

LAPPEENRANNAN TEKNILINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

RAILONVALMISTUSMENETELMÄT ALUMIININ HITSAUKSESSA
GROOVE MANUFACTURING METHODS FOR ALUMINUM WELDING

Lappeenrannassa 13.9.2011

Jussi Asikainen

0325386

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO	3
1 JOHDANTO	4
1.1 Työn tausta.....	4
1.2. Työn tavoite ja rajaus.....	4
2 ALUMIININ TYÖSTÖMINAISUUKSIA.....	5
2.1 Leikattavuus.....	5
2.2 Hitsattavuus	5
2.3 Lastuttavuus	8
3 ALUMIININ LEIKKAUS	10
3.1 Terminen leikkaus.....	10
3.1.1 Laserleikkaus	10
3.1.2 Plasmaleikkaus.....	12
3.2 Vesisuihkuleikkaus	13
3.3 Mekaaninen leikkaus	14
3.3.1 Tappijyrsintä	15
4 LEIKKAUSMENETELMIEN SOVELTUVUUS RAILONVALMISTUKSEEN.....	15
4.1 Alumiinin hitsauksessa vaadittavat railot, tarkkuudet ja toleranssit.....	16
4.2 Menetelmillä saavutettavat tarkkuudet	19
4.2.1 Vesisuihkuleikkaus	19
4.2.2 Laserleikkaus	20
4.2.3 Jyrsintä	21
4.2.4 Plasmaleikkaus.....	23
4.3 Leikkausjäljen virheet ja laatu	23
4.3.1 Vesisuihkuleikkaus	23
4.3.2 Plasmaleikkaus.....	23
5 LEIKKAUSMENETELMIEN TALOUDELLINEN VERTAILU	25
6 CASE: ALUMIINIVENEEN RUNKO	27

7 JOHTOPÄÄTÖKSET	31
8 YHTEENVETO.....	31
LÄHTEET	33

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO

E	Kimmomoduuli [Gpa]
R _a	Pinnankarheus [μm]
R _{p0,2}	Myötölujuus [MPa]
CW	Continuous-wave
HAZ	Heat affected zone
MIG-hitsaus	”Metal inert gas” –welding
PCD	Polycrystalline Diamond
TIG-hitsaus	”Tungsten Inert Gas Arc” –welding
YAG	Yttrium Aluminum Garnet

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Tämä kandidaatintyö liittyy Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa 2008-2011 käynnissä olevaan Tekesin tutkimushankkeeseen ”Alumiiniveneen hitsauksen automatisointi”. Tällä hetkellä Suomessa pienemmät veneenrungot hitsataan käsin, sillä robottihitsauksessa tulee ongelmaksi hitsin luokse pääseminen, etenkin kokoonpanohitsauksessa. Automaatiohitsauksessa myös tarvitaan huomattavasti tarkemmat railotoleranssit kuin käsinhitsauksessa, koska hitsausrobotti on sokea hitsausliitosten poikkeamille. Hitsauksen automatisoinnilla pyritään nostamaan nykyistä tuotantokapasiteettia ja yleisesti parantamaan alumiinirakenteiden hitsien laatua.

1.2. Työn tavoite ja rajaus

Työn tarkoituksena on tutkia erilaisia railonvalmistusmenetelmiä alumiinin hitsausta varten, sekä casena pohtia railonvalmistusmenetelmien soveltuvuutta robotisoituun MIG-hitsaukseen alumiinisessa veneenrungossa. Työssä pohditaan hitsauksen, sekä robotisoidun hitsauksen railonvalmistukseen soveltuvia leikkausmenetelmiä, railonvalmistusta yleisesti, toleransseja, alumiinin työstöominaisuuksia, sekä leikkausmenetelmien taloudellisuutta. Työssä käsitellään railovaatimuksia mm. MIG-, TIG-, plasma-, sekä laserhitsaukselle.

