin (Si) ja Mangaanin (Mn) palamista hitsissä. Suojakaasun toinen tehtävä on auttaa aineen siirtymistä lisäainelangan päästä hitsisulaan, vakauttaa valokaari ja vähentää huurujen syntyä prosessin aikana (Pires, Quitino & Miranda, 2007, s. 1623). Suojakaasun tyypillä ja koostumuksella on erillinen vaikutus hitsauksessa vaikuttavaan kaariplasmaan. Plasma koostuu karkeasti ionisoituneesta kaasusta, metallisulasta, höyryistä ja kaasutilassa olevista atomeista ja molekyyleistä. (Kah & Martikainen, 2013, s. 1411; Lukkari, 1997, s. 196–197.)

Suojakaasun reagoidessa sulan kanssa voidaan kaasulla seostaa ja muokata syntyvän hitsin mekaanisia ja metallurgisia ominaisuuksia. Näiden ominaisuuksien muutoksen myötä voidaan muuttaa mm. lujuutta, sitkeyttä, kovuutta ja korroosion kestoa. Seostamista tärkeämpää on kuitenkin hitsisulan suojaaminen ja lisäaineen siirtymismuodon eli kaarityypin kontrollointi. Suojakaasulla voidaan kontrolloida sitä, että siirtyykö lisäaine pisarana vai suihkuna hitsisulaan. (Kah & Martikainen, 2013, s. 1411; Lukkari, 1997, s. 196–197.)

MAG-hitsauksessa käytettävän aktiivisen suojakaasun tulee suojauksen lisäksi myös reagoida valokaaren sekä valokaaren synnyttämän hitsisulan aineiden kanssa. Aktiivisia suojakaasuja ovat:

- Happi, O_2
- Hiilidioksidi, CO_2
- Hapen ja/tai hiilidioksidin argonpohjaiset yhdistelmäkaasut (Ar + CO_2, Ar + O_2, Ar + O_2 + CO_2, Ar + He (helium) + CO_2, Ar + He + O_2)

(Oy AGA Ab, 2014, s. 4; Schweighardt, 2007, s. 40–41.)

2.3.1 Hiilidioksidi

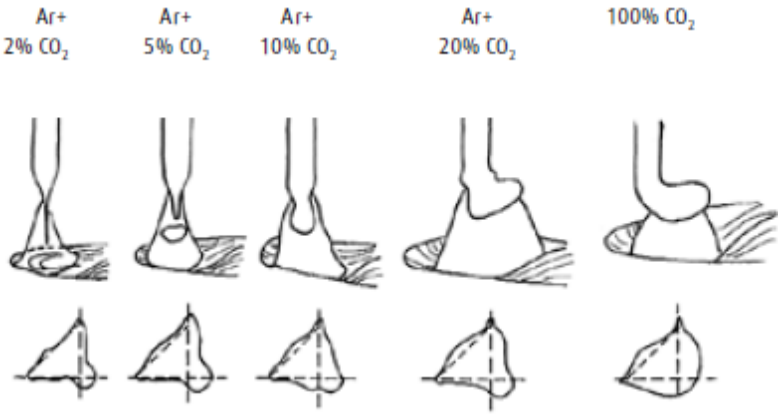
Hiilidioksidia voidaan käyttää sellaisenaan MAG-hitsauksessa, mutta aineen siirtyminen on suuri pisaraista ja aiheuttaa täten roiskeita kuumakaarialueella. Hiilidioksidi luo korkean kaaripaineen, mikä kasvattaa tunkeumaa ja leventää hitsipalkoa. (Oy AGA Ab, 2013, s. 5.) Hiilidioksidilla on monesti geometrisesti hyvän laatuinen hitsi, jonka leveys-syvyys-suhde on hyvä. (Schweighardt, 2007, s. 40.)

2.3.2 Happi

Happea käytetään yleensä maksimissaan 10 % suojakaasun seososana. Hapelle on ominaista korkea lämmöntuontipotentiaali, mikä johtuu sen muodostamasta ionisaatioenergiasta sekä sen molekyylien erottumisesta vapautuvasta energiasta. Happi muodostaa leveän ja matalan palon, mikä johtuu sen suuresta lämmöntuonnista. (Schweighardt, 2007, s. 40.)

2.3.3 Argonpohjaiset suojakaasut

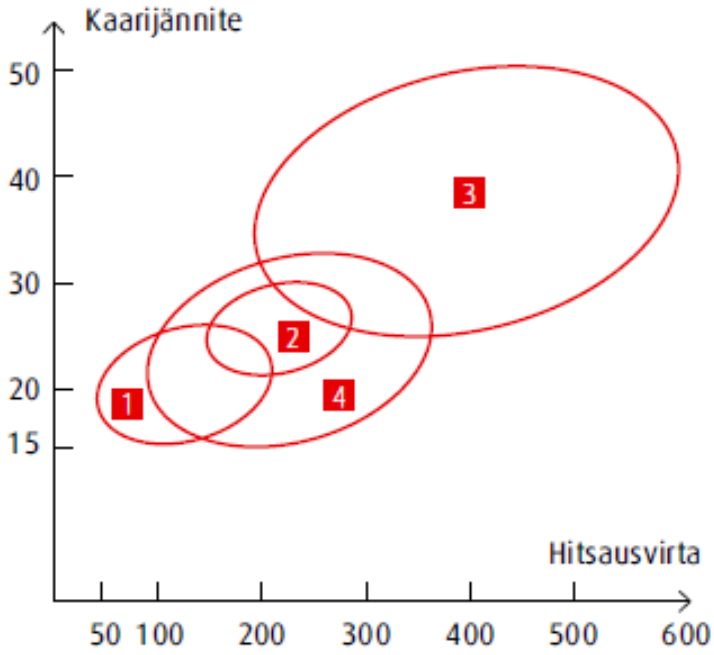
Argonpohjaiset suojakaasut ovat yleisimmin teollisuudessa käytettyjä suojakaasuja MAG-hitsauksessa. Puhdas argon saa aikaan epävakaan valokaaren, eikä sen takia sovellu MAG-hitsaukseen. Argoniin yleensä seostetaan yhtä tai useampaa, sulan kanssa hitsauksen yhteydessä reagoivaa suojakaasua kuten happea (O_2) ja/tai hiilidioksidia. (CO_2) (Oy AGA Ab, 2013, s. 4.) Puhtaalla argonilla on huono lämmönjohtokyky, jonka takia kaaren lämpövaikutus ei juuri ulotu valokaaren ulkopuolelle. Muodostuvan hitsin profiili on syvä ja kapea. (Schweighardt, 2007, s. 40.) Kuvassa 5 on esitetty hiilidioksidin määrän vaikutusta tunkeumaan ja aineen siirtymistapaan argonpohjaisessa suojakaasussa.



Kuva 5. Hiilidioksin vaikutus tunkeumaan ja aineen siirtymiseen (Oy AGA Ab, 2013, s. 5).

2.4 Kaarityypit

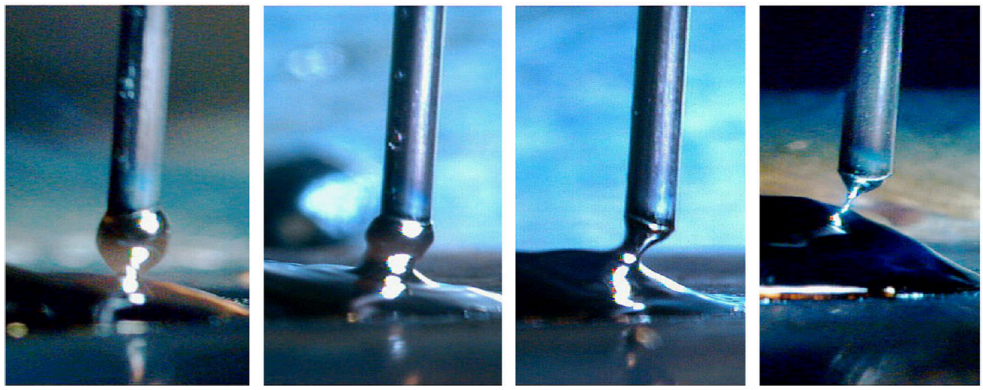
MAG-hitsaus voidaan jakaa neljään (4) peruskaarityyppiin, joita on lyhyt-, seka-, pulssi- ja kuumakaari. Kaarityyppi määräytyy hitsausparametrien sekä suojakaasun mukaan ja kaarityyppi määrittää aineen siirtymistavan lisäaineesta hitsisulaan. Kuvassa 6 on esitetty eri kaarityyppien periaatteelliset virta- ja jännitealueet.



Kuva 6. Eri kaarityyppien virta-jännitealueet, jossa 1. lyhytkaari, 2. sekakaari, 3. kuumakaari ja 4. pulssikaari (Oy AGA Ab, 2014, s. 15).

2.4.1 Lyhytkaari

Lyhytkaarihitsaus toimii perushitsauskaarityypeistä alhaisimmalla jännite/virta-alueella. Siinä siirtyvän sulapisaran koko on pieni, yleensä lisäainelangan halkaisijan kokoinen. Lyhytkaaressa jännite sulattaa lisäainelangan päähän sulapisaran, joka yhdistyy hitsisulaan ja muodostaa oikosulun. Oikosulkuhetkellä jännite laskee, kaari sammuu ja virta kasvaa, mikä irrottaa sulapisaran ja siirtää sen sulaan. Oikosulkuja tapahtuu arviolta 30-200 kertaa sekunnissa. Ajoittaisen valokaaren takia lämmöntuonti lyhytkaarihitsauksessa on alhainen ja tämän takia se soveltuu asentohitsaukseen sekä ohuille materiaaleille. (Weman, 2012, s. 85–86; Lukkari, 1997, s. 168–169; Scotti, Ponomarev & Lucas, 2012, s. 1407.) Hitsausvirta vaikuttaa suuresti lyhytkaarihitsauksen kaaren käyttäytymiseen. Liian suuri virta aiheuttaa paljon roiskeisuutta, sillä lisäaineen irtoamiseen vaikuttava Pinch-voima on suuri ja täten lisäaineen siirtyminen liian voimakasta. Liian alhainen virta aiheuttaa ongelmia valokaaren palamisen kanssa. (Weman, 2012, s. 86.) Kuvassa 7 on kuvattu oikosulun muodostuminen ja sulapisaran siirtyminen lisäainelangan päästä hitsisulaan.

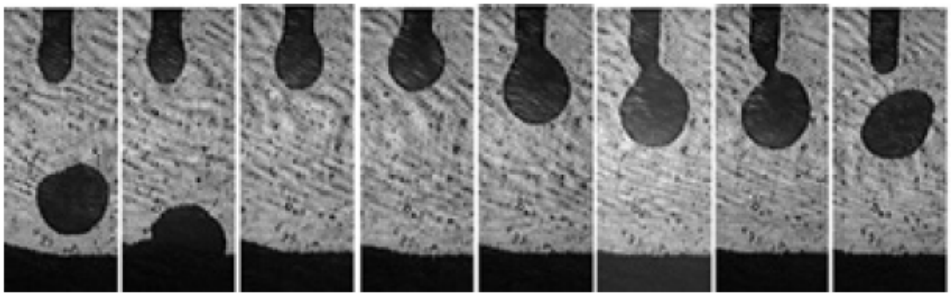


Kuva 7. Lyhytkaarihitsauksessa aineensiirtyminen lisäaineesta hitsisulaan (Doodman Tipi, Hosseini sani & Pariz, 2014, s. 660).

2.4.2 Sekakaari

Sekakaarihitsaus toimii suuremmalla virta-jännitealueella kuin lyhytkaari, mutta alhaisemmalla kuin kuumakaarihitsaus. Sekakaarihitsauksessa sulapisaroiden koko on suuri (1,5–3-kertaa langan halkaisija) ja ne siirtyvät hitaasti hitsisulaan verrattuna muihin kaarityyppeihin (1–10 kertaa sekunnissa). Pisara siirtyy alhaisemmalla virta-jännitealueella painovoiman takia, mutta virtaa ja jännitettä lisäämällä painovoiman apuna toimii irrottava Pinch-voima. (Scotti et al., 2012, s. 1407–1409; Weman, 2012, s. 86; Kurşun, 2011, s. 956.) Sekakaarihitsauksessa syntyy paljon roiskeita ja tämän takia sen käyttöä pyritään

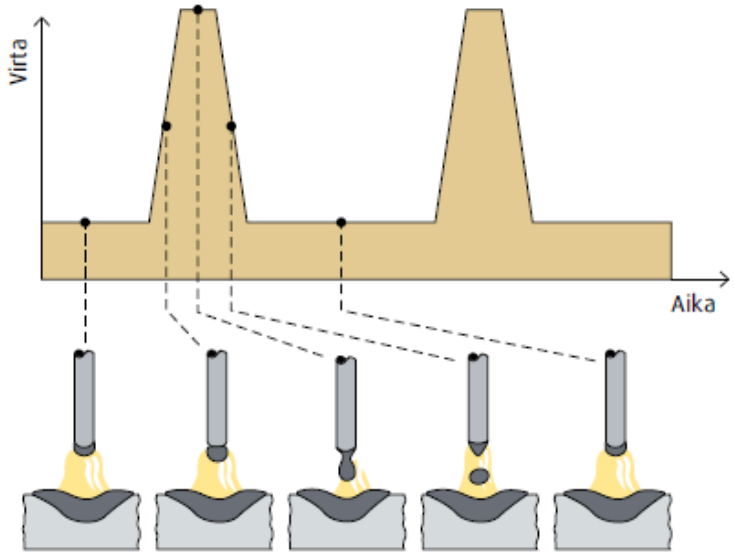
välttämään. Tyypillisimmät käyttökohteet ovat vaikeat asentohitsaukset, joissa lyhytkaaren lämmöntuonti on liian alhainen ja kuumakaaren liian suuri. (Lukkari, 1997, s. 169.) Kuvassa 8 on esitelty sekakaaren aineensiirtymisen periaate.



Kuva 8. Sekakaarihitsauksen aineensiirtyminen (mukaillen Scotti et al., 2012, s. 1409).

2.4.3 Pulssikaari

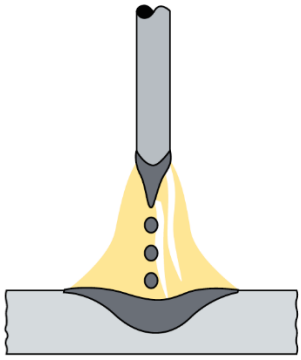
Pulssikaari toimii osittain muiden kaarityyppien virta-jännitealueilla, mutta se sijoittuu pääasiassa kuumakaaren ja lyhytkaaren väliselle alueelle. Pulssihitsauksessa hitsausvirta on pulssitettua ja aine siirtyy hitsisulaan ilman oikosulkuja. Perusvirta estää pulssien välillä lisäainelangan päätä ja hitsisulaa jähmettymästä. Perusvirtaa korkeampi pulssivirta irrottaa lisäainepisaran ja kuljettaa sen sulaan. (Lukkari, 1997, s. 171–172.) Pulssikaaressa virta-alue vaihtelee 100–350 A ja jännite vaihtelee 15–35 V (kuva 6.). Pulssikaarihitsausta voidaan käyttää sekä rauta- että ei-rautametalleja hitsattaessa. Sen alhaisen lämmöntuonnin takia se soveltuu myös ohuiden materiaalivahvuuksien hitsaamiseen. Laajan materiaalikirjon lisäksi pulssikaarihitsaus soveltuu asentohitsaukseen, sillä sulan hallinta on helpompaa kuin muilla kaarityypeillä. (Kah, Suoranta & Martikainen, 2013, s. 655.) Pulssikaarihitsauksen hyvän sulanhallinnan ja kuumakaarta vähäisemmän lämmöntuonnin lisäksi sen etuisuuksia ovat syvä tunkeuma, sileä palon pinta, korkea hitsausnopeus, hyvä hitsiaineen tuottavuus ja vähäiset roiskeet. (Kurşun, 2011, s. 956.) Kuvassa 9 on esitetty pulssikaarihitsauksen pulssituksen ja lisäaineen siirtymisen välinen yhteys.



Kuva 9. Periaate aineen siirtymisestä ja pulssituksen vaiheistuksesta pulssikaarihitsauksessa (Oy AGA Ab, 2014, s. 18).

2.4.4 Kuumakaari

Kuumakaarihitsauksessa käytetään korkeinta virta/jännitealueita muihin perinteisiin kaarityyppeihin verrattuna. Kuumakaaren virta-alue vaihtelee 200–600 A välillä, ja jännite vaihtelee 25–50 V. Korkeiden parametrien takia aineen siirtyminen tapahtuu pisaramaisesti ilman oikosulkuja. (Weman, 2012, s. 85; Lukkari, 1997, s. 169–170.) Kuumakaarihitsauksessa siirtyy suuri määrä lämpöenergiaa kappaleeseen, mikä rajoittaa sen käyttömahdollisuuksia. Liiallinen lämmöntuonti voi aiheuttaa esimerkiksi vääränlaisia mikrorakenteen muutoksia työkappaleeseen tai polttaa reiän työkappaleeseen hitsauksen aikana. Kuumakaarihitsaus rajoittaa myös mahdollisia asentoja, joita voidaan käyttää, sillä aineen siirtyminen on pisaramaista ja sulan hallinta ei ole suuresta lämmöntuonnista johtuen helppoa. (Kurşun, 2011, s. 956; Scotti et al., 2012, s.1410.) Kuvassa 10 on periaatteellinen kuva aineen siirtymisestä kuumakaarihitsauksessa.



Kuva 10. Kuumakaarihitsauksen aineensiirtymisen periaate (Oy AGA Ab, 2014).

2.5 Modifioidut kaarityypit

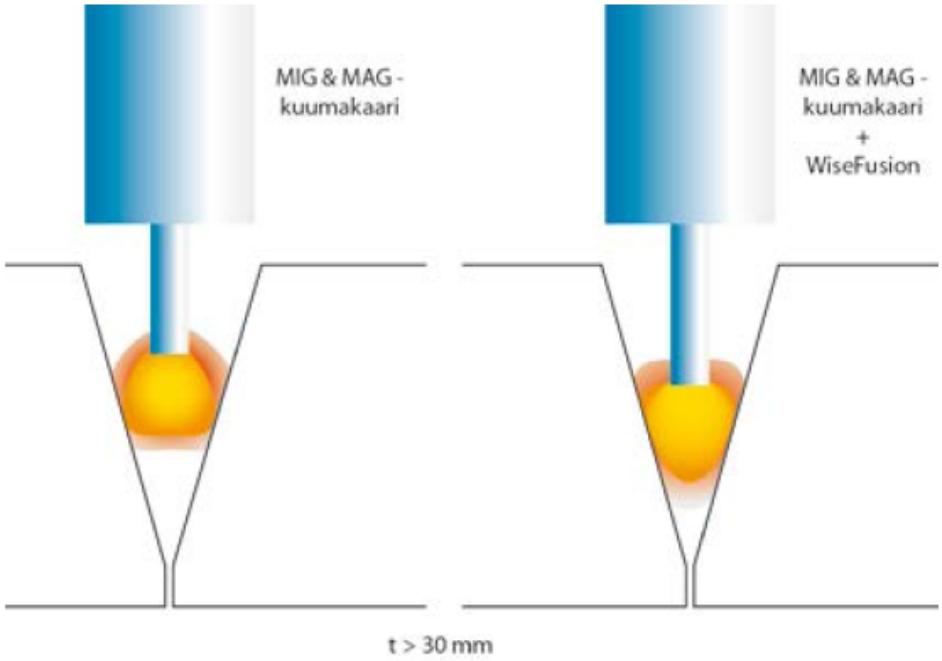
MAG-hitsaukselle on kehitetty paljon sovelluksia vastaamaan paremmin erilaisia erikoistarpeita ja tehostamaan perinteistä kaasukaariprosessia. Sovelluksia löytyy lähes jokaiselta laitevalmistajalta, mutta ohessa muutamia esimerkkejä; Kempiltä Wise-tuoteperhe, Lincoln Electric:in STT™ (Surface Tension Transfer), Migatronic:n IAC™ (Intelligent Arc control), EWM Hightec Welding GmbH:n coldArc©, Froniusin CMT™ (Cold Metal Transfer), (Kah et al., 2013, s. 655–663; Lincoln Electric, 2014; Migatronic A/S, 2012; EWM AG, 2013; Fronius International GmbH, 2014.)

Kempin Wise-tuoteperhe sisältää neljä (4) erilaista erikoissovellusta. WiseThin™ on ohutlevyille tehty erikoiskylmäkaariprosessi, jossa on pyritty vähentämään lämmöntuontia kappaleeseen (Kemppi, 2013b). WiseRoot™ on erityisesti juuripalkojen hitsaukseen suunniteltu sovellus (Kemppi, 2013c). WisePenetrationissa™ on pyritty minimoimaan ja poistamaan suutinetäisyyden vaikutukset tunkeumaan, jolloin käsinhitsauksessa pystyttäisiin hitsaamaan parempilaatuista hitsiä (Kemppi, 2013d). WiseFusion™ esitellään erikseen seuraavassa kappaleessa 2.5.1.

2.5.1 Kemppi WiseFusion™

Kemppi Oy:n WiseFusion™ on erikoiskaarisovellus, joka on erityisesti tarkoitettu synergiseen MAG-hitsaukseen, jota voidaan hyödyntää sekä pulssi- että kuumakaarihitsauksessa. Kaarisovelluksessa hyödynnetään adaptiivista valokaaren säätyvyyttä, joka tutkii hitsaustapahtumaa. Adaptiivinen säätö ei säädä parametereja aikajakson mukaan, vaan säätö tapahtuu valokaaren muutosten mukaan. Adaptiivisuuden ansiosta valokaari pysyy optimaalisen mittaisena. Optimoidulla ja kuroutetulla valokaarella

pystytään luomaan kapea ja täten energiatiheä valokaari. Valokaaren ollessa lyhyt, se on ennen kaikkea helppo hallita ja täten soveltuu erinomaisesti asentohitsaukseen. Kuvassa 11 on periaatteellinen kuva WiseFusionin adaptiivisen valokaaren erosta tavallisen MAG-hitsauksen valokaaren käyttäytymiseen. (Uusitalo, 2012, s. 21–23; Kemppi, 2013e.)



Kuva 11. WiseFusionin vaikutus valokaaren muotoon ja tunkeumasyvyyteen verrattuna tavalliseen MAG-hitsaukseen (Uusitalo, 2012, s. 23).

3 VIRHEET JA ROISKEISUUS MAG-HITSAUKSESSA

MAG-hitsauksessa yleisimpiä hitsausvirheitä ovat huokoset, liitosvirheet ja kraaterihalkeamat. Huokosia aiheuttaa monesti huono kaasusuojaus tai epäpuhdas railonpinta. Kaasusuojaus kaasukaarihitsauksessa on välttämätön ja sen ollessa joko liian suuri tai liian pieni, on lopputulos usein huono. Kaasusuojaus häiriintyy helposti, kun hitsataan esimerkiksi ulkona, jossa tuuli pääsee vaikuttamaan suoraan railoon ja koko hitsaustapahtumaan. Kaasuvirtauksen ollessa liian suuri, syntyy kaasusuuttimen päähän ja hitsin ympärille turbulenttista virtausta, joka ei pysty suojaamaan hitsausprosessia vaaditulla tavalla. Railon pinnalla voi myös olla esimerkiksi öljyä tai ruostetta, joista vapautuu haitallisia kaasuja ja aineita hitsisulaan ja täten aiheuttavat huokosia hitsiin. (Weman, 2012. s. 95; Morret & Giese, 2006, s. 26–27.)

Liitosvirheitä aiheuttavat monesti väärät parametriasetukset, liian hidas hitsausnopeus, kaaren vääränlainen suuntaus tai liian nopea jäähtyminen. Liitosvirhe voi syntyä, jos jännite ja/tai virta ovat liian pieniä. Tämä aiheuttaa sen, ettei lämpöteho suhteutettuna lisäaineen vaatimaan tehoon ei ole riittävä ja osa perusaineesta tai lisäaineesta jää vajavaiselle sulatukselle. Hitsausnopeuden ollessa liian pieni voi sula valua valokaaren eteen. (Weman, 2012, s. 96.)

Kraaterihalkeama on eräs kuumahalkeaman muoto. Se syntyy monesti siitä, että epäpuhtaudet perusaineesta ja lisäaineesta suotautuvat hitsin keskilinjalle hitsin ollessa vielä kuuma. Hitsin jäähtyessä se alkaa kutistua ja siihen muodostuu jännityksiä, mutta keskelle suotautuneet epäpuhtaudet antavat periksi ja hitsi halkeaa. (Ovako, 2012, s. 12; Weman, 2012, s. 96.)

3.1 Roiskeisuus

Roiskeisuus on monesti vain visuaalinen ongelma lopputuotteessa tai rakenteessa. Siitä aiheutuu paljon lisäkustannuksia ja lisätyötä kappaleen pinnan suojauksen, hiomisen ja viimeistelyn takia. (Ovako, 2012, s. 14.) MAG-hitsauksessa roiskeisuutta esiintyy erityisen paljon lyhyt- ja sekakaarihitsauksessa. Roiskeisuutta aiheuttaa liian suuri jännite, huono kaasusuojaus, epäpuhtaudet, vääränlainen virta/jännite-suhde, väärä polarisaatio tai

magneettinen puhallus. Liian suuri jännite pidentää valokaarta, jolloin aineen siirtyminen ei ole hallittua ja sulapisara ei siirry hitsisulaan hallitusti. (Lukkari, 1997, s. 204.)

MAG-hitsauksessa käytettävän jännitteen ja virran tulee olla sopivassa suhteessa keskenään. Aineensiirtymisen vaatiessa oikosulkua voi väärä virta-jännitesuhde aiheuttaa liian pitkän oikosulun, jolloin virran arvo kasvaa liian suureksi pitkän oikosulun aikana. Oikosulun katketessa valokaari syttyy uudelleen, joka tapahtuu niin voimakkaasti, että sulasta sinkoutuu huomattava määrä roiskeita. (Lukkari, 1997, s. 217.)

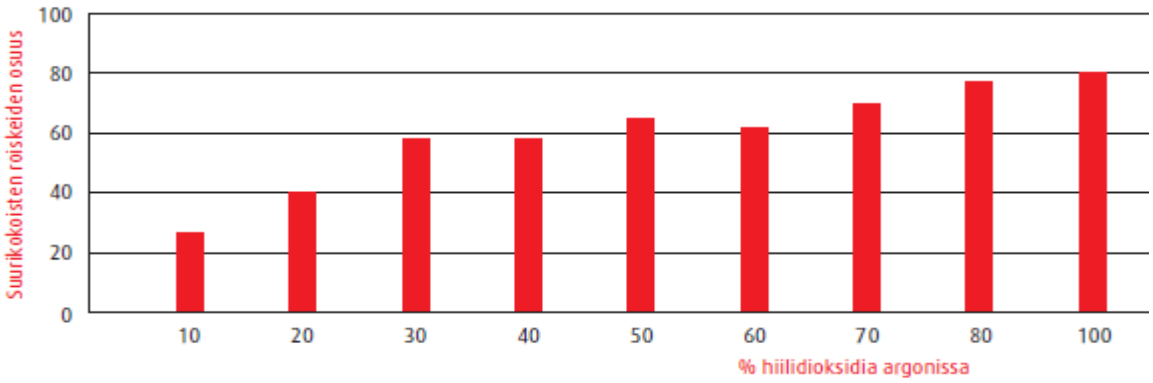
Hitsauksen polarisaatio eli napaisuus vaikuttaa myös roiskeiden syntymiseen. MAG-hitsaus suoritetaan yleensä +navassa, jolloin roiskeiden esiintyminen on vähäisempää, mutta joskus voidaan tarvita –napaa hitsauksessa. –navalla saavutetaan suurempi sulatusteho ja leveämpi palko, mutta valokaari on epävakaampi. (Lukkari, 1997, s. 160.)

MAG-hitsauksessa lisäainelangan ja valokaaren ympärille muodostuu magneettikenttä, jonka suuruus riippuu virran suuruudesta. Magneettikenttä aiheuttaa valokaaren taipumista ja hitsauksen aikana valokaari saattaa muuntua rauhattomaksi tai taipua väärään asentoon aiheuttaen roiskeisuutta. (Lukkari, 1997, s. 75; Ovako, 2012, s. 14.)

Suojakaasu on vaikuttavana tekijänä myös roiskeiden muodostumisessa. Puutteellisen tai katkonaisen suojauksen vaikutuksesta hitsaustapahtuma häiriintyy, joka aiheuttaa roiskeiden muodostumista ilman päästessä hitsaustapahtumaan. (Kah & Martikainen, 2013, s. 1411.) Suojakaasun tyyppi on myös oleellinen tekijä roiskeiden esiintymisessä tai estämisessä, sillä se vaikuttaa muodostuvaan kaarityyppiin. Esimerkiksi puhtaalla hiilidioksidilla ei muodostu perinteistä suihkumaista kuumakaarta, vaan kuumakaari muuntuu pitkäkaareksi. Pitkäkaaressa aineen siirtyminen ei ole pisamaista, vaan epätasaista. (Kah & Martikainen, 2013, s. 1411; Lukkari, 1997, s. 171.) Puhdas argon ei myöskään sovellu MAG-hitsaukseen, sillä kaari on epävakaa ja hitsin laatu huonoa. Argoniin pitää lisätä hapettavaa kaasua seoksen parantamiseksi, kuten esimerkiksi happea tai hiilidioksidia. (Sato, 2001, s. 617.)

Piresin, Quitinon ja Mirandan (2007) tutkimuksessa selvitettiin suojakaasun koostumuksen vaikutusta kaaren käyttäytymiseen. Verrattavina suojakaasuina oli Ar + 2 % CO_2 ja Ar +

18 % CO_2. Argon-hiilidioksidiseosteisilla suojakaasulla hitsattaessa huomattiin, että hiilidioksidin osuuden kasvaessa vaadittavan jännitteen ja virran määrä kasvoi, jotta pystyttiin saavuttamaan vakaa valokaari. Vakaalla valokaarella voidaan monesti vähentää roiskeisuutta hitsauksen aikana, sillä aineen siirtyminen on hallittua. (Pires et al., 2007, s. 1626; de Menenses et al., 2014, s. 1388.) Kuvassa 12 on esitetty hiilidioksidin määrän vaikutus roiskeisuuteen argon-pohjaisessa suojakaasussa.



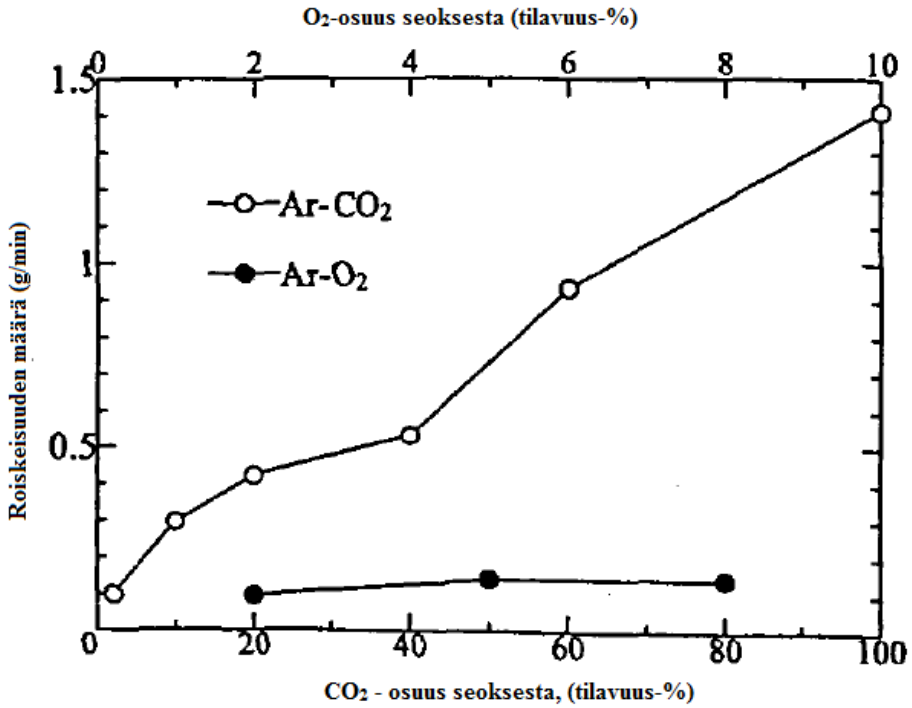
Kuva 12. Hiilidioksidin määrän vaikutus roiskeisuuteen Argon-pohjaisessa suojakaasussa (Oy AGA Ab, 2013, s. 19).

Subanin ja Tušekin (2003, s. 430–436) tutkimuksessa vertailtiin kolmen eri suojakaasun vaikutusta valokaareen ja aineen siirtymisen muotoon. Tutkimuksessa käytettiin puhdasta hiilidioksidia, argonin ja hiilidioksidin seosta sekä T.I.M.E.-suojakaasua (Transferred Ionised Molten Energy) (65 % Ar + 26.5 % He + 8 % CO_2 + 0.5 % O_2). Hitsattaessa puhtaalla hiilidioksidilla prosessi ei kykene ylläpitämään yhtä tasaista ja helposti hallittavaa valokaarta kuin argon-pohjaisella suojakaasulla virran intensiteetin ollessa korkea, vaan valokaari muodostaa ajoittaisen oikosulun. Virran ollessa korkea oikosulkusilta purkautuu räjähdysmäisesti, joka aiheuttaa roiskeita. Suojakaasun ollessa seostettua oikosulkuja ei muodostunut, vaan aine siirtyi tasaisemmin ja rauhallisemmin pisaramaisesti hitsisulaan. (Suban & Tušek, 2003, s. 435–436.)

Hiilidioksidilla hitsattaessa roiskeisuuteen vaikuttaa sulapisaran epäsäännöllinen käyttäytyminen hitsauksen aikana. Pisaran koko saattaa vaihdella ja irtoaminen hitsisulaan on epätasaista. Tokihiko et al. (2009) tutkimuksessa selvitettiin pulssituksen vaikutusta roiskeisuuteen. Virran pulssituksella pystyttiin vakioimaan sulapisaran siirtymistä ja

käyttäytymistä, ja tämän avulla vähentämään roiskeisuutta. (Tokihiko et al., 2009, s. 744–745.)

Argon-pohjaisella suojakaasulla hiilidioksidin lisäksi happi lisää roiskeisuutta, kun sen osuutta seoksessa kasvatetaan, mutta hyvin vähän hiilidioksidiin verrattuna. Hapen osuus suojakaasun seoksena pidetään yleensä alle 10 %. (Sato, 2001, s. 616–617.) Kuvassa 13 on esitetty hapen ja hiilidioksidin määrien vaikutus roiskeisuuteen argonpohjaisessa suojakaasussa.

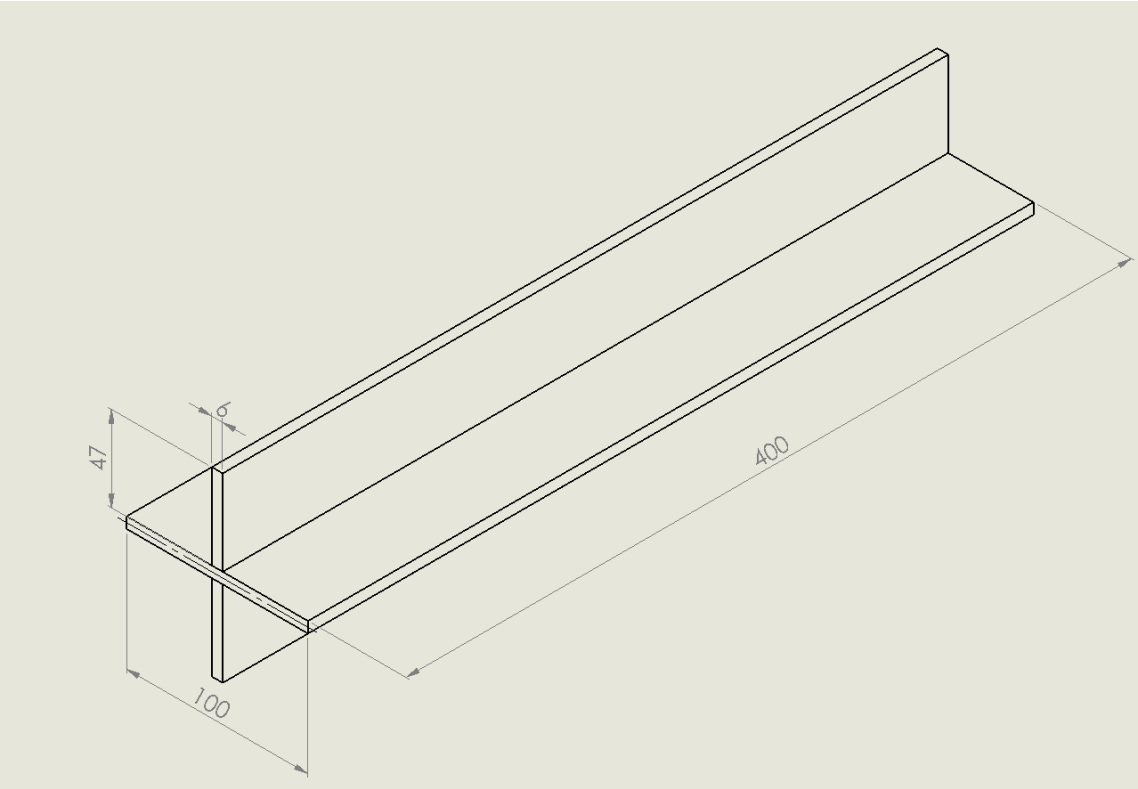


Kuva 13. Hiilidioksidin ja hapen määrän vaikutus roiskeisuuteen argon-pohjaisessa suojakaasussa, kun hitsaus on suoritettu päällehitsauksena (mukaillen Sato, 2001, s. 616).

