LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Kone
BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

ALUMIININ MONIPALKOHITSAUS
MULTI-RUN WELDING OF ALUMINIUM

Lappeenrannassa 12.8.2013

Ilkka Kaipainen
0311905

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO ... 3

1 JOHDANTO ... 4

2 ALUMIINI JA ALUMIINISEOKSET ... 6

2.1 Alumiiniseokset ... 6

2.1.1 Kylmämuokattavat seokset ... 7

2.1.2 Lämpökäsiteltävät seokset ... 8

3 ALUMIININ HITSATTAVUUS ... 10

3.1 Eri alumiinilaatujen hitsattavuus ... 10

3.1.1 Muokatut seokset ... 11

3.1.2 Karkenevat seokset ... 11

3.2 Muodonmuutokset ... 12

4 HITSAUSPROSESSIT ... 14

4.1 MIG -hitsaus (Metal Inert Gas welding) ... 14

4.2 TIG -hitsaus (Tungsten Inert Gas welding) ... 15

4.3 Muita prosesseja ... 16

5 HITSAUSAINEET ... 17

5.1 Hitsauslisäaineet ... 17

5.2 Suojakaasut ... 17

6 HITSAUKSEN ESIVALMISTELUT ... 20

6.1 Railot ... 20

6.2 Juurituet ... 20

6.3 Puhdistukset ... 21

6.4 Esikuumennus ... 21

7 ALUMIININ MONIPALKOHITSAUS ... 22

7.1 Alumiinin monipalkohitsauksen metallurgiaa ... 22

7.2 Hitsausvirheet 24
7.2.1 Huokoset 25
7.2.2 Kuumahalkeamat 26
7.2.3 Liitosvirheet 27
7.2.4 Sulkeumat 28
8 ALUMIININ MONIPALKOHITSAUSKOKEET 29
8.1 Koejärjestelyt 29
8.2 Tulokset 31
8.3 Tulosten tarkastelu 38
9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET 39
10 YHTEENVETO 40
LÄHTEET 42

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Tunnukset ja yksiköt

^{o}C	celsiusaste
A	ampeeri
Al	alumiini
Al_2O_3	alumiinioksidi
Bi	vismutti
Cu	kupari
Fe	rauta
h	tunti
Mg	magnesium
m	metri
mm	millimetri
Mn	mangaani
Pb	lyijy
s	sekunti
Si	pii
V	voltti
vk	viikko
Zn	sinkki

Lyhenteet

AW	Aluminum Wrought alloys
EN	European Standard
FSW	Friction Stir Welding
HAZ	Heat Affected Zone
ISO	International Organization for Standardization
MIG	Metal Inert Gas
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
TIG	Tungsten Inert Gas

1 JOHDANTO

Alumiini on toiseksi käytetyin metalli teräksen jälkeen. Alumiinia käytetään lukuisilla teollisuuden aloilla sen lujuus/paino-suhteen ja hyvän korroosionkestävyyden vuoksi. Suurimpia alumiinin käyttäjiä ovat pakkaus-, ajoneuvo-, laiva-, rakennus-, sähkötarvike- ja sotatarviketeollisuus. Useimmat alumiinit ovat hyvin hitsattavia ja hitsaus on yleinen prosessi alumiinituotteiden valmistuksessa. (Lukkari 2001, s. 26-28.)

Alumiinilla on kemiallinen taipumus yhtyä hapen kanssa, ja sen pinnalle syntyy nopeasti kova ja sitkeä oksidikalvo, joka suojaa materiaalia korroosiolta. Alumiinioksidin sulamislämpötila on huomattavasti korkeampi kuin alumiinin, ja se aiheuttaa hitsausvirheitä jäädessään hitsisulan sisään. Lisäksi oksidi sitoo itseensä kosteutta, joka voi vapauttaa vetyä hitsiin. Alumiinin hitsauksessa vallitsee käsitys, että oksidikerros tulee poistaa mekaanisesti railopinnoilta ja hitsipalkojen välistä hitsausvirheiden minimoimiseksi ja liittymisen varmistamiseksi. (Tampereen teknillinen yliopisto 2005.)

Tämän työn tavoitteena on tutkia alumiinin pinnalle muodostuvan oksidikerroksen vaikutusta hitsien metallurgiaan ja erityisesti hitsausvirheisiin. Työn aiheena on alumiinin monipalkohitsaus. Monipalkohitsauksella tarkoitetaan yksinkertaisesti usean hitsin suorittamista samaan hitsausrailoon. Useiden eri palkojen hitsaaminen altistaa hitsin useammille hitsausvirheille, koska palkojen välinen pinta-ala on suurempi kuin yhdellä palolla hitsattaessa. Työ rajoittuu hitsausvirheiden tutkimiseen, ja esimerkiksi mikrorakenne- ja muodonmuutoksia ei huomioida tässä työssä. Aihetta tutkitaan kirjallisuusselvityksen lisäksi hitsauskokeella, joka käsittää useita eri koehitsejä. Eri koekappaleiden olosuhteita muutetaan kosteuden ja päällehitsausajankohdan mukaan, jotta oksidikerroksen vaihteluita voidaan tutkia.

Työ alkaa teoriaosalla, jossa käsitellään alumiinin materiaaliominaisuuksia hitsauksen kannalta sekä alumiinin hitsauksen metallurgiaa. Nämä asiat ovat tärkeitä laadukkaiden ja virheettömien hitsien aikaansaamiseksi. Lisäksi esitellään yleisimpiä alumiinin hitsauksessa käytettäviä hitsausprosesseja ja -lisäaineita. Työ sisältää myös tietoa hitsauksen esivalmisteluista. Teoriaosan lopussa esitellään alumiinin monipalkohitsauksen

teoriaa ja pohditaan useiden palkojen vaikutusta hitsin metallurgisiin ominaisuuksiin ja hitsausvirheisiin.

Kokeellisessa osuudessa käsitellään hitsauskokeita, joissa hitsattiin AW EN-5083 -alumiinia hitsausrobotilla koesuunnitelman mukaan. Eri koekappaleilla oli erilaiset olosuhteet kosteuden ja palkojen välisen hitsausajan suhteen. Testit suoritettiin LUT Koneen hitsaustekniikan laboratoriossa.

2 ALUMIINI JA ALUMIINISEOKSET

Alumiini on monikäyttöinen ja taloudellinen rakenneaine. Sillä on monia hyödyllisiä ominaisuuksia (Pettinen et al. 2004, s. 241):

- Sen tiheys on kolmasosa teräksen tiheydestä
- Sään- ja korroosionkesto on hyvä
- Muovattavuus on erinomainen
- Sähkönjohtavuus on 60 % kuparin sähkönjohtavuudesta
- Lämmönjohtavuus on 30- 50 % kuparin lämmönjohtavuudesta
- Hyvä heijastuskyky
- Ei kipinöi
- Ei ole magneettinen.
- Useimpien alumiiniseosten hitsattavuus on hyvä.

Hitsatut alumiinirakenteet ovat yleisiä offshore -teollisuudessa, kuljetusalalla ja laivanrakennuksessa. Alumiinin helppo muokattavuus ja mahdollisuus valmistaa ohuita kalvoja ovat vakiinnuttaneet sen elintarvikepakkausten materiaalina. Keveytensä ansiosta se on ottanut jalansijaa teräkseltä ajoneuvoteollisuudessa. Myös lentokoneteollisuudessa alumiinia on käytetty runsaasti. (Lukkari 2001, s. 26-29.)

2.1 Alumiiniseokset

Puhdas alumiini sisältää vähintään 99 % alumiinia. Se on hyvin pehmeä metalli ja omaa alhaisen lujuuden verrattuna seostettuihin alumiineihin. Sen käyttö rakennemateriaalina on vähäistä. Puhtaan alumiinin sähkön- ja lämmönjohtavuus on kuitenkin erittäin hyvä. (Lukkari 2001, s. 10.)

Seostamalla alumiinia sen lujuutta, korroosionkestoa ja valettavuutta voidaan parantaa. Yleisimmät seosaineet ovat mangaani, magnesium, kupari, pii ja sinkki. Muita vähemmän käytettyjä seosaineita ovat titaani, zirkoni, lyijy tai litium. Yhdistelemällä eri seosaineita saadaan muokattua alumiinille halutut ominaisuudet. Alumiinin lujuutta voidaan parantaa

lähes kaikilla mainituilla seosaineilla ja esimerkiksi magnesium ja mangaaniseostus lisäävät korroosionkestoa. (Lukkari 2001, s. 10-11.)

Alumiiniseokset erotellaan eri seosaineiden mukaan nelinumeroisella nimikejärjestelmällä SFS-EN 573-1 – standardissa. Seosryhmät ovat (SFS-EN 573-1 2005, s. 6; Martikainen 2011, s. 11):

- 1xxx (1000-sarja), puhdas alumiini (puhtaampi kuin 99 %)
- 2xxx (2000-sarja), kupari
- 3xxx (3000-sarja), mangaani
- 4xxx (4000-sarja), pii
- 5xxx (5000-sarja), magnesium
- 6xxx (6000-sarja), magnesium ja pii
- 7xxx (7000-sarja), sinkki
- 8xxx (8000-sarja), litium
- 9xxx (9000-sarja), muut seosaineet (mm. skandium, nikkeli, molybdeeni, Al_2O_3).

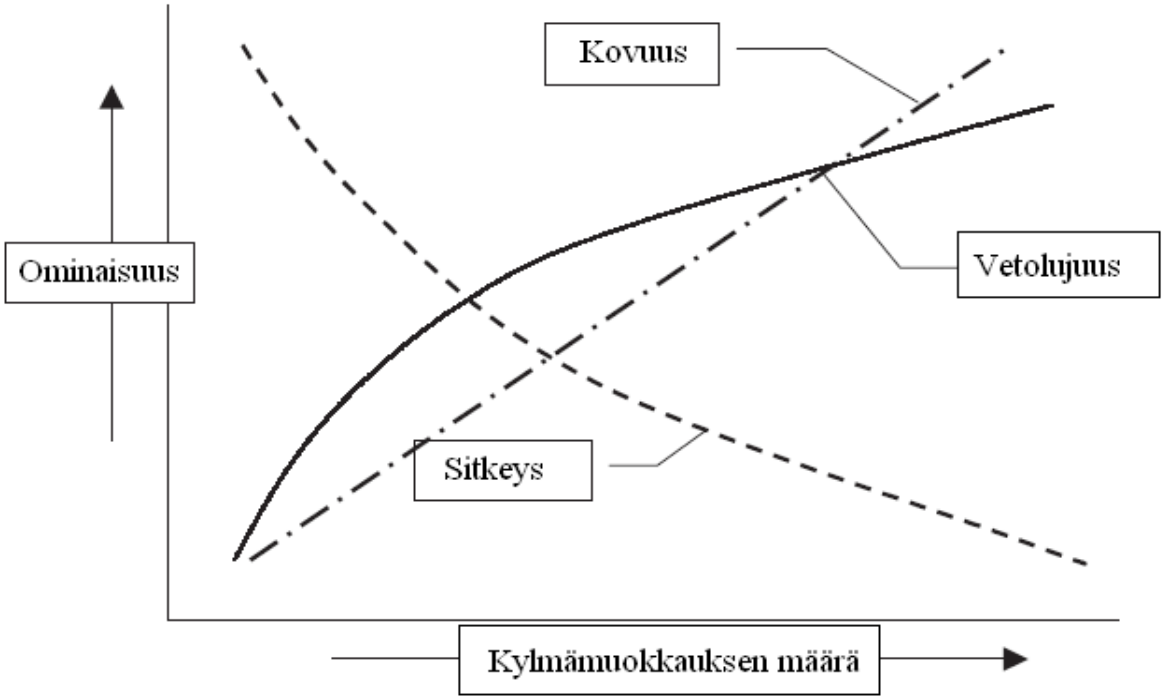
Alumiiniseosten ominaisuuksia voidaan muokata erilaisilla lämpö- ja muokkauskäsittelyillä. Alumiinin lämpötilaa nostamalla sen liukoisuus lisäaineille kasvaa. (Esabna 2013a). Käytettyjen muokkaustapojen ja toimitustilojen tunnukset ovat esitetty standardissa SFS-EN 515. Käytössä olevia toimitustiloja ovat pehmeäksihehkutus (O), muokkauslujitus (H), liuotushehkutus (W) ja muuhun stabiiliin tilaan kuin O, H tai W lämpökäsitelty (T). Muokkaamattomien eli valmistustilassa olevien seosten tunnus on F. Muokkauksista on olemassa useita eri variaatioita. Ne ovat esitetty myös standardissa SFS-EN 515. (SFS-EN 515, s. 8.)

Muokattavat alumiiniseokset voidaan jakaa kahteen ryhmään karkenevuuden perusteella. Karkenemattomia eli muokkauslujittuvia alumiiniseoksia ovat 1xxx-, 3xxx-, 4xxx- ja 5xxx-sarjat. Erkautuskarkeneviin eli lämpökäsiteltäviin seoksiin kuuluvat 2xxx-, 6xxx-, 7xxx-ja 8xxx-sarjat. (Karhula 1994, s. 6; Martikainen 2011, s. 11.)

2.1.1 Kylmämuokattavat seokset

Kylmämuokattavat eli karkenemattomat seokset ovat lujitettavissa kylmämuokkauksella. Alumiiniseoksen lujuus nousee kylmämuokkauksessa, kun kiteet muuttavat muotoaan ja

atomitasot liukuvat toistensa suhteen. Dislokaatioiden lukumäärä kasvaa ja niiden liikkuvuus huononee mitä enemmän niitä esiintyy. Tästä aiheutuu rakenteeseen sisäisiä jännityksiä. Samalla materiaalin lujuus ja kovuus kasvaa, mutta sitkeys pienenee. Kuvassa 1 on havainnollistettu kylmämuokkauksen vaikutusta sitkeyteen, vetolujuuteen ja kovuuteen. (Lukkari 2001, s. 13-14; Mathers 2002, s. 15.)



Kuva 1. Kylmämuokkauksen vaikutus sitkeyteen, vetolujuuteen ja kovuuteen (Mathers 2002, s. 15).

2.1.2 Lämpökäsiteltävät seokset

Lämpökäsiteltävät eli karkenevat seokset ovat lujitettavissa lämpökäsittelyillä. Tärkein lämpökäsittely on erkautuskarkaisu, jolla saadaan korkeimmat lujuusarvot alumiiniseoksille. Erkautuskarkaisuun kuuluu neljä vaihetta, jotka ovat liuotushehkutus, jäähdytys, erkautuskäsittely ja hallittu jäähtyminen. Liuotushehkutuksessa alumiiniin seostetaan yhtä tai useampaa seosainetta. Alumiini on jähmeässä tilassa ja lisäaineet liukenevat tasapainon osoittamina määrinä. Lujittuminen saavutetaan erkautuskäsittelyssä. Seosaineet erkautetaan joko huoneenlämmössä (luonnollinen vanhentaminen) tai korotetussa lämpötilassa (keinovanhentaminen). Käsittelyn jälkeen seos on pehmeä ja helposti muokattavissa. (Lukkari 2001, s. 16-17.)

Erkautuskarkaisun lisäksi alumiinia voidaan lämpökäsitellä homogenisoinnilla, pehmeäksihehkuttamisella ja jännityksenpoistohehkuttamisella. Homogenisointi tasaa suotaumia ja jännityksiä, joita voi syntyä jäähdyttämisen aikana. Pehmeäksihehkutus muuttaa alumiiniseoksen mahdollisimman pehmeäksi ja sitkeäksi, joka helpottaa muokkausta ja työstöä. Jännityksenpoistohehkutuksella poistetaan rakenteeseen jääneitä jäännösjännityksiä, joita syntyy muun muassa nopeassa jäähtymisessä ja muokkauksessa. (Martikainen 1994, s. 12.)

3 ALUMIININ HITSATTAVUUS

Hitsaus on yleisin alumiinin liittämismenetelmä. Alumiinia voidaan hitsata useimmilla teräksen hitsaukseen kehitetyillä hitsausprosesseilla. Alumiinin materiaaliominaisuudet poikkeavat kuitenkin teräksen vastaavista ja se on otettava huomioon hitsattavia alumiinirakenteita suunniteltaessa. Hitsaukseen vaikuttavia erityispiirteitä ovat matala sulamislämpötila, hyvä sähkön- ja lämmönjohtavuus sekä suuri lämpölaajeneminen. Lisäksi alumiini hapettuu muodostaen oksidikalvon ja vedyn liukoisuus sulaan on suuri. (Lukkari 2001, s.56-57.)

3.1 Eri alumiinilaatujen hitsattavuus

Eri alumiinilaatujen hitsattavuudessa on eroja. Hitsattavuuteen vaikuttavat seosainepitoisuudet ja erilaiset käsittelyt. Muokatut seokset ovat yleisesti hyvin hitsattavia kaarihitsausprosesseilla. Karkenevien seosten kohdalla tulee ottaa huomioon hitsauslämmön aiheuttamat muutokset. (Keytometals 2013). Kuvassa 2 on esitetty yleisimpien alumiiniseosten hitsattavuus. Alumiinin hitsauksessa tärkein huomioitava asia on eri seosten alttius kuumahalkeamille. Kuumahalkeamia on käsitelty tarkemmin luvussa 7.2 hitsausvirheet.

Merkintä: numeerinen EN AW	Merkintä: kemiallinen EN AW	Hitsatta-vuus
1000-sarja		
1050 A	Al 99,5	5
1100	Al 99,0Cu	5
1350	EAl 99,5	5
2000-sarja		
2011	AlCu6BiPb	2
2014	AlCu4SiMg	3
2017A	-	3
2024	AlCu4Mg1	3
2030	AlCu2,5Mg0,5	2
3000-sarja		
3030	AlMn1Cu	6
3103	AlMn1	6
5000-sarja		
5005	AlMg1	6
5052	AlMg2,5	6
5083	AlMg4,5Mn0,7	6
5086	AlMg4	6
5154A	AlMg3,5(A)	6
5454	AlMg3Mn	6
5754	AlMg3	6
6000-sarja		
6060	AlMgSi	6
6061	AlMgSiCu	4
6063	AlMgSi0,7	6
6082	AlSi1MgMn	5
7000-sarja		
7020	AlZn4,5Mg1	5
7075	AlZn5,5MgCu	3
Valut		
21100	AlCu4Ti	3
44200	AlSi12(a)	5
43000	AlSi10Mg(a)	4
46000	AlSi9Cu3(Fe)	3
51100	AlMg3(a)	4
51400	AlMg5(Si)	4

Selitykset:
1 = ei, 2 = huono, 3 = ei suositella,
4 = kohtuullinen, 5 = hyvä, 6 = erinomainen

Kuva 2. Yleisimpien alumiiniseosten hitsattavuus (Lukkari 2012, s.28).

3.1.1 Muokatut seokset

Karkenemattomat seokset ovat pääsääntöisesti hyvin hitsattavia yleisillä kaarihitsausprosesseilla. Puhtaan alumiinin (1xxx-sarja) mikrorakenne on yksifaasinen ja hitsauslämpö ei vaikuta siihen. Sularajalla voi olla pientä lujuuden laskua johtuen sulan kutistumisesta. Alumiini-mangaani -seoksien (3xxx-sarja) hitsattavuus on puhtaan alumiinin kaltainen. Mikrorakennemuutokset ovat hyvin samankaltaisia ja lujuus voi hieman alentua. Kuparia sisältävät AlMn -seokset voivat kuumahalkeilla, mutta oikealla lisäaineen valinnalla se on estettävissä. (Lukkari 2001, s.76-77; Mathers 2002, s. 40-41.)

Alumiini-magnesium -seosten (5xxx-sarja) mikrorakenne ei myöskään muutu merkittävästi hitsatessa. Kuitenkin lujemmilla seoksilla on taipumusta mikrorakennemuutoksiin. Magnesiumin liukoisuus alumiiniin normaaleissa olosuhteissa on 1,4 %, mutta lujempien seosten magnesium- pitoisuus voi olla jopa yli 5 %. Tästä johtuen magnesium pyrkii karkaamaan hilarakenteesta hitsauslämmön vaikutuksesta ja se alentaa seoksen lujuutta. Ilmiötä voi hillitä hitsaamalla lisäaineella, joka sisältää enemmän magnesiumia kuin hitsattava seos. (Mathers 2002, s. 42-43.)

3.1.2 Karkenevat seokset

Karkenevien seosten hitsattavuus vaihtelee. Etenkin kuparia sisältävien seosten hitsaus voi olla haasteellista kuumahalkeilutaipumuksen vuoksi. Alumiini-kupari –seosten (2xxx-sarja) sanottiin pitkään olevan mahdottomia hitsata, koska seosten 2…4 % kuparipitoisuus altistaa voimakkaasti kuumahalkeilulle. Kuumahalkeilu aiheutuu seosaineiden eriaikaisesta jäähtymisestä alumiinin kanssa. Kun kuparipitoisuutta nostetaan 6 %:in tai enemmän, halkeamat täyttyvät hitsin jäähtyessä ja eivät siten aiheuta ongelmia. Suuri lämmöntuonti, useiden palkojen hitsaaminen ja suuret palkotilavuudet lisäävät kuumahalkeamariskiä näillä seoksilla. (Esabna 2013c; Mathers 2002, s. 43-44.)

Alumiini-magnesium-pii -seokset (6xxx-sarja) ovat herkkiä halkeilemaan hitsatessa, mutta sitä voidaan estää oikealla lisäaineen valinnalla. Lisäaineena voidaan käyttää piitä tai magnesiumia sisältäviä lisäaineita, kuten 4043 tai 5356. Lisäaineeton hitsaus ei ole suositeltavaa näillä seoksilla kuumahalkeiluvaaran vuoksi. Lujuuden menetys hitseissä on suurempaa keinovanhennetuilla seoksilla kuin luonnollisesti vanhennetuilla.

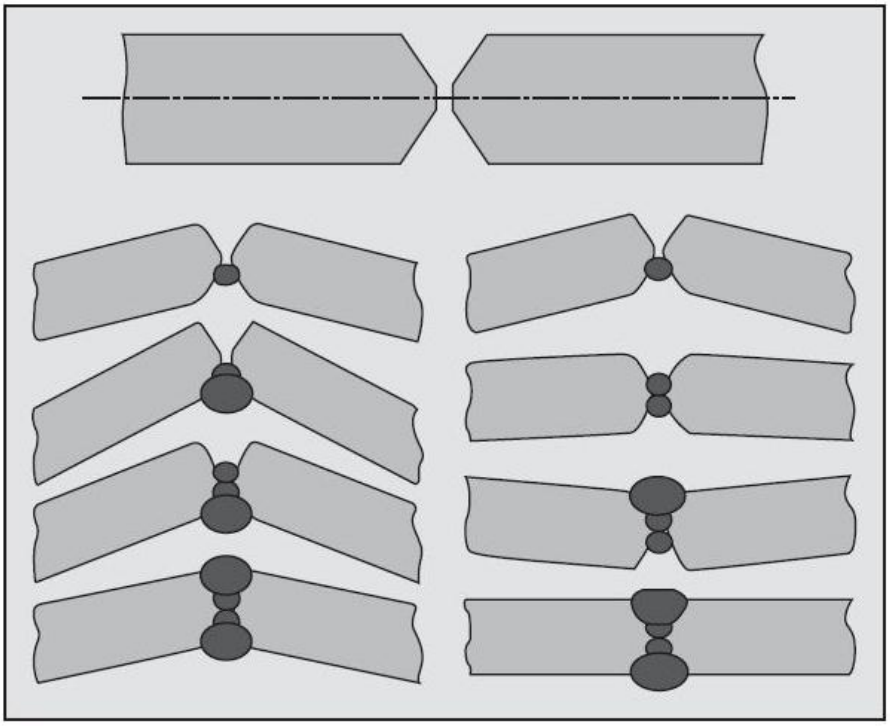
Kontrolloimalla lämmöntuontia lujuuden menettämistä voidaan hallita. (Mathers 2002, s. 44-45.)

Alumiini-sinkki-magnesium -seokset (7xxx-sarja) eivät ole erityisen kuumahalkeilualttiita. Kuitenkin kuparia sisältävien seosten, kuten 7075, hitsaaminen on haasteellista, koska kupari ja magnesium aiheuttavat jäähtyessään jännityksiä raerajoille. Tästä aiheutuu halkeilua. Lujien 7xxx-sarjan hitsaaminen ei ole suositeltavaa, koska hitsauslämmön vaikutuksesta lujuus pienenee merkittävästi. Lujuus on palautettavissa lämpökäsittelyllä, mutta sen sitkeys romahtaa samalla. Kuparia sisältämättömät seokset ovat hitsattavia. Lujuuden menetys ei ole merkittävä ja se on palautettavissa sopivalla lämpökäsittelyllä. Yksi 7xxx-sarjan ongelma hitsauksen kannalta on sinkki, joka voimakkaasti oksidoituvana voi aiheuttaa liitosvirheitä. (Esabna 2013c; Mathers 2002, s.45.)

3.2 Muodonmuutokset

Hitsausprosessilla tuodaan nopeasti lämpöä pienelle alueelle, joka aiheuttaa lämpölaajenemista metallissa. Kun hitsi jäähtyy, hitsi kutistuu ja aiheuttaa jännitystilan liitoksen alueelle. Tästä johtuen hitsausliitoksiin aiheutuu mm. poikittais- ja pitkittäiskutistumista sekä taipumista ja kulmavetäytymistä. Koska alumiinin lämpölaajeneminen on kaksinkertainen verrattuna teräkseen, on se otettava paremmin huomioon alumiinia hitsattaessa. (Anttila 1991, s.16.)

Muodonmuutosten suuruus riippuu aineenpaksuudesta, hitsausprosessista, railomuodosta, hitsausjärjestyksestä ja lämmöntuonnista. Muodonmuutokset tulee ottaa huomioon jo rakenteen suunnitteluvaiheessa sekä suunniteltaessa hitsausjärjestystä, silloituksia ja kiinnityksiä. (Lukkari 2001, s. 222). Kuvassa 3 on esitetty ratkaisu päittäisliitoksen muodonmuutosten hallinnasta.



Kuva 3. Muodonmuutosten eliminointi päittäisliitoksessa (Mathers 2002, s.86).

Muodonmuutosten välttämiseksi on olemassa useita eri keinoja (Lukkari 2001, s. 223):

- Käytä esilämmitystä.
- Levyjen tulisi liikkua vapaasti, jotta kutistumista pääsee tapahtumaan.
- Älä käytä tarpeettoman suuria railotilavuuksia ja sovita railot huolella.
- Käytä suurinta mahdollista hitsausnopeutta tai nopeinta mahdollista hitsausprosessia.
- Pyri hitsaamaan mahdollisimman vähäisellä palkomäärällä.
- Käytä osien esitaivutusta asettamalla osat ennakkokulmaan.
- Aloita hitsaaminen keskeltä pitkissä hitseissä.
- Kahdelta puolen hitsattaessa hitsaa vuorotellen molemmille puolille.
- Hitsaa poikittaishitsit ennen pituushitsejä ja päittäishitsit ennen pienahitsejä.

4 HITSAUSPROSESSIT

Alumiinin hitsauksessa yleisesti käytettyjä prosesseja ovat MIG- (Metal-arc inert gas welding) ja TIG (Tungsten inert gas arc welding) -hitsaus. Muita vähemmän käytettyjä prosesseja ovat plasma-, puikko-, kaasu-, vastuspiste- ja laserhitsaus sekä kitkahitsaus pyörivällä työkalulla eli FSW (friction stir welding).

Kaasukaarihitsausprosessien eli MIG- ja TIG -hitsauksen etuna on oksidin puhdistuminen hitsausprosessin aikana. Nykyaikaiset hitsausvirtalähteet ovat mikroprosessiohjattuja ja niissä on useita hitsausta helpottavia ominaisuuksia. Erityisesti nykyelektroniikan mahdollistama pulssihitsaus ja sen säädettävyys on suuri etu alumiinin hitsauksessa. (Lukkari 2001, s. 125, 128-129.)

4.1 MIG -hitsaus (Metal Inert Gas welding)

MIG -hitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa lisäainelangan ja työkappaleen välillä. Langansyöttölaite syöttää lisäainelankaa valokaareen ja sula metalli siirtyy pisaroina langan päästä hitsisulaan. Suojakaasu suojaa hitsisulaa ympäröivältä ilmalta. Suojakaasuna käytetään argonia, heliumia tai niiden seosta. (Lukkari 2002, s. 249). Alumiinin MIG -hitsauksessa käytetään tasavirtaa ja elektrodi eli lanka on plus-navassa. Tällä saavutetaan hyvä tunkeuma ja oksidi puhdistuu erittäin hyvin. (Lukkari 2001, s. 121.)

Alumiinin MIG -hitsaus on yleensä kuuma- tai pulssikaarihitsausta. Kuumakaarialueella (suurilla virran ja jännitteen arvoilla) lisäaine siirtyy suihkumaisena ja roiskeetta. Pulssikaarella lisäaine siirtyy pisara/pulssi -periaatteella pulssitetun virran avulla. Kuumakaarella saavutetaan hyvä tunkeuma ja suuri hitsiaineentuotto, mutta se ei sovellu ohuille ainepaksuuksille ja asentohitsausmahdollisuudet ovat rajoitetut. Pulssikaarta käytettäessä saavutetaan kuumakaaren hyvät ominaisuudet jo pienillä virran arvoilla ja se soveltuu paremmin ohuille ainepaksuuksille sekä asentohitsaukseen. (Lukkari 2001, s. 123-124.)

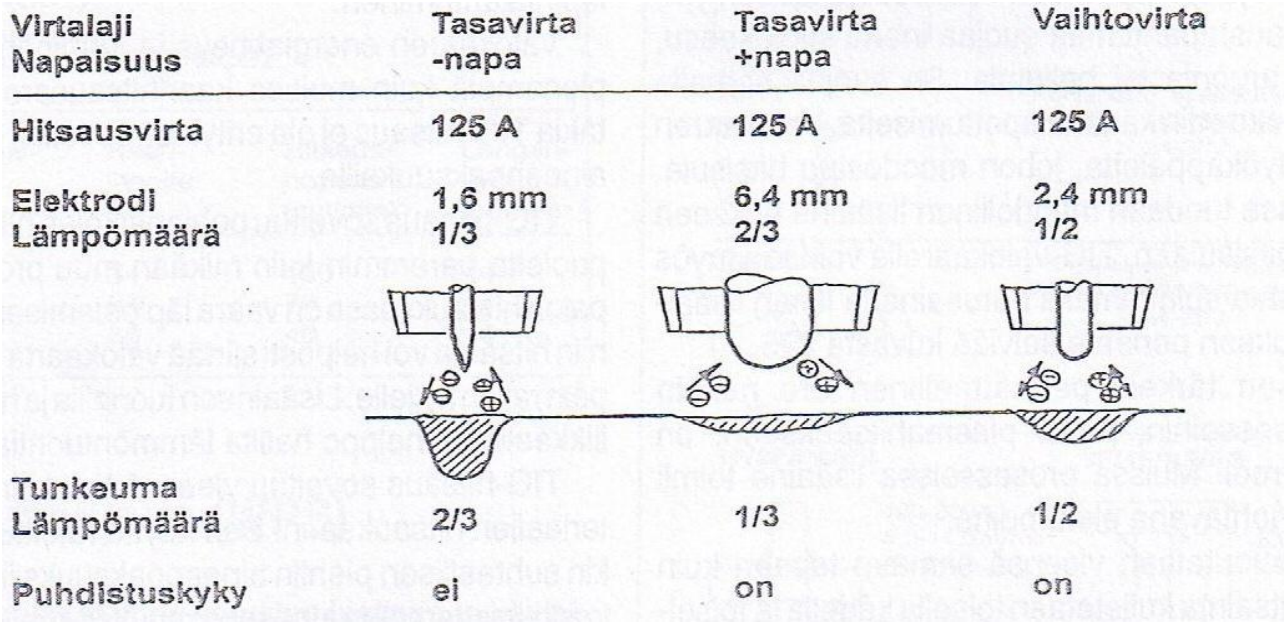
MIG -hitsausta käytetään yleisesti mm. alumiinisten laivojen, pienveneiden, junien, säiliöautojen ja linja-autojen rakennuksessa. Soveltuvat ainepaksuudet ovat 3 mm:stä ylöspäin. Pulssikaarella hitsatessa alaraja on noin 1 mm. (Lukkari 2001, s. 121.)

4.2 TIG -hitsaus (Tungsten Inert Gas welding)

TIG -hitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa sulamattoman wolframielektrodin ja työkappaleen välillä suojakaasun ympäröimänä. Suojakaasuna käytetään argonia tai heliumia, jotka ovat inerttejä kaasuja. TIG -hitsaus voidaan suorittaa ilman lisäainetta sulattamalla perusainetta, mutta lisäaineen käyttö on myös mahdollista. Tärkein ero muihin kaarihitsausprosesseihin on sulamaton elektrodi. TIG -hitsauksen tärkeimpiä ominaisuuksia on sulan ja tunkeuman hyvä hallinta, johtuen erotetuista valokaaresta ja lisäaineentuonnista. Lisäksi hitsausvirta voi olla alimmillaan muutamia ampeereja. (Lukkari 2002, s. 249.)

Alumiinin hitsauksessa TIG -hitsaus on MIG- hitsauksen jälkeen eniten käytetty prosessi. Sitä käytetään mm. ohuiden ainepaksuuksien, lyhyiden hitsien, ja putkien hitsauksessa. Lisäksi TIG -hitsaus soveltuu kohteisiin, joissa hitsiltä vaaditaan hyvää ulkonäköä. Hitsattavat ainepaksuudet ovat 0,5…10 mm välillä. Paksumpiakin levyjä voidaan hitsata, mutta suuren railon täyttäminen on hidasta. (Lukkari 2001, s. 103.)

Alumiinin TIG -hitsauksessa käytetään yleensä vaihtovirtaa. Tasavirtahitsausta käytetään vähemmän, koska elektrodin ollessa miinus-navassa valokaarella saavutetaan suurin tunkeuma, mutta oksidikerros ei sula alumiinin pinnalta ja elektrodin ollessa plus-navassa oksidikerros sulaa, mutta suurin osa lämmöstä kohdistuu elektrodiin ja tunkeuma jää pieneksi. (Lukkari 2001, s. 103-104.) Kuvassa 4 on esitetty virtalajien ja napaisuuden vaikutukset tunkeumaan, lämmön jakautumiseen ja oksidin puhdistuskykyyn.



Virtalaji Napaisuus	Tasavirta -napa	Tasavirta +napa	Vaihtovirta
Hitsausvirta	125 A	125 A	125 A
Elektrodi Lämpömäärä	1,6 mm 1/3	6,4 mm 2/3	2,4 mm 1/2
Tunkeuma Lämpömäärä	2/3	1/3	1/2
Puhdistuskyky	ei	on	on

Kuva 4. Virtalajin ja napaisuuden vaikutukset (Lukkari 2002, s.250).

4.3 Muita prosesseja

Alumiinin hitsauksessa käytetään MIG- ja TIG -hitsauksen lisäksi plasma-, puikko-, kaasu-, vastuspiste- ja laserhitsausta sekä kitkahitsausta pyörivällä työkalulla. Näiden hitsausprosessien käyttö on kuitenkin vähäistä verrattuna MIG- ja TIG -hitsaukseen. Plasmahitsaus on aina mekanisoitua ja sitä käytetään eniten I-railojen sekä osaviistettyjen V-railojen pohjapalon hitsauksessa. Puikko- ja kaasuhitsausta käytetään lähinnä alumiinin korjaushitsauksissa. (Lukkari 2001, s. 150-168.)

Kitkahitsausta on tutkittu paljon alumiinin liittämiseen viimeaikoina. Kitkahitsauksessa pyörivällä työkalulla kuumennetaan työkappaletta ja työkalun liikkuessa kappaleet sekoittuvat toisiinsa muodostaen liitoksen. Materiaali ei sula prosessissa ja liitoksen mikrorakenne on hyvin hienojakoinen. Menetelmällä voidaan myös liittää eri metalleja toisiinsa. Menetelmää käytetään etenkin lentokoneteollisuudessa. (Gordon 2012.)

Myös laserhitsaus on nykyisin merkittävä prosessi alumiinin hitsauksessa. Sitä käytetään etenkin auto- ja lentokoneteollisuudessa. Laserhitsauksessa fokusoidulla lasersäteellä sulatetaan hitsattavat pinnat yhteen. Hitsit ovat kapeita, mutta suurilla tehoilla saavutetaan suuri tunkeuma ja hitsausnopeus. Alumiinin korkea heijastavuus ja suuri lämmönjohtavuus ovat ongelmia alumiinin laserhitsauksessa. (Mathers 2002, s. 150-152)

5 HITSAUSAINEET

Hitsausaineiden merkitys on suuri onnistuneiden hitsien aikaansaamiseksi. Tässä luvussa käsitellään hitsauslisäaineen ja -kaasun merkitystä alumiinin hitsauksessa.

5.1 Hitsauslisäaineet

Hitsauslisäaineen tehtävä on tuottaa hitsiainetta railoon. MIG -hitsauksessa käytetään aina lisäainetta. TIG- hitsaus onnistuu sekä lisäainelangan kanssa että sulattamalla pelkästään perusainetta. Oikean lisäaineen valinnalla voidaan vaikuttaa hitsin laatuun. Näitä laadullisia ominaisuuksia ovat halkeamattomuus, lujuus, sitkeys ja korroosionkestävyys. (Lukkari 2001, s. 178.)

Lisäaineet alumiinin hitsauksessa ovat seostukseltaan samanlaisia kuin perusaineetkin. Yleisimmät lisäaineet ovat puhdas alumiini (Al 99,5), magnesium- seosteinen alumiini (AlMg5 tai AlMg4,5Mn) ja pii- seosteinen alumiini (AlSi5). Näiden lisäksi on olemassa monia muita seostyyppejä lisäaineille. Käytännössä ne ovat yleisimpien lisäaineiden kaltaisia, mutta erilaisilla seossuhteilla. (Lukkari 2001, s. 178.)

Eri alumiiniseosten sähkönjohtavuus vaihtelee ja sähkönjohtavuuserot vaikuttavat hitsausvirtaan sekä jännitteeseen. Kaariteho kasvaa sähkönjohtavuuden mukana. Kaaritehon kasvu johtaa suurempaan lämmöntuontiin ja lisää tunkeumaa. (Lukkari 2001, s. 179-180.)

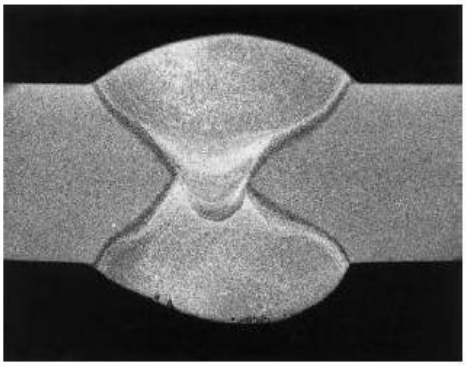
5.2 Suojakaasut

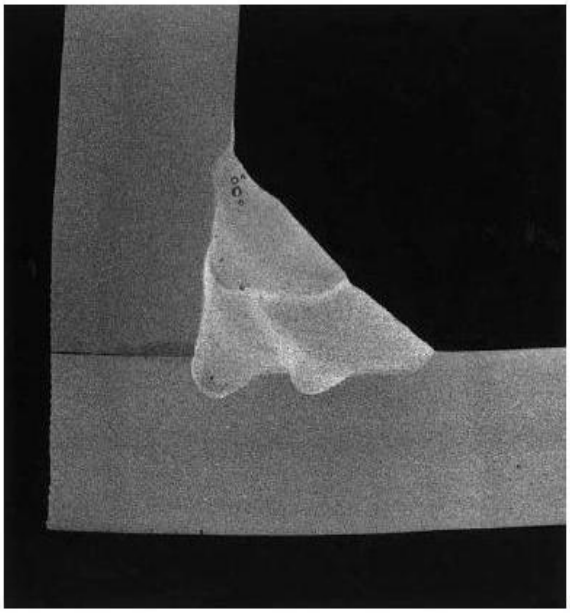
Suojakaasun tehtävänä on suojata kaarihitsaustapahtumaa sekä kuumaa elektrodia TIG- ja plasmahitsauksessa. Suojakaasu vaikuttaa myös hitsausnopeuteen, tunkeumaan, hitsisulan juoksevuuteen, valokaaren vakavuuteen, oksidin puhdistuskykyyn ja valokaaren syttyvyyteen. (Lukkari 2001, s. 196.)

Alumiinin hitsauksessa käytetään vain inerttejä eli sulan kanssa reagoimattomia kaasuja. Käytännössä sellaisia ovat argon ja helium sekä niiden seokset. Muutkin jalokaasut (neon,

krypton ja ksenon) olisivat mahdollisia suojakaasuja, mutta ne ovat hitsauskäyttöön taloudellisesti kannattamattomia. Yleisin suojakaasu on argon. Heliumia käytetään argonin seoskaasuna erityisesti paksuilla ainevahvuuksilla. Lisäksi joissain suojakaasuissa on lisättynä muutamien sadasosaprosenttien pitoisuus happea, typpeä, typpimonoksidia tai hiilidioksidia. Nämä kaasut vakavoittavat valokaarta, vähentävät roiskeita ja parantavat hitsin ulkonäköä. (Lukkari 2001, s. 197-198.)

Argonin etuja ovat edullisuus, vakaa valokaari, sormimainen tunkeuma ja vähäinen lämmöntuonti. Hitsausnopeudet jäävät kuitenkin alhaisiksi ja paksuilla ainevahvuuksilla voi aiheutua liitosvirheitä. (Mathers 2002, s. 131-132). Kuvassa 5 on alumiinin MIG - hitsejä, joiden suojakaasuna on käytetty puhdasta argonia. Kuvista voidaan havaita argonin käytön seurauksena sormimainen ja kapea tunkeuma.

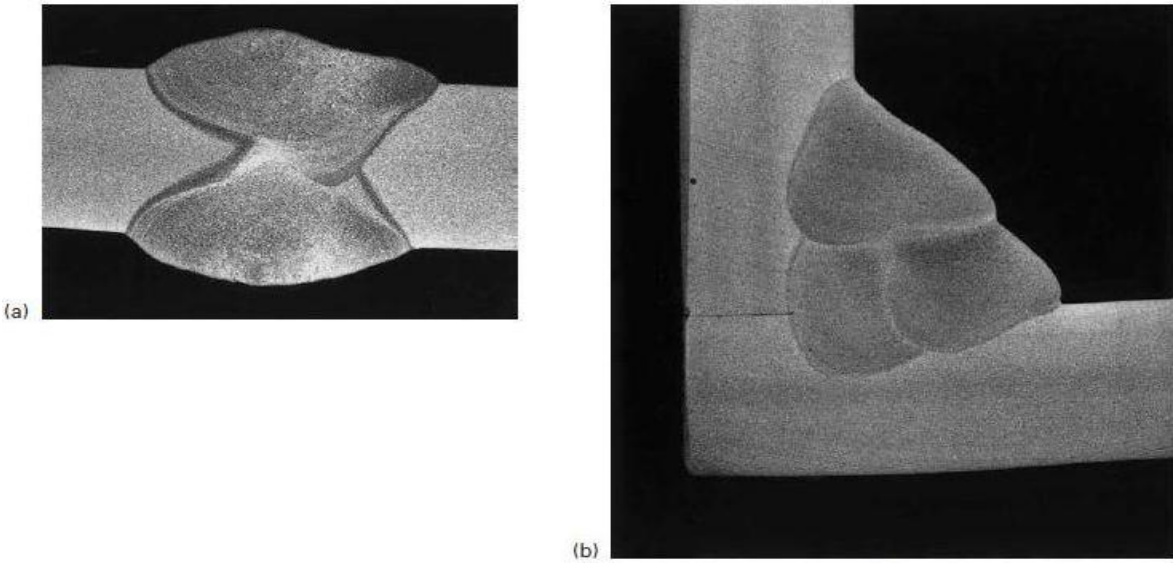




Kuva 5. Alumiinin MIG-hitsejä, suojakaasuna 100% argon. a) Kahdelta puolen hitsattu X-railo. b) Kolmella palolla hitsattu pienahitsi (Mathers 2002, s.131).

Puhtaan heliumin käyttö kasvattaa kaarijännitettä jopa 20 % verrattuna puhtaaseen argoniin. Siitä johtuen lämmöntuonti kasvaa johtaen suurempaan tunkeumaan ja leveämpään hitsiin. Kuvasta 6 voidaan havaita tämä ilmiö. Kuvassa 6 on alumiinin MIG - hitsejä, joiden suojakaasuna on käytetty puhdasta heliumia. Heliumilla voidaan hitsata jopa

kolme kertaa suuremmilla nopeuksilla kuin argonilla. Puhtaan heliumin ominaisuudet soveltuvat parhaiten mekanisoituun hitsaukseen. (Mathers 2002, s.131-132.)



Kuva 6. Alumiinin MIG-hitsejä, suojakaasuna 100% helium. a) Kahdelta puolen hitsattu X-railo. b) Kolmella palolla hitsattu pienahitsi (Mathers 2002. s.132).

6 HITSAUKSEN ESIVALMISTELUT

Luvussa esitellään erilaisia esivalmisteluja, jotka ovat tärkeitä alumiinin hitsauksessa. Huomioon otettavia asioita ovat erilaiset hitsausrailot, juurituet, oksidikerroksen puhdistus sekä mahdollinen esikuumennus.

6.1 Railot

Terästen hitsausrailojen valmistuksessa yleinen polttoleikkaus ei sovellu hitsausrailojen valmistukseen alumiinille. Yleisesti käytetäänkin plasma- tai vesileikkausta sekä mekaanista leikkausta. Myös laserleikkaus on mahdollista. Mekaaninen leikkaus on kuitenkin yleisintä sen yksinkertaisuuden ja edullisuuden vuoksi. Railoja voidaan myös koneistaa esimerkiksi jyrsimällä, jolloin saavutetaan paras mahdollinen laatu railolle. (Mathers 2002, s. 52-64). Alumiinin hitsauksen railomuodot ovat esitetty standardissa SFS-EN ISO 9692-3 ”Hitsaus ja sen lähiprosessit. Railomuodot. Osa 3: Alumiinin ja alumiiniseosten MIG- ja TIG- hitsaus”. Yleisesti käytettyjä railomuotoja MIG- ja TIG-hitsauksessa ovat I- ja V- railo. (SFS-EN ISO 9692-3, s. 6.)

6.2 Juurituet

Alumiinin sulan viskositeetti on suuri ja pintajännitys pieni, mikä tarkoittaa sitä, että alumiini on sulana hyvin juoksevaa. Tästä johtuen suurilla energioilla hitsattaessa vaaditaan juurituki hyvän juuren saavuttamiseksi. Koska sula alumiini valuu juuritukea vasten, on sen muoto ja tilavuus valittava käytetyn railotyypin ja hitsausmenetelmän mukaan. (Anttila 1991, s.37.)

Yleisesti käytettyjä juuritukia ovat irrallinen juurituki, joka poistetaan käytön jälkeen, sekä pysyvä juurituki, joka jää rakenteen osaksi. Irralliset juurituet ovat yleensä valmistettu alumiinista, kuparista, ruostumattomasta teräksestä tai keraamista. Pysyvät juurituet ovat perusaineen kaltaista alumiinia tai pursotettua alumiiniprofiilia, jossa juurituki on valmiina. (Lukkari 2001, s. 216.)

6.3 Puhdistukset

Alumiinin oksidinmuodostuskyvyn vuoksi puhdistuksiin tulee kiinnittää erityistä huomiota alumiinin hitsauksessa. Oksidi aiheuttaa hitsausvirheitä, ja se suositellaan poistettavaksi ennen hitsausta. (Lukkari 2001, s.59-60). Railopinnoilta tulee poistaa lika ja rasva ennen oksidin poistoa. Oksidin poistamiseen käytetään yleisimmin ruostumattomasta teräksestä valmistettuja harjoja tai ruostumatonta teräsvillaa. Myös kupari tai messinki käy harjojen materiaaliksi. Kaapiminen on myös tehokas puhdistuskeino. Joskus äärimmäistä puhtautta vaativissa hitseissä voidaan käyttää kemiallista puhdistusta oksidin poistamiseen. Puhdistus tulisi uusia, jos hitsausta ei ole suoritettu noin neljän tunnin kuluessa. (Mathers 2002, s. 66-68.)

6.4 Esikuumennus

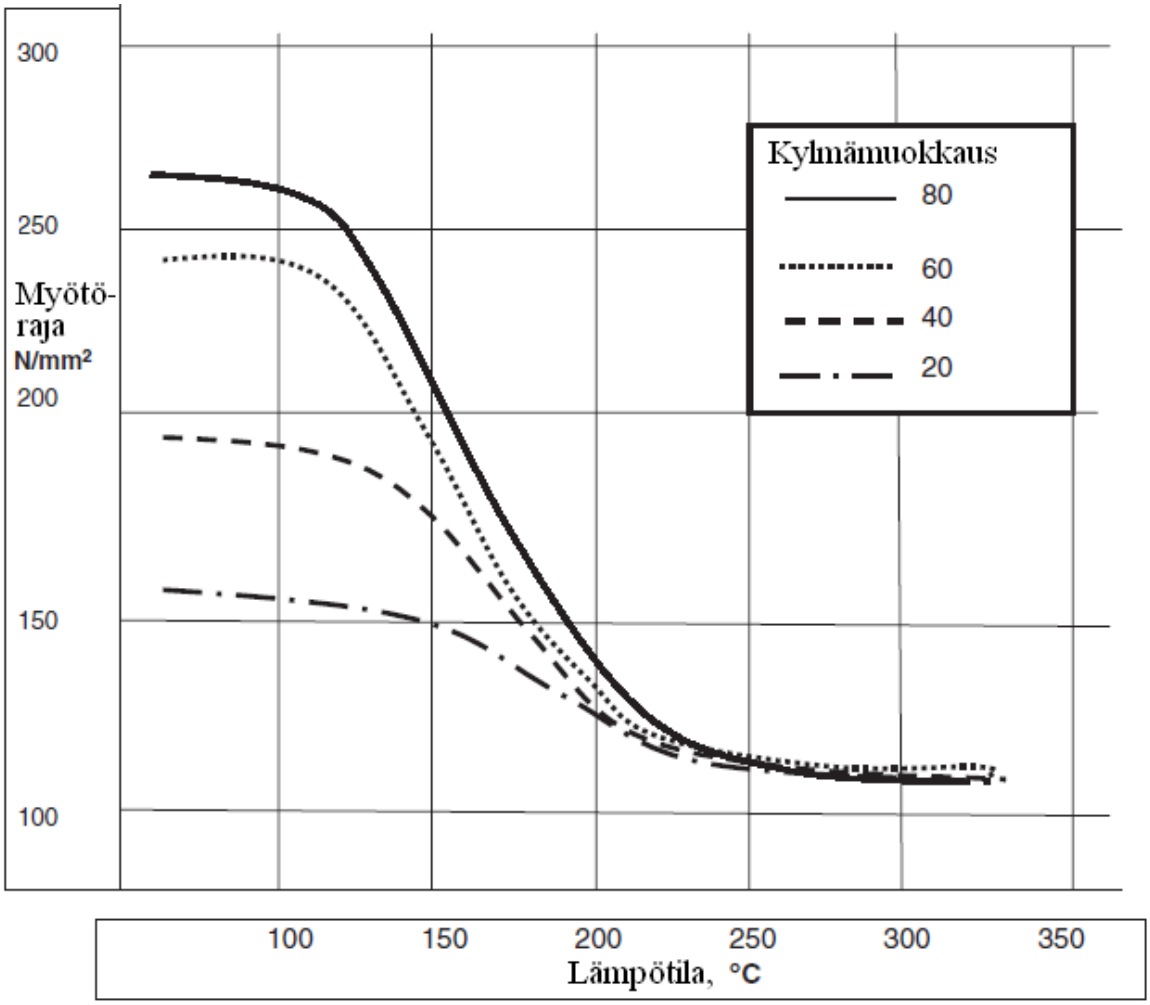
Alumiinin suuresta lämmönjohtavuudesta johtuen joudutaan joskus käyttämään esikuumennusta. Esikuumennus takaa sen, että sulaminen ja tunkeuma ovat riittäviä sekä hitsisulaan liukenevat kaasut poistuvat hitsistä. Esikuumennuslämpötila ja alueen laajuus riippuvat alumiiniseoksesta, aineenpaksuudesta, hitsauslämmöntuonnista ja suojakaasusta. Esikuumennusta tarvitaan MIG -hitsauksessa noin 15 mm ja TIG -hitsauksessa noin 5 mm paksummilla ainevahvuuksilla. Suurentamalla lämmöntuontia ja käyttämällä heliumia suojakaasuna voidaan vähentää esilämmityksen tarvetta. Esikuumennukseen käytetään yleensä kaasupoltinta. Kuumennusta on valvottava pintalämpömittarilla tai lämpöliidulla, koska alumiinin pinta ei muuta väriään lämmitettäessä ja lämpötila ei saisi ylittää noin 120°C:ta. Lisäksi polttimen liekin tulisi olla pelkistävä, jotta pinnalle ei muodostuisi paksua oksidikalvoa sen hapettuessa. (Lukkari 2001, s. 219.)

7 ALUMIININ MONIPALKOHITSAUS

Usein hitsausrailo pyritään täyttämään yhdellä palolla, koska se on useassa tapauksessa nopein ja helpoin ratkaisu. Kuitenkin suurilla railotilavuuksilla eli paksujen levyjen hitsauksessa yhdellä palolla hitsaaminen voi olla haasteellista. Tällöin käytetään useampaa palkoa hitsin suorittamiseksi eli monipalkohitsausta. (Soete 1971). Monipalkohitsauksen erityispiirre on syklinen lämmöntuonti, joka muokkaa aiemmin hitsattujen palkojen mikrorakennetta. Oikealla palkojärjestyksellä ja sijoittelulla on tärkeä merkitys lämpövaikutusten minimoimiseen.

7.1 Alumiinin monipalkohitsauksen metallurgiaa

Monipalkohitsauksen syklinen lämmöntuonti lämpökäsittelee ja muokkaa mikrorakennetta. Usein alumiinin hitsauksessa ilmiö esiintyy lujuuden alenemisena HAZ:n (Heat Affected Zone) alueella. Kun kylmämuokattua alumiinia lämmitetään, sisäiset jännitykset purkautuvat ja raerakenne pyrkii palautumaan normaalitilaan. Hallitulla lämmöntuonnilla mekaaniset ominaisuudet ja mikrorakenne ovat säilytettävissä. Kuitenkin kun lämpötilaa nostetaan rekristallisaatiolämpötilaan, joka on noin 150 ^{o}C, rakeiden jännitykset poistuvat ja mikrorakenne palautuu vähitellen kylmämuokkausta edeltävälle tasolle. Tapahtuu rekristallaatio ja se tarkoittaa uudelleenkiteytymistä. Samalla lujuus pienenee ja sitkeys palautuu. Kun lämpötila nousee yli rekristallaatiolämpötilan, mikrorakenteesta tulee karkea. Se on epätoivottavaa mekaanisten ominaisuuksien ja hitsauksen kannalta. Kuva 7 esittää kylmämuokatun 1xxx-sarjan alumiinin lujuuden muutoksia lämpötilan kasvaessa. Kuvasta voi havaita, että kylmämuokkauksella saavutettu lujuus pienenee radikaalisti lämpötilan noustessa yli 120 ^{o}C:en. (Mathers 2002, s. 16, 31-33; Lukkari 2012, s.25.)



Kuva 7. Lämpötilan vaikutus 1xxx-sarjan alumiinin lujuuteen (Mathers 2002, s. 33).

Standardissa SFS-EN 1011–4: ” Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 4: Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus” on annettu ohjearvoja alumiinin hitsauksen suorittamiseen muun muassa esilämmityksen ja välipalkolämpötilojen suhteen. Monipalkohitsauksessa lämmöntuonti on merkittävästi suurempaa yhdellä palolla hitsaukseen verrattuna ja lämpötilan nousua tulee seurata, jotta (SFS-EN 1011-4 2001, s. 20):

- mekaaniset ominaisuudet eivät heikenny ylikuumenemisen vuoksi
- pehmenneen muutosvyöhykkeen laajuus pysyy pienenä
- erkaumien määrä pysyy pienenä muutosvyöhykkeellä.

Standardissa välipalkolämpötilan ja esikuumennuksen ei suositella nousevan yli 120 ^{o}C. Välipalkolämpötilalla tarkoitetaan liitoksen lämpötilaa ennen seuraavan hitsin

suorittamista. Tarkemmat ohjeistukset eri seoksille ovat esitetty kuvassa 8. Standardi suosittelee myös pintojen puhdistamista mekaanisilla menetelmillä tai harjaamalla jokaisen palkokerroksen välillä.

Perusaine	Esikuumennuslämpötila	Välipalkolämpötila
	°C, max	°C, max
Ei-lämpökäsiteltävät seokset 1xxx-sarjan seokset 3xxx-sarjan seokset 5xxx-sarjan seokset AlSi-valuseokset AlMg-valuseokset	120[a)]	120[a)]
Lämpökäsiteltävät seokset 6xxx-sarjan seokset AlSiMg-valuseokset AlSiCu-valuseokset	120[a)]	100
7xxx-sarjan seokset	100[a)]	80

[a)] Liian pitkä kuumennus voi aiheuttaa osittaista pehmenemistä muokkauslujitetuissa seoksissa ja ylivanhenemista lämpökäsitellyissä seoksissa.

HUOM. 1 Taulukossa mainitut lämpötilat ovat ohjeellisia. Niitä voidaan muuttaa sopimuksesta ja ne pitäisi mainita hitsausohjeessa.

HUOM. 2 Seosryhmän 22.4 (5xxx) seoksissa, jotka sisältävät magnesiumia yli 3,5 %, ja seosryhmässä 23.2 (7xxx) voi tapahtua sellaisten faasien erkautumisia, jotka voivat aiheuttaa herkistymistä kerros- ja jännityskorroosiolle tietyissä käyttöympäristöissä.

Kuva 8. Suositukset esikuumennuksen ja välipalkolämpötilan enimmäisarvoiksi (SFS-EN 1011–4 2001, s. 20).

7.2 Hitsausvirheet

Alumiinin pinnalle muodostuva oksidikerros vaikuttaa hitsaukseen negatiivisesti. Alumiinioksidi muodostuu ilman hapen vaikutuksesta ja ilmasto-olosuhteilla on suuri vaikutus sen muodostumiseen. Kosteassa ympäristössä oksidikalvosta tulee merkittävästi paksumpi ja se sisältää hitsauksen kannalta haitallista vetyä. Lisäksi oksidikerros toimii sähköisenä eristeenä ja sen sulamispiste on 2050 ^{o}C, joka on yli kolminkertainen verrattuna alumiinin sulamispisteeseen. Tämän vuoksi oksidikerros estää hitsisulan ja railopintojen/palkojen liittymistä. (Lukkari 2001, s.59; Huhtaniemi et. al. 2006, s. 100-101.)

Alumiinin MIG- ja TIG -hitsauksessa alumiinin pinnalle voi muodostua myös nokea. Noki sisältää alumiinioksidia. Nokea syntyy, kun osa lisäaineesta höyrystyy valokaaren palaessa ja joutuu kaasusuojauksen ulkopuolelle ja oksidoituu. Lisäainetta höyrystyy, koska sen sisältämien aineiden kiehumispiste on pienempi kuin valokaaren lämpötila. Noen määrä

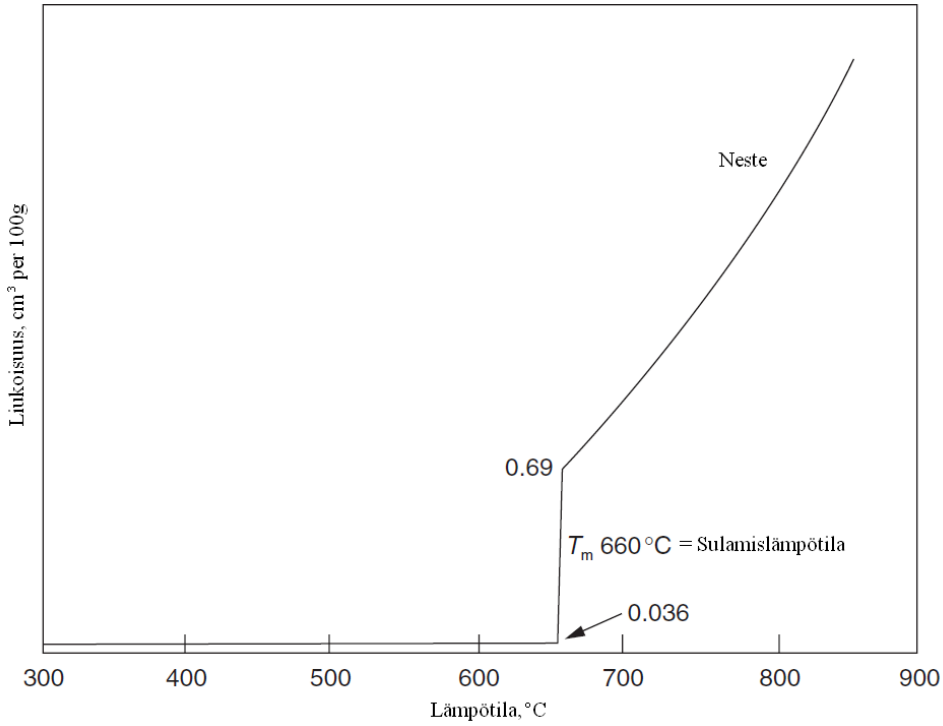
hitseissä vaihtelee, ja sen minimoimiseksi kaasusuojauksen on oltava kunnossa. Työntävä poltinkulma vähentää myös noen määrää. Erityisesti magnesiumia sisältävät lisäaineet tuottavat nokea, koska magnesiumin kiehumispiste on alumiinia alhaisempi. Niiden noki sisältää alumiini- ja magnesiumoksidia sekä jonkin verran metallista alumiinia ja magnesiumia. (Armao 2003.)

Usealla palolla hitsattaessa noen ja oksidin merkitys korostuu, koska hitsien pinta-ala on suurempi ja suuri lämmöntuonti liuottaa oksidin sisältämää vetyä sulan sisään. Monipalkohitseissä puhdistuksiin on kiinnitettävä erityistä huomiota. Jokaisen hitsatun palon pinta tulee puhdistaa noesta ja oksidista ennen seuraavan hitsaamista. Tämä helpottaa hitsausprosessia ja minimoi hitsausvirheiden riskiä. (Mathers 2002, s. 19; Dickerson 1993, s. 736.)

Alumiinin hitsausvirheet ovat esitelty standardissa SFS-EN 10042 ”Hitsaus. Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus. Hitsiluokat”. Standardi määrittelee normaalissa tuotannossa esiintyviä tyypillisiä hitsausvirheitä. Hitsit ryhmitellään standardissa kolmeen eri luokaan hitsausvirheiden perusteella, jotka ovat vaativimmasta alkaen B, C ja D. Tarvittava hitsiluokka riippuu hitsattavan kohteen vaatimuksista. (SFS-EN 10042 2006, s.8, 10.)

7.2.1 Huokoset

Huokoset ovat yleisiä alumiinin hitsauksessa. Huokosia ilmenee, kun hitsin sisään jää kaasukuplia metallin jähmettyessä. Alumiinin tapauksessa huokoset johtuvat vedystä, jota on oksidikerroksessa sekä hitsauslisäaineessa. Vedyn liukoisuus alumiiniin vaihtelee lämpötilan mukaan. Vetyä liukenee 20 kertaa enemmän sulaan alumiiniin kuin kiinteään, kuten kuva 9 osoittaa. Tämän takia huokosettomat hitsit ovat harvinaisia alumiinilla. (Mathers 2002, s. 18-19.)



Kuva 9. Vedyn liukoisuus alumiiniin (Mathers 2002, s. 19).

Huokoisuus on pienintä yhden palon hitseissä. Monipalkohitsaus nostaa riskiä hitsausvirheille, koska hitsiainemäärä on suurempi. Etenkin usean palon MIG -hitseissä kosteudelle altistunut hitsauslisäaine tuo vetyä hitseihin ja siitä aiheutuu huokosia. Suurempi hitsauslämpö nostaa huokosten määrää, kuten kuvasta 9 voidaan päätellä. Jäähtymisaikaa kontrolloimalla huokoisuutta voidaan vähentää, koska kaasukuplat ehtivät poistua sulasta ennen jähmettymistä. Myös seosaineilla on vaikutusta vedyn liukoisuuteen. Esimerkiksi 6 % magnesium- pitoisuus vähentää vedyn sitoutumista puoleen. Kuparilla ja piillä on päinvastainen vaikutus. (Mathers 2002, s. 19-20.)

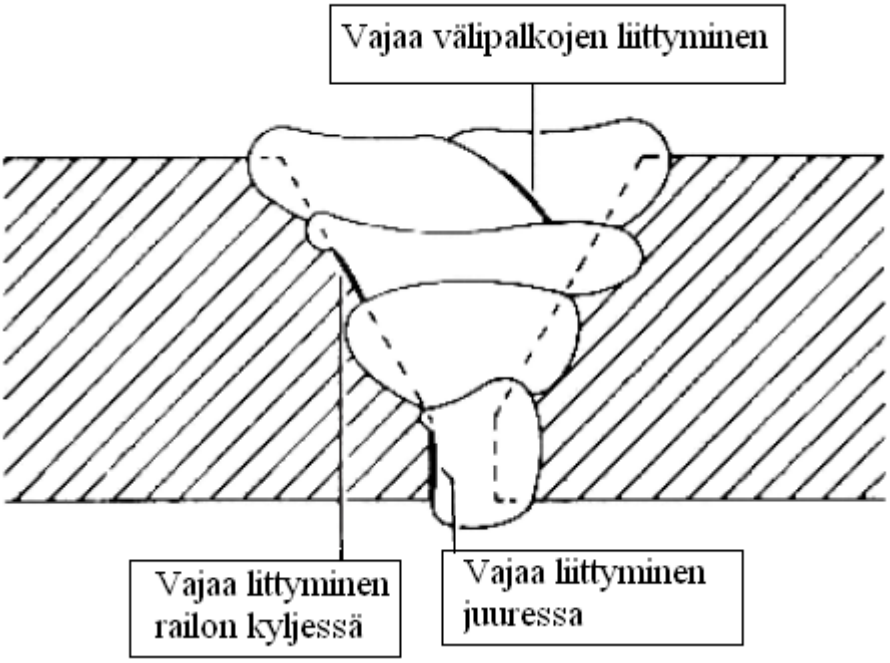
7.2.2 Kuumahalkeamat

Kuumahalkeamat ovat yksi suurimmista ongelmista alumiinin hitsauksessa. Kuvassa 10 on nähtävissä tyypillisiä kuumahalkeamia pienaliitoksen lopetuskraattereissa sekä hitsien keskivaiheilla. Eriaikaisesta seosaineiden jäähtymisestä johtuen raerajoille syntyy jännityksiä, ja jännitystilojen purkautuessa raerajoille syntyy halkeamia. Puhtaiden metallien jähmettymispiste on määrätty yhteen lämpötilaan, mutta seoksien jähmettyminen tapahtuu tietyllä lämpötilavälillä. Kuumahalkeilu riippuu voimakkaasti eri seostyypeistä ja lämmöntuonnista. Ongelmaa voidaan estää oikealla lisäainevalinnalla ja lämmöntuonnin kontrolloinnilla. (Lukkari 2001, s. 61-62; Praveen & Yarlagadda 2005).

Kuva 10. Kuumahalkeamia alumiinin hitsissä (Esabna 2013b).

7.2.3 Liitosvirheet

Liitosvirheitä esiintyy monipalkohitseissä railokyljissä sekä palkojen välissä. Usein syynä on oksidikerros. Oksidi aiheuttaa liitosvirheen, jos se on puhdistettu huolimattomasti ennen hitsausta tai hitsi on suoritettu virheellisesti, jolloin valokaaren puhdistusvaikutus on huono. Hitsauspoltin on kohdistettava oikein ja hitsausnopeus ei saa olla liian suuri tai pieni, jotta valokaari sulattaa railokyljet kunnolla. (Lukkari 2001, s. 232). Kuvassa 11 on esitetty erilaisia liitosvirheitä.



Kuva 11. Erilaisia liitosvirheitä (Mathers 2002, s. 203).

7.2.4 Sulkeumat

Sulkeumat ovat alumiinin hitsauksessa usein oksidisulkeumia, joiden syynä on puutteellinen puhdistus ennen hitsausta tai palkojen välissä. Sulkeumat syntyvät, kun alumiinia painavammat oksidihiukkaset jäävät sulan sisään sen jähmettyessä. Myös huono kaasusuojaus voi olla syynä sulkeumiin. (Lukkari 2001, s. 232-233.)

8 ALUMIININ MONIPALKOHITSAUSKOKEET

Alumiinin monipalkohitsauskokeet suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa. Hitsausprosessina oli pulssi-MIG -hitsaus, joka suoritettiin Motoman EA1900 (NX100) -hitsausrobotilla. Hitsausvirtalähteenä käytettiin Fronius VR 7000 CMT –laitteistoa.

8.1 Koejärjestelyt

Kokeissa hitsattiin ainevahvuudeltaan 8 mm AW EN-5083-alumiinia, joka on muokkauslujitettua. Lisäaineena koehitseissä käytettiin Elgan 1,2 mm Alumig Mg5:tä, jonka standardin mukainen nimike on 5356. Hitsausparametrit valittiin muutamien koehitsien perusteella ja ne ovat esitetty taulukossa 1. Kaikki koekappaleet hitsattiin samoilla parametreilla vertailun mahdollistamiseksi.

Taulukko 1. Hitsausparametrit.

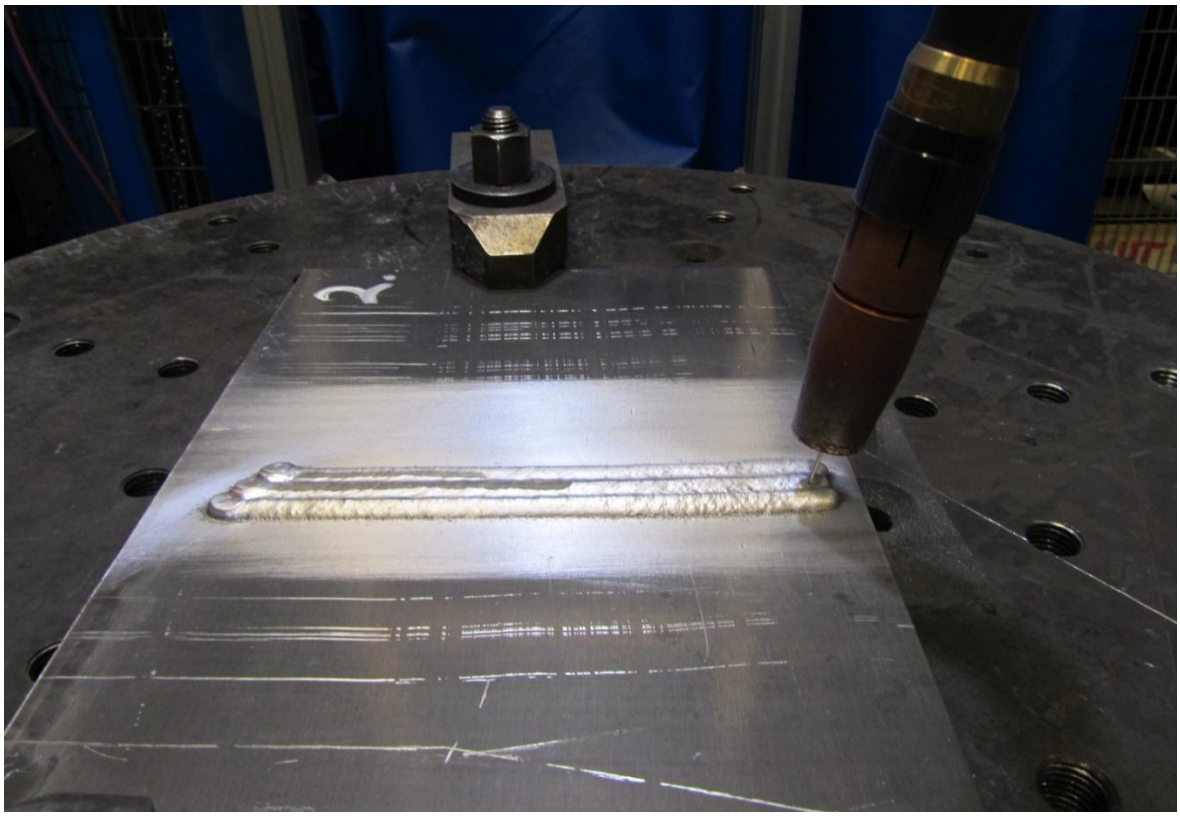
Kallistuskulma	0°
Kuljetuskulma	10°
Suojakaasu	Argon 100 %
Hitsausnopeus	10 mm/s
Langansyöttö	12,5 m/s
Jännite	19,6…19,7 V
Hitsausvirta	196…200 A

Koekappaleita oli viisi ja niihin hitsattiin ensin kolme pohjapalkoa. Pohjapalkojen päälle hitsattiin vielä kaksi palkoa taulukon 2 osoittaman ajankohdan ja ilmastoaltistuksen jälkeen. Ilmasto-olosuhteet ja päällehitsausajankohdat olivat erilaiset alumiinioksidikerroksen muodostumisen ja sen hitsaukseen aiheuttamien ilmiöiden tutkimiseksi. Koekappale 1 toimi verrokkina muille koekappaleille. Koekappaleiden säilytys toteutettiin kuivilla koekappaleilla hitsaustekniikan laboratorion normaalissa huoneilmassa, jonka lämpötila oli noin 21°C ja ilmankosteus noin 30–40 %. Kostea olosuhde luotiin sääkaapilla, jonka lämpötila oli 21°C ja kosteusprosentti oli 80 %.

Taulukko 2. Koekappaleiden olosuhteet ja päällehitsauksen ajankohta.

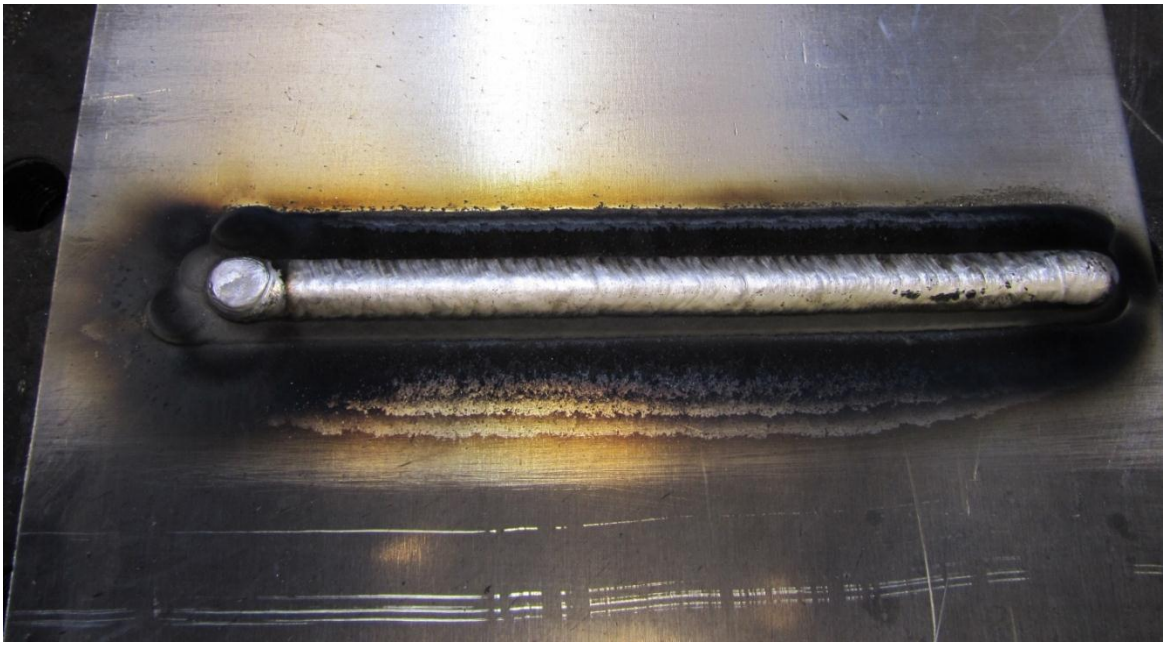
	Koekappale 1	Koekappale 2	Koekappale 3	Koekappale 4	Koekappale 5
Olosuhteet	Kuiva, 21°C	Kuiva, 21°C	Kostea, 21°C	Kuiva, 21°C	Kostea, 21°C
Päällehitsauksen ajankohta	0 h	4 h	4 h	1 vk	1 vk

Kuvassa 12 on koekappale 2 pohjapalkojen hitsaamisen jälkeen. Alumiinioksidi harjattiin huolellisesti pohjalevystä pois ennen hitsausta ja oksidittoman alueen voi helposti havaita vaaleampana alueena.



Kuva 12. Pohjapalot koekappaleessa 2.

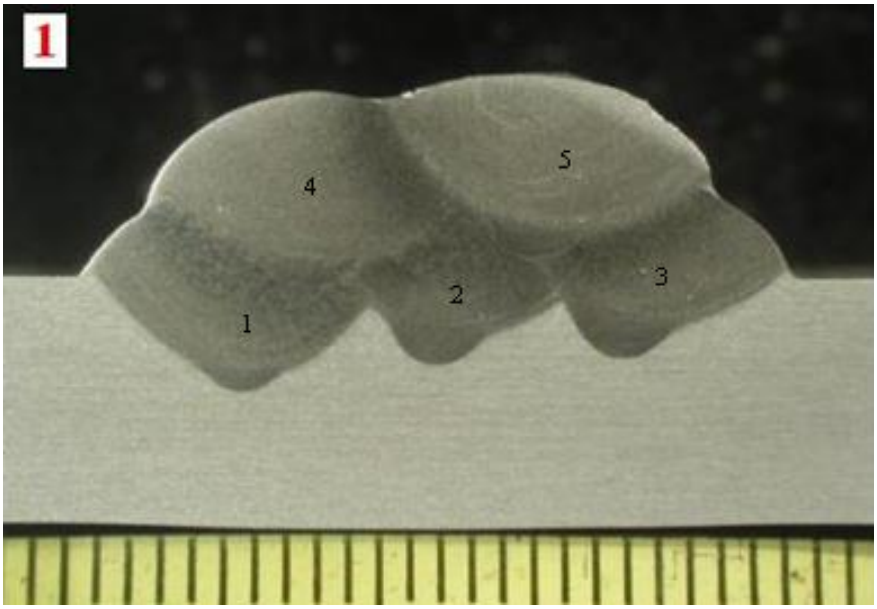
Koska ensimmäisen pintapalon hitsaaminen aiheutti suuren määrän nokea, se harjattiin ruostumattomalla teräsharjalla pois ennen seuraavan palon hitsaamista. Kuva 13 on otettu koekappaleesta 2 ensimmäisen pintapalon hitsaamisen jälkeen. Noen määrä olisi haitannut merkittävästi seuraavan palon hitsaamista.



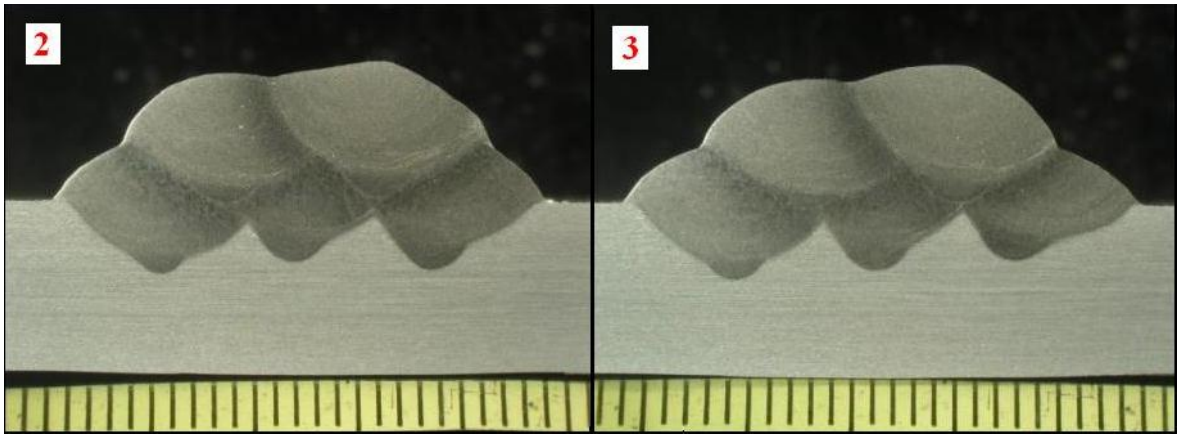
Kuva 13. Nokea hitsin pinnalla.

8.2 Tulokset

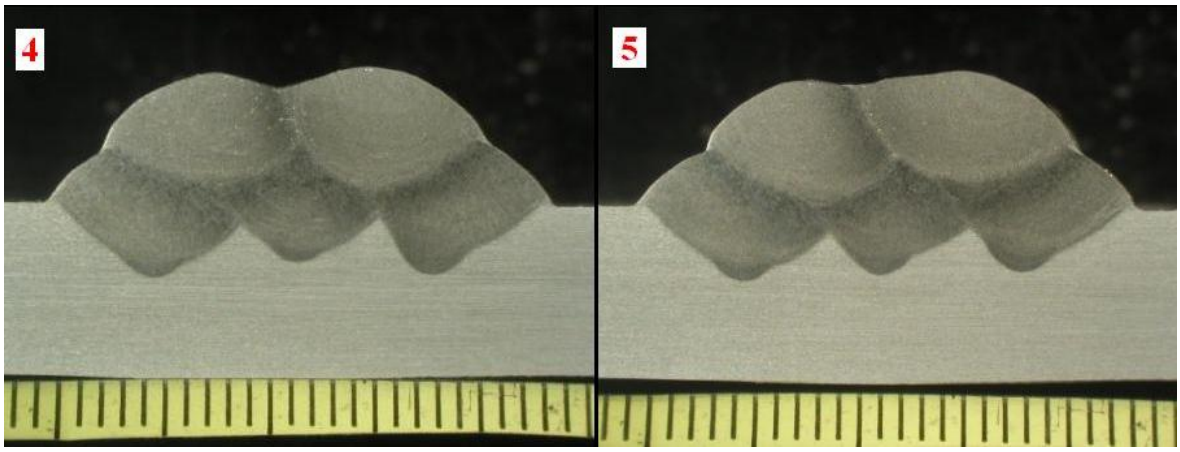
Hitsatuille koekappaleille suoritettiin röntgenkuvaus ennen hieiden valmistusta. Hieitä valmistettiin yksi kustakin koekappaleesta. Hieille suoritettiin silmämääräinen tarkastelu mikroskoopin avulla. Koekappaleiden hieet kuvattiin myös tavallisella kameralla. Kuvat 14, 15 ja 16 ovat makrokuvia koekappaleiden hieistä. Kuvassa 14 mustilla numeroilla on lisäksi merkitty koekappaleiden hitsauksessa käytetty palkojärjestys.



Kuva 14. Makrokuva koekappaleesta 1. Näkyvissä myös palkojärjestys.



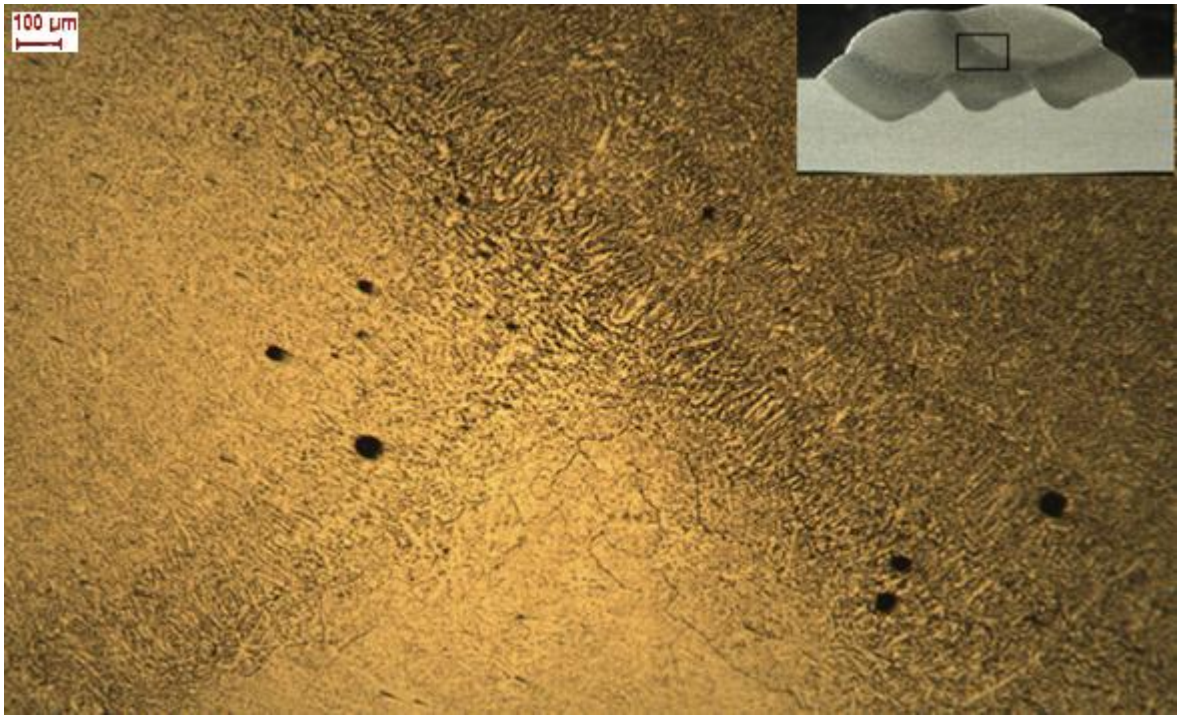
Kuva 15. Makrokuvat koekappaleista 2 ja 3.



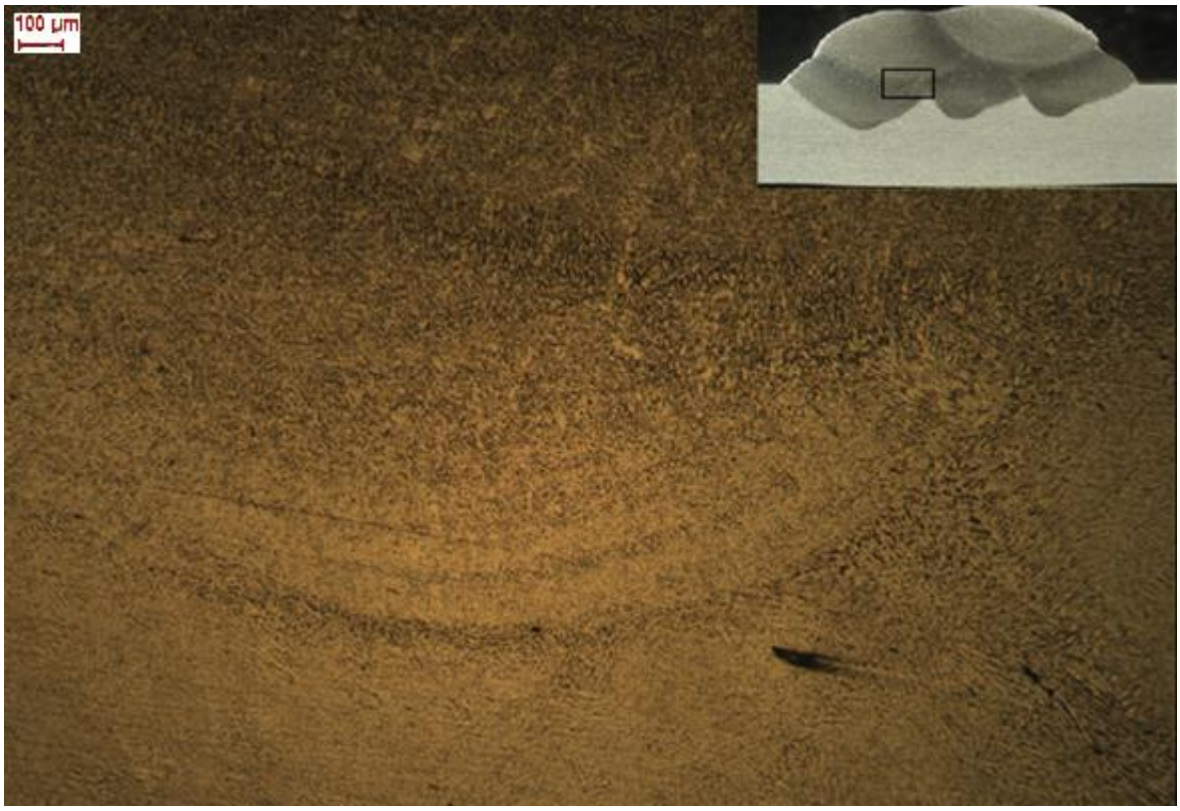
Kuva 16. Makrokuvat koekappaleista 4 ja 5.

Mikroskooppitutkimuksissa keskityttiin hitsipalkojen liittymisiin ja sularajoihin. Erityistä huomiota kiinnitettiin päällimmäisten palkojen (palot 4 ja 5) liittymisiin alempiin, koska olosuhde-erot kohdistuivat kyseessä olevaan väliin. Mikroskooppikuvissa on oikeaan yläkulmaan lisätty makrokuva, josta selviää mistä alueesta se on otettu. Koekappaleiden mikroskooppikuvat ovat esitelty seuraavasti:

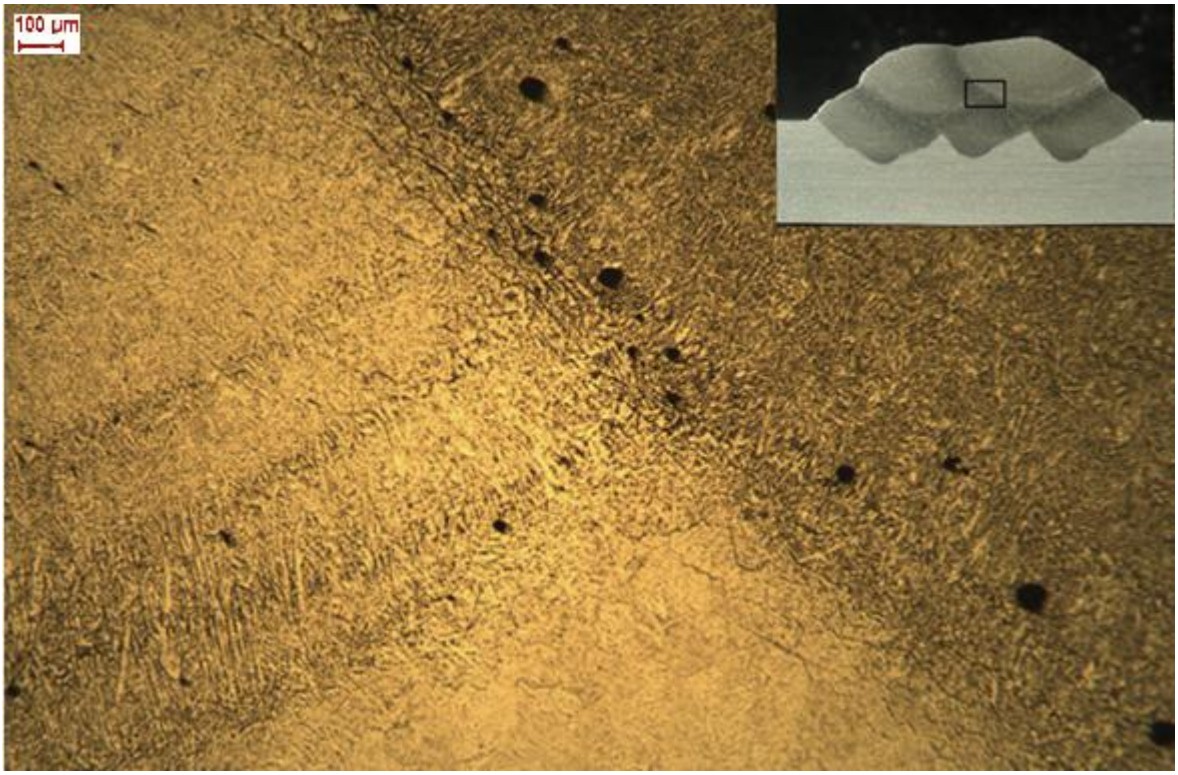
- Koekappale 1: Kuvat 17 ja 18
- Koekappale 2: Kuvat 19 ja 20
- Koekappale 3: Kuvat 21 ja 22
- Koekappale 4: Kuvat 23 ja 24
- Koekappale 5: Kuvat 25 ja 26.



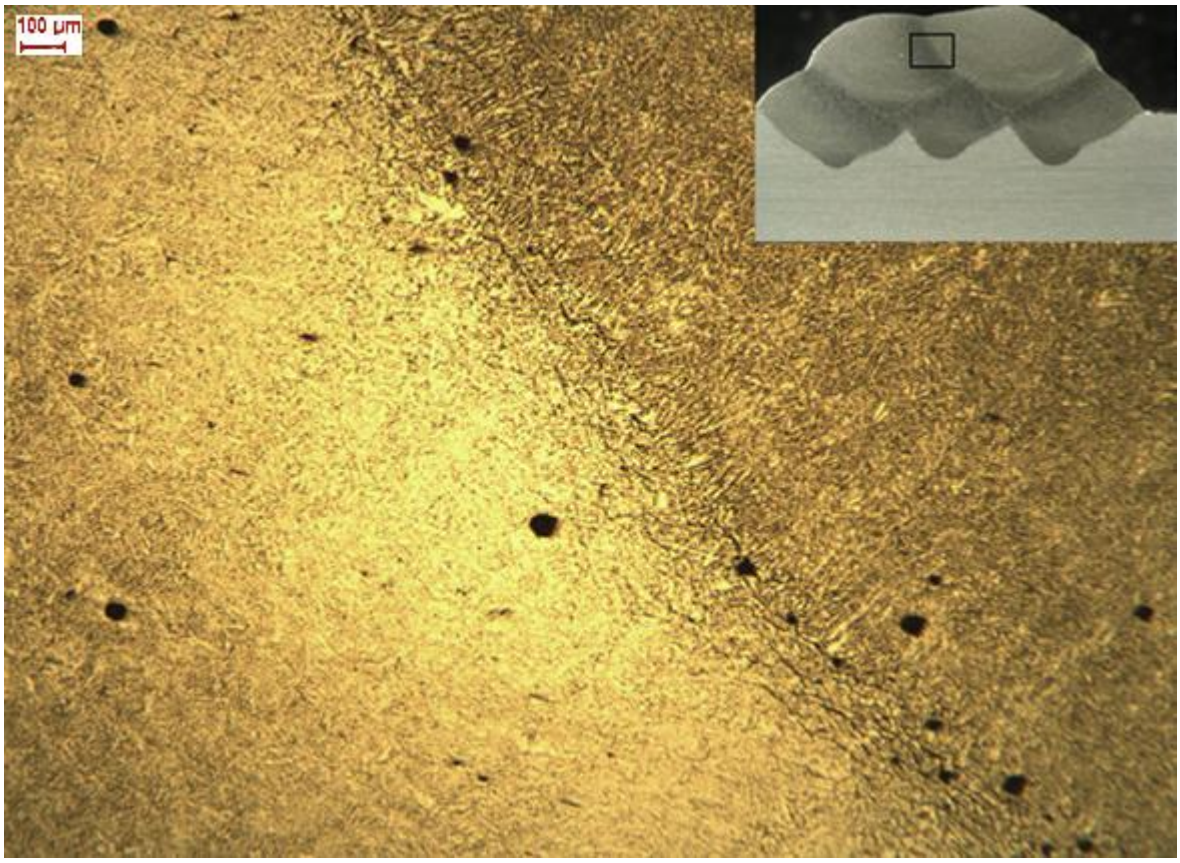
Kuva 17. Mikroskooppikuva koekappaleesta 1 palkojen 2, 4 ja 5 sularajalla.



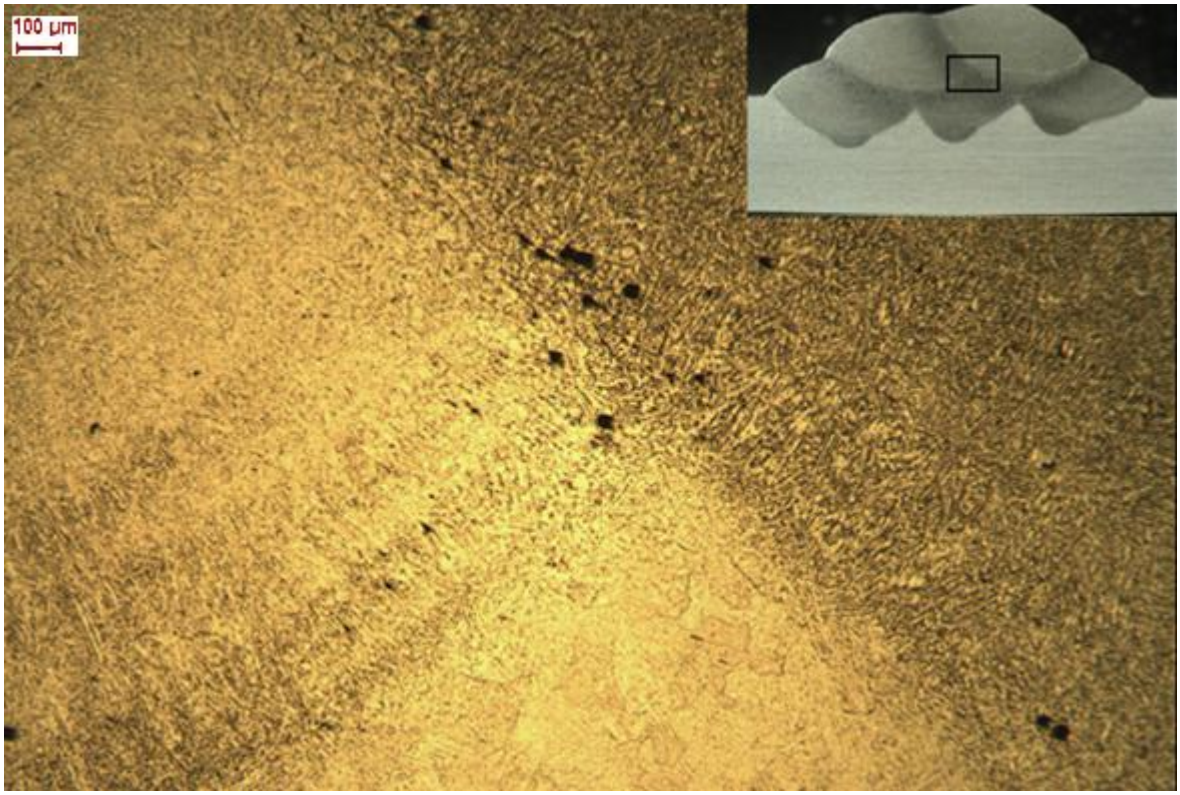
Kuva 18. Mikroskooppikuva koekappaleesta 1 palkojen 1 ja 4 sularajalla.



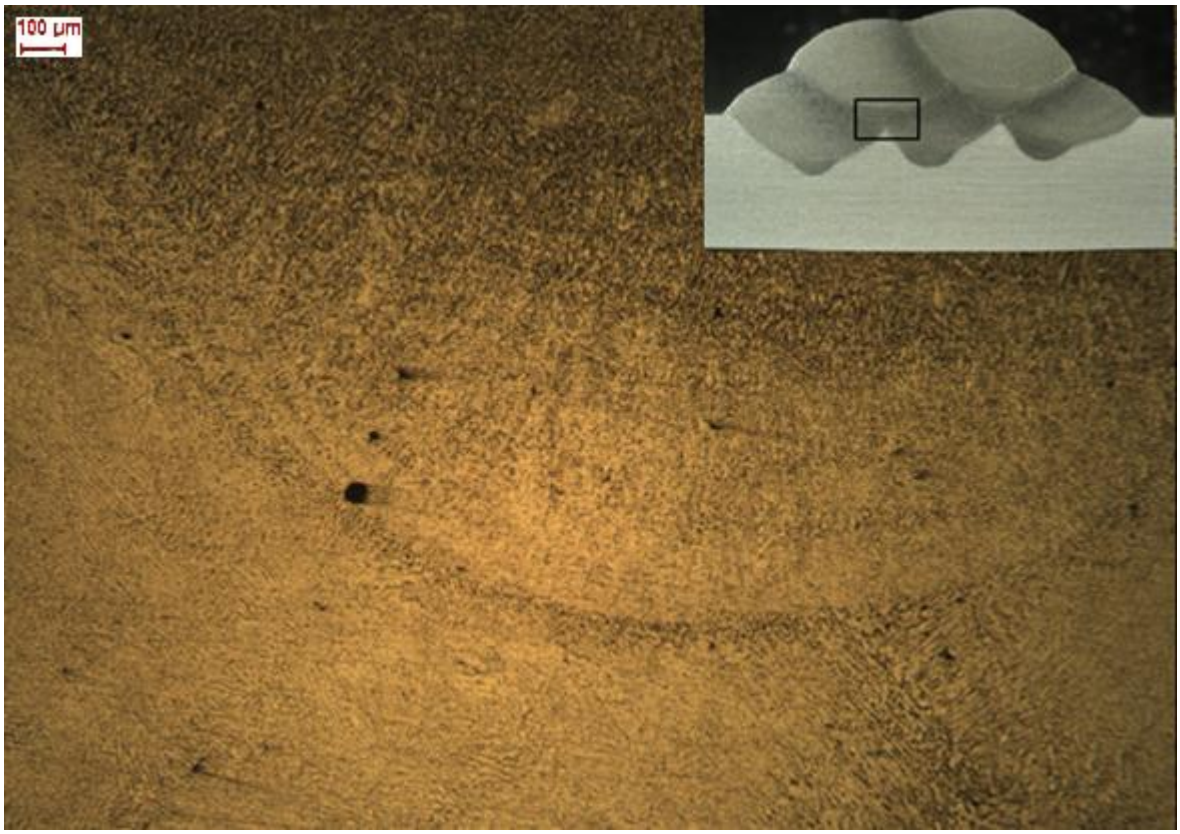
Kuva 19. Mikroskooppikuva koekappaleesta 2 palkojen 2, 4 ja 5 sularajalla.



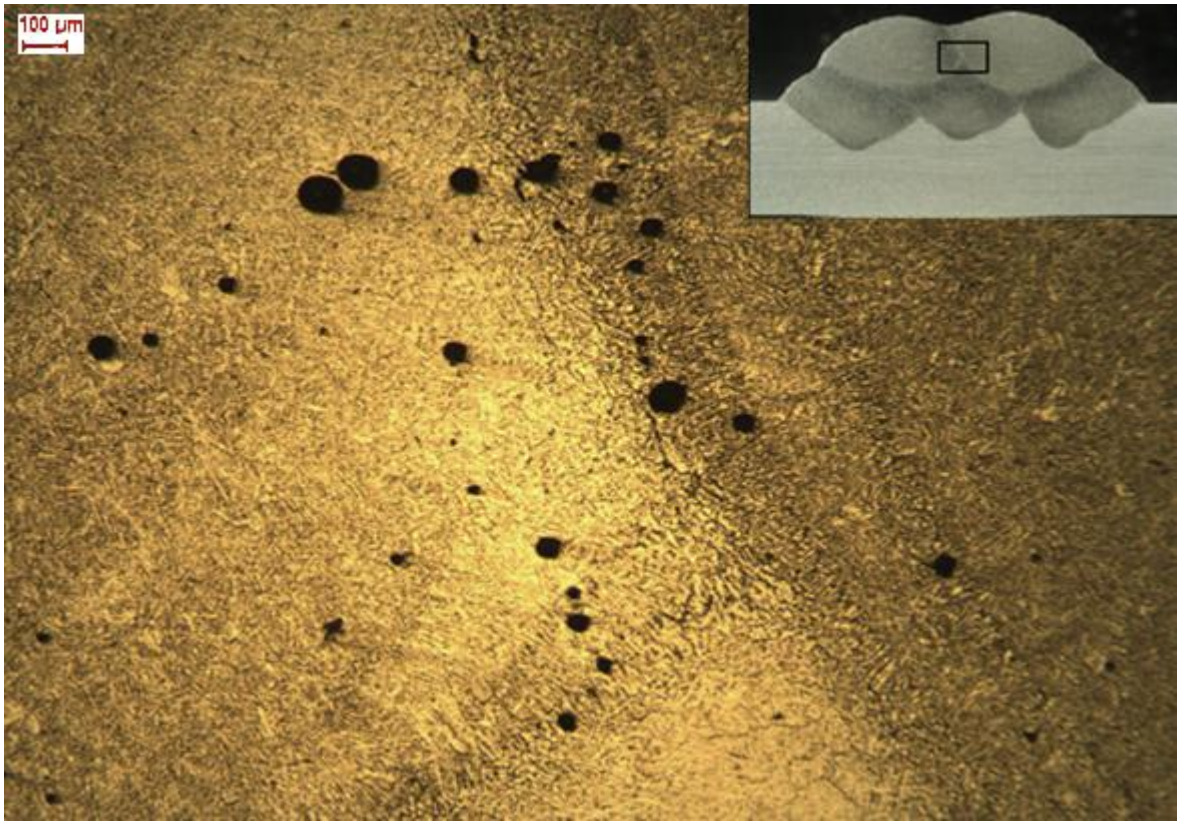
Kuva 20. Mikroskooppikuva koekappaleesta 2 palkojen 4 ja 5 sularajalla.



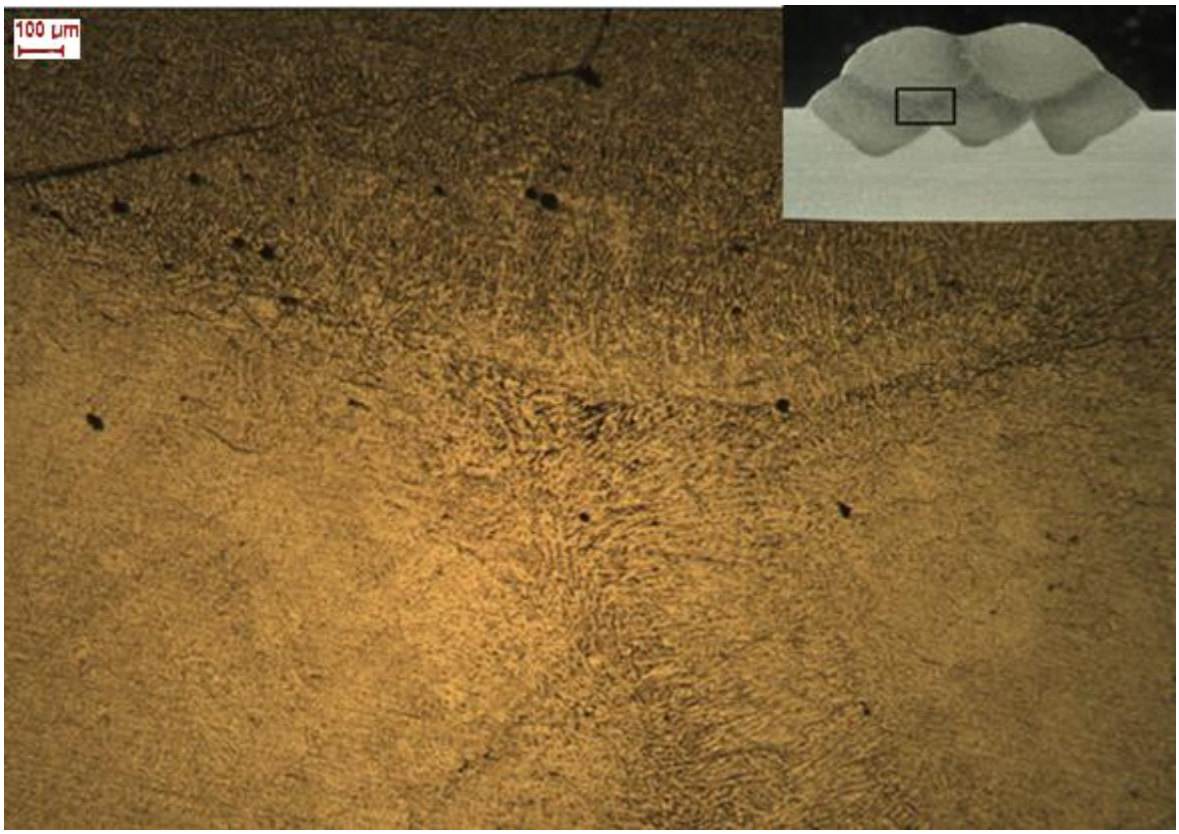
Kuva 21. Mikroskooppikuva koekappaleesta 3 palkojen 2, 4 ja 5 sularajalla.



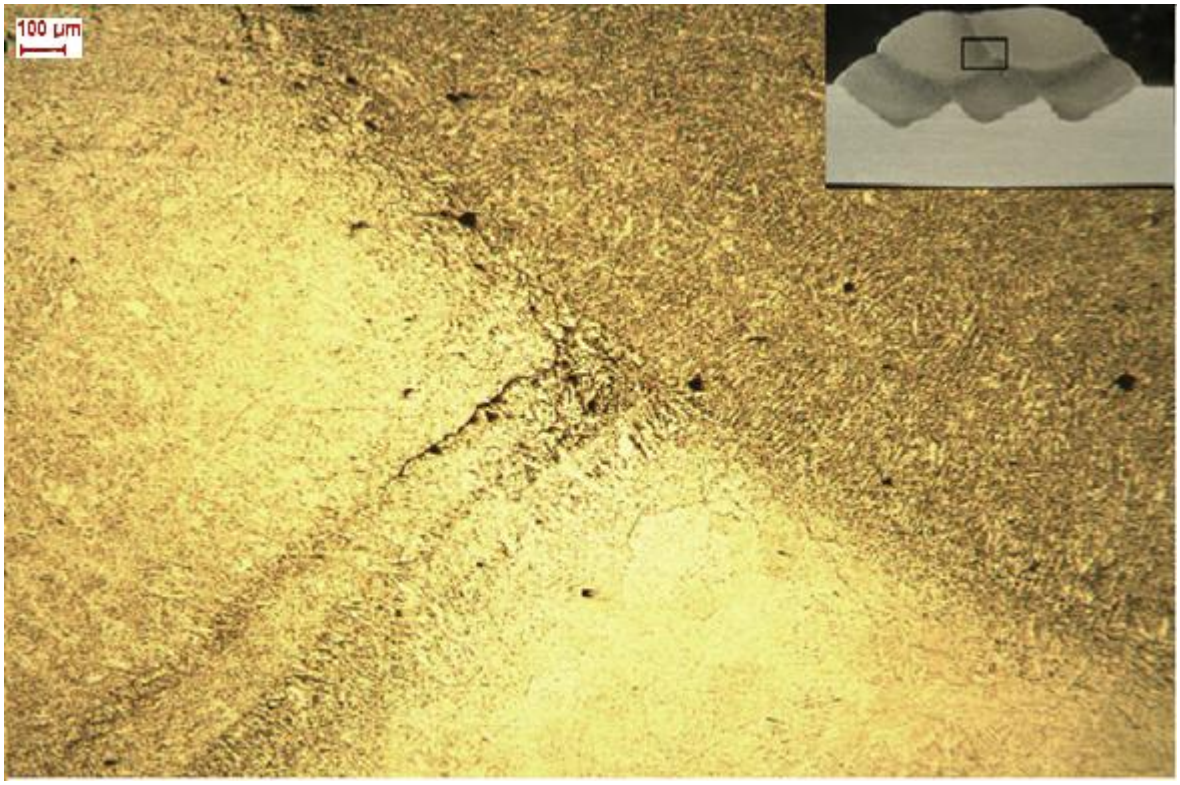
Kuva 22. Mikroskooppikuva koekappaleesta 3 palkojen 1 ja 4 sularajalla.



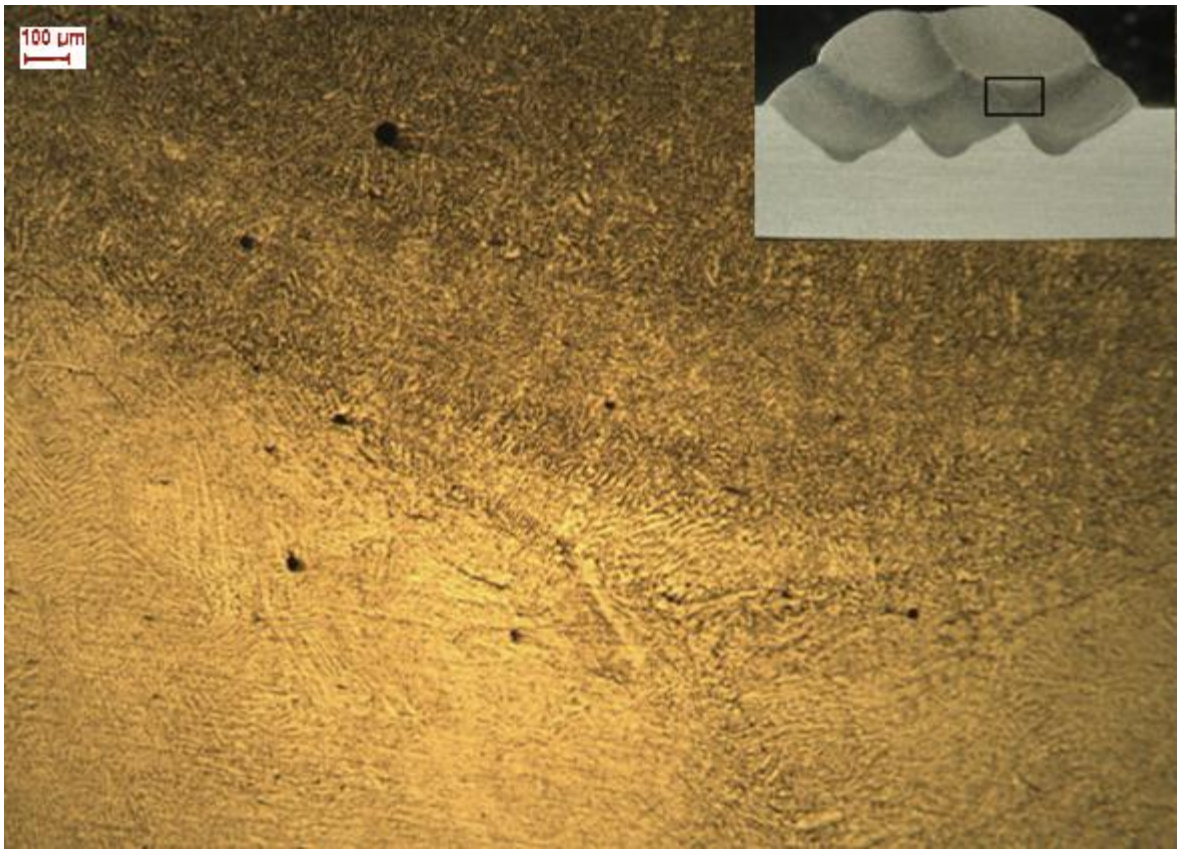
Kuva 23. Mikroskooppikuva koekappaleesta 4 palkojen 2, 4 ja 5 sularajalla.



Kuva 24. Mikroskooppikuva koekappaleesta 4 palkojen 1, 2 ja 4 sularajalla.



Kuva 25. Mikroskooppikuva koekappaleesta 5 palkojen 2, 4 ja 5 sularajalla.



Kuva 26. Mikroskooppikuva koekappaleesta 5 palkojen 2, 3 ja 5 sularajalla.

8.3 Tulosten tarkastelu

Missään koekappaleessa ei havaittu merkittäviä hitsausvirheitä niin makro- kuin mikrokuvissakaan. Sama voitiin todeta myös röntgenkuvista. Huokosia oli havaittavissa jokaisessa koekappaleessa. Suositusten mukaan hitsatun koekappale 1:n ei havaittu poikkeavan tässä suhteessa. Huokosten määrä oli hiukan suurempi koekappaleissa 2, 3, 4 ja 5 päälle hitsattujen palkojen sularajoilla kuin koekappaleessa 1.

Useiden lähteiden mukaan (esimerkiksi Lukkari 2001, Mathers 2002 ja Dickerson 1993) kostealle ympäristölle altistuminen aiheuttaa oksidikerroksen hydratoitumista eli vedyn liukenemista oksidiin sekä oksidikerroksen paksuuntumista. Tämän pitäisi aiheuttaa hitsiin huokosia ja mahdollisesti liitosvirheitä. Kuitenkaan kostealle altistettujen koekappaleiden 3 ja 5 ei havaittu poikkeavan merkittävästi kuivassa olleille koekappaleille 1, 2 ja 4. Myös eri päällehitsausajoilla ei ollut havaittavaa merkitystä hitseihin. Koekappale 4:än muodostui hiukan muita suurempi määrä huokosia palkojen 4 ja 5 välille, jonka voi havaita kuvasta 23. Kuitenkin standardin SFS-EN ISO 10042 mukaan koekappaleen 4 huokosten määrä on normaalia.

Kaikkien koekappaleiden hitsien liittyminen oli jouheaa. Koekappaleessa 5 oli havaittavissa alumiinioksidikerrostuma palkojen 2, 4 ja 5 sularajalla, jonka voi nähdä kuvassa 25 viivamaisena muodostumana. Muita pienempiä oksidikerrostumia oli useassa koekappaleessa palkojen sularajoilla, kuten esimerkiksi kuvista 19 ja 23 voidaan nähdä. Hitseissä ei havaittu halkeamia tai liitosvirheitä.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET

Tutkimuksissa suoritettujen hitsauskokeiden koekappaleiden lukumäärän vähäisyys rajoittaa syvällisten johtopäätösten tekemistä. Myös tasaiset laboratorio-olosuhteet sekä robotisoitu hitsaaminen aiheuttavat sen, että tulokset eivät ole välttämättä saavutettavissa konepajaympäristössä. Robotisoidun hitsaamisen etuna on tarkka polttimen kohdistaminen, jonka ansiosta valokaaren oksidinpuhdistuskyky on paras mahdollinen.

Tuloksista voidaan päätellä, että alumiinin monipalkohitsauksessa eri olosuhteilla on vähäinen vaikutus saavutettavan hitsin laatuun. Koekappaleissa ei havaittu merkittäviä hitsausvirheitä. Huokosia oli jokaisessa koekappaleessa alumiinin hitsaukselle tyypilliseen tapaan.

Kirjallisuudessa esitetty alumiinioksidin puhdistusvaatimus ennen hitsausta voi olla vanhentunutta tietoa. Nykyaikaisten hitsausvirtalähteiden ja pulssihitsauksen käyttäminen rikkoo oksidikerroksen tehokkaasti, ja oksidin puhdistusta ei tarvitse suorittaa jokaisen palon hitsaamisen jälkeen. Kuitenkin runsas noen määrä on tyypillistä alumiinin hitsauksessa ja sen puhdistaminen palkokerrosten välistä on tärkeää. Kun noen puhdistaminen suoritetaan ruostumattomalla teräsharjalla, samalla oksidikerros rikkoutuu ja se vähentää riskiä hitsausvirheille. Tämä saattoi vaikuttaa myös tämän tutkimuksen lopputuloksiin.

Tulevaisuudessa oksidikerroksen vaikutuksiin liittyvissä alumiinin hitsauksen tutkimuksissa tulisi muuttaa olosuhde-eroja vielä rajummiksi, jotta voitaisiin selvittää, minkälaiset olosuhteet ovat kriittisiä hitsausvirheiden muodostumiselle. Esimerkiksi materiaalin siirtäminen kylmästä lämpimään, joka aiheuttaa vesihöyryn tiivistymisen kylmän metallin pinnalle, olisi tutkimisen arvoinen asia oksidin muodostumisen kannalta. Tässä tutkimuksessa ei otettu huomioon mahdollisia konepajaympäristössä olevia ongelmia, kuten esimerkiksi vedon aiheuttaman puutteellisen kaasusuojauksen vaikutus. Myös noen vaikutusta hitsausvirheisiin voitaisiin tutkia jättämällä sen puhdistus pois ennen seuraavan palkokerroksen lisäämistä.

10 YHTEENVETO

Alumiinilla on kemiallinen taipumus yhtyä hapen kanssa ja muodostaa oksidikerros itsensä pinnalle. Oksidikerros voi aiheuttaa hitsausvirheitä sekä haitata hitsausprosessia. Vaikka yleisesti alumiinin hitsauksessa käytettävien hitsausprosessien valokaarella on oksidia puhdistava ominaisuus, se suositellaan yleisesti poistettavaksi mekaanisesti ennen hitsauksen suorittamista.

Tässä työssä tutkittiin alumiinioksidin vaikutusta alumiinin monipalkohitsauksessa. Työn tavoitteena oli tutkia alumiinin pinnalle muodostuvan oksidikerroksen vaikutusta hitsien metallurgiaan ja hitsausvirheisiin. Hitsauskokeissa pyrittiin selvittämään oksidikerroksen muodostumista eri olosuhteissa ja sen vaikutusta usean palon hitseissä.

Työn teoriaosuudessa selvitettiin ensin eri alumiinilaatujen ominaisuuksia hitsattavuuden kannalta sekä esiteltiin yleisimmät alumiinin hitsauksessa käytettävät hitsausprosessit. Lisäksi kerrottiin hitsausaineiden ja esivalmisteluiden merkityksestä alumiinin hitsauksessa. Teoriaosan lopussa pohdittiin monipalkohitsauksen metallurgisia erityispiirteitä sekä alumiinin monipalkohitsauksessa esiintyviä hitsausvirheitä.

Työn käytännön osuudessa alumiinin monipalkohitsausta tutkittiin hitsauskokeilla. Hitsauskokeiden tarkoituksena oli selvittää erilaisten olosuhteiden vaikutus oksidikerroksen muodostumiseen ja sen vaikutuksista hitsien laatuun. Kokeissa hitsattiin AW EN-5083 – alumiinia päällehitsauksena. Koekappaleita oli viisi, ja kolmen pohjapalon hitsaamisen jälkeen koekappaleille luotiin erilaiset olosuhteet niin päällehitsausajankohdan kuin kosteuden suhteen. Olosuhdealtistuksen jälkeen hitsattiin vielä kaksi palkoa edellisten päälle.

Tutkimustuloksista selvisi, että erilaisten olosuhteiden vaikutus alumiinin monipalkohitseihin on pieni. Hitsausvirheiden määrä ei merkittävästi muuttunut koekappaleiden erilaisista olosuhteista huolimatta. Kuitenkin tuloksia tarkastellessa on huomioitava koekappaleiden vähäinen määrä sekä robottihitsauksen ja laboratorio-

olosuhteiden mahdollinen vaikutus lopputuloksiin, ja se on siten vain rajoitetusti sovellettavissa käytännön konepajaympäristössä.

Tulevaisuuden alumiinioksidin vaikutuksiin hitsauksessa liittyvissä tutkimuksissa voisi selvittää minkälaiset olosuhteet ovat rajoittavia laadukkaassa alumiinin hitsauksessa. Olosuhteita voisi miettiä normaalin konepajaympäristön näkökulmasta, jotta tutkimus palvelisi parhaiten käytännön tilanteita.

LÄHTEET

Anttila, J. 1991. Paksun alumiinin suurenergia-MIG –hitsaus. Diplomityö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Armao, F. 2003. How to recognize, minimize weld smut. Practical welding today -lehti Maalis-/Huhtikuu 2003. Saatavissa: http://www.thefabricator.com/article/aluminumwelding/how-to-recognize-minimize-weld-smut

Dickerson, P. 1993. Welding of aluminum alloys. ASM Handbook, Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering. ASM International. Materials Park. S. 722-739.

Esabna. 2013a. The Differences Between Heat-Treatable and Non-Heat-Treatable Aluminum Alloys. Viitattu 7.5.2013. Saatavissa: http://www.esabna.com/us/en/education/knowledge/qa/The-Differences-Between-Heat-Treatable-and-Non-Heat-Treatable-Aluminum-Alloys.cfm

Esabna. 2013b. How to Avoid Cracking in Aluminum Alloys. Viitattu 8.5.2013. Saatavissa: http://www.esabna.com/us/en/education/knowledge/qa/How-to-Avoid-Cracking-in-Aluminum-Alloys.cfm

Esabna. 2013c. What are unweldable aluminum alloys. Viitattu 7.5.2013. Saatavissa: http://www.esabna.com/us/en/education/knowledge/qa/What-are-unweldable-aluminum-alloys.cfm

Gordon, S. 2012. Friction stir welding. Industrial Heating. S. 55-57.

Huhtaniemi, K. & Jerima, M. & Pohjus, J. & Puska, M. & Vierimaa, T. & Karppinen, A. & Vartiainen, M. 2006. Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit. Teknologiainfo Teknova Oy. Helsinki. 237 s.

Karhula, M. 1994. Alumiini rakenneaineena. Hitsaustekniikka –lehti 1/1994.

Key to metals. 2013. Welding of Aluminum Alloys. Viitattu 6.5.2013. Saatavissa: http://www.keytometals.com/Article12.htm

Lukkari, J. 2001. Alumiinit ja niiden hitsaus. Tampere. Tammerpaino Oy. 251 s.

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

Lukkari, J. 2012. Katsaus alumiinin ominaisuuksiin ja hitsattavuuteen. Hitsaustekniikka – lehti 6/2012.

Martikainen, J. 1994. Alumiinin käyttäytyminen hitsauksessa ja lämpökäsittelyt. Hitsaustekniikka –lehti 1/1994.

Martikainen, J. 2011. Hitsausmetallurgia. Luentomoniste. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Mathers, G. 2002. Welding of aluminium and its alloys. Cambridge. Woodhead publishing Ltd. 248 s. ISBN 978-1-85573-567-5

Pettinen, R. & Witting, L. & Pullinen, A. & Lindewald C-G. & Kortelainen, O. 2004. Hitsauksen materiaalioppi. Suomen hitsausteknillinen yhdistys. Helsinki. 295 s.

Praveen, P & Yarlagadda, P. 2005. Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding. Journal of material processing technology. Elsevier. Saatavissa: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013605001950

SFS-EN 515. 1993. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokatut tuotteet. Tilojen tunnukset. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki.

SFS-EN 1011-4. 2001. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 4: Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus. Suomen standardoimisliitto. Helsinki.

SFS-EN 573-1. 2005. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokattujen tuotteidentuotteiden kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Osa 1: Numeerinen nimikejärjestelmä. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki.

SFS-EN ISO 9692-3. 2001. Hitsaus ja sen lähiprosessit. Railomuodot. Osa 3: Alumiinin ja alumiiniseosten MIG- ja TIG- hitsaus. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki.

SFS-EN 10042. 2006. Hitsaus. Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus. Hitsiluokat. Suomen standardisoimisliitto. Helsinki.

Soete, W. 1971. One-Run Versus Multi-Run Wels. Welding Research Supplement. Saatavissa: http://files.aws.org/wj/supplement/WJ_1971_03_s127.pdf

Tampereen teknillinen yliopisto, Materiaaliopin laitos. 2005. Alumiini. Viitattu 25.4.2013. Saatavissa: http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_2_1.php