



ALUMIINISEOSTEN HITSAUS JA SIIHEN LIITTYVÄT ERITYISPIIRTEET
WELDING OF ALUMINUM ALLOYS AND ITS RELATED SPECIAL FEATURES

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Atte Ruokonen

Ohjaajat: TkT Miikka Karhu

Laboratorioinsinööri Esa Hiltunen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Atte Ruokonen

Alumiiniseosten hitsaus ja siihen liittyvät erityispiirteet

Konetekniikan kandidaatintyö

43 sivua, 20 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Miikka Karhu

Avainsanat: Alumiiniseokset, alumiiniseosten hitsaus, MIG-hitsaus, muutosvyöhyke, kovuus, lujuus

Kevenä konstruktiomateriaalina alumiini tarjoaa hyvän lujuus/paino- suhteen. Alumiinia käytetään laajalti ajoneuvo-, rakennus-, ilmailu- ja pakkausteollisuudessa. Useimmat alumiiniseokset ovat hyvin hitsattavia, mutta alumiiniseosten materiaaliominaisuudet hitsauksen kannalta eroavat kuitenkin huomattavasti esimerkiksi verrattuna teräksen hitsaukseen.

Tässä kandidaatintyössä pyritään esittämään tärkeimmät alumiinien hitsauksessa esiintyvät materiaaliominaisuudet ja kuinka nämä ominaisuudet vaikuttavat alumiinien hitsaukseen. Työssä selvitetään valta-asemassa olevien alumiinien hitsausprosessien edut ja haitat. Käytännön tutkimusosiossa alumiinilevykoekappaleiden päittäisliitoksille suoritettiin hitsauskokeet, joissa varioitiin perusainetta, lisäainetta sekä hitsauksen lämmöntuontia. Hitsatuista koekappaleista valmistettiin vetokoesauvat sekä makrohieet, joille tehtiin Vickers-kovuusmittauskokeet.

Tutkimustuloksissa selvisi, että alumiinin tärkeimmät materiaaliominaisuudet hitsauksessa ovat sen lujuuden menetys hitsauksen aiheuttaman lämmöntuonnin takia, alumiinin pinnalle muodostuva oksidikalvo sekä suuri lämpölaajenemis- ja lämmönjohtumiskerroin. Hitsauskokeet onnistuivat ja MIG-hitsaus todettiin toimivaksi alumiinien hitsausprosessiksi.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Atte Ruukonen

Welding of aluminum alloys and its related special features

Bachelor's thesis

2022

43 pages, 20 figures, and 2 tables

Examiner: D.Sc Miikka Karhu

Keywords: Aluminum alloys, welding of aluminum alloys, MIG-welding, heat affected zone, hardness, strength

As a lightweight construction material, aluminum offers a good strength-to-weight ratio. Aluminum is widely used in the automotive, construction, aerospace, and packaging industries. Most aluminum alloys are highly weldable but the material properties of aluminum alloys for welding differ considerably compared to a steel welding.

This bachelor's thesis aims to present the main material properties of aluminum welding and how these affect the welding of aluminum. The advantages and disadvantages of welding processes in dominant aluminum welding processes are investigated in this bachelor's thesis. In the study, welding tests were also performed on aluminum, in which the base material, filler material, and the heat input of the welding were varied. Welded specimens were used to make tensile rods and macrographs, which were subjected to Vickers hardness tests.

The research results showed that the main material properties of aluminum in welding are the loss of its strength due to the heat input caused by welding, the oxide film formed on the surface of the aluminum, and the high coefficient of thermal expansion and thermal conductivity. The welding tests were successful and MIG welding was found to be an effective welding process for aluminum.

SYMBOLI-JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

°C	celsiusaste
A	ampeeri
Al	alumiini
Al ₂ O ₃	alumiinioksidi
Ar	argon
CO ₂	hiilidioksidi
Cu	kupari
Fe	rauta
He	helium
I	hitsausvirta [A]
Kr	krypton
Li	litium
Mg	magnesium
min	minuutti
mm	millimetri
nm	nanometri
Ne	neon
Mn	mangaani
Pb	lyijy
Q	lämmöntuonti [kJ/mm]
R _m	murtolujuus [MPa]
R _{p,0.2}	myötölujuus [MPa]
s	sekunti
Si	pii
Sn	tina
Ti	titaani
v	hitsausnopeus [mm/s]

w_{fs}	hitsauslangan syöttönopeus [m/min]
V	voltti
Xe	ksenon
Zn	sinkki

Kreikkalaiset

κ	hitsausprosessikohtainen terminen hyötysuhdekerroin
μm	mikrometri

Lyhenteet

AC	Alternative Current
AW	Aluminum Wrought alloys
EN	European Standard
FSW	Friction Stir Welding
HAZ	Heat Affected Zone
ISO	International Organization for Standardization
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
Nd:YAG	Neodyymillä varusteltu yttriumalumiinigranaatti
SFS	Suomen Standardisoimisliitto SFS ry
TIG	Tungsten Inert Gas

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SYMBOLI-JA LYHENNELUETTELO

1. Johdanto	8
2. Alumiini ja alumiiniseokset	10
2.1 Alumiiniseokset ja niiden nimikejärjestelmä	10
2.1.1 Ei-lämpökäsitellävät seokset	12
2.1.2 Lämpökäsiteltävät seokset	13
2.2 Alumiinien toimitustilat	14
3. Alumiinien materiaaliominaisuudet hitsauksessa	16
3.1 Hapettuminen ja korrosio	16
3.2 Huokoisuus	17
3.3 Sähkön- ja lämmönjohtavuus	18
3.4 Lämpölaajenemiskerroin	19
3.5 Muut ominaisuudet	20
3.6 Alumiinin hitsauksen esivalmistelut	22
4. Hitsausaineet	24
4.1 Lisäaineet	24
4.2 Suojakaasut	25
5. Alumiinien hitsausprosessit	27
5.1 MIG-hitsaus	27
5.2 TIG-hitsaus	28
5.3 Laser-sovellukset	29
5.4 Friction Stir Welding (FSW)	30
6. Hitsauskokeet	32
6.1 Koejärjestelyt	33
6.2 Tulokset	34
6.3 Tulosten analysointi	38
7. Johtopäätökset	40

8. Yhteenveto	41
Lähteet	42

1. Johdanto

Lujuuden ja painon hyvä suhde tekee alumiinista haastajan teräksille teollisuudessa. Alumiinia käytetään laajasti rakennus-, ajoneuvo-, laiva- ja pakkausteollisuudessa. Näillä teollisuuden aloilla tarvittavan muodon saavuttaminen vaatii usein liitoksen. Metalleilla liitos toteutetaan usein hitsaamalla, koska hitsauksella saavutetaan hyvät metallurgiset ominaisuudet, ylivoimaiset mekaaniset ominaisuudet sekä alhainen hinta. Uusien lujempien alumiiniseosten käytön lisääntyminen on ajanut kehittämään kilpailukykyisempiä prosesseja alumiinin hitsaukseen. Alumiinin hitsaukseen on perinteisesti käytetty kaarihitsausprosesseja, kuten MIG (Metal Inert Gas) ja TIG (Tungsten Inert Gas), mutta teknologian kehityksen myötä on otettu käyttöön uusia tehokkaampia prosesseja. Useimmat alumiinin seokset ovat erittäin hitsattavia, mutta alumiinin hitsaus eroaa huomattavasti teräksen hitsauksesta, jonka takia alumiinirakentajan täytyy tuntea alumiinin hitsaukseen liittyvät erityispiirteet. (Lukkari 2001, s. 24, 26–28.)

Tämän työn tavoitteena on selvittää alumiinien hitsaukseen nykytilanne ja alumiinin hitsaukseen vaikuttavat ominaispiirteet kirjallisuuskatsauksen ja käytännön kokeiden avulla. Tarkoituksena on yhdistää kirjallisuuskatsauksen ja käytännön kokeiden tulokset. Aiheeseen liittyy paljon muuttujia, koska alumiiniseoksia on lukematon määrä, mukaan lukien eri hitsauslisäaineet. Hitsausprosesseja on olemassa monenlaisia ja niiden tuottama hitsien laatu vaihtelee eri prosesseittain. Tässä työssä alumiinien, lämmöntuonnin ja lisäaineen vertailu rajataan alumiineihin, joita testataan käytännön kokeissa. Tutkimuksen kannalta tärkeitä kysymyksiä ovat:

- Mitkä ovat tärkeimmät huomioon otettavat asiat alumiinien hitsauksessa?
- Mitkä ovat tärkeimmät alumiinin hitsausprosessit?
- Vastaako kirjallisuudesta löytyvät ilmiöt käytännön kokeissa ilmenneitä asioita?

Koska alumiinin hitsauksessa korostuu tuntemus alumiinista materiaalina, selvitetään alumiinin erityisominaisuudet ja tarkastellaan niitä etenkin hitsattavuuden kannalta. Lisäksi kerrotaan eri hitsausprosessien vahvuudet ja heikkoudet. Samalla pyritään selvittämään hitsauksessa esiintyvät tyypillisimmät hitsausvirheet ja hitsaukseen liittyvät ongelmat. Työssä kerrotaan myös hitsausta edeltävistä esivalmisteluista. Kuudennessa kappaleessa

esitellään käytännönkokeet, joissa MIG-hitsataan hitsausrobotilla alumiinien EN AW 5083 ja EN AW 6082 eripariliitos koesuunnitelman mukaan. Kokeet suoritettiin LUT-yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa. Johtopäätöksissä tarkastellaan tavoitteen onnistumista ja vastataan tutkimuskysymyksiin. Yhteenvedoon kootaan tiivistäen työssä esiin tulleet vastaukset ja ratkaisut.

2. Alumiini ja alumiiniseokset

Alumiini on maankuoren kolmanneksi yleisin alkuaine. Maankuoresta 8 % on alumiinia. Vaikka alumiini on yksi yleisimmistä alkuaineista maankuoressa, se ei koskaan esiinny vapaana, vaan yhdisteinä eri alkuaineiden kanssa. Pääsääntöisesti alumiini esiintyy piin ja hapen yhdisteinä sekä eri alkalimetallien ja maa-alkalimetallien kanssa. Alumiini valmistetaan pääsääntöisesti maaperästä louhittavasta bauksiitista. Valmistuksessa on kaksi päävaihetta, jossa ensimmäisessä bauksiitti jalostetaan alumiinioksidiksi Al_2O_3 Bayernin prosessissa, jonka jälkeen alumiinioksidista valmistetaan alumiinia Hall-Héroult menetelmällä. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 30–31).

Alumiinin suosio käytettävänä materiaalina perustuu sen tarjoamiin uniikkeihin ominaisuuksiin ja sitä voi löytää monista eri tuotteista meidän arkipäiväisestä elämästämme. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 16):

- Alumiinin tiheys ($2,7 \text{ kg/dm}^3$) vrt. teräs ($7,85 \text{ kg/dm}^3$)
- Riittävä lujuus, $R_m = 70\text{--}700 \text{ MPa}$
- Hyvä korroosionkestävyys
- Helppo muokattavuus ja muovattavuus
- Hyvä hitsattavuus
- Erinomainen sähkönjohtavuus, 60 % puhtaan kuparin sähkönjohtavuudesta
- Epämagneettisuus
- Myrkyttömyys

2.1 Alumiiniseokset ja niiden nimikejärjestelmä

Puhdas alumiini sisältää vähintään 99 % alumiinia ja usein pieniä määriä epäpuhtauksia, kuten rauta- ja pii-jäänteitä. Kuitenkin puhdas eli seostamaton alumiini on todella pehmeää, eikä sillä ole hyviä käytännön ominaisuuksia konstruktioiteollisuudessa. Puhtaan alumiinin heikon lujuuden takia alumiinia seostetaan eri alkuaineilla, joiden avulla saavutetaan haluttuja hyödyllisiä ominaisuuksia. Seostuksen tärkein tavoite on lujuuden parantaminen, koska puhtaan seostamattoman alumiinin murtolujuus puhtausasteesta riippuen on 60–105

MPa. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 55–56). Yleisimmät seosaineet ovat magnesiumium (Mg), mangaani (Mn), kupari (Cu), pii (Si) ja sinkki (Zn). Muita pienemmissä määrin ja harvemmin käytettyjä seosaineita ovat titaani (Ti) ja lyijy (Pb). Alumiinin lujuutta pystytään parantamaan lähes kaikilla edellä mainituilla seosaineilla. (Mathers 2002, s. 35–36)

Alumiiniseoksien nimeäminen tapahtuu kahdella eri järjestelmällä, jotka perustuvat standardeihin. Numeerinen järjestelmä perustuu standardiin SFS-EN 573-1, jonka mukaan voidaan nimetä eri alumiiniseokset nelinumeroisella nimikejärjestelmällä, josta selviää lisätyt seosaineet. Kemialliseen koostumukseen perustuva standardi on SFS-EN 573-2. Nimike alkaa etuliitteellä EN, mikä osoittaa sen kuuluvuuden eurooppalaiseen standardiin. Etuliitteen jälkeen tulee materiaalitunnus A, mikä kertoo, että materiaali on alumiini. Materiaalitunnuksen jälkeen merkitään seoksen tyyppi W (muokattavat tuotteet) tai C (valuseos). Viimeiseksi nimikkeeseen tulee neljä- tai viisinumeroinen seosnumero, riippuen, onko kyseessä muokattava vai valuseos, joka kertoo pääseosaineet. Seosryhmät ovat (SFS-EN 573-1 2005, s. 8):

- 1xxx (1000-sarja), alumiinia vähintään 99,00 %
- 2xxx (2000-sarja), kupari
- 3xxx (3000-sarja), mangaani
- 4xxx (4000-sarja), pii
- 5xxx (5000-sarja), magnesiumium
- 6xxx (6000-sarja), magnesiumium ja pii
- 7xxx (7000-sarja), sinkki
- 8xxx (8000-sarja), muut seosaineet
- 9xxx (9000-sarja), käyttämätön sarja

Alumiininseokset voidaan jaotella kahteen ryhmään, karkenemattomiin eli kylmämuokattaviin seoksiin ja karkeneviin eli lämpömuokattaviin seoksiin. Karkenemattomiin seoksiin kuuluvat 1xxx-, 3xxx-, 4xxx, 5xxx-sarjat ja karkeneviin 2xxx-, 6xxx-, 7xxx-sarjat. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 66.) 8xxx- sarjan alumiiniseokset ovat alumiiniseoksia, jotka eivät selkeästi kuulu mihinkään edellä mainituista ryhmistä. Yleisiä 8xxx-sarjan seosaineita on rauta (Fe), tina (Sn) ja litium (Li). 8xxx- sarjan alumiinit voivat olla kylmä-, tai lämpömuokattavia. (Polmear 2017, s.184.)

