

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

ALUMIINIPALKIN VALMISTETTAVUUS- JA HITSATTAVUUSVERTAILU
ALUMIININ SEOSTUKSEN JA TUOTANNON AUTOMAATIOASTEEN
NÄKÖKULMISTA

COMPARISON OF MANUFACTURABILITY AND WELDABILITY FOR
ALUMINIUM BEAM FROM THE VIEW OF ALLOY SELECTION AND THE
DEGREE OF PRODUCTION AUTOMATIZATION

Lappeenrannassa 23.5.2019

Juuso Pirttiniemi

Tarkastajat: Professori Harri Eskelinen
Laboratorioinsinööri Esa Hiltunen
Tommi Kasanen

Ohjaajat: Professori Harri Eskelinen
Laboratorioinsinööri Esa Hiltunen

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Juuso Pirttiniemi

Alumiinipalkin valmistettavuus- ja hitsattavuusvertailu alumiinin seostuksen ja tuotannon automaatioasteen näkökulmista

Kandidaatintyö

2019

41 sivua, 13 kuvaa, 7 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Harri Eskelinen,
Laboratorioinsinööri Esa Hiltunen,
Tommi Kasanen

Ohjaajat: Professori Harri Eskelinen,
Laboratorioinsinööri Esa Hiltunen

Hakusanat: alumiiniseokset, hitsattavuus, alumiinin hitsaus, MIG-hitsaus, mekanisoitu hitsaus, robotisoitu hitsaus, profiilin pursotus

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on vertailla alumiinipalkkirakenteen seosvalintaa, sekä valmistus- ja hitsausteknillisiä vaihtoehtoja tuotannon automaatioasteen nostamisen kannalta. Työn teettäjänä toimii KT-Shelter, joka valmistaa suuren kokoluokan, helposti liikuteltavia sääsuojuja niin puolustuksen, kriisinhallinnan kuin teollisuudenkin tarpeisiin. Tavoitteena on tutkia vaihtoehtoja nykyiselle alumiiniseokselle rakenteessa, ja esimerkiksi mekanisoinnin ja robotisoinnin mahdollisuuksia palkin hitsauksessa.

Kirjallisuusosuudessa käsitellään yleisesti alumiiniseossarjojen hitsausta sekä eri menetelmiä, joilla alumiinipalkin voisi valmistaa. Tutkimusosuudessa etsitään eri alumiiniseosvaihtoehtoja nykyiselle seokselle sekä valmistusmenetelmälle. Lopuksi eri vaihtoehtojen perusteella luodaan vertailumatriisi, jossa esitetään eri seosvaihtoehtoja sekä eri menetelmiä valmistuksen toteuttamiseksi.

Työn tuloksena luotu vertailumatriisi esittää 32 erilaista toteuttamiskelpoista variaatiota valmistukselle ja seosvalinnalle. Osassa hitseistä hitsauksen automaatioastetta pystytään nostamaan mekanisoinnilla tai robotisoinnilla, mutta kokonaan se ei onnistu nykyisillä liitosmuodoilla. Seosvalinnan osalta pursotetut osat olisivat nykyisestä EN AW-6082 seoksesta ja levyosat nykyisestä tai EN AW-5083 seoksesta.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Juuso Pirttiniemi

Comparison of manufacturability and weldability for aluminium beam from the view of alloy selection and the degree of production automatization

Bachelor's thesis

2019

41 pages, 13 figures, 7 tables and 1 appendice

Examiners: Professor Harri Eskelinen,
Laboratory engineer Esa Hiltunen,
Tommi Kasanen

Supervisors: Professor Harri Eskelinen,
Laboratory engineer Esa Hiltunen

Keywords: aluminium alloys, weldability, welding of aluminium, MIG-welding, mechanized welding, robotized welding, profile extrusion

The aim of this thesis is to compare the alloy selection of the aluminium beam structure, as well as the manufacturing and welding techniques for increasing the degree of production automation. The project is commissioned by KT-Shelter, that manufactures large scale weather shelters for defense, crisis management and industrial applications. The aim is to explore alternatives to the current aluminium alloy for the structure and, for example, the possibilities of mechanization and robotization in welding process.

The literature section generally deals with welding of aluminium alloy series as well as various methods by which the aluminium beam could be made. In the research section, various aluminium alloy alternatives are searched for the current alloy and for the manufacturing process. At the end of the research section, reference matrix is created based on the various alternatives. It presents different alternatives for the aluminium alloy selection and for the manufacturing methods.

The resulting reference matrix shows 32 different feasible variations for manufacturing and alloy selection. For some of the welds, automatization degree can be increased by mechanization or robotization. For the alloy selection, the extruded parts could be from the current EN AW-6082 alloy and the plate parts from the current alloy or EN AW-5083 alloy.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn tausta.....	7
1.2	Työn tavoite ja tutkimuskysymykset	7
1.3	Rajaus ja menetelmät	8
2	ALUMIINISEOSTEN HITSATTAVUUS	9
2.1	Alumiiniseokset	9
2.2	Hitsattavuus	12
2.2.1	Ei-lämpökäsiteltävät seokset.....	13
2.2.2	Lämpökäsiteltävät seokset	14
3	ALUMIINIPALKKIEN VALMISTUSTEKNIIKAT	16
3.1	Hitsausprosessit	16
3.1.1	MIG- hitsaus	16
3.1.2	TIG-hitsaus	17
3.1.3	Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla	18
3.2	Hitsauksen automatisointi.....	19
3.2.1	Hitsauksen mekanisointi	20
3.2.2	Hitsauksen robotisointi	22
3.3	Palkkiprofiilin pursotus ja taivutus	23
4	CASE: KT-SHELTER	26
4.1	Palkkirakenteen esittely ja vaatimukset	26
4.2	Vaihtoehtoisten alumiiniseosten tunnistaminen	27
4.2.1	Vertailtavat alumiiniseokset	29
4.2.2	Hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely	31
4.3	Vertailumatriisi	31
5	POHDINTA	35
5.1	Tärkeimmät tulokset	35

5.2 Tulosten uutuusarvo.....	36
5.3 Jatkotutkimusaiheet	36
6 YHTEENVETO	37
LÄHTEET	38
LIITTEET	

LIITE I: Alumiiniseoksien lujuuksia

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Al, A	Alumiini
C	Valuseokset
Cu	Kupari
F	Valmistustila
H	Muokkauslujitettu
Mg	Magnesium
Mn	Mangaani
O	Pehmeäksi hehkutettu
Si	Pii
T	Lämpökäsitelty
W	Muokattavat seokset
W	Liuotushehkutettu
Zn	Sinkki
EN	Eurooppalainen standardi
FSW	Friction stir welding, kitkahitsaus pyörivällä työkalulla
HAZ	Heat affected zone, hitsauksen lämpövyöhyke
MIG	Metal-arc inert gas
TIG	Tungsten inert gas

1 JOHDANTO

Tämä kandidaatintyö on tehty liittyen LUT-yliopiston tekemään esiselvitykseen alumiinipalkin hitsauksen automaatioasteen kasvattamisesta. Työssä tutkitaan alumiinirakenteen valmistustekniikan vaihtoehtoja sekä materiaalivalinnan optimaalisuutta. Työ tehdään KT-Shelterille, joka toimii työn teettäjänä. Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta sekä case-tutkimuksesta.

1.1 Työn tausta

KT-Shelter on suomalainen yritys, joka valmistaa haastaviin olosuhteisiin tarkoitettuja sääsuojia. Sääsuojat ovat vahvarakenteisia ja ne sopivat niin puolustuksen, kriisinhallinnan kuin teollisuudenkin tarpeisiin. Suojien erikoispiirteenä on hyvä liikuteltavuus, sillä ne voidaan pystyttää nopeasti ilman koneita tai laitteita, eli käytännössä sijainnilla ei ole merkitystä. Katoksen runko tehdään alumiinista, minkä ansiosta osat ovat kevyitä ja liikuteltavissa käsivoimin. Runko kootaan pienistä merikonttiin mahtuvista palasista, ja se kasataan vasta pystytyksen yhteydestä. Tämä mahdollistaa tuotteen kuljetuksen pienessä tilassa. (KT-Shelter 2019) Alumiinirungon kaaripalkki hitsataan tällä hetkellä käsinhitsauksella kasaan, joten tuottavampien valmistusmenetelmien tutkimiselle voisi olla perusteita kasvavan kysynnän vuoksi. Lisäksi nykyisen alumiiniseoksen optimaalisuutta rakenteeseen voisi olla syytä tutkia.

1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on tutkittavan alumiinirakenteen tarkoituksenmukaisen materiaalin ja valmistus- sekä hitsausteknisten vaihtoehtojen vertailu. Aihetta tutkitaan siis materiaalin valinnan näkökulmasta, eli tutkitaan nykyisen alumiiniseoksen optimaalisuutta. Lisäksi tutkitaan valmistusteknisiä vaihtoehtoja eli verrataan eri tapoja hitsata sekä prosessin, että geometrian kannalta, ja hitsaamattoman rakenteen mahdollisuutta.

Tutkimus vastaa seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitkä eri alumiiniseokset voisivat olla mahdollisia kyseisen alumiinipalkin materiaaleina?

- Mitkä tutkittavan alumiinipalkin eri kohdat tai geometriat ovat sellaisia, joita voisi hitsausteknisesti pohtia uudestaan? Ovatko mahdolliset kohdat sellaisia, joissa hitsauksen mekanisointia tai robotisointia voisi hyödyntää?

1.3 Rajaus ja menetelmät

Työ toteutetaan yhdistämällä kirjallisuuskatsaus ja case-tutkimus siten, että kirjallisuusosuudessa käytävät asiat tukevat case-tutkimuksen toteutusta. Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään alumiiniseoksia ja niiden hitsattavuutta, alumiinin hitsauksessa käytettäviä prosesseja sekä hitsauksen automatisointia. Case-tutkimuksessa luodaan vertailumatriisi, jossa esitetään eri materiaaleja sekä eri valmistusteknillisiä tapoja ja ideoita liittyen alumiinipalkin valmistukseen. Työ pyrkii nostamaan esiin rakenteen mahdollisia kehityskohtia, ja sitä kautta synnyttämään mahdollisia uusia ideoita valmistuksen ja materiaalinvalinnan näkökulmasta.

2 ALUMIINISEOSTEN HITSATTAVUUS

Tässä luvussa käsitellään eri alumiiniseoksia ja niiden hitsattavuutta. Luvun asioiden perusteella pystytään luomaan pohjaa case-tutkimuksen eri alumiiniseoksien vertailuun.

Hitsatun palkkirakenteen materiaalivaihtoehtoa tutkittaessa materiaalin hitsattavuus on luonnollisesti tärkeä ominaisuus. Näin ollen eri alumiiniseosten hitsausta käsiteltäessä on tarkoitus kartoittaa hyvän hitsattavuuden omaavia seoksia, joilla on vaativan käyttökohteensa vuoksi myös hyvät lujuusominaisuudet. Tutkittavassa alumiinipalkissa on myös pursotettuja osia, minkä vuoksi seoksen täytyy sopia myös pursotukseen.

Hitsattavuus määritelmänä voidaan jakaa kolmeen eri osaan, jotka kaikki vaikuttavat rakenneosan hitsattavuuteen. Nämä eri osat ovat perusaineen hitsattavuus, rakenteellinen hitsattavuus ja valmistuksellinen hitsattavuus. Perusaineen hitsattavuuteen kuuluu seikat, jotka hitsattavan materiaalin ominaisuuksien puolesta vaikuttavat onnistuneen liitoksen aikaansaamiseen. Perusaineen hitsattavuuteen vaikuttaa esimerkiksi materiaalin lujuus, lämmönjohtavuus ja kuumahalkeilutaipumus. Rakenteellinen hitsattavuus tarkoittaa rakenteen muotoilun vaikutusta liitoksen toimintakykyyn. Hitsausliitoksen kohdalle syntyy jännityskeskittymiä aiheuttavia epäjatkuvuuskohtia. Näin ollen rakenteelliseen hitsattavuuteen vaikuttaa siis esimerkiksi hitsien sijainnit ja liitosmuodot, jotka ottavat vastaan tietyn suuruista ja suuntaista kuormitusta. Valmistuksellinen hitsattavuus puolestaan tarkoittaa valmistuksellisia tekijöitä, jotka tulee ottaa huomioon rakenneosan hitsauksessa. Näitä ovat hitsauksen esivalmistelu, käytettävä hitsausmenetelmä ja hitsauksen jälkeiset käsittelyt. Yleisesti ottaen hitsattavuus on sitä parempi, mitä vähemmän edellä mainittuja asioita täytyy ottaa huomioon hitsausliitoksen toteuttamisessa. (Lepola & Makkonen 2005, s. 28-29)

2.1 Alumiiniseokset

Seostamalla puhdasta alumiinia erilaisten seosaineiden kanssa, saadaan nostettua sen vähäisiä lujuusominaisuuksia ja korroosionkestävyyttä. Yleisimmät seosaineet alumiinille ovat kupari (Cu), pii (Si), mangaani (Mn), magnesium (Mg) ja sinkki (Zn). (Stano, Pfeifer

& Rózański 2014, s. 91) Eri seosaineita ja niiden vaikutuksia seokseen on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Seosaineet ja niiden vaikutus seoksen lopullisiin ominaisuuksiin (Lukkari 2001, s.11)

Seosaine	Vaikutus ominaisuuksiin
Cu	Parantaa lujuutta
Si	Alentaa sulamislämpöaluetta ja parantaa juoksevuutta
Mn	Lisää lujuutta menettämättä olennaisesti sitkeyttä
Mg	Lisää lujuutta menettämättä hyvää korroosionkestävyyttä
Mg/Si	Lisää lujuutta, muovattavuutta ja pursotettavuutta menettämättä olennaisesti korroosionkestävyyttä
Zn	Antaa magnesiumin ja kuparin kanssa suuren lujuuden

Alumiiniseoksille on kaksi erilaista nimikejärjestelmää, jotka molemmat perustuvat standardeihin. Numeerinen järjestelmä noudattaa standardia SFS-EN 573-1, ja kemialliseen koostumukseen perustuva järjestelmä standardia SFS-EN 573-2. (Teknologiateollisuus 2006, s. 61)

Numeerinen nimike alkaa etuliitteellä EN, mikä tarkoittaa eurooppalaista standardia. Tämän jälkeen tulee materiaalitunnus A, joka tarkoittaa alumiinia. Materiaalitunnuksen jälkeen merkitään seoksen tyyppi W (muokattavat seokset) tai C (valuseokset). Lopuksi nimikkeeseen tulee neljä tai viisinumeroinen seosnumero, riippuen onko kyseessä muokattava vai valuseos, minkä ensimmäinen numero ilmaisee pääseosaineen. Taulukossa 2 on esitetty eri seosryhmät. (Teknologiateollisuus 2006, s. 61-62; SFS-EN 573-1 2005, s.6)

Taulukko 2. Alumiiniseokset (SFS-EN 573-1 2005, s. 6)

Alumiinia vähintään 99,00%	1xxx (1000-sarja)
Kupari	2xxx (2000-sarja)
Mangaani	3xxx (3000-sarja)
Pii	4xxx (4000-sarja)
Magnesium	5xxx (5000-sarja)
Magnesium ja pii	6xxx (6000-sarja)
Sinkki	7xxx (7000-sarja)
Muut seosaineet	8xxx (8000-sarja)
Käyttämätön sarja	9xxx (9000-sarja)

Alumiiniseokset voidaan jakaa ei lämpökäsiteltäviin eli karkenemattomiin seoksiin sekä lämpökäsiteltäviin eli karkeneviin seoksiin. Karkenematon seos tarkoittaa, että se ei reagoi lämpölujittamiseen, vaan sen lujuutta voidaan nostaa vain kylmämuokkauksella. Yleisimmät seosaineet näillä seoksilla ovat mangaani ja magnesium, jotka voivat olla seosaineena sekä yhdessä, että erikseen. Karkenemattomia seoksia ovat: 1000-sarja (seostamaton alumiini), 3000-sarja (AlMn- ja AlMnMg-seokset), 4000-sarja (AlSi-seokset), 5000-sarja (AlMg-seokset) ja 8000-sarja (muut seosaineet). Lujuuden nostaminen saadaan aikaan muokkauslujittamisella, joka tapahtuu yleensä valmistuksen yhteydessä kylmämuokkauksella. (Lukkari 2001, s. 46; Polmear, StJohn, Nie & Ma 2017, s. 178-180)

Karkenevat seokset puolestaan lujitetaan lämpökäsittelyssä erkautuskarkaisulla. Tällöin seoksessa täytyy olla aineita, joiden liukoisuus vaihtelee lämpötilan mukaan siten, että se on korkeampi suurissa lämpötiloissa kuin pienissä. Näitä seoksia ovat: 2000-sarja (AlCu- ja AlCuMg-seokset), 6000-sarja (AlMgSi-seokset) ja 7000-sarja (AlZnMg- ja AlZnMgCu-seokset). Lämpökäsiteltävät seokset voidaan jakaa kahteen ryhmään. Toiseen ryhmään kuuluvat keskilujiset ja helposti hitsattavat AlMgSi- ja AlZnMg-seokset, ja toiseen suurilujiset ja rajoitetusti hitsattavissa olevat AlCu-, AlCuMg- ja AlZnMgCu-seokset. (Lukkari 2001, s. 16; Polmear et al. 2017, s. 184) Lämpökäsitellyt seokset omaavat siis korkean lujuuden, minkä vuoksi ne ovat mielenkiinnon kohteena tutkittavan rakenteen materiaalin valintaa käsiteltäessä.

Alumiiniseoksien ominaisuuksien muokkauksessa käytettyjen käsittelyjen tunnuksot on esitetty standardissa SFS-EN 515:2017. Tilojen tunnuksiin merkitään kirjaimin päätunnus, jonka perään tarkempi luokittelu numeroin. Standardin mukaiset toimitustilat ovat valmistustila (F), pehmeäksi hehkus (O), muokkauslujitus (H), liuotushehkus (W) ja vain lämpökäsiteltäville seoksille lämpökäsittely (T). (SFS-EN 515:2017, s. 5-6)

2.2 Hitsattavuus

Yleisesti ottaen alumiinilla ja sen seoksilla on hyvä hitsattavuus. Ainoastaan hitsauksen kannalta huonoja ovat useat 2000-sarjan seokset sekä 7000-sarjan suurilujiset seokset. (Polmear et al 2017, s. 221) Alumiinilla on kuitenkin ominaisuuksia, jotka tulee ottaa huomioon hitsauksessa. Alumiinin suuri lämmönjohtavuus aiheuttaa lämmön karkaamisen hitsausliitoksesta, mikä voi johtaa liitosvirheisiin, sillä lämpö ei välttämättä riitä sulattamiseen ja sitä kautta riittävään tunkeumaan. Suuri lämpölaajeneminen aiheuttaa myös ongelmia alumiinin hitsauksessa, sillä sen vuoksi alumiini vetelee eli siihen aiheutuu lämpömuodonmuutoksia hitsauksen aikana. Suuren lämmönjohtavuuden vuoksi hitsauksessa suositaan nopeita prosesseja. Myös alumiinin pinnalle muodostuva oksidikalvo vaikeuttaa sen hitsausta. Oksidikalvo on kova ja sitkeä, ja sen sulamispiste on kolme kertaa suurempi kuin alumiinin. Näin ollen hitsauksen lämpö ei pysty sulattamaan sitä, kuin pieneltä alueelta kerrallaan valokaaren kohdalta. Lisäksi sulanut oksidikalvo voi aiheuttaa hitsausvirheitä tai vetyhuokosia, koska painavuutensa vuoksi se vajoaa alumiinisulan sekaan. (Lukkari 2001, s. 57-59; Mathers 2002, s. 23)

Alumiiniseokset ovat myös herkkiä kuumahalkeilulle, jotka ovat yleisimpiä halkeamatyyppejä alumiinihitseissä. Kuumahalkeama syntyy, kun seosaineet jähmettyvät eriaikaisesti, josta aiheutuu halkeamia synnyttäviä jännityksiä raerajoille. Kuumahalkeilutaipumus onkin merkittävin mittari seoksen hitsattavuuden kannalta. Kuumahalkeiluun ovat taipuvaisia etenkin niukkaseosteiset seokset, joissa on 0,5-2% seosainetta. (Lukkari 2001, s. 61, 71) Esimerkkejä hyvin hitsattavista alumiiniseoksista on esitetty kuvassa 1.

Hyvin hitsattavia seoksia	Nimike	
	Numeerinen EN AW	Koostumus EN AW
Kaikki seostamattomat alumiinit. Esim.:	1050A	Al99,5(A)
Useimmat karkenemattomat seokset. Esim.:	3103	AlMn1
	5052	AlMg2,5
	5083	AlMg4,5Mn0,7
Useat karkenevat seokset. Esim.:	6005	AlSiMg
	6005A	AlSiMg(A)
	6063	AlMg0,7Si
	6063A	AlMg0,7Si(A)
	6082	AlSi1MgMn
	6101	EAlMgSi
	7021	AlZn5,5Mg1,5

Kuva 1. Muokattavien alumiinien ja alumiiniseosten hitsattavuus (Lukkari 2001, s. 76)

2.2.1 Ei-lämpökäsiteltävät seokset

1000-sarja, on hyvin hitsattavissa mutta sen lujuusominaisuudet ovat alhaiset. Siinä ei ole seosaineita, joten se ei ole kuumahalkeilualtis koko sulan jäähmettyessä samanaikaisesti. Myöskään lujuusominaisuudet eivät juurikaan laske hitsauksen vuoksi. Yhtaikainen jäähmettyminen kuitenkin altistaa sen huokosille, mistä voi seurata hitsausvirheitä. (Lukkari 2001, s. 46, 62, 66, 71) 3000-sarjan seokset ovat ominaisuuksiensa suhteen lähes samanlaisia kuin 1000-sarjan seokset. Näin ollen hitsattavuus on samaa luokkaa kuin puhtailla alumiineilla. Mangaanin avulla saadaan seokselle hieman korkeammat ominaisuudet lujuuden ja korroosionkeston osalta mutta lujuus on silti matala, joten sen käyttö lujuutta vaativissa kohteissa on vähäistä. (Teknologiateollisuus 2006, s. 57; Lukkari 2001, s. 46)

4000-sarjan seokset eivät ole kovinkaan kuumahalkeilualttiita, koska niiden seosaineistus on yleensä tarpeeksi suuri. Näin ollen ne ovat hitsattavissa. Alumiini-pii-seokset sopivat hyvin valamiseen ja niitä käytetäänkin hyvin vähän muokattuina tuotteina. Lisäksi hyvä juoksevuus ja matala herkkyys kuumahalkeiluun tekevät alumiini-pii-seoksista yleisen lisäainemateriaalin hitsauksessa. (Lukkari 2001, s. 46, 63; Mathers 2002, s. 41)