2 ALUMIININ TYÖSTÖOMINAISUUKSIA

2.1 Leikattavuus

Leikkaus voidaan jakaa karkeasti mekaaniseen ja termiseen leikkaukseen. Mekaanisessa leikkaamisessa leikattavuuteen vaikuttavat mekaaniset ominaisuudet kuten materiaalin kovuus, myötö- ja murtolujuus, sekä sitkeys. Joissain tapauksissa myös materiaalin muokkauslujittuminen voi olla huomioitava ominaisuus. Termisessä leikkauksessa taas täytyy huomioida materiaalin sulamis- ja palamislämpötila, sekä lämmönjohtavuus ja seosaineiden vaikutus. Leikkausmenetelmiin on perehdytty tarkemmin luvussa kolme. (Matilainen et al. 2011 s.142-143)

Alumiinin railonvalmistukseen soveltuvat leikkausprosessit:

- Plasmaleikkaus
- Laserleikkaus
- Vesisuihkuleikkaus
- Mekaaninen leikkaus

(SFS-EN 1011-4)

2.2 Hitsattavuus

Puhtaan alumiinin hitsattavuus on hyvä, mutta sitä kuitenkin käytetään harvoin puhtaana. Käyttökohteesta riippuen sen ominaisuuksia parannetaan seostamalla, esim. puhdas alumiini tunnetaan 1000-sarjassa, Cu-seosteiset 2000-sarjassa ja tämän työn casessa käytettävä merialumiini on magnesiumseosteista 5000-sarjaa. Suurin osa seostetuista alumiineista on hyvin hitsattavaa, mutta poikkeuksena 2000-sarjan alumiinit eivät ole erkautuskarkaistuna hitsattavia ja 4000-sarjan piiseosteiset alumiinit, jotka ovat tarkoitettu valettaviksi, ovat vain tyydyttävästi hitsattavia. Alumiiniseosten ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1.

Yleensä alumiinin hitsaamiseen käytettävät prosessit ovat pulssi-MIG, vaihtovirta-TIG, plasma ja laser. Alumiinin hitsaamiseen asettaa haasteita mm. sen pinnalle syntyvä oksidikalvo (n. 10 nm paksu), joka antaa alumiinille erinomaisen korroosionkestävyyden.

Puhtaan alumiinin sulamislämpötila on n. 660 °C, mutta pinnassa oleva alumiinioksidi sulaa vasta 2060 °C lämpötilassa, joten hitsauksen valmistelu edellyttää oksidikerroksen poistamista juuri ennen hitsausta. (Karhula 2009, mat-48) Oksidin mekaanisen poistamisen lisäksi kaarihitsauksessa voidaan hyödyntää ilmiötä nimeltä katodinen puhdistus. Kun käytetään tasavirtaa ja elektrodi on +navassa, työkappaleen pinnasta liikkuu elektroneja kohti hitsaussuuttimen elektrodi ja vastakkaiseen suuntaan ioneja, jotka pommittavat oksidikalvon hajalle. Oksidikalvon hajottua hitsauslisäaine pääsee virtaamaan kunnolla perusaineeseen. (Sarraf & Kovacevic 2010)

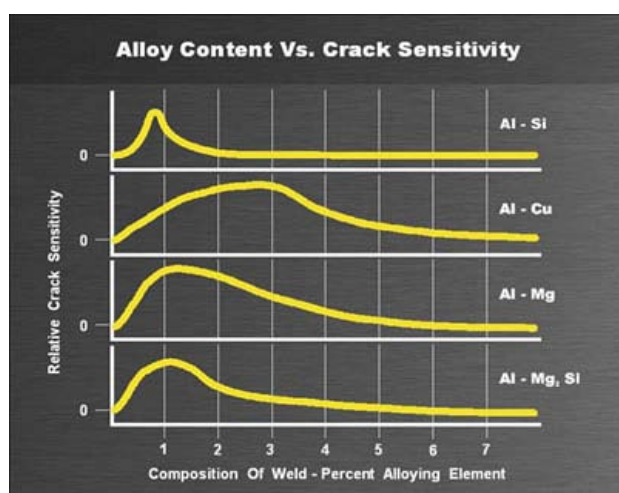
Taulukko 1. Alumiiniseosten ominaisuuksia (Mathers 2002, s.40-46)

Alumiinisarja	Pääseosaineet	Hitsattavuus	Muuta
1xxx	Al ~99.98%	Hyvä	Puhdas alumiini
2xxx	Al-Cu	Hyvä ennen erkautuskarkaisua	Lämpökäsiteltävä
3xxx	Al-Mn	Kohtalainen	Muokkauslujittuva
4xxx	Al-Si	Huono	Valettava alumiini
5xxx	Al-Mg	Erinomainen	"Merialumiini"
6xxx	Al-Mg-Si	Erinomainen	Pursotettava, lämpökäs.
7xxx	Al-Zn-Mg	Kohtalainen	Lämpökäsiteltävä

Lämpökäsiteltäviä laatuja 2xxx, 6xxx, 7xxx

Hitsausprosessin aikana perusaine kuumenee ja sulaa hitsausvirran tuottamasta lämmöstä, hitsiin tuotu lisäaine sekoittuu osittain perusaineeseen ja jäähtyessään perusaine, sekä lisäaine muodostavat liitoksen. Hitsi ei useinkaan ole mekaanisilta ominaisuuksiltaan yhtä hyvä kuin perusaine. Lisäksi hitsausprosessin aikana tuotu lämpö aiheuttaa perusmateriaalin karkenemistä ja lujuuden menetystä. Lämmöntuonti voi aiheuttaa hitsattavaan levyyn myös vetelyä, joka voi olla erityisen haitallista esim. robottihitsauksessa tai muissa tarkkuutta vaativissa kohteissa. Hitsin laatuun voidaan vaikuttaa oikeanlaisella lisäaineella ja hitsausarvojen optimoinnilla, sekä hitsin jälkikäsitteilyllä. Alumiinin kiderakenteen käyttäytyminen on myös hyvin erilaista kuin esim. teräksillä. Mikäli hitsi saadaan jähmettymään nopeasti, saadaan metallissa aikaan hienompi raekoko ja paremmat mekaaniset ominaisuudet. Tästä johtuen pienemmillä hitsipaloilla saadaan aikaan yleensä lujempia hitsejä. Kylmämuokatuissa perusaineissa hitsaus aiheuttaa aina lujuuden menetystä johtuen lämpövyöhykkeellä tapahtuvasta rekristalisaatiosta. (Mathers 2002, s.31-33)

Virheellinen hitsaus tai hitsausrailon valmistus voi johtaa kuumahalkeamaan. Kuumahalkeamat syntyvät hitsin jäähtyessä, esimerkiksi jos hitsausrailo on liian kapea suhteessa sen korkeuteen. Kuumahalkeamia voidaan välttää valitsemalla sopiva railo ja liitosmuoto, sekä varmistamalla perusaineen hitsattavuus ja siihen sopivan lisäaineen koostumus. Myös hitsausnopeudella on suuri merkitys: mitä suurempi nopeus, sitä nopeammin hitsi jäähtyy ja on siten vähemmän aikaa kuumahalkeamiin johtavalla lämpövyöhykkeellä. Kuumahalkeamaherkkyttä eri seosaineilla on havainnollistettu kuvassa 1, jossa on pystyakselilla suhteellinen herkkyys kuumahalkeamille ja vaakakselilla seosaineen määrä prosentteina. (ESAB 2010)



Kuva 1, Alumiinin kuumahalkeamaherkkyys eri seosaineiden määrillä. (ESAB 2010)

Eräs huomioitava seikka alumiinia hitsattaessa on hitsin huokoisuuden välttäminen. Mikäli hitsausrailoa valmistettaessa leikkauspintaan on jäänyt liian paksu oksidikerros, sitä ei välttämättä saada poistettua kokonaan katodisella puhdistuksella. Tästä voi seurata oksidisulkeumia hitsissä, mikä voi johtaa myöhemmin hitsin halkeamiseen. (Mathers 2002, s.202) Hitsausprosessin aikana hitsiin voi myös syntyä vetykuplia, joiden koko voi vaihdella mikrometreistä 3-4 millimetriin. Alumiinin seosaineista esim. magnesium (5000- ja 6000-sarjat) vähentää huokosten muodostumista, sillä se vähentää vedyn liukenemista hitsiin. Mikäli hitsattaessa huokoisuus muodostuu ongelmaksi, voidaan hitsiin tuoda lisää magnesiumia vielä hitsauslisälangassa. Piillä ja kuparilla taas tiedetään olevan päinvastainen vaikutus huokoisuuteen. Hitsauslämpötilalla ja hitsin jäähtymisen nopeudella, sekä hitsausasennolla on suuri merkitys huokosten syntymisessä. Yleensä suurempi hitsauslämpö aiheuttaa niitä enemmän, koska silloin vety liukenee hitsiin

nopeammin. Kuitenkin jalkoasennossa suurempi hitsauslämpö voi vähentää huokoisuutta jos kaasujen poistuminen hitsistä ylittää absorbtion – mikäli hitsi saadaan jäähtymään jalkoasennossa hitaasti, vedyllä on ns. aikaa poistua hitsistä. Hitsauksen lämpöön ja jäähtymiseen voidaan vaikuttaa hitsausvirran, kuljetusnopeuden ja hitsauskaasun avulla. Muita huomioitavia tekijöitä huokosten muodostumisessa ovat mm. mahdolliset epäpuhtaudet tai kosteus hitsauslisäaineessa ja hitsissä, sekä puutteellinen kaasusuoja. (Mathers 2002, s.18-20)

2.3 Lastuttavuus

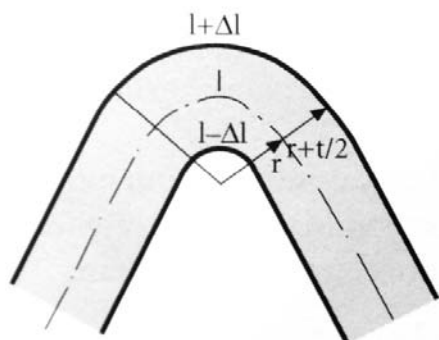
Yleisesti lastuttavuutta voidaan mitata mm. lastuamisen pinnanlaadulla, työkalun kestoiällä, materiaalin poistonopeudella ja tehontarpeella. Alumiinin seosaineilla voidaan säädellä lastuttavuutta jonkin verran. Esim. suuret magnesiumpitoisuudet nostavat alumiinin pinnankovuutta ja siten vaativat suurempaa lastuamisvoimaa. (V. Songmene et al. 2011 s.1)

Käytännössä kaikki seostetut alumiinit ovat hyvin lastuttavia. Joitakin poikkeuksia löytyy, mutta tarpeen tullen niitä voidaan korvata saman sarjan eri seoksella. Esim. AW6082-alumiinia on vaikeata automaattisorvata sille ominaisen pitkän lastunmuodostuksen takia. Se voidaan kuitenkin korvata esim. AW6012-laadulla jolla on huomattavasti lyhyempi lastunmuodostus, mutta se säilyttää sarjalle tyypilliset mekaaniset ominaisuudet. (Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit 2002, s.169)

Lastuttavana materiaalina alumiini on melko pehmeää, jolloin lastuamiseen tarvittava tehontarve ja lastuamisvoimat ovat pieniä. Puhdas alumiini ei kuitenkaan ole lastuamisominaisuuksiltaan yhtä hyvää kuin tavalliset seostetut, sillä se tarttuu helposti terään ja lastuaminen vaatii suurta lastuamisnopeutta ja työkaluun teräviä särmiä. Seostetuilla alumiineilla saadaan yleensä hyvä lastunhallinta, mikä on erittäin tärkeää lastuamisen lopputuloksen kannalta. Mikäli alumiinia työstettäessä lastunpituus kasvaa liian suureksi tai se hitsautuu terään kiinni, saattavat lastut vaurioittaa työstettävän kappaleen pintaa merkittävästi. Alumiinivaluja lastuttaessa hiekkasulkeumat voivat myös koitua ongelmaksi. (Sandvik Coromant, technical guide 2010, s.38)

2.4 Särmättävyys

Materiaalia taivutettaessa sen ulkoreuna venyy ja sisäreuna tyssääntyy. Mikäli taivutussäde (ks. kuva 2) on liian pieni, taivutettava kappale voi repeytyä tai siihen voi tulla pintavaurioita. (Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit. 2002 s.146)



Kuva 2. Särmättäessä levy venyy ulkoreunalta ja tyssääntyy sisäpuolelta. (Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit 2002, s.147)

Materiaalin taivutettavuutta kuvataan sen pienimmällä taivutussäteellä. Tärkeimmät siihen vaikuttavat tekijät ovat materiaalin lujuus ja raekoko, levyn paksuus ja muoto, taivutuskulman suuruus ja käytettävä taivutusmenetelmä. Levyjä taivutettaessa tulee myös ottaa huomioon valssaussuunta. (Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit. 2002 s.147-148)

Alumiinin taivutusta suunniteltaessa tulee myös huomioida materiaalin takaisinjousto. Pehmeimmillä alumiiniseoksilla se on kuitenkin hyvin vähäistä. Takaisinjoustokulma tulee laskea ja huomioida se taivuttaessa. Takaisinjoustoon vaikuttaa materiaalin ominaisuuksista myötöraja ($R_{p0,2}$) ja kimmomoduuli (E). Kappaleen ominaisuuksista vaikuttavat suunniteltu taivutussäde ja kappaleen paksuus. Takaisinjousto voidaan arvioida taulukoiduilla k -arvoilla. (Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit. 2002 s.148)

3 ALUMIININ LEIKKAUS

Tässä luvussa käsitellään alumiinin leikkausmenetelmiä, jotka on mainittu kohdassa ”2.1 Leikattavuus”. Alumiinia voidaan leikata useilla erilaisilla menetelmillä, mutta luvussa esitetyt menetelmät on rajattu niihin, jotka soveltuvat railonvalmistukseen.

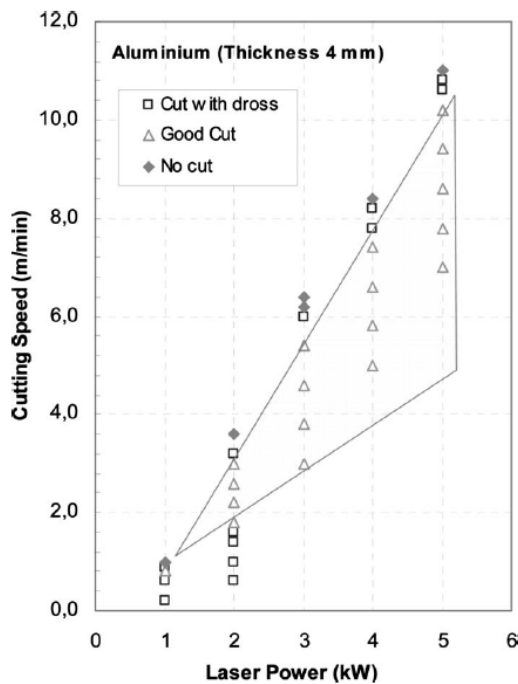
3.1 Terminen leikkaus

Tässä osiossa käsitellään alumiinin termistä leikkaamista laserilla ja plasmalla. Polttoleikkausta ei juurikaan käytetä alumiinin leikkaamisessa sen suuren lämmöntonin takia.

3.1.1 Laserleikkaus

Termi Laser tulee sanoista Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation. Lasersäde siis syntyy, kun esim. YAG-kiteessä olevaa Neodyyniä (Nd) stimuloidaan valokaarella tai lampulla. Neodyyniatomit vaihtavat energiatasoaan ja emittoivat fotoneja, jotka omaavat tietyn aallonpituuden ja suunnan. Fotonit (valoenergia) vahvistetaan ja suunnataan peileillä tai optisella kuidulla mahdollisimman pieneen pisteeseen, jolloin siihen saadaan aikaan suuri tehotiheys. (Chryssolouris 1991, s.19)

Laserleikkausta voidaan suorittaa joko polttamalla, sulattamalla tai höyrystämällä. Sulattavaa leikkausta varten käytetään yleensä jatkuva-aaltoista laseria (CW, continuous wave) ja höyrystävään leikkaukseen tarvitaan yleensä korkeatehoinen pulssilaser. Sulattavassa leikkauksessa tarvitaan apukaasu sulan poistamiseen leikkaurailosta. Alumiinia leikattaessa apukaasuksi soveltuvat parhaiten happi, typpi tai ilma. (Mathers 2002, s. 58-60) Leikkauksessa käytettävällä kaasulla on myös suuri vaikutus leikkauksen tehokkuuteen. Happi on tehokkain kaasu leikkausnopeuden kannalta, mutta voi aiheuttaa laserleikkauksilaitteen ylikuumentumista. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää esim. heliumia tai ilmaa, mutta leikkausnopeus on tällöin n. 75% hapen leikkausnopeudesta. Tärkeämpi leikkauksen nopeuteen vaikuttava tekijä on kuitenkin käytettävä laserteho. Kuvassa 3 on havainnollistettu diodilaserin leikkauksen nopeutta lasertehon funktiona AW5754-alumiinille. (Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit, s.206)



Kuva 3. Leikkausnopeus-laserteho –kuvaaja 4 mm paksulle AW5754 -alumiinille, jossa esitetty myös leikkauksjäljen laatu. Kolmion sisällä olevilla parametreilla on saavutettu hyvälaatuinen ja purseeton leikkauksjälki. Kyseessä kuitulaser. (Wandera 2010, s.157)

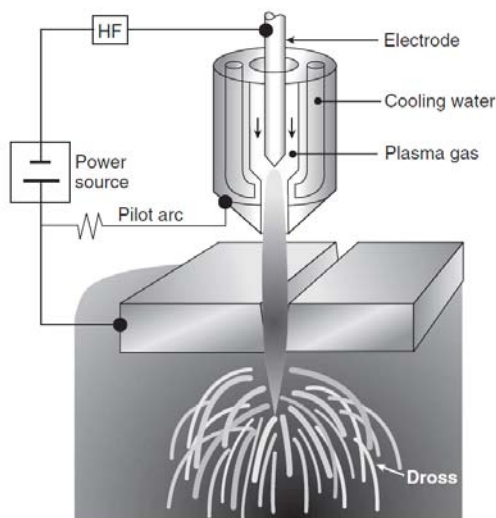
Suurimpia etuja laserleikkauksessa on sen suhteellisen pieni lämmöntuonti, mikä vähentää leikattavan kappaleen muodonmuutoksia. Leikkauksjälki on myös hyvin tarkkaa, sekä leikkaus on nopeaa, mutta jos leikattava materiaali on liian paksua, leikkauksen tehokkuus ja tarkkuus laskee merkittävästi. Yleisesti alumiinin paksuuden yläraja laserleikkauksessa on 6-10 mm. Paksummilla materiaaleilla leikkauksen epätarkkuus johtuu lasersäteen kohdistuksesta; yleensä lasersäteen polttopiste on kohdistettu materiaalin pintaan ja säde ei ole materiaalin alareunaan tunkeutuessaan enää niin tarkka. Tätä voidaan korjata kohdistamalla sädettä materiaalin sisään, mutta laserilla leikattavien paksujen materiaalien tarkkuus on selkeästi heikompi. (Chryssolouris 1991, s53-54).

Ongelmaksi alumiinin laserleikkauksessa voi aiheutua alumiinin pinnan heijastavuus. Tämän välttämiseksi kannattaa yleensä valita laserprosessi, jolla on optimaalinen aallonpituus. Yleisesti alumiinin laserleikkaukseen soveltuvat CO₂-, Nd:YAG- sekä kuitulaser. CO₂-laseria käytettäessä tulee kuitenkin huomioida, että sen aallonpituuden (10.6 μm) ollessa noin kymmenkertainen verrattuna Nd:YAG-laseriin, heijastaminen voi koitua ongelmaksi. (A. Stournaras et al. 2009. s.62)

CO₂-laserilla absorptio alumiiniin on heikompaa, mutta se pystytään usein sivuuttamaan lasertyypille ominaisten suurien tehojen (~1-10kW) ansiosta. Tärkeimmät laserleikkauksessa säädettävät parametrit ovat tarvittava laserteho, leikkausnopeus, kaasun paine ja virtausnopeus, sekä lasersäteen pulssin taajuus. Tavallisesti pyritään minimoimaan lämmöntuontia kappaleeseen suurella leikkausnopeudella ja pienