



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ALUMIINISEN KULJETIN- KISKON KORJAUSHITSAUS

TEKIJÄ: Oskari Toivanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Oskari Toivanen	
Työn nimi Alumiinisen kuljetinkiskon korjaushitsaus	
Päiväys	16.2.2017
Sivumäärä/Liitteet	53/4
Ohjaaja(t) Yliopettaja Heikki Salkinoja, lehtori Mika Mäkinen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Sakupe Oy / Pajava Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Työn tarkoituksena oli tutkia hitsaamisen vaikutuksia Sakupe Oy:ssä käytettyyn alumiiniseen kuljetinkiskoon sekä löytää hitsaustapa, joka tuottaa pitkäikäisimmän ratkaisun kuoppaantuneen kiskon korjaamiseen. Aiemmin on ollut hitsatun kohdan nopea uudelleen vaurioituminen huonojen lujuusominaisuuksien vuoksi.</p> <p>Työssä perehdyttiin alumiiniseoksiin ja niiden metallurgisiin ominaisuuksiin. Kiskomateriaalille tehtiin alkuaineanalyysi, jonka perusteella valittiin erilaisia muuttujia koehitsetä varten. Koehitseteille tehtiin kovuusmittauksia lämpövaikutusalueen koon ja kovuusmuutoksien selvittämiseksi. Työssä arvioitiin myös käytettävissä olevia vaihtoehtoisia korjausmenetelmiä, kuten vaurioituneen osan korvaaminen teräsinsertillä. Koemuuttujina olivat kolme erilaista hitsauslisäainetta, hitsatun sekä hitsaamattoman kappaleen anodisoimalla pinnoittaminen sekä kolme hitsaamisen jälkeen tehtyä käsittelyä. Jälkikäsittelyt olivat hitsin sammuttaminen suoraan veteen, erkautuskarkaisu sekä hitsiaineen muokkauslujittaminen.</p> <p>Työn tuloksena havaittiin, että perinteisin menetelmin täyttöhitsatussa kiskossa hitsiaineen kovuus oli noin 70 % alkuperäisestä ja hitsin ympärillä lämpövaikutusalueella noin 45 % eikä näihin arvoihin voitu vaikuttaa lisäänevalinnoilla. Hitsiaineen kovuus voidaan nostaa perusaineen tasolle muokkauslujittamalla sitä. Lämpövaikutusalueen kovuus saadaan palautettua erkautuskarkaisemalla hitsattu kappale. Mikäli kappaleen koon ja sijainnin puolesta on mahdollista, yhdistämällä nämä käsittelyt hitsatun kohdan kovuus saadaan palautettua alkuperäistä perusainetta vastaavalle tasolle. Muutoin hitsaamista on vältettävä ja pyrittävä korvaamaan vaurioituneet osat RST-profiililla tai teräsinsertillä.</p>	
Avainsanat alumiini, liuoshehkutus, hitsaus, HAZ, erkautuskarkaisu, keino vanhentaminen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Oskari Toivanen			
Title of Thesis Weld Repair of Aluminum Conveyor Rail			
Date	February 6, 2017	Pages/Appendices	53/4
Supervisor(s) Mr Heikki Salkinoja, Principal Lecturer and Mr Mika Mäkinen, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Sakupe Oy / Pajava Oy			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this final project was to determine the effects of welding on aluminum conveyor rail and find the most suitable method for repairing the rail by welding. The rail has been welded several times before, and it has become evident that the strength properties of the welded section are significantly reduced leading to premature failure.</p> <p>The study was performed by first studying the theory concerning aluminum alloys and their metallurgic properties. The composition of the aluminum alloy used in the rail was determined by elemental analysis (XRF). After the analysis, welded samples of the base material were made with different variables based on the analysis and theory. The width of the heat affected zone and changes in hardness were measured by performing Vickers hardness tests. Alternative methods for repairing the rail were assessed as well. The variables chosen to be studied were three different filler metals, coating of a welded and unwelded sample by anodizing and three different treatments that were made after welding. The treatments were cooling the sample immediately after welding, precipitation hardening and hardening the weld metal by hammering.</p> <p>As a result of the study it was noticed that when welded with traditional procedures the hardness of the weld metal was about 70 % and the heat affected zone about 45 % when compared to the unwelded base material. The hardness of the welded sample could not be increased by filler metal choices. The study showed that hardening the weld metal increases it's hardness to the same level with the base material. The hardness of the heat affected zone could be restored to the initial state by performing precipitation hardening procedure to the sample. By combining hardening of the weld metal and the precipitation hardening process the hardness of the entire sample could be normalized to the same or higher level of hardness as that of the base metal. On the other hand, welding should be avoided and the damaged rail sections should be replaced with a stainless steel profile or a steel insert.</p>			
<p>Keywords XRF-analysis, aluminum, alloy, precipitation, hardening, vickers, HAZ, ageing</p>			

ESIPUHE

Haluan kiittää työn ohjaajaa, yliopettaja Heikki Salkinojaa hyvästä ohjauksesta, Pajava Oy:n toimitusjohtaja Tapio Valkosta yhteistyöstä sekä työnantajaani opinnäytetyön aiheesta. Suurin kiitos kuuluu perheelleni ja työtovereilleni, jotka ovat joustamisellaan mahdollistaneet opintojen suorittamisen.

Siilinjärvellä 22.2.2017

Oskari Toivanen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	SAKUPE OY	9
2.1	Yritysesittely	9
2.2	Materiaalin kuljetus- ja varastointijärjeselmät Sakupe Oy:ssä	9
3	TUTKIMUSKOHTENA OLEVA RATAJÄRJESTELMÄ	10
3.1	Ratajärjestelmän eri osa-alueet	10
3.2	Ratajärjestelmän tekniset ominaisuudet ja ongelmat	11
3.3	Kiskon rasitukset	13
4	ALUMIINIT	17
4.1	Alumiinien nimikejärjestelmät	17
4.2	Alumiiniseokset	19
4.2.1	Karkenemattomat seokset	20
4.2.2	Karkenevat seokset	21
4.3	Tutkimuskohtena olevan seoksen erityispiirteet	22
5	ALUMIINIEN HITSAAMINEN JA HITSATTAVUUS	26
5.1	Yleisimmät hitsausprosessit	26
5.2	TIG-hitsaus	26
5.3	Alumiiniseosten hitsattavuus	27
5.3.1	Rakenteellinen hitsattavuus	28
5.3.2	Perusaineen hitsattavuus	28
5.4	Lisäaineet	32
6	KOEJÄRJESTELYT	34
6.1	Koekappaleet	34
6.2	Aineenkoetusmenetelmät	36
6.3	Lisäainevalinnat ja koemuuttajat	36
7	TULOKSET	39
8	VAIHTOEHTOISET KORJAUSMENETELMÄT	43
8.1	Tehdasvalmisteinen teräsinsertti	43
8.2	Toisesta materiaalista valmistettu kisko	44
9	YHTEENVETO	46
10	POHDINTA	47

LÄHDELUETTELO.....	48
LIITE 1: XRF-ANALYYSI	50
LIITE 2: NÄYTTEIDEN KOVUUSTAULUKKO	51
LIITE 3: PERUSAINEN VETOKOERAPORTTI.....	52
LIITE 4: KOVUUSMITTAUSTEN KUVAAJA TÄYSIKOKOISENA	53

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Sakupe Oy:n Siilinjärven toimipisteessä käytetyn alumiinista valmistetun monorail-tyyppisen kuljetinjärjestelmän korjaushitsausta. Tuotantotilojen korkeassa osassa katon tasossa sijaitsevaa tietokoneohjattua kuljetinjärjestelmää käytetään materiaalivirtojen ohjaukseen ja varastointiin. Työn tavoitteena on löytää hitsauslisäaine ja -tapa, jolla saavutetaan hitsatun kohdan paras mahdollinen kestävyys, sekä selvittää hitsaustapahtuman vaikutuksia kiskon lujuusominaisuuksiin yleisesti. Tutkimuskohde poikkesi tavanomaisesta alumiinin korjaushitsauksesta siten, että tutkimuksessa ei tehty liitoshitsejä vaan kyse on pinnoittamisesta.

Kiskoa pitkin liikkuvien pyörien aiheuttama liian suuri rasitus muodostaa pitkällä aikavälillä painaamia alumiinikiskoon, jolloin painovoimaisesti toimivaksi suunniteltu järjestelmä ei toimi ilman, että säkille antaa manuaalisesti lisävauhtia. Ongelmakohtia on korjattu joitakin kertoja täyttöhitsaamalla, mutta hitsin lujuusominaisuudet ovat olleet heikohkot verrattuna perusmateriaaliin, minkä vuoksi hitsiin ja pehmenneeseen perusaineeseen syntyy nopeasti uudet painaumat.

Opinnäytetyö tehdään yhteistyössä Pajava Oy:n kanssa, joka on viime vuosina suorittanut alihankintana suurimman osan Sakupe Oy:n hitsaustöistä mukaan lukien alumiinikiskon korjaushitsaus. Aloite tutkimukseen syntyi Pajava Oy:n toimitusjohtaja Tapio Valkoselta. Mikäli nykyistä hitsauslisäainetta ja hitsausprosessia paremmin toimiva vaihtehto löytyy, on mahdollista saavuttaa kustanussäästöjä kunnossapitotarpeen vähenemisen vuoksi ja tuottavuuden kasvun myötä.

Työssä pyritään selvittämään kiskon perusmateriaalin koostumus ja suoritetaan koehitsejä eri parametrein, minkä jälkeen pinnoitehitseille suoritetaan kovuusmittauksia. Työ rajataan vain niiden muuttujien tutkimiseen, joihin autenttiossa korjaustilanteessa voidaan vaikuttaa; hitsaus on normaalisti suoritettava tuotantotiloissa henkilönostimelta purkamatta rakenteita pienempiin osiin. Opinnäytetyössä on tarkoitus myös selvittää, miten alumiinin luonnollinen vanheneminen ja keino vanhenemus vaikuttavat hitsin ja perusaineen ominaisuuksiin.

Opinnäytetyössä käytetään pääasiallisesti kirjallisuuslähteitä koehitsien muuttujia valittaessa. Tutkimuskohteessa on sovellettava laajasti teoretietoa alumiinin metallurgisista ominaisuuksista, sillä alumiini käyttäytyy hitsatuissa rakenteissa huomattavasti erilalla kuin teräs.

2 SAKUPE OY

2.1 Yritysesittely

Sakupe Oy on teollisuuspesula, joka tuottaa tekstiilihuoltopalveluita yrityksille ja yhteisöille kahdessa eri toimipisteessä, Siilinjärvellä ja Jyväskylässä. Sakupe Oy pesee ja huoltaa päivittäin noin 25 000 kiloa ja vuosittain noin 6 miljoonaa kiloa tekstiilejä. Yritys on perustettu vuonna 1983, jonka jälkeen se on kasvanut tasaisesti, ja on nykyisin alansa johtavia toimijoita Suomessa. Sakupe Oy:ssä on panostettu edistykselliseen tekniikkaan ja suuri osa prosesseista on automatisoitu (Sakupe Oy, 2017-02-14.)

2.2 Materiaalin kuljetus- ja varastointijärjeselmät Sakupe Oy:ssä

Nykyisin teollisuuspesuloissa materiaalivirtoja käsitellään suurelta osin tietokoneohjatuin kuljetinjärjestelmin. Päivittäinen 25 000 kilon tekstiilimäärä tarkoittaa suuria materiaalivirtoja; tekstiili on kevyttä, joten asiakkaalta viikkaamattomana palautuessaan se vie erittäin paljon tilaa. Pesuloissa ongelma on ratkaistu siirtämällä materiaalin varastoiminen ja kuljettaminen suurelta osin kattoon erilaisille kuljetinjärjestelmille, jolloin lattipinta-ala voidaan käyttää tehokkaammin tuotantolaitteiden ja työpisteiden sijoitteluun.

Sakupe Oy:n tuotantotiloissa on käytössä kolme toisistaan riippumatonta katon tasossa olevaa kuljetinjärjestelmää. Kolmesta kuljettimesta kahdessa materiaali kulkee säkeissä, jotka roikkuvat kiskosta pyörästön varassa. Molemmat ovat monorail-tyyppisiä ratoja, joissa säkki liikkuu yhtä kiskoa pitkin pyörästöt toisiaan seuraten. Täysin erilaisten kiskoprofiilien ja pyörästöjen lisäksi radat eroavat materiaailtaan: toinen on terästä ja toinen alumiinia. Molemmissa säkkiradoissa säkin vetoisuus on noin 50 kg. Kolmannessa kuljetintyyppissä liikkuvat työasut hengaroituina.

Monorail-radoilla pyykki ohjataan tietokoneella tai tilauspainikkeilla pudotuspaikoille eli tiettyihin asemiin ratajärjestelmissä, joissa säkin pohja avataan koneellisesti ja sisältö pudotetaan alas. Pesula on jaettu niin sanottuun puhtaaseen ja likaiseen puoleen, jotka on hygieniasyistä erotettu toisistaan väliseinän ja -ovien avulla.

Likapuolella tutkimuskohteena oleva alumiininen ratajärjestelmä syöttää pesukoneita eli prosessinhoitajaa ohjaa säkkeitä haluamiensa pesukoneiden yläpuolelle, josta säkin sisältö pudotetaan automaattisesti pesukoneeseen. Puhtaalla eli jälkikäsitteilypuolella kullekin työpisteelle tilataan katossa sijaitsevasta välivarastosta materiaalia tilauspainikkeilla. Tilattu säkki siirtyy automaattisesti pudotuspaikalle, jossa sisältö putoaa lattiatasolle pyörillä varustettuun pyykkivaunuun ja on siirrettävissä lattiaa pitkin työpisteelle.

3 TUTKIMUSKOHTENA OLEVA RATAJÄRJESTELMÄ

Opinnäytetyössä tutkitaan likapyykkisalissa sijaitsevan, erään merkittävän pesula-alan laitetoimittajan kuljetin- ja lajittelujärjestelmän korjaushitsausta. Järjestelmä koostuu kolmesta osasta: primääri- ja sekundääriradasta sekä lajittelupisteestä, joka erottaa nämä radat toisistaan.

3.1 Ratajärjestelmän eri osa-alueet

Primäärirata

Asiakkaat pakkaavat likaisen pyykin omissa tiloissaan 110 x 70 cm kokoisiin kangassäkkeihin, joiden pohjassa on rivat ripustamista varten. Pesulaan saavuttuaan säkit puretaan rullakoista ja ripustetaan pohjarivoista primääriradan alussa olevassa nostimessa pyörästöön, jossa on teräskoukku. Nostin nostaa koukut radan ylimpään kohtaan, josta ne siirtyvät painovoimaisesti jollekin seitsemästä varastoradasta. Tämä väli-varasto toimii materiaalipuskurina, joka tasoi vaihteluja saapuvan pyykin aikataulussa.



KUVA 1. Säkit primääriradalla (Toivanen, 2016.)

Lajittelupiste

Primääriradalta koukut tilataan kuvassa 2 näkyvään lajittelupisteeseen, jossa säkit roikkuvat edelleen koukusta. Säkin pohjassa oleva lukko avataan ja säkkiin sisältö tyhjennetään lajittelupisteessä pyörivälle liukuhihnalle. Liukuhihnalta 4 – 7 -henkinen lajitteluryhmä lajittelee likapyykin omiin kaukaloihinsa, joiden vetoisuus on noin 50 kg. Kun tavoitepaino saavutetaan, kaukalo tyhjenee auto-



KUVA 2. Lajittelupiste (Toivanen, 2016.)

maattisesti kuljettimelle, joka vie lajitellun pyykin sekundääriradan hissille. Kuljettimen päässä hississä odottaa 50 kg vetoinen suursäkki, johon lajiteltu pyykkierä tippuu kuljettimelta suoraan.

Sekundäärirata

Lajittelupisteen jälkeinen hissi nostaa jälleen lajitellun pyykkierän sekundääriradalle eli lajitellun pyykin radalle. Hissistä suursäkki siirtyy jollekin kahdeksasta varastoradasta. Varastoradoilta prosessinhoitaja valitsee tietokoneella pesukoneelle ajettavat lajitelmät halutussa järjestyksessä, minkä jälkeen



KUVA 3. Sekundäärirata (Toivanen, 2016.)

rata ajaa säkkejä automaattisesti haluttuihin osoitteisiin. Koska rata on painovoimainen, säkkejä ohjataan lähinnä avaamalla pysäytyslukkoja ja kääntämällä vaihteita eri puolilla rataa.

3.2 Ratajärjestelmän tekniset ominaisuudet ja ongelmat

Ratajärjestelmä koostuu kattoon kannakoidusta suulakepuristetusta alumiiniprofilista. Pitkillä suorilla osuuksilla rata on kannakoitu katosta 2,4 m välein teräskannakkeilla, jotka kiinnittyvät kiskoon salmiakkimuttereilla profiilin yläpuoliseen uraan. Säkkien kulkua ohjataan pysähdyspaikoissa olevilla lukoilla ja kääntövaihteilla, joita on useita kymmeniä.



KUVA 4. Suursäkit kuljettimella (Toivanen, 2016.)