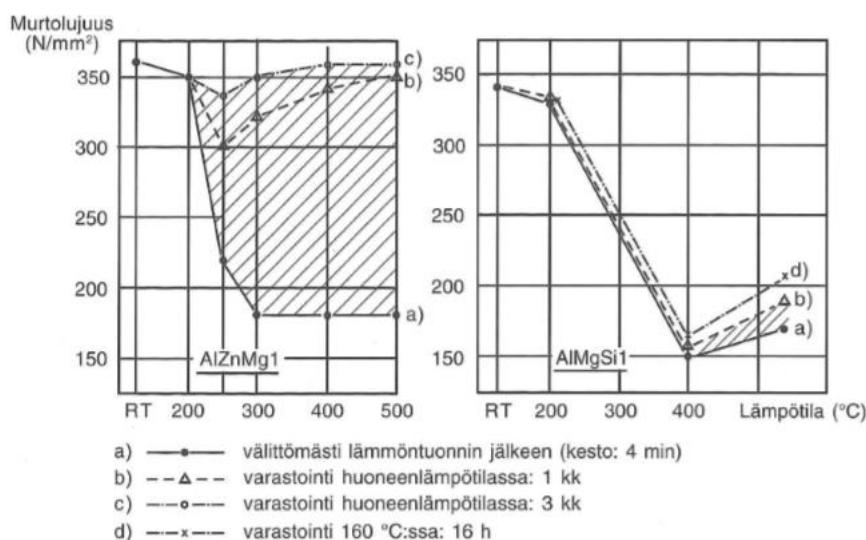
5000-sarjan seosten lujuusominaisuudet ovat korkeimmat kylmämuokatuista seoksista, joten niitä käytetään lujuutta vaativiin kohteisiin kuten laivanrakennukseen. Niiden hitsattavuus

on myös hyvä, vaikkakin muokkauslujitettujen seosten lujuus laskee hitsauksen takia. Karkenemattomien seosten lujuudet hitsauksen jälkeen ovat yleisesti samaa luokkaa kuin hehkutetussa tilassa riippumatta kylmämuokkauksen tasosta (Polmer et al. 2017, s. 221). Lujuuden pieneneminen johtuu muutosvyöhykkeellä (HAZ) tapahtuvasta uudelleenkiteytyksestä eli rekristallisaatiosta. Muokkauslujitettuun seokseen on vaikeaa saada lujuus takaisin hitsauksen jälkeen. Kuumahalkeiluriski on matala, sillä seospitoisuus on yleensä yli 3%. Hitsauksessa on myöskin vältettävä AlSi-lisäainetta, sillä se muodostaa kuumahalkeilualtista magnesiumsilikaattia. (Lukkari 2012, s. 28; Lukkari 2001, s. 47, 63)

2.2.2 Lämpökäsiteltävät seokset

2000-sarjan seokset ovat lujia seoksia, mutta ne voivat olla huonosti hitsattavia kuumahalkeilun vuoksi. Esimerkiksi seokset EN AW-2017 ja EN AW-2024 ovat huonosti hitsattavia, mutta seoksella EN AW-2219 puolestaan on vähäinen halkeilutaipumus, joten sillä on hyvä hitsattavuus. Halkeilutaipumusta pystytäänkin vähentämään käyttämällä lisäaineita, joilla jähmettymislämpötila on alhainen, koska tällöin hitsiaine jähmettyy viimeisenä. Lämpökäsiteltävien seosten lujuudet tippuvat hitsauksen jälkeen yleisesti samalle tasolle kuin tilassa T4 (liuoshehkutettu ja luonnollisesti vanhennettu). 2000-sarjan seoksille pystytään palauttamaan lujuutta hitsauksen jälkeen lämpökäsittelyllä. (Sasabe 2009, s. 339, 349; Lukkari 2001, s. 63, 77; Polmer et al. 2017, s. 221)

6000-sarjan seokset ovat yleisesti käytettyjä lämpökäsiteltyjä seoksia ominaisuuksiensa takia. Niillä on hyvät lujuus- ja pursotusominaisuudet sekä ne ovat hyvin hitsattavia, vaikkakin ne voivat olla kuumahalkeilualttiita. Kuumahalkeilua esiintyy erityisesti silloin, jos hitsataan perusainetta vastaavalla lisäaineella tai ilman lisäainetta. Tästä syystä hitsauksessa käytetään joko AlSi- tai AlMg lisäaineita. 6000-sarjan seosten lujuus laskee hitsattaessa ja se on mahdollista palauttaa vain uudella liuotuskäsittelyllä, koska vanhentumisessa tapahtuva lujuuden kasvu on vähäistä. (Lukkari 2001, s. 49, 62, 69; Mathers 2002, s. 44) Kuvassa 2 on vertailu yhden 6000-sarjan ja yhden 7000-sarjan seosten välillä vanhenemisessa tapahtuvasta lujittumisesta.



Kuva 2. Seosten EN AW-7020 ja EN AW-6082 lujittuminen vanhentamisessa hyvin lyhyen lämpökäsittelyn jälkeen (Lukkari 2001, s. 69)

7000-sarjan seokset ovat lujia seoksia, joita käytetään esimerkiksi hitsatuissa rakenteissa. Seoksien hitsattavuus riippuu siitä, kuinka paljon seokseen on seostettu kuparia seoksen lujittamiseksi. Mitä enemmän seoksessa on kuparia, sen alttiimpi se on kuumahalkeilulle. AlZnMg-seoksen kuumahalkeilualttius ei eroa 6000-sarjasta juurikaan, mutta AlZnMgCu-seoksilla kuumahalkeilu on ongelma. AlZnMg-seoksilla päästään hyviin lujuusominaisuuksiin hitsauksen jälkeen. Lujuus laskee hitsauksessa, mutta se palautuu lähes kokonaan vanhenemalla joko huoneenlämmössä tai korotetussa 120-130°C lämpötilassa. Esimerkiksi seoksen EN-AW-7020 T6 lujuus hitsauksen jälkeen palautuu lähes ennalleen 90 vuorokauden jälkeen huoneenlämpötilassa. (Fukuda 2010, s. 260-261; Lukkari 2001, s. 50, 68)

Tässä luvussa käsiteltiin eri alumiiniseoksia ja niiden hitsattavuutta, minkä pohjalta voidaan rajata pois jo joitain seossarjoja case-tutkimuksen alumiinipalkin materiaalivaihtoehtoista. Eri seossarjojen lujuusominaisuuksien ja hitsattavuuden perusteella voidaan karsia pois muut seossarjat paitsi 5000-, 6000-, ja 7000-sarjan seokset.

3 ALUMIINIPALKKIEN VALMISTUSTEKNIIKAT

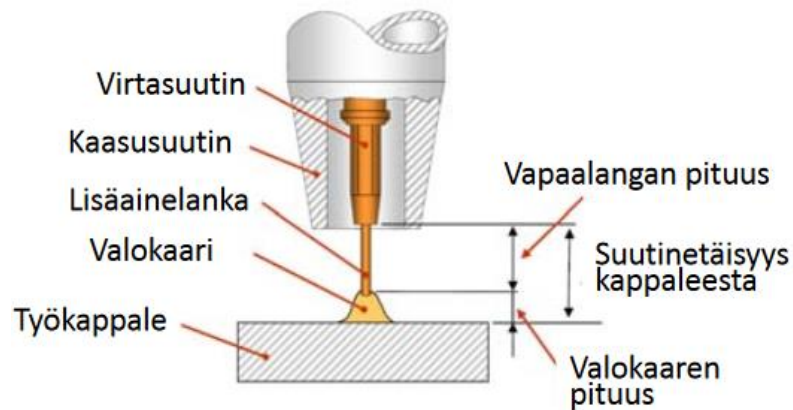
Tässä luvussa käydään läpi eri menetelmiä liittyen alumiinipalkin valmistukseen. Hitsausprosesseissa keskitytään alumiinin hitsauksessa yleisimmin käytettäviin prosesseihin eli MIG- ja TIG-prosesseihin sekä hitsauksen automatisointiin. Myös kitkahitsaus pyörivällä työkalulla sekä palkkiprofiilin pursotus käydään läpi.

3.1 Hitsausprosessit

Alumiinia pystytään hitsaamaan monilla eri hitsausprosesseilla, mutta kaasukaarihitsausprosessit, etenkin MIG- ja TIG-prosessit ovat yleisimpiä prosesseja. Kaasukaarihitsausprosessien hyvänä puolena on se, että valokaari pystyy poistamaan oksidikerroksen. Ilmiötä kutsutaan katodiseksi puhdistukseksi, jossa kaasuionit iskeytyvät suurella nopeudella oksidikalvon pintaan, ja rikkovat sen mekaanisesti. Lisäksi prosesseissa käytetään inerttiä suojakaasua, joka estää oksidikalvon syntymisen hitsauksen aikana. Valokaaren pintapuhdistuskyvystä huolimatta pinta täytyy puhdistaa myös ennen hitsausta, sillä oksidikalvo sitoo itseensä kosteutta, joka vapautuu kalvon sulaessa. (Polmer et al. 2017, s. 220; Lukkari 2012, s. 20)

3.1.1 MIG- hitsaus

MIG-hitsauksen nimi tulee sanoista ”Metal-arc” ja ”Inert Gas”. Se on hitsausprosessi, jossa valokaari palaa lisäainelangan ja työkappaleen välissä sulattaen lisä- ja perusainetta ja muodostaa hitsin. MIG-hitsauksen periaate on esitetty kuvassa 3. Se on puoliautomatoitu prosessi, sillä lisäainelankaa syötetään automaattisesti tasaisella nopeudella valokaaren. Hitsaustapahtumaa suojaa inertti suojakaasu, joka tarkoittaa reagoimatonta kaasua, joita on esimerkiksi jalokaasut kuten argon ja helium. MIG-hitsauksessa hitsausvirta riippuu lisäaineensyötön nopeudesta. Suuri lisäainelangan syöttönopeus mahdollistaa suuret hitsausnopeudet, jolloin hitsauspolttimen korkeuden hallinta on hankalaa. MIG-virtalähde kuitenkin synnyttää itsestään säätyvän valokaaren, jolloin valokaaren pituus pysyy samana, vaikka hitsauspolttimen etäisyys hitsattavasta kappaleesta muuttuu. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 71-72; Weman 2012, s. 75-84)

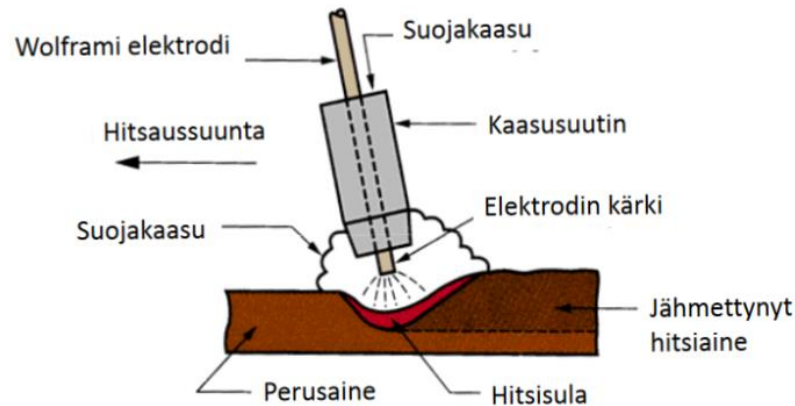


Kuva 3. MIG-hitsauksen periaatekuva (Suoranta 2018, s. 4)

MIG-hitsaus sopii alumiinin hitsaukseen hyvin sen korkean nopeuden ansiosta. Alumiini johtaa lämpöä hyvin, joten suuri nopeus ehkäisee lämmön leviämistä suurelle alueelle. Lisäksi sillä on hyvä valokaaren pintapuhdistuskyky, joka on tärkeä alumiinin oksidikalvon vuoksi. MIG-hitsaus on myös helposti mekanisoitavissa sekä automatisoitavissa ja sillä voidaan hitsata kaikissa asennoissa. Alumiinin hitsauksessa suojakaasuna käytetään argonia. Kaasun tulee olla puhdasta ja virtauksen häiriötöntä. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 220; Lukkari 2001, s. 119)

3.1.2 TIG-hitsaus

TIG-hitsauksen nimi tulee sanoista ”Tungsten” ja ”Inert Gas”. Se on myös kaasukaarihitsausprosessi, mutta TIG-hitsauksessa valokaari palaa perusaineen ja sulamattoman volframielektrodin välillä (kuva 4). Sulamaton elektrodi on erona MIG-hitsaukseen, jossa sulava lisäainelanka toimii elektrodina. Tämän ansiosta TIG-hitsausta voidaan suorittaa myös ilman lisäainetta. Mahdollinen lisäaine syötetään lankana valokaareen erikseen. Tämä mahdollistaa hyvän tunkeuman ja sulan hallinnan, minkä ansiosta pystytään hitsaamaan esimerkiksi alhaisilla virran arvoilla. TIG-hitsaus on näin ollen hyvä esimerkiksi pohjapalkojen ja ohuiden materiaalien hitsauksessa suhteessa muihin prosesseihin. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 71-72; Weman 2012, s. 63-66)

