

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan osasto

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

OPTINEN RAILONSEURANTA ALUMIINIRAKENTEIDEN HITSUKSESSA

Lappeenrannassa 7.12.2009

Raine Liutu 0280120

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	1
2	ALUMIININ MIG-HITSAUS .....	2
3	ALUMIINIT JA ALUMIINISEOKSET.....	6
3.1	Alumiinien ja alumiiniseosten jaottelu, ominaisuudet ja käyttö.....	6
3.2	Toimitustilat.....	8
4	HITSAUKSESSA HUOMIOITAVAT ALUMIININ ERITYISPIIRTEET .....	10
4.1	Vetyliukoisuus .....	10
4.2	Hapettuminen ja korroosio .....	10
4.3	Lämpölaajeneminen .....	11
4.4	Lämmön- ja sähkönjohtavuus.....	12
4.5	Muita ominaisuuksia .....	13
5	ALUMIINIRAKENTEET JA NIIDEN HITSAUS.....	14
5.1	Hitsi- ja liitostyytit .....	14
5.2	Alumiiniprofiilit.....	16
5.3	Muodonmuutokset alumiinirakenteissa.....	17
5.4	Alumiinirakenteiden väsymiskestävyys .....	18
6	MIG-HITSAUKSEN ROBOTISOINTI .....	19
6.1	Robotit.....	19
6.2	Teollisuudessa käytettävät robotit ja apulaitteet.....	20
6.3	Robottien ohjelmointi.....	21
7	RAILONHAKU JA -SEURANTA .....	22
7.1	Optisen railonseurannan menetelmät .....	23
7.2	Circular Scanning Sensor .....	25
7.3	Optinen railonhakuanturi.....	26
7.4	Optisen railonseurannan testaus alumiinirakenteissa.....	27
7.4.1	Kokeessa käytetty tekniikka.....	28
7.4.2	Koejärjestelyt.....	30
7.4.3	Jatkotutkimukset.....	31
7.4.4	Tulokset.....	31
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET .....	36
9	YHTEENVETO .....	38
	LÄHTEET .....	40
	LIITE	

## 1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää optista railonseuranta-alumiinirakenteiden robotisoidussa MIG-hitsauksessa. Työssä kerrotaan alumiinin MIG-hitsauksen perusteista ja alumiinin erityispiirteistä. Erityisten materiaaliominaisuuksien vuoksi alumiinirakenteiden hitsaus on huomioitava jo suunnitteluvaiheessa, mutta huomionarvoisia seikkoja on myös itse hitsausvaiheessa. Myös hitsauksen robotisointia käydään läpi pääpiirteittäin. Robotisoinnilla tavoitellaan taloudellista, tuottavaa ja laadukasta hitsausta. Railonseuranta on tärkeä lisäominaisuus, jolla pyritään varmistamaan robotisoinnin hyötyjen toteutuminen myös käytännössä. Optinen railonseuranta on käytännössä ainoa vaihtoehto, kun materiaalina on alumiini.

Teoriaosuuden lisäksi työssä käsitellään optisen railonseurannan testausta alumiinirakenteissa sekä niistä saatuja tuloksia. Optisessa railonseurannassa keskitytään pelkästään railonhakuun ja -seurantaan eli adaptiivinen hitsaus on rajattu pois. Työ on tehty osana Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja projektiyritysten Alumiiniveneen hitsauksen automatisointi-projektia.

## 2 ALUMIININ MIG-HITSAUS

MIG-hitsaus on kaasukaarihitsausta, jossa kaari palaa jatkuvasti syötettävän lisäainelangan ja työkappaleen välillä. Lyhenne tulee englanninkielisistä sanoista Metal Inert Gas Welding. MIG/MAG-prosessi tunnetaan myös lyhenteellä GMAW, joka tulee sanoista Gas Metal Arc Welding. (Cary 2002, s. 142.)

MIG-hitsauksessa sula metalli siirtyy langan kärjestä pieninä pisaroina valokaaren läpi hitsisulaan. Lisäainelanka syötetään koneellisesti tasaisella nopeudella hitsauspistoolin kosketussuuttimen reiästä valokaareen. Alumiinin ja muiden ei-rautametallien hitsaus on MIG-hitsausta inertillä suojakaasulla, joka ei reagoi hitsisulan kanssa. (Cary 2002, s. 142.) Aktiivista suojakaasua käytetään terästen hitsaukseen, jolloin kyseessä on MAG-hitsaus. (Lukkari 2001a, s. 119)

MIG-hitsausvirtalähdettä kutsutaan vakiojännitevirtalähteeksi, koska sen ominaiskäyrä on lähes vaakasuora, eli jännite pysyy melko vakaana. Valokaaren tulisi pysyä vakiopituisena hitsauksen aikana, jolloin hitsaustapahtuma on mahdollisimman vakaa ja hitsauslaatu tasaisen hyvää. Valokaari on itsesäätyvä, jolloin muutos suutinetäisyydessä aiheuttaa muutoksen hitsausvirrassa. Langansyöttönopeus muuttaa samalla myös hitsausvirtaa niin, että suuremmalla langansyöttönopeudella myös hitsausvirta on suurempi. Tunkeumaan vaikuttavia parametreja ovat suutinetäisyys ja vapaalanka, koska ne muuttavat hitsausvirran arvoa. Suutinetäisyyden kasvaessa hitsausvirta pienenee. (Lukkari 2002, s. 160–165.) Alumiinin hitsauksessa vapaalangan pituuden vaikutus hitsausvirran muutokseen on hyvin pieni alumiinin suuren sähkönjohtavuuden vuoksi. (Lukkari 2001b, s. 28.)

Alumiinin MIG-hitsauksessa kaarijännitteen suuruus vaikuttaa hitsin ominaisuuksiin. Lyhyellä valokaarella eli pienellä jännitteellä tunkeumasta tulee syvempi kuin pitkällä valokaarella. (Lukkari 2001a, s. 143.) Valokaaren pituuden vaikutukset hitsin eri ominaisuuksiin ovat taulukossa 1.

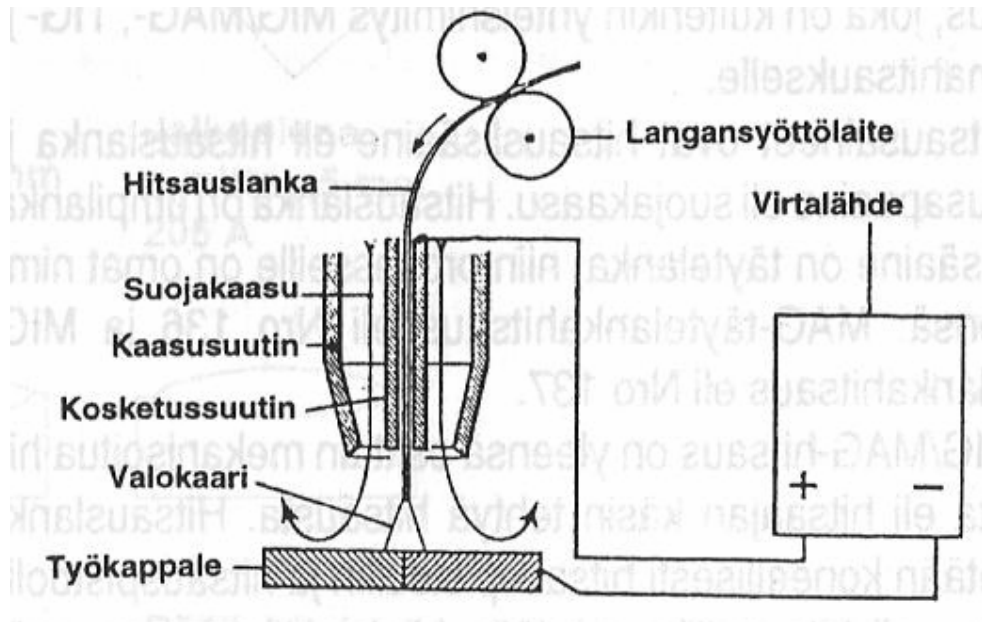
*Taulukko 1. Valokaaren pituuden vaikutukset hitsaustuloksiin (Lukkari 2001a, s. 143.)*

<b>Ominaisuus</b>	<b>Lyhyt valokaari</b>	<b>Pitkä valokaari</b>
Tunkeuma	Syvä	Matala
Hitsipalon leveys	Kapea	Leveä
Hitsikuvun korkeus	Korkea	Matala
Sulan pinta	Painunut	Tasainen
Roiskeet	Vähemmän	Enemmän
Pintahuokokset	Enemmän	Vähemmän

Aineensiirtyminen lisäainelangan sulasta kärjestä tapahtuu joko pieninä pisaroina oikosulkusiirtymisenä tai suihkumaisena siirtymisenä ilman oikosulkuja. Oikosulkusiirtymisessä kaarityyppi on lyhytkaari ja suihkumaisessa siirtymisessä kuumakaari. Kuumakaaren käyttöalue alkaa noin 3 mm:n aineenpaksuudesta ylöspäin. (Lukkari 2001a, s. 121.)

MIG-hitsauksen etuja ovat mm. tehokkuus ja tuottavuus, kuonattomuus, helppo mekanisointavuus, valokaaren pintapuhdistuskyky ja erilaisten hitsausasentojen käyttömahdollisuus. Huonoja puolia ovat mm. arkuus huokosille, rajoitettu luoksepäästävyys hitsauskohteisiin sekä rajoitettu soveltavuus pienille aineenpaksuuksille. (Lukkari 2001a, s. 120–121.)

MIG-hitsauslaitteisto koostuu virtalähteestä, monitoimikaapelista, maadoituskaapelista, hitsauspolttimesta, langansyöttölaitteistosta ja kaasupullosta. Hitsauslisäaine ja suojakaasu tulevat hitsauspolttimelle monitoimikaapelia pitkin. (Cary 2002, s. 145.) MIG-hitsauslaitteisto on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Periaatekuva MIG-hitsauslaitteistosta (Lukkari 2002, s. 159.)

MIG-hitsauksessa käytettäviä inerttejä suojakaasuja ovat argon ja helium sekä niiden seokset. Alumiinin hitsauksessa suojakaasun puhtaudella on suuri merkitys hitsin laatuun. Puhtauden tulee olla vähintään 99,998 %, ja lisäksi kosteustason on oltava hyvin pieni. Argonia käytettäessä valokaari on vakaampi ja tunkeuma kapeampi. Lämmöntuonti on kuitenkin pienempi heliumiin verrattuna, jolloin hitsausnopeuden tulee olla myös pienempi. Heliumia käytettäessä kaarilämpötila on suurempi ja tunkeuma leveämpi. Koska hitsistä tulee leveämpi, hitsauspistoolin paikoitus ei ole niin tarkka kuin argonilla. Heliumin käyttö on yleisempää mekanisoidussa ja robotisoidussa hitsauksessa. Argonin ja heliumin sekoituksia käytetään yleisimmin käsinhitsauksessa sekä joissakin tapauksissa myös mekanisoidussa hitsauksessa. Sekoituskaasuilla saadaan yhdistettyä molempien kaasujen ominaisuuksia. Yleisimmät sekoitussuhteet ovat 50 % ja 75 % heliumia argonissa. (Mathers 2002, s. 130–133.)

Alumiinin MIG-hitsauksessa käytettävät lisäainelankojen halkaisijat ovat tyypillisesti 0,8–3,2 mm. Suojakaasun ohella myös lisäainelangan puhtaus on ehdottoman tärkeää erityisesti hitsin huokoisuuden välttämiseksi. (Mathers 2002, s. 133.)

Oikean lisäaineen valinnalla on merkitystä hitsin eheydelle, lujuudelle, sitkeydelle sekä korroosionkestävyydelle. Kolme yleisintä lisäaineen seostyyppiä ovat puhdas alumiini, Mg-seosteinen alumiini sekä Si-seosteinen alumiini. (Lukkari 2001a, s. 178.)

Pulssihitsaus on yksi MIG-hitsauksen erikoissovelluksista. Pulssihitsaus perustuu tiettyyn perusvirtaan ja sen päälle syötettäviin suuritaajuuksiin virtapulsseihin. Pulssihitsauksella saadaan aikaa suihkumainen aineensiirtyminen eli kuumakaari. Ilman pulssivirtaa vastaavilla hitsausvirran keskiarvoilla ja käytetyillä langanhalkaisijalla kuumakaari ei olisi mahdollinen, vaan hitsaus tapahtuisi joko lyhyt- tai sekakaarella. Pulssitaajuus on yleensä 20–400 Hz ja huippuvirta on yleensä noin kaksi kertaa suurempi kuin jatkuvalla virralla hitsattaessa. Tässä tapauksessa pisaroita irrottava pinch-voima on niin suuri, ettei oikosulkuja pääse syntymään. Parametrit pyritään säätämään niin, että yhtä pulssia kohti irtoaa yksi lisäainepisara. Yleisintä pulssihitsauksen käyttö on alumiinin hitsauksessa. Pulssihitsauksen etuja ovat:

- suurempi hitsausnopeus ja hitsiaineentuotto lyhytkaarihitsaukseen verrattuna
- pienempi lämmöntuonti ja muodonmuutokset kuumakaarihitsaukseen verrattuna
- vähemmän roiskeita ja hitsaushuuruja
- parempi hitsin ulkonäkö
- paksumman langan käyttömahdollisuus
- helpompi hitsaustapahtuma vaikeasti hitsattavilla lisäaineilla (Lukkari 2002, s. 172.)