Radan painuminen on suurempi ongelma sekundääriradalla, jossa liikkuu suursäkkejä. Säkit riippuvat kiskossa kankaaseen ommeltuun teräsvanteeseen kiinnitettyjen pyörästöjen varassa, joiden etäisyys toisistaan on 860 mm. Alumiinin heikkous korostuu sekundääriradalla, koska suursäkeissä on enemmän massaa kuin primääriradalla kuljetettavissa pyykkipusseissa. Ajan saatossa suursäkkien etumaiset pyörät painavat alumiinirataan kuopan, joka laajenee vaurion edetessä. Oletettavasti vaurio-kohta sijoittuu etumaisen pyörän kohdalle pysäytyspaikoilla säkin pysähtyessä syntyvän heiluriliikkeen vuoksi. Kuvassa 5 on näkyvässä pahoin painunut kohta.



KUVA 5. Pahoin painunut kohta (Toivanen, 2016.)



KUVA 6. Kiskon poikkileikkaus ja pyörästö (Toivanen, 2016.)

Alumiiniprofiilille tehtiin XRF-analyysi Kuusakoski Oy:n alumiinisulatossa käytetyn seoksen selvittämiseksi. Analyysiraportin tuloksia (liite 1) verrattiin standardiin SFS-EN 573-3, jossa määritellään sivuilla 10 - 31 alumiinien tuotemuodot ja niiden seostukset. Taulukon mukaan lähimpänä XRF-analyysin tulosta on ennako-odotusten mukaisesti alumiiniseos EN-AW 6082 [AlSi1MgMn]. Alapuolella on analyysiraportin tulokset ja sulkuihin merkittynä standardin antamat vaihteluvälit EN-AW 6082 -seokselle.

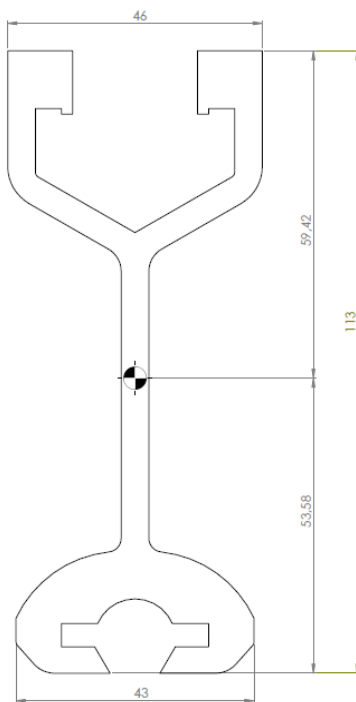
- Si 0,953 % (Si 0,7-1,3%)
- Mg 0,599 % (Mg 0,6-1,2%)
- Mn 0,478% (Mn 0,4-1,0%)

Muille seosaineille annetaan maksimipitoisuudet, joita voidaan pitää lähinnä epäpuhtauksina. EN-AW 6082 kuuluu 6000-sarjan alumiineihin, joissa pääseosaineina ovat magnesium ja pii. Magnesium ja pii muodostavat lämpökäsittelyn yhteydessä koherentteja Mg_2Si -erkaumia jotka lujittavat seosta huomattavasti (Koivisto ym., 2008, 170.)

3.3 Kiskon rasitukset

Kiskon alkuperäisten ja hitsaamisen mahdollisesti heikentämien lujuusominaisuuksien riittävyyden arvioimiseksi määritettiin kiskon sisäinen maksimijännitys, kun kannakointivälille (2,4 m) on pysähtynyt suurin mahdollinen säkkimäärä. Kiskon kantavuuden arvioimisen lisäksi määritettiin pyörän kiskoon aiheuttama kosketuspaine.

Kiskon poikkileikkaussuureiden laskeminen käsin olisi ollut hankalaa monimutkaisen profiilin vuoksi, joten poikkileikkaus mallinnettiin SolidWorks-ohjelmistolla, josta suuret saadaan helposti arviointityökaluja käyttäen.



SolidWorks-ohjelmisto antaa poikkileikkauksen pinta-alaksi, jäyhyysmomenteiksi sekä reunaetäisyyksiksi neutraaliakselista:

$$I_x = 253484.37\text{mm}^4$$

$$I_y = 2304291.56\text{mm}^4$$

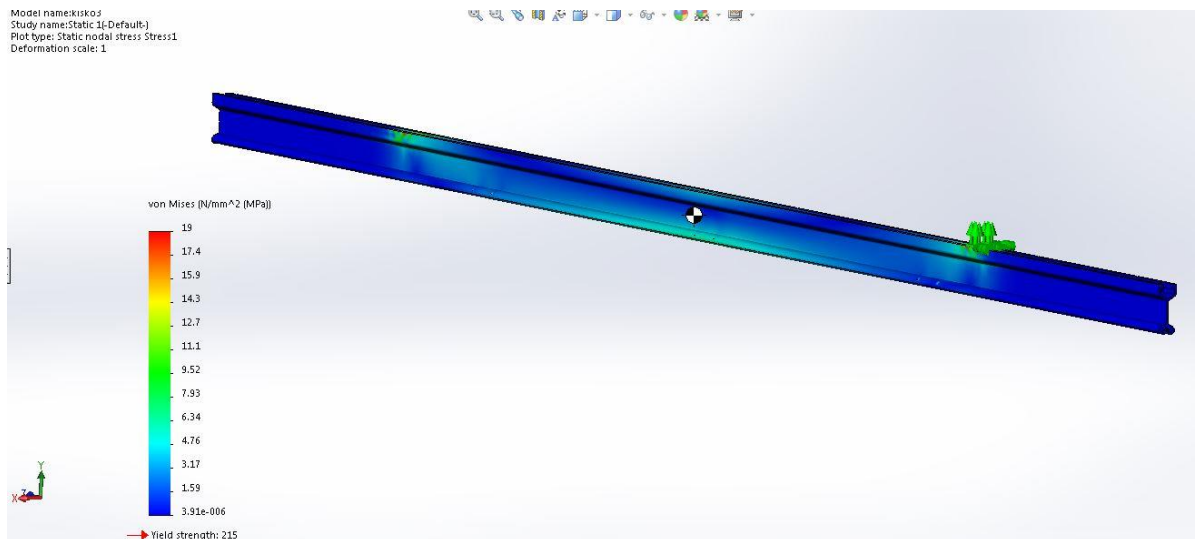
$$A = 1467.17\text{mm}^2$$

$$e_1 = 53,58\text{mm}$$

$$e_2 = 59,42\text{mm}$$

KUVA 7. Profiilin päämitat
(Toivanen, 2016.)

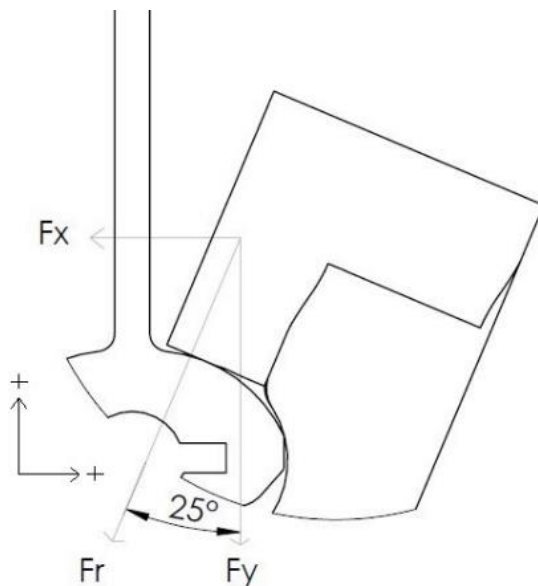
Profiilin jäyhyysmomentti vaikuttaa suurehkolta suhteessa kuormitukseen, joten kiskolle ei nähty tarpeelliseksi määrittää kaikkia sisäisiä voimia ja niiden jakaantumista. Kiskon maksimijännitykset määritettiin tekemällä FEM-analyysi SolidWorksilla. Analyysissä pyörien aiheuttamat voimat (125 N / pyörä) asetettiin todellisuutta vastaavalle etäisyydelle kannakoinnista, jolloin tulokseksi saatiin noin 7 MPa Von Misesin yhdistetty maksimijännitys kannakointivälin keskivaiheilla. Jännitys on niin pieni, että hitsaaminen ei varmasti aiheuta riskiä lujuuden kannalta.



KUVA 8. Kiskon FEM-analyysi (Toivanen, 2016.)

Kuvassa 9 on esitetty pyörästä ja profiilin välillä vaikuttavat voimat sekä pyörän kallistuskulma. Kuvasta nähdään, että kallistuskulman vuoksi kiskon kosketuspinnan kaaren normaalin suuntainen resultanttivoima F_r aiheuttaa suurimman rasituksen kiskon pintaan. Y-akselin suuntainen komponentti F_y muodostuu staattisessa kuormituksessa säkin painosta, joka jakautuu neljälle kantavalle pyörälle.

$$\text{Yhden pyörän kohdalla komponentti } F_y \text{ on } 12,5 \text{ kg} \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} = -122,6 \text{ N}. \quad (1)$$



Resultanttivoima F_r saadaan kaavalla

$$F_r = F_y / \cos \alpha \quad (2)$$

$$F_r = \frac{-122,6 \text{ N}}{0,906} = -135,27 \text{ N}$$

KUVA 9. Profiiliin kohdistuvat voimat (Toivanen, 2016.)

Kosketuspaineen karkeaan määrittämiseen tarvitaan kahden vastakkaisen pinnan kimmomoduuli ja voima, jolla pinnat puristuvat yhteen. Ruiskuvaletun pyörän materiaalin selvittämiseksi olisi ollut tehtävä polttokoe, joten materiaalin määrittämistä varten haastateltiin ruiskuvalutekniikan asiantuntija Kari Rannasmaata (Production support manager, Medisize Oy). Asiantuntijan arvion mukaan pyörän on olosuhteet huomioon ottaen oltava jokin lujimmista ruiskuvalettavista materiaaleista. Ruiskuvalettavien muovien suurimmat kimmomoduuliarvot ovat luokkaa 15 GPa, joten tuota arvoa käytetään laskenta-arvona (Rannasmaa, 2016). Alumiinin kimmokerroin on 70 GPa (Koivisto ym., 2008, 164).

Kahden eri materiaalin yhdistetty kimmokerroin saadaan kaavalla (3)

$$E = 2 \frac{E_1 * E_2}{E_1 + E_2}, \text{ joten} \quad (3)$$

$$E = 2 \frac{15 \text{ GPa} * 70 \text{ GPa}}{15 \text{ GPa} + 70 \text{ GPa}} \approx 25 \text{ GPa}$$

Kosketuspaineen laskennassa on yleisesti käytössä kolme tapausta (Valtanen, 2013, 289):

- voiman vaikutus tasaisella pinnalla
- sylinteri tasolla
- kaksi sylinteriä vastakkain.

Kosketuspaineen laskentatapaus on hieman hankala määrittää, sillä kiskon ja pyörän välinen tilanne muistuttaa kahta toisiinsa nähden ristissä olevaa sylinteriä, jolloin kosketuspinta-ala muodostuu erittäin pieneksi. Tapaus lienee lähimpänä pallon ja tason välistä kosketuspainetta, joka lasketaan kaavalla

$$p_{max} = 0,388 \sqrt[3]{\frac{FE^2}{R}} \quad (4)$$

Pallon ja tason välisen tapauksen kaavalla laskemiseen on määritettävä efektiivinen säde R, koska molemmat kontaktipinnat ovat pyöreitä. Pyörän ja kiskon pyöristyksen säde on sama, eli $R_1=21\text{mm}$ ja $R_2=21\text{mm}$.

Efektiivinen säde R saadaan kaavalla

$$R = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}, \text{ joten} \quad (5)$$

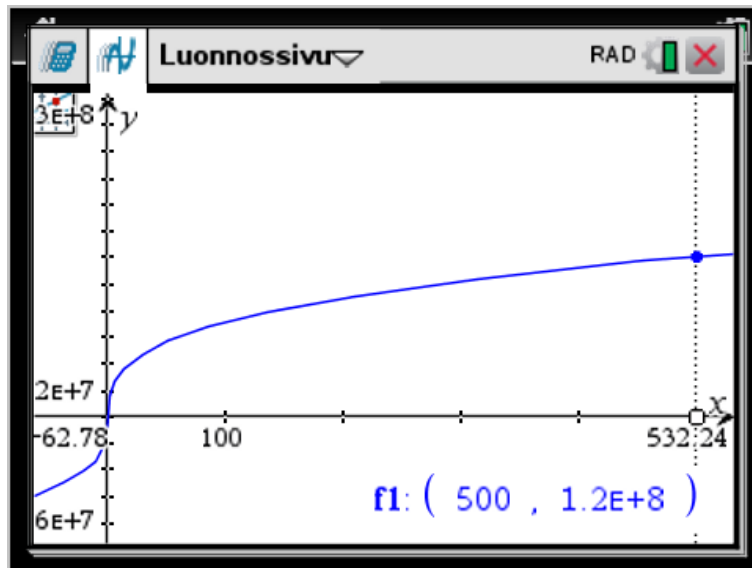
$$R = \frac{21 \text{ mm} * 21 \text{ mm}}{21 \text{ mm} + 21 \text{ mm}} = 10,5 \text{ mm}$$

Pyörän kiskoon kohdistama resultanttivoima F_r on 135,27 N. Sijoittamalla arvot yllä esitettyyn pintapaineen kaavaan saadaan tulokseksi

$$p_{max} = 0,388 \sqrt[3]{\frac{135,27 \text{ N} * 25^2 \text{ GPa}}{0,0105 \text{ m}}} \approx 78 \text{ MPa}$$

Laskentamalli antaa kosketuspaineelle erittäin pienen arvon verrattuna EN-AW 6082 -profiilin myötölujuuteen. Laskenta koskee staattista kuormitusta, joten on todennäköistä että säkin pysäyttäminen täydestä vauhdista aiheuttaa riittävän suurta dynaamista kuormitusta painauman muodostumiseksi, minkä vuoksi painauma on lähinnä pysähdyspaikoilla.

Kosketuspaineessa on huomioitava että paine ja voima eivät ole lineaarisessa suhteessa toisiinsa vaan kosketuspaineen funktio noudattaa kuvassa 8 esitettyä kuvaajaa. Kuvaajaan on merkitty voima, joka vaaditaan >120 MPa jännityksen syntyyn. 120 MPa jännityksen syntyyn tarvittava voima on 500 N, joten on mahdollista, että taulukkokirjan yleinen pintapaineen laskentamalli ei päde tässä tapauksessa tai kiskon alkuperäinen vauriomekanismi on jokin muu kuin puhtaasti kosketuspaineen aiheuttama myötäminen.



KUVA 10. Voiman ja kosketuspaineen välinen funktio (Toivanen, 2016)

4 ALUMIINIT

Alumiini on kevytmetalleihin lukeutuva, harmaa, korroosionkestoltaan ja sähkönjohtavuudeltaan hyvä metallinen alkuaine (Huhtaniemi ym., 2006, 30). Puhdas alumiini on maan kuoren kolmanneksi yleisin alkuaine, jossa se esiintyy bauksiitti-nimisessä kivilajissa alumiinioksida. Metallinen alumiini saadaan erottamalla alumiinioksidi bauksiitista, ja jatkojalostamalla se alumiiniksi. Alla on esitetty yhteenvedo puhtaan alumiinin tärkeimmistä ominaisuuksista (Koivisto ym., 2008, 163-164.)

Sulamislämpötila	660 °C
Hilarakenne	Pintakeskinen kuutio
Tiheys	2,7 g/cm ³
Kimmokerroin	70 kN/mm ²
Vetomurtolujuus	45 N/mm ²
Sähkönjohtavuus	65 % IACS
Korroosionkestävyys	Hyvä hapettavissa oloissa

Alumiinilla on luonnostaan paljon hyviä ominaisuuksia, joiden vuoksi sitä käytetään lukuisissa eri sovelluksissa. Esimerkkinä ominaisuuksista, jotka erottavat alumiinin teräksestä, ovat mm. hyvä korroosionkesto, keveys, muovattavuus kylmänä ja kuumana, sähkön- ja lämmönjohtavuus sekä sitkeysominaisuudet (Lukkari, 2001, 24). Edellä mainittuihin ja lukuisiin muihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa seostamalla alumiiniin muita alkuaineita. Seostettavuus eri käyttökohteita varten mahdollistaa laajan käyttöalueen: alumiinia käytetään yleisesti niin koneenrakennuksessa, rakennuksessa, sähkötarvikkeissa, sisustuksessa ja meriteollisuudessa. (Lukkari, 2001, 27.)

Alumiiniseokset jaetaan standardeissa SFS EN-573 ja SFS EN-1706 valettaviin ja muokattaviin seoksiin. Opinnäytetyö rajataan käsittelemään muokattavia seoksia koska tutkimuskohteena on tankopuristettu alumiini.

4.1 Alumiinien nimikejärjestelmät

Alumiiniseoksille on käytössä standardoitu nimikejärjestelmä, SFS-EN 573. Standardin osissa 1 ja 2 määritetään seoksille kaksi vaihtoehtoista, usein yhdessä käytettyä nimeämistapaa: nelinumeroinen koodi sekä kemialliseen koostumukseen perustuva nimikejärjestelmä. Esimerkkinä numeerisesta ja kemialliseen koostumukseen perustuvasta nimikkeestä on EN AW 6082 [Al Si1MgMn].

Standardissa SFS-EN 573-1 sivulla 6 esitetään nimikejärjestelmän komponentit. Nelinumeroinen nimikejärjestelmä koostuu kirjaimista EN AW XXXX, jossa EN tarkoittaa standardia, A alumiinia, W muokattua alumiinia (wrought) ja XXXX sisältää nelinumeroisen tunnuksen, jonka ensimmäinen numero kertoo pääasiallisen seosaineen. W-kirjaimen tilalla voidaan käyttää myös C-kirjainta, jolloin puhutaan valamiseen tarkoitettun alumiiniseoksen tunnuksesta (SFS-EN 1780-1).

Kemialliseen koostumukseen perustuvassa nimikejärjestelmässä seosaineet ilmoitetaan pitoisuuden mukaan laskevassa järjestyksessä, esimerkkinä EN AW Al Si1MgMn, jossa Al tarkoittaa perusaineen olevan alumiinia sekä pääseosaineiden magnesiumia ja mangaania piin seostuksen ollessa 1 % (SFS-EN 573-2, 1995, 6.)

Yleisemmin käytetty numeerinen nimikejärjestelmä jakautuu niin sanottuihin sarjoihin pääseosaineen mukaan.

Sarja	Pääseosaine
1xxx (1000-sarja)	Alumiinia vähintään 99,00 %
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)	Muut seosaineet
9xxx (9000-sarja)	Käyttämätön sarja

Numeerisen nimikejärjestelmän sarjat (SFS-EN 573-1, 2005, 6.)

Osana alumiinien nimikejärjestelmää toimii myös toimitustilojen tunnuksot jotka määrittävät standardissa SFS-EN 515 ”Alumiini ja alumiiniseokset. Muokatut tuotteet. Tilojen tunnuksot”. Toimitustila kertoo valmistus-, muokkaus- ja lämpökäsittelytilan johon puolivalmiste on jätetty haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi (Lukkari, 2001, 44.)

Toimitustilojen merkinnässä käytetään neljää eri päätunnusta jotka jakautuvat alatunnuksiin:

F-tila Puolivalmisteelle ei ole suoritettu erillisiä lämpökäsittelyjä tai muokkaamista, vaan sen on annettu jäähtyä valmistustilasta huoneenlämpöön ilman erillisiä lujusvaatimuksia

O-tila Tuote on pehmeäksi hehkutettu. Pehmeäksi hehkutus poistaa lämpökäsittelyn ja muokkauslujittamisen vaikutukset, joten tuote palautuu takaisin helposti muovattavaan tilaan.

H-tila Merkintää käytetään muokkauslujittuville, ei-lämpökäsiteltäville seoksille. Kirjaimen jälkeinen kaksinumeroinen numeroyhdistelmä kertoo lujitusasteen sekä mahdollisen lisähehkutuksen.

W-tila Tuote on liuoshehkutettu valmistuksen jälkeen, mutta ei keinovanhennettu. Soveltuu vain lämpökäsiteltäville seoksille. Tuote saavuttaa lopullisen lujutensa vasta vanhettuaan.

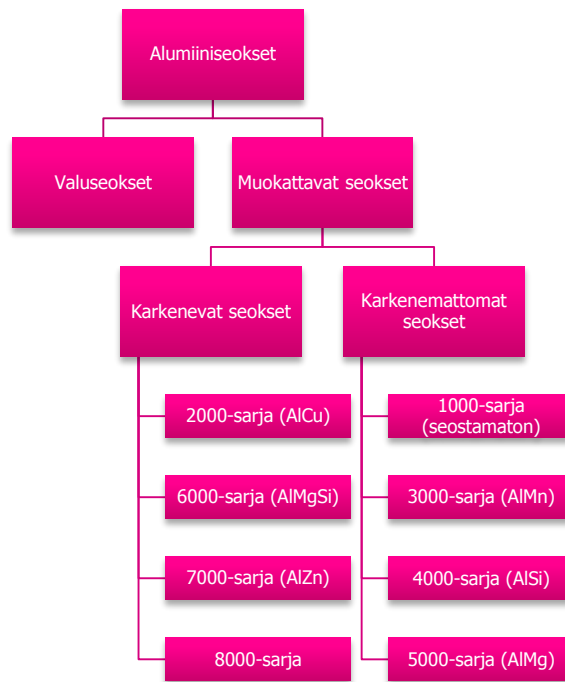
T-tila Tuote on liuoshehkutuksen jälkeen vanhennettu keinotekoisesti tai luonnollisesti stabiiliin tilaan, jolloin saavutetaan parhaat lujuusarvot. T-kirjaimen jälkeinen numerotunnus erittelee tarkemmin käsittelyyn.

(Lukkari, 2001, 44.)

Esimerkkinä kokonaisesta alumiiniseoksen merkinnästä toimitustiloiheen opinnäytetyön kiskoprofiilin seos: EN AW 6082 [Al Si1MgMn] T6, jossa viimeinen kirjainyhdistelmä kertoo seoksen olevan karkaistu, eli liuoshehkutettu ja keinovanhennettu pursotuksen jälkeen.

4.2 Alumiiniseokset

Alumiiniseokset voidaan jakaa standardien mukaan muokattaviin seoksiin ja valuseoksiin, sekä edelleen karkeneviin (lämpökäsiteltävät) ja karkenemattomiin (ei lämpökäsiteltävät) seoksiin kuten kuviossa 1 on esitetty (Lukkari, 2001, 46-51.)



KUVIO 1. Alumiiniseosten luokittelu (Lukkari, 2001, 46-51.)

Muokattavat seokset ovat alumiinilaatuja, joita voidaan työstää kylmänä tai kuumana esimerkiksi pursottamalla ja valssaamalla. Muokattaviin alumiineihin kuuluu niin karkenevia kuin karkenemattomia-kin, muokauslujittuvia seoksia. Valssatuissa tuotteissa käytetään usein muokauslujittuvia seoksia, kun taas pursotetuissa karkenevia. (Huhtaniemi ym., 2006, 55.)

4.2.1 Karkenemattomat seokset

Karkenemattomilla seoksilla tarkoitetaan yleensä muokkauslujittuvia, korroosionkestoltaan hyviä alumiini-mangaani- ja alumiini-magnesiumseoksia. Karkenemattomien seosten lujuusominaisuuksia voidaan parantaa muokkauslujittamalla, esimerkiksi levyjä valssaamalla. Alumiinin lujuus kasvaa myös seosainepitoisuutta kasvattamalla, mutta muokkauslujittuvat seokset eivät karkene lämmön vaikutuksesta (Huhtaniemi ym., 2006, 56 - 57.)

AlMn-seoksia (3000-sarja) käytetään useissa kohteissa niiden hyvän korroosionkeston ja kohtalaisen lujuuden ansiosta, mutta ennen kaikkea niiden erinomaisten muovattavuuden vuoksi. AlMn-seokset ovat yleisiä mm. koneenrakennuksessa, katoissa ja kattiloissa. AlMn-seokset ovat erittäin hyviä myös hitsattavuudeltaan (Huhtaniemi ym., 2006, 57.)

AlMg-seoksia (5000-sarja) käytetään hyvää korroosionkestoa vaativissa kohteissa, kuten merivedessä ja suolapitoisessa ilmassa. Magnesiumpitoisuuden kasvaessa seoksen muokattavuus huononee koska alumiini lujittuu seosainepitoisuuden lisääntyessä. Seokset ovat hitsattavissa 5 % seostukseen asti (Huhtaniemi ym., 2006, 57.)

Karkenemattomiin seoksiin lukeutuu myös seostamaton alumiini. Alumiinia kutsutaan seostamattomaksi tai puhtaaksi, jos se sisältää alle 1 p- % rautaa ja piitä eikä siihen ole lisätty muita seosaineita. Tällöin alumiinin koostumus voidaan ilmaista esimerkiksi käyttämällä tunnistetta Al99,0, Al99,5 tai Al99,7 (Huhtaniemi ym., 2006, 55). Erillistä puhdistuselektrolyysiä käyttäen voidaan valmistaa niin sanottua erittäin puhdasta, Al99,9 %, alumiinia (Koivisto ym., 2008, 164).

Puhdas alumiini on monipuolisesti työstettävissä esimerkiksi hitsaamalla ja muovaamalla, mutta valamiseen se sopii huonosti. Puhdas alumiini on muokkauslujittuvaa. Normaalisti sen lujuus on puhtausteen mukaan 60-106 MPa, mutta kylmämuokkauksen avulla murtolujuus voi nousta jopa 170 MPa:n tasolle (Koivisto ym., 2008, 164). Puhdasta alumiinia käytetään erilaisten tuotteiden säilönnässä ja varastoinnissa, astioissa, koneissa, taloustavaroissa sekä sähkönjohtimissa sen hyvän sähkönjohtavuuden vuoksi (Koivisto ym., 2008, 164).

4.2.2 Karkenevat seokset

Karkenevien alumiiniseosten lämpökäsittelyä kutsutaan erkautuskarkaisuksi. Lämpökäsittelyssä materiaalia lujittavien erkaumien syntyminen vaatii seosaineita, jotka muodostavat yhdisteitä, kuten Mg₂Si:tä (magnesium ja pii) tai Al₂Cu:a (alumiini ja kupari) (Lukkari, 2001, 49-50).

Erkautuskarkaisu on kuvattu tarkemmin luvussa 4.4 tutkittavan seoksen osalta, mutta pääsääntöisesti erkautuskarkaisu koostuu seuraavista vaiheista:

Liutushehkutus

Kappale hehkutetaan korotetussa lämpötilassa, jotta erilliset faasit liukenevat toisiinsa tasapainopiirroksen sallimissa määrin.

Jäähdytys

Hehkutettu kappale jäähdytetään nopeasti huoneenlämpöön, jolloin toisiinsa lienneet faasit eivät ehdi erkautua tasapainopiirroksen mukaiseen tilaan.

Vanhennus

Hehkutettu ja nopeasti sammutettu, ylikylläiseen tilaan jäänyt seos vanhennetaan joko keinotekoisesti tai luonnollisesti eli toisiinsa lienneiden faasien annetaan erkautua hallitusti joko korotetussa lämpötilassa tai huoneenlämmössä. Erkaumien syntymisen myötä alumiini saavuttaa lopullisen lujutensa.

(Koivisto ym.,2008, 166-168.)

Erkautuskarkaistavia seoksia ovat muun muassa 2000-, 6000- ja 7000-sarjat. Pääasiallisina erkaumia muodostavina seosaineina toimivat kupari, magnesium ja pii sekä sinkki (Lukkari, 2001, 49-50). Lämpökäsiteltäviä seoksia käytetään ennen kaikkea pursotetuissa profiileissa helpon pursotettavuutensa ansiosta, sillä muokkauslujittuvat seokset vaativat liikaa voimaa pursotusvaiheessa (Huhtaniemi ym., 68).

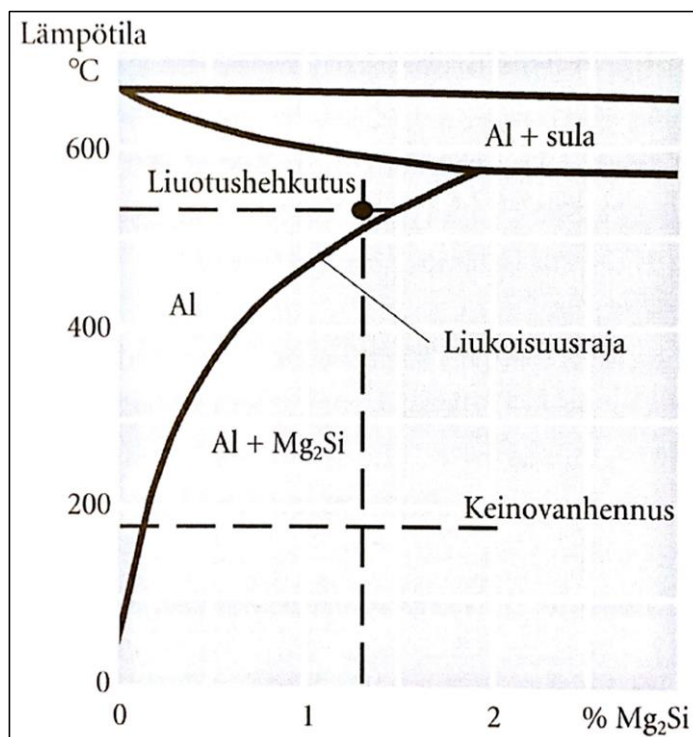
4.3 Tutkimuskohteena olevan seoksen erityispiirteet

XRF-analyysin perusteella profiilin laatu on erittäin todennäköisesti EN-AW 6082. Seos kuuluu 6000-sarjan alumiineihin, eli sen pääseosaineet ovat magnesium ja pii. Seokseen on muista 6000-sarjan alumiineista poiketen lisätty mangaania 0,4-1,0 % (SFS-EN 573-3, 2013, 22).

6000-sarjan alumiineille yhteistä on kohtuullinen lujuus, hyvä työstettävyys sekä hitsattavuus. 6000-sarjan seokset ovat yleisimpiä pursotettavia laatuja, minkä vuoksi ne ovat yleisimpiä kaikissa kohteissa joissa käytetään alumiiniprofiileja, kuten huonekalut, julkisivut ja tikkaat (Huhtaniemi ym., 2006, 70). EN-AW 6082 -seoksen murtolujuus toimitustilan mukaan on jopa 310 N/mm². Suuren lujuutensa vuoksi seos on yleisesti käytetty kuormaa kantavissa rakenteissa, kuten silloissa, antenneissa ja laivanrakennuksessa. (Lukkari, 2001, 50.)

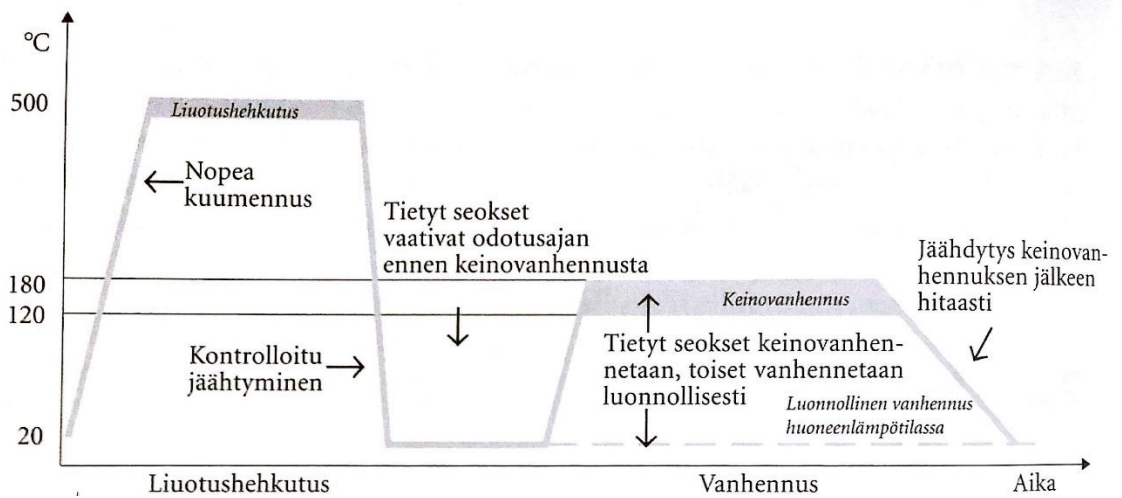
Muiden 6000-sarjan alumiinien tapaan EN-AW 6082 -seos saavuttaa lopullisen lujuutensa lämpökäsittelyn yhteydessä, jossa magnesium ja pii muodostavat materiaalia lujittavia Mg₂Si erkaumia. Hitsaus tapahtuman vaikutusten ymmärtämiseksi on tärkeä käsitellä seoksen erkautuskarkaisua yksityiskohteisesti.

EN-AW 6082 -seoksen pääseosaineet magnesium ja pii muodostavat normaalisti matalissa lämpötiloissa erillisen Mg₂Si-faasin, sillä kuvassa 11 olevan faasidiagrammin mukaan alumiini ei voi liuottaa itseensä huoneenlämmössä Mg₂Si-faasia. Korotetussa lämpötilassa Mg₂Si-faasin liukoisuus lisääntyy faasidiagrammin osoittamalla tavalla. Kuvaajasta nähdään että esimerkiksi 400 °C lämpötilassa alumiini liuottaa itseensä maksimissaan noin 0,6 % Mg₂Si-partikkeleita (Lukkari, 2001, 16-17.)



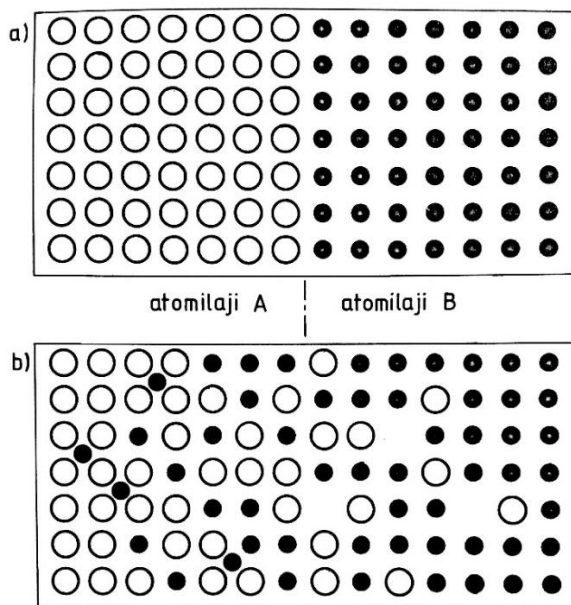
KUVA 11. AlMgSi-seoksen faasidiagrammi (Huhtaniemi ym., 2006, 58.)

Kuten muidenkin karkenevien alumiinilaatujen, EN-AW 6082 laadun lujittaminen lämpökäsittelmällä koostuu kuvan 11 vaiheista. Kunkin vaiheen tarkka lämpötila ja pitoaika määräytyvät käsiteltävän seoksen mukaan (Huhtaniemi ym., 2006, 96.)



KUVA 12. Lämpökäsittelyn vaiheet (Huhtaniemi ym., 2006, 96.)

Liuotushehkutuksessa lämpötilan kohoamisen seurauksena Mg_2Si -faasin liuetessa tasapainopiirroksen mukaisina määrinä alumiiniin muodostuu niin sanottu jähmeä liuos (Lukkari, 2001, 16). Jähmeässä liuoksessa kahden toisiinsa liukenevan faasin atomit ovat levittäytyneet tasaisesti muodostaen yhteisen faasin (Koivisto ym., 2008, 166).



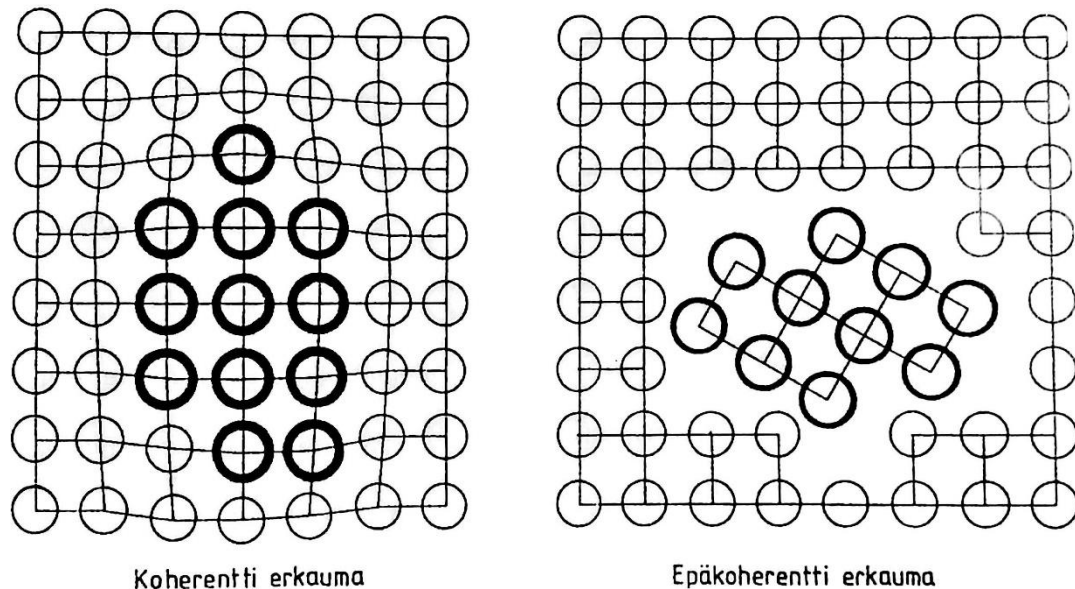
KUVA 13. Kahden erillisen faasin yhdistyminen jähmeäksi liuokseksi diffuusion avulla (Koivisto ym., 2008, 61.)

Liuotushehkutuksen jälkeen seos jäähdytetään nopeasti, jolloin toisiinsa liuenneet faasit eivät ehdi erkautua toisistaan vaan Mg_2Si -partikkelit jäävät liuenneeksi alumiinifaasiin. Tällöin Mg_2Si -faasia on perusaineeseen liuenneena enemmän, kuin tasapainopiirroksen mukaan olisi mahdollista. Sammutuksen jälkeistä tilaa kutsutaan ylikylläiseksi tilaksi (Koivisto ym., 2008, 167.)

Sammuttamisen jälkeen seos vanhennetaan. Vanhentamisessa ylikylläiseen tilaan jääneessä liuoksessa faasit erkautuvat toisistaan. Syntyneillä erkaumilla on alumiinia lujittava vaikutus. Vanheneminen voi tapahtua joko luonnollisesti tai keinovanhentamalla korotetussa lämpötilassa (Huhtaniemi ym., 2006, 96.)

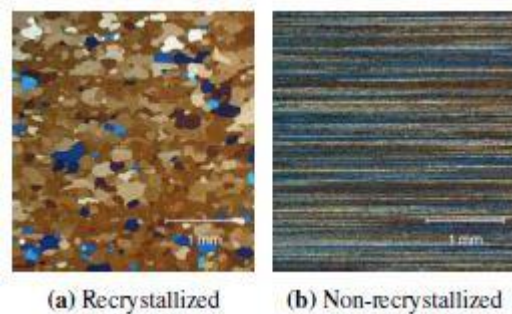
Luonnollinen vanheneminen tapahtuu huoneenlämmössä. Taipumus luonnolliseen vanhenemiseen riippuu merkittävästi alumiinin seosaineista ja -pitoisuudesta. AlZnMg-seokset lujittuvat 6000-sarjan alumiineja enemmän luonnollisesti vanhenemalla usean kuukauden ajan sammutushetkestä, kun taas EN-AW 6082 laatu saavuttaa stabiilin tilan muutamassa päivässä. Tämän jälkeen vanhenemista ei enää tapahdu huoneenlämmössä (Huhtaniemi ym., 2006, 97.)

Lopullinen lujuus EN-AW 6082 seokselle saadaan keinovanhentamalla. Luonnollisen ja keinovanhenemisen yhteydessä Mg_2Si -faasi erkautuu ensin omaksi faasikseen mutta pysyy kuitenkin osana alumiinin omaa hilarakennetta. Tällaista hallitussa vanhenemisessä tuotettua erkaumaa kutsutaan koherentiksi erkaumaksi. Koherenteilla erkaumilla on suurin lujittava vaikutus lämpökäsittelyn jälkeen. Mikäli seosta vanhennetaan liikaa (ns. ylivanheneminen), erkaumat muuttuvat epäkoherenteiksi. Epäkoherentti erkauma muodostuu kun erkauma järjestyy omaksi kiteekseen ja leikkautuu irti perusaineen hilarakenteesta. Tällöin lujittava vaikutus on huomattavasti pienempi, kun dislokaatioiden liike etenee normaalisti raerajoja pitkin. Kuvassa 14 on esitetty koherentin ja epäkoherentin erkauman ero (Koivisto ym., 2008, 166.)



KUVA 14. Koherentti ja epäkoherentti erkauma (Koivisto ym., 2008, 167.)

EN-AW 6082 -seoksen erottaa muista 6000-sarjan alumiineista mangaaniseostus. Mangaanin seostaminen lisää alumiinin lujuutta muuttamalla sen kiderakenteen syymäiseksi kuumana muovatuilla kappaleilla (esimerkiksi tankopuristus). Mangaani estää alumiinin kiderakenteen rekristallisaation puristusvaiheessa (Breivik, 2013, 5.)



KUVA 15. Mangaaniseostuksen vaikutus kiderakenteeseen
a) EN-AW 6063 b) EN-AW 6082 (Breivik, 2013, 5.)

Kuvassa 16 on esitetty yleisimpien alumiiniseosten hehkutuslämpötiloja ja pitoaikoja, joista tärkeimpänä EN-AW 6082 seoksen liuoshehkutuslämpötila 535 °C ja keinovanhennuslämpötila 175 °C / 8 h. Taulukon lisäksi raaka-ainekäsikirjassa todetaan että vaihtoehtoinen pitoaika keinovanhennuksessa on 180 °C / 5 h (Huhtaniemi ym., 2006, 98.)

Nimike EN AW-	Pehmeäksi- hehkutus °C	Lämpötila ja aika		Luonnollinen vanhennus vrk	Keino- vanhennus °C h	
		Liutos- hehkutus °C	Sammutus- väliaine			
Karkenemattomat seokset						
1070A	Al99,7	380–450				
1050A	Al99,5(A)	380–450 ⁶⁾				
1350	E-Al99,5	380–450				
1200	Al99,0	380–450				
3103	AlMn1	450–520				
3003	AlMn1Cu	450–520				
3005	AlMn1Mg0,5	380–450	} Lujuutta ei voida lisätä lämpökäsittelmällä			
3004	AlMn1Mg1	380–450				
5005	AlMg1	380–450				
5049	AlMg2Mn0,8	380–450				
5052	AlMg2,5	380–450				
5754	AlMg3	380–450				
5083	AlMg4,5Mn0,7	410–450				
Karkenevat seokset						
2011	AlCu6BiPb	380–420		510 ± 5	H ₂ O ≤ 40 °C	5 175 ± 5 6
2014	AlCu4SiMg	380–420		505 ± 5	H ₂ O ≤ 40 °C	5 160 ± 3 20 ± 2
					175 ± 5 10	
6005	AlSiMg	380–420	530 ± 10	2°C/s	2 175 ± 5 8 ³⁾	
6005A	AlSiMg(A)	380–420	530 ± 10	H ₂ O ≤ 40 °C (ilma)	2 175 ± 5 8 ⁴⁾	
6060	AlMgSi	380–420	510 ± 10	ilma	2 175 ± 5 8 ⁴⁾	
6063	AlMg0,7Si	380–420	510 ± 10	ilma 1°C/s	2 175 ± 5 8 ³⁾	
6063A	AlMg0,7Si(A)	380–420	530 ± 10		2 175 ± 5 8	
6082	AlSi1MgMn	380–420	535 ± 10	H ₂ O ⁸⁾ 4 °C/s	2 175 ± 5 8 ³⁾	
6101	AlMgSi	380–420	530 ± 10		2 175 ± 5 8	
6463	AlMg0,75Si(B)	380–420 ⁷⁾	510 ± 10 ⁷⁾		2 175 ± 5 8	
7020	AlZn4,5Mg1	400–420 ⁵⁾	480 ± 20		30 120 ± 5 24 ¹⁾	
7021	AlZn5,5Mg1,5	400–420 ⁵⁾	460 ± 10	9)	30 120 ± 5 2 ¹⁾ , 10)	
7075	AlZn5,5MgCu	400–420	465 ± 5		- 120 ± 5 24	

KUVA 16. Alumiiniseosten lämpökäsittelyjen lämpötilat ja pitoajat (Huhtaniemi ym., 2006, 98.)

5 ALUMIINIEN HITSAAMINEN JA HITSATTAVUUS

5.1 Yleisimmät hitsausprosessit

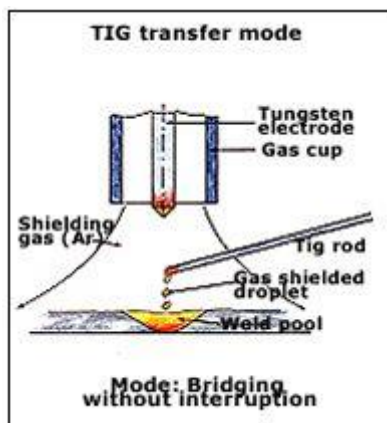
Alumiinit ovat yleisesti hitsattavissa lukuisilla kaari- ja puristushitsausmenetelmillä, mutta opinnäyte-työssä keskitytään TIG-hitsausprosessiin.

Alumiini on hitsattavissa TIG-, MIG-, plasma-, puikko-, kaasu-, kitka- sekä liimahitsausprosessilla (Lukkari, 2001, 98). Lähes kaikki muut hitsausprosessit ovat korvautuneet aikojen saatossa TIG- ja MIG-hitsauksella (Huhtaniemi ym. 2006, 193). Näistä kahdesta TIG-hitsaus on tärkeä prosessi esimerkiksi ohuiden aineenpaksuuksien, lyhyiden hitsien ja putkien hitsaamisessa sekä hyvää ulkonäköä vaativissa hitseissä (Huhtaniemi ym. 2006, 103), kun taas MIG-hitsauksella voidaan hitsata suurempia aineenpaksuuksia ja tuottavuus on huomattavasti parempi (Huhtaniemi ym., 2006, 99).

5.2 TIG-hitsaus

TIG-hitsaus on kaasukaarihitsausprosessi. TIG-hitsauksessa hitsattavan kappaleen ja polttimessa olevan sulamattoman elektrodin välillä palaa valokaari. Valokaarta ja hitsaustapahtumaa suojaa inertti suojakaasu, yleensä argon, joka estää hitsattavan kappaleen ja polttimessa sijaitsevan elektrodin hapettumisen (ESAB, 2017-01-04.)

TIG-hitsauksessa hitsaimessa olevan elektrodin ja työkappaleen välillä palava valokaari sulattaa perusaineen. Hitsaus suoritetaan työntävällä liikkeellä, ja tarvittaessa lisäainetta syötetään hitsiin erillisellä lisäainelangalla valokaaren sivusta (Lukkari, 2001, 102-103.)



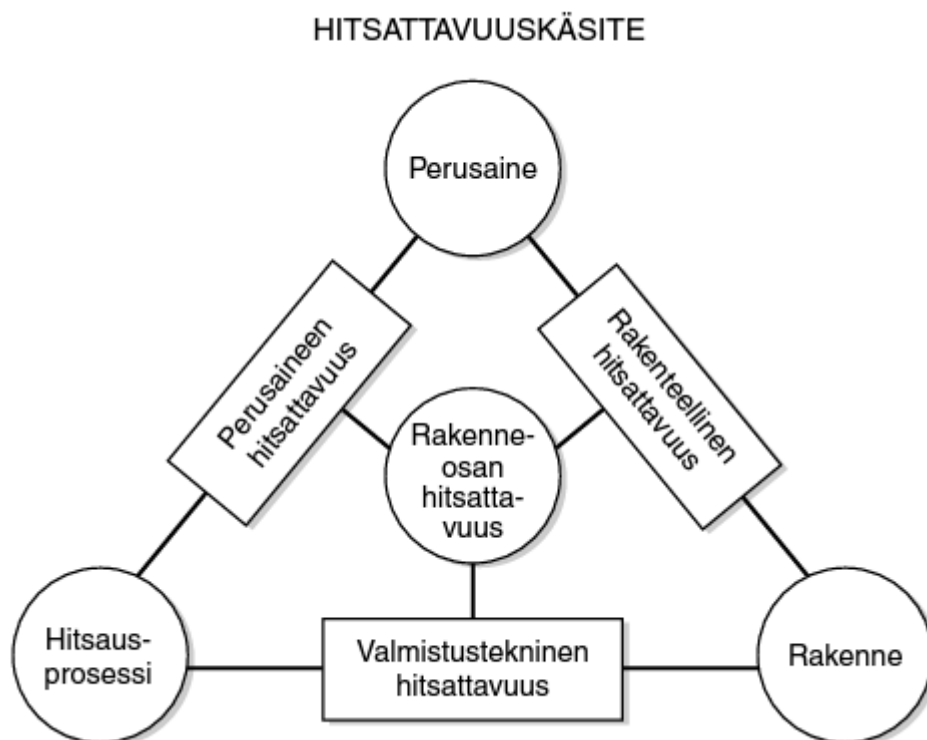
KUVA 17. TIG-hitsauksen periaatekuva (ESAB, 2017-01-04.)

TIG-hitsauksen etuja muihin prosesseihin nähden ovat muun muassa hyvä sulan ja tunkeuman hallinta, mahdollisuus hitsata ilman lisäainetta, erittäin ohuiden aineenpaksuuksien hitsausmahdollisuus, alumiinin hitsauksessa valokaaren hyvä pintapuhdistuskyky, roiskeettomuus sekä erilaiset virranhallintamahdollisuudet (Lukkari, 2001, 102-103.)

TIG-hitsauksessa voidaan käyttää teräksen hitsauksessa yleisesti käytetyn tasavirran lisäksi vaihtovirtaa, joka on käytännössä edellytys alumiinin hitsaamiselle. Vaihtovirralla (AC) hitsatessa positiivisella puolijaksolla on oksidikerrosta rikkova ja pintaa puhdistava vaikutus, kun taas negatiivinen puolijakso käytännössä sulattaa perusainetta suuremman tunkeuman vuoksi ja mahdollistaa varsinaisen hitsaamisen. Vaihtovirtahitsauksessa positiivisen ja negatiivisen puolijakson välistä suhdetta säätämällä voidaan vaikuttaa tunkeumaan ja valokaaren pinnanpuhdistuskykyyn, joka on erityisen tärkeää alumiinia hitsattaessa (Lukkari, 2001, 102-103.)

5.3 Alumiiniseosten hitsattavuus

Hitsattavuus –käsitteen arvionnissa otetaan yleensä huomioon valmistettava tuote kokonaisuudessaan mukaan lukien rakenteelle asetetut vaatimukset, perusaineen ominaisuudet ja valmistuksen asettamat vaatimukset sekä rajoitukset (Lepola ym., 2005, 28.)



KUVA 18. Hitsattavuuskäsite (Lepola ym., 2005, 28.)

5.3.1 Rakenteellinen hitsattavuus

Alumiinin hitsauksessa rakenteellisen hitsattavuuden osalta on otettava huomioon alumiinin terästä suurempi lämpölaajeneminen sekä hitsin ympärillä usein tapahtuva perusaineen lujuuden menetys. Lujuuden menetystä ei tapahdu pehmeässä toimitustilassa olevaa alumiinia hitsatessa, mutta muokkaamalla tai lämpökäsittelmällä lujitettu alumiini pehmenee lämpövaikutusalueelta. Lujuuden pienenemisen vuoksi hitsit on sijoitettava vähiten rasitettuihin kohtiin sekä käytettävä mitoituksessa kompensoituja lujuusarvoja (Lukkari, 2001, 68-69). Lujuuden pienenemistä käsitellään tarkemmin alumiinin perusaineen hitsattavuuden yhteydessä.

Rakenteelliseen hitsattavuuteen vaikuttaa myös alumiinin terästä huomattavasti suurempi lämpölaajenemiskerroin. Lämpölaajenemisen vuoksi alumiini "vetelee" huomattavasti enemmän, mikä aiheuttaa suurempia muodonmuutoksia sekä rakenteellisia jännityksiä (Lukkari, 2001, 74). Tutkimuskohteena olevan kiskon osalta lämpölaajeneminen tai muodonmuutokset ei ole kuitenkaan merkittävä tekijä, sillä kisko pääsee elämään vapaasti pituussuunnassa.

5.3.2 Perusaineen hitsattavuus

Perusaineen hitsattavuuden osalta alumiiniin liittyy tiettyjä haasteita. Ensimmäinen ja yksi tärkeimmistä kaikkia alumiiniseoksia hitsatessa huomioitavista asioista on puhtaus. Alumiiniin syntyy herkästi vedyn aiheuttamia huokosia. Alumiini on puhdistettava mahdollisimman hyvin rasvoista ja muista epäpuhtauksista. Puhdistukseen kuuluu myös alumiinin pinnalle muodostuvan oksidikerroksen (Al_2O_3) mekaaninen poistaminen. Oksidikerroksella on niin korkea sulamislämpötila, ettei se sula hitsaustapahtumassa, vaan muodostaa hitsiin sulkeumia ja vetyhuokosia mikäli siihen on sitoutunut myös vetyä. Käytännössä hitsaustapahtumaan lisäaineessa tai perusaineessa tuodut epäpuhtaudet aiheuttavat hitsiin huokosia (AGA, 2017-01-10.)

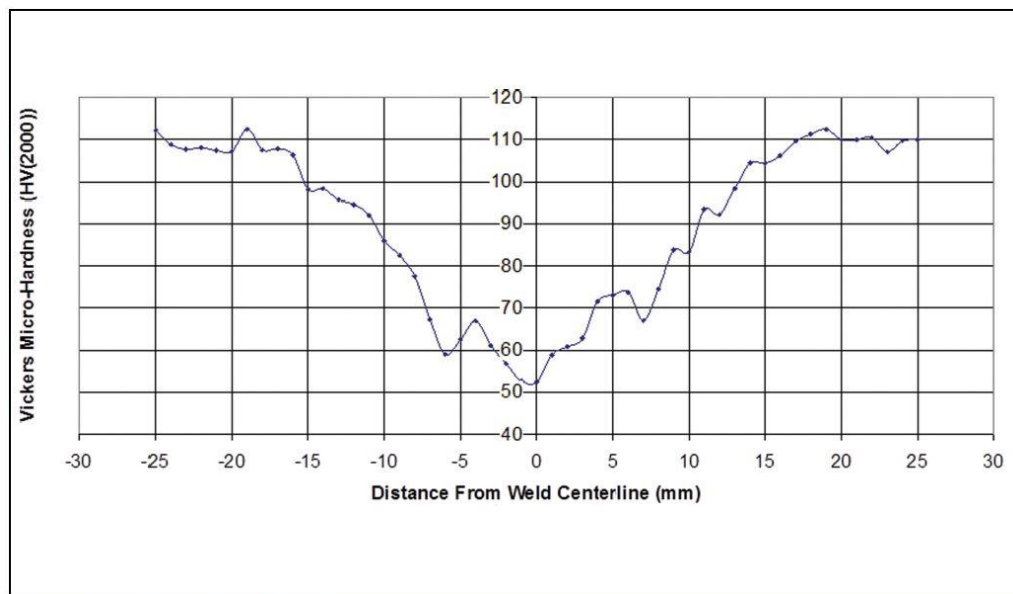
Perusaineen hitsattavuuteen vaikuttaa edellä mainittujen yhteisten tekijöiden lisäksi erittäin paljon käytetty alumiiniseos sekä lisäaine ja näiden yhteensopivuus. Alumiiniseoksesta ja lisäainevalinnasta riippuvaisia hitsausvirheitä ovat erilaiset halkeamat sekä hitsatun perusaineen lujuuden laskeminen (Lukkari, 2001, 5.)

Hitsattavuuden yhteydessä hitsausliitoksen lujuudella tarkoitetaan liitoksen lujuutta suhteessa perusaineen alkuperäiseen lujuuteen (Lukkari, 2001, 67). Opinnäytetyössä ei varsinaisesti ole kyse hitsausliitoksesta, mutta hitsilisäaineen ja perusaineen lujuus ovat keskeisiä asioita tutkimusongelmassa. Lujuuden pieneneminen koskee niin lämpökäsittelmällä kuin muokkaamalla lujitettuja seoksia. Säkupella käytetty monorail-rata on lämpökäsiteltyä seosta joten seuraavassa käsitellään tarkemmin lämpökäsittelmällä lujitettujen seosten lujuuden pienenemistä.

Lämpökäsitellyistä alumiineista AlMgSi-seosten (joihin myös opinnäytetyön materiaali kuuluu) pehmenemismekanismi on kuvattu opinnäytetyön luvussa 4.4. Käytännössä muutosvyöhykkeellä tapahtuu

erkaumien kasvua eli ylivanhenemista. Näiden seosten lujuus on perusaineen osalta palautettavissa uudelleen liuoshehkuttamalla ja keinovanhentamalla. Lämpökäsiteltävillä AlZnMg-seoksilla on taipumus vanhentua luonnollisesti lähes alkuperäisen lujuuden tasolle huoneenlämmössä. (Lukkari, 2001, 68-69.)

Lämpökäsiteltyjen seosten lujuuden pieneneminen on riippuvainen lämmöntuonnista sekä esikuumenus- ja välipalkolämpötiloista (Lukkari, 2001, 68). American Welding Societyn julkaisemassa tutkimuksessa todetaan sivulla 306, että hitsin lujuus (MPa) ja kovuus (HV) korreloivat voimakkaasti keskenään. Kuvassa 19 on esitetty samassa artikkelissa julkaistu kuvaaja josta selviää seoksella 6061-T651 hitsin ja perusaineen kovuus suhteessa hitsin keskilinjaan.



KUVA 19. Hitsiliitoksen kovuus suhteessa etäisyyteen hitsin keskilinjasta (Stathers ym., 2014, 306.)

Lujuuden menettämisen lisäksi yleisimpiä perusaineen hitsattavuuteen liittyviä hitsausvirheitä ovat erilaiset kuumahalkeamat. Halkeilutaipumus riippuu voimakkaasti alumiinin seosainepitoisuudesta ja -tyypistä sekä suuresta lämpölaajenemiskertoimesta johtuvista rakenteellisista jännityksistä (Lukkari, 2001, 61.)

Lukkarin teoksessa "Alumiinit ja niiden hitsaus" luetellaan sivulla 61 yleisimmät alumiinin hitsauksessa esiintyvät halkeamatyypit:

Kuumahalkeama

Kuumahalkeama syntyy kun raerajoilla olevat matalammassa lämpötilassa sulavat yhdisteet ovat yhä sulia muun materiaalin ollessa jähmettynyt.

Jähmettymishalkeama

Jähmettymishalkeama syntyy hitsisulan jähmettymisen yhteydessä.

Sulamishalkeama

Sulamishalkeama syntyy kun matalissa lämpötiloissa jähmettyvät yhdisteet sulavat.

Kylmähalkeama

Kylmähalkeama syntyy matalissa lämpötiloissa kiinteässä tilassa olevaan materiaaliin.

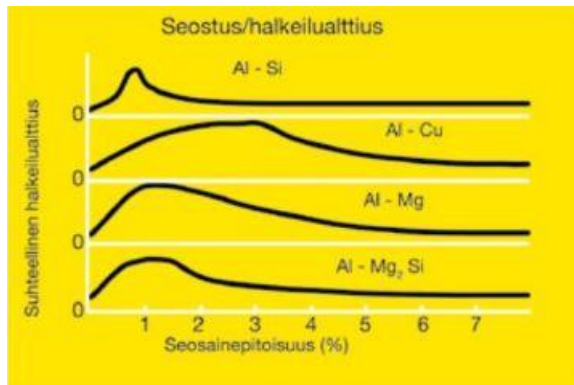
Vetyhalkeama

Vetyhalkeama syntyy vedyn aiheuttamana kiinteässä tilassa olevaan materiaaliin.

Kutistumishalkeama

Kutistumishalkeama syntyy kutistumisen estyessä kiinteässä tilassa olevaan materiaaliin, kun materiaalin muodonmuutoskyky tai poikkipinta-ala ei ole riittävä.

Halkeilutaipumukseen voidaan vaikuttaa jossain määrin rakenteellisten jännistyten hallinnalla, mutta ennen kaikkea yhteensopivien perus- ja lisäaineen valinnalla. Puhtaan alumiinin jähmettyessä samanaikaisesti 660 °C lämpötilassa halkeiluriskiä ei juurikaan esiinny. Myös runsaasti seostetuilla alumiineilla halkeilutaipumus on vähäistä, sillä seosainepitoisuuden kasvaessa jähmettyminen tapahtuu pitkällä aikavälillä laajan puuroalueen vuoksi. Kuitenkin niukasti seostetuilla alumiineilla, joita useimmat hitsattavat alumiinit ovat, on kohonnut halkeiluriski epätasaisen jähmettymisen vuoksi. Hitsisula jähmettyy mikrosuotautumisesta johtuvien koostumuserojen vuoksi epätasaisesti ja viimeisenä raerajoilla. Sisäiset jännitykset repivät sulana olevat raerajat auki, jolloin syntyy halkeama (Lukkari, 2001, 62.)



KUVA 20. Alumiiniseoksen vaikutus kuumahalkeilu-
taipumukseen (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys, 2012, 25.)

Kuvasta 20 nähdään, että kaikkien seosten halkeiluallttius on suurimmillaan 1-2 % seosainepitoisuuk-
silla. Tämän vuoksi lisäainevalinta tulisi tehdä niin, että hitsin lisäaineen laimentuminen huomioon
ottaen seosainepitoisuus olisi suurempi kuin 2 % (Lukkari, 2001, 63.)

Tutkittava seos, kuten muutkin AlMgSi seokset, on altis kuumahalkeilulle, minkä vuoksi hitsatessa on
käytävä runsasseosteista lisäainetta (Lukkari, 2001, 64). Runsa-seosteisen lisäaineen käyttö auttaa
pitämään laimenneen hitsiaineen seosainepitoisuuden yli 2 %:n tasolla ja pienentää sulamishal-
keamien esiintymistodennäköisyyttä lämpövaikutusalueella. Mitä suurempi seosainepitoisuus lisäai-
neessa on, sitä matalampi on sen jähmettymislämpötila. Kun lisäaine jähmettyy viimeisenä perusai-
netta ja sen raerajoja matalammassa lämpötilassa jähmettymishalkeamia ei pääse syntymään. AlSi-
lisäaineen parempi hitsattavuus 6000-sarjan alumiineilla johtuu Si-seosteisen lisäaineen matalam-
masta jähmettymislämpötilasta verrattuna Mg₅-seosteiseen lisäaineeseen – lisäaine jähmettyy var-
memmin viimeisenä (Lukkari, 2001, 65).

Hitseissä esiintyy myös kraaterihalkeamia, jotka saavat alkunsa hitsin lopetuskohtaan syntyvästä
imuontelosta. Imuontelo johtuu tavallisesti väärästä hitsauksen lopetustavasta (Lukkari, 2001, 65.)



KUVA 21. Kraaterihalkeama hitsaustekniikan
projektiin liittyvässä koesauvassa (Toivanen, 2016.)

5.4 Lisäaineet

Alumiinin hitsauksessa käytetyt lisäaineet luokitellaan standardissa SFS-EN ISO 18273: "Hitsausaineet. Hitsauslangat ja hitsaussauvat alumiiniin ja alumiiniseosten hitsaukseen. Luokittelu". Kuten alumiiniseostenkin, lisäainelankojen tunnusjärjestelmä on kaksiosainen. Standardi määrittää jokaiselle lisäainelle numeerisen sekä kemialliseen koostumukseen perustuvan tunnuksen. Esimerkiksi lisäainelangan tunnuksessa S Al 4043 (AlSi5) merkintä S kertoo langan tuotemuodon (umpilanka), Al 4043 kertoo kyseessä olevan alumiinilangan, jonka tunnus on 4043, ja merkintä AlSi5 on vaihtehtoinen tunnus, joka ilmoittaa suoraan kemiallisen koostumuksen.

Alumiiniseosten tapaan lisäainelankojen tunnuksot määräytyvät standardissa käytetyn pääseosaineen mukaisesti:

Sarjan tunnus	Pääseosaine	Sarjaan kuuluvien lisäaineiden lukumäärä
1000-sarja	Alumiini-niukkaseosteinen	6 kpl
2000-sarja	Alumiini-kupari	1 kpl
3000-sarja	Alumiini-mangaani	1 kpl
4000-sarja	Alumiini-pii	13 kpl
5000-sarja	Alumiini-magnesium	15 kpl

Vaikka standardissa on määritetty kaiken kaikkiaan 36 erilaista lisäainetta, käytännössä niiden käyttö rajoittuu muutamiin yleisimpiin lisäaineisiin erikoissovelluksia lukuun ottamatta (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys, 2012, 26). Lisäainevalikoiman rajoittuneisuus tuli käytännössä ilmi opinnäytetyötä tehtäessä, sillä koehitsejä varten etsittiin AlMg₄,5Mn-seosteista lisäainetta pohjois-savolaisilta jälleenmyyjiltä ja suurimmilta lisäainevalmistajien maahantuojilta, mutta käytännössä jälleenmyyjien varasto-ohjelmissa oli ainoastaan Mg₅- ja Si₅-seosteisia lisäaineita. AlMg₄,5Mn-seosteisia lisäainelankoja oli kuitenkin saatavissa erään suuren tukkurin keskusvarastolta toimitusmyyntinä.

Oikean lisäaineen valintaan vaikuttavat muun muassa hitsattavan aineen kuumahalkeilutaipumus, lujuus-, korroosionkestävyys- ja jälkikäsiteltävyysvaatimukset sekä hitsattavuus yleisesti (Lukkari, 2001, 182). Käytännössä yleisohjeena on, että karkenemattomat seokset hitsataan perusaineen kaltaisella seoksella (5000-sarja) ja karkenevat seokset (6000-sarja) lisäaineena AlMg₅ tai AlSi₅. Hitsattavan kohteen vaatimustason mukaan voidaan valita hitsausaine tarkemmin (Hitsausteknillinen yhdistys, 2012, 26).

Standardissa SFS-EN 1011-4 annetaan lisäainevalintasuosituksia eri perusaineille eri ominaisuuksia painottaen. Taulukkoa luettaessa on otettava huomioon, että suositukset pätevät vain alle +50 °C lämpötiloissa, sillä korkeammissa lämpötiloissa tietyt lisäaineet altistuvat jännityskorroosiolle (Lukkari,

2001, 179). SFS-EN1011-4-standardissa sivuilla 32 ja 34 on esitetty lisäainevalintataulukot joista voidaan etsiä suositusten mukainen lisäaine.

6 KOEJÄRJESTELYT

Alustavan suunnitelman mukaan ongelmaa oli tarkoitus tutkia tekemällä koehitsejä eri lisäaineita ja lämpökäsittelyä käyttäen. Opinnäytetyön teoriaosuutta koostettaessa havaittiin, että varsinkaan pelkällä lisäainevalinnalla ei hitsin lopulliseen lujuuteen voida todennäköisesti juurikaan vaikuttaa ja lämpökäsittelyjenkin vaikutus jäänee pieneksi. Teoriatietoon perustuen voidaan palauttaa perusaineen lujuus, mutta ei hitsiaineen. Lisäainevalintaan vaikuttaa varsinkin 6000-sarjan alumiineja hitsattaessa enemmänkin lisäaineen sopivuus hitsattavuuden näkökulmasta voimakkaan kuumahalkeilutaipumuksen vuoksi.

Opinnäytetyön tavoitteena oli löytää mahdollisimman kovan ja lujan pinnan tuottava korjausmetodi. Lisäainevalinnassa ja lämpökäsittelyssä keskityttiin lujuuden maksimoimiseen eikä halkeilualttiutta otettu varsinaisesti huomioon koska kyse ei ole liitoshitsistä, eikä kokemuseräisesti aiemmissä korjaushitseissä ole esiintynyt halkeilua. Oletettavasti heikohkoksi jäävän korjaushitsin vuoksi tutkimusta laajennettiin pinnoittamiseen ja toista materiaalia olevan insertin käyttöön.

Opinnäytetyötä tehdessä kartoitettiin muutamia alumiinille tarjottavia pinnoitusvaihtoehtoja, mutta lopulta kustannustehokkaaksi osoittautui yleisin pinnoitustapa, anodisointi. Profiiliin sopivan insertin varsinainen suunnittelu olisi laajentanut opinnäytetyön aihetta liikaa, mutta Sakupe OY:n varastosta löytyi tyhjen säkkien palautusradalle tarkoitettu tehdasvalmisteinen korjausinsertti, jonka käyttöä täysien säkkien varastoradalle arvioitiin myös.

Luonnollisen vanhenemisen vaikutusta ei voitu mitata aikataulujen vuoksi, sillä EN-AW 6082 –seos stabiloituu huoneen lämmössä noin 2 vuorokauden kuluessa liuoshehkutuksesta (Huhtaniemi ym., 2006, 98). Kovuusmittaukset olisi pitänyt saada suoritettua välittömästi hitsauksen jälkeen.

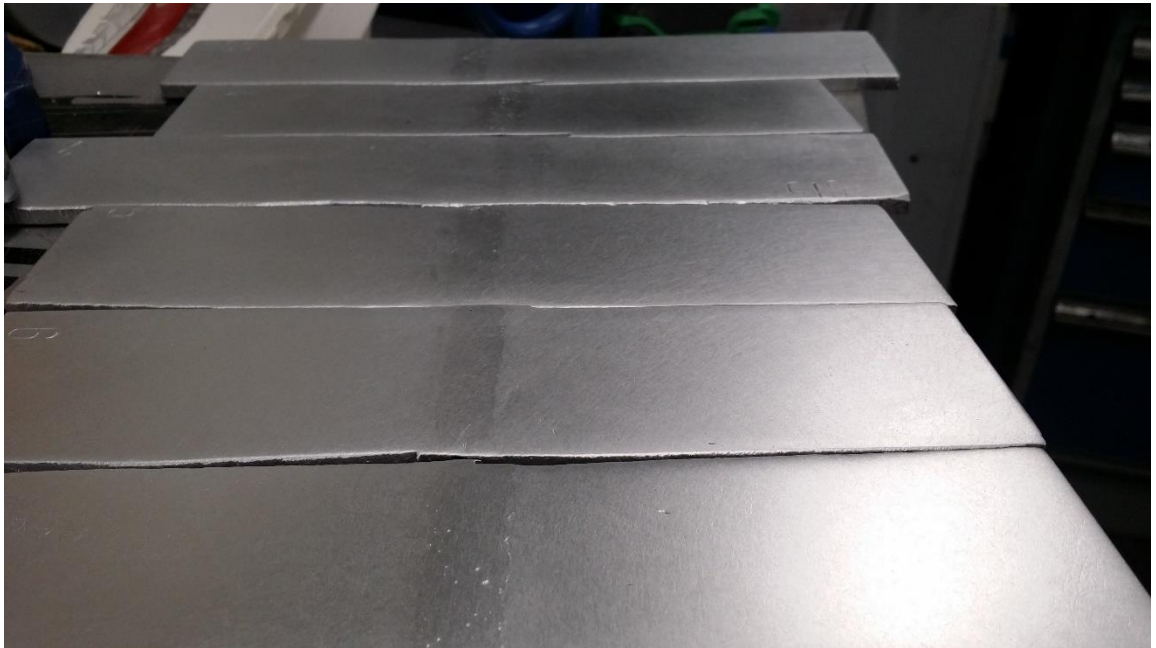
6.1 Koekappaleet

Koekappaleiksi otettiin Sakupe OY:n varastosta tarvittava määrä valmiiksi noin 200 mm:n mittaiseksi katkaistuja paloja. Näytekappaleisiin jyrättiin Savonia-ammattikorkeakoulun konetekniikan laboratoriossa kuvassa 23 näkyvät urat, jotta täyttöhitsille saatiin tarpeeksi tilavuutta. Ura on pystysuunnassa jotta kovuusmittaukset voidaan suorittaa kiskon suuntaisesti lämpövaikutusalueen koon selvittämiseksi. Urat on jyrätty R9-pallojyräsimellä 1,5 mm syvyyteen, ja ne ovat noin 40 mm pitkiä. Railon tilavuudeksi muodostuu noin 405mm³ jolloin railon täyttämiseen tarvitaan 2,4 mm paksuista lisäainelankaa 170 mm pituudelta.



KUVA 22. Koekappaleeseen jyrssitty ura (Toivanen, 2017.)

Hitsattavien näytekappaleiden osalta jyrssityt urat täyttöhitsattiin, minkä jälkeen kiskoprofiilin keskeltä sahattiin hitsin sisältävä suorakaiteen muotoinen, tasainen alue irti. Hitsikupu hiottiin perusaineen korkoon paineilmatoimisella epäkeskohiomakoneella, ensin karkeammalla hiomapaperilla ja tämän jälkeen pinta viimeisteltiin kiillotuslaikalla jotta kovuusmittauksien teko on onnistuu. Työkappaleen lämpötilaa tarkkailtiin koko hiomisprosessin ajan, jotta se säilyi kädenlämpöisenä lämpövaikutusten välttämiseksi.



KUVA 23. Hiottuja koekappaleita (Toivanen, 2017.)

Hiomisen yhteydessä muutamista hitseistä paljastui melko runsaasti huokosia, joita oli väisteltävä kovuusmittausvaiheessa.

6.2 Aineenkoetusmenetelmät

Koekappaleille suoritettiin Vickersin kovuusmittauksia HV5-menetelmällä hitsin keskilinjasta sivulle päin 2 mm välein. Tavallisesti hitsiliitoksien kovuuksia mitataan hitsin poikkipinnasta, mutta opinnäytetyössä tutkitaan pääasiassa pintakerroksen kestävyyttä joten luontevinta on mitata kovuus ongelmakohdasta eli pinnasta. Mittauspisteiden paljouden vuoksi mittaukset suoritettiin vain hitsistä katsottuna yhteen suuntaan. Tulossiossa samat tulokset on peilattu myös hitsin toiselle puolelle kuvaa-ajan selkeyden lisäämiseksi. Mittaukset lopetettiin etäisyydellä jossa kovuus stabiloituu perusaineen kovuuden tasolle.

Kovuusmittauksen lisäksi perustaineen alkuperäinen lujuus selvitettiin sahaamalla perusaineesta säännöllisen suorakaiteen muotoinen alue ja tekemällä tälle kappaleelle vetokoe. Näin saatiin selvitettyä perusaineen lujuus (MPa).

6.3 Lisäainevalinnat ja koemuuttajat

Lisäainevalinnoissa lähdettiin 6000-sarjan voimakkaasta kuumahalkeilutaipumuksen huomioimisesta. Taipumuksen vuoksi lisäainevalinnat oli tehtävä runsasseosteisista langoista, jotta perusaineen kanssa laimentuessaan seosainepitoisuus ei olisi kriittisellä alueella (kuva 20). Hitsauslankojen lujuuksia vertailtiin lisäainevalmistajien taulukoista, sekä pohdittiin lisäaineiden mahdollisten metallurgisten ominaisuuksien hyödyntämistä (mm. muokkauslujittaminen).

Lukkarin kirjassa (2001) todetaan sivulla 179, että erkautuskarkaistavia lisäainelankoja kehitetään jatkuvasti, ja markkinoilla olisi jo lisäainelanka tyyppiltään Al 4643 (AlSi4Mg). Standardi SFS-EN ISO 18273 tuntee myös lisäaineen, mutta sitä ei ollut saatavilla yhdeltäkään lisäainevalmistajan edustajalta Suomessa. Allaolevat lisäainelankojen lujuudet ovat Elga weldingin lisäainekatalogin taulukkoarvoja.

Kovuusmittaukset suoritettiin seuraaville näytekappaleille:

1) **Hitsaamaton, käsittelemätön perusaine**

Vertailupohjaksi kovuusmittaukset suoritettiin täysin käsittelemättömälle kiskoprofiilin osalle.

2) **Al 4043 (AlSi5) käsittelemätön**

Al 4043 -lisäaineella hitsattu koepala. Lisäainevalmistajien lujuustaulukoihin perustuen ei ole mitään syytä olettaa, että ko. lisäaineella hitsin lujuus olisi muita parempi. Lisäaine on kuitenkin hitsattavuudeltaan paras 6000-sarjan alumiineille kuumahalkeilun suhteen hitaan jähmettymisen vuoksi.

Myötölujuus, Rp0.2%: 55 MPa

Murtolujuus, Rm: 140 MPa

3) **Al 5356 (AlMg5Cr) käsittelemätön**

Yleiskäyttöinen ja yleinen AlMg5 -lisäaine. Runsasseosteisuuden vuoksi käy hyvin 6000-sarjan alumiineille, mutta myös 5000-sarjan karkenemattomille alumiineille. Elgan lisäainekatalogin mukaan AlMg5 -hitsauslangoilla on yli kaksinkertainen myötölujuus AlSi5 -lankoihin verrattuna.

Myötölujuus, Rp0.2%: 125 MPa

Murtolujuus, Rm: 255 MPa

4) **Al 5356 (AlMg5Cr) muokkauslujitettu**

Lisäaineena edelleen AlMg5. Magnesiumseosteisten 5000-sarjan alumiinien ainoa lujittamiskeino on muokkaaminen kylmänä. Magnesium toimii lujittavana seosaineena, minkä vuoksi muokattavuus heikkenee ja lujittumistaipumus kasvaa magnesiumpitoisuuden kasvaessa (Lukkari, 2001, 47.)

Tätä ominaisuutta kokeiltiin hyödyntää AlMg5 -seosaineella hitsattuun täyttöhitsiin. Hitsikupua vasa-roitiin kolmessa eri vaiheessa hiomisen aikana. Teoriassa tällä tavoin hitsin lujuutta saadaan nostettua, mutta lämpövaikutusalueella ylivanhennon perusaineen lujuuteen sillä ei ole vaikutusta.

5) **Al 5356 (AlMg5Cr) sammutettu veteen suoraan hitsistä**

Lisäaineena edelleen AlMg5. Koekappale sammutettiin viimeisen hitsipalon jälkeen suoraan veteen. Tavoitteena on saada lämpövaikutusalueella liuoshehuttunut perusaine opinnäytetyön sivun 21 mukaiseen ylikylläiseen tilaan jossa Mg₂Si-faasia on liuennut enemmän alumiiniin kuin tasapainopiirroksen mukaan olisi mahdollista.

Ylikylläisen tilan lujuudesta löytyy hyvin vähän kirjallista tietoa, sillä se on tavallisesti vain välivaihe lujittamisprosessissa. Joissakin lähteissä mainitaan ylikylläisen tilan olevan jonkin verran pehmeäksi hehketettua lujempi ja toisissa pehmeäksi hehketetun tasolla.

Hitsin sammutus olisi mahdollista myös purkamatta kiskorakennetta paikanpäällä korjausolosuhteissa.

6) **Al 5356 (AlMg5Cr) liuoshehketetty ja keinovanhennettu**

Lisäaineena edelleen AlMg5. Aiemmin esitellyn erkautuskarkaisuprosessin mukaisesti koekappale liuoshehketettiin ja keinovanhennettiin lämpökäsittelyuunissa. Liuoshehuttamalla ja vanhentamalla pitäisi olla mahdollista palauttaa perusaineen lujuus täysin alkuperäistä vastaavalle tasolle.

Lähteistä riippuen liuoshehuttaminen ja keinovanhennus tehdään EN AW-6082 seokselle lämpötilojen 535±10 °C ja 175±5 °C / 8 h (Huhtaniemi ym., 2006, 98) sekä 575 °C ja 190 °C / 6 h (Mrówka-Nowotnik ym., 2009, 165) välillä.

Edellä esitetyistä jälkimmäiset lämpötilat ja pitoajat ovat yliopistotason tieteellisessä tutkimuksessa vahvistetut, jossa vertailtiin erilaisia keinovanhennuslämpötiloja ja pitoaikoja sekä niiden vaikutusta EN-AW 6082 seoksen lujuuteen ja muihin metallurgisiin ominaisuuksiin. Tutkimuksessa todettiin, että

korotetussa 190 °C vanhenuslämpötilassa saavutetaan jo 6 tunnin pitoajalla parempi lujuus kuin 175 °C lämpötilassa 8 tunnin pitoajalla.

Liioshehkutuslämpötilaksi valittiin lämpötila kahden eri lähteen väliltä, 545 °C / 2 h. Keinovanhennus suoritettiin tieteellisen tutkimuksen osoittamassa lämpötilassa lyhyemmän vanhennusajan ja luotettavamman lähteen vuoksi (selkeästi dokumentoitu tieteellinen artikkeli). Vanhennuslämpötila oli 190 °C ja pitoaika 6 tuntia.

Liioshehkutuksen ja keinovanhentamisen onnistumisesta ei ollut takeita, sillä optimaaliset pitoajat ja lämpötilat ovat seosainepitoisuuskohtaisia. Liioshehkutuslämpötilan suhteen lämpötilan toleranssi on ± 10 °C (Lukkari, 2001, 19.)

7) **Anodisoitu hitsaamaton, käsittelemätön perusaine**

Koska teoriapohjalta vaikutti että pelkällä lisäainevalinnalla ei lujuuteen voida merkittävästi vaikuttaa, päätettiin kokeilla pinnoittamista. Pinnoitusvaihtoehtoina oli paikallisella toimijalla prototyyppiasteella ollu nikkelöinti sekä perinteinen anodistointi. Pienen erän nikkelöinnistä olisi tullut liikaa kustannuksia hyötyyn nähden, mutta anodistointi on kohtuullisesti hinnoiteltu yleisyytensä vuoksi.

Vertailun vuoksi anodisoitiin yksi hitsaamaton kappale. Hitsaamattomaan kappaleeseen anodisoitiin 20µm paksu oksidikerros.

8) **Al 5356 (AlMg5Cr) anodisoitu**

Lisäaineena edelleen AlMg5. Hitsi hiottiin perusaineen tasalle ja kappaleen pintaan anodisoitiin 20µm paksu oksidikerros.

9) **Al 5183 (AlMg4,5Mn)**

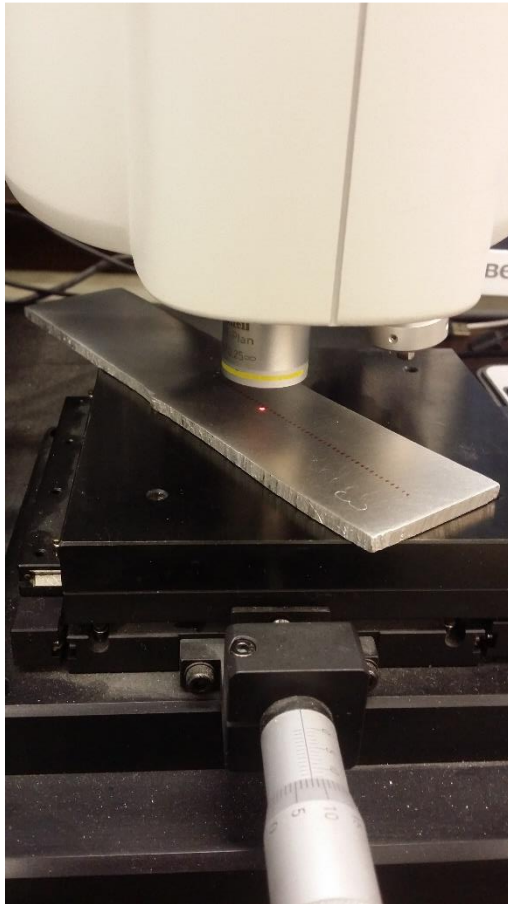
Lisäaineena AlMg-pohjainen lisäaine johon on seostettu myös mangaania. Tuottaa valmistajan mukaan 16 % lujemman hitsiaineen kuin AlMg5 -lisäaine.

Myötölujuus, Rp0.2%: 145 MPa

Murtolujuus, Rm: 275 MPa

7 TULOKSET

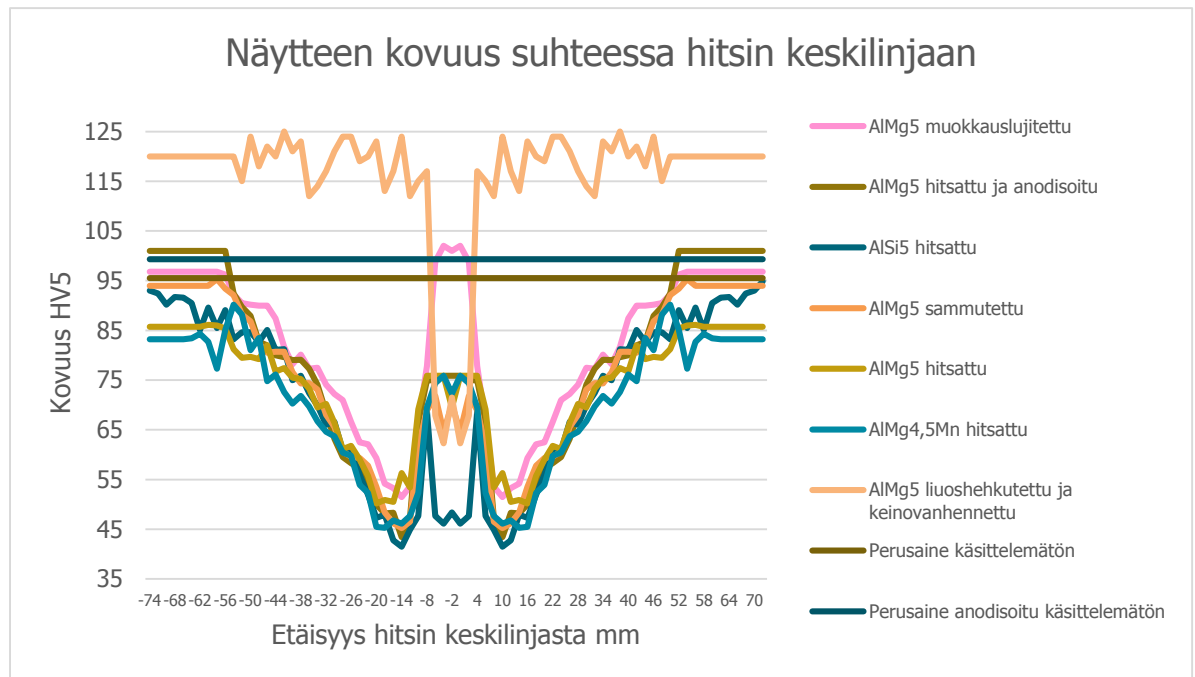
Laboratoriokokeet onnistuivat hyvin. Kovuusmittauksissa oli jonkin verran mittausepävarmuutta sillä näytteitä ei ollut mahdollista hioa peilikirkkaaksi tai täydellisen tasaiseksi. Tulokset ovat kuitenkin selvästi vertailukelpoisia ja noudattavat yleisesti teoriaosuudessa esitettyjä arvioita. Kovuusmittaukset suoritettiin Savonian kovuusmittauslaitteilla ja lämpökäsittely tehtiin koulun uunilla jolla lämpötila saatiin asetettua tarkasti halutuksi.