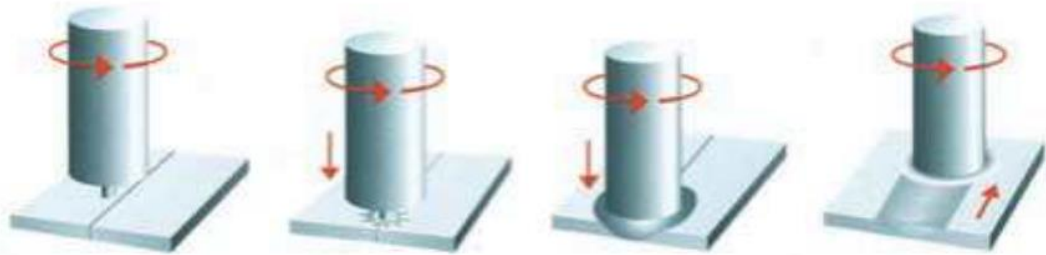


Kuva 4. TIG-hitsauksen periaatekuva (Suoranta 2018, s. 32)

Alumiinia hitsattaessa käytetään vaihtovirtaa, eli hitsauksen aikana elektrodin ja työkappaleen napaisuudet vaihtelevat. Vaihtovirran avulla saadaan aikaan katodinen puhdistus, jossa valoakari rikkoo alumiinin pinnalla oleva oksidikalvon. TIG-hitsaus on helppo mekanisoida tai automatisoida, ja sillä pystytään hitsaamaan kaikissa asennoissa. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 221; Lukkari 2001, s. 103)

3.1.3 Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla

Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla (Friction Stir Welding, FSW) kehitettiin 1990-luvulla erityisesti juuri alumiinin hitsaukseen (Lukkari 2001, s. 163). Suomenkielessäkin Friction stir welding:stä käytetään lyhennettä FSW, joka on myös tässä työssä käytössä. FSW:n toimintaperiaate perustuu pyörivään työkaluun, jota liikutetaan liitettävien pintojen välissä (kuva 5). Pyörivä työkalu aiheuttaa perusmateriaaliin plastista muodonmuutosta, joka aiheuttaa kitkaa työkappaleen ja työkalun väliin. Kitkan aiheuttama lämpö pehmentää perusmateriaalia työkalun ympäriltä, joka yhdessä pyörivän liikkeen vaikutuksesta aiheuttaa pehmenneen materiaalin liikkumisen työkalun etupuolelta taakse. Metallin virtaus täyttää työkalun tekemän railon sen liikkeessä eteenpäin. Pyörivä työkalu muodostaa siis liikkeessään kiinteän tilan liitoksen, jossa ei tapahdu perusmateriaalin sulamista. (Mishra, De & Kumar 2014, s. 3-5)



Kuva 5. Friction stir welding- periaatekuva (Tuovinen 2006, s. 41)

Perinteiseen kitkahitsausprosessiin verrattuna, joissa prosessi rajoittuu pyörähdyssymmetrisiin kappaleisiin, on FSW:n mahdollisuudet laajemmat. Sitä voidaan hyödyntää lähes kaikille rakenteellisille geometrioille, sekä sillä voidaan muodostaa useita eri liitosmuotoja. Mahdollisia liitosmuotoja ovat esimerkiksi päittäisliitos, päällekkäisliitos, T-liitos ja pienaliitos. FSW:n etuna verrattuna sulahitsaukseen on se, että sulamista ei tapahdu. Tästä syystä esimerkiksi kuumahalkeilua ei pääse tapahtumaan alumiinin hitsauksessa. Lisäksi hitsauksessa ei tarvita lisäainetta eikä suojakaasua. (Mishra et al. 2014, s. 7-8). Yhtenä haasteena FSW:llä on tuenta, sillä työkalun liikuttaminen tarvitsee paljon voimaa, ja hitsattavien kappaleiden tulee pysyä paikallaan hitsauksen onnistumiseksi. Lisäksi työkalu jättää hitsin loppuun reiän, joka mahdollisesti joudutaan tukkimaan muilla menetelmillä. (Colligan 2010, s. 24) Tärkeimpiä FSW:n etuja ovat:

- Ei tarvita railonvalmistusta: ainoastaan rasvanpuhdistus
- Korkealaatuiset hitsit: korkeampi lujuus, hyvät väsymisominaisuudet ja korroosionkesto
- Ympäristöystävällinen: ei valokaarta, hitsaushöyryjä tai roiskeita
- Matalat käyttökustannukset: ei kulutustavaraa ja matalat energiakustannukset
- Ei jälkikäsittelyä: vähäiset muodonmuutokset ja kutistuvuus

(ESAB 2019)

3.2 Hitsauksen automatisointi

Hitsauksesta aiheutuvia kustannuksia pyritään laskemaan jatkuvasti. Kun halutaan nostaa tuottavuutta ja samalla madaltaa valmistuskustannuksia, on hitsauksen automatisointi yksi keino. (Cary & Helzer 2005, s. 289) Lisäksi asiakkaan vaatimukset lopputuotteen laadulle etenkin teknisesti vaativissa tuotteissa lisäävät painetta automatisoinnille, sillä pätevistä

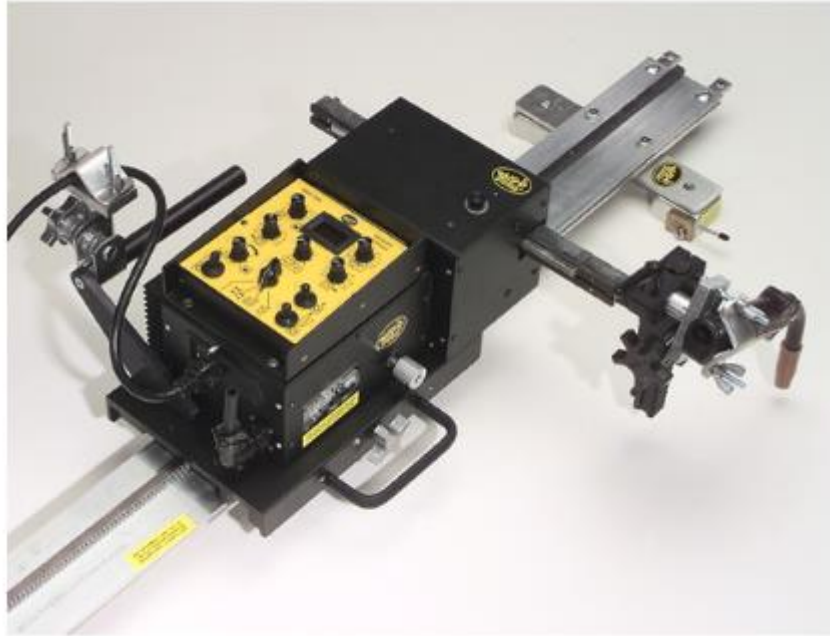
hitsareista on puutetta (Holamo 2016, s. 7). Automatisoidussa hitsauksessa saavutettavia etuja ovat esimerkiksi:

1. Tuottavuuden kasvu korkeamman operaattoriasteen myötä
2. Tuottavuuden kasvu korkeamman hitsiaineen tuoton myötä
3. Tuottavuuden kasvu suuremman hitsausnopeuden ansiosta
4. Hyvä hitsin laatu, joka on ennustettavissa ja tasalaatuinen
5. Kustannusten määrittäminen johtuen ennakoitavasta hitsausajasta
6. Työntekijöiden osaamisvaatimus ja koulutuksen tarve vähenee
7. Työturvallisuus kasvaa, kun työntekijän ei tarvitse olla hitsauksen välittömässä läheisyydessä
8. Lopputuotteen laadun tasaisuus

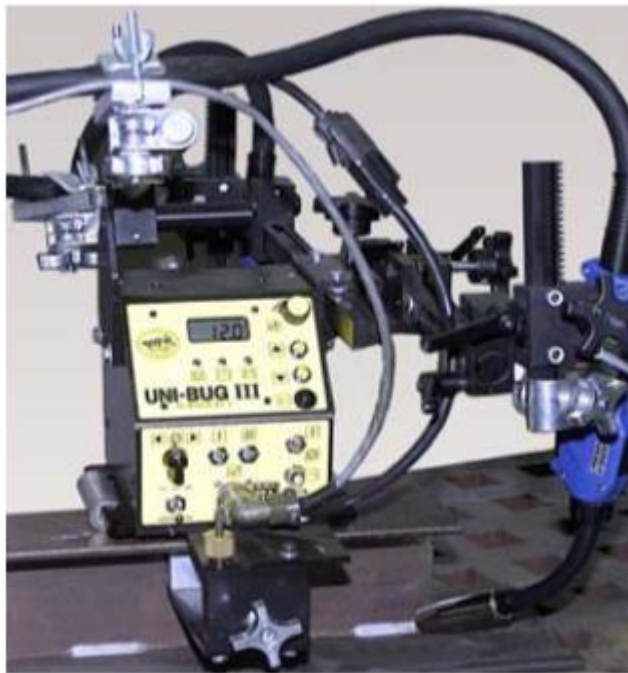
(Cary & Helzer 2005, s. 289)

3.2.1 Hitsauksen mekanisointi

Mekanisoidussa hitsauksessa hitsauspoltinta liikutetaan hitsiä pitkin koneen avulla. Hitsaajan rooli muuttuu siten, että hitsauksen sijasta hän valvoo hitsausprosessia ja tarvittaessa säätää hitsausparametreja. Mekanisoituja hitsauspään kuljettimia ovat esimerkiksi kiskoilla liikkuvat kuljettimet (kuva 6), työkappaleeseen kiinnitettävät mekanisointilaitteet (kuva 7) ja hitsaustraktorit (kuva 8). (Cary & Helzer 2005, s. 292; Haula 2008, s. 4-5) Erilaisilla hitsauspään kuljettimilla voidaan päästä moninkertaisiin hitsausnopeuksiin verrattuna käsinhitsaukseen. Käsinhitsauksessa hitsausnopeus on keskimäärin noin 20-40 cm minuutissa, kun kevytmekanisoinnilla voidaan päästä jopa 100 cm minuutissa alapienan hitsauksessa. (Jernström 2011, s. 9)



Kuva 6. Kiskokuljetin (Haula 2008, s. 4)



Kuva 7. Hitsattavaan työkappaleeseen kiinnitettävä kuljetin (Haula 2008, s. 4)



Kuva 8. Akkukäyttöinen hitsaustraktori (Haula 2008, s. 3)

3.2.2 Hitsauksen robotisointi

Robottihitsaus on yksi menestyksekkäimmistä robotiikan sovelluksista useilla eri teollisuuden aloilla. Tekniikan kehittyessä, robottien hinnat pienenevät ja ohjelmointi helpottuu, minkä vuoksi robottihitsaus yleistyy teollisuuden käytössä. Robottihitsauksen suurimpia hyötyjä on ihmisen vaikutuksen eliminointi hitsausprosessissa, minkä ansiosta hitsauksen laatu ja tuottavuus paranee, sekä valmistuskustannukset vähenevät. (Lin & Luo 2015, s. 2404)

Hitsausrobotit ovat yleensä kuuden vapausasteen nivelvarsirobotteja (kuva 9), jotka koostuvat virtalähteestä, hitsauspolttimesta, lisääineensyöttölaitteesta, hitsauspään puhdistus- ja kalibrointiasemasta sekä turva-aidasta. Kehittyneemmissä sovelluksissa on myös optisia railonhakulaitteistoja, joilla pystytään reaaliaikaisesti seuramaan railoa esimerkiksi hitsauksesta aiheutuvien muodonmuutosten mukaisesti. Robottihitsauksen yhtenä haasteena on kompensoida hitsattavassa kappaleessa olevia epätarkkuuksia, jotka aiheuttavat laaturvirheitä. Erilaisien sensorien avulla pystytään esimerkiksi paikantamaan ja seuraamaan railoa sekä hallitsemaan tunkeumaa hitsauksen aikana. Robottihitsaus vaatii hitsattaville kappaleille esivalmisteluja, sillä railot tulee olla tasalaatuisia ja puhtaita, ja

esimerkiksi railon leveyden toleranssi ei saa olla yli 1 mm. (Lin & Luo 2015, s. 2404; Kah et al. 2015, s. 1, 5)



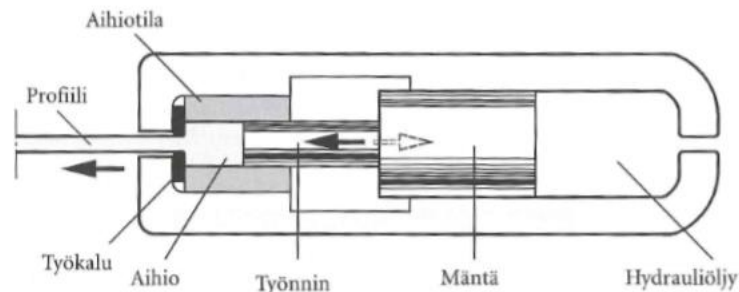
Kuva 9. Hitsausrobotti (Finnrobotics 2018)

Alumiinin robotisoidussa MIG-hitsauksessa alumiinin pinnalla oleva oksidikalvo hankaloittaa etenkin valokaaren sytyttämistä. Oksidikalvo toimii eristeenä alumiinin pinnalla, jolloin kalvon läpi pääsemiseen tarvitaan enemmän energiaa valokaarelta. Tämän vuoksi hitsausrobotin valokaaren sytytysvaiheessa ei välttämättä ole riittävästi energiaa oksidikalvon läpäisemiseksi, jonka vuoksi hitsauksen aloituskohdassa voi esiintyä virhettä. Alumiinin hitsauksessa on yleistä, että alussa käytetään suurempia hitsausarvoja, jolloin valokaaren sytytys helpottuu. Hitsin loppuosa hitsataan pienemmällä arvoilla. (Hoffman 2007, s. 40, 42)

3.3 Palkkiprofiilin pursotus ja taivutus

Alumiinin matalan muokkauslämpötilan (450-500°C) ansiosta pursotetun alumiiniprofiilin muoto voidaan valita melko vapaasti. Pursotus on tehokas keino valmistaa monimuotoisia profiileja, sillä silloin voidaan suunnitella profiili juuri sille tarkoitetun toiminnon täyttämiseen. Poikkileikkaukseen voidaan esimerkiksi tehdä paksumpi kohta, jos tiedetään sen joutuvat suuremmalle kuormitukselle. Toisaalta keventää kohdista, joissa lujuutta ei tarvita niin paljoa. Pursotettuun profiiliin voidaan myös tehdä suoraan esimerkiksi erilaisia uria, jotka jouduttaisiin muuten työstämään. Kuvassa 10 on esitetty pursotuksen periaate.

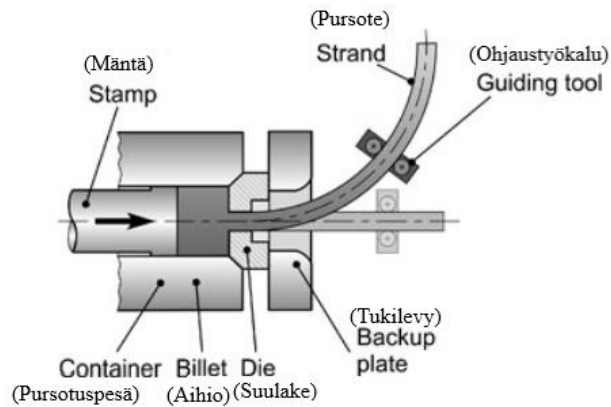
Kuumennettu aihio puristetaan hydraulisesti pursotustyökalun läpi, josta saadaan valmis profiili. (Lukkari 2001, s. 29-31; Teknologiateollisuus 2006, s. 46)



Kuva 10. Pursotuksen periaate (Teknologiateollisuus 2006, s. 46)

Alumiiniprofiileja voidaan taivuttaa esimerkiksi rullataivutuksella ja venytystaivutuksella. Taivuttamisprosesseissa esiintyy kuitenkin haasteita, joita ovat esimerkiksi epätarkkuutta aiheuttava takaisinjousto, poikkileikkauksen muodonmuutokset ja seinämän ohentuminen. Profiilien taivuttamisessa tuleekin ottaa huomioon etenkin poikkileikkauksen muodonmuutokset, ja tästä syystä ontot profiilit tulee tukkia ennen taivutusta esimerkiksi tuurnilla tai levyliuskoilla. (Teknologiateollisuus 2006, s. 146, 152, 154; Selvaggio et al. 2015, s. 287)

Pursottamalla profiili suoraan kaarevaksi voidaan ehkäistä kyseisiä ongelmia. Kaarevan profiilin pursottamisen aikana profiili syötetään ohjaustyökalulle, joka ohjaa materiaalin virtausta siten, että muoto kaareutuu. Kaarevan profiilin pursotuksen periaate on esitetty kuvassa 11. Kyseisellä tekniikalla pystytään taivuttamaan kolmiulotteisesti monimutkaisiakin poikkileikkauksia ilman muodonmuutoksia. Kaarevan profiilin pursotus sopii erityisesti pienten tuotantoerien tuotantoon joustavuutensa ansiosta. (Selvaggio et al. 2015, s. 287-288, 291)



Kuva 11. Kaarevan profiilin pursotuksen periaatekuva. (Selvaggio et al. 2015, s. 288) (muokattu)

Pursotetuille alumiiniprofiileille on esitetty mitta- ja muototoleransseja standardissa SFS-EN 755-9. Sen perusteella on kerätty esimerkiksi joitakin eri toleranssien arvoja ontolle profiilille, jonka poikkileikkauksen ympäri piirretyn ympyrän halkaisijan suuruus on 300-500 mm, poikkileikkauksen sivun pituus 300-450 mm ja profiilin koko pituus 6000 mm. Toleranssien arvoja on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Onton alumiiniprofiilin mitta- ja muototoleransseja (SFS-EN 755-9 2016, s. 6, 10, 11, 16)

Toleranssi	Arvo (mm)
Poikkileikkauksen mittatoleranssi	$\pm 3,5$
Pituustoleranssi	+14
Kiertymätoleranssi	5,0
Suoruspikkeama	9

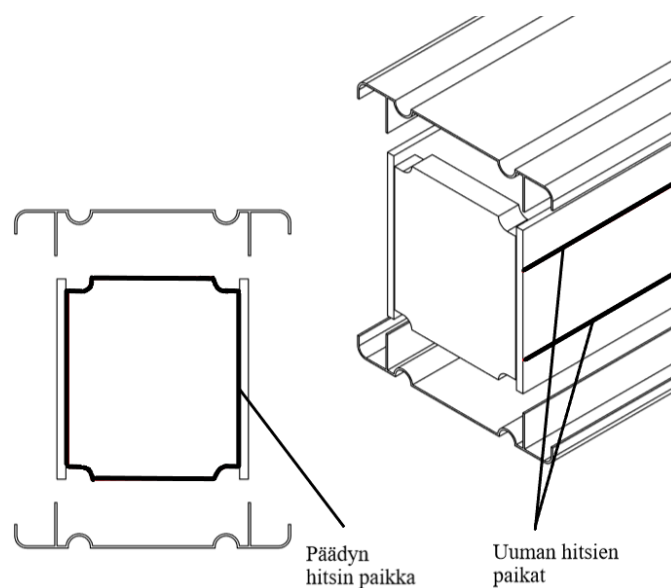
Lopulliset tarkkuudet ovat kuitenkin tapauskohtaisia eli riippuvat pursotetun profiilin geometrioista. Lisäksi profiilin mahdollinen taivutus lisää epätarkkuutta. Esimerkiksi Purso Oy:n profiilisuunnittelun käsikirjan mukaan profiilin taivutusmenetelmän valintaan vaikuttaa profiilin muoto (Purso Oy 2014, s. 34). Näin ollen myös taivutusmenetelmäkohtaiset toleranssit vaikuttavat lopulliseen tarkkuuteen.

4 CASE: KT-SHELTER

Case-osiossa tutkitaan mahdollista vaihtoehtoa alumiinipalkin nykyiselle seosvalinnalle sekä valmistustekniikalle. Alumiiniseoksen valinnassa tutkitaan eri seosten sopivuutta materiaaliksi valmistusmenetelmän ja käyttötarkoituksen kannalta. Valmistusteknisessä tarkastelussa tutkitaan valmistettavuutta sekä mekanisoinnin tai robotisoinnin hyödyntämisen mahdollisuuksia palkin hitsauksessa. Lopussa laaditaan vertailumatriisi, jossa esitetään mahdollisia valmistusteknisiä ratkaisuja ja jonka avulla tunnistetaan toteuttamiskelpoisimmat vaihtoehdot.

4.1 Palkkirakenteen esittely ja vaatimukset

Palkkirakenne valmistetaan hitsaamalla pursotettuihin profiileihin kiinni levyleikkeet sivuille ja pätyihin. Kuvassa 12 näkyvät palkin osat yksinkertaistettuna ilman tarkkoja geometrioita. Uuman hitsit tehdään katkohitseinä molemmilta sivuilta yhtä aikaa, jotta säästytään suurilta vetelyiltä. Päädyn hitsit hitsataan molemmilta puolilta riittävän tunkeuman saamiseksi siten, että sisäpuolen hitseihin päästään käsiksi palkin sivussa olevien reikien läpi. Hitsausprosessina on kaikissa hitseissä käsinhitsausena suoritettu MIG-hitsaus.



Kuva 12. Palkin päädyn rakenne yksinkertaistettuna

Nykyinen palkissa käytettävä alumiiniseos on EN AW-6082 T6. Sitä käytetään rakenteessa levyinä ja pursotteina. Vertailun vaatimuksena on, että rakenne ei saa heikentyä. Näin ollen materiaalivaihtoehtoa lähdetään haarukoimaan useasta eri vaihtoehdosta, joista niitä karsitaan lujuusominaisuuksien ominaisuuksien perusteella siten, että nykyisen seoksen lujuusominaisuudet ovat vertailun pohjana. Lujuusominaisuuksien lisäksi vaadittavia ominaisuuksia seokselle ovat hitsattavuus, pursotettavuus ja anodisoitavuus. Rakenteen toiminnallisuuden vaatimuksena on, että palkin muotoilu pysyy samana. Näin ollen esimerkiksi päätylevyn paikan tulee säilyä ennallaan.

4.2 Vaihtoehtoisten alumiiniseosten tunnistaminen

Eurokoodissa 9 on esitelty yleisimpiä materiaaleja, joita käytetään alumiinirakenteissa (SFS-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 167). Kuvaan 13 on kerätty seoksia Eurokoodin 9, sivun 167 taulukosta. Kuvaan on kerätty ne seokset, joilla on joko erinomaiset tai hyvät lujuusominaisuudet, erinomainen hitsattavuus, erinomainen, hyvä tai tyydyttävä anodisoitavuus ja joita saadaan levyinä tai pursotteina.

Seos	Standardisoitu muoto ja tila		Lujuus	Hitsattavuus	Anodisoitavuus
	Levy, ohutlevy ja nauha	Pursotetut profiilit			
EN AW-5052	x	x (yksinkertaisia avoprofiileja)	Hyvä/tyydyttävä	Erinomainen	Erinomainen/hyvä
EN AW-5083	x	x (yksinkertaisia avoprofiileja)	Erinomainen/hyvä	Erinomainen	Erinomainen/hyvä
EN AW-5454	x	x (yksinkertaisia avoprofiileja)	Hyvä/Tyydyttävä	Erinomainen	Erinomainen/hyvä
EN AW-5754	x	x (yksinkertaisia avoprofiileja)	Hyvä/Tyydyttävä	Erinomainen	Erinomainen/hyvä
EN AW-6060	-	x	Hyvä/Tyydyttävä	Erinomainen	Erinomainen
EN AW-6061	-	x	Hyvä/Tyydyttävä	Erinomainen	Hyvä/tyydyttävä
EN AW-6063	-	x	Hyvä/Tyydyttävä	Erinomainen	Erinomainen/Hyvä
EN AW-6005A	-	x	Hyvä	Erinomainen	Hyvä/tyydyttävä
EN AW-6106	-	x	Hyvä/tyydyttävä	Erinomainen	Erinomainen/hyvä
EN AW-6082	x	x	Erinomainen/hyvä	Erinomainen	Hyvä/Tyydyttävä
EN AW-7020	x	x	Erinomainen	Erinomainen	Hyvä/tyydyttävä

Kuva 13. Rakenteissa käytettyjen alumiiniseosten yleisominaisuuksien ja muiden piirteiden vertailu (SFS-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 167) (muokattu)

Kuvan 13 olevat seokset on järjestetty lujuusominaisuuksiensa perusteella taulukoihin 4 ja 5. Arvot on saatu Eurokoodin 9 s. 40-42 taulukoista, joissa on esitetty alumiiniseoksien ominaisarvoja myötölujuudelle ja murtolujuudelle hitsauksen muutosvyöhykkeellä. Muutosvyöhykkeen tekijä tarkoittaa suhdetta, joka ilmoittaa muutosvyöhykkeen lujuuden suhteessa alkuperäiseen materiaalin lujuuteen. Taulukossa 3 seoksien ominaisuudet ovat levyinä ja taulukossa 4 pursotettuina profiileina. Taulukoihin on valittu seokset, joiden

myötölujuus on vähintään sama hitsauksen jälkeen kuin nykyisellä seoksella EN AW-6082 T6, jolla se on 125 MPa. Muiden kuvan 13 seoksien lujuusominaisuudet muutosvyöhykkeellä on esitetty liitteessä I.

Taulukko 4. Alumiiniseoksien lujuusominaisuudet hitsin muutosvyöhykkeellä - levyt (SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 40) (muokattu)

Paksuus (mm)	Seos EN AW-	Muutosvyöhykkeen tekijä	Myötölujuus (MPa) (muutosvyöhyke)	Murtolujuus (MPa) (muutosvyöhyke)
alle 12,5	7020 T6	0,73/0,80	205	280
alle 40	7020 T651	0,73/0,80	205	280
alle 40	5083 H12	0,62/0,90	155	275
alle 25	5083 H24/H34	0,62/0,81	155	275
alle 40	5083 H22/H32	0,72/0,90	155	275
alle 25	5083 H14	0,55/0,81	155	275
alle 12,5	6082 T61/T6151	0,61/0,66	125	185
alle 12,55	6082 T6	0,48/0,60	125	185

Taulukko 5. Alumiiniseoksien lujuusominaisuudet hitsin muutosvyöhykkeellä - pursotetut profiilit (SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 41-42) (muokattu)

Paksuus (mm)	Seos EN AW-	Muutosvyöhykkeen tekijä	Myötölujuus (MPa) (muutosvyöhyke)	Murtolujuus (MPa) (muutosvyöhyke)
alle 40	7020 T6	0,71/0,80	205	280
alle 5	6082 T6	0,48/0,60	125	185

Taulukoista huomataan, että levyinä riittävän lujuuden omaavia seoksia hitsauksen jälkeen ovat EN AW-7020, EN AW-5083 ja EN AW-6082. Pursotettuina profiileina riittävät lujuusominaisuudet hitsauksen jälkeen on seoksilla EN AW-7020 ja EN AW-6082. Mikäli valmistuksessa voitaisiin käyttää sulahitsauksen korvaavaa menetelmää, eli hitsauksen

lämpövaikutusta lujuuteen ei tarvitsisi ottaa huomioon, on lähes kaikilla 6000- sarjan seoksilla riittävät lujuusominaisuudet pursotettuina profiileina (taulukko 6).

Taulukko 6. Alumiiniseoksien lujuusominaisuudet - pursotetut profiilit (SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 41-42) (muokattu)

Paksuus (mm)	Seos EN AW-	Myötölujuus (MPa)	Murtolujuus (MPa)
alle 40	7020 T6	275	350
alle 5	6082 T6	250	290
10-25	6005A T6	200	250
alle 25	6061 T6	240	260
5-10	6005A T6	215	260
alle 10	6106 T6	200	250
alle 10	6063 T66	200	245
alle 25	6063 T6	160	195
3-25	6060 T66	150	195
alle 15	6060 T6	140	170

Tarkempaan tarkasteluun otetaan nykyinen seos EN AW-6082, sekä seokset EN AW-5083 ja EN AW-7020 hyvien lujuusominaisuuksiensa vuoksi. Lisäksi hyvät pursotusseokset EN-AW-6063 ja EN AW-6061 tulevat mukaan vertailuun. Seuraavan kappaleen materiaalien ominaisuudet perustuvat Eurokoodi 9:n tietoihin. Lisää seosten ominaisuuksista on esimerkiksi standardissa SFS-EN 754-2, jossa on käsitelty etenkin eri seosten mekaanisia ominaisuuksia.

4.2.1 Vertailtavat alumiiniseokset

Seos EN AW-6082 on yleisesti käytetty lämpökäsitelty materiaali sekä hitsatuissa, että hitsaamattomissa rakenteissa. Sen etuna on suotuisa yhdistelmä eri ominaisuuksia, jotka ovat hyvä hitsattavuus esimerkiksi MIG- ja TIG-prosesseilla, hyvä korroosionkestävyys ja erittäin korkea lujuus etenkin lämpökäsiteltynä. Sen lujuus kuitenkin pienenee runsaasti hitsauksessa hitsin muutosvyöhykkeellä, mikä tulee ottaa huomioon. Pursotettavuus ei ole yhtä hyvä, kuin muilla 6000-sarjan seoksilla, jonka vuoksi valmistettavat profiilit ovat yksinkertaisempia ja paksumpia. (SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 166)

Seos EN AW-5083 on kylmämuokatuista seoksista lujin. Sillä on hyvä korroosionkesto, hyvät työstöominaisuudet sekä sillä on hyvä hitsattavuus MIG- ja TIG-prosesseilla. Korkean magnesiumipitoisuutensa vuoksi sitä on vaikea pursottaa, ja näin ollen pursotetut profiilit ovat yksinkertaisia ja paksuseinäisiä. Seos voi olla altis raerajakorroosiolle ja mahdollisesti jännityskorroosiolle, mikäli se joutuu jatkuvan kuormituksen alaiseksi. Erityisesti tilat H32 ja H34 ovat alttiita raerajakorroosiolle. (SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 169)

Seos EN AW-7020 on todella luja seos, jota käytetään sekä hitsatuissa, että hitsaamattomissa rakenteissa. Verrattuna 6000-sarjan seoksiin, sillä on hitsauksen jälkeen korkeammat lujuusominaisuudet sen luonnollisen vanhenemisen takia. Pursottamalla siitä ei kuitenkaan saada tehtyä yhtä monimutkaisia geometrioita kuin 6000-sarjan seoksilla. Seoksen saatavuus voi olla huono ja seos voi olla korroosioaltis. Mikäli lämpökäsitellyssä tilassa T6 olevaa materiaalia kylmämuokataan esimerkiksi taivuttamalla tai leikkaamalla, saattaa siitä tulla altis jännityskorroosiolle. (SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 168)

Seos EN AW-6063 on pursotusseos, jonka saatavuus rajoittuu pursotteisiin ja vedettyihin tuotteisiin. Sen lujuusominaisuudet eivät ole suuret, mutta niistä pystytään tekemään monimutkaisia profiileja. Seoksella on hyvä pinnanlaatu ja anodisoitavuus, ja se on hitsattavissa. Lujuus kuitenkin laskee muutosvyöhykkeellä, kuten muillakin 6000-sarjan seoksilla. (SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 168)

Seos EN AW-6061 on yksi käytetyimmistä pursotusseoksista seoksen EN AW-6063 kanssa. Sitä on saatavissa erilaisina pursotettuina profiileina ja putkina ja sitä käytetään yleensä lämpökäsitellyssä tilassa. Sillä on hyvä hitsattavuus ja korroosionkesto sekä verrattuna seokseen EN AW-6063, sillä on paremmat lujuusominaisuudet. (SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s. 166)

Mahdollisen eripariliitoksen kohdalla myös hitsauslisäaineen valinta on otettava huomioon. Tämä koskee tapauksia, joissa rakenteessa olisi siis käytetty sen eri osissa eri alumiiniseoksia, esimerkiksi seoksia EN AW-5083 ja EN AW-6082.

4.2.2 Hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely

Hitsauksen jälkeisellä lämpökäsittelyllä pystytään palauttamaan hitsauksessa menetettyä lujuutta riippuen seoksesta. Hitsauksen jälkeisiä lämpökäsittelyjä ovat luonnollinen vanhentaminen, jossa rakenne annetaan olla huoneenlämmössä määrätyn ajan, keinovanhentaminen, jossa rakennetta pidetään korotetussa lämpötilassa, sekä uusi erkautuskarkaisu, jossa alumiiniseosten lujittamisessa käytetty prosessi tehdään uudelleen hitsatulle rakenteelle. (Lukkari 2001, s. 67-70) Esimerkiksi seokselle EN AW-6082 luonnollinen vanhentaminen on kaksi vuorokautta ja keinovanhentaminen 8 tuntia noin 175°C lämpötilassa. (Teknologiateollisuus 2006, s. 98)

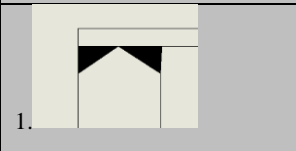
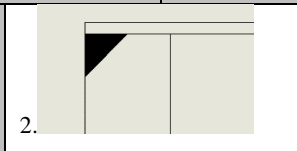
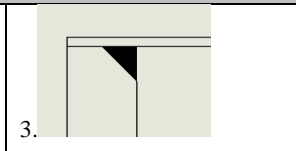
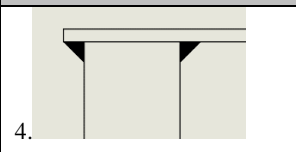
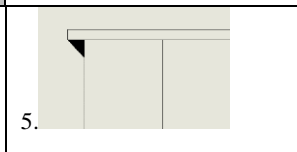
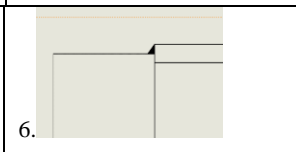

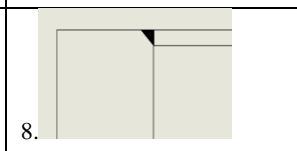
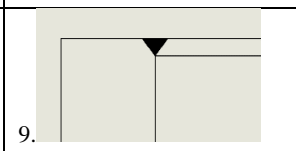
Kylmämuokattujen seosten lujuutta ei pystytä nostamaan lämpökäsittelyllä, joten hitsauksen jälkeisellä lämpökäsittelyllä ei ole hyötyä seoksen EN AW-5083 lujuusominaisuuksien nostamiseksi. Lämpökäsittelyjen seosten kohdalla lämpökäsittelyillä pystytään jonkin verran palauttamaan lujuutta. 6000-sarjan seoksilla lujuus palautuu kunnolla vain uuden erkautuskarkaisun avulla, jossa se liuotushehkutetaan ja keinovanhennetaan uudelleen. Näin saadaan palautettua yleisesti ottaen 85-100% seoksen alkuperäisestä lujuudesta. Uusi erkautuskarkaisu voi olla tosin haastava toteuttaa. 6000-sarjan seoksien lujuuksia saadaan hiukan nostettua myös luonnollisella vanhentamisella tai keinovanhentamisella. Esimerkiksi murtolujuus kasvaa keinovanhennuksessa noin 10-20%. Seoksen EN AW-7020 lujuus saadaan nostettua takaisin hyvin verrattuna 6000-sarjan seoksiin. Sen lujuus palautuu luonnollisella vanhentamisella noin 85-90% alkuperäisestä lujuudesta, ja keinovanhentamalla noin 85-100% alkuperäisestä. (Lukkari 2001, s. 71-72)

4.3 Vertailumatriisi

Alumiinipalkin mahdollisten valmistusvaihtoehtojen ja seosvaihtoehtojen pohjalta on muodostettu vertailumatriisi. Vertailumatriisin perusideana on jakaa suunniteltava tai kehitettävä kokonaisuus osatoimintoihin, joihin kehitetään eri vaihtoehtoja. Tässä tapauksessa tutkittava kokonaisuus on palkkiprofiilin valmistus, ja se on jaettu yhteensä 8 eri osaan, joihin on kehitetty vaihtoehtoja. Matriisi on toteutettu siten, että eri riveillä on eri palkkirakenteen kohdan valmistusmenetelmä tai materiaalivalinta, ja kyseisten rivien sarakkeilla on niille vaihtoehdot. Näin ollen eri rivien sarakkeita yhdistämällä saa aina yhden valmistusvaihtoehdon. Matriisin ideana on siis pyrkiä nostamaan esille useita eri vaihtoehtoja rivien osatoiminnoille. Vertailumatriisin etuna on se, että sen avulla saadaan

luotua hyvin paljon erilaisia kombinaatioita valmistukselle, tosin kaikki eivät ole suoraan käyttökelpoisia. Toisaalta vaikka kaikki ei olisikaan mahdollisia, voi kelvottomatkin ideat antaa uusia näkökulmia ja sitä kautta olla hyödyksi. Matriisi on esitetty taulukossa 7. Matriisiin tuottamia vaihtoehtoja on avattu taulukon jälkeen.