2.1.1 Ei-lämpökäsiteltävät seokset

Kylmämuokattavien seosten lujuutta voidaan nostattaa vain kylmämuokkauksella eli kylmävalssauksella. Kylmämuokkauksella lisätään atomien välistä dislokaatiota, jonka seurauksena tietyssä pisteessä dislokaatioiden liikkuvuus huononee. Prosessin seurauksena metallin lujuus, kovuus ja pinnanlaatu paranee, mutta sitkeys pienenee. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 56)

1xxx-sarja eli seostamattoman puhtaan alumiinin ominaisuuksia ovat matala lujuus, pehmeys, muovattavuus ja erinomainen sähkönjohtavuus. Maksimimurtolujuus voi olla kylmämuokkauksen jälkeen 170 MPa. Koska puhtaassa alumiinissa ei ole seosaineita, se ei ole altis kuumahalkeilulle. Pehmeiden ja heikon lujuuden takia seostamattomia alumiineja käytetään pakkausteollisuudessa etenkin folioissa ja sähköteollisuudessa sähköjohtimina. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 56). 3xxx-sarja eli AlMn seosten ominaisuudet ovat lähes samat kuin 1xxx- sarjalaisen. 3xxx-sarjan käyttö hitsatuissa rakenteissa on vähäistä, kuten 1xxx-sarjankin, johtuen matalista lujuusominaisuuksista. 3xxx-sarjan seoksia käytetään pursotetuissa putkissa ja lämmönjohtimissa. (Mathers 2002, s. 41.)

4xxx-sarja eli AlSi seokset ovat harvemmin käytettyjä rakenteissa, jotka vaativat hitsausta. 4xxx-sarjan seoksilla on erittäin hyvä sulan juoksevuus, minkä takia sen seoksia käytetään alumiinivaluissa. Hyvä juoksevuus ja matala taipumus kuumahalkeiluun tekevät AlSi seoksista yleisesti käytetyin lisäainemateriaalin hitsauksessa. (Mathers, 2002 s. 41.)

5xxx-sarja eli AlMg seokset ovat laajalti käytettyjä lujuutta vaativissa kohteissa. Magnesium parantaa lujuutta, mutta heikentää muovattavuutta. 5xxx-sarjan hitsattavuus on hyvä, vaikka muokkauslujitetuissa alumiineissa tapahtuu muutosvyöhykkeellä lujuuden heikkenemistä. Seokset omaavat hyvän korroosionkestävyyden etenkin merivedessä, jolloin niitä voidaan käyttää esimerkiksi laivateollisuudessa. 5xxx-sarjan hitsauksessa on vältettävä AlSi-lisäainetta, koska se muodostaa kuumahalkeilualtista magnesiumisilikaattia. (Lukkari 2001, s.57)

2.1.2 Lämpökäsiteltävät seokset

Lämpömuokattavat seokset lujitetaan erkautuskarkaisulla, joka edellyttää alumiiniseoksen koostumuksen olevan erkautuskarkeneva. Seosaineen liukoisuuden kuuluu vaihdella voimakkaasti eri lämpötiloissa. Erkautuskarkaisuun kuuluu neljä tärkeää vaihetta, joita ovat liuotushehkus, jäädytys, erkautuskäsittely ja hallittu jäähtyminen. Lämpömuokattavat seokset voidaan jakaa kahteen ryhmään. Toisessa ryhmässä ominaisuutena on hyvä hitsattavuus ja riittävä lujuus, kun taas toinen ryhmä voidaan jakaa erittäin lujiin seoksiin, jotka on kehitetty ilmailuteollisuuden tarpeisiin ja omaavat heikon hitsattavuuden. (Polmear 2017, s.184.)

2xxx-sarjan alumiiniseokset eli AlCu-, ja AlCuMg seokset ovat lujia alumiineja, joiden myötöraja voi olla 450 MPa. Korkea lujuus syntyy pienien alumiini-kupari partikkelien muodostumisesta erkautuskarkaisussa. AlCu- seosten hitsattavuutta on pidetty pitkään mahdottomana prosessina, koska 2...4 % kuparipitoisuus altistaa alumiiniseoksen erittäin voimakkaasti kuumahalkeilulle. Kuumahalkeilua esiintyy, kun seoksen eri partikkelit jähmettyvät eri aikaan. Kun kuparin pitoisuutta seoksessa lisätään yli 6 %:in, halkeamat eivät enää tuota ongelmia hitsauksessa. AlCu-seosten pääasiallinen käyttökohde on lentokoneteollisuudessa. (Mathers 2002, s.43–44.)

6xxx- sarjan eli AlMgSi seosten lujuusominaisuudet ovat hyvät. Murtolujuus voi olla seoksilla 150–350 MPa. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 55–56.) 6xxx- sarjan seokset sopivat hyvin pursotukseen ja hitsaukseen, sekä ne ovat hyvin anodisoituvia, mikä on tärkeää julkisivurakenteita valmistaessa. Hitsauksessa ja suunnittelussa on huomioitava hitsauslämmön aiheuttama lujuuden menetys hitsissä sekä muutosvyöhykkeellä. 6xxx-sarjan seoksilla kuumahalkeilua esiintyy hitsauksessa, kun hitsataan ilman lisäainetta tai ei tunneta oikeaa lisäainetta. Lisäaineena on syytä käyttää piitä tai magnesiumia sisältäviä lisäaineita (Mathers 2002, s. 44.)

7xxx- sarjan alumiiniseokset eli AlZnMg-seokset voidaan jakaa kahteen ryhmään hitsattavuuden kannalta. Toisen ryhmän seokset omaavat suuren lujuuden ja hyvän hitsattavuuden. 7xxx-sarjan alumiiniseokset, joihin on lisätty kuparia AlZnMgCu omaavat heikon hitsattavuuden, mutta ovat erittäin lujia. Kupari tekee hitsattavuuden heikoksi ison kuumahalkeiluherkkyuden takia. Pääseosaine sinkki mahdollistaa korkean lujuuden, mutta

tuo ongelman 7xxx-sarjan hitsaukseen, koska sinkki on erittäin voimakkaasti oksidoituvaa ja voi tuottaa sen takia liitosvirheitä. (Mathers 2002, s. 45.)

2.2 Alumiinien toimitustilat

Hitsauksia sisältävän alumiinirakenteen materiaalivalinnoissa on syytä huomioida alumiinin toimitustilat. Toimitustila vaikuttaa merkittävästi alumiiniseosten ominaisuuksiin, jonka takia alumiinirakentajan on tärkeä tuntea alumiiniseoksille tehdyt käsittelyt. Toimitustila tarkoittaa alumiiniseoksille tehtyjä muokkauslujituksia ja lämpökäsittelyjä, joiden avulla saavutetaan halutut ominaisuudet alumiiniseoksille. Toimitustilat on jaettu viiteen pääryhmään, jotka erittelevät tarkan toimitustilan. Mikäli tiloille tarvitaan alaluokitusta, merkitään sitä yhdellä tai useammalla numerolla kirjaimen perässä. Alumiiniseosten toimitustilat esitetään standardissa SFS-EN 515:2017 ”Alumiini ja alumiiniseokset. Muokatut tuotteet. Tilojen tunnukset” (SFS-EN 515, 2017 s. 7–15):

- F, valmistustila
- O, Pehmeäsihehkutettu
- H, Muokkauslujitettu
- W, Liuotushehkutettu
- T, Lämpökäsitelty muuhun stabiiliin tilaan

F-tilassa materiaali tulee suoraan valmistusprosessista esimerkiksi taonnasta, kuumavalssauksesta tai se on valettu ja työstämätön. Materiaalin mekaanisille ominaisuuksille tällöin ei aseteta vaatimuksia. (Mathers 2002, s. 38).

O-tilassa materiaali on hehkutettu pehmeäksi, jotta alumiini saavuttaa parhaan mahdollisen muovattavuutensa, jonka seurauksena sen lujuus heikkenee. (SFS-EN 515, 2017 s. 8–9):

- O1, Pehmeäksi hehkutettu ja jäähdytetty hitaasti
- O2, Termomekaanisesti käsitelty
- O3, Homogeenisoitu

H-tila eli materiaali on muokkauslujitettu F- tai O-tilojen jälkeen, jolla saavutetaan haluttu lujuus. H-tilaa käytetään vain ei-lämpökäsiteltäville seoksille. Kirjainta ”H” seuraa

vähintään kaksi numeroa, joista ensimmäinen esittää peruskäsittelyiden yhdistelmää ja toinen muokkauslujittamisasteen (SFS-EN 515, 2017 s. 9):

- H1, Ainoastaan muokkauslujitettu
- H2, Muokkauslujitettu ja osittaishehkutettu
- H3, Muokkauslujitettu ja stabiloitu
- H4, Muokkauslujitettu ja pinnoitettu

W-tila tarkoittaa epästabiilia seosta, jota on liuoshehkutuksen jälkeen luonnollisesti vanhennettu huoneenlämmössä. Lämpökäsittelyn jälkeen voidaan mahdollisesti tehdä kylmämuokaus. Tunnusta W seuraava numero tarkoittaa luonnollisen vanhentamisen aikaa tunteina (Mathers 2002, s. 38).

T-tila tarkoittaa, että materiaali on lämpökäsitelty ja tarvittaessa muokkauslujitettu stabiiliin tilaan. Hitsatuissa rakenteissa käytetään usein muokkauslujitettua tai hehkutettua tilaa. T kirjaimen jälkeen esiintyvät numerot kertovat tehtyjen käsittelyjen järjestyksen. (SFS-EN 515, 2017 s. 9–10):

- T1, Jäähdytetty muokkausprosessista ja luonnollisesti vanhennettu stabiiliin tilaan
- T2, Jäähdytetty, kylmämuokattu ja luonnollisesti vanhennettu
- T3, Liuotushehkutettu, kylmämuokattu ja luonnollisesti vanhennettu stabiiliin tilaan.
- T4, Liuotushehkutettu ja luonnollisesti vanhennettu.
- T5, Jäähdytetty ja keinovanhennettu.
- T6, Liuotushehkutettu ja keinovanhennettu.
- T7, Liuotushehkutettu ja ylivanhennettu.
- T8, Liuotushehkutettu, kylmämuokattu ja keinovanhennettu.
- T9, Liuotushehkutettu, keinovanhennettu ja kylmämuokattu.
- T10, Jäähdytetty, kylmämuokattu ja keinovanhennettu

Lisämerkkejä T-toimitustilassa voidaan käyttää ilmaisemaan materiaalin ominaisuuksiin vaikuttavista käsittelyistä. Materiaalia muokattaessa seokseen voi syntyä jännityksiä, jotka voidaan poistaa kuumamuokkauksella tai lämpökäsittelyllä. (Mathers 2002, s. 39).