KUVA 24. Kovuusmittauslaite (Toivanen, 2017.)

Seuraavalla sivulla on esitetty kuviossa 2 kaikkien mitattujen koekappaleiden kovuudet rinnakkain. Tummat vaakasuorat viivat ovat käsittelemättömän ja anodisoidun, hitsaamattoman perusaineen kovuudet. Molemmista näytteistä otettiin kolme mittausta eri puolilta kappaletta ja arvoksi määritettiin näiden mittausten keskiarvo. Muutamissa hitsattujen koekappaleiden mittauspisteissä otettiin useampi näyte selvän mittausepävarmuuden vuoksi. Liitteessä 2 arvot on esitetty taulukoituna ja liitteessä 4 on arvojen kuvaaja täysikokoisena.

Kiskoprofiilista tehdyn vetokokeen mukaan profiilin murtolujuus oli 260,2 MPa. Vetokokeen pöytäkirja opinnäytetyön liitteenä (liite 3).



KUVIO 2 Kovuusmittausten tulokset rinnakkain (Toivanen, 2017.)

Yksi opinnäytetyön tavoitteista oli selvittää, kuinka paljon ja kuinka suurelta alueelta perusaine pehmenee hitsin ympäriltä. Kuviosta 2 voidaan nähdä että koekappaleessa olevan railon täyttöhitsaamisen aiheuttama lämpövaikutusalue ylittää noin 50 mm etäisyydelle hitsistä. Koekappaleet olivat TIGillä käsin hitsattuja, joten lämmöntuonnissa on varmasti kappalekohtaisia eroja, mikä selittää pienet vaihtelut lämpövaikutusalueen koossa. Kuvaajissa on nähtävissä perusaineen kovuuden laskeminen hitsiainetta pehmeämmäksi, eli hitsin ympärillä oleva perusaine on huomattavasti pehmeämpää ja vaurioalttiimpaa kuin varsinainen hitsausaine. Muutama näyte ei saavuttanut millään etäisyydellä referenssinä toimineen perusaineen kovuutta. Tämä voi johtua esimerkiksi eräkohtaisesta vaihtelusta perusaineen valmistuksessa.

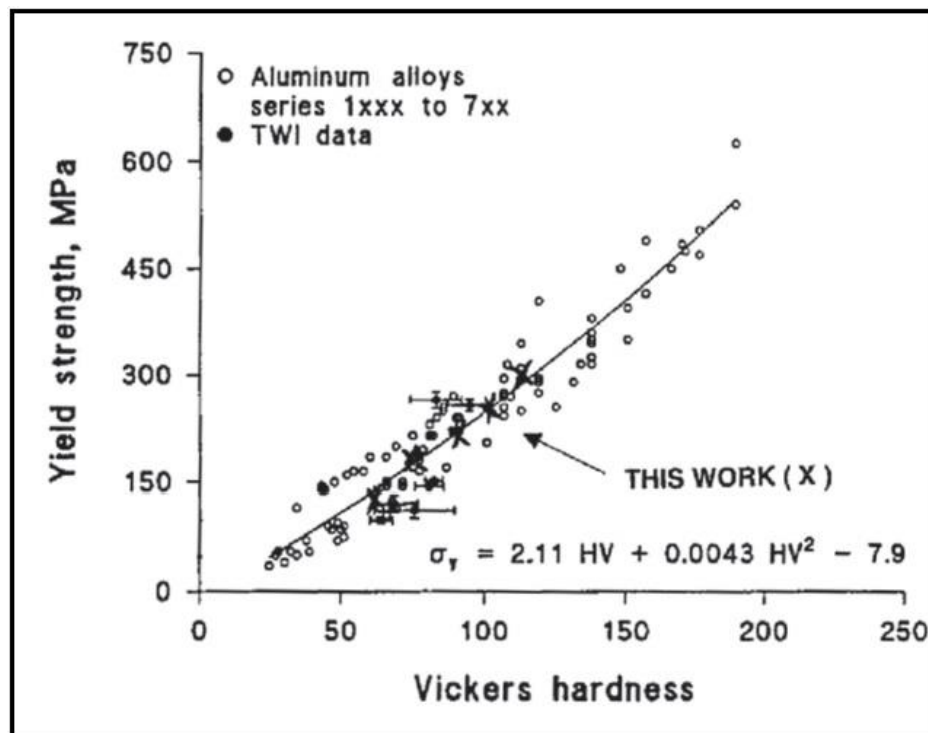
Anodisoitujen näytteiden tutkimustulokset olivat yllättäviä, sillä mittausten perusteella näyttää että anodisoidut kappaleet ovat hitsaamattomana alle 10 % kovempia kuin käsittelemätön kappale. Lämpövaikutusalueella anodisointi ei näytä parantaneen kovuutta lainkaan. Tämä voi johtua anodisoinnin alla olevan perusaineen pehmeystä, jolloin oksidikerros rikkoontuu perusaineen peittäessä sen alla. Anodisointi paransi selvästi abrasiivisen kulutuksen kestävyyttä, sillä näyte oli huomattavasti hankalammin naarmutettavissa.

Pelkällä lisäainevalinnalla ei näytä olevan minkäänlaista vaikutusta hitsin kovuuteen, ainoastaan AlSi5 lisäaineella kovuus oli vain n. 60 % AlMg-pohjaisista lisäaineista. Tulos oli odotettu, sillä AlSi5-lisäaineen ilmoitettu lujuus on vain 44 % magnesiumipohjaisista lisäaineista. AlMg4,5Mn- ja AlMg5-lisäaineiden välillä ei ollut merkittäviä kovuuseroja, vaikka hitsi sammutettaisiin veteen suoraan hitsauksesta.

Mielenkiintoisimmat tulokset saavutettiin lisäkäsittelmällä hitsialuetta. Tutkimuksessa havaittiin, että muokkauslujittamalla AlMg5-hitsausainetta sen kovuus voidaan nostaa jopa alkuperäisen perusaineen tasolle ja kovemmaksi. Hitsaamattoman perusaineen kovuus oli 95,5 HV ja muokkauslujitetun AlMg5-lisäaineen maksimikovuus oli 102 HV. Muokkauslujitetun hitsin kovuus pienenee nopeasti lämpövaikutusalueella samalle tasolle muiden koekappaleiden kanssa, eli siitä ei ole kuitenkaan apua lämpövaikutusalueen lujuuden pienenemiseen.

Lämpökäsittely onnistui odotettua paremmin. Erkautuskarkaistussa näytteessä lämpövaikutusaluetta ei ole käytännössä lainkaan. Hitsausaineeseen lämpökäsittelyllä ei ollut vaikutusta, minkä vuoksi AlMg5-lisäaine oli hitsissä yhtä kovaa kuin muissakin koekappaleissa. Koekappaleen kovuus oli 4 mm etäisyydellä hitsin keskikohdasta ~70 HV mikä vastaa muiden näytteiden arvoja, mutta seuraavassa mittauspisteessä 6 mm etäisyydellä ja siitä eteenpäin kovuus oli jo noin 120 HV. Erkautuskarkaisemalla koko näytekappaleen kovuus kasvoi noin 25 % käsittelemättömän perusaineen kovuuteen verrattuna.

Lopulta keskeisintä korjaushitsin onnistumisessa on lujuus eikä kovuus. Kuvassa 25 on esitetty alumiiniseoksen kovuuden ja lujuuden korrelaatio. Kuvaaja näyttää pitävän melko hyvin paikkansa kiskoprofiilin ominaisuuksiin verrattuna (260,2 MPa / 95,5 HV).



KUVA 25. Kovuuden ja lujuuden välinen korrelaatio (Stathers ym., 2014, 306.)

Kovuuden ja lujuuden välinen välinen korrelaatio käy ilmi myös yhdistämällä opinnäytön tutkimustulokset aiemmin opintojen yhteydessä tehdyn hitsaustekniikan projektin tutkimustuloksiin. Hitsaustekniikan projektissa tutkittiin hitsiliitoksen vaikutusta EN-AW 6063 seoksen lujuusominaisuuksiin.

Tutkimuksessa havaittiin vetokokein, että 40 mm x 3 mm kokosiin alumiinilattoihin tehdyt päittäishitsit murtuvat hitsausaineen vierestä perusaineesta. Hitsatun kappaleen lujuus oli 50 % hitsaamattoman kappaleen lujuudesta (Toivanen, 2016, 23.)

Opinnäytetyön kovuusmittauksissa havaittiin että lämpövaikutusalueen kovuus on vastaavasti noin 50 % perusaineen kovuudesta. Kuvassa 26 on projektin yhteydessä vetokokeessa vedetty alumiinisauva. Kuvassa on selkeästi nähtävissä lämpövaikutusalueella tapahtunut myötäminen. Näkyvän lämpövaikutusalueen koko on noin 30 mm, ja opinnäytetyön kovuusmittauksissa lämpövaikutusalue saavuttaa hitsausaineen kovuuden samalla etäisyydellä hitsistä.



KUVA 26. Alumiinisauvan myötäminen lämpövaikutusalueelta (Toivanen, 2016.)

Kovuusmittauksia voidaan pitää luotettavina, sillä ThyssenKrupp Materialsin valmistaman EN-AW 6082-seoksen aineslehdessä mainitaan T6 toimitustilaisen materiaalin kovuuden olevan 100 HV. Perusaineen kovuusmittauksissa päästiin yli 100 HV arvoihin keskiarvon ollessa 95,5 HV.

8 VAIHTOEHTOISET KORJAUSMENETELMÄT

8.1 Tehdasvalmisteinen teräsinsertti

Opinnäytetyötä tehdessä puheeksi tuli myös mahdollinen kovempaa materiaalia oleva kiskoinsertti. Sakupe OY:n varastosta löytyi ratatoimittajan oma insertti, joka on tarkoitettu tyhjien säkkien palautusradalle. Insertissä on hahlot askelsyöttäjiä varten jotka annostelevat tyhjiä säkkejä. Tuotetta ei ole aiemmin kokeiltu, koska sitä ei ole ensisijaisesti tarkoitettu täysien säkkien radalle, eikä palautusradalla kohtaan johon insertti on tarkoitettu ole ollut vielä korjaustarvetta.

Insertin kokeilua on harkittu aiemmin, mutta sen asentaminen paikan päällä on nähty hankalaksi, eikä inserttiä pysty asentamaan esimerkiksi lyhyille (pienimmät korjattavat kohdat kulmavaihteissa noin 300 mm pitkiä) tai kaareville osuuksille, joten insertti on jäänyt varastoon käyttämättä. Insertti on valettua terästä, ja se kiinnitetään kiskoprofiiliin olevaan uraan pujotettavalla kiinnityslevyllä. Kiinnityslevyn pujottamiseksi kisko on purettava niin, että uran pää paljastuu ja levy voidaan pujottaa siihen.

Jotta insertin asentaminen olisi mahdollista, oli sille tehtävä alkeellinen sahausjigi joka voidaan kenttäolosuhteissa kiinnittää puristimilla kiskoprofiiliin ja leikata tarvittava hahlo kulmahiomakoneen katkaisulaikkaa käyttäen. Kuvassa 27 on jigi sekä jigin avulla sahattuun hahloon asennettu insertti. Jigillä hahlosta tuli juuri sopivan mittainen niin, että viimeistelyn pystyi tekemään viilalla.



KUVA 27. Insertti asennettuna ja sahausjigi (Toivanen, 2017.)



KUVA 28. Insertin kiinnityslevy alapuolen urassa (Toivanen, 2017.)

Insertin ongelmiksi saattavat muodostua hyvästä istuvuudesta riippumatta liitoskohtiin jäävät pienet raot, joista kuoppautuminen voi alkaa ja rako suureta alumiinin myötäessä. Täysien säkkien suuri massa vaatii mahdollisesti alkuvauhtia jotta tuo pienikin rako voidaan ylittää. Tyhjien säkkien pienempi massa sekä alkuperäisessä käyttökohteessa askelsyöttäjän antama alkuvauhti antaa paremmat lähtökohdat liitoksen toimivuudelle.

Insertissä on merkitty asennussuunta. Insertin jättöpuoli on tehty noin 1mm korkeammaksi kuin kiskon pinta johon se asennetaan. Tällä on haettu ratkaisua mahdollisiin asennusepäätarkkuuksiin, mutta korkeuseron vuoksi on mahdollista ja todennäköistä että insertin jälkeinen alumiinikisko joutuu vieläkin kovemalle rasitukselle renkaan pudotessa insertin päältä alumiinikiskolle. Viitteitä tällaisesta kulumismekanismista on kulmavaihteissa, joissa liitoskohdissa on myös jätetty jättöpuoli hieman korkeammalle kuin seuraavan rataosuuden alku. Kulmavaihteet ovat kuoppautuneet liitoskohtien vierestä kohdasta johon rengas putoaa siirtyessään seuraavalle rataosuudelle.

8.2 Toisesta materiaalista valmistettu kisko

Alumiinin heikkous ratamateriaalina on huomioitu myös toimittajan taholla. Tänä päivänä uudet ratajärjestelmät toimitetaan ruostumattomasta teräksestä rullamuovaamalla valmistetusta profiilista. Profiili koostuu kahdesta toisiinsa pistehitsatusta puolikkaasta.



KUVA 29. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu kiskoprofiili (Toivanen, 2017.)

Ruostumattomasta teräksestä valmistettu profiili olisi kestävä ja oikea ratkaisu ongelmaan. Profiili on hinnoiteltu toimittajan taholta metritavarana ostettuna sellaiseksi, ettei sen käyttö ole taloudellisesti kannattavaa. RST-kiskoa on vaihdettu alumiinisen tilalle tietyiltä osin suurempien uudisprojektien yhteydessä, jolloin myös kiskoprofiilin hinta asettuu maltillisemmalle tasolle.

RST-kiskon asennuksessa on huomioitava että kiinnitykset ja jatkokset vaativat alumiini-teräs muunnoskappaleet joita on saatavissa järjestelmän toimittajalta.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia hitsaamisen vaikutusta hitsin ja lämpövaikutusalueen lujuusominaisuuksiin. Tavoitteena oli löytää nykyistä lujemman korjauksen tuottava hitsaus-tapa, sekä vertailla vaihtoehtoisia korjausmenetelmiä.

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että perinteisin menetelmin hitsattuna kiskon lujuus on hitsi-aineen osalta noin 70 % perusmateriaalin lujuudesta, mutta lämpövaikutusalueella perusaineen lujuudesta on jäljellä enää 40 - 50 %. Lämpövaikutusalue ulottuu noin 50 mm etäisyydelle hitsistä. Pelkällä lisäainevalinnalla hitsin lujuteen ei voida juurikaan vaikuttaa, mutta AISi5-lisäainetta tulee välttää sen muita huonomman lujuuden vuoksi.

Kiskon lujuus voidaan palauttaa hitsiaineen kohdalta muokkauslujittamalla sitä hiontavaiheessa esimerkiksi vasaroimalla käytettäessä magnesiumipohjaisia lisäaineita. Muokkauslujitettamalla hitsiaineesta saatiin jopa perusainetta lujempaa, mutta hitsin viereisen lämpövaikutusalueen lujuus oli edelleen vain noin 40 % alkuperäisestä kovuudesta. Muokkauslujitus voidaan suositella tehtäväksi aina hitsauksen yhteydessä.

Hitsin viereisen lämpövaikutusalueen lujuus saatiin palautettua ja jopa lisättyä sitä suorittamalla koe-kappaleelle liuoshehkus ja keinovanhennus. Lämpökäsittelyn jälkeen lämpövaikutusaluetta ei ollut käytännössä lainkaan, vaan perusaineen kovuus oli heti hitsin vierestä noin 25 % alkuperäistä lujempaa. Lämpökäsittelyllä ei kuitenkaan ole vaikutusta hitsiaineeseen, sillä hitsiaineesta puuttuu erkaumien syntyyn vaadittava seosaine.

Kiskon korjaushitsauksessa tulee käyttää yleisintä alumiineille tarkoitettua lisäainetta AIMg5:tä. Muokkauslujittamalla hitsin lujuusominaisuuksia voidaan parantaa paikallisesti merkittävästi. Pienempien, lämpökäsittelyuuniin mahtuvien ja purettavien kokonaisuuksien korjaamisessa kannattaa mahdollisuuksien mukaan yhdistää muokkauslujittaminen ja lämpökäsittely. Mikäli hitsattu kappale lämpökäsittellään hitsauksen jälkeen ja lämpökäsittelyn jälkeen hitsi muokkauslujitetaan ennen hiomista, päästään lujuudessa alkuperäisen perusaineen tasolle. Kuviosta 2 (liite 4) nähdään, että muokkauslujitetun ja lämpökäsittelyn näytteen kovuuksien kuvaajat leikkaavat toisensa melko tarkasti perusaineen kovuuden tasolla. Yhdistetyillä käsittelyillä päästäisiin siis alkuperäiseen kovuuteen.

Insertin asentamista kannattaa kokeilla, mutta hallitusti yhteen kohtaan niin, että tilalle voidaan vaihtaa tarvittaessa ehjä kisko. Insertin toimintaa on seurattava mahdollisten ongelmien ja liitoskohdan kuoppautumisen varalta pitkällä aikavälillä. Insertin asentaminen vaatii tarkkuutta eikä kiskoa voida käytännössä palauttaa ennalleen, mikäli asennus epäonnistuu.

Lähtökohtaisesti väärän materiaalivalinnan vuoksi kiskoa tulee pyrkiä korvaamaan RST-profiililla mahdollisimman pitkäaikaisen ratkaisun saavuttamiseksi.

10 POHDINTA

Opinnäytetyö antoi erittäin kattavan läpileikkauksen toisinaan jopa mystisenä pidettyyn alumiinin hitsaamiseen ja eri alumiinien ominaisuuksiin. Opinnäytetyö oli työelämälähtöinen, todelliseen ongelmaan perustuva tutkimustyö. Tutkimuksen aikana pystyin hyödyntämään konetekniikan opintoja hyvin laajasti. Opinnäytetyössä käytettyjä menetelmiä olivat muun muassa XRF-analyysi, Vickers-kovuuskokeet, vetokoe, muokkauslujittaminen sekä alumiinin lämpökäsittely liuoshehuttamalla ja vanhentamalla. Edellä mainittujen menetelmien avulla sain kytkettyä konetekniikan opintojen teorian käytäntöön onnistuneesti. Koetulokset vastasivat muita teoriapohjana käytettyjä tutkimustuloksia.

Opinnäytetyöprosessi eteni järjestelmällisesti ja suhteellisen hyvin aikataulussa. Teoriapohjan kerääminen ja sisäistäminen vei huomattavasti enemmän aikaa kuin teknisen suorittamisen osuus. Opinnäytetyölle asetetut tavoitteet täyttyivät hyvin: opinnäytetyön myötä hitsaustapahtuman vaikutukset perusaineen kovuuteen selvisivät ja löydettiin keinoja tilanteen parantamiseksi.

Tutkimustyöstä teki mielenkiintoisen se, että kyse oli pinnoittamisesta hitsaamalla eikä liitoshitsistä. Teoriatiedon keräämisen yhteydessä vastaan ei tullut tutkimuksia, joissa käsiteltäisiin mahdollisimman lujan pinnan tuottavaa hitsausmetodia, vaan tutkimuksissa keskityttiin lähinnä väsymislujuuteen tai liitoshitsin kestävyuteen. Tämä johtuu tietysti siitä, että alumiini on usein väärä materiaali mekaaniselle rasitukselle alttiisiin kohteisiin, mutta ilmeisesti virhearviointeja tapahtuu.

Lujien alumiinilaatujen yleistyessä koneenrakennuksessa uskon, että asiaan perehtyneisyys on eduksi. Opinnäytetyön tutkimustuloksista voi olla hyötyä myös yleisesti, mikäli haetaan mahdollisimman lujaa pintaa korjaushitsatulle kappaleelle.

LÄHDELUETTELO

- AGA. (ei pvm). *Pienoisopas. Alumiinin hitsaus.* (Oy Aga AB) Haettu 10. 01 2017 osoitteesta AGA:
http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20Aluminum%20Welding%20Brochure%20105x210%20FI634_122433.pdf?v=1.0
- Breivik, C. R. (2013). *Mechanical Properties of Gas Metal Arc.* Trondheim: Norwegian University of Science and Technology Department of Materials Science and Engineering.
- Elga. (ei pvm). *Elga - Lisäaineita tuottavaan hitsaukseen.* (Elga welding) Haettu 1. Helmikuu 2017 osoitteesta
http://www.woikoski.fi/sites/default/files/Lis%C3%A4aineita%20tuottavaan%20hitsaukseen_Elga.pdf
- ESAB. (ei pvm). *ESABIN OSAAMISKESKUS.* (ESAB) Haettu 4. Tammikuu 2017 osoitteesta
<http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/tig-hitsaus.cfm>
- Huhtaniemi, K.;Jerima, M.;Pohjus, J.;Puska, M.;Vierimaa, T.;Karppinen, A.;& Vartiainen, M. (2006). *Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit.* Tampere: Teknoliigateollisuus Ry.
- Kaarlo, K.;Laitinen, E.;Tiainen, T.;Tiilikka, P.;& Tuomikoski, J. (2008). *Konetekniikan materiaalioppi.* Helsinki: Edita Prima Oy.
- Lepola, P.;& Makkonen, M. (2005). *Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet.* Werner Söderström Osakeyhtiö.
- Lukkari, J. (2001). *Alumiinit ja niiden hitsaus.* Tampere: Metallisteollisuuden keskusliitto.
- Mrówka-Nowotnik, G.;Sieniawski, J.;& Nowotnik, A. (2009). Effect of heat treatment on tensile and fracture toughness properties of 6082 alloy. (2).
- Rannasmaa, K. (11. Lokakuu 2016). Production Support Manager (Medisize Oy). Kuopio.
- Sakupe Oy. (ei pvm). *Sakupe Oy - PUHDASTA TULEE.* (Sakupe Oy) Haettu 14. Helmikuu 2017 osoitteesta
<http://www.sakupe.fi>
- Stathers, P.;Hellier, A.;Harrison, R.;Ripley, M.;& Norrish, J. (2014). Hardness-Tensile Property Relationships for HAZ in 6061-T651 Aluminum. *2014*(8).
- Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. (2012). Hitsaustekniikka-lehti. (6).
- Suomen standardoimisliitto SFS. (1993). *SFS-EN 515: ALUMIINI JA ALUMIINISEOKSET. MUOKATUT TUOTTEET. TILOJEN TUNNUKSET.* Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- Suomen standardoimisliitto SFS. (1995). *SFS-EN 573-2: ALUMIINI JA ALUMIINISEOKSET. MUOKATTUJEN TUOTTEIDEN KEMIALLINEN KOOSTUMUS JA TUOTEMUODOT. OSA 2: KEMIALLISEEN KOOSTUMUKSEEN PERUSTUVA NIMIKEJÄRJESTELMÄ.* Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- Suomen standardoimisliitto SFS. (2001). *SFS-EN 1011-4: HITS AUS. METALLISTEN MATERIAALIEN HITS AUSSUOSITUKSET.* Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- Suomen standardoimisliitto SFS. (2005). *SFS-EN 573-1: ALUMIINI JA ALUMIINISEOKSET. MUOKATTUJEN TUOTTEIDEN KEMIALLINEN KOOSTUMUS JA TUOTEMUODOT. OSA 1: NUMEERINEN NIMIKEJÄRJESTELMÄ* (2. Painos p.). Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- Suomen standardoimisliitto SFS. (2010). *SFS-EN 1706: Alumiini ja alumiiniseokset. Valut. Kemiallinen koostumus ja mekaaniset ominaisuudet* (2. Painos p.). Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- Suomen standardoimisliitto SFS. (2013). *SFS-EN 573-3: ALUMIINI JA ALUMIINISEOKSET. MUOKATTUJEN TUOTTEIDEN KEMIALLINEN KOOSTUMUS JA TUOTEMUODOT. OSA 3: KEMIALLINEN KOOSTUMUS JA TUOTEMUODOT. 5. painos.* Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

Suomen standardoimisliitto SFS. (2015). *SFS-EN 18273: Hitsausaineet. Hitsauslangat ja hitsaussauvat alumiinin ja alumiiniseosten hitsaukseen. Luokittelu*. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

ThyssenKrupp Materials (UK). (2013). Aluminium Alloy 6082 Material Data Sheet. ThyssenKrupp Materials (UK).

Valtanen, E. (2013). *Tekniikan taulukkokirja*. Mikkeli: Genesis-kirjat OY.

LIITE 1: XRF-ANALYYSI

26.9.2016 18:48:54

QMatrix Analysis Results

Sample Identification										
Quality	50000		Sulatusnumero		Näytenum		JUHAN PALIKKA			
Lisätiet			Käyttäjä	JSA						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ag
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.960	0.192	0.0076	0.475	0.592	0.0018	<0.0010	0.011	0.010	<0.00050
2.	0.947	0.189	0.0052	0.480	0.602	0.0017	<0.0010	0.0098	0.010	<0.00050
3.	0.953	0.193	0.0054	0.479	0.602	0.0016	0.0013	0.0097	0.011	<0.00050
↑										
∅	0.953	0.191	0.0061	0.478	0.599	0.0017	0.0011	0.010	0.010	<0.00050
↓										
σ	0.0065	0.0021	0.0013	0.0026	0.0058	0.00010	0.00017	0.00075	0.00071	
υ	0.682	1.099	21.31	0.544	0.968	5.882	15.45	7.500	7.100	
	B	Bi	Be	Ca	Cd	Co	Ga	Na	Li	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0012	0.00051	<0.00050	0.0031	<0.0010	<0.0010	0.0086	0.0026	<0.0010	0.0011
2.	0.00096	<0.00050	<0.00050	0.0026	<0.0010	<0.0010	0.0087	0.0022	<0.0010	0.0012
3.	0.00097	0.00055	<0.00050	0.0029	<0.0010	<0.0010	0.0086	0.0033	<0.0010	0.0011
↑		0.10								
∅	0.0010	0.00052	<0.00050	0.0029	<0.0010	<0.0010	0.0086	0.0027	<0.0010	0.0011
↓										
σ	0.00015	0.00003		0.00025			0.00007	0.00056		0.00007
υ	15.00	5.769		8.621			0.814	20.74		6.364
	Sn	Sr	V	Zr	P	Hg	Sb	Bg	Al	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
1.	<0.0010	<0.0010	0.0055	0.0026	<0.0010	0.0013	0.0021	<0.0	97.71	
2.	<0.0010	<0.0010	0.0053	0.0021	<0.0010	0.0014	0.0027	<0.0	97.72	
3.	<0.0010	<0.0010	0.0054	0.0061	<0.0010	0.0012	0.0023	<0.0	97.71	
↑										
∅	<0.0010	<0.0010	0.0054	0.0036	<0.0010	0.0013	0.0024	0.0	97.71	
↓										
σ			0.00010	0.0022		0.00010	0.00031		0.0071	
υ			1.852	61.11		7.692	12.92		0.0073	

LIITE 2: NÄYTTEIDEN KOVUUSTAULUKKO

Etäisyys hitsin keskiviivasta	AlMg5 muokkauslujitettu	AlMg5 hitsattu ja anodisoitu	AISI5 hitsattu	AlMg5 sammutettu	AlMg5 hitsattu	AlMg4,5Min hitsattu	AlMg5 liuoshehkutettu ja keinovanhennettu	Perusaine käsittelemätön	Perusaine anodisoitu käsittelemätön
0	101	75,9	48,4	70,1	69,5	72,3	71,5	95,5	99,3
2	102	75,9	46,1	64,6	75,9	75,9	62,3	95,5	99,3
4	98,8	75	47,7	71,8	75,9	74,4	67,9	95,5	99,3
6	77,8	75	68,7	68,9	75,9	69,5	117	95,5	99,3
8	66,4	66,6	47,7	61,8	69,1	52,3	115	95,5	99,3
10	53,6	47,2	44,9	46,5	53,4	47,7	112	95,5	99,3
12	51,5	43,4	41,5	45,2	56,3	46,1	124	95,5	99,3
14	53,3	48,3	42,8	46,2	50,5	46,8	117	95,5	99,3
16	54,2	48,2	47,9	48,4	50,9	45,3	113	95,5	99,3
18	59,3	50	47,3	53,5	50,2	45,5	123	95,5	99,3
20	62,1	53,6	51,9	57,8	55,7	52,3	120	95,5	99,3
22	62,5	57,2	56	59,3	59	53,9	119	95,5	99,3
24	66,6	58,3	60,8	59,6	61,8	59,8	124	95,5	99,3
26	71	59,5	60,8	60,6	61,1	60,4	124	95,5	99,3
28	72,2	63,2	66,6	65,6	66,4	63,7	121	95,5	99,3
30	74,1	68,5	66	68	70,2	64,6	117	95,5	99,3
32	77,5	74,1	69,9	73,1	69,5	66,7	114	95,5	99,3
34	77,3	77,3	72,4	74,4	73,3	69,7	112	95,5	99,3
36	80,1	79,1	75,9	74,3	75,2	71,8	123	95,5	99,3
38	78,2	79	75	76,6	75,5	70,3	121	95,5	99,3
40	81,7	79,6	81,2	80,7	77,4	72,6	125	95,5	99,3
42	87,4	80	81,1	80,7	76,7	76,1	120	95,5	99,3
44	90	82	85,1	80,5	82	74,8	122	95,5	99,3
46	90	82,7	82,7	82,4	79,2	83,5	118	95,5	99,3
48	90,2	87,9	84,6	86,8	79,7	81	124	95,5	99,3
50	90,5	89,7	84,6	88,2	79,5	88,2	115	95,5	99,3
52	92,2	92,4	83,2	92,1	81,2	90,2	120	95,5	99,3
54	96,2	101	89,1	93,4	85,4	85,1	120	95,5	99,3
56	96,8	101	85,5	95,3	86	77,3	120	95,5	99,3
58	96,8	101	89,6	94	86,1	82,7	120	95,5	99,3
60	96,8	101	85,1	94	85,7	84,3	120	95,5	99,3
62	96,8	101	90,5	94	85,7	83,4	120	95,5	99,3
64	96,8	101	91,6	94	85,7	83,2	120	95,5	99,3
66	96,8	101	91,7	94	85,7	83,2	120	95,5	99,3
68	96,8	101	90,2	94	85,7	83,2	120	95,5	99,3
70	96,8	101	92,4	94	85,7	83,2	120	95,5	99,3
72	96,8	101	93	94	85,7	83,2	120	95,5	99,3
74	96,8	101	94,9	94	85,7	83,2	120	95,5	99,3

LIITE 3: PERUSAINEN VETOKOERAPORTTI



KOETULOKSET



Vetokoeohjelma FMT-ProgSys 8.0 T/TCB

MATERTEST OY

Aineenkoetuslaitteet ja testaussyöntinjärjestelmät

Koekappaleryhmän yleiset tiedot

Vetokoe

SFS - EN ISO 6892-1:2016

Opinnäytetyö kiskoprofiili

Tilaus Oskari T Toivanen

Erä Alumiini

Koekappale 1

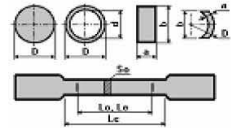
Huom

Koestuspäivä 3.2.2017

Koestaja OT

Syöttötiedot

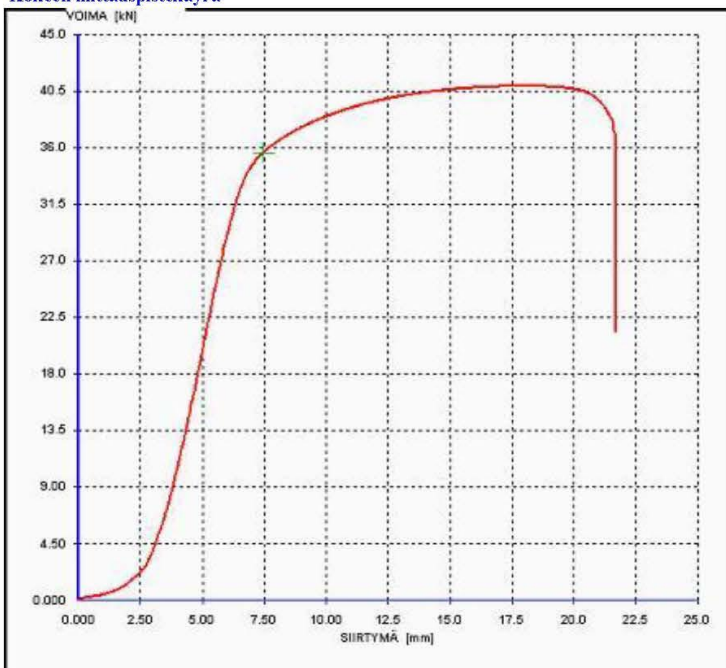
a	4,90	mm	Koepituus	Lc	100,00	mm	
b	32,00	mm	Murtovenymä alkumittapituus	Lo	50,00	mm	
D	0,00	mm	loppumittapituus	Lu	67,60	mm	
d	0,00	mm	Venymäanturi alkumittapituus	Le	0,00	mm	
Pinta-ala	So	156,80	mm ²	Koekappaleen loppuhalkaisia	Du	0,00	mm



Lopputulokset

Suurin voima	Fm	40,804	kN	Kimmo kerroin	E	0	10 ³ N/mm ²
Lujuus	Rm	260,2	N/mm ²	Korrelaatio		0,00	
Alempi myötöraja	ReL	0,0	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
Ylempi myötöraja	ReH	226,8	N/mm ²	Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Venymisraja	Rp	0,00 % 0,0	N/mm ²
		0,000000		Koeaika		94,9	s
		0,000000		Murtovenymä	A	35,2	%
				Murtokuruuma	Z	0,0	%

Kokeen mittauspistekäyrä



LIITE 4: KOVUUSMITTAUSTEN KUVAAJA TÄYSIKOKOISENA