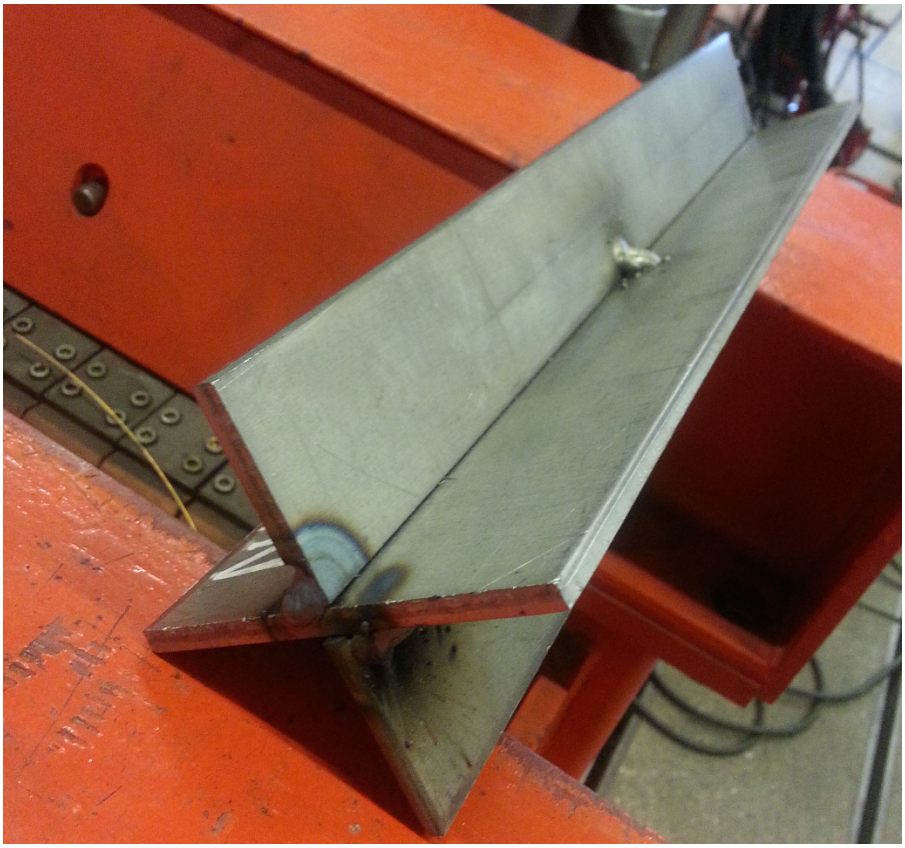
4 KOKEELLINEN OSUUS

Kokeellisen osuuden valmistelut aloitettiin leikkaamalla hitsattavan kappaleen levyaihiot suuremmasta levystä. Kokeissa käytetty materiaali oli Ruukin rakenneteräs S355 MC ja sen materiaalivahvuus oli 6 mm. Liitteestä I löytyy käytetyn materiaalin ainestodistus. Hitsattavan koekappaleen osat leikattiin Finn-Powerin levyleikkurilla 47x400 mm ja 100x400mm kokoisiksi aihioiksi.

Yhteen koekappaleeseen käytettiin kaksi (2) 47mm aihiota ja yksi (1) 100mm aihio. Kuvassa 14 on esitetty aihioiden mitat. Aihioiden leikkauksen jälkeen aihiot silloitettiin koekappaleiksi (kuva 15).



Kuva 14. Koekappaleen mitat ja sen rakenne.



Kuva 15. Valmis koekappale silloituksen jälkeen.

Kappaleiden varsinaisissa koehitsauksissa hyödynnettiin hitsauslaboratoriossa olevaa hitsaustornia. Tornin käytöllä hitsauksissa pyrittiin takaamaan yhtäläiset hitsausnopeudet jokaiselle koekappaleelle. Kappaleita ei varsinaisesti kiinnitetty hitsauspöytään hitsauksien ajaksi, mutta ne kohdistettiin pöytään kiinnitetyn tukiraudan avulla jolla taattiin, että kappaleet ovat kokeissa keskenään samansuuntaisia.

Hitsauslisäaineena käytettiin ESAB:n 1,2 mm paksuista OK Autrod 12,51 (EN ISO 14341-A-G3Si1) MAG-hitsaukseen tarkoitettua umpilankaa. Vapaalangan pituus pidettiin 20 mm pituisena. Lisäainelanka pysyi koko kokeen ajan samana. Suojakaasun virtausnopeudeksi asetettiin 18 l/s, joka pidettiin samana molemmilla suojakaasuilla. Kaikissa kokeissa pyrittiin 4 mm a-mittaan. Hitsauslaitteena käytettiin Kempin FastMIG X 450 hitsauslaitetta, johon oli kiinnitetty Kempin MXP37 Pipe langansyöttöjärjestelmä (kuva 16).

Kuva 16. Kempin FastMIG X 450-hitsauslaite ja langansyöttöjärjestelmä MXP 37 Pipe.

Kappaleiden hitsausten jälkeen hitsi ja railo puhdistettiin kevyesti teräsharjalla, pyyhkäisemällä pinnat kaksi kertaa. Hitsauskokeiden jälkeen visuaalisen tarkastelun lisäksi hitsatuille kappaleille määriteltiin lämmöntuonti ja hitsausenergia. Lisäksi hitseille suoritettiin makrohietutkimus, jolla pyrittiin selvittämään tunkeumaprofiili ja mahdolliset virheet, joita ei voida nähdä visuaalisessa tarkastelussa. Kappaleiden tutkimisen jälkeen kappaleista sahattiin n. 25 x 25 mm kokoiset koepalat keskeltä hitsattua kappaletta. Koepaloista hiottiin ja syövytettiin makrohiepalat tunkeuman tarkastelua varten.

4.1 Hitsausparametrit

Tehtävistä hitsauskokeista koottiin matriisi, josta selviää hitsauksessa käytetyt parametrit ja säädöt. Kahdella suojakaasulla ja kolmella eri kaarityypillä hitsattiin yhteensä kuusi (6) erilaista hitsiä, joista jokaiselle suoritettiin visuaalinen tarkastelu, makrohietutkimus sekä roiskeisuustarkastelu.

Hitsauskokeet jaettiin kaarityypin mukaan kolmeen (3) ryhmään, K-, S- ja F-ryhmiin, joissa kirjain kertoo kokeen kaarityypin. K-ryhmä käsittää pulssikaariparin, S-ryhmä kuumakaaret ja F-ryhmä WiseFusionin. Kirjaimen jälkeiset merkit, 18 (Mison 18) tai C3 (Corgon 3), kertovat käytettävän suojakaasun tyypin. Viimeinen numero tarkoittaa kokeen numeroa, joka on siis kaikissa yksi (1). Taulukossa 1 on esitetty koematriisi, josta selviää koelyhenteet ja kokeissa käytetyt hitsausparametrit.

Taulukko 1. Koematriisi ja hitsausparametrit.

		Kuumakaari		Pulssikaari		Kemppi WiseFusion™	
		S18.1	**SC3.1**	**K18.1**	**KC3.1**	**F18.1**	**FC3.1**
Virta	[A]	272	323	260	262	277	278
Jännite	[V]	29,9	30,3	32,2	32,3	28,1	26,8
Aika	[s]	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
Aika	[min]	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Matka	[mm]	170	170	170	170	170	170
Nopeus	[mm/min]	500	500	500	500	500	500
Langan syöttö-nopeus	[m/min]	10	10,1	9,9	10	10	10,1
Kaasu		Mison 18	Corgon 3	Mison 18	Corgon 3	Mison 18	Corgon 3

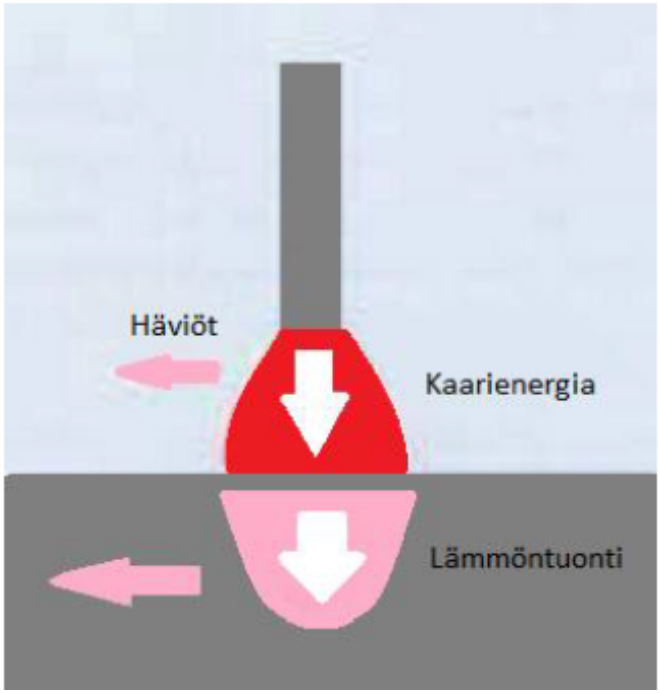
Taulukossa 1 olevien parametrien lisäksi oli mahdollista käyttää hitsausvirtalähteen sisältämiä erikoistoimintoja kuten hienosäätöä ja dynamiikkaa. Pulssihitsauksessa pystyi säätämään edellä mainittujen parametrien lisäksi pulssivirran prosentuaalista arvoa, joka säädettiin 10 % pulssihitsauskokeiden ajaksi. Hienosäätö ja dynamiikka asetettiin vakioiksi kokeiden ajaksi ja niiden arvot olivat:

- Hienosäätö -3,5
- Dynamiikka 0

Hienosäädöllä pyritään vaikuttamaan valokaaren pituuteen asettamalla pohjavirralle tietynlaiset raja-arvot. Hienosäädön oletusasetus on nolla (0) ja sitä voidaan muuttaa -9 ja 9 välillä 0,5 pykälän välein. Dynamiikka säätää virran ja jännitteen välistä suhdetta hitsauksessa, jolla pyritään vaikuttamaan prosessin oikosulkuominaisuuksiin. Pienempi arvo pehmentää valokaaren käyttäytymistä ja korkeampi arvo karhentaa sitä. Hienosäätöä voidaan säätää -9 ja 9 välillä 0,5 välein. Pulssivirran muuttaminen vaikuttaa suoraan hitsauskäyrän pulssivirran suuruuteen hitsauksen aikana. Kasvattamalla prosentuaalista määrää virtalähteen ominaiskäyrän pulssivirran määrä kasvaa ja vastaavasti vähentämällä se pienenee. 0 % on oletusasetus, mutta määrää voidaan muuttaa -10 % ja 15 % välillä.

4.1.1 Hitsausenergia ja lämmöntuonti

Hitsausenergia (E) ja lämmöntuonti (Q) ovat eri asioita. Hitsausenergialla eli kaarienergialla tarkoitetaan hitsauksessa käytettävää energiamäärää pituusyksikköä kohti. Lämmöntuonnilla tarkoitetaan kaaresta kappaleeseen siirtyvän energian määrää pituusyksikköä kohti. (Lukkari, 2007, s. 8.) Kuvassa 17 on esitetty hitsausenergian ja lämmöntuonnin erot visuaalisesti.



Kuva 17. Kaarienergian eli hitsausenergian ja lämmöntuonnin merkitysten ero (Lukkari, 2007, s. 8).

Hitsausenergia E [kJ/mm] voidaan laskea seuraavasti:

$$E = \frac{U \times I \times 60}{v \times 1000} \quad (1)$$

Hitsausenergian kaavassa (1) U on jännite [V], I hitsausvirta [A] ja v hitsausnopeus [mm/min] (Lukkari, 2007, s. 8). Kaarienergia on se energiamäärä, jonka valokaari tuottaa hitsauksen aikana. Osa valokaaren energiasta siirtyy kappaleeseen ja osa säteilee pois ilmaan. Kappaleeseen siirtynyttä energia kuvataan lämmöntuonnin avulla. (Ovako, 2012, s. 6; Lukkari, 2007, s. 8.)

$$Q = k \times \frac{U \times I \times 60}{v \times 1000} \quad (2)$$

Lämmöntuonnin kaavassa (2) k on terminen hyötysuhde (SFS-EN 1011-1, 2009, s. 18). Lämmöntuonnissa lasketaan vain sen kaarienergian suuruus/osuus, joka siirtyy kaaren tuottamasta energiasta kappaleeseen, minkä suhdetta kuvataan termisellä hyötysuhteella. Standardin 1011-1 mukaan MAG-umpilankahitsauksen terminen hyötysuhde k on 0,8. (SFS-EN 1011-1, 2009, s. 20.) Tyypillinen lämmöntuonti MAG-hitsaukselle on 0,5-3 kJ/mm (Ovako, 2012, s. 6).

5 TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Hitsauskokeissa saatujen tulosten perusteella oli huomattavissa kuinka paljon roiskeisuuden määrät vaihtelivat eri kaarityyppien osalta. Seuraavissa kappaleissa esitellään saadut tulokset roiskeisuuden sekä tunkeuman osalta.

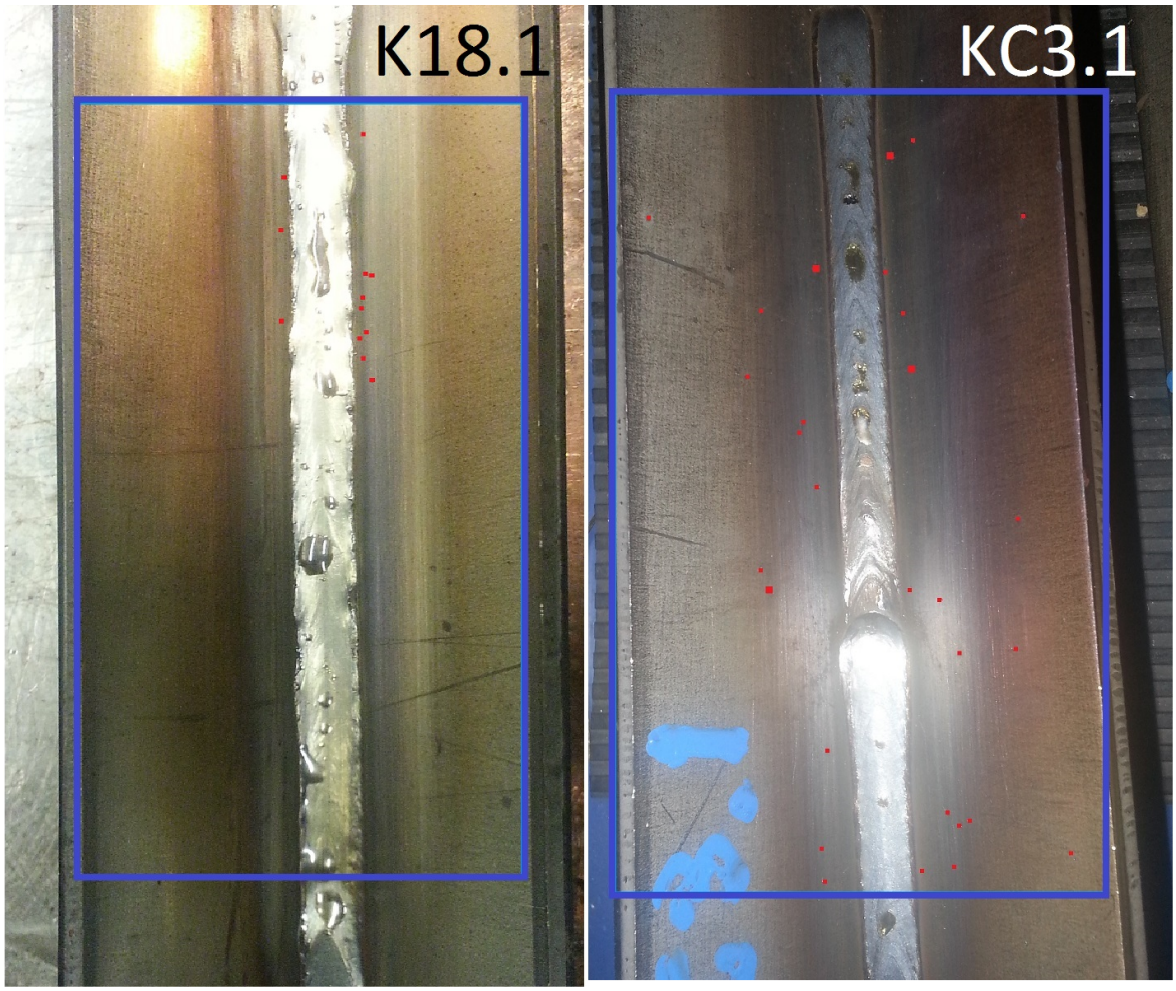
5.1 Roiskeisuuden analysointi

Monissa tutkimuksissa on todettu, että hiilidioksidin osuuden kasvaessa suojakaasussa roiskeisuus lisääntyy huomattavasti. Lisäksi tutkimuksista löytyi, että pulssituksella pystytään vähentämään roiskeiden syntymistä. Tässä työssä roiskeisuutta tutkittiin niiden lukumäärän laskemisella hitsauksen jälkeen jokaisen hitsin osalta. Roiskeet laskettiin n. 100 mm pitkältä ja koko koekappaleen levyiseltä alueelta. Roiskeet jaettiin karkeasti kahteen eri luokkaan; suuri- ja pienikokoisiin. Suurikokoisiksi roiskeiksi laskettiin selvästi kappaleen pinnalta erottuvat suuret hitsiroiskeet, joiden koko oli vähintään 0,5 mm. Pienikokoisiksi roiskeiksi laskettiin roiskeet, mitkä olivat alle 0,5 mm ja olivat täten huomattavasti pienempiä, eivätkä erottuneet yhtä selvästi. Roiskeiden määrä eri hitseissä on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Roiskeiden lukumäärä eri koehitseissä.

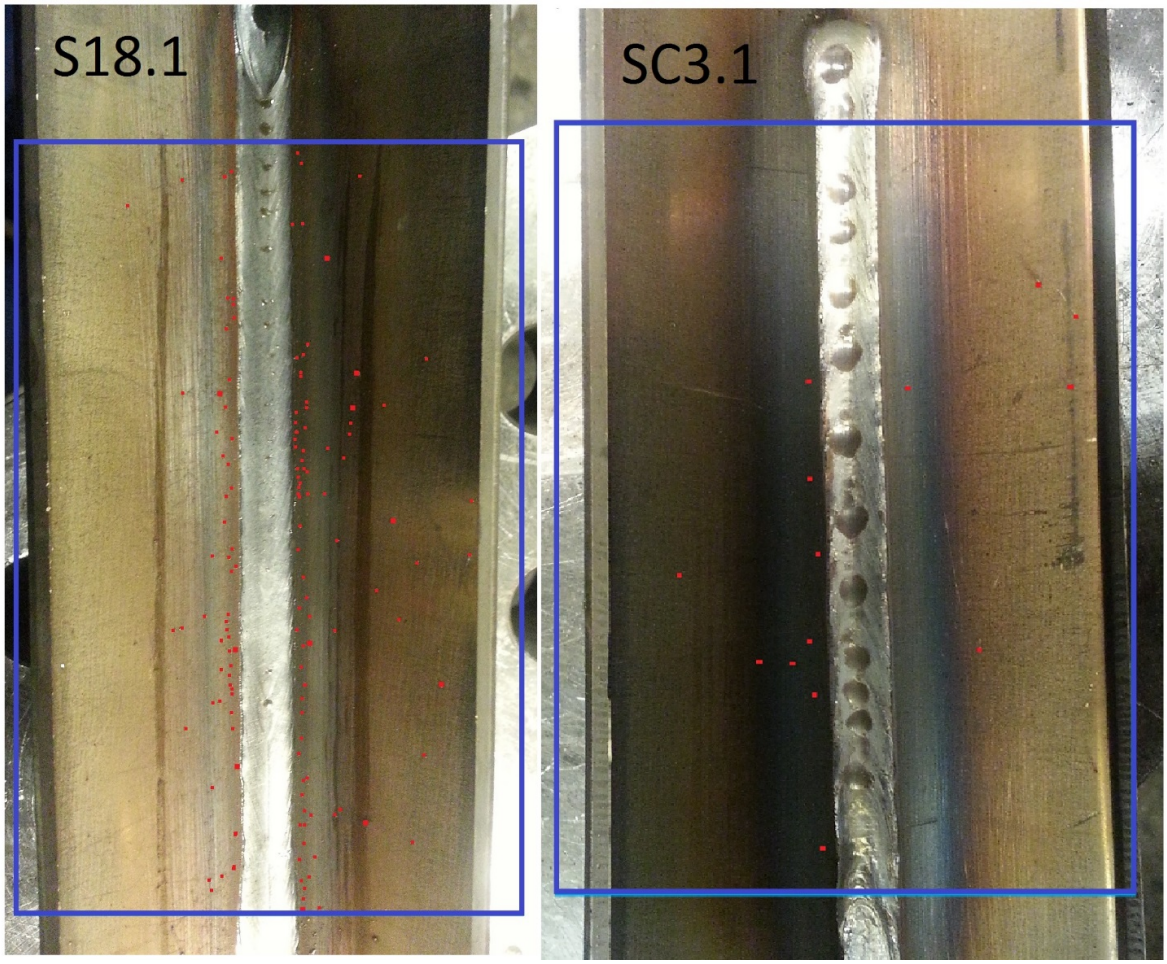
	Suurien roiskeiden lukumäärä [kpl]	Pienten roiskeiden lukumäärä [kpl]	**Yhteensä [kpl]**
S18.1	11	128	**139**
SC3.1	0	14	**14**
K18.1	0	18	**18**
KC3.1	4	25	**29**
F18.1	16	153	**169**
FC3.1	11	190	**201**

Koekappaleiden kuvissa roiskeet on merkitty punaisilla neliöillä. Neliöitä on kahta eri kokoa, joista suuremmat neliöt kuvastavat suurikokoisia roiskeista ja pienemmät neliöt pienikokoisia roiskeita. Lisäksi tutkittava-alue on hahmoteltu sinisellä ruudulla. Kuvassa 18 on esitetty roiskeisuuden jakautumista pulssikaarella hitsatuissa koekappaleissa.



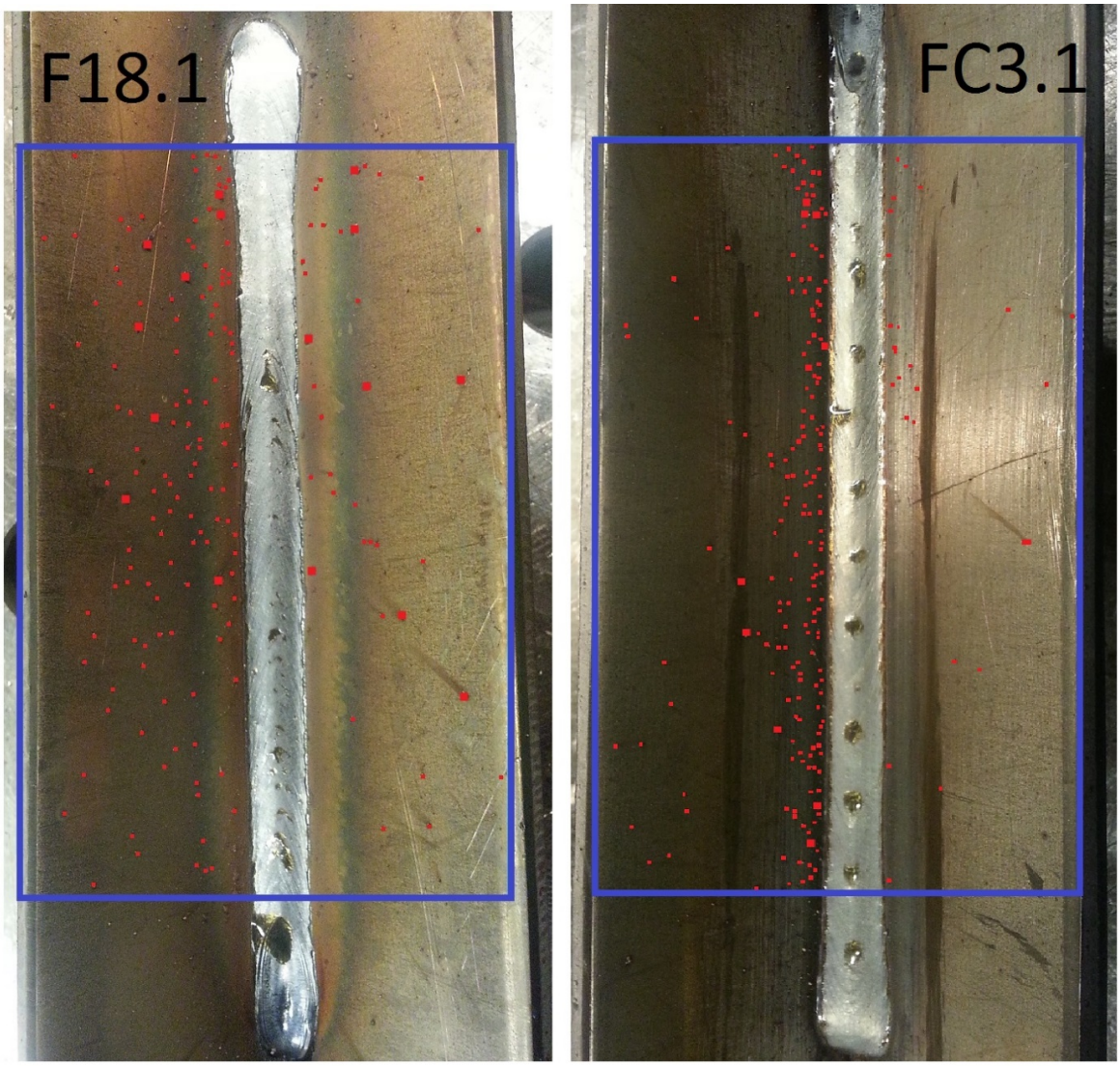
Kuva 18. Pulssikaarella hitsattujen koekappaleiden roiskeiden jakautuminen, jossa on vasemmalla Mison 18 ja oikealla Corgon 3 suojakaasu.

Pulssikaarella saavutettiin kokonaisvaltaisesti paras tulos roiskeiden määrän kannalta, suojakaasusta riippumatta. K18.1 koekappaleessa, jossa suojakaasuna toimi Mison 18, roiskeita muodostui 18 kappaletta ja KC3.1 roiskeita muodostui 29 kappaletta. Kuvassa 19 on havainnollistettu kuumakaari hitsauksessa muodostuneiden roiskeiden jakautumista.



Kuva 19. Kuumakaarella hitsatut koekappaleet ja niiden roiskeisuuden jakautuminen sekä määrä, jossa vasemmalla on Mison 18-suojakaasu ja oikealla Corgon 3 suojakaasu.

Kuumakaarella hitsattaessa suojakaasulla oli suurimerkitys roiskeiden muodostumiseen, sillä argonin ja hiilidioksidin seoskaasuulla (S18.1) muodostui huomattavasti enemmän roiskeita kuin AGAn kolmekomponenttikaasulla Corgon 3:lla (SC3.1). S18.1 koehitsauksissa muodostui 139 kappaletta ja SC3.1 roiskeita muodostui vain 14 kappaletta. SC3.1:ssa roiskeita muodostui kaikista kokeista vähinten. Kuvan 19 oikean puoleisessa hitsissä, jossa on käytetty Corgon 3 suojakaasua, on nähtävissä paljon pinnalle kerääntynyttä kuonaa, joka ei ole seostunut muodostuneeseen hitsiin. Kuonakalvot saattavat sisältää esimerkiksi rikkiä. Kuvassa 20 on havainnollistettu Kempin WiseFusionin hitsauksessa muodostuneiden roiskeiden jakautumista.

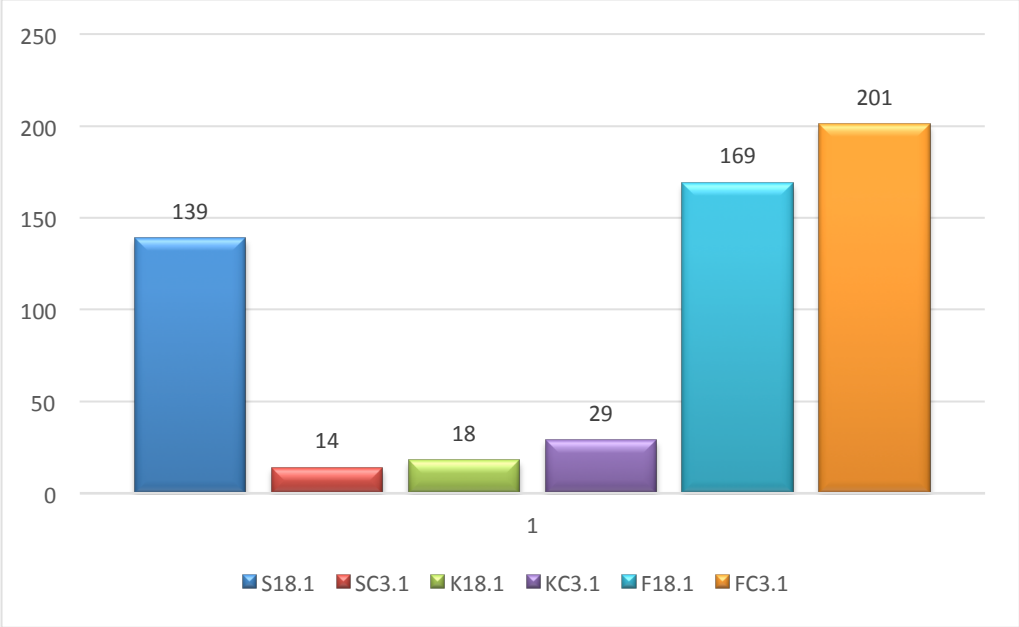


Kuva 20. Kemppi Oy:n WiseFusion™ koekappaleet ja roiskeiden jakautuminen, jossa vasemalla on Mison 18 ja oikealla Corgon 3.

Kemppi Oy:n WiseFusion™ erikoiskaarisovelluksella, F18.1 ja FC3.1, muodostui huomattava määrä roiskeita, suojakaasusta riippumatta. Syitä suureen roiskemäärään voi olla se, ettei hitsausparametreja optimoitu erikoisprosessille sopivammiksi. F18.1 roiskeita muodostui 169 kappaletta ja FC3.1 roiskeita muodostui 201 kappaletta. Syntyneet roiskeet olivat pääasiassa pieniä roiskeita.

Pulssituksella saadut tulokset olivat parhaimmat, sillä roiskeita muodostui yhteensä alle 50 kappaletta. Muiden kaarityyppien roiskeiden määrä oli kuumakaarella yli 150 ja WiseFusionilla yli 350 kappaletta. WiseFusionin synnyttämät roiskeet olivat huomattavasti

muiden koehitsausten roiskeita pienempiä. Kuvassa 21 on pyritty havainnollistamaan roiskeiden jakautumista eri suojakaasu/kaarityyppipareille.



Kuva 21. Kuvaajassa on esitetty roiskeiden määrä eri suojakaasu-kaarityyppipareille.

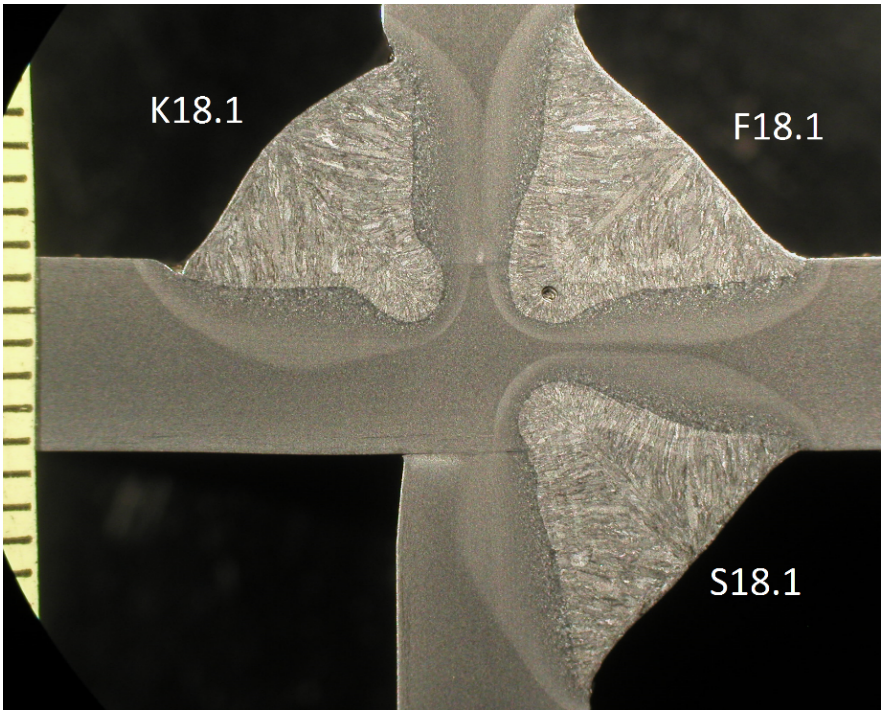
Roiskeita syntyi vähiten SC3.1, K18.1 ja KC3.1 kokeissa, joista nähdään, että pulssikaari toimi siis parhaiten valituista koepareista. Kuumakaarella, jossa käytettiin AGAn kolmekomponenttikaasua, saavutettiin yksittäisenä kokeena parempi tulos roiskeiden määrässä, mutta ero pulssikaarihitsaukseen oli vain neljä (4) kappaletta, joka ei ole merkittävä. Kirjallisuudesta löytyi tutkimuksia, joissa on todettu, että pulssitus vähentää roiskeisuutta ja parantaa hitsauksen hallintaa (Kurşun, 2011, s. 956; Tokihiko et al., 2009, s. 745).

Tulosten perusteella kuumakaarella hitsatut tulokset tukeutuvat kirjallisuudesta löydettyihin tuloksiin hiilidioksidin osuuden vaikutuksesta roiskeiden muodostumiseen, sillä kokeessa S18.1 muodostui huomattava määrä roiskeita SC3.1 verrattuna. Kirjallisuuslähteiden perusteella hiilidioksidin määrän kasvaessa roiskeisuus lisääntyy, jos hitsausvirtaa ei kasvateta vakaamman valokaaren ylläpitämiseksi (Pires et al., 2007, s. 1626).

Pulssikaaren sekä WiseFusionin roiskeiden määrä kasvoi kolmekomponenttikaasua käytettäessä, jolloin hiilidioksidin määrä väheni suojakaasun osuudesta 13 prosenttiyksikköä ja happi lisättiin seokseen. Hapen vaikutuksesta löytyi vain vähän tietoa, mutta erään lähteen mukaan hapen määrän kasvaessa hitsauksen roiskeisuus lisääntyy, mutta vain erittäin vähän esimerkiksi hiilidioksidiin verrattuna (Sato, 2001, s. 616). Kuvassa 13 kuvattiin hapen ja hiilidioksidin osuuksien vaikutusta roiskeisuuteen. Kuvasta on nähtävillä, että hapen ja hiilidioksidin määrien ollessa 5 % roiskeisuuden määrä kaasulla on melkein sama (n. 0,1 g/min). Tämä voi olla eräs selitys pulssikaaren ja WiseFusionin roiskeiden määrän lisääntymiseen Corgon 3 suojakaasulla. Toisaalta hiilidioksidin määrän ollessa 18 % roiskeisuutta syntyisi tutkimuksen mukaan n. 0,4 g/min, joka on huomattavasti suurempi kuin pienemmän hiilidioksidimäärän ja hapen muodostama roiskeisuusmäärä.

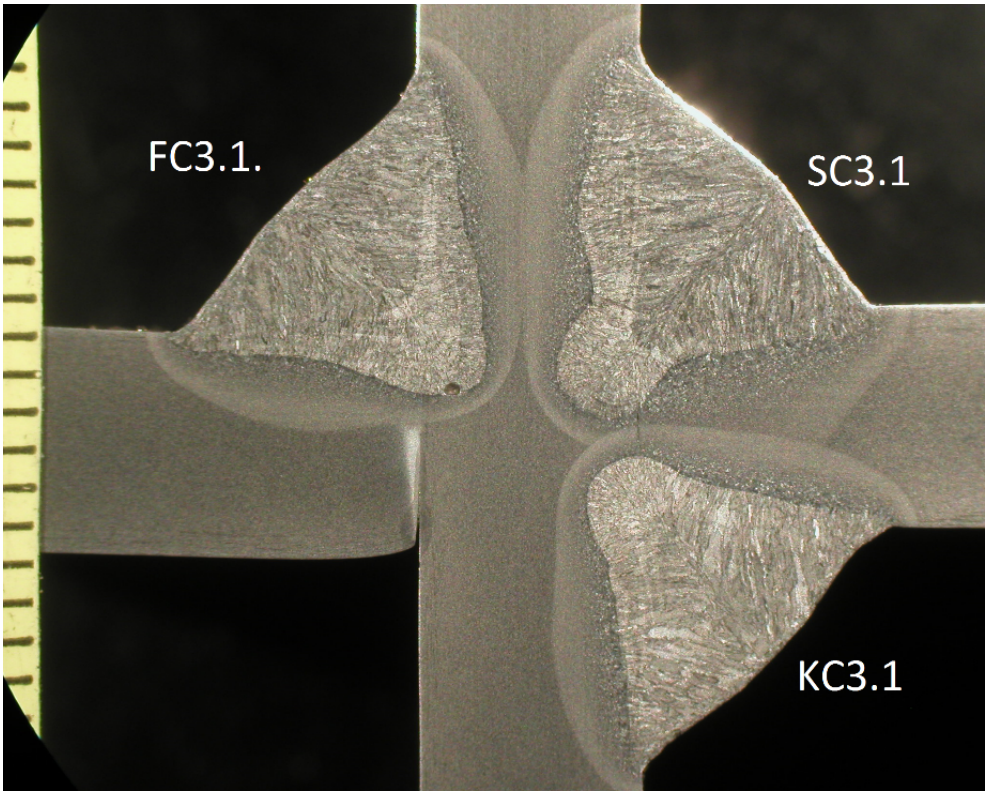
5.2 Tunkeuman analysointi

Makrohieet valmistettiin hitsien tunkeuman tarkastelua varten. Kuvissa 22 ja 23 ovat kuvat hiekappaleista, joissa kuvassa 22 suojakaasuna on argonin ja hiilidioksidin seos ja kuvassa 23 AGAn Corgon 3 suojakaasu.



Kuva 22. Makrohiekuva Ar + 18 CO_2 suojakaasulla hitsatusta koekappaleesta, jossa S18.1 on kuumakaari, F18.1 Kemppi WiseFusion ja K18.1 pulssikaari.

Pulssikaarella hitsatussa K18.1 hitsistä huomataan selvä reunahaava hitsin molemmilla reunoilla. Lisäksi pulssikaarella hitsatun K18.1 palon muoto hieman poikkeaa tavallisesta tasasivuisesta palosta. Syynä tälle erikoiselle palon muodolle voi olla polttimen tai hitsattavan kappaleen vääränlainen suuntaaminen. Eli poltin ei ole ollut koko matkaa täysin railon keskellä ja valokaari on hitsannut normaalista poikkeavassa kulmassa työkappaletta. K18.1 hitsin palon muotoon on voinut vaikuttaa myös liiallinen hitsausjännite, joka on muodostanut reunahaavan hitsin reunoille. Lisäksi voidaan huomata, että F18.1 hitsin alaosassa on huokonen.



Kuva 23. Makrohiekuva AGAn Corgon 3 suojakaasulla hitsatusta koekappaleesta, jossa SC3.1 on kuumakaari, FC3.1 Kemppi WiseFusion ja KC3.1 pulssikaari.

Corgon 3 kaasulla hitsatussa koekappaleessa (kuva 23) WiseFusionilla hitsatussa FC3.1 on huokonen palon alaosassa. Kuumakaarella hitsatussa SC3.1 hitsissä on huomattavissa sama poikkeavuus kuin K18.1:n palon muodossa. Kyseessä saattaa olla sama ongelma, eli polttimen tai hitsattavan kappaleen kohdistus ei ole ollut täydellinen tai hitsausjännitteen suuruus. Muilta osin hitsit näyttävät laadullisesti hyviltä ja tavoiteltu 4 mm a-mitta on saavutettu kaikissa hitseissä. Koekappaleille laskettiin lopuksi kaavojen 1 ja 2 avulla

lämmöntuonnit ja hitsausenergiat. Hitseille laskettujen lämmöntuontien ja hitsausenergioiden arvot ovat esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Hitseille laskettujen hitsausenergioiden ja lämmöntuontien arvot.

		S18.1	**SC3.1**	**K18.1**	**KC3.1**	**F18.1**	**FC3.1**
Hitsaus-energia	**[kJ/mm]**	0,98	1,17	1,00	1,02	0,93	0,89
Lämmön-tuonti	**[kJ/mm]**	0,78	0,94	0,80	0,81	0,75	0,72

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUSAIHEET

Tehtyjen kokeiden ja niistä saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että kaarityypillä on vaikutusta roiskeiden määrään. Pulssikaarella saavutettiin vakaimmat ja parhaimmat tulokset roiskeisuuden kannalta suojakaasusta riippumatta. Kemppi Oy:n WiseFusionilla saadut tulokset olivat selvästi huonoimmat molemmilla suojakaasuilla. Erikoiskaarisovelluksessa hyödynnetään kuroutettua valokaarta, joka aiheuttaa valokaaren palamisen tavallista valokaarta syvemmällä ja täten mahdollistaa kapeampien railojen käytön. Tästä johtuen roiskeisuutta olisi mahdollisesti pystytty vähentämään, jos hitsauksessa käytettäviä parametreja olisi muutettu, suojakaasun virtausta säädetty jne., sillä roiskeet ovat voineet muodostua epäedullisten parametrien ja arvojen johdosta.

Suojakaasujen eroavaisuudet eivät ilmenneet niin selkeästi kuin kaarityyppien, mutta eroja löytyi. Kirjallisuudesta löytyi tutkimuksia, joissa todettiin, että hiilidioksidin määrän kasvaessa roiskeiden määrän tulisi kasvaa, mutta tämä ilmeni vain kuumakaarihitsauksessa. Kun taas pulssikaarihitsauksessa ja WiseFusionilla hitsattaessa kolmekomponenttisuojakaasu aiheutti enemmän roiskeisuutta, joka on ristiriidassa hiilidioksidin ja roiskeisuuden yhteyden kanssa. Hitsauskokeiden aikana oli huomattavissa, että pulssikaarella hitsattaessa valokaari oli rauhallinen ja valokaaren synnyttämä ääni tasainen.

Eräs syy saatuihin tuloksiin kolmekomponenttikaasun osalta voi olla se, ettei kokeissa käytettävän hitsauslaitteen ohjelmistosta löytynyt juuri oikeaa säätöä käytettävälle suojakaasulle. Virtalähteen arvoksi asetettiin sama kuin toisen suojakaasun kanssa, eli ’Ar + 18 % CO_2’. Oikealla säädöllä olisi voinut tulla erilaiset tulokset, mutta arvio on, ettei säädön puute vaikuttanut tuloksiin merkittävästi.

WiseFusionin koetuloksiin voi vaikuttaa vähäinen parametrien optimointi, sillä hitsaustapahtumat pyrittiin pitämään jokaiselle kokeelle mahdollisimman samankaltaisena. Virtalähteen parametreja säätämällä hitsaustapahtuma ja sitä kautta valokaarta olisi mahdollisesti saatu optimoitua suotuisammaksi, jottei roiskeita olisi syntynyt niin paljoa. Valtaosa WiseFusionin roiskeista oli todella pieniä, mutta ne laskettiin kaikesta huolimatta

roiskeiksi. Koetulokset saattaisivat muuttua totaalisesti kaikkien kaarityyppien osalta, jos parametreja optimoitaisiin mahdollisimman suotuisiksi virtalähteen erikoistoiminnoilla (hienosäätö, dynamiikka jne.).

Roiskeisuuden minimointiin tärkein tekijä on kaarityypin valinta, sillä saatujen tulosten perusteella kaarityypeillä oli selvimmät erot. Tämä voidaan päätellä myös aikaisempien tutkimusten ja löydetyn teorian pohjalta, sillä aineen siirtymismuodolla on merkittävä rooli roiskeisuudessa. Lisäksi on oletettavaa, että parametrien optimoinnilla ja säätämisellä on vaikutusta roiskeisuuden syntyyn. Tuloksista huomataan, ettei suojakaasu ole niin tärkeä tekijä roiskeisuuden syntyyn. Lisäksi kokeissa saadut tulokset ja aikaisemmat tutkimukset ovat hieman ristiriidassa hiilidioksidin suhteen, sillä hiilidioksidivaltaisen suojakaasun olisi pitänyt muodostaa enemmän roiskeita kuin Corgon 3 suojakaasu, joka sisälsi vähemmän hiilidioksidia. 2/3 koetuloksista kuitenkin osoittaa, että argonin, hapen ja hiilidioksidin sisältämä suojakaasu (Corgon 3) aiheuttaa enemmän roiskeita kuin suuremman hiilidioksidin osuuden omaava suojakaasu.

Koemäärien kasvattamisella pystyttäisiin varmentamaan tulosten oikeellisuus, sillä on mahdollista, että jokin funktio ei toiminut juuri näissä kokeissa ja puutteellisuus olisi tullut ilmi laajemmissa tutkimuksissa. Roiskeisuuden selvittämisessä oli haastavaa itse roiskeiden määrittäminen. Hitsattujen koekappaleiden roiskeiden määrät vaihtelivat niin koon kuin määränkin suhteen.

Tulevaisuudessa roiskeisuuden tutkimisessa voitaisiin selvittää kaasuvirtauksen suuruuden vaikutusta roiskeiden muodostumiseen, sekä vaikuttaako virtausnopeus roiskeisuuteen eri kaasuilla eri tavalla. Tutkimuksessa voitaisiin keskittyä vain suojakaasuihin ja pitää kaarityyppi samana. Toinen jatkotutkimusaihe voisi olla kaarityypin optimoinnin ja parametrien vaikutus roiskeisuuteen. Suojakaasu pysyisi samana, mutta valittujen kaarityyppien parametreja ja muiden säätömahdollisuuksien, kuten hienosäädön ja dynamiikan, vaikutuksia roiskeiden syntyyn pyrittäisiin tutkimaan.

7 YHTEENVETO

Kandidaatintyössä tutkittiin suojakaasun ja kaarityypin vaikutusta roiskeiden syntyyn. Teoriakatsauksessa selvitettiin perusteoriaa koehitsauksissa käytettävän MAG-hitsauksen osalta sekä tutkittiin suojakaasujen ja kaarityyppien ominaisuuksia. Teoriaosuudessa paneuduttiin myös hitsausvirheisiin, jossa painotuksena oli erityisesti roiskeisuus ja roiskeisuuden syitä. Tutkimuksia varten suoritettiin kuusi koehitsausta, joiden perusteella pyrittiin selvittämään roiskeisuuteen vaikuttavia tekijöitä suojakaasun ja kaarityypin suhteen.

Aikaisemmissa tutkimuksissa, liittyen roiskeisuuteen, on tutkittu pääasiassa hiilidioksidin vaikutusta roiskeiden syntyyn ja hapen vaikutuksia oli tutkittu huomattavasti vähemmän. Tutkimusten pohjalta selvisi, että argonpohjaisessa suojakaasussa hiilidioksidin määrän kasvaessa roiskeisuus lisääntyy huomattavasti, kun hiilidioksidin osuus vaihtelee 0–100 % koko suojakaasun osuudesta. Hiilidioksidin määrän kasvaessa valokaaren käyttäytyminen ja siten lisäaineen siirtyminen hitsisulaan muuttuvat. Lisäainepisaran koko kasvaa ja siirtymisestä tulee epäsäännöllisempää, joka vaikuttaa roiskeisuuteen. Happi aiheuttaa hiilidioksidin lailla roiskeisuutta, mutta hapen määrän kasvaessa roiskeisuus lisääntyy vain vähän hiilidioksidiin verrattuna. Tyypillinen hiilidioksidin osuus MAG-hitsauksen argon-pohjaisesta suojakaasusta vaihtelee 2–25 % ja hapen osuus 0–10 %

Pulssituksen on tutkittu vähentävän roiskeiden muodostumista, sillä valokaari on rauhallinen ja lisäaine siirtyy hitsiin hallitusti ja tasaisesti. Kuumakaarihitsauksessa aine siirtyy pienenä pisarasuihkuna hitsisulaan, joka on hallittua.

Koehitsauksista saaduista tuloksista voidaan päätellä, että kaarityypillä on suurempi merkitys roiskeiden syntymisessä kuin suojakaasulla, sillä eroavaisuudet eri kaarityyppien välillä suojakaasusta riippumatta ovat selkeämmät kuin eri suojakaasujen erot kaarityyppien välillä. Pulssituksella saavutettiin selvästi paremmat tulokset kuin muilla kaarityypeillä, ja joka on yhteydessä aikaisempiin tutkimuksiin. Teorioista löydetty hiilidioksidin vaikutus roiskeisuuteen ei todentunut saatujen tulosten perusteella, sillä 2/3 kokeista osoitti, että kolmekomponenttisuojakaasu aiheutti enemmän roiskeita, kuin

runsaamman hiilidioksidin määrän omaava suojakaasu. Tämä voi viitata siihen, että hapen ja hiilidioksidin keskinäinen reagoiminen hitsauksen aikana aiheuttavat roiskeisuutta.

LÄHTEET

ESAB. 2014. Hitsaustietoa – MIG-MAG-hitsaus. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 26.09.2014. [Viitattu 26.09.214]. Saatavissa: http://www.esab.fi/fi/fi/education/processes-mig-gmaw.cfm.

EWM AG. 2013. EWM-Group - coldArc©. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 25.04.2014. [Viitattu 18.11.2014]. Saatavissa: https://www.ewm-group.com/images/stories/innovationen/praesentationen/en/coldArc/coldArc.html

Fronius International GmbH. 2014. Fronius – CMT Welding. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 18.11.2014. [Viitattu 18.11.2014]. Saatavissa: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_international/hs.xsl/79_9399_ENG_HTML.htm#.VJK4uWOEOBQ

de Menenses, V., Gomes, J. & Scotti, A. 2014. The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation morphology and composition in short-circuit MAG welding. The Journal of Material Processing Technology, vol 214:7. s. 1388–1397.

Doodman Tipi, A. R., Hosseini sani, S. K. & Pariz, N. 2014. Improving the dynamic metal transfer model of gas metal arc welding (GMAW) process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol 76:1-4. s. 657–668.

Kah, P. & Martikainen, J. 2013. Influence of shielding gases in the welding of metals. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol 64:9-12. s. 1411–1421.

Kah, P., Suoranta, R. & Martikainen, J. 2013. Advanced gas metal arc welding processes. International Journal of Advanced Manufacturing technology, vol 67:1-4. s. 655–674.

Karadeniz, E., Ozsarac, U. & Yldiz, C. 2007. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. Materials and Design, vol 28:2. s. 649–656.

Kemppi Oy. 2013a. Hitsausaapinen – MIG/MAG-hitsaus, Laitteet. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 27.09.2014. [Viitattu 27.09.2014]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/fi/akp.nsf/frameset/Frameset?OpenDocument&left=/inet/kemppi/fi/akp.nsf/WEB_Nav?OpenView&navcat=Welding%20ABC&main=/inet/kemppi/contman.nsf/0/5EA64CEDFF42FC30C225718D003E66A7?opendocument&top=/inet/kemppi/fi/akp.nsf/Top?ReadForm&topcat=Welding%20ABC

Kemppi Oy. 2013b. Kemppi WiseThin™. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 24.10.2014. [Viitattu 24.10.2014]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/0/8B18ED7051905F1BC22574E9001E1B43?OpenDocument

Kemppi Oy. 2013c. Kemppi WiseRoot™. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 24.10.2014. [Viitattu 24.10.2014]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/0/1F55021F369E6E00C22576240040846B?OpenDocument

Kemppi Oy. 2013d. Kemppi WisePenetration™. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 30.09.2014. [Viitattu 30.09.2014]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/0/6C7C 7C91E7C0AC26C225762400485902?OpenDocument

Kemppi Oy. 2013e. Kemppi WiseFusion™. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 24.10.2014. [Viitattu 24.10.2014]. Saatavissa: http://www.kemppi.com/inet/kemppi/kit.nsf/0/E58F90813E77658EC225762D004F330D?OpenDocument

Kurşun, T. 2011. Effect of the GMAW and the GMAW-P Welding Processes on Microstructure, Hardness, Tensile and Impact Strength of AISI 1030 Steel Joints Fabricated by ASP316L Austenitic Stainless Steel Filler Metal. Archives of Metallurgy and Materials, vol 56:4. s. 955–963.

Lincoln Electric. 2014. Surface Tension Transfer, STT. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 13.08.2013. [Viitattu 25.10.2014]. Saatavissa: http://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/NX220.pdf

Lukkari, J. 2007. Työkaluja hitsauskoordinoijalle hitsausten suunnittelua varten. Hitsaustekniikka, vol 2. s. 2–17.

Lukkari, J. 1997. Hitsaustekniikka - Perusteet ja kaarihitsaus. Helsinki. Opetushallitus. 292 s.

Migatronic A/S. 2012. Intelligence Arc Control – IAC. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 18.11.2014. [Viitattu 18.11.2014]. Saatavissa: http://www.migatronic.com/why%20migatronic/green%20world/iac%20-%20intelligent%20arc%20control

Morret, B. & Giese, B. 2006. Troubleshooting the GMAW Process. Welding Journal, vol 85:2. s. 26–27.

Ovako. 2012. Ovakon terästen hitsaus. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 09.03.2012. [Viitattu 23.10.2014]. Saatavissa: http://www.ovako.com/PageFiles/320/Ovakon_terasten_hitsaus_15724.pdf

Oy AGA Ab. 2014. AGA – Käytännön ohjeita MIG/MAG-hitsaukseen. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 03.09.2014. [Viitattu 26.09.2014]. Saatavissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20MIG%20MAG%20Welding%20Brochure%202014%20FI634_122347.pdf

Oy AGA Ab. 2013. AGA – Suojakaasukäsikirja. [Verkkodokumentti]. Päivitetty 11.02.2013. [Viitattu 25.11.2014]. Saatavissa: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20Shielding%20Gases%20Handbook%20FI634_122349.pdf

Pires, I., Quitino, L. & Miranda, R. M. 2007. Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. Materials and Design, vol 28:5. s. 1623–1631.

Sato, T. 2001. Influence of shielding gases on quality and efficiency in gas shielded arc welding. Welding International, vol 15:8. s. 616–619.

Schweighardt, F. 2007. Choosing shielding gases for arc welding. The Fabricator, vol 37:9. s. 40–42.

Scotti, A., Ponomarev, V. & Lucas, W. 2012. A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. Journal of Materials Processing Technology, vol 212:6. s. 1406–1413.

SFS-EN 1011-1. 2009. Hitsaus – Metallisten materiaalien yleissuositukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. 25 s. Vahvistettu 20.04.2009.

Suban, M. & Tušek, J. 2003. Methods for the determination of arc stability. Journal of Materials Processing Technology, vol 143–144. s. 430–437.

Tokihiko, K., Rinsei, I., Koichi, Y. & Yoshinori, H. 2009. Development of low spatter CO_2 arc welding process with high frequency pulse current. Science and Technology of Welding Joining, vol 14:8. s. 740–746.

Uusitalo, J. 2012. Hitsausvalokaaren hallinnalla huippulaatu. Kemppi ProNews 2012. s. 21–25.

Weman, K. 2012. Welding processes handbook. 2. painos. Cambridge. Woodhead Publishing Limited. 270 s.

RUUKKI

VASTAANOTTOTODISTUS INSPECTION CERTIFICATE

EN 10 204-3.1 (2004)

87861U-001
23.10.2012

Tilaaja Purchaser
RUUKKI METALS OY
00810 HELSINKI FINLAND

Tilaus nro Order No.
4500512370

Tilausvahvistus Order Confirmation
87861U

Vastaanottaja Consignee
RUUKKI STAINLESS STEEL &
04400 JÄRVENPÄÄ FINLAND

Asiakkaan merkki Shipping mark

Päivämäärä Date
24.10.2012

Valmistajan merkki
Mark of the Manufacturer

Todistus Certificate
31

Laivaus Shipping

Laatuleimaus Quality Stamping

Tarkastajan leima
Stamp of Inspector
Mxx

Vastaanottajan leima
Stamp of Surveyor

Muut leimaukset
Other Stamps

Toimitustyyppi Delivery type
TOTAL DELIVERY

Sulatus nro levy nro Cast No. Plate No.
XXXXX XXX XX XXX

Tuote Product
COILS

Toleranssit Tolerances
RUUKKI LASER,EN 10051

Tekniset vaatimukset ja/tai viralliset määräykset Technical terms of Delivery and/or Official Regulations

Laji Grade
LASER 355 MC

Laatuselvitys Quality Specifications
RUUKKI LASER, HSF FINE GRAIN STEEL FOR LASER/PLASMA CUTTING

Positio Item	Mitat mm Dimensions mm	Merkki Marke	Kpl Pcs	Paino kg Weight kg	Sulatus levy nro Cast plate No	SP nro SP No	UT UT	MT MT
HOT ROLLED STEEL MILL EDGE COILS PICKLED								
MEETS REQUIREMENTS OF EN10149-2 S355MC								
010	6.00 X 1250 X 155000	4500512370 A001.A02260 STD	2	20470	58965	041	041	
		***	2	20470				

RUUKKI 01609250

Raahe Steel Works

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

Testaus ja tarkastus Testing and Inspection

JAAKKO JUUSO
Valtuutettu tarkastaja Authorized inspection representative

RTX60

Yhtiön nimi Company Name: RUUKKI METALS OY
Kotipaikka Registered Office: HELSINKI
Osoite Address: PL 93, P.O Box 93 FIN-92101 RAAHE NLAND
Puhelin Telephone: 020 5911 +358 20 5911
Telekopio Telefax: 020 592 2736 +358 20 592 2736
Y-tunnus Business ID: 2389445-7

Ainestodistus.

RUUKKI

AINESTODISTUS TEST REPORT

EN 10 204-3.1 (2004)

87861U-001

23.10.2012

Tilaaja Purchaser
RUUKKI METALS OY

Tilaus nro Order No.
4500512370

Laji Grade
LASER 355 MC

Laatuselvitys Quality Specifications
RUUKKI LASER, HSF FINE GRAIN STEEL FOR LASER/PLASMA CUTTING

Vastaanottaja Consignee
RUUKKI STAINLESS STEEL & ALUMINIUM OY
Asiakkaan merkki Shipping mark

Lisävaatimukset Additional requirements

Päivämäärä Date
24.10.2012 MLK

Valmistajan merkki
Mark of the Manufacturer

Jatkuvavalettua happiterästä
Oxygen steel, continuous casting

Fully killed, Fine grain practiced

Pos. Item	Sulatus, k.erä nro Cast. test No	T-tila Cond	Vetokoe Tensile test K2	°C	RP02 MPa	RT05 MPa	REL MPa	REH MPa	RM MPa 1	2	3	A % 50	80	200	REH / RM	RM * A5	RAZ % 1	2	3	Keskiarvo Average	Taivutuskoe Bend test K5	D = X t	Huom Nb	Päästö Tempering °C
010	58965 041	TM	52					398	464				33								52	0.5		

K2: 52=BOTTOM, LONGITUDINAL
K5: 52=120 MM WIDE BEND TEST

TM=THERMOMECH. TREATED

Pos. Item	Sulatus k.erä nro Cast. test No	Iskukoe Impact test K3	°C	1	2	3	Keskiarvo Average	Sitkeämurtuma Ductile fracture 1	2	3	Keskiarvo Average	Erikoiskokeet Special tests K4	°C	1	2	Keskiarvo Average	Huom Nb	Päästö Tempering °C
010	58965 041	157	-020	168	193	155	172											

K3: 157=CH-V/ISO-V(J),TX10,BOTTOM,LONGIT,KV600

Raahe Steel Works

Testaus ja tarkastus Testing and Inspection

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

JAAKKO JUUSO
Valtuutettu tarkastaja Authorized inspection representative

Yhtiön nimi Company Name: RUUKKI METALS OY Osoite Address: PL 93, P.O Box 93 FIN-92101 RAAHE LAND Puhelin Telephone: 020 5911 +358 20 5911 Telekopio Telefax: 020 592 2736 +358 20 592 2736 Y-tunnus Business ID: 2389445-7
Kotipaikka Registered Office: HELSINKI

Liite I, 2

RUUKKI

ANALYYSITODISTUS ANALYSIS CERTIFICATE
ANALYSEBESCHEINIGUNG COMPOSITIO CHIMIQUE CERTIFICAT
СЕРТИФИКАТ АНАЛИЗА

87861U-001
23.10.2012

Sulatus nro Cast No Schmelzen Nr. Nõ de coulén № Плавки	Koe nro Test No Prüf Nr. Essai No № Пробы	Positio Item Pos. Poste Поз.	Cekv Ceq Cäq Cég Сekv	Analyysi % Chemical composition % Chemisch Zusammensetzung % Composition Chimique % Анализ плавки % (*=ppm)							
				C	SI	MN	P	S	AL	NB	V
58965		010	.19	.055	.02	0.70	.007	.006	.047	.027	.006

Päivämäärä Date Datum Date Дата
24.10.2012 MLK

CEQ=C+MN/6+(CR+MO+V)/5+(NI+CU)/15

Raahe Steel Works

Testaus ja tarkastus — Testing and Inspection — Испытание и контроль качества
Prüfung und Kontrolle — Essais et Contrôle

Steel manufactured and supplied by Rautaruukki is free from radiation.
Производимая на металлургическом комбинате «Rautaruukki» и поставляемая заказчику сталь не излучают радиации.

JAAKKO JUUSO
Valtuutettu tarkastaja — Authorized inspection representative — Уполномоченный инспектор
Sachverständiger — Inspector autorisé

Yhtiön nimi Company Name: RUUKKI METALS OY
Kotipaikka Registered Office: HELSINKI
Osoite Address: PL 93, P.O Box 93, FIN-92101 RAAHE, FINLAND
Puhelin Telephone: 020 5911, +358 20 5911
Telekopio Telefax: 020 592 2736, +358 20 592 2736
Y-tunnus Business ID: 2389445-7

Ainestodistus.

Liite I, 3