Erityisesti alumiinin hitsauksessa paksumman langan käyttömahdollisuus vähentää huokosten määrää ja parantaa syötettävyyttä. Lisäksi se parantaa asentohitsausominaisuuksia ja antaa paremmat mahdollisuudet ohuiden aineenpaksuuksien hitsaukseen. (Lukkari 2002, s. 172.)

Alumiinin hitsauksessa käytettävä pulssihitsauksen variaatio on tuplapulssitus, jolla saadaan aikaan parempi hitsin ulkonäkö. Hitsistä tulee säännöllisen suomuinen ja läpipalamisriski pienenee ohuiden levyjen hitsauksessa. Tuplapulssi perustuu kahteen eritehoiseen ja suuritaajuiseen pulssivirtaan, jotka vaihtelevat pienellä taajuudella. (Lukkari 2001a, s. 132.)

### 3 ALUMIINIT JA ALUMIINISEOKSET

Alumiini on kolmanneksi yleisin alkuaine maapallolla. Se muodostaa herkästi yhdisteitä hapen ja muiden alkuaineiden kanssa, minkä vuoksi sitä ei ole puhtaana maankuoressa, vaan useimmiten oksideina ja silikaatteina. (Lukkari 2001a, s. 8.)

Alumiinit voidaan jakaa eri ryhmiin esimerkiksi seosaineiden ja lämpökäsiteltävyyden perusteella. Valmistus-, muokkaus- ja lämpökäsittelytilat on määritelty toimitustiloiksi, joina alumiiniseoksia on saatavana. Eri seoksilla ja käsittelyillä tavoitellaan haluttuja ominaisuuksia.

Alumiini ja alumiiniseokset voidaan jaotella hyvin hitsattaviin, rajoitetusti hitsattaviin ja huonosti hitsattaviin ryhmiin. Hyvin hitsattavia seoksia voidaan käyttää hitsattaviin rakenteisiin, mutta hitsattavuudeltaan rajoitettujen seoksien käyttöä tulisi välttää. Sen sijaan huonosti hitsattavia seoksia ei suositella lainkaan hitsattavien rakenteiden materiaaliksi. (Lukkari 2001, s. 75.) Esimerkiksi kupariseosteiset alumiinilaadut (2000-sarja) ovat osittain hitsattavissa tai niiden hitsaus ei onnistu lainkaan (Martikainen 1994, s. 10).

#### 3.1 Alumiinien ja alumiiniseosten jaottelu, ominaisuudet ja käyttö

Standardissa SFS-EN 573-1 alumiinit ja alumiiniseokset on jaettu eri ryhmiin pääseosaineiden mukaan. Ryhmässä 1xxx kaksi viimeistä numeroa kertovat alumiinin vähimmäispitoisuuden prosentteina kahden desimaalin tarkkuudella. Puhdas alumiini sisältää aina vähintään 99,00 % alumiinia, joten merkinnän kaksi viimeistä numeroa kertovat 99,00 %:n ylittävän määrän. Ryhmien 2xxx-8xxx kaksi viimeistä numeroa ilmaisevat ryhmän eri alumiiniseokset. (Lukkari 2001a, s. 41.) Alumiiniseoksien ryhmittely on esitetty taulukossa 2.

Puhdas alumiini on erittäin pehmeä metalli, minkä vuoksi sitä ei käytetä rakenteissa, joilta vaaditaan lujuusominaisuuksia. Seostamaton alumiini on hyvin sähköä ja lämpöä johtavaa lujempiin alumiiniseoksiin verrattuna. Se on myös hyvin korroosiota vastustavaa. Alumiiniin voidaan lisätä seosaineita, joilla tavoitellaan tiettyjä ominaisuuksia tapauksesta riippuen. Tärkeimmät seosaineet ovat kupari (Cu), mangaani (Mn), magnesium (Mg), pii



(Si) ja sinkki (Zn). Myös titaania (Ti), zirkonia (Zr) ja lyijyä (Pb) voidaan lisätä pienempiä määriä. (Lukkari 2001b, s. 10.) Seosaineet vaikuttavat seoksen ominaisuuksiin eri tavoilla, jotka ilmenevät taulukosta 2.

*Taulukko 2. Alumiinin seosaineet ja niiden vaikutukset ominaisuuksiin (Cary 2002, s. 516; Lukkari 2001a, s. 46–47).*

<b>Alumiiniseos 1000-sarjat</b>	<b>Seosaine</b>	<b>Vaikutukset ominaisuuksiin</b>
2000-sarja	Kupari (Cu)	Lujuuden parantaminen
3000-sarja	Mangaani (Mn)	Lujuuden parantaminen heikentämättä sitkeyttä oleellisesti
4000-sarja	Pii (Si)	Sulamisalueen alentaminen, juoksevuuden parantaminen
5000-sarja	Magnesium (Mg)	Lujuuden parantaminen heikentämättä korroosionkestoa oleellisesti
6000-sarja	Magnesium (Mg) & Pii (Si)	Lujuuden muovattavuuden ja pursotettavuuden parantaminen menettämättä korroosionkestoa oleellisesti
7000-sarja	Sinkki (Zn)	Magnesiumin ja kuparin kanssa lujuuden parantaminen
8000-sarja	Muut seosaineet	

Alumiiniseokset voidaan jakaa lämpökäsiteltäviin (karkeneva) ja ei-lämpökäsiteltäviin (karkenematon) seoksiin. Karkenemattomia seoksia ovat 1000-, 3000-, 4000- ja 5000-sarjat, jotka ovat lujitettavissa ainoastaan kylmämuokkaamalla. Sen sijaan karkeneva seos on mahdollista lujittaa sopivalla lämpökäsittelyllä. Tällaisia seoksia ovat 2000-, 6000-, 7000- ja 8000-sarjat. (Mathers 2002, s. 40-46.)

Seostamattomalla alumiinilla (1000-sarja) on paremmat sähkön- ja lämmönjohtavuus-, muokattavuus-, ja korroosionkesto-ominaisuudet kuin seostetulla alumiinilla. Seostamattoman alumiinin esimerkillisiä käyttökohteita ovat elintarvike- ja kemiallisen teollisuuden pakkaukset ja laitteet, rakennusteollisuuden koristelistat ja kattolevyt sekä

sähkö- ja elektroniikkateollisuuden sovellukset. AlMn-seoksilla (3000-sarja) on melko matalat lujuusominaisuudet, joten niitä ei juuri käytetä hitsatuissa rakenteissa. Korroosionkesto ja muovattavuusominaisuudet ovat kuitenkin hyvät, joten niitä käytetään mm. vedettyinä putkina. AlSi-seoksia (4000-sarja) käytetään hitsauslisäaineina ja valuina, mutta hyvin vähän muokattuina tuotteina. AlMg-seoksilla (5000-sarja) on hyvä korroosionkesto. Niitä kutsutaan myös merialumiineiksi, koska ne kestävät korroosiota myös klorideja vastaan. Seosten lujuus kasvaa Mg-pitoisuuden kasvaessa. (Lukkari 2001a, s. 46–47.)

Lämpökäsiteltävien seosten lujittaminen tehdään erkautuskarkaisulla, joten seoksen koostumuksen on oltava erkautuskarkeneva. Tällaisia seoksia ovat AlCu (2000-sarja), AlMgSi (6000-sarja), AlZn (7000-sarja) sekä muita seosaineita sisältävät seokset (8000-sarja). AlCu-seoksia käytetään suurta lujuutta vaativissa kohteissa, kuten lentokoneteollisuudessa. Joidenkin AlCu-seosten hitsattavuus voi olla rajoitettu, eivätkä sen korroosionkesto-ominaisuudet ole erityisen hyvät. AlMgSi-seokset ovat tärkeä seosryhmä, johon kuuluu yli kolmekymmentä erilaista seosta. Ryhmän seoksilla on hyvät lujuusominaisuudet lämpökäsiteltyinä, korroosionkestävyys, pursotettavuus sekä hitsattavuus. Ne ovat myös hinnaltaan edullisia ja niitä käytetään paljon pursotettuina profiileina. AlZnMg-seosten hitsattavuus vaihtelee kuparipitoisuuden mukaan. Seokset, joissa ei ole kuparia tai sitä on hyvin vähän, ovat hitsattavuudeltaan hyviä. Seokset ovat kuitenkin lujia, mikä perustuu MgZn<sub>2</sub>-erkaumien syntymiseen erkautuskarkaisussa. Näitä seoksia käytetään lujuutta vaativissa hitsattavissa rakenteissa, kuten laivoissa, kuljetuskalustossa ja metrojunissa. (Lukkari 2001a, s. 49–50.)

### 3.2 Toimitustilat

Toimitustila on valmistus-, muokkaus- ja lämpökäsittelytila, johon alumiinipuolivalmiste on saatettu, jotta halutut ominaisuudet saavutettaisiin. Standardin SFS-EN 515:1993 mukaan toimitustilaa osoittavia perustiloja ovat valmistustila (F), hehkutettu (O), muokkauslujitettu (H), liuotushehkutettu (W) ja lämpökäsitelty (T). (Lukkari 2001a, s. 44.)

Valmistustilassa (F) tuote on saanut jäähtyä vapaasti valmistusprosessin jälkeen. Valmistusprosesseja voivat olla esimerkiksi muokkaus, pursottaminen, kuumavalssaus tai valaminen. Mekaanisille ominaisuuksille ei ole asetettu vaatimuksia. (Lukkari 2001a, s. 44.)

Hehkutetussa tilassa (O) tuote on hehkutettu pehmeäksi, jolloin se on helposti muovattavissa ja lujuus on matala. Merkinnässä voi olla lisämääriä O-kirjaimen jälkeen. (Lukkari 2001a, s. 44.)

Muokkauslujitetussa tilassa (H) tuote on kylmämuokattu F- tai O-tilojen jälkeen. H-kirjaimen jälkeen tulee kaksi numerotunnusta, joista ensimmäinen kertoo mahdollisen lämpökäsittelyn ja toinen muokkausasteen. H-tilaa käytetään vain ei-lämpökäsiteltäville seoksille. Huokosriskin minimoimiseksi hitsattaviin rakenteisiin valitaan tavallisesti muokkauslujitettu ja osittain hehkutettu tai muokkauslujitettu tai stabiloitu tila. (Lukkari 2001a, s. 44–45.)

W-tilassa tuote on liotushehkutettu epästabiiliin tilaan. Liotushehkutus tehdään vain lämpökäsiteltäville seoksille, jotka vanhenevat huoneenlämpötilassa liotushehkutuksen jälkeen. W-kirjaimen jälkeen ilmoitetaan vanhenemisaika tunteina. Lämpökäsitellyssä tilassa tuote on liotuskäsitelty eli liotushehkutettu ja joko luonnollisesti tai keinotekoisesti vanhennettu. Tällä saavutetaan haluttu lujuus. Lämpökäsittelyn jälkeen on mahdollista tehdä myös kylmämuokkaus. (Lukkari 2001a, s. 45.)

Lämpökäsitellyn toimitustilan merkinnässä T-kirjaimen jälkeen tulee ainakin yksi numerotunnus, joka kertoo tilan tarkemmin. T-merkintää käytetään vain lämpökäsiteltäville seoksille. Hitsattuihin rakenteisiin käytetään yleisimmin muokkauslujitettua tai hehkutettua tilaa, koska riski huokosten muodostumiseen hitsauksessa on pienempi muihin toimitustiloihin verrattuna. (Lukkari 2001, s. 44–45; Lindroos et al. 1986, s. 613–615.) Yleisimmät alumiinin toimitustilat ovat liitteessä I.

## 4 HITSAUKSESSA HUOMIOITAVAT ALUMIININ ERITYISPIIRTEET

### 4.1 Vetyliukoisuus

Alumiinille on ominaista suuri vetyliukoisuus. Se aiheuttaa huokosia hitsiin silloin, kun hitsiin jää enemmän vetyä kuin sen liukoisuus on metalliin. Huokokset voivat olla hyvin pieniä, mutta joissain tapauksissa halkaisijaltaan jopa 4 mm kokoisia. (Mathers 2002, s. 18.) Hitsisulan jähmettyessä nopeasti, vety jää siihen kuplina. Kun sula alumiini on sulamispisteessä, vedyn liukoisuus siihen on jopa kaksikymmenkertainen verrattuna heti sen jälkeen jähmeässä tilassa olevaan alumiiniin. Sulan alumiinin lämpötila hitsauksessa on yli 660 °C, mutta MIG-hitsauksessa sulapisaroiden lämpötila voi olla jopa 2000 °C. Vedyn liukoisuus sulamispisteen jälkeen kasvaa hyvin jyrkästi. Huokokset heikentävät hitsin lujuusominaisuuksia vain harvoin, mutta sillä on vaikutuksensa liitoksen väsymisenkestoon. (Lukkari 2001a, s. 64–65.)

Huokosia aiheuttava vedyn joutuminen hitsiin johtuu yleisimmin paksusta oksidikalvosta perusaineesta ja railopinnoilla, railopintojen kosteudesta ja likaisuudesta, hapettuneesta lisäaineesta, epäpuhtaasta suojakaasusta tai liian pienestä suojakaasun määrästä tai väärästä suuntauksesta. (Martikainen 1994, s. 9.)

### 4.2 Hapettuminen ja korroosio

Alumiinin pintaan hapettuu ilman vaikutuksesta oksidikalvo, minkä ansiosta sillä on hyvät korroosionkesto-ominaisuudet. Ilmassa muodostuva kalvon paksuus kasvaa nopeasti 1,5 nm paksuiseksi ja saavuttaa vähitellen 2,5–5 nm paksuuden (Martikainen 1994, s. 8). Erilaisilla elektrolyyttisillä ja kemiallisilla menetelmillä sen paksuutta voidaan kasvattaa 0,05 mm (50000 nm) paksuuteen saakka, jolloin sen suojavaikutus paranee. (Lindroos & Sulonen & Veistinen 1986, s. 590.)

Oksidikalvolla on suuri merkitys alumiinin hitsauksessa, koska sen sulamispiste on yli 2000 °C, eli noin kolme kertaa suurempi kuin alumiinin sulamispiste. Kalvo toimii eristeenä sulan ja railopinnan välissä vaikeuttaen lisäaineen tuontia ja hitsisulan liittymistä

perusaineeseen. Itse oksidikalvo imee kosteutta ilmasta, mistä vapautuu vetyä hitsisulaan aiheuttaen huokosia. (Lukkari 2001b, s. 25–26.) Oksidikalvo tulisi poistaa hitsattavista pinnoista juuri ennen hitsausta. Poistaminen voidaan tehdä mekaanisella tai kemiallisella menetelmällä. (Cary 2002, s. 521.) Kaasukaarihitsauksessa valokaari pystyy poistamaan kalvoa tietyllä tasolla, ja inertti suojakaasu estää hapettumista. MIG-hitsauksessa pintapuhdistuskyky on aina olemassa, koska työkappale on kiinnitetty –napaan ja elektrodi +napaan. Jos kytkentä olisi päinvastoin, valokaari ei poistaisi oksidikalvoa lainkaan. Tällainen kytkentä on mahdollista TIG-hitsauksessa. (Lukkari 2001b, s. 25–26.)

Oksidikalvosta huolimatta alumiinissa voi ilmetä eri korroosion lajeja. Rakokorroosiota voi ilmetä yhteen niitattujen alumiinilevyjen välissä. Kapillaarivoima imee vettä ulkoilmasta ja ilman pääsy ahtaaseen rakoon on estetty. Piilokorroosion estämiseksi rako olisi täytettävä esimerkiksi juottamalla, mikäli levyjä ei voi liittää toisiinsa hitsaamalla. Galvaanista korroosiota voi ilmetä silloin, kun alumiini on tekemisissä sellaisten metallien kanssa, jotka ovat sitä alempana sähkökemiallisessa jännitesarjassa. Alumiinia jalompi metalli on esimerkiksi kupari. Raerajakorroosio on mahdollista Al-Cu-seoksissa, mikä aiheuttaa materiaalin hajoamista erillisiksi kiteiksi. Jännityskorroosiota voi ilmetä Al-Mg ja Al-Zn-seoksissa ja erityisesti kloridien läsnä ollessa, jos alumiiniin on jäänyt muokkauksessa sisäisiä jännityksiä tai niitä käytetään jännityksen alaisina. (Lindroos et al. 1986, s. 590–592, 602.)

#### 4.3 Lämpölaajeneminen

Alumiinin lämpölaajenemiskerroin on kaksinkertainen teräksiin verrattuna, mikä aiheuttaa suurempia muodonmuutoksia hitsauslämmön vaikutuksesta. Sen lisäksi alumiini kutistuu 6 % jähmettyessään sulasta tilasta kiinteään tilaan, mikä voi aiheuttaa muodonmuutoksia ja kraaterihalkeaman hitsiin. (Cary 2002, s. 521.) Halkeiluvaaran vuoksi hitsaus tulisi lopettaa sopivalla tavalla.

Hitsauksen lopetus voidaan toteuttaa esimerkiksi seuraavilla tavoilla:

- käyttämällä erillistä lopetuspalaa hitsauksen lopetuksessa
- hitsauskoneessa olevaa lopetusohjelmaa käyttämällä
- lisäämällä hitsausnopeutta hitsisulan koon pienentämiseksi
- tuomalla valokaari hieman taaksepäin ennen sen sammuttamista (Lukkari 2001b, s. 29.)

#### 4.4 Lämmön- ja sähkönjohtavuus

Alumiinin lämmönjohtavuus on seostuksesta riippuen 3-5-kertainen teräkseen verrattuna. Sen vuoksi hitsauksessa joudutaan käyttämään suurempaa lämmöntuontia, vaikka alumiinin sulamislämpötila on alle puolet teräkseen nähden. (Cary 2002, s. 521.) Hitsiin tuotu lämpö johtuu nopeasti ympäristöönsä, mikä lisää liitosvirheiden riskiä, koska lämpö ei välttämättä jää riittävästi sulamiseen ja tunkeuman muodostamiseen. Hitsisula jäähmettyy myös hyvin nopeasti, jolloin kaasut eivät ehdi poistua hitsisulasta, mikä aiheuttaa lisää huokosia. (Lukkari 2001b, s. 28.) Toisaalta nopea jäähtyminen on eduksi hitsisulan käyttäytymisen kannalta (Cary 2002, s. 521). Alumiiniseoksesta riippuen sen lämmönjohtavuus vaihtelee. Joidenkin seosten lämmönjohtavuus on vain puolet puhtaaseen alumiiniin verrattuna. Hitsausvirheiden välttämiseksi paksun alumiinin hitsauksessa voidaan joutua käyttämään esikuumennusta ja heliumseosteista suojaakaasua. Alumiinin esikuumennuksen tarkoituksena on rajoittaa lämmön johtumista hitsistä pois. Tarkoitus ei siis ole sama kuin terästen esikuumennuksessa, jossa pyritään ehkäisemään karkenemistä ja vetyhalkeamien syntymistä hitsausliitokseen. (Lukkari 2001b, s. 28.)

Alumiini johtaa sähköä kolminkertaisesti teräkseen verrattuna. Sen vuoksi MIG-hitsauksessa vapaalangan pituuden vaihtelun merkitys hitsausvirta-arvoihin on melko pieni. Eri alumiiniseosten sähkönjohtavuuserot näkyvät erilaisina hitsausvirtoina ja tunkeumina. Mitä enemmän sähköä johtavaa materiaali on, sitä syvempi on tunkeuma sekä hitsausvirta. (Lukkari 2001b, s. 28.)

#### 4.5 Muita ominaisuuksia

Alumiinilla voi esiintyä kuumahalkeilua hitsiaineessa tai muutosvyöhykkeellä ja kraaterihalkeamia hitsipalon lopetuskohdassa. Herkkyys kuumahalkeilulle riippuu alumiiniseoksesta. Halkeilutaipumus on suurimmillaan mm. pienillä Si- ja Mg-pitoisuuksilla sekä Cu- ja Pb-seosteisilla alumiineilla. (Lukkari 2001b, s. 29.) Lisäaineen seosaineena titaani tai zirkoni vähentävät halkeilutaipumusta (Martikainen 1994, s. 10). Oikean perusaineen ja lisäaineen valinta sekä niiden sekoittumisasteen huomioon ottaminen on oleellista. Kuumahalkeiluerkkyttä lisää myös materiaalin suuri jäykkyys. (Lukkari 2001b, s. 29.)

Hitsaus vaikuttaa myös perusaineen lujuuteen ja sitkeyteen. Muokkaamalla lujitettujen alumiiniseosten lujuus laskee lämpövyöhykkeellä muokkausasteesta, muokatun rakenteen lujuudesta, lämmöntuonnista, lämpösyklin muodosta sekä hitsausmenetelmästä ja parametreista riippuen. Hitsauksessa murtolujuus laskee karkenemattomilla muokatuilla laaduilla tyypillisesti 5-20 % ja myötölujuus 20–40 % perusaineeseen nähden. (Martikainen 1994, s. 11.) Sen sijaan iskusitkeyteen hitsaus ei vaikuta juuri lainkaan ja se pysyy hyvänä jopa -200 °C lämpötilaan saakka. (Lukkari 2001b, s. 29–30.)

Lämpökäsiteltävien, karkenevien alumiiniseosten hitsauksen jälkeen on enemmän mahdollisuuksia palauttaa alkuperäinen lujuus. Palautus voidaan tehdä joko lämpökäsittelyllä tai muokkauksella. Käytännön olosuhteissa tällaiset käsittelyt ovat yleensä kuitenkin mahdottomia suorittaa. (Martikainen 1994, s. 11–12.)

## 5 ALUMIINIRAKENTEET JA NIIDEN HITSAUS

Alumiinirakennetta suunniteltaessa ei voida suoraan käyttää teräsrakenteiden suunnitteluperiaatteita. Valmistusmenetelmät tulisi valita niin, että ne ottavat huomioon alumiinin ominaisuudet, eivätkä heikentäisi niitä. Erityisesti vaihtelevan kuormitukselle alttiit rakenteet tulisi suunnitella ja valmistaa huolella. Suuria jännityskeskittymiä ja jyrkkiä liittymiä tulisi välttää. (Lukkari 2001a, s. 97.)

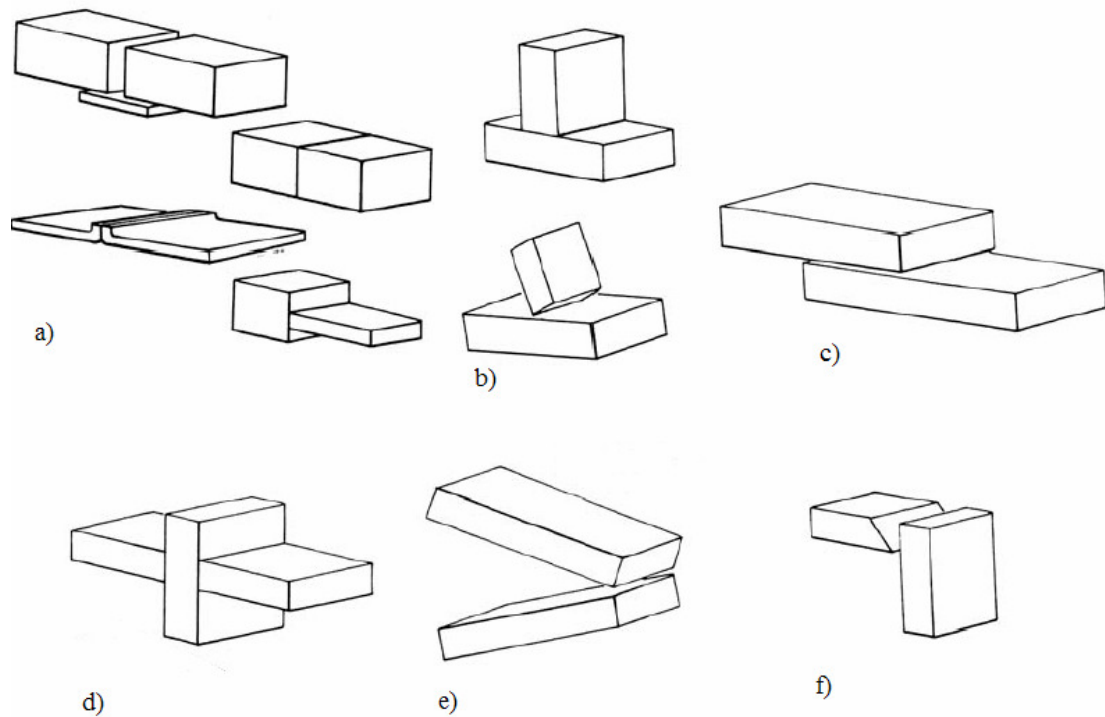
Alumiinin hyvän pursotettavuuden ansiosta siitä voidaan valmistaa profiileja, joiden ansiosta hitsien määrä pysyy pienempänä. Alumiinirakenteiden hitsit tulisi sijoittaa sellaisiin kohtiin, jossa ne eivät joudu suuren rasituksen alaiseksi. Hitsauksen aiheuttamia muodonmuutoksia voidaan hallita sekä suunnittelun että valmistuksen keinoin. (Lukkari 2001a, s. 97.)

### 5.1 Hitsi- ja liitostyypit

Alumiinirakenteiden hitsausliitoksen suunnittelu perustuu lujuusvaatimusten, alumiiniseoksen, materiaalin paksuuden, liitoksen tyyppin ja sijainnin, liitokseen päästävyuden ja käytettävän prosessin perusteella. Yleisimmin käytettävät hitsityypit ovat päittäis-, piena sekä reunahitsi, joita käytetään tavallisesti päittäis-, piena-, päällekkäis-, X-, kulma ja reunaliitosten hitsaukseen. (Mathers 2002, s. 72–73.) Liitostyypit ovat kuvassa 2. Alumiinin MIG-hitsauksessa, päittäisliitoksissa käytettävät railomuodot on määritelty standardissa ISO 9692-3:2000, joista yleisimmät ovat kuvassa 3 (Lukkari 2001a, s. 138).

Alumiinin hitsauksessa juuritukien käyttö helpottaa pohjapalon hitsausta, kun juuri hitsataan yhdeltä puolelta. Juurituki on joko irrallinen tai pysyvä. Yleisimpiä juuritukia ovat irralliset tuet, kuten juuritukitanko ja keraaminen tuki tai pysyvä tuki, kuten samaa seosta oleva alumiini, joka jää rakenteen osaksi hitsauksen jälkeen. (Lukkari 2001a, s. 216.)





Kuva 2. Erilaisia liitostyyppejä, joista a) päittäisliitoksia, b) T-liitoksia, c) päällekkäisliitos, d) X-liitos, e) reunaliiitos ja f) kulmaliitos (Mathers 2002, s. 73).

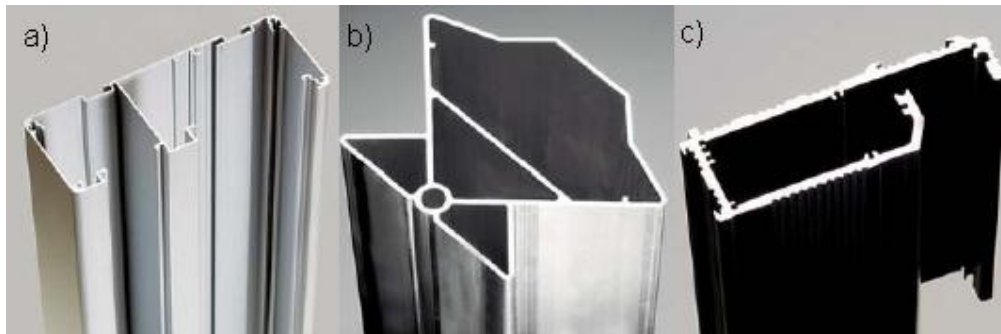
Nro	Aineen-paksuus (mm)	Railo-tyyppi	Railomuoto	Railo-kulma (°)	Viiste-kulma (°)	Ilma-rako (mm)	Juuri-pinta (mm)	Huomautus
1.2	2-5	I-railo		-	-	< 1,5	-	Yhdeltä puolelta pulssihitsaus Irrotettava juurituki
1.3	3-10	V-railo		60-70	-	< 2	< 2	Yhdeltä puolen Pulssihitsaus ainoastaan
1.3	3-10	V-railo		60-70	-	< 2	< 2	Yhdeltä puolelta Irrotettava juurituki
1.5	6-25	V-railo		~ 70	-	2	3	Yhdeltä puolen Irrotettava juurituki
1.5	6-25	V-railo		~ 70	-	4-6	3	Yhdeltä puolelta Kiinteä juurituki
1.3A	2-8	V-railo		-	10-20	0-3	0,5-1	Pursotetut profiilit Juurisärmät pitää murtaa
1.3B	6-20	V-railo		-	10-20	0-3	2-3	Pursotetut profiilit
2.2	4-12	I-railo		-	-	1-3	-	Yhdeltä puolelta Irrotettava juurituki
2.5.9	5-12	V-railo		60-70	-	1-3	2-4	Molemmilta puolilta

Kuva 3. Yleisimmät railomuodot standardin ISO 9692-3:2000 mukaan (Lukkari 2001a, s. 138).

## 5.2 Alumiiniprofiilit

Alumiinista voidaan valmistaa erimuotoisia profiileita pursottamalla. Tällöin aineenpaksuus on valittavissa, joten profiilin ja lopullisen rakenteen painoa voidaan pienentää käyttämällä suurempia aineenpaksuuksia vain siellä, missä sitä tarvitaan lujuusteknisistä syistä. Myös jäykisteet voidaan valmistaa pursottamalla. Profiileita käyttämällä voidaan vähentää hitsien määrää, ja hitsit voidaan sijoittaa niin, että ne ovat helposti hitsattavissa ja mekanisoitavissa. Profiileihin voidaan viisteet ja juurituet valmiiksi hitsausta varten. Runsaimmin seostettuja alumiineja on vaikeampi valmistaa profiileiksi. (Lukkari 2001, s. 80, 91.)

Pursotettuja alumiiniprofiileita ovat avoimet, ontot, puoliontot ja vapaasti muotoiltavat profiilit. Avoimessa profiilissa ei ole suljettua onkaloa lainkaan, ja se on edullisin profiilimuoto. Ontossa profiilissa on vähintään yksi suljettu onkalo. Onkaloa ympäröivissä seinissä on pituussuunnassa hitsautuneita saumoja, mikä rajoittaa sen käyttöä kohteissa joissa se joutuu paineen alaiseksi. Puoliontossa profiilissa ei ole suljettua onkaloa, mutta siinä on esimerkiksi niin syvä avautuva muoto, jonka valmistaminen ei onnistu yksinkertaisella työkalulla. (Nordic Aluminium 2007.) Alumiiniprofiilit ovat kuvassa 4.

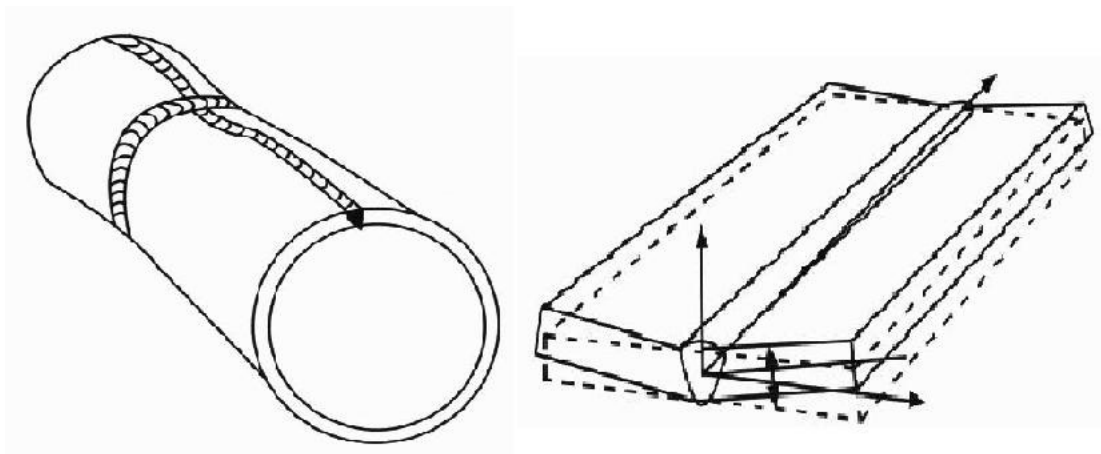


Kuva 4. Alumiiniprofiilit, joista a) avoin, b) ontto, c) puoliontto (Nordic aluminium 2007).

### 5.3 Muodonmuutokset alumiinirakenteissa

Alumiinirakenteissa hitsauksen aiheuttamia muodonmuutoksia voidaan ehkäistä jo suunnitteluvaiheessa. Muodonmuutokset alumiinirakenteissa ovat käytännössä suurempia kuin teräksen hitsauksessa. Hitsien koko, muoto ja määrä, sijainti, aineenpaksuus, rakenteen koko ja muoto ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat muodonmuutoksiin. Erityisesti ohutlevyrakenteissa olisi tärkeää, että hitsejä olisi mahdollisimman vähän. Mikäli rakenne voidaan rakentaa useista alikokoonpanoista, muodonmuutoksille voidaan suunnitella jo valmiiksi varat ennen loppukokoonpanoa. (Lukkari 2001a, s. 90, 219.)

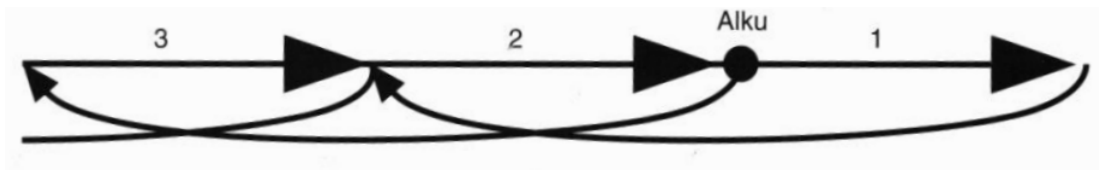
Hitsien sijoittelulla ja hyvällä hitsausjärjestyksellä voidaan vähentää vetelyitä oleellisesti. Suunnittelussa olisi pyrkiä sellaisiin rakenteisiin, joiden hitsauksessa voidaan käyttää hitsauskiinnittimiä. Vesijähdytteisten kiinnittimien käyttö olisi suositeltavaa, koska niillä olisi mahdollista johtaa lämpö tehokkaasti pois työkappaleesta. (Lukkari 2001a, s. 90.) Tyypillisiä hitsauksen aiheuttamia muodonmuutoksia on kuvassa 5.



Kuva 5. Hitsauksen aiheuttamia muodonmuutoksia (Lukkari 2001a, s. 220–221).

Muodonmuutoksia voidaan hallita lisäksi muun muassa seuraavin keinoin:

- oikealla hitsausjärjestyksellä ja -suunnilla
- välttämällä tarpeettoman suuria railoja
- huomioimalla erilaiset hitsien tilavuudet ja hitsityypit hitsausjärjestyksessä
- siltahitsien sijoituksella ja niiden oikealla hitsausjärjestyksellä
- taivuttamalla hitsattavat osat ennakkokulmaan
- sijoittamalla hitsit lähelle kappaleen neutraaliakselia
- käyttämällä taka-askelhitsausta. (Lukkari 2001a, s. 223.) Taka-askelhitsauksen periaate on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Taka-askelhitsauksen periaate (Lukkari 2001a, s. 223).

#### 5.4 Alumiinirakenteiden väsymiskestävyys

Alumiinirakenne voi olla vaihtokuormituksen alaisena, jolloin se on altis väsymiselle. Alumiinin väsymislujuus on suhteellisen matala ja loviherkkyys on suurempi kuin teräksen. Sen vuoksi hitsien muotoilu ja käsittely ovat tärkeitä. Hitsin liittyminen perusaineeseen tulisi olla jouheva. (Lukkari 2001a, s. 85–87.) Erityisen tärkeä seikka on hitsipalon liittymän pyörityssäde. Lisäksi on huomioitava hitsipalon liittymiskulma sekä korkeus. Hitsipalon liian suuri korkeus ei kuitenkaan ole niin vaarallista kuin alitäyttö. Särömäisiä virheitä hitsistä voidaan poistaa esimerkiksi hiomalla. (Nevasmaa & Peltonen 1992, s. 19.)

## 6 MIG-HITSAUKSEN ROBOTISOINTI

Teollisuuden käytössä on erityyppisiä robotteja, joita voidaan hyödyntää eri tarkoituksiin. Hitsaavassa teollisuudessa on yleisesti käytössä kuusiakselinen robotti, jota voidaan ohjelmoida joko opettamalla tai etäohjelmointina, jolloin tuotanto ei keskeydy ohjelmoinnin ajaksi.

Robotisoinnin etuja käsinhitsaukseen verrattuna ovat mm. suurempi tuottavuus, kustannusten ennustettavuus ja tasainen laatu. Laatuun ja tuottavuuteen vaikuttavia yksityiskohtaisempia seikkoja ovat mm. vakaa suutinetäisyys, parempi kaariaikasuhde, suurempi hitsausnopeus sekä hitsaajan vapautuminen hitsaustyöstä. (Mathers 2002, s. 141; Cary 2002, s. 365.)

### 6.1 Robotit

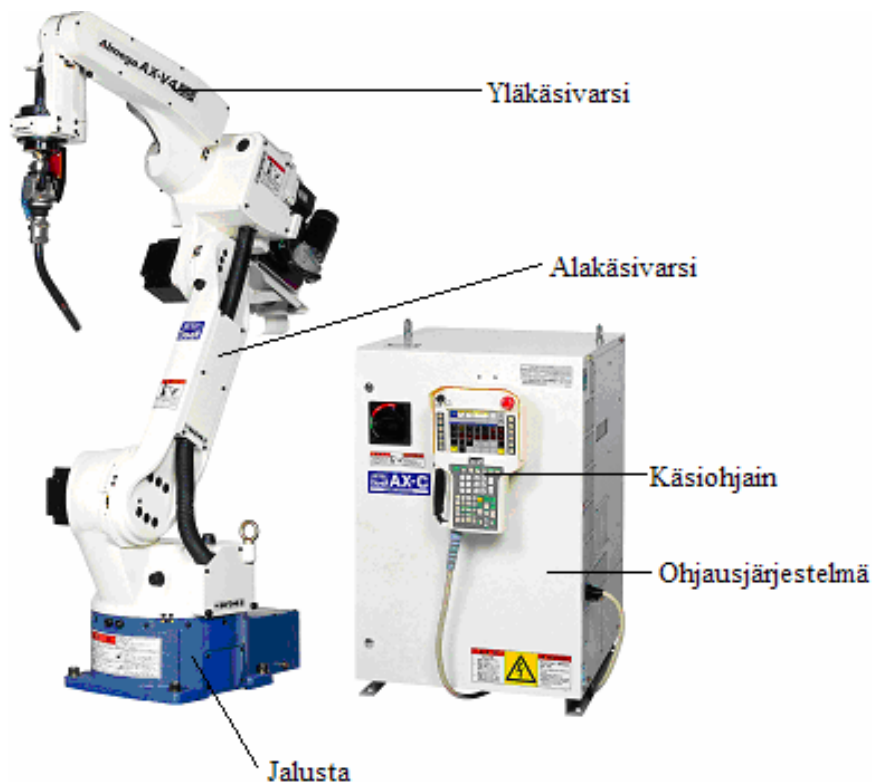
Kansainvälinen robottiyhdistys määrittelee robotin standardin ISO 8373 mukaan uudelleen ohjelmoitavissa olevaksi, monipuoliseksi, vähintään kolminiveliseksi laitteeksi, joka on suunniteltu liikuttamaan kappaleita, osia, työkaluja tai erikoislaitteita ohjelmoitavin liikkein monenlaisten tehtävien suorittamiseksi teollisuuden sovelluksissa. Uudelleenohjelmoitavuuden lisäksi robotit on saatava muodostamaan tuotteiden suunnittelutiedoista ja ympäristömallista liikeratansa, joita voidaan päivittää prosessia tarkkailevien antureiden avulla. (Kuivanen 1999, s. 13.)

Robotin tarkoituksena on hallita työkalunsa liikettä ja asemaa operaattorin haluamalla tavalla. Haluttu työkalun asema muutetaan laskennallisesti halutuiksi vapausasteiden paikkaohjearvoiksi. Robotti voi myös määrittää työkalun aseman paikkaohjearvojen perusteella. Teollisuusrobottien eri koordinaatistoja ovat maailmakoordinaatisto, peruskoordinaatisto sekä työkalukoordinaatisto. Maailmakoordinaatisto on robotin ulkopuolinen koordinaatisto, joka on sidottu työskentely-ympäristöön. Peruskoordinaatisto on sidottu robotin jalustaan, ja työkalukoordinaatisto on sidottu kiinni haluttuun kohtaan robotin työkalua. (Kuivanen 1999, s. 20–21.)

## 6.2 Teollisuudessa käytettävät robotit ja apulaitteet

Nykyiset hitsaavassa teollisuudessa käytettävät robotit ovat yleensä kuusiakselisia ja nivelvarsirakenteisia, joiden toistotarkkuus on 0,1 mm luokkaa. Hitsaussovelluksissa voidaan käyttää kevyempiä ja kuormituskyvyltään pienempiä robotteja, jotka mahdollistavat suuremmat liikenopeudet. (Hiltunen & Naams 2000, s. 20.)

Kuusiakselisissa robotissa on kuusi vapausastetta, joiden ansiosta työkalun saa mihin tahansa paikkaan ja asentoon työalueella (Kuivanen 1999, s. 18). Kolme vapausastetta on koordinaattiakselin suuntia ja kolme muuta näiden akselien kiertymiä (Salter & Weston 1989, s. 17). Mekaaniset liikealueet ja robotin sallittava työskentelyalue rajoittavat saavutettavia paikkoja ja asentoja. Kuuden vapausasteen huono puoli on vapausasteiden, mekaniikan ja ohjauksen korkea hinta. (Kuivanen 1999, s. 18.) Kuvassa 7 on kuusiakselinen teollisuusrobotti ja sen yleisimmät komponentit.



Kuva 7. Teollisuusrobotti ja sen yleisimmät komponentit (Q Point Robotic Solutions 2009).

Robottien työaluetta voidaan laajentaa asentamalla lattialla olevalle radalle. Myös 2-3 lineaariakselinen puoliportaali on mahdollinen. Työkappale asennetaan käsittelypöytään, jossa voi olla yksi tai kaksi liikeakselia. Kaksiakselisella käsittelypöydällä saavutetaan huomattavasti parempi hitsattavuus yksiakseliseen pöytään verrattuna., jolloin työkappale saadaan todennäköisemmin ihanteelliseen jalkoasentoon. Lisäksi suurin osa hitsausrailoista on hitsattavissa ja poltinkulmat sekä muut parametrit saadaan säädettyä kohdalleen. (Hiltunen & Naams 2000,s. 20–21.)

Robotin varustukseen kuuluvat virtalähde, langansyöttöyksikkö, poltin, polttimon puhdistus- ja langankatkaisulaite, polttimon vaihtoyksikkö sekä liityntä robotin ohjaukseen. Lisäksi robottiin voidaan yhdistää terminen leikkaus ja jäysteenpoistotoiminnot. (Holamo 2002; Hiltunen & Naams 2000, s. 22.)

### 6.3 Robottien ohjelmointi

Robotti voidaan ohjelmoida joko opettamalla tai etäohjelmointimenetelmällä. Opettamalla ohjelmoinnissa robotti ajetaan käsiohjaimen avulla haluttuihin kohtiin, ja asema tallennetaan muistiin. Robottiohjelma koostuu paikoituspisteistä ja ohjaukskäskyistä. Ohjaukskäskyjä ovat mm. hitsauksen aloitus- ja lopetuskäskyt, tauot ja polttimen kuljetusnopeus. Lisäksi ohjelmaan voidaan lisätä erikoistoimintoja, kuten railonhaku. (Hiltunen & Naams 2000, s. 22.)

Kuten opettamalla ohjelmointi, myös etäohjelmointi perustuu robotin paikoituspisteisiin. Pisteet luodaan erillisellä ohjelmalla käyttäen hyväksi hitsattavan kappaleen 3D-mallia. Etäohjelmoinnin etu opettamalla ohjelmointiin on tuotannon keskeytymättömyys ohjelmoinnin aikana. (Hiltunen & Naams 2000, s. 22.)

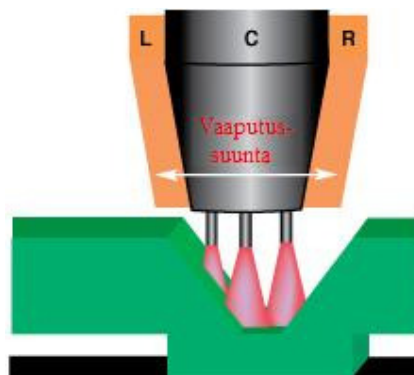
Piirrepohjainen etäohjelmointi on kehittyneempää ja nopeampaa perinteiseen ohjelmointiin nähden. Piirteellä tarkoitetaan valmistettavan tuotteen ominaisuutta, joka on tallennettu järjestelmään. Se huomioi myös prosessikohtaiset ohjelmointivaatimukset. Järjestelmässä piirteet ovat aliohjelmamakroja, joita järjestelmä ottaa käyttöön, kun tuotteessa toteutuvat tietyt ehdot. Perinteiseen etäohjelmointiin nähden piirrepohjainen ohjelmointi on nopeampaa. (Hiltunen & Naams 2000, s. 22.)

## 7 RAILONHAKU JA -SEURANTA

Railonhaku ja -seuranta ovat tarpeellisia robotisoidussa hitsauksessa, koska hitsattavien liitosten geometrioissa ja sijainnissa on poikkeamia, jotka johtuvat erilaisista epätarkkuuksista. Epätarkkuuksia syntyy eri valmistusvaiheissa ja lämmöntonin aiheuttamista muodonmuutoksista. Mekaanisoidussa ja automatisoidussa hitsauksessa automaattinen, reaaliaikainen säätö on välttämätön poikkeamien havaitsemiseksi. Tällöin hitsausparametreja voidaan muuttaa reaaliajassa ja pitää laatu vaadittavalla tasolla. (Jernström 2002, s. 13–14.)

Railonhaku- ja seuranta voidaan toteuttaa joko valokaarta hyödyntämällä, mekaanisella koskettimella tai optisella menetelmällä. Valokaaren käyttäminen seuranta-anturina on yleinen menetelmä MIG/MAG-hitsauksessa. Menetelmä perustuu valokaaren vaaputukseen hitsausrailojen sivuille. Vakiojännitevirtalähteessä tapahtuu virran muutoksia suutinetäisyyden muuttuessa railon sivujen ja keskikohdan välillä. Mitattuja arvoja verrataan keskenään, ja sen perusteella tehdään muutokset hitsauspään kulkurataan. (Jernström 1997, s. 43; Hiltunen & Naams 2000, s. 22; Korhonen & Alvajärvi & Vesansalo 1998, s. 14.) Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 8.

Suutinetäisyyden muutoksiin perustuva railonseurantamenetelmä ei kuitenkaan toimi alumiinin hitsauksessa, koska alumiinilla on terästä suurempi sähkönjohtavuus (Korhonen et al. 1998, s. 14). Hitsausvirran muutokset ovat olemattomia, vaikka vapaalangan pituus muuttuisikin (Lukkari 2001b, s. 28). Sitä ei voi myöskään käyttää ohuiden levyjen hitsauksessa. Myös pulssihitsauksessa menetelmä on ongelmallinen. (Hiltunen & Naams 2000, s. 22.)



Kuva 8. Valokaaren käyttäminen seuranta-anturina (Lipnevicius 2006).



## 7.1 Optisen railon seurannan menetelmät

Optisen railon seuranta mahdollistaa kosketuksettoman menetelmän railonhakuun ja -seurantaan. Optiset menetelmät perustuvat anturiin, joka tarkkailee railon sijaintia. Anturilla on oma ohjain, joka käsittelee ja tulkitsee anturilta tulevaa signaalia. Anturin ohjain antaa muutuskäskyjä robottiohjelmaan, joka tekee muutoksia robotin liikerataan tarpeen mukaan. Robotti pystyy hyödyntämään kaikkia kuutta vapausastetta liikeradan muuttamiseen. (Drews & Starke 1989, s. 84–85.)

Optisia railon seurantamenetelmiä ovat strukturoidun valon menetelmät, lasersäteen pyyhkäisyyn perustuvat menetelmät sekä hitsisulan tarkkailuun perustuvat menetelmät. Strukturoidun valon menetelmässä hitsauspään etupuolelle suunnataan juovan muotoon hajotettu laservalosäde. Sädetä tarkastellaan kameralla, joka on sijoitettu vinoon kulmaan valolähteeseen nähden. Mikäli railossa esiintyy poikkeamia, valon säde muuttaa muotoaan ja paikkaa kuvassa. Tietokone analysoi kuvaa ja tekee tarvittavat muutokset liikerataan. Strukturoidun valon periaate on kuvassa 9. (Jernström 1997, s. 41.)

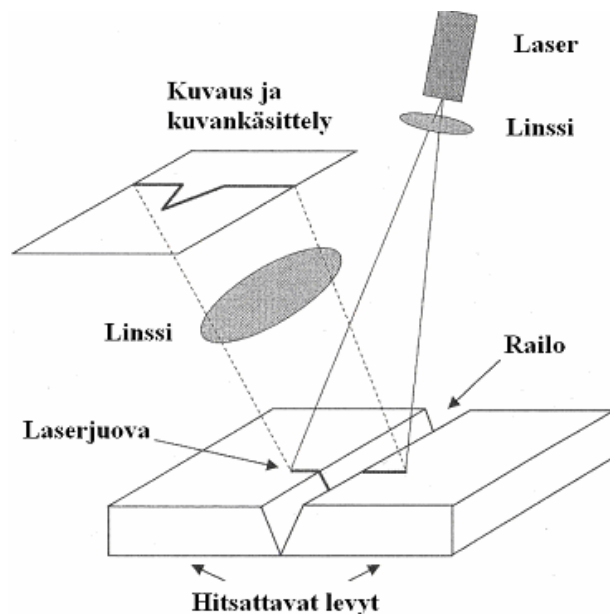
Lasersäteen pyyhkäisyyn perustuvissa menetelmissä lasersädetä poikkeutetaan polttimen edellä. Heijastuneen säteen etäisyyttä työkappaleen ja säteen lähetyskohdan välillä mitataan kolmiomittausperiaatteella. Mittauksella saadaan tietoa railon paikasta, leveydestä ja syvyydestä. (Jernström 1997, s. 41.) Menetelmän periaate on kuvassa 10.

Optisilla antureilla saadaan tietoa myös hitsausrailon tilavuudesta ja hitsipalon muodosta railon seurannan lisäksi. Takaisinkytkennän avulla parametreja voidaan muuttaa sopiviksi. Optinen railon seuranta on käytännössä ainut mahdollisuus, kun railon seurannan tarkkuusvaatimus on hyvin korkea, hitsausnopeus on useita metrejä minuutissa tai hitsattavana on kapeita I-railoja. Antureiden huono puoli on, että ne vievät ylimääräistä tilaa hitsauspolttimen ulkopuolelle sijoitettuna, jolloin robotin mahdollisuudet ahtaissa paikoissa heikkenevät. (Hiltunen & Naams 2000, s. 22.)

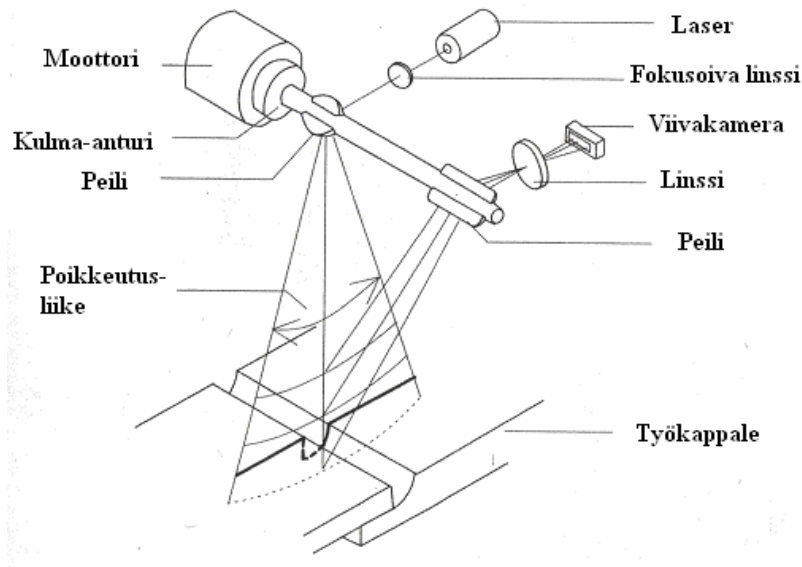
Nykyaikainen railon seurantatekniikka toimii jopa 2,5 metrin hitsausnopeuksilla, joten sen kapasiteetti on riittävä ainakin niillä hitsausnopeuksilla, joita käytetään MIG-hitsauksessa. Hyvän railon seurantatarkkuuden saavuttamiseksi seurantajärjestelmä tulee kalibroida tarkasti. (Anderson 2006.)

Valokaari ei haittaa railon seurannan toimintaa, koska raiioon heijastettava lasersäde koostuu vain yhdestä aallonpituudesta (Anderson 2006). Anturin kameran edessä on optinen suodatin, mikä päästää läpi vain lasersäteen aallonpituutta (Meta Vision Systems 2006). Anturin toiminta ei myöskään kärsi hitsauksen aiheuttamasta lämmöstä, roiskeista, höyryistä tai itse valokaaresta anturin ja hitsauskohdan etäisyyden ja anturissa itsessään olevan suojauksen ansiosta (Anderson 2006).

Alumiinirakenteiden haaste optiselle railon seurannalle on sen heijastavuus. Kiillotettu alumiinipinta heijastaa jopa 99 % säteilystä takaisin (Lukkari 2001a, s. 24). Optisen anturin sovelluksista, joissa hitsattava materiaali on erittäin heijastavaa, noin 10 %:lla on ongelmia anturin toiminnassa (Meta Vision Systems 2002). Railon seurannassa käytettävien anturien kameroissa on eroavaisuuksia. Sopivalla kameralla varustetulla anturilla luotettava railon seuranta saadaan toimimaan myös hyvin heijastavien materiaalien hitsauksessa (Anderson 2006).



Kuva 9. Strukturoituun valoon perustuva railon seurantamenetelmä (Pires & Loureiro & Bolmsjö 2005, s. 110).



Kuva 10. Lasersäteen pyyhkäisyyn perustuva railonseurantamenetelmä (Pires et al. 2005, s. 110).

## 7.2 Circular Scanning Sensor

CSS-anturi (Circular Scanning Sensor) on Oxfordsensorin patentoima anturi, jota voidaan käyttää myös railonseurantaan. Pienitehoisen lasersäteen ja pyörivän linssin avulla tarkasteltavaan pintaan lähetetään lasersäde. Nopeasti pyörivän lasersäteen eri vaiheiden etäisyyttä anturin ja mitattavan pinnan välillä mitataan jatkuvasti. Lasersäde lähetetään pintaan vinosta kulmasta pintaan nähden, ja samassa kulmassa sijaitsee myös tunnistin, joka mittaa pintaan kohdistetun, ympyrärataa pyörivän lasersäteen eri vaiheiden etäisyyttä anturiin, jolloin sen ohjain pystyy muodostamaan kolmiulotteisen tiedon mitattavasta pinnasta. Anturi toimii myös hyvin heijastavilla materiaaleilla kuten alumiinilla. (Ost-Smartline 2009; Oxfordsensor 2009) Railonseuranta-anturi ja pintaan heijastunut lasersäde ovat kuvassa 11.

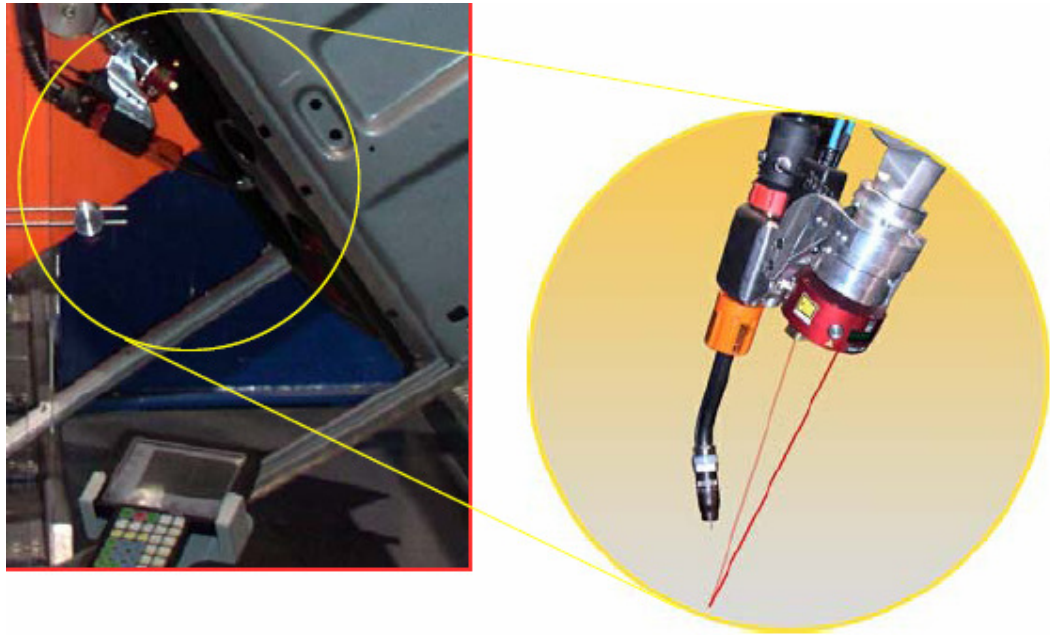


Kuva 11. Pyörivään laservaloon perustuva railonseuranta-anturi (Ost-Smartline 2009).

Autovalmistaja Jaguar käyttää XK-mallisen urheiluauton valmistuksessa robotisoitua alumiinin MIG-hitsausta. Autossa on vain kaksi hitsiä, jotka näkyvät ulospäin. Hitsauspolttimen oikean kohdistuksen varmistamiseksi railonseurantaan käytetään Oxfordsensorin CSS-anturia. Railonseuranta-anturi on liitetty ABB:n kuusiakseliseen robottiin. Anturin avulla hitsauspoltin saadaan kulkemaan juuri oikeaa rataa jokaisessa valmistettavassa autossa. Yli 0,5 mm suuruisin poikkeamia optimaalisesta hitsausradasta ei sallita missään tapauksessa. 150 mm pitkät hitsit sijaitsevat molemmin puolin autoa C-pilarin ja katon liitoksessa. Tehdas on asettanut hitsin laadulle erittäin suuret vaatimukset ja erityisesti huokoisuuden minimoimiseen on kiinnitetty huomiota. (Mortimer 2006, s. 272–275.)

### 7.3 Optinen railonhakuanturi

Railonseurannan sijaan voidaan käyttää myös sellaista anturia, joka sisältää vain railonhakutoiminnon. Sellainen anturi ei kuitenkaan sovellu käytettäväksi pitkissä hitseissä, joissa todelliset hitsien paikat eroavat ohjelmoidusta. Toisaalta pitkiä hitsejä hitsatessa hitsaus voidaan keskeyttää välillä ja suorittaa railonhaku uudelleen oikean linjan varmistamiseksi. Anturivalmistaja Servo-Robotilla on uusi, optinen railonhakuanturi, jolla railonhaku voidaan suorittaa kohteissa, joihin tavallinen railonseuranta-anturi ei suuren tilantarpeen vuoksi mahdu. Lisäksi anturi on sijoitettu huomattavasti kauemmaksi hitsausuuttimesta, mikä myös antaa paremmat mahdollisuudet toimia ahtaissa hitsauskohteissa. Anturi on kuvassa 12.



Kuva 12. Servo-Robotin uusi, optinen railonhakuanturi (Servo-Robot 2009).

#### 7.4 Optisen railon seurannan testaus alumiinirakenteissa

Optisen railon seurannan toimivuutta alumiinirakenteissa testattiin Savonia-ammattikorkeakoulun hitsauslaboratorion laitteilla. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää optisen railonhaun ja -seurannan toimivuutta alumiinirakenteissa erilaisissa liitosmuodoissa. Testauksessa oli myös mukana erityinen alumiiniveneessä käytettävä alumiiniprofiili, joka hitsataan alumiinilevyyn. Profiili on kuvassa 13. Koe selvitti yleisesti myös railon seurannan toimintaa käytännössä.

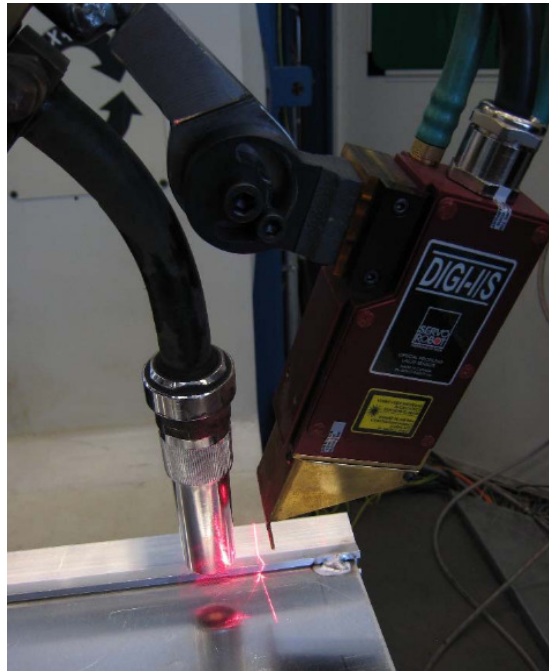


Kuva 13. Alumiiniveneessä käytettävä profiili ja siihen silloitetut ohutlevyt.

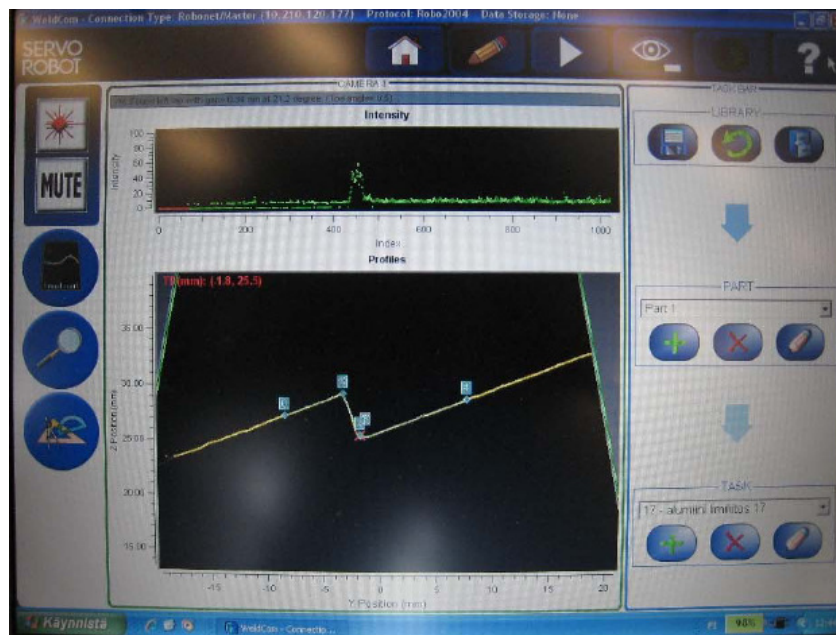
Railon seurannan toimintaa tutkittiin myöhemmässä vaiheessa lisää, jolloin tavoitteena oli saada aikaan hyvälaatuista hitsiä seuranta hyödyntäen. Toimintaa kokeiltiin myös paremmin heijastavalla, harjaamattomalla alumiinipinnalla. Lisäksi tutkittiin optisella railon seuranta-anturilla varustetun robotin rajoitteita ahtaissa hitsauskohteissa.

#### 7.4.1 Kokeessa käytetty tekniikka

Käytettävissä oli kuusiakselinen OTC hitsausrobotti, johon oli yhdistetty Servo-Robot Digi-IIS optinen railonhaku ja -seuranta-anturi. Anturi lähettää laservalojuovan noin 20 mm lisäänelangan etupuolelle. Laservalojuova heijastuu anturissa olevaan kameraan. Anturi on kuvassa 14. Railoon kohdistettua laservalojuovaa tarkkailee anturissa oleva kamera, minkä avulla railon paikka ja muoto siirtyy sähköiseen muotoon anturin ohjaimelle. Ohjelma tulkitsee railon paikan muutosta ja tekee tarvittavat korjaukset ohjelmoituun rataan. Ohjelman käyttöliittymä on kuvassa 15.



Kuva 14. Testauksessa käytetty optinen Servo-Robot Digi-IIS-anturi.



Kuva 15. Optisen anturin ohjaimen käyttöliittymä. Kuvan tapauksessa viiva kuvaa päällekkäisliitoksesta heijastuneen lasersäteen muotoa.

Seurannan lisäksi anturi pystyy tekemään myös railonhaun ennen hitsauksen aloitusta. Heijastettava lasersäde on noin 20 mm lisäainelangan edellä, joten seurannassa on aina sen pituinen viive robotin liikeradan korjauksessa. Käytännön tilanteissa siitä ei kuitenkaan ole haittaa, koska sellainen tilanne on harvinainen, jossa railon suunta muuttuisi yhtäkkiä niin lyhyellä matkalla.

Seuranta-anturin ohjain sisältää lukuisia säätömahdollisuuksia, joiden avulla seuranta saadaan toimimaan mahdollisimman häiriöttömästi ja tarkasti. Ensimmäiseksi tulee tarkistaa, että anturin asento on oikea, jotta se ei aiheuta systemaattista virhettä seurantaan. Railon muoto tulostuu tietokoneen kuvaruudulle, kun lisäainelanka asetetaan esimerkiksi hitsauksen aloituskohtaan. Ohjelma tunnistaa automaattisesti railosta erilaisia piirteitä, kuten kulmia, jotka ohjelma numeroi. Tällainen piirre on esimerkiksi V-railon pohja, joka voidaan valita seurattavaksi kohteeksi. Laserin teho säädetään sopivaksi niin, että ohjelma kykenee tulkitsemaan railon muodon oikein. Materiaalin heijastuvuus vaikuttaa railon luettavuuteen. Ohjainohjelmisto sisältää myös erilaisia hienosäätömahdollisuuksia, joita joudutaan säätämään railomuotojen ja materiaalien vaihtuessa. Erilaisia suodattimia säätämällä saadaan poistettua häiriöitä, jotka ovat haitaksi railon luennassa. Servo-Robot Digi-IIS-anturi sisältää myös hitsauksen lopetuskohdan tunnistuksen.

#### 7.4.2 Koejärjestelyt

Railonhaun- ja seurannan toimivuutta testattiin erilaisilla liitostyypeillä, kuten päittäisliitoksella, päällekkäisliitoksella sekä erityisen alumiiniprofiilin liitoksella ohutlevyyn. Päittäisliitoksen ilmarako vaihteli myös hieman. Siten voitiin tutkia onko sillä vaikutusta seurannan toimintaan. Kappaleita aseteltiin vinoon alkuperäiseen ohjelmointiin nähden ennen robotin liikkeen aloitusta, jolla voitiin testata railonhaun toimivuutta, sekä sen jälkeistä seurantaa. Lisäksi koekappaleita käännettiin kesken robotin liikesuorituksen. Robotin liikerataa tutkittiin pääsääntöisesti ilman valokaarta, jolloin toimintaa oli mahdollista seurata paljaalla silmällä. Sen lisäksi yksi railo testattiin hitsaamalla päällekkäisliitos.



### 7.4.3 Jatkotutkimukset

Myöhemmissä tutkimuksissa perehdyttiin erityisesti kuvassa 10 näkyvän, alumiiniveneessä käytettävän alumiiniprofiilin ja siihen liitettävien ohutlevyjen hitsausliitoksiin. Todellisuudessa kyseiset hitsit ovat erittäin pitkiä, jolloin seuranta on erityisen tarpeellinen muodonmuutosten vaikutusten kompensoimiseksi. Hitsausarvot määritettiin koekappaleita apuna käyttäen ennen varsinaisen testikappaleen hitsausta. Seurannan toimivuutta kokeiltiin myös erittäin heijastavalla, harjaamattomalla alumiinipinnalla, mikä toi hieman lisää haasteita asetusten hakuun. Lopuksi kokeiltiin anturilla varustetun robotin soveltuvuutta ahtaissa hitsauskohteissa, jossa koekappaleena oli alumiiniveneen pohjan rakenteita jäljittelevä alumiinirakenne. Koekappale on kuvassa 16.



Kuva 16. Ulottuvuustarkastelussa käytetty, alumiiniveneen pohjaa mallintava koekappale.

### 7.4.4 Tulokset

Heijastavalla materiaalilla ohjaimen ja anturin säädöt olivat melko tarkkoja asetuksistaan, jotta seuranta saatiin toimivaksi ja häiriöttömäksi. Myös railossa olleet koneistusvirheet saattoivat aiheuttaa heijastuksia, ja sitä myöten häiriöt näkyivät tietokoneella epämuodostuneena railonkuvana. Erilaisilla suodattimilla ja säädöillä häiriöt vähenivät ja seuranta saatiin toimimaan luotettavasti. Kokonaisuudessaan voitiin havaita, että säätöjen ollessa kohdallaan mikään testatuista railoista ei aiheuttanut ongelmia seurannalle. Robotti pysyi kaikissa testeissä radallaan tekemättä virheliikkeitä. Huomioitavaa kuitenkin on

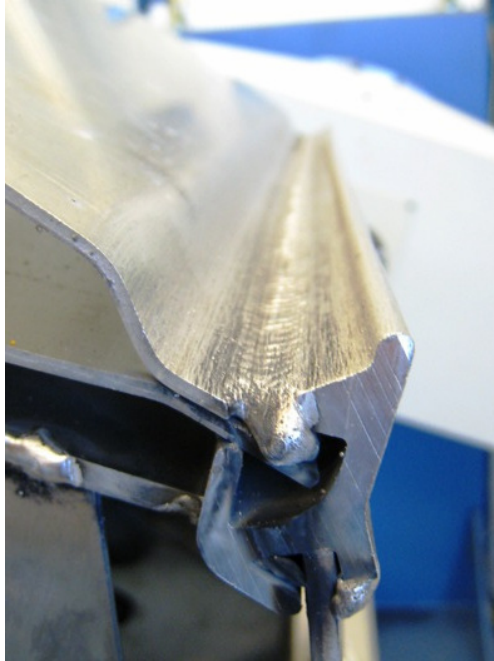
railon seurannan kannalta, että siltahitsit eivät saa olla hitsauksen aloituskohdassa, koska tällöin railonhakutoiminto ei välttämättä löydä hitsauksen aloituskohtaa oikein.

Hitsatun koekappaleen kohdalla seuranta toimi myös moitteetta. Kuvassa 17 näkyvä hitsi on juuri oikealla kohdalla, mutta hitsausarvot eivät olleet aivan optimaaliset, minkä vuoksi hitsin laatu on heikohko.



Kuva 17. Alumiinin päällekkäisliitoksen hitsaus optista railonseurantaa hyödyntäen.

Myöhemmissä tutkimuksissa varsinainen koehitsaus onnistui hyvin. Kuvassa 18 oleva hitsi oli silmämääräisen tarkastuksen perusteella erittäin hyvin onnistunut ja seuranta oli toiminut moitteettomasti. Suuria muodonmuutoksia koekappaleessa ei päässyt tapahtumaan, mutta seuranta olisi voinut harhautua esimerkiksi satunnaisesta lasersäteiden heijastumasta. Seurannan harhautumista ei kuitenkaan tapahtunut.



Kuva 18. Jatkotutkimuksissa hitsattu koehitsi.

Harjaamattomalla, erittäin kiiltävällä alumiinipinnalla suoritettu seurannan testaus tuotti hieman haasteita. Tällöin voitiin havaita heijastumien vaikutus optisen anturin toiminnan vakauteen. Anturin asetusten säätö oli huomattavasti tarkempaa verrattuna normaalitilanteeseen, jossa alumiinipinnasta on juuri poistettu oksidikerros esimerkiksi harjaamalla.

Alumiiniprofiilin koehitsauksessa käytetyt hitsausarvot ovat seuraavat: tehollinen virta  $I=135A$  tuplapulssilla, jännite  $U=20V$  ja hitsausnopeus  $v=50$  cm/min. Hitsistä tehtiin makrohie, joka on kuvassa 19. Kuvasta voidaan nähdä, että hitsaus on onnistunut mainiosti. Huokosia on toki näkyvissä, mutta niiden kohtuullinen määrä on normaalia alumiinia hitsattaessa.

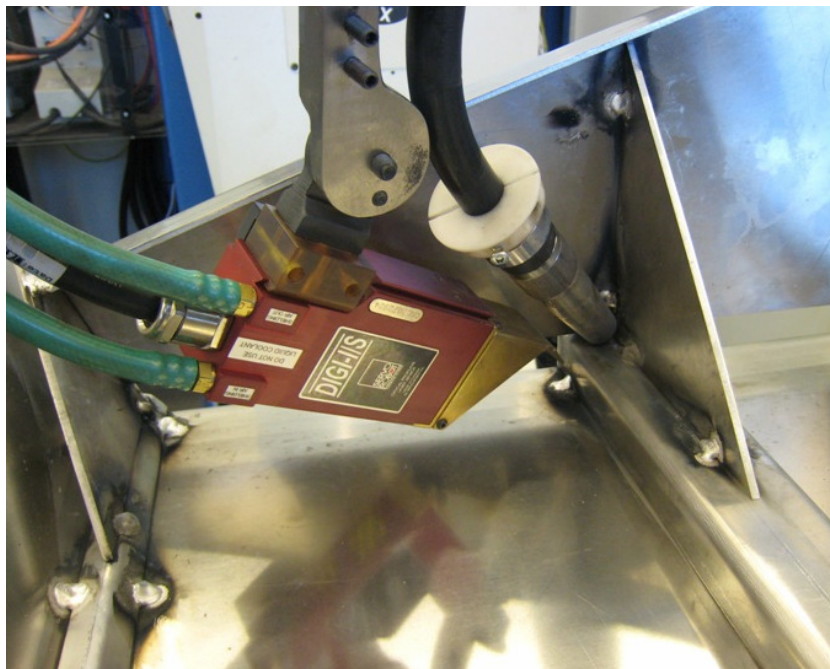


Kuva 19. Makrohie alumiiniprofiilin koehitsistä.

Ulottuvuustarkastelussa havaittiin anturin suhteellisen suuren fyysisen koon tuomat rajoitteet ahtaiden kohteiden hitsauksessa, mikäli railonseuranta halutaan hyödyntää. Kuvassa 19 on näkyvissä esimerkkitapaus, jossa railonseuranta-anturin käyttö rajoittaa hitsauskohteeseen pääsyä. Toisaalta seuranta ei aina ole tarpeellista käyttää, vaan robotin käsivarsi voidaan kääntää sellaiseen asentoon, jossa anturi ei ole enää hitsauskohteeseen pääsyn esteenä. Tällaisessa tapauksessa anturi ei kuitenkaan enää ole käytettävissä. Tällainen esimerkki on esitetty kuvassa 21. Kuvien 20 ja 21 tapauksessa hitsit ovat melko lyhyitä, joten todennäköisyys muodonmuutosten tapahtumiseen on pienempi kuin pidempiä hitsejä hitsattaessa. Sen vuoksi seuranta ei ole niin oleellinen osa hitsauksen onnistumista.



Kuva 20. Esimerkkitapaus optisen anturin tuomasta rajoitteesta ahtaassa hitsauskohteessa.



Kuva 21. Hitsausrobotin käsivarren kääntäminen asentoon, jossa optinen anturi ei ole esteenä hitsaukselle ahtaassa kohteessa. Kuvan asennossa anturi ei ole käytettävissä.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET

Robotisoidun hitsauksen tavoitteena on automatisoitu hitsaustapahtuma, jossa laatu-, taloudellisuus ja tuottavuusseikat ovat kilpailukykyisessä kunnossa. Alumiinirakenteiden robotisoidussa hitsauksessa railon seuranta on rakenteesta riippuen hyvin tarpeellinen, jotta robotisoinnin hyödyt saadaan pidettyä yllä. Railon seurannalla on vaikutus hitsin laatuun ja hitsauksen taloudellisuuteen. Hitsauspolttimen oikea kohdistus varmistaa laadun ja rakenteiden kestävyuden omalta osaltaan. Kun hitsaus suoritetaan kerralla valmiiksi vaaditulla laadulla, jälkityön määrä vähenee.

Alumiinin erilaiset fysikaaliset ominaisuudet teräkseen verrattuna edellyttävät erityistä huomiota hitsauksen kannalta. Erityisesti suuri lämpölaajeneminen vaatii toimivaa railon seuranta. Lämpölaajenemisen aiheuttamia muodonmuutoksia ei voi kuitenkaan jättää pelkästään railon seurannan varaan, vaan niitä voidaan vähentää myös rakenteiden oikealla suunnittelulla.

Optisen railon seurannan haaste alumiinirakenteissa on materiaalin suuri heijastuvuus. Alustavissa testeissä seuranta toimi kuitenkin moitteetta, kun anturin ohjaimen säädöt oli saatu kohdalleen. Jatkotutkimuksissa eri heijastavuusasteiden omaavien alumiinipintojen seurannan toimivuudessa ja anturin ohjelmoitavuudessa havaittiin selkeä ero. Lisäksi häiriöitä voivat aiheuttaa esimerkiksi virheet railon koneistuksessa. Vähemmän heijastavalla materiaalilla se ei ole niin suuri ongelma, koska pinnan virheet eivät aiheuta niin herkästi toimintaa häiritseviä ylimääräisiä heijastuksia.

Eräät anturivalmistajat lupaavat anturillensa toimivuuden myös hyvin heijastavien materiaalien hitsauksessa, mutta tutkimustietoa optisesta railon seurannasta alumiinirakenteissa on niukasti tarjolla. Terästen hitsauksessa voidaan yleensä tyytyä halvempaan, valokaaren pituuden muutoksiin perustuvaan railon seurantaan, jolloin optisen railon seurannan tutkiminen ja kehitys eivät ole niin etualalla. Alumiinirakenteiden automatisoidun hitsauksen kannalta optinen railon seuranta on kuitenkin niin oleellinen osa, että tutkimuksille olisi tilaa.

Railonseuranta-anturin hankintapäätöstä tehdessä on syytä vertailla eri valmistajien antureita. Eroja saattaa löytyä esimerkiksi anturin ohjelman käyttöliittymässä, ohjelmoinnin helppoudessa ja seurannan luotettavuudessa. Erot korostunevat erityisesti heijastavien pintojen seuranta ohjelmoitaessa.

Anturien fyysiseen kokoon tulisi kiinnittää tulevaisuudessa enemmän huomiota. Nykyiset anturit ovat melko suurikokoisia rajoittaen luoksepäästävyttä hitsauskohteisiin. Ratkaisua kannattaa miettiä myös alumiinirakennetta suunnitellessa niin, että hitsit olisivat helposti hitsattavissa. Tietyissä tapauksissa alumiinirakenne voitaisiin valmistaa myös osakokoonpanoista, jotta hitsauskohteet olisivat paremmin esillä. Railonseurannan sijaan mahdollisuutena on käyttää pelkkää railonhakutoiminnolla varustettua anturia. Tällöin pitkiä hitsejä hitsatessa railonhaku on suotavaa suorittaa välillä uudelleen robotin oikean paikoituksen varmistamiseksi.

Hitsirailon heijastavuuden rajoittamista voisi myös tutkia. Railopintaa voisi käsitellä koneistusvaiheessa niin, että sen heijastavuutta saisi pienemmäksi. Käsittely voisi olla esimerkiksi maalaus, jolla ei kuitenkaan saisi olla heikentävää vaikutusta hitsin laatuun. Heijastavuuden vähenemisen lisäksi railon ja ympäröivän alumiinipinnan välille saataisiin kontrastiero, jolloin railonhakukin toimisi todennäköisesti varmemmin.

Nykyisilläkin optisilla antureilla on kuitenkin edellytykset railonseurantaan alumiinirakenteita hitsattaessa. Esimerkiksi alumiinivene sisältää hyvin esillä olevia pitkiä hitsejä, joissa seuranta on hyvin tarpeellinen hitsausliitoksen onnistumisen ja laadun kannalta. Kaikissa tapauksissa seuranta ei kuitenkaan ole tarpeellista käyttää, mutta anturi saattaa silti olla ahtaaseen hitsauskohteeseen pääsyn esteenä. Mahdollisuuksien mukaan voitaisiin käyttää kahden robotin järjestelmää, joista vain toinen olisi varustettu optisella anturilla. Siten voitaisiin taata parempi luoksepäästävyys ahtaampiin kohteisiin.

## 9 YHTEENVETO

Tämän kandidaantintyön tavoitteena oli esitellä optisen railon seurannan haasteita ja mahdollisuuksia alumiinirakenteiden robotisoidussa MIG-hitsauksessa. Työssä kerrottiin alumiinin MIG-hitsauksen perusteista, hitsauksen robotisoinnista sekä alumiinin materiaaliominaisuuksista ja erilaisista seoksista. Erityiset materiaaliominaisuudet vaikuttavat osaltaan hitsauksen suoritukseen. Alumiinilla on voimakas taipumus hapettua. Pintaan muodostuva oksidikerros tulee poistaa ennen hitsausta. Alumiinin MIG-hitsauksessa käytetään yleisesti pulssihitsausta, jolla on lukuisia etuja perinteiseen MIG-hitsaukseen verrattuna. Alumiiniseokset voidaan jakaa erilaisiin ryhmiin muun muassa seosaineiden ja erilaisten muokkaustilojen perusteella, jotka vaikuttavat hyvin paljon korroosionkesto- ja lujuusominaisuuksiin sekä hitsattavuuteen. Alumiinirakenteiden suunnittelussa ja valmistuksessa on myös huomioon otettavia seikkoja juuri materiaalin ominaisuuksien vuoksi. Hitsauksen kannalta suuri lämpölaajeneminen ja sen tuomat muodonmuutokset rakenteisiin tuovat haasteita. Hitsin laadun tulisi myös olla sellainen, ettei se olisi erityisen alttiina väsymismurtumille.

Robotisoidussa MIG-hitsauksessa railonhaku ja -seuranta ovatkin varsin oleellinen osa hitsauksen laadun ja tuottavuuden kannalta. Hitsattavien raijien sijainnit poikkeavat usein oletetusta, jolloin railon seuranta paikkaa virheitä korjaamalla robotin ohjelmoitua liikerataa. Valokaaren pituuden muutoksiin perustuva railon seurantamenetelmää ei voi käyttää alumiinin hitsauksessa alumiinin suuren sähkönjohtavuuden ja yleisesti käytettävän pulssihitsauksen vuoksi. Sen vuoksi optinen railon seuranta tulee kyseeseen alumiinirakenteiden hitsauksessa. Optisille antureille haasteena on alumiinin hyvin suuri heijastuvuus. Anturit ovat myös sitä kokoluokkaa, että ahtaisiin hitsauskohteisiin pääsy voi olla ongelma.

Koehitsaukset optisen railon seurannan toimivuudesta alumiinirakenteissa antoivat kuitenkin varsin positiivisia tuloksia. Testauksessa kokeiltiin erilaisia liitostyyppjä sekä simuloitiin erilaisia railon seurannan toimintaan ja luotettavuuteen vaikuttavia seikkoja. Seuranta toimi luotettavasti, kun anturin ohjaimen säädöt olivat kohdallaan. Esille nousi kuitenkin seikka, että keskimääräistä heijastavampi pinta tuo riskinsä seurannan onnistumiseen. Sen lisäksi anturin ohjelmoiminen on vaikeampaa ja vie täten enemmän



työaikaa. Kehitystyötä antureiden parissa voitaisiin tehdä erityisesti niiden fyysisen koon pienentämiseksi. Myös tutkimustieto eri antureiden soveltuvuuksista heijastaville materiaaleille olisi tervetullutta.

## LÄHTEET

Anderson, C. 2006. Improve Welding Quality With 3D Laser Seam-Tracking [verkkodokumentti]. Päivitetty 26.10.2006. [viitattu 18.3.2009]. Saatavissa: [http://weldingmag.com/processes/news/wdf\\_38778/](http://weldingmag.com/processes/news/wdf_38778/)

Cary, H. 2002. Modern Welding Technology. 5th edition. New Jersey. Pearson Education Ltd. 801 s.

Drews, P & Starke, G. 1989. Visual sensing approaches for robotic arc welding. Exploiting robots in arc welded fabrication. 84–93 s.

Hiltunen, E. & Naams, I. 2000. Robottihitsauksen faktat ja fiktiot Suomessa. Hitsaustekniikka 5/2000. 20–23 s.

Holamo, O-P. 2002. Robottiaseman etäohjelmointi ja kalibrointi [verkkodokumentti]. Päivitetty 10.4.2002. [viitattu 10.3.2009]. Saatavissa: <http://www2.lut.fi/~hiltunen/virhholamo.pdf>

Jernström, P. 2002. Hitsin laadun reaaliaikainen hallinta automatisoidussa hitsauksessa. Hitsaustekniikka 2/2002. 13–18 s.

Jernström, P. 1997. Plasmahitsauksen tehokas käyttö. Tekninen tiedotus 5/97. Helsinki. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 60s.

Korhonen, P. & Alvajärvi, A. & Vesansalo, T. 1998. Kokemuksia alumiinin tandem-MIG-hitsauksesta. Hitsaustekniikka 5/1998. 12–14 s.

Kuivanen R. (toim.) 1999. Robotiikka. Vantaa. Talentum Oyj / Metallitekniikka. 212 s.

Lindroos, V. & Sulonen, M. & Veistinen, M. 1986. Uudistettu Miekk-ojan metallioppi. Helsinki. Kustannusosakeyhtiö Otava. 841 s.

- Lipnevicius, P. 2006. Positioning your welds [verkkodokumentti]. Päivitetty 10.1.2006. [viitattu 18.11.2009]. Saatavissa: [http://www.thefabricator.com/AluminumWelding/AluminumWelding\\_Article.cfm?ID=1229](http://www.thefabricator.com/AluminumWelding/AluminumWelding_Article.cfm?ID=1229)
- Lukkari 2001a. Alumiinit ja niiden hitsaus. Tampere. Metalliteollisuuden kustannus Oy. 251 s.
- Lukkari, J. 2001b. Miksi alumiinin hitsaus on erilaista kuin teräksen hitsaus? Hitsaustekniikka 1/2001. 24–30 s.
- Lukkari, J. 2002. Hitsaustekniikka – Perusteet ja kaarihitsaus. Helsinki. Edita Prima Oy. 292 s.
- Martikainen, J. 1994. Alumiinin käyttäytyminen hitsauksessa ja lämpökäsittelyt. Hitsaustekniikka 1/1994. 8–13 s.
- Mathers, G. 2002. Welding of aluminium and its alloys. Cambridge. Woodhead publishing Ltd. 234 s.
- Meta Vision Systems 2002. [yrityksen verkkosivut]. [Viitattu 30.9.2009]. Saatavissa: <http://www.meta-mvs.com/news/43.html>
- Meta Vision Systems 2006. [yrityksen verkkosivut]. [Viitattu 23.10.2009]. Saatavissa: <http://www.meta-mvs.com/lasersensors.html>
- Mortimer, J. 2006. Jaguar uses adaptive MIG welding to join C-pillars to an aluminium roof section in a new sports car [verkkodokumentti]. Päivitetty 26.4.2006. [viitattu 3.3.2009]. Saatavissa: <http://www.emeraldinsight.com/0260-2288.htm>
- Nevasmaa, P. & Peltonen, J. 1992. Hitsausteknisiä näkökohtia väsymiskuormitettujen alumiinirakenteiden suunnittelussa ja valmistuksessa. Hitsaustekniikka 6/1992. 17–20 s.

Nordic Aluminium, 2007. Profiilien suunnittelu [verkkodokumentti]. [viitattu 12.3.2009]. Saatavissa: [http://nordicaluminium.a1netti.com/files/pdf/palvelumyynti/profiilisuunnittelu\\_2007.pdf](http://nordicaluminium.a1netti.com/files/pdf/palvelumyynti/profiilisuunnittelu_2007.pdf)

Ost-smartline 2009. [yrityksen verkkosivut]. [viitattu 14.3.2009]. Saatavissa: <http://ost-smartline.com/?target=p&item=css>

Oxfordsensor. 2009. [yrityksen verkkosivut]. [viitattu 14.3.2009]. Saatavissa: <http://www.oxfordsensor.com/css2.shtml>

Pires, J.N. & Loureiro, A. & Bolmsjö, G. 2005. Welding Robots: Technology, System Issues And Application. Springer. 180s.

Q Point Robotic Solutions. 2009. [yrityksen verkkosivut]. [viitattu 20.4.2009]. Saatavissa: <http://www.qpointrobotic.com/Graphics/AX-V4%20with%20AX-C.jpg>

Salter, G.R. & Weston, J. 1989. Principles and terminology of robotic arc welding. Exploiting robots in arc welded fabrication. 16–21 s.

Servo-Robot 2009. [yrityksen verkkosivut]. Päivitetty 1.3.2009. [viitattu 21.11.2009]. Saatavissa: <http://www.servorobot.com/uploads/media/Servo-Robot-RoboFind.pdf>

LIITE I

*Alumiiniseosten yleisimmät toimitustilat (Standardi SFS-EN 515; Lukkari 2001a, s. 45).*

<b>Tilatunnus</b>	<b>Selitys</b>
F	Valmistustila
O	Pehmeäksilujitettu
H	Muokkauslujitettu
H12	Muokkauslujitettu, ¼-kova
H14	Muokkauslujitettu, ½-kova
H16	Muokkauslujitettu, ¾-kova
H18	Muokkauslujitettu, 4/4-kova
H19	Muokkauslujitettu ja osittain hehkutettu, erikoiskova
H22	Muokkauslujitettu ja osittain hehkutettu, ¼-kova
H24	Muokkauslujitettu ja osittain hehkutettu, ½-kova
H26	Muokkauslujitettu ja osittain hehkutettu, ¾-kova
H28	Muokkauslujitettu ja osittain hehkutettu, 4/4-kova
H32	Muokkauslujitettu ja stabiloitu, ¼-kova
H34	Muokkauslujitettu ja stabiloitu, ½-kova
H36	Muokkauslujitettu ja stabiloitu, ¾-kova
H38	Muokkauslujitettu ja stabiloitu, 4/4-kova
T	Lämpökäsitelty
T2	Jäähdytetty kuumamuovauslämpötilasta, kylmämuovattu ja luonnollisesti vanhennettu
T3	Liuotushehkutettu, kylmämuovattu ja luonnollisesti vanhennettu
T4	Liuotushehkutettu ja luonnollisesti vanhennettu
T5	Jäähdytetty kuumamuovauslämpötilasta ja keinovanhennettu
T6	Liuotushehkutettu ja keinovanhennettu
T8	Liuotushehkutettu, kylmämuovattu ja keinovanhennettu
T9	Liuotushehkutettu, kuumamuovattu ja luonnollisesti vanhennettu