Taulukko 7. Vertailumatriisi, jossa harmaalla pohjalla toteuttamiskelpoisimmat vaihtoehdot

Hitsausprosessi		MIG	TIG	Laser	Plasma	FSW
Automaatioaste	Pääty	Käsinhitsaus	Robottihitsaus	Mekanisoitu hitsaus		
	Uuma	Käsinhitsaus	Robottihitsaus	Mekanisoitu hitsaus	Pursotus	
Uuman hitsi		Katkohitsi			Jatkuva hitsi	
Päädyn liitoksen ja railon muoto		1. 	2. 	3. 		
		4. 	5. 	6. 		
		7. 	8. 	9. 		
Materiaali EN AW-(palkin laippaprofiili)		6082	5083	7020	6063	6061
Materiaali EN AW-(palkin uumalevy)		6082	5083	7020	6063	6061
Materiaali EN AW-(palkin päätylevy)		6082	5083	7020	6063	6061
Hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely		Ei lämpökäsittelyä	Luonnollinen vanhentaminen	Keinovanhentaminen	Uusittu erkautuskarkaisu	

Hitsausprosesseissa on esitetty vaihtoehtoina useita prosesseja, joilla pystytään hitsaamaan alumiinia. Tarkastelu kuitenkin kohdistuu MIG-prosessiin, sillä kohdeyrityksen alihankintana valmistava yritys käyttää kyseistä prosessia. Muillakin prosesseilla hitsaus mahdollisesti pystyttäisiin toteuttamaan, mutta ne rajoittuvat pois tästä tarkastelusta.

Hitsauksen automaatioasteeseen vaikuttaa kyseisessä rakenteessa se, mitä kohtaa hitsataan. Uuman hitsit pystyttäisiin hitsaamaan robotilla tai mekanisoidulla kuljettimella, mutta katkohitsit voivat aiheuttaa laadun epätasaisuutta. Esimerkiksi robottihitsauksen

haastavimmat kohdat ovat hitsin aloitus ja lopetuskohdat, joten katkohausta tulisi siinä välttää. Katkohaustuksen hyvänä puolena on tosin vähentynyt lämmöntuonti ja sitä kautta pienemmät lämpömuodonmuutokset eli vetelyt. Näin ollen olisi hyvä tehdä testihitsit esimerkiksi robotilla, ja siten havaita aiheuttaisiko jatkuva hitsi liikaa lämpömuodonmuutosta rakenteeseen. Lisäksi huomionarvoista on, että mekanisoitu kuljetin mahdollistaa kahdella polttimella hitsaamisen samanaikaisesti molemmilta puolilta. Molempien puolien yhtäaikaiseen hitsaukseen tarvittaisiin siis kaksi hitsausrobotia. Yhtäaikainen molempien puolien hitsaaminen kuitenkin vähentäisi mahdollisesta epätasaisesta lämmöntuonnista johtuvia lämpömuodonmuutoksia.

Päädyn liitoksen ja railon muotoihin on hahmoteltu periaatekuvia useista eri variaatioista, joilla liitos olisi teoriassa tehtävissä, ottamatta kantaa käytännöllisyyteen. Erilaisia railonmuotoja voisi olla muitakin kuin esitetyt, mutta olennaista kuvissa on hitsien paikat. Kuvista voidaan kuitenkin suoraan todeta, että osa liitosmuodoista ei ole käyttökelpoisia toteutettavaksi. Esimerkiksi liitosmuodot 6-9 eivät ole soveltuvia rakenteen toiminnallisuuden vuoksi, sillä päädyn levy ei voi tulla pidemmälle kuin pursotetut laipat, koska se rajoittaisi valmiin rakenteen toiminnallisuutta. Myöskään liitosmuoto 3 ei ole järkevä vaihtoehto, sillä liitosmuoto 2 ajaa saman asian paremmin. Jäljelle jääneidenkin liitosten osalta on huomattava, että mikäli muutoksia tehtäisiin nykyiseen liitosmuotoon verrattuna, olisi uudet lujuuslaskut tehtävä ja liitokset mitoitettava standardien mukaan.

Päädyn liitoksista 1 ja 4 ovat sellaisia, joissa hitsausta ei pysty ainakaan kokonaan automatisoimaan. Tämä johtuu siitä, että robotti ei pääse hitsaamaan palkin sisäpuolelta, joten sisäpuolen hitsit jäävät joka tapauksessa käsinhitsattaviksi. Aiemman liitosmuotojen karsinnan jälkeen jäljelle jääneistä liitoksista robotilla olisi hitsattavissa liitokset 2 ja 5. Kyseisten liitosmuotojen kohdalla lujuus voi kuitenkin jäädä liian alhaiseksi, sillä yhdeltä puolelta hitsatessa ei välttämättä saataisi riittävää tunkeumaa pitävän liitoksen aikaansaamiseksi. Esimerkiksi juuri tästä syystä lujuustarkastelu olisi syytä suorittaa mahdollisille uusille liitostyypeille.

Pursotus on esitetty myös yhtenä valmistusmenetelmänä, ja sillä tarkoitetaan, että uuma ja laippa saataisiin pursotettuna suoraan yhtenäisenä kappaleena, jolloin uuman hitseiltä vältyttäisiin. Tämä voisi mahdollistaa alhaisemman lujuuden omaavan seoksen käytön.

Tällöin kuitenkin olisi selvitettävä saataisiinko kriittisiin kohtiin pursottamalla tarpeeksi vahvennusta, sillä päätylevyjen hitsaus kuitenkin aiheuttaisi lujuuden alentumista hitsin muutosvyöhykkeellä.

Materiaalin valinnan näkökulmasta rakenne voidaan jakaa kolmeen eri osaan, jotka ovat palkin ylä- ja alaosassa olevat pursotetut laippaprofiilit, uuman levyosat ja päädyn levyosat. Hyvän pursotettavuutensa ansiosta 6000-sarjan seokset sopivat hyvin pursotettujen osien materiaaliksi. Hitsauksen aiheuttama lujuuden lasku huomioon ottaen, jäävät seokset EN AW-6061 ja EN AW-6063 lujuusominaisuuksiltaan vertailtavan nykyisen seoksen EN AW-6082 alle. Toisaalta mikäli hitsauksen lämpövaikutuksia saataisiin vähennettyä, lujuusvaatimuksia pienennettyä tai palkkiprofiili suoraan pursotettua, voisivat kyseiset seokset olla hyviä vaihtoehtoja, koska ne ovat paremmin pursotettavissa kuin EN AW-6082. Seokset EN AW-5083 ja EN AW-7020 omaavat heikommat pursotettavuusominaisuudet, joten ne eivät olisi optimaalisimmillaan pursotetuissa osissa.

Levyosien kohdalla riittävät lujuusominaisuudet hitsauksen jälkeen nykyisen seoksen lisäksi on seoksilla EN AW-7020 ja EN AW-5083. Alempilujuiset EN AW-6061 ja EN AW-6063 sopivat paremmin pursotukseen. Niillä ei myöskään ole riittävät lujuusominaisuudet hitsauksen jälkeen, minkä vuoksi ne eivät ole sopivia levyosien materiaaleiksi.

Hitsauksen jälkeisen lämpökäsittelyn vaihtoehdot riippuvat materiaalivalinnoista. Kylmämuokatulle seokselle EN AW-5083 ei lämpökäsittelystä ole lujuutta nostavaa vaikutusta, kun taas seokselle EN AW-7020 saadaan lujuus palautettua tehokkaasti vanhentamalla se hitsauksen jälkeen. 6000-sarjan seoksilla puolestaan luonnollisella- tai keinovanhentamisella ei ole kovin suurta vaikutusta lujuuteen, joten merkittävän lujuuden palauttamisen saamiseksi tulisi tehdä materiaalille erkautuskarkaisu uudestaan. Näistä uusi erkautuskarkaisu tai keinovanhentaminen voivat olla tosin haastavia toteuttaa.

5 POHDINTA

Tässä luvussa käydään läpi edellisessä luvussa havaittuja tärkeimpiä tuloksia. Sen lisäksi tarkastellaan tulosten uutuusarvoa sekä mahdollisia jatkokehityskohteita.

5.1 Tärkeimmät tulokset

Kappaleen 4.3 vertailumatriisissa (taulukko 7) on esitetty useita eri variaatioita alumiinipalkin valmistukseen ja seosvalintaan. Matriisiin on vahvennettu harmaalla taustalla vaihtoehtoista tällä hetkellä toteuttamiskelpoisimmat vaihtoehdot. Harmaan pohjan variaatioista syntyy yhteensä 32 erilaista yhdistelmää.

Uuman hitsien kohdalla hitsauksen automaatioastetta pystyisi nostamaan joko mekanisoidulla kuljettimella tai hitsausrobotin avulla. Robottihitsaus olisi joustavampi, mutta se vaatisi molempien puolien yhtäaikaista hitsaukseen kaksi hitsausrobotia. Mekanisoituun kuljettimeen puolestaan pystyisi liittämään kaksi poltinta, jolloin molemminpuolinen hitsaus onnistuisi. Katkohitsin tai jatkuvan hitsin valinnan edellytyksenä olisi tehdä testihitsit, jolloin optimaalisempi tapa selviäisi. Näin selviäisi aiheuttaako jatkuva hitsi liikaa lämpömuodonmuutoksia palkkiin. Päädyn liitoksen hitsaus kokonaan automatisoidusti ei nykyisellä liitosmuodolla onnistu hankalan sijaintinsa takia. Tämän vuoksi ainakin palkin sisäpuolen hitsit jäävät siis käsinhitsattavaksi.

Materiaalin näkökulmasta, kun käytetään MIG-hitsausta sekä uuman, että päädyn hitseissä, on pursotettujen laippaprofiilien materiaalina hyvä vaihtoehto nykyinen seos EN AW-6082. Tämä johtuu hitsauksen aiheuttamasta lujuuden alentumisesta, jolloin muiden hyvin pursotettavien seosten lujuusominaisuudet jäävät materiaalinvalinnan kriteerinä olevan lujuuden alle. Levyosien kohdalla nykyisen seoksen lisäksi vaihtoehtona voisi olla EN AW-5083 seos, jonka lujuusominaisuudet ovat paremmat hitsauksen jälkeen kuin seoksella EN AW-6082. Seos EN AW-7020 voisi ominaisuuksiensa puolesta sopia levymateriaaliksi, mutta sillä saattaa olla jopa turhan suuret lujuusominaisuudet suhteessa muihin materiaaleihin, jolloin niistä ei olisi niin suurta hyötyä. Hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely ei vaikuta seoksen EN AW-5083 lujuuteen. Seoksen EN AW-6082 kohdalla keinovanhentamisella tai erkautuskarkaisulla saataisiin nostettua hitsauksen jälkeistä

lujuutta. Ne voivat kuitenkin olla haastavia toteuttaa valmiille rakenteelle. Toisaalta kyseisen seoksen lujuus on riittävä hitsauksen jälkeen, minkä vuoksi lämpökäsittelyn tarve jää vähäiseksi.

5.2 Tulosten uutuusarvo

Tämän työn tavoitteena oli nostaa esiin tutkittavan alumiinipalkin kohtia tai seikkoja, joita voisi tehdä uudella tavalla. Työn uutuusarvo perustuu juuri siihen, että se antaa kohdeyritykselle erilaisia alumiiniseos- sekä valmistusteknillisiä vaihtoehtoja, joita voisi olla palkkirakenteessa mahdollista käyttää. Lisäksi vertailumatriisi antaa eri vaihtoehtoja esimerkiksi hitsauksen automaatioasteen nostamisen kannalta.

5.3 Jatkotutkimusaiheet

Jatkotutkimuksen kohteena voisi olisi eri menetelmien soveltuvuuden tarkempi selvitys kyseisen palkkirakenteen valmistamisessa. Esimerkiksi käytännön hitsaustestien suorittaminen hitsausrobotilla antaisi lisää tietoa robottihitsauksen soveltuvuudesta kyseisessä kohteessa. Lisäksi päätylevyn liitoksen uudelleen suunnittelu robottihitsaukseen soveltuvaksi voisi olla kannattavaa automaatioasteen nostamisen kannalta. Tämä sen vuoksi, että automaatioasteen nostamisesta uuman hitsien kohdalla ei välttämättä ole niin suurta vaikutusta tuottavuuteen, mikäli myös päädyn hitsejä ei saada automatisoitua. Tähän liittyen, mikäli liitosmuotoja muutettaisiin, olisi uudet lujuustarkastelut luonnollisesti tehtävä. Lisäksi mikäli valmistusprosessia lähdettäisiin muokkaamaan nykyisestä, tulisi myös kustannuksellinen tarkastelu ottaa huomioon.

6 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tutkia mahdollisuuksia KT-Shelterin alumiinipalkin hitsauksen automaatioasteen nostamiselle sekä tutkia mahdollisia vaihtoehtoja nykyiselle alumiiniseokselle. Työn aluksi käsiteltiin kirjallisuuden pohjalta alumiinin hitsattavuutta sekä eri menetelmiä, joita voidaan käyttää alumiinipalkkien valmistuksessa. Lisäksi käsiteltiin hitsauksen automatisointia. Kirjallisuuskatsauksen tarkoitus oli olla pohjatietona case-tutkimukselle.

Case-osiossa tutkittiin eri alumiiniseosten sopivuutta alumiinipalkille. Sopivia seoksia lähdettiin kartoittamaan Eurokoodi 9:n pohjalta. Aluksi kerättiin seokset, joilla olivat hyvät hitsattavuus-, lujuus-, ja korroosionkesto- ominaisuudet sekä joita saadaan levyinä tai pursotettuina profiileina. Tämän jälkeen seoksista valittiin tarkempaan tarkasteluun ne, joiden lujuusominaisuudet olivat vähintään samat kuin nykyisen seoksen EN AW-6082 lujuusominaisuudet hitsauksen jälkeen. Myös pursotusseokset EN-AW-6063 ja EN AW-6061 valittiin mukaan tarkasteluun.

Case-osion lopuksi laadittiin vertailumatriisi, jossa vertailtiin eri valmistusteknisiä piirteitä palkkirakenteen valmistuksessa. Matriisissa pohdittiin hitsauksen automaatioasteen nostamisen hyödyntämisen mahdollisuuksia. Lisäksi matriisissa esitettiin eri osissa käyttökelpoisia alumiiniseoksia. Vertailumatriisin hyötynä on se, että sen avulla pystytään nopeasti kartoittamaan eri seosvaihtoehtojen ja valmistusprosessien yhdistelmiä.

Vertailumatriisin avulla saatiin luotua 32 erilaista yhdistelmää toteuttamiskelpoisista ratkaisuista alumiinipalkin valmistukselle. Todennäköisimmissä vaihtoehdoissa hitsaus suoritetaan uuman kohdalla mekanisoidulla tai robotisoidulla MIG-hitsauksella, ja päädyn liitos hitsataan käsin molemmilta puolilta nykyiseen tapaan. Materiaaleina pursotteissa on nykyinen seos EN AW-6082 ja levyosissa nykyiselle seokselle vaihtoehdoksi seos EN AW-5083. Kyseiset yhdistelmät ovat tosin vain yksi tulkinta ratkaisuista, ja toisenlaisilla painotuksilla ja valinnoilla on mahdollista saada lukuisia muitakin yhdistelmiä.

LÄHTEET

Cary, H. & Helzer, S. 2005. Modern welding technology. 6. painos. Upper Saddle River (New Jersey): Pearson/Prentice Hall. 715 s.

Colligan, K. 2010. The friction stir welding process: an overview. Teoksessa: Lohwasser, D. & Chen, Z. Friction stir welding: from basics to applications. Cambridge: Woodhead Pub. S. 15-28.

ESAB. 2019. Friction Stir Welding-Quality in Depth. [www-sivu]. [Viitattu 15.3.2019]. Saatavissa: <https://www.esab.co.uk/gb/en/automation/process-solutions/fsw/index.cfm>

Finnrobotics Oy. 2018. OTC päivitti robottimallistoaan, nyt saatavilla uusi V8! [www-sivu]. [Viitattu 27.4.2019]. Saatavissa: <http://finnrobotics.fi/2018/02/15/otc-paivitti-robottimallistoaan-nyt-saatavilla-uusi-v8/>

Fukuda, T. 2009. Weldability of 7000 series aluminium alloy materials. Teoksessa: Welding International. Vol. 26, Iss. 4. Huhtikuussa 2012. Taylor & Francis. S. 256-269.

Haula, J. 2008. Hitsauksen kevytmekanisoinnilla tehoa tuotantoon! Hitsaustekniikka 4/2008. S. 2-6.

Hoffman, J. 2007. Challenges of robotic aluminium MIG welding. Cleveland: Welding Magazine. Vol. 80, Iss. 10. S. 40, 42-45.

Holamo, O. 2016. Hitsauksen mekanisointi ja automatisointi [verkkodokumentti]. Tampere: 15.3.2016. [Viitattu 16.2.2019]. Seminaariesitys. 32 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <https://www.shy-hitsaus.net/LinkClick.aspx?fileticket=E%2FgdWKeTX%2B8%3D&tabid=4849>

Jernström, P. 2011. Kevytmekanisoinnilla tehokkuutta- ja parempaa työergonomiaa [verkkodokumentti]. Lahti: Kemppi Oy. Julkaistu 2011. [Viitattu 20.3.2019]. Saatavissa:

https://productinfo.kemppi.com/flipbook/pronews_2011/fi/files/assets/downloads/publication.pdf

Kah, P., Shestra, M, Hiltunen, E. & Martikainen J. 2015. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. Julkaisussa: International Journal of Mechanical and Materials Engineering 10:13. 16 s.

KT-Shelter. 2019. Yrityksen kotisivut. [Viitattu 15.3.2019]. Saatavissa: <http://www.kt-shelter.com/fi/>

Lepola, P. & Ylikangas, R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 415 s.

Lepola, P. & Makkonen, M. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOY. 429 s.

Lin, W. & Luo, H. 2015. Robotic Welding. Teoksessa: Nee, A.Y.C. Handbook of Manufacturing engineering and Technology. Lontoo: Springer-Verlag. S. 2403-2443.

Lukkari, J. 2001. Alumiinit ja niiden hitsaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 251 s.

Lukkari, J. 2012. Katsaus alumiinin ominaisuuksiin ja hitsattavuuteen. Hitsaustekniikka 6/2012. S.19-28.

Mathers, G. 2002. Welding of aluminium and its alloys. Cambridge: Woodhead Pub. 236 s.

Mishra, R., De, P. & Kumar, N. 2014. Friction Stir Welding and Processing: Science and Engineering. New York: Springer International Publishing. S. 338.

Purso Oy. 2014. Profiilisuunnittelun käsikirja [verkkodokumentti]. Siuro: lokakuu 2014. [Viitattu 16.5.2019]. 36 s. Saatavissa PDF-tiedostona: https://purso.fi/files/4015/3053/5354/purso_profiilisuunn_kasikirja_web.pdf

Polmear, I., StJohn, D., Nie, J-F. & Qian, M. 2017. Light alloys: metallurgy of the light metals. 5. painos. Oxford: Butterworth-Heinemann. 526 s.

Sasabe, S. 2009. Welding of 2000 series aluminium alloy materials. Teoksessa: Welding International. Vol. 26, Iss. 5. Maaliskuussa 2012. Taylor & Francis. S. 339-350

Selvaggio, A., Becker, D., Klaus, A., Arendes, D. & Kleiner, M. 2015. Curved Profile Extrusion. Teoksessa: Tekkaya, A. E., Homberg, W. & Brosius, A. 60 Excellent Inventions in Metal Forming. Berliini: Springer- Verlag. S. 287-292.

SFS-EN 515. 2017. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokatut tuotteet. Tilojen tunnuksset. 2. painos. Metalliteollisuuden Standardointiyhdistys ry. 43 s.

SFS-EN 573-1. 2005. Alumiini ja alumiiniseokset. Muokattujen tuotteiden kemiallinen koostumus ja tuotemuodot. Osa 1: Numeerinen nimikejärjestelmä. 2. painos. Suomen standardoimisliitto SFS. 12 s.

SFS-EN 755-9. 2016. Alumiini ja alumiiniseokset. Pursotetut tangot, putket ja profiilit. Osa 9: Profiilien mitta- ja muototoleranssit. 3. painos. Suomen standardoimisliitto SFS. 37 s.

SFS-EN 1999-1-1 + A1. 2009. Eurokoodi 9. Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Rakenteita koskevat yleiset säännöt. Suomen standardoimisliitto SFS. 239 s.

Stano, S., Pfeifer, T. & Rózański, M. 2014. Modern technologies of welding aluminium and its alloys. Teoksessa: Welding International. Vol. 28, Iss. 2. Taylor & Francis. S. 91-99

Suoranta, R. 2018. Luento 2. Hitsaustekniikka. Valmistus- ja tuotantotekniikka.

Teknoliateollisuus. 2006. Alumiinit- Raaka-ainekäsikirja 5. Helsinki: Teknoliateollisuus ry. 237 s.

Tuovinen, S. 2006. FSW-Friction Stir Welding. Hitsaustekniikka 5/2006. S. 41-42.

Weman, K. 2012. Welding Processes Handbook. 2. painos. Cambridge: Woodhead Pub. 270 s.

Alumiiniseoksien lujuuksia

(SFX-EN 1999-1-1+A1 2009, s.40-42) (muokattu)

Levyt

Paksuus (mm)	Seos EN-AW	Myötölujuus (MPa)	Murtolujuus (MPa)	Muutosvyöhykkeen tekijä	Myötölujuus (MPa) (muutosvyöhyke)	Murtolujuus (MPa) (muutosvyöhyke)
alle 40	5083 H12	250	305	0,62/0,90	155	275
alle 40	5083 H22/H32	215	305	0,72/0,90	155	275
alle 25	5083 H14	280	340	0,55/0,81	155	275
alle 25	5083 H24/H34	250	340	0,62/0,81	155	275
alle 25	5454 H14	220	270	0,48/0,80	105	215
alle 25	5454 H24/H34	200	270	0,53/0,80	105	215
alle 25	5754 H14	190	240	0,53/0,79	100	190
alle 12,5	6061 T6/T651	240	290	0,48/0,60	115	175
alle 12,55	6082 T6	255	300	0,48/0,60	125	185
alle 12,5	6082 T61/T6151	205	280	0,61/0,66	125	185
alle 12,5	7020 T6	280	350	0,73/0,80	205	280
alle 40	7020 T651	280	350	0,73/0,80	205	280

Pursotetut profiilit

Paksuus (mm)	Seos EN-AW	Myötölujuus (MPa)	Murtolujuus (MPa)	Muutosvyöhykkeen tekijä	Myötölujuus (MPa) (muutosvyöhyke)	Murtolujuus (MPa) (muutosvyöhyke)
alle 15	6060 T6	140	170	0,43/0,59	60	100
3-25	6060 T66	150	195	0,43/0,56	65	110
alle 25	6061 T6	240	260	0,48/0,67	115	175
alle 25	6063 T6	160	195	0,41/0,56	65	110
alle 10	6063 T66	200	245	0,38/0,53	75	130
5-10	6005A T6	215	260	0,53/0,63	115	165
alle 10	6106 T6	200	250	0,48/0,64	95	160
alle 5	6082 T6	250	290	0,48/0,60	125	185
alle 15	7020 T6	290	350	0,71/0,80	205	280