3. Alumiinien materiaaliominaisuudet hitsauksessa

Hitsauksen ideaalinen tarkoitus on suorittaa kahden tai useamman kappaleen liittäminen niin, että hitsiaineen, muutosvyöhykkeen (HAZ) ja perusaineen ominaisuudet pysyisivät samanlaisina. Alumiinin ja sen seosten hitsauksessa tämän ideaalitilanteen saavuttaminen voi olla haastavaa, johtuen alumiinin omista materiaaliominaisuuksista. Alumiinien hitsauksessa täytyy tuntea alumiinin erityisominaisuudet hitsauksen kannalta, joita ovat alumiinin alhainen sulamispiste verrattuna oksidikalvoon, lämpölaajeneminen, lämmönjohtokyky ja hitsauksen aiheuttama lujuuden menetys. Näiden seurauksesta alumiini on altis erillisille hitsausvirheille kuten oksidisulkeumille, vety- ja kaasuhuokosille, kuumahalkeamille ja lujuuden heikkenemiselle hitsissä ja muutosvyöhykkeellä. Metallurgisten ominaisuuksien lisäksi alumiinin hitsauksessa on syytä huomioida hitsauksen esivalmistelut sekä hitsausympäristö. (Mathers 2002, s. 10).

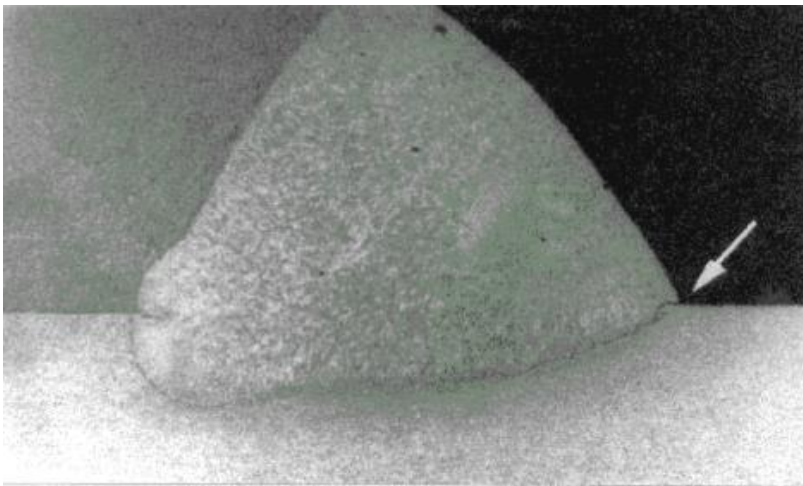
3.1 Hapettuminen ja korroosio

Alumiinin pintaan muodostuu automaattisesti ohut tyypillisesti 2–5 nm paksu oksidikalvo Al_2O_3 , joka suojaa alumiinia hyvin korroosion vaikutuksilta. Kun oksidikerros rikkoutuu mekaanisesti, siihen muodostuu sekunneissa uusi kerros. Aluksi kerroksen paksuus on 1 nm, mutta nopeasti viikkojen kuluessa se saavuttaa tyypillisen paksuutensa. Kosteissa olosuhteissa oksidikalvo kertyy takaisin nopeammin sekä paksummaksi kuin kuivassa ympäristössä. Anodisoinnilla voidaan kasvattaa luonnollista oksidikalvoa alumiinin pinnalla käyttötilanteen vaatimusten mukaan 10–25 μm . (Huhtaniemi et al. 2002, s. 98–100)

Oksidikalvo omaa hyvin erilaiset ominaisuudet kuin alumiini, jonka takia oksidikalvolla on suuri vaikutus alumiinin hitsauksessa. Oksidikalvo on erittäin kova ja sitkeä. Oksidikalvon sulamispiste 2050 °C on huomattavasti korkeampi verrattuna alumiinin sulamispisteeseen, joka on 660 °C. Korkean sulamispisteen seurauksena oksidikalvo ei sula hitsauksen aikana, jos kalvoa rikkovaa toimintoa ei käytetä. Oksidikalvo vaikeuttaa huomattavasti hitsauslisäaineen kulkeutumista ja hitsisulan liittymistä perusaineeseen. Itse oksidikalvo on hygroσκοoppinen, jonka takia se imee itseensä kosteutta ja tämä vapautuu hitsiin

hitsauksessa. Vety voi muodostaa hitsissä vetyhalkeilua ja heikentää huomattavasti hitsin laatua. (Lukkari 2001, s. 99–100)

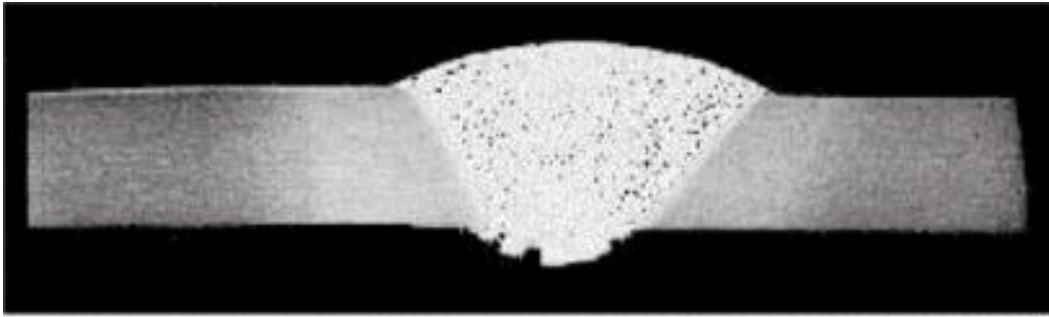
Alumiinin hitsauksessa vallitsee käsitys, että oksidikerros tulisi poistaa ennen hitsausta. Poistaminen voidaan suorittaa mekaanisesti tai kemiallisesti. Ilman oksidikalvon kunnollista poistamista voi hitsiin muodostua oksidisulkeumia. (Çam et al. 2016 s. 2.) Oksidisulkeumilla tarkoitetaan hitsisulaan jääneitä oksidihiukkasia, jotka painuvat sulan pohjalle, johtuen suuremmasta tiheydestä. Oksidisulkeuma on esitetty kuvassa 1. Oksidihiukkasten tiheys on suurempi kuin alumiinin, joten hiukkaset luontaisesti painuvat syvemmälle hitsisulaan, joka vaikeuttaa niiden poistumista hitsisulasta. (Mathers 2002, s. 23). Oksidisulkeumat ovat hitsausvirheitä, jotka heikentävät merkittävästi hitsin lujuutta, kestävyyttä ja ulkonäköä. Sulkeumien estämiseksi on tärkeää suorittaa oksidikalvon poistaminen huolellisesti ja taata suojakaasun virtauksen riittävyys. (Lukkari 2001, s. 232–233)



Kuva 1. Oksidisulkeuma hitsin ja perusaineen välissä (Mathers 2002, s. 23).

3.2 Huokoisuus

Hitsauksessa huokokset ovat suuri ongelma, koska ne heikentävät merkittävästi hitsin ominaisuuksia. Huokokset (kuva 2) eivät kuitenkaan merkittävästi heikennä hitsin lujuutta, mutta radiografisessa tarkastuksessa ne ovat hitsausvirheitä ja johtavat vaatimusten mukaisiin korjauksiin. (Lukkari 2001, s. 66).



Kuva 2. Hienojakoista huokoisuutta hitsin poikkileikkauksessa (Mathers 2002, s. 19).

Nestemäisessä tilassa alumiiniseoksilla on erittäin suuri vedyn liukoisuus. Jos hitsisula absorboi vetyä nestemäisessä tilassa, ja se ei ehdi poistua hitsisulasta ennen metallin jähmettymistä, muodostaa se huokosia hitsiin. Vedyn liukenemiseen alumiiniin vaikuttaa usea tekijä. Usein vety liukenee alumiinin oksidikalvon kautta. Muita syitä voivat olla hitsauslisäaineen mukana kulkeutuva vety, epäpuhdas suojakaasu, railopintojen likaisuus, liian suuri lämmöntuonti ja hitsattava alumiiniseos. (Mathers 2002, s.19–20.) Lisäksi vetyhuokoisuutta voidaan vähentää tehokkaasti käyttämällä pienempää lämmöntuontia, jolloin hitsin nopeamman jäähtymisen seurauksesta hitsiin ei ehdi kertyä vetyä. (Çam et al. 2016 s. 4).

3.3 Sähkön- ja lämmönjohtavuus

Alumiinin matala sulamispiste vaikuttaa pienentävästi hitsauksessa tarvittavaan lämmöntuontiin. Lämmönjohtavuus on kuitenkin alumiinissa neljä kertaa suurempaa kuin teräksillä, jolloin lämpö johtuu hitsin alueelta nopeammin ympäristöön. (Çam et al. 2016 s. 2). Liitosvirheiden riski lisääntyy, koska hitsauslämmön poisjohtumisen seurauksena ei välttämättä saavuteta tarvittavaa sulatunkeumaa tai hitsautumissyvyttä. Alumiinin hitsauksessa tarvitaan suurta lyhytkestoista lämpöenergiaa, jotta perusaine saadaan sulaksi kohdennetulta alueelta. Paksujen alumiinien hitsauksessa voidaan joutua käyttämään esikuumennusta, joka rajoittaa lämmönjohtumista pois hitsistä ympäristöön. Suuri lämmönjohtavuus edistää kuitenkin alumiinin jähmettymistä, jolloin sula alumiini jähmettyy nopeammin. (Lukkari 2001, s. 58–59)

Alumiinin korkea sähkönjohtavuus vaikuttaa etenkin alumiinin vastuspistehitsaukseen. Kolminkertainen sähkönjohtavuus verrattuna teräkseen vaatii huomattavasti suuremman

hitsausvirran ja laitteiston vastuspistehitsauksessa. (Çam et al. 2016 s. 3). MIG-hitsauksessa vapaalangan pituudella ei ole suurta vaikutusta hitsausvirta-arvoihin. (Lukkari 2001, s. 59).

3.4 Lämpölaajenemiskerroin

Alumiinin kaksinkertainen lämpölaajenemiskerroin verrattuna teräkseen vaikeuttaa merkittävästi alumiiniseosten hitsattavuutta. Hitsauksessa lämmöntuonti olisi pidettävä mahdollisimman matalana, jotta vältytään mahdollisimman paljon ei halutuilta muodonmuutoksilta. (Lukkari, 2001, s.74). Epätasainen alumiiniseosten sulaminen ja jähmettyminen aiheuttavat materiaalille sisäisiä jännityksiä liitosalueelle. Alumiini kutistuu 6 % sulasta tilasta jähmettyessään kiinteäksi, mikä voi aiheuttaa kraaterihalkeamia hitsin lopetukseen (kuva 3). Jotta mahdolliset kraaterihalkeamat voidaan estää, täytyy hitsi lopettaa oikealla tavalla. Lopetus voidaan toteuttaa käyttämällä erillistä lopetuspalaa tai käyttäen kraaterintäyttöautomaattia, joka estää hitsin valumisen sekä kraaterihalkeaman synnyn. (Lukkari 2001, s. 231).



Kuva 3. Kraaterihalkeamia hitsin päätössä, sekä halkeamia hitsin keskellä (Esabna 2022).

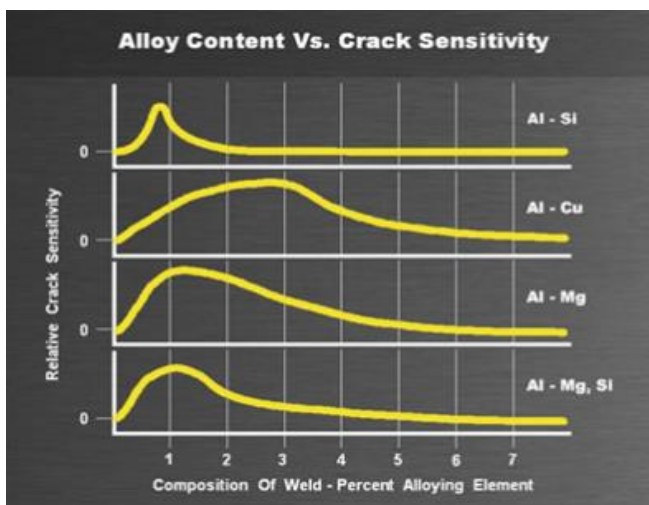
Muodonmuutosten merkitys riippuu ainevahvuudesta, käytettävästä hitsausprosessista, railomuodosta ja lämmöntuonnista. Muodonmuutokset pitää huomioida jo alumiinirakenteen suunnitteluvaiheessa miettien hitsausjärjestyksiä, silloituksia ja kiinnityksiä. Kutistumille tulee mitoittaa reilut kutistumisvarat kaikkiin rakenneosiin. Hitsausmuodonmuutokset luokitellaan hitsausvirheiksi, minkä takia niitä tulee välttää.

Muodonmuutoksien hallitsemiseksi on alumiinin hitsauksessa erilaisia neuvoja (Lukkari 2001, s.223):

- Railojen sovitus huolella ja välttä suuria railotilavuuksia
- Vapaan kutistumisen mahdollistaminen
- Käytä mahdollisimman suurta hitsausnopeutta tai nopeinta hitsausprosessia
- Käytä mahdollisimman vähän palkoja
- Poikittaishitsit ennen pitkittäishitsejä
- Esitaivutus

3.5 Muut ominaisuudet

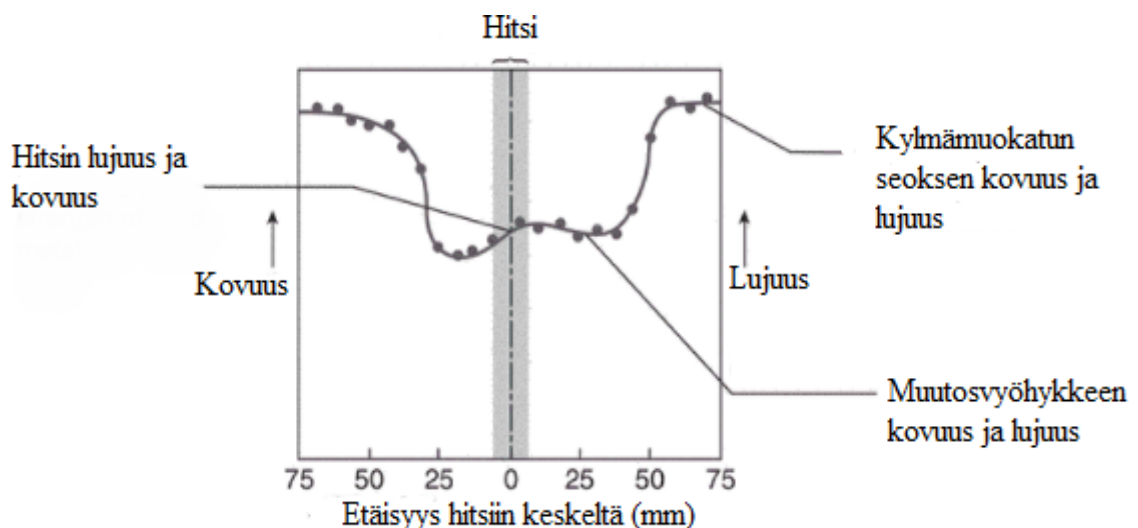
Alumiinin seokset ovat hitsauksessa herkkiä halkeiluille, joita ovat usein kuumahalkeamat. Ensisijaisesti kuumahalkeamien esiintymiseen vaikuttaa seostyyppi. Kuvassa 4 on esitelty seosaineiden taipumus kuumahalkeilulle. Kun lisätään pieniä määriä seosaineita, herkkyys halkeamille kasvaa, mutta maksimin jälkeen halkeilutaipumus palaa alhaiselle tasolle. Halkeiluerkkyyskäyrät ovat hyvä työkalu ymmärtämään, missä seosaineen pitoisuudessa materiaalilla on taipumusta kuumahalkeilulle. Halkeiluerkkyys on suurinta Si-, Cu- ja Mg-seosteilla alumiineilla. (Esabna 2022). Kuumahalkeiluerkkyttä voidaan pienentää oikealla lisäainevalinnalla, sekä pienentämällä rakenteeseen kohdistuvia jännityksiä. (Lukkari 2001, s. 61–62.)



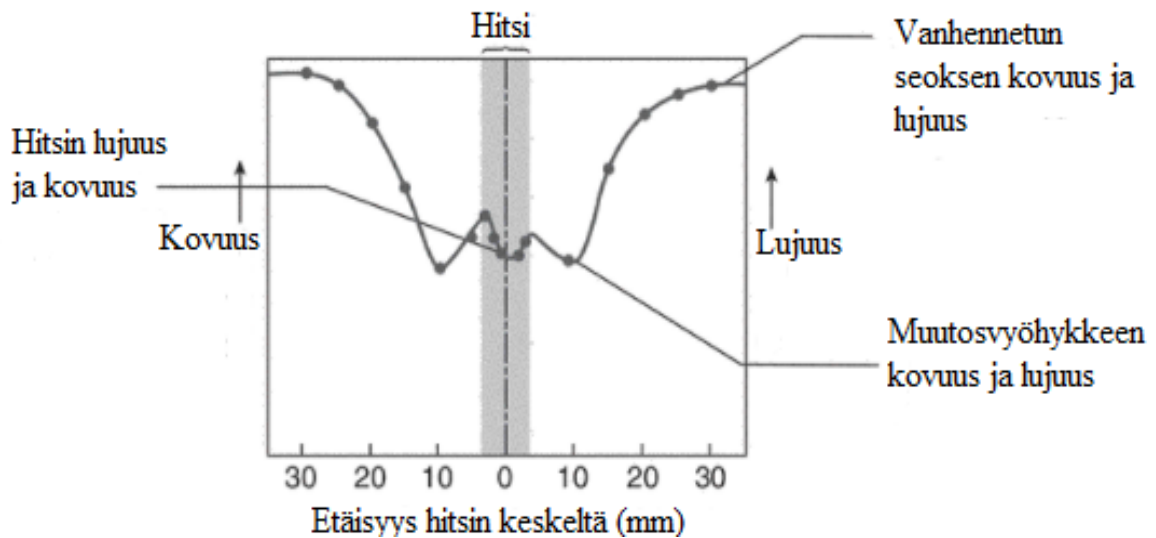
Kuva 4. Alumiiniseosten halkeiluerkkyys suhteutettuna seospitoisuuteen (Esabna 2022).

Hitsatessa alumiiniseoksia perusaineessa tapahtuu ominaisuusmuutoksia, jonka seurauksena perusaine menettää lujuus- ja sitkeysominaisuuksiaan. Lujuuden lasku perustuu alumiinien pehmenemiseen lämpötilan noustessa, jolloin kylmämuokkauksella tai lämpökäsittelyllä saadut lujuusominaisuudet häviävät. Lujuusominaisuuksien menetyksen takia hitsit olisi hyvä sijoittaa kohtiin, joissa rasitukset eivät ole suuria. Lujuusominaisuudet tippuvat kylmämuokattavilla ja lämpömuokattavilla seoksilla saman suuntaisesti, vaikka ne johtuvat hieman eri syistä. (Lukkari 2001, s. 67–68).

Kylmämuokattavilla seoksilla lujuuden menetys johtuu rekristallisaatiosta muutosvyöhykkeellä. Rekristallisaatioon alumiinin kiderakenne uusiutuu uusien kiteiden ydintymisen ja kasvun kautta. Rekristallisaatio alkaa muutosvyöhykkeellä, kun lämpötila ylittää 200 °C. Kylmämuokattavilla seoksilla menetettyä lujuutta ei voi palauttaa. Kuvassa 5 on esitetty 5xxx-sarjan seoksen lujuuden ja kovuuden menetys. Lämpökäsiteltävillä seoksilla lujuuden menetys perustuu erkaumien kasvuun tai ylivanhenemiseen. Menetetyn lujuuden palauttaminen on teoriassa mahdollista tehdä lämpökäsiteltävillä seoksilla uusimalla lämpökäsittelyt hitsauksen jälkeen. Jotkut seokset voivat lujittua myös itsestään vanhenemalla. (Mathers 2002, s.31–34.) Kuvassa 6 on esitetty 6xxx-sarjan seoksen hitsauksen aiheuttaman lämmöntuonnin lujuuden ja kovuuden menetys.



Kuva 5. TIG-hitsauksen vaikutus lujuuteen ja kovuuteen 5xxx-sarjan seoksella (mukailien Mathers 2002, s. 33).



Kuva 6. TIG-hitsauksen vaikutus lujuuteen ja kovuuteen 6xxx-sarjan seoksella (mukaan Mathers 2002, s.34).

3.6 Alumiinin hitsauksen esivalmistelut

Tärkeässä osassa alumiinin hitsauksessa on hitsauksen esivalmistelu, jossa on huomioitava hitsausrailot, juurituet ja oksidikerroksen puhdistus. Hitsausrailon valmistuksessa käytetään plasma-, vesi-, mekaanista- tai laserleikkausta. Polttoleikkaus ei sovellu hitsausrailojen valmistukseen alumiineille. Railokulmat tulisi koneistaa lastuamalla, jotta saavutetaan paras mahdollinen railopinta. Alumiinien TIG- ja MIG- hitsauksessa usein käytetyt railomuodot ovat I- ja V-railo. (Mathers 2002, s. 52–64). Alumiinien hitsauksen railomuodot ovat standardisoitu ja railomuodot löytyvät standardissa SFS-EN ISO 9692-3:2016 ”Hitsaus ja sen lähiprosessit. Railomuodot. Osa 3: Alumiinin ja alumiiniseosten MIG- ja TIG- hitsaus”. (SFS-EN ISO 9692-3, 2016 s. 6.)

Sulan alumiinin suuren viskositeetin takia suurilla energioilla hitsatessa käytetään juuritukia. Juurituella pystytään hallitsemaan halutun hitsinjuuren syntymistä. Yleisesti juurituet ovat irrallisia, jotka ovat poistettavissa käytön jälkeen tai pysyviä, jotka ovat suunniteltu jäävän osaksi rakennetta. Irralliset juurituet valmistetaan alumiinista, kuparista, ruostumattomasta teräksestä tai keraamista. Pysyvät juurituet ovat perusaineen kaltaisia alumiineja tai profiileja, jossa juurituki on valmiina. (Lukkari 2001, s. 216–217.)

Alumiinin pinnalla oleviin epäpuhtauksiin tulee kiinnittää huomiota ja ne täytyy poistaa ennen hitsauksen aloittamista. Hitsausriloissa ei saa olla rasvaa tai öljyä. Oksidikalvon poistamiseksi voidaan käyttää ruostumattomasta teräksestä valmistettua harjaa tai sille erikseen tarkoitettua kemikaalista puhdistusta. Epäpuhtauksilta pystytään välttymään, kun toimitaan ainoastaan alumiinin hitsaukseen tarkoitetuissa tuotantotiloissa, jossa työtasot ovat päällystetty ruostumattomalla teräksellä ja käytetyt jigat ovat alumiinia. Hitsaushallin tilojen on hyvä olla puhtaat, jolloin alumiini ei ole altis epäpuhtauksille kuten teräspölylle, betonipölylle tai kosteudelle. (Lukkari 2001, s. 217.)

4. Hitsausaineet

Tässä kappaleessa selvitetään alumiinien hitsauksessa käytettäviä hitsausaineita. Hitsausaineet ovat yleisnimitys hitsauksessa tarvittaville lisäaineille ja apuaineille. Lisäaineet ovat hitsiin tuotavia aineita, joita ovat erilaiset hitsauslangat ja hitsauspuikot. Lisäaineiden tarkoituksena on tuottaa hitsiainetta railoon. Hitsauksessa käytettävät apuaineet ovat usein kaasuja tai hitsausjauheita. Apuaine ei varsinaisesti tuota railoon hitsiainetta, vaan usein kemiallisen reaktion kautta vaikuttaa hitsin ominaisuuksiin. (Lukkari 2001, s. 178).

4.1 Lisäaineet

Lisäaineen valinta alumiinien hitsauksessa on tärkeässä osassa hyvän lopputuloksen saavuttamisessa. Lisäaineiden valintaan vaikuttavat hitsiaineen eli lisäaineen ja perusaineen koostumuksen sopivuus (kuumahalkeilutaipumus), lujuus- ja sitkeysvaatimukset liitokselle, rakenteen käyttölämpötila sekä lisäaineen ominaisuudet. (Lukkari 2001, s. 182).

Lisäaineet alumiinien hitsaukseen luokitellaan standardissa SFS-EN ISO 18273. Luokittelu on jaettu kahteen osaan, jossa ensimmäinen osa ilmaisee tuotemuodon. Tuotemuotoja ovat umpilanka tai sauva. Toinen osa kertoo lisäaineen kemiallisen koostumuksen. Hitsauslisäaine voidaan standardin mukaan muodostaa kahdella tavalla, joka voi olla numeerinen tai kemiallinen merkintä. Esimerkki esitetty standardista. (SFS-EN ISO 18273, 2015, s.13):

- Numeerinen: S Al 4043
- Kemiallinen: S AlSi5

Hitsauslisäaineen valintaan on kehitelty valmistajien toimesta valintakaavioita. Kuvassa 7 esitellään erään valmistajan hitsauslisäaineen valintakaavio kemiallisella merkinnällä.

Perus- aine 1	Perus- aine 1 EN AW	Seostyyppi ja OK Autrod/Tigrod							
Al 99,7	1070A	Al99,7							
Al 99,5	1050A	Al99,5 Ti	Al99,5 Ti						
Al 99	1200	Al99,5	Al99,5						
AlMn1	3103	Al99,5 Ti AlMn1	Al99,5Ti AlMn1	AlMn1					
AlMg3	5754	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg3 AlMg5				
AlMg5	5019	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg3 AlMg5	AlMg5			
AlMg4,5 Mn0,7	5083	AlMg5	AlMg5	AlMg5 AlMg3	AlMg5 AlMg3	AlMg5	AlMg4,5Mn		
AlMgSi0,5	6060	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg5	
AlMgSi1	6082	AlSi5	AlSi5					AlSi5	
AlMg1SiCu	6061								
AlZn4,5Mg1	7020	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg5	AlMg4,5Mn	AlMg5	AlMg5
Perus- aine 2		Al99,8 Al99,7	Al99,5 Al99,5	AlMn1	AlMg3	AlMg5	AlMg4,5Mn0,7	AlMgSi0,5 AlMgSi1 AlMg1SiCu	AlZn4,5Mg1

Kuva 7. Lisäaineen valintakaavio (ESAB 2017, s. 487).

Yleisellä tasolla lisäaineen valinta voidaan jakaa kahteen kategoriaan. Kylmämuokattavien seosten hitsauksessa käytetään perusaineen kaltaista lisäainetta. Lämpömuokattavien seosten hitsauksessa käytetään usein AlMg5 eli 5356 ja AlSi5 eli 4043 lisäainetta. AlSi5 lisäaineella hitsatessa hitsistä tulee murtolujuudeltaan puhdasta hitsiainetta lujempi ja sitkeämpi. AlMg5 ja AlMg4,5Mn lisäaineilla hitsatessa saavutetaan paremmat lujuus- ja kovuusominaisuudet kuin AlSi5 hitsatessa. Mg-seosteisilla lisäaineilla muodostuu Mg:n palamisesta nopea hitsin pintaan. Noen muodostumista pystytään estämään käyttämällä riittävää suojakaasun virtausta, oikeita parametrejä ja käyttämällä pulssiohjelmaa. (Lukkari 2001, s.182–185.)

4.2 Suojakaasut

Suojakaasun tarkoituksena kaarikaasuhitsausprosessissa on suojata hitsausprosessi sekä estää kuumen elektrodin hapettuminen TIG-, ja plasmahitsauksessa. Suojakaasut vaikuttavat myös hitsin tiiveyteen, hitsausnopeuteen, hitsisulan juoksevuuuteen, sulatunkeumaan, ja oksidinkalvon puhdistuskykyyn. (Lukkari 2001, s.196.)

Alumiinien hitsauksessa käytetään vain inerttiä suojakaasua. Inertillä kaasulla tarkoitetaan, että kaasu ei reagoi kemiallisesti sulan kanssa. Pääasiallisesti käytetyt suojakaasut ovat argon

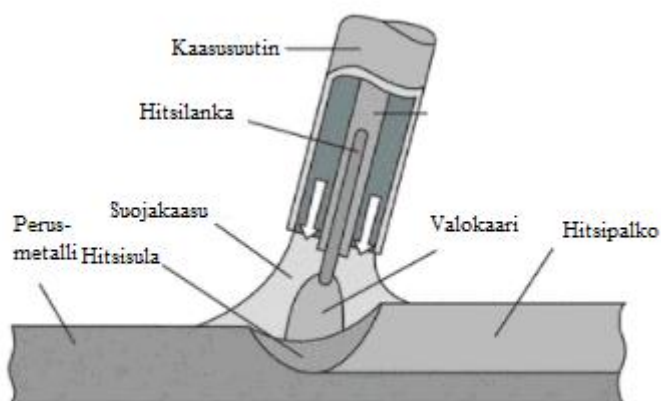
(Ar) ja helium (He), johtuen näiden kaasujen tarjoamasta helposta ja kohtuuhintaisesta saatavuudesta verrattuna neoniin (Ne), kryptoniin (Kr) ja ksenoniin (Xe). Yleisin suojakaasu on argon, jota voidaan seostaa heliumilla. Heliumin käyttöä on syytä harkita, kun hitsataan yli 10 mm ainepaksuuksia. Helium nostaa kaarijännitettä, joka kasvattaa kaaritehoa. Kaaritehon lisääminen parantaa tehokkuutta hitsausprosessissa, vähentää esikuumennuksen tarvetta ja suurentaa täten sulatunkeumaa ja sulamissyvyyttä. Joihinkin suojakaasuihin voidaan lisätä pieniä määriä happea, typpeä ja typpimonoksidia, joiden avulla pyritään parantamaan hitsin ulkonäköä, vakavoittamaan valokaarta sekä estämään roiskeiden syntyä. (Lukkari 2001, s.197–198, 203.)

5. Alumiinien hitsausprosessit

Alumiinin hitsauksessa käytetään monia eri hitsausprosesseja. Merkittävimpinä alumiinin hitsausprosesseina voidaan pitää kaasukaarihitsausprosesseja, jotka ovat hallinneet alumiininhitsausta 1940-luvulta alkaen. Prosessin valinta riippuu usein hitsattavasta ainepaksuudesta, liitosmuodosta, hitsausnopeudesta, hitsien mekaanisista ominaisuuksista sekä käyttö- ja investointikustannuksista. (Lukkari 2001, s. 98.) Tässä luvussa esitellään valta-asemassa olevat hitsausprosessit ja niiden prosessikuvaus.

5.1 MIG-hitsaus

MIG-hitsaus (Metal Inert Gas) on kaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa hitsauslangan ja perusaineen välillä suojaavan suojakaasun ympärillä. Hitsausvirta synnytetään virtalähteen avulla ja se syötetään virtajohdinta pitkin hitsauspistooliin, josta se siirtyy hitsauslankaan. Valokaari sulattaa perusaineen ja hitsauslangan muodostaen hitsisulan. Samanaikaisesti langansyöttölaite työntää hitsauslankaa hitsauksen aikana hitsisulaan. Suuri lisäainelangan syöttönopeus tekee MIG-hitsauksesta erittäin tehokkaan prosessin. MIG-hitsausprosessi on kuvattu kuvassa 8. (Weman 2011 s. 76–83).



Kuva 8. MIG-hitsauksen prosessiperiaate (mukaiillen, Mathers 2002, s. 117).

Alumiinin MIG-hitsauksessa käytetään tasavirtaa, jolloin elektrodi on plus-navassa. Tällöin oksidikalvon puhdistuskyky on hyvä. (Lukkari 2001, s. 121.) Alumiinin MIG-hitsauksessa käytetään myös pulssikaarta, jolloin savutetaan roiskeeton ja tasainen hitsin laatu.

Hitsausvirtaa pulssitetaan, jolloin perusvirran päälle syötetään virtapulsseja korkealla taajuudella. Tätä prosessia kutsutaan pulssi-MIG-hitsaukseksi. Se soveltuu erittäin hyvin ohuille, 1 mm:stä alkaville ainepaksuuksille. Pulssi-MIG on syrjäyttänyt TIG-hitsausta ohuiden alumiinien hitsauksessa. (Lukkari, 2001, s. 121, 130; Weman 2011, s. 86–87.) Pulssi-MIG avulla pystytään vähentämään lämmöntuontia, jolloin hitsin lujuus paranee ja muutosvyöhykkeellä tapahtuvaa lujuuden heikkenemistä ei kylmämuokattavilla seoksilla merkittävästi tapahdu. Tosin pulssi-ohjelman seurauksesta hitsausnopeus laskee. (Hadadzadeh et al. 2017, s. 9–10.)

MIG-hitsauksessa sulatustehoa ja tuottavuutta voidaan parantaa erilaisilla MIG-hitsausten kehitysversioilla. Kehitysversioita on suurenergia-MIG-hitsaus, Tandem-MIG-hitsaus, lyhytkaarhitsaus ja AC-MIG-hitsaus. Suurenergia-MIG-hitsauksessa hitsausvirta voi olla 1000A ja langanpaksuus 6 mm. Prosessi on erittäin tehokas paksujen alumiinien hitsaamiseen, jossa 60 mm liitospaksuus voidaan täyttää kahdella palolla. Tandem-MIG-hitsauksessa käytetään kahta eri hitsauslankaa samanaikaisesti, joiden avulla molemmille langoille voidaan säätää omat parametrit. Tandem-MIG-hitsauksen etuna on pienahitsaus ja päällekkäishitsien hitsaus hyvin suurella nopeudella. (Lukkari 2001, s. 132–136.)

5.2 TIG-hitsaus

TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas) on kaasukaarihitsausprosessi, jossa työkappaleen ja sulamattoman wolframielektrodin välillä valokaari palaa suojakaasun ympäröimänä. TIG-hitsausta voidaan suorittaa lisäaineen kanssa tai ilman. Lisäaine tuodaan käsin hitsisulaan edestäpäin hitsauksessa. Isoin ero muihin kaarihitsausprosesseihin on sulamaton elektrodi, joka on valmistettu wolframista. (Weman 2011, s. 63–66.) TIG-hitsausta käytetään paljon alumiinin hitsauksessa, koska hitsausprosessilla pystytään hallitsemaan erittäin hyvin sulatunkeumaa, johtuen erotetuista valokaaresta ja lisäaineen tuonnista. TIG-hitsauksella myös saavutetaan paremmat tulokset ulkonäöllisesti verrattuna muihin kaarihitsausprosesseihin. Johtuen manuaalisesta langan syötöstä TIG-hitsauksen tuottavuus on heikompi kuin MIG tai plasmahitsauksella. (Weman 2011, s. 63–66.)

Toisin kuin alumiinin MIG-hitsauksessa, alumiinien TIG-hitsauksessa käytetään lähes aina vaihtovirtaa. Hitsausvirran positiivisen puolijakson aikana saadaan aikaan riittävä

oksidikalvon puhdistus, mutta samaan aikaan elektrodi kuumenee. Kun elektrodi on miinusnavassa, valokaarella saavutetaan suurin tunkeuma ja samalla elektrodi jäähtyy. Liiallinen elektrodin kuumeneminen hapettaa sitä ja lyhentää sen käyttöikää. Nykyaikaisissa virtalähteissä on mahdollista käyttää perinteisen sinimuotoisen hitsausvirta-aallon sijasta kanttiaaltoa. Kanttiaallolla virran suunnanvaihto on terävä, jolloin virta pysyy huippuarvossaan pidempään. Kanttiaallolla pysytyttään saavuttamaan parempi valokaaren tasaisuus, hitsausnopeus ja tunkeuma. (Lukkari 2001, s.103–105.)

TIG-hitsauksessa on kehitetty TIP TIG menetelmä, jossa lisäaine syötetään hitsisulaan lankana. TIP TIG-hitsauksessa lankaan aiheutetaan edestakaista liikettä. Tällä liikkeellä saadaan hitsisulaan kineettistä energiaa, joka kolminkertaistaa hitsausnopeuden. TIP TIG tarjoaa MIG-hitsauksen tuottavuuden ja TIG-hitsauksen korkean laadun. TIP TIG:n käyttö on helppoa ja se tulee lisääntymään ohutlevysovelluksissa, joissa MIG/MAG-hitsauksella ei saavuteta tarvittuja laatuvaatimuksia. (Wilson 2007, s. 462–463.)

5.3 Laser-sovellukset

Laserhitsaus on merkittävä prosessi alumiinien hitsauksessa, jossa fokusoidulla lasersäteellä sulatetaan hitsattavat pinnat yhteen. Lasersäde muodostetaan CO₂-, Nd:YAG-, diodi- tai kuitulaserlähteen avulla. Laserhitsaus voidaan suorittaa monella tavalla, mutta teollisuudessa suoritettua laserhitsauksesta avaimenreikähitsaus on käytetyin. Avaimenreikähitsauksessa kohdistetaan suuri tehotiheys pienelle alueelle, jolloin perusmateriaalia sublimoituu suoraan höyryksi ja ympäröivä materiaali sulaa. Tällöin saadaan erittäin kapea ja läpäisevä hitsi. Laserhitsauksen etuja alumiinin hitsauksessa ovat tarkkuus, nopeus, vähäinen lämmöntuonti ja laatu. Laserhitsaus on usein mekanisoitua tai robotisoitua hitsausta, jolloin saavutetaan sen maksimaallinen tehokkuus. (Katayama, S, 2013, s. 3–6.)

Kuitenkin alumiinin ominaisuudet tuovat vielä ongelmia, jotka vaikeuttavat alumiinin laserhitsausta. Alumiinin laserhitsauksessa tulee huomioida alumiinin suuri lämmönjohtavuus, jolloin vaaditaan enemmän tehoa hitsausprosessiin. Myös jokaisella alumiinin seosaineella on eri vaikutus lämmönjohtavuuteen, jotka pitää huomioida laserhitsauksessa. Alumiinin heijastavuus vaikeuttaa lasersäteen absorptiota, jolloin alumiini

tarvitsee tarpeeksi pienen aallonpituuden absorboituakseen. Pinnankäsittelyillä, kuten hiekkapuhalluksella, pystytään parantamaan pinnan absorptiokykyä. Laserhitsauslaitteisto on usein myös hyvin kallis investointi. (Sánchez-Amaya et al. 2013, s. 215–218.)

Laserhitsauksella on viimevuosina kyetty kilpailemaan myös käsihitsauksessa MIG- ja TIG-hitsausta vastaan. Käsilaserhitsauksen periaate on sama kuin normaalissa kaarihitsausprosessissa (Kuva 9.). Käsilaserhitsaus on neljä kertaa nopeampi kuin normaali kaarihitsausprosessi. Prosessi koetaan olevan helppokäyttöinen ja nopeasti opittava. Alumiinilla suositellut hitsausliitoksen paksuudet ovat 4 mm asti. Käsilaserhitsauksessa tarvitaan erillinen suojaruste lasersäteille, kuten lasersuojalasit ja erillinen lasertyöpiste, joita normaalissa kaarihitsausprosessissa ei tarvita. (Sprovieri, 2021, s.14–15.)

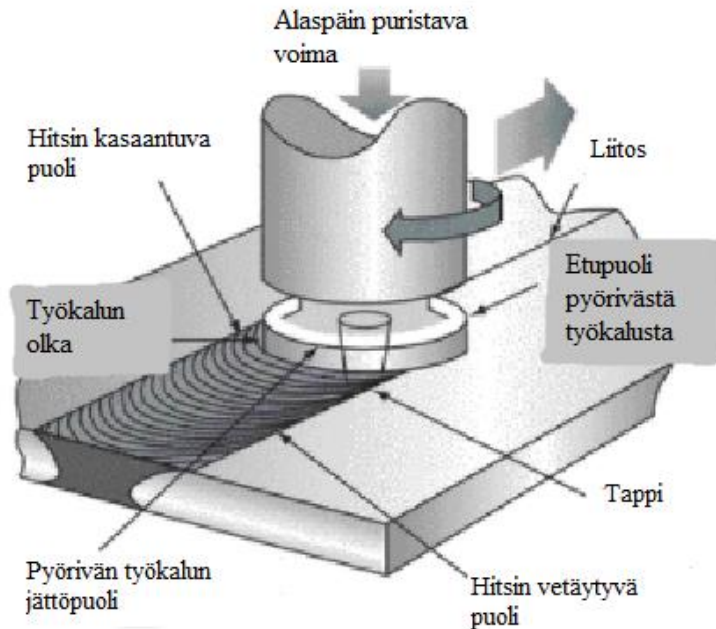


Kuva 9. Käsilaserhitsausta (Sprovieri, J, 2021, s.14).

5.4 Friction Stir Welding (FSW)

Friction Stir Welding eli kitkahitsausta pyörivän työkalun avulla on 1990-luvun alussa kehitelty liittämismenetelmä, jossa metallia kuumennetaan pyörivän lieriömäisen työkalun avulla liitettävien levyjen välissä. FSW on kiinteän tilan hitsausprosessi eli materiaalin lämpötila pysyy alle sulamispisteen. Alumiinin kaarihitsauksessa normaalisti esiintyvät

ongelmat, kuten huokoisuus, kutistumis- ja kuumahalkeamilta pystytään välttymään FSW prosessilla. (Mubiayi et al. 2019, s. 4.) Kuvassa 10 on esitelty FSW:n periaatte.



Kuva 10. FSW prosessiperiaate (mukaiillen, Mathers, 2002 s.163).

FSW oleelliset erot ja edut kaarihitsaukseen ovat: (Besharati Givi et al. 2014, s. 14)

- Kiinteän tilan hitsaus
- Ei tarvitse suojakaasua
- Oksidikalvoa ei tarvitse poistaa
- Vaikeasti hitsattavien seosten liittäminen, 2xxx- ja 7xxx sarjat
- Energiatehokas
- Hitsin hyvät mekaaniset ominaisuudet
- Helppo rillonvalmistus, I-railo

FSW haittapuolet ovat: (Besharati Givi et al. 2014, s. 14):

- Työkalun ulostuloreikä, täytyy korjaushitsata TIG tai MIG-prosessilla
- Vaatii suuren alaspäin suuntautuvan voiman
- Kappaleet tarvitsevat lujan kiinnityksen
- Levyjen on aina oltava saman paksuisia

6. Hitsauskokeet

Tässä luvussa tarkastellaan hitsauskokeita. Hitsauskokeissa hitsattiin kaksi koekappaletta EN AW-6083 ja EN AW-6082 päittäisliitoksia sekä neljä koekappaletta EN AW-5083 ja EN AW-6082 päittäisliitoksia. Kaikkien koekappaleiden ainepaksuus oli 6 mm. Hitsauskoematriisi, jossa esitetään liitosten materiaaliparit ja käytetyt hitsausparametrivaihtoehdot, on nähtävissä taulukossa 1.

Hitsauskokeiden tavoitteena oli selvittää, miten eri perusmateriaali, hitsauslisäaine ja hitsauksen lämmöntuonti vaikuttavat hitsin ominaisuuksiin ja verrata näitä tuloksia kirjallisuudesta löytyviin lähteisiin. Hitsatuista koekappaleista valmistettiin vetokoesauvat sekä makrohieet, joille tehtiin Vickers-kovuusmittauskokeet. Alumiinin hitsauskokeet suoritettiin Lappeenrannan-Lahden Teknillisen Yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa. Hitsausprosessina oli MIG-hitsaus, joka helpon robotisoidavuuden takia soveltui kokeiden hitsausprosessiksi. Hitsaus suoritettiin Motoman EA1900N -hitsausrobotilla. Hitsausvirtalähteenä toimi Kemppi A7. Hitsauksen koejärjestely on esitelty kuvassa 11.



Kuva 11. Hitsauksen koejärjestely, Motoman EA1900N-hitsausrobotti, koekappaleen alla juurituki.

EN AW-5083 eli AlMg4,5Mn alumiiniseosta käytetään usein hitsatuissa rakenteissa helpon hitsattavuuden ja työstettävyyden ansiosta. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 57). EN AW-6082 eli AlSi1MgMn omaa hyvän lujuuden, jonka takia sitä käytetään lujuutta vaativissa kohteissa, kuten esimerkiksi pursotteissa. (Huhtaniemi et. al. 2002, s. 71). EN AW-5083 ja EN-AW-6082 eripariliitosta voitaisiin esimerkiksi hyödyntää käytännössä, kun halutaan käyttää EN AW-6082 pursotetta jäykisteenä EN AW-5083 levyrakenteessa.

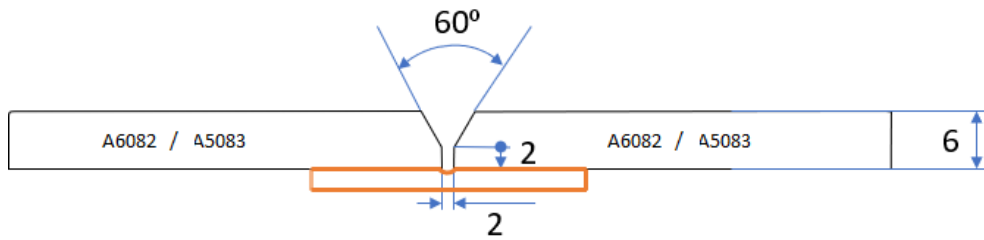
6.1 Koejärjestelyt

Hitsauskokeissa varioitiin perusmateriaalia, hitsauslisäainetta ja lämmöntuontia. Koekappaleita oli kuusi, joissa käytettiin osaviistettyä railoa railokulmassa 60-astetta. Juuritukena käytettiin kuparista juuritukea, johon on jyrskitty haluttu hitsinjuurenpuolen muoto. Juuripinnan korkeus on 2 mm ja juuren ilmarako 2 mm. Railopinta-ala on 32 mm². Hitsausjärjestelyt on havainnollistettu kuvassa 12. Hitsauskokeet numeroitiin kronologiseen järjestykseen ja nimettiin K-lyhenteellä, jota tullaan käyttämään viitatessa eri hitsauskokeisiin.

Lisäaineina hitsauksessa toimi Lincoln Electric SuperGlaze HD 5356 AlMg5Cr ja Elga Alumig 5183 AlMg4,5Mn. Lisäaineiden langanpaksuutena oli 1,2 mm. Lämmöntuontia muutettiin vaihtamalla hitsausnopeutta pienemmäksi. Lämmöntuonti Q voidaan teoreettisesti määrittää kaavalla 1. (Welding Value 2020).

$$Q = \kappa \frac{I \cdot U}{v} * 10^{-3} \text{ kJ/mm} \quad (1)$$

, jossa κ on hitsausprosessikohtainen terminen hyötysuhdekerroin (MIG-hitsauksessa 0,8), I on hitsausvirta, U on hitsausjännite ja v hitsausnopeus.



Kuva 12. Käytetty raillogeometria ja hitsausjärjestelyt.

Taulukko 1. Hitsauksessa käytetty perusmateriaali, lisäaine, parametrit ja lämmöntuonti.

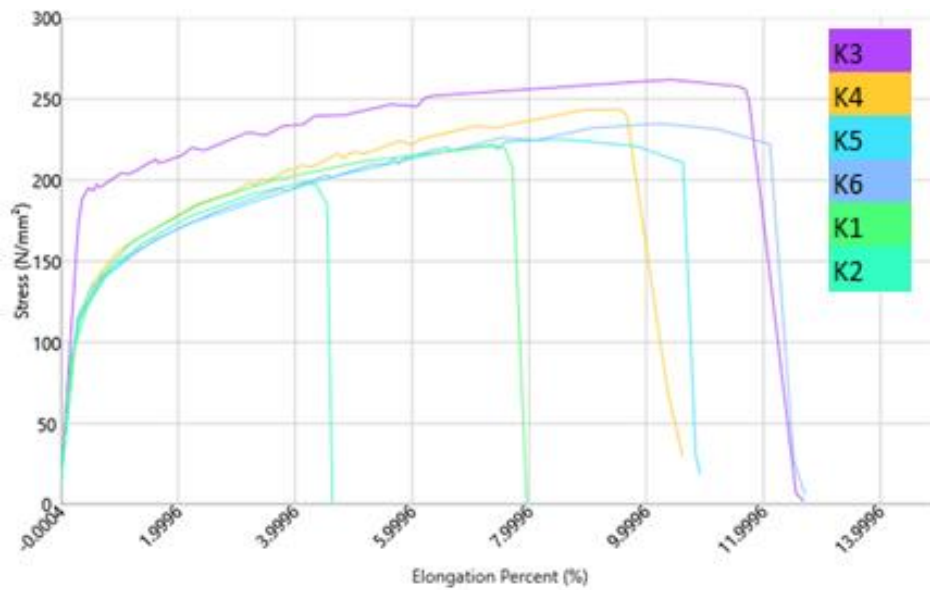
Koe	Materiaali		Lisäaine	Lämmöntuonti						
	1	2		1	2	w_{fs} [m/min]	v [mm/s]	I [A]	U [V]	Q [kJ/mm]
1	A6082	A6082	5183	X		12	10	186	22,5	0,33
2	A6082	A6082	5356	X		12	10	184	22,5	0,33
3	A6082	A5083	5183	X		12	10	188	22,2	0,33
4	A6082	A5083	5356	X		12	10	189	21,9	0,33
5	A6082	A5083	5183		X	12	7	185	23,1	0,49
6	A6082	A5083	5356		X	12	7	188	22,6	0,49

6.2 Tulokset

Kaikkien koekappaleiden hitsaus onnistui ja niissä ei havaittu merkittäviä hitsausvirheitä. Koekappaleista otettiin makrohiekuvat sekä mitattiin kovuus pitkin perusainetta ja hitsiä. Kovuuskokeista muodostettu kuvaaja sijoitettiin makrohiekuvan päälle. Kovuusprofiilit on esitelty kuvissa 15–20.

Vetokokeessa vetokoesauvat K1, K2 ja K4 murtuivat hitsistä ja K3, K5 ja K6 muutosvyöhykkeeltä. Vetokoeikäyrät ovat esitelty kuvassa 13 ja taulukossa 2 on yksityiskohtaisemmat tulokset. Vetokokeessa poikkivedetyt sauvat ovat nähtävissä kuvassa 14.

Vetokokeissa korostui lämpökäsiteltävien alumiinien heikkeneminen hitsin lämmöntuonin vaikutuksesta. Paras murtolujuus vetokokeissa saavutettiin K3 eli EN AW-5083 ja EN AW-6082 eripariliitoksessa, kun käytettiin pienempää lämmöntuontia ja 5183 lisäainetta. 5183 lisäainetta käyttämällä saatiin myös parempi murtolujuus K1 eli EN AW-6082 ja EN AW-6082 hitsatessa. K3 erottui selkeästi parhaalla myötölujuudellaan.



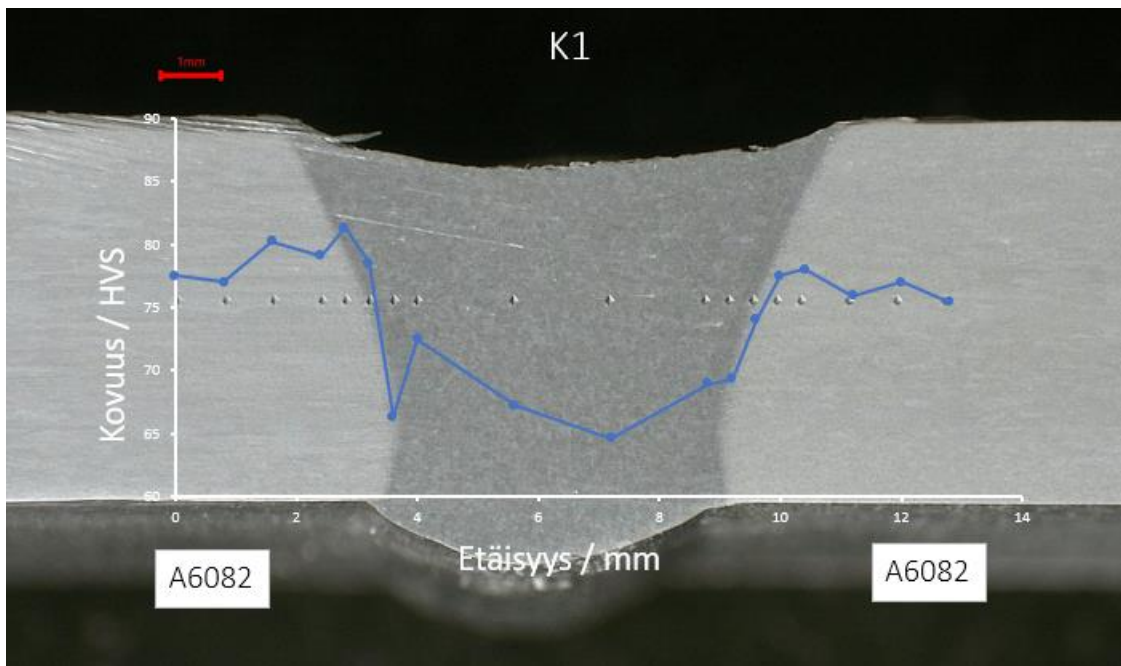
Kuva 13. Vetokoekuvaajat.

Taulukko 2. Vetokoetulokset.

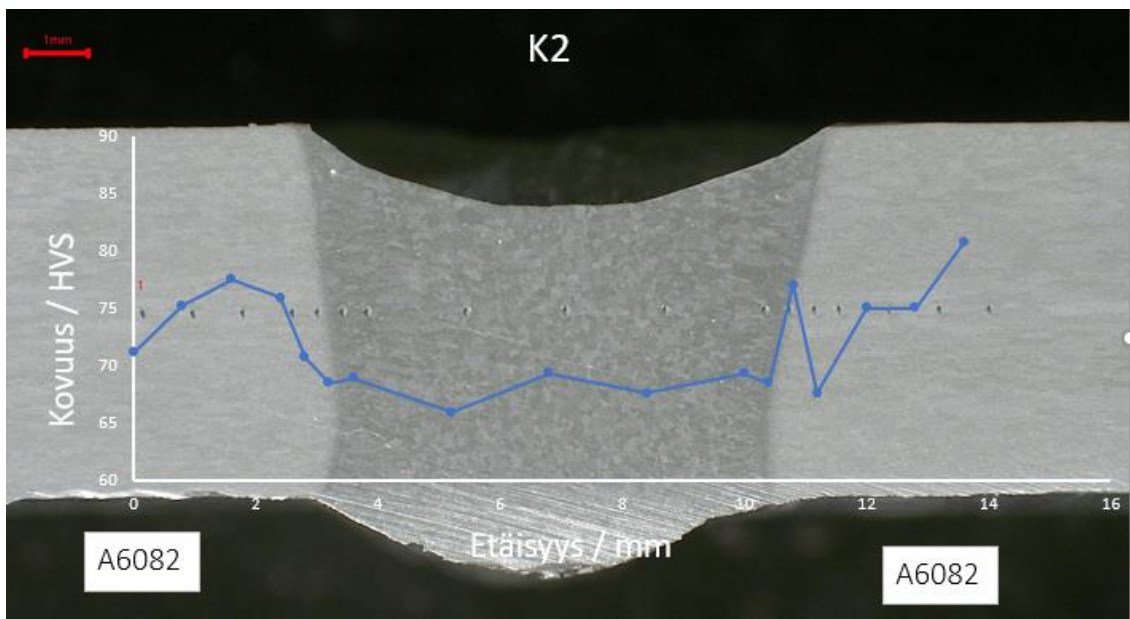
Koe	Rm [MPa]	Rp,0,2 [MPa]	Voima [N]	Sauvan pituus [mm]	Venymä [%]
K3	262.0	195.4	36819.5	140.527	12.0
K4	243.7	130.1	34774.1	142.702	10.3
K5	225.2	128.7	33600.2	149.181	10.2
K6	234.9	124.0	35087.8	149.358	12.0
K1	221.5	125.3	35129.6	158.634	7.8
K2	199.1	119.4	29583.2	148.568	4.5



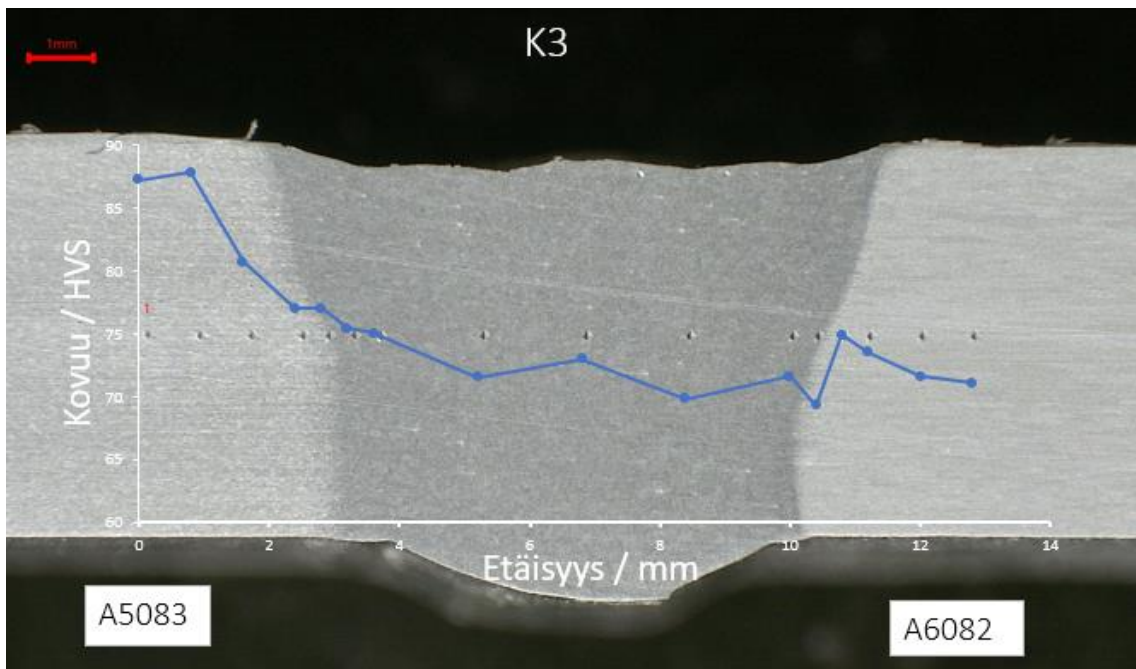
Kuva 14. Poikkivedetyt vetokoesauvat K1 ja K2 molemmat puolet EN AW-6082 Yläpuolella materiaali K3, K4, K5 ja K6 EN AW-6082 ja alapuolella EN AW-5083.



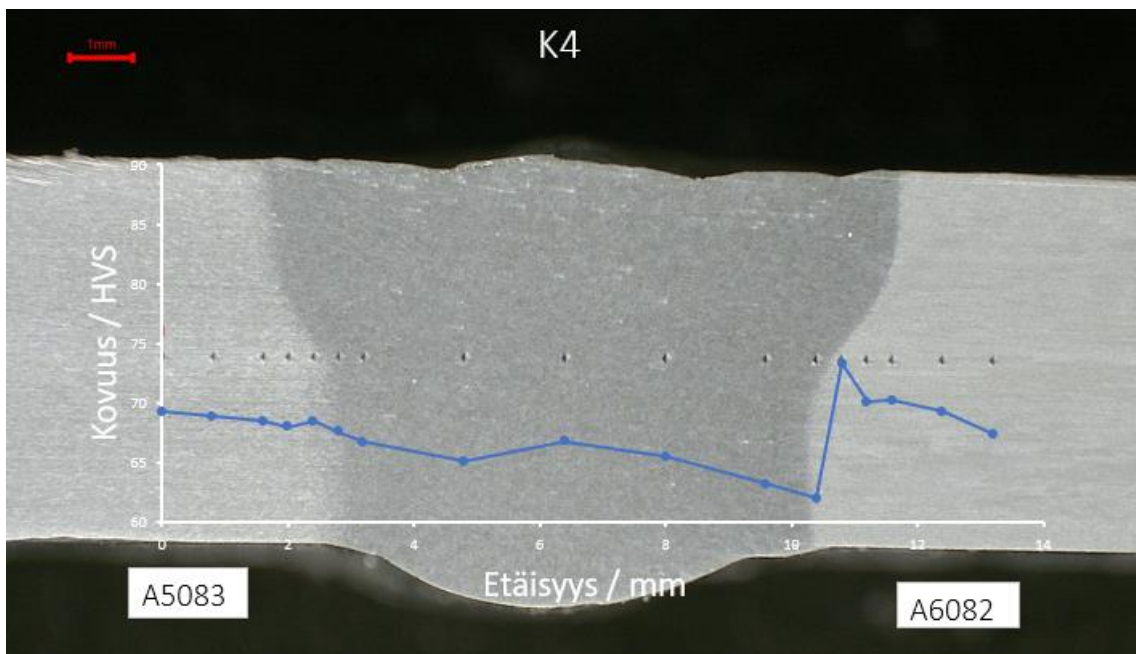
Kuva 15. K1, kovuusprofiili sijoitettuna makrohiekuvan päälle.



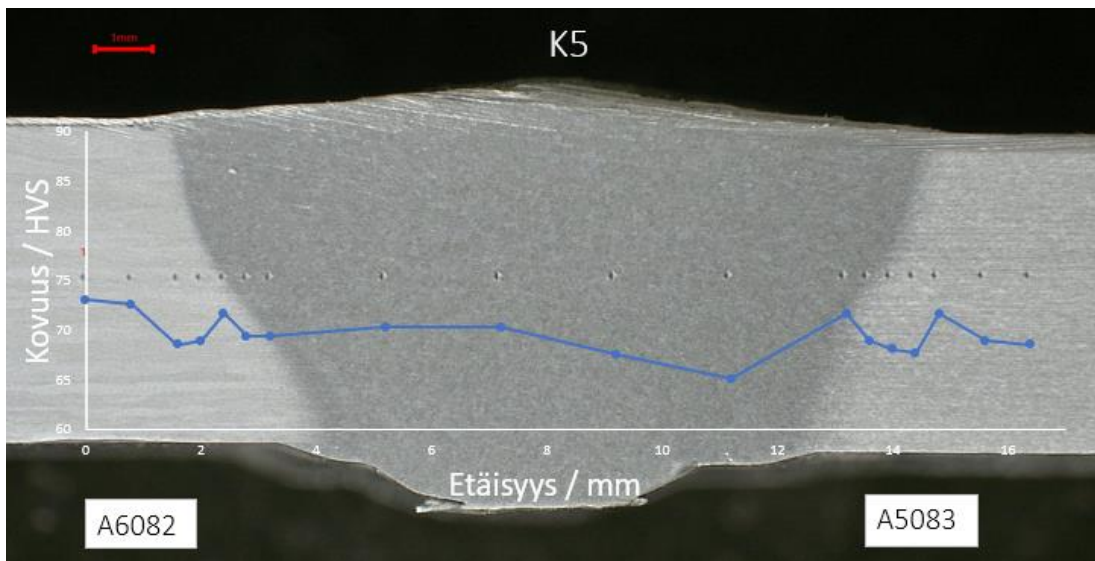
Kuva 16. K2, kovuusprofiili sijoitettuna makrohiekuvan päälle.



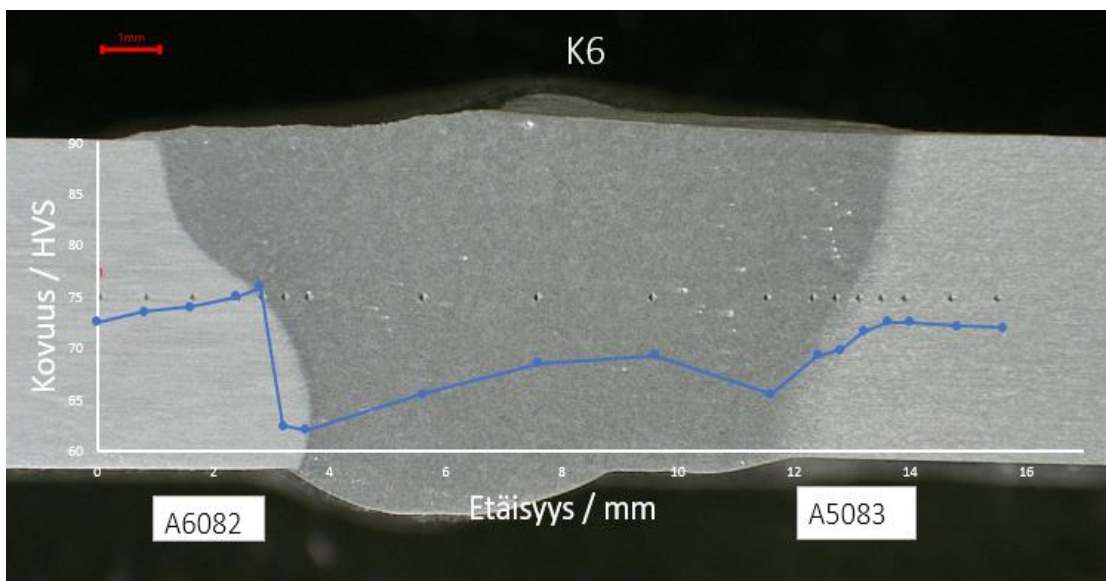
Kuva 17. K3, kovuusprofiili sijoitettuna makrohiekuvan päälle.



Kuva 18. K4, kovuusprofiili sijoitettuna makrohiekuvan päälle.



Kuva 19. K5, kovuusprofiili sijoitettuna makrohiekuvan päälle.



Kuva 20. K6, kovuusprofiili sijoitettuna makrohiekuvan päälle.

6.3 Tulosten analysointi

Käytännön kokeiden tulosten perusteella tärkeimpänä alumiinin materiaaliomianaisuutena voidaan pitää hitsauksesta aiheutuvaa lujuuden heikkenemistä. Hitsauksen aiheuttamaa kovuuden heikkenemistä oli havaittavissa kaikissa koekappaleissa.

Lujuuden menetys lämpökäsitellyillä alumiineilla korostui, joka on huomattavissa vetokoetuloksissa koekappaleilla K1 ja K2 verrattuna K3, K4, K5 ja K6. Kylmämuokatulla alumiiniseoksella EN AW-5083 kovuuden menetys hitsauksen takia ei ole niin suurta kuin lämpökäsitellyllä EN AW-6082. Kylmämuokattavien seosten lujuutta ei pysty palauttamaan hitsauksen jälkeisellä lämpökäsittelyllä, kuten EN AW-6082 lujuutta pystyttäisiin nostamaan keinovanhentamisella tai erkautuskarkaisulla. Lämpökäsittelyt kuitenkin ovat vain mahdollista kappaleilla, jotka voidaan hitsauksen jälkeen siirtää lämpökäsittelyihin.

Kuvien 15–20 kovuusprofiilien kuvaajat noudattivat kuvien 5 ja 6 mukaista käyrää, jossa lämpökäsitellyn alumiiniseoksen kovuus nousee ”terävämmin” muutosvyöhykkeellä kuin kylmämuokatun alumiiniseoksen. K3:ssa saavutetaan selkeästi korkeampi kovuus EN AW-5083 perusaineen puolella kuin muissa koekappaleissa.

Lisäaineen valinta voidaan jakaa yleisellä tasolla niin, että kylmämuokattavilla seoksilla käytetään perusaineen kaltaista lisäainetta ja lämpömuokattavilla AlSi5/AlMg5 lisäainetta. Kuitenkin lisäaineen oikealla valinnalla voidaan parantaa hitsiaineen lujuusominaisuuksia. Hitsauskokeissa 5183 pärjasi paremmin verrattuna 5356. Lisäaineen valintakaavion (kuva 7) perusteella perusaineelle EN AW-6082 lisäaineeksi suositellaan vain AlSi5 lisäainetta. AlSi5 lisäaineella olisi voitu saada paremmat tulokset EN AW-6082 kannalta. Toisaalta AlSi lisäaineita on vältettävä 5xxx-sarjalaisten hitsauksessa, koska se muodostaa kuumahalkeilualtista magnesiumisilikaattia hitsiin ja vaikuttaa negatiivisesti EN AW-5083 hitsauksessa hitsin ominaisuuksiin.

7. Johtopäätökset

Alumiiniseosten hitsauksessa yhtenä tärkeimpänä materiaaliominaisuutena voidaan pitää hitsauksesta aiheutuvaa lujuuden heikkenemistä. Muita tärkeitä hitsauksen kannalta olevia materiaaliominaisuuksia ovat alumiinin oksidikalvo, suuri lämpölaajenemis- ja lämmönjohtumiskerroin.

Kylmämuokattavan ja lämpömuokatun alumiinin eripariliitoksessa tulee huomioida lämpömuokatun seoksen suurempi lujuuden menetys. Myös tietämys siitä, mitä alumiiniseosta hitsataan, on oleellisessa osassa onnistunutta lopputulosta. Alumiiniseoksia on useita ja ne omaavat monia toimitustiloja. Useimmat alumiinit ovat kuitenkin hyvin hitsattavissa, mutta lujimpien 2xxx- ja 7xxx-sarjan hitsauksessa tulee huomioida seosten suurempi herkkyys kuumahalkeilulle.

Alumiini tarvitsee hitsauksessa suuren lämmöntonin, johtuen suuresta lämmönjohtumiskertoimesta. Lämmönjohtuminen vaikeuttaa alumiinien hitsausprosessia, koska tarvittavan sulatunkeuman ja hitsautumissyvyyden saavuttaminen voi olla vaikeampaa paksummilla hitsausliitoksilla. Liiallinen lämmöntuonti kuitenkin heikentää hitsin lujuusominaisuuksia. Lämmöntonin optimointi alumiinien hitsauksessa on tärkeässä osassa onnistunutta hitsiä. Hitsauskokeissa K5 ja K6 suurempi lämmöntuonti heikensi hitsien lujuus- ja kovuus ominaisuuksia. Suurempi lämmöntuonti myös lisäsi hitsisulan määrää ja levensi hitsausvyöhykettä.

Koetulosten ja teoriaosuuden perusteella MIG-hitsausta voidaan edelleen pitää hyvänä alumiinien hitsausprosessina. MIG-hitsauksen vahvuutena on sen helppo automatisointi ja tämän tuoma tehokkuus ja tarkkuus. Kuitenkin MIG-hitsauksen aiheuttama lämmöntuonti vaikeuttaa joidenkin alumiinien hitsausta. Näiden vaikeasti hitsattavien alumiinien hitsauksessa voitaisiin enemmän pyrkiä hyödyntämään hitsausprosesseja tai liittämismenetelmiä, joissa lämmöntonin vaikutus on huomattavasti alhaisempaa tai sitä ei ole. Näitä prosesseja voisivat olla FSW, laserhitsaus tai mekaaniset liitokset. Pulssi-MIG-hitsausta käyttämällä voidaan pienentää hitsauksen aiheuttamaa lujuuden menetystä. TIG-hitsauksen edut tulevat esiin ulkonäköä vaativissa kohteissa ja ohuita ainepaksuuksia hitsatessa.

8. Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena oli selvittää alumiiniseosten hitsauksen tärkeimmät ominaispiirteet ja miten alumiini materiaalina vaikuttaa hitsaukseen. Työssä pyrittiin selvittämään ilmenevätkö kirjallisuudessa esiintyvät avainpiirteet käytännön kokeissa. Työ antoi relevanttia tietoa alumiinien hitsauksesta, etenkin EN AW-5083 ja EN AW-6082 eripariliitoksessa.

Työn teoriaosuuden alussa selvitettiin, kuinka alumiinit nimetään ja luokitellaan, sekä käytiin läpi alumiiniseoksien perusteet. Seuraavaksi selvitettiin alumiiniseosten ominaisuuksia hitsattavuuden kannalta. Tärkeimmät hitsauksen kannalta olevat asiat listattiin. Teoriaosuuden lopuksi esiteltiin valta-asemassa olevat alumiinien hitsausprosessit ja pyrittiin kertomaan hitsausaineiden merkityksestä alumiinien hitsaukseen.

Hitsauskokeissa MIG-hitsattiin robotisoidusti kuusi koekappaletta. Hitsauskokeissa varioitiin perusmateriaalia, lisäainetta sekä lämmöntuontia. Kaikkien koekappaleiden hitsaus onnistui. Paras koetulos eripariliitoksessa saatiin kokeessa K3, joka omasi parhaat elastiset ja lujuudelliset ominaisuudet. Hitaampaa hitsausnopeutta käyttämällä luotiin suurempi lämmöntuonti, joka aiheutti koekappaleissa K5 ja K6 suurempaa lujuuden menetystä.

Työn tutkimustuloksista selvisi, että useimmat alumiiniseokset ovat hyvin hitsattavissa. Tärkeimpinä materiaaliominaisuuksina hitsauksen kannalta voidaan pitää alumiinin lujuuden ja kovuuden menetystä hitsauksen seurauksesta. Muita tärkeitä materiaaliominaisuuksia ovat alumiinin oksidikalvo ja alumiinin suuri lämmönjohtavuus. MIG-hitsaus on edelleen valta-asemassa oleva alumiinien hitsausprosessi. Muita vartenotettavia prosesseja ovat laser- ja TIG-hitsaus. Tulevaisuudessa FSW:n käyttö tulee yleistymään alumiinien hitsauksessa kiinteän tilan hitsauksen tarjoamien etujen vuoksi.

Lähteet

Besharati Givi, M. K. & Asadi, P. 2014. *Advances in friction- stir welding*. Cambridge, England. Woodhead Publishing. 722 s.

Cam, G. & Apekoglu, G. 2016. Recent developments in joining of aluminum alloys. *International journal of advanced manufacturing technology*. Vol.91. S. 1851–1866.

Esabna. 2022. How to Avoid Cracking in Aluminum Alloys. [verkkodokumentti] [viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/how-to-avoid-cracking-in-aluminum-alloys.cfm>

ESAB 2017. Hitsauslisäaineet-kirja. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.3.2022]. Saatavissa: <https://assets.esab.com/assetbank-esab/action/viewAsset?id=12268&index=7&total=8&view=viewSearchItem>

Hadadzadeh, Ghaznavi, M. M., & Kokabi, A. H. 2017. HAZ softening behavior of strain-hardened Al-6.7Mg alloy welded by GMAW and pulsed GMAW processes. *International journal of advanced manufacturing technology*. Vol 92. S. 2255–2265

Huhtaniemi, K. & Jerima, M. & Pohjus, J. & Puska, M. & Vierimaa, T. & Karppinen, A. & Vartiainen, M. 2002. *Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit*. Teknologiainfo Teknova Oy. Helsinki. 237 s.

Katayama, S. 2013. *Handbook of Laser Welding Technologies*. 1st edition. Vol. 41. Cambridge: Elsevier Science & Technology. 552 s.

Lukkari, Juha. 2001. *Alumiinit ja niiden hitsaus*. Tampere: Tammerpaino Oy. 251 s.

Mathers, G. 2002. *The welding of aluminium and its alloys*. Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltd. 236 s.

Mubiayi, Mukuna Patrick., Esther Titilayo. Akinlabi, and Mamookho Elizabeth. Makhatha. 2019. *Current Trends in Friction Stir Welding (FSW) and Friction Stir Spot Welding*

(FSSW) An Overview and Case Studies. 1st ed. 2019. Cham: Springer International Publishing. 216 s.

Polmear, I. J. 2017 Light alloys. Metallurgy of the light metals. Fifth edition. Oxford, England. Butterworth-Heinemann. 515 s.

Sánchez-Amaya, J.M., Amaya-Vazquez, M.R. & Botana, F.J. 2013. Laser welding of light metal alloys: aluminium and titanium alloys. In: Katayama, S. 2013. Handbook of laser welding technologies. Philadelphia, PA: Woodhead Pub. Pp. 215-226.

SFS-EN 515. 2017. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokatut tuotteet. Tilojen tunnukset Helsinki. suomen Standardisoimisliitto SFS. s. 45

SFS-EN 573-1. 2005. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokattujen tuotteiden kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Helsinki: suomen Standardisoimisliitto SFS. s. 63

SFS-EN ISO 18273. 2015. Hitsausaineet. Hitsauslangat ja hitsaussauvat alumiinin ja alumiiniseosten hitsaukseen. Luokittelu. Helsinki: suomen Standardisoimisliitto SFS. s.23

SFS-EN ISO 9692–3. 2016. Hitsaus ja sen lähiprosessit. Railomuodot. Osa 3: Alumiinin ja alumiiniseosten MIG- ja TIG-hitsaus. Helsinki. suomen Standardisoimisliitto SFS. s.31

Sprovieri, J. 2021. HANDHELD LASER COMPETES WITH MIG, TIG. Assembly Carol Stream, Ill. Vol. 64. s. 2

Welding Value. 2020. MIG/MAG-hitsauksen lämmöntonin laskenta. [Welding Value www-sivuilla]. [Viitattu 2.4.2022]. Saatavissa: <https://weldingvalue.com/fi/2020/07/mig-mag-hitsauksen-lammontuonnin-laskenta/>

Weman, K. (2011) Welding Processes Handbook. Cambridge: Elsevier Science & Technology.

Wilson, M. 2007. TIP TIG: New Technology for Welding. Industrial Robot: An International Journal 34/6 2007. 462–466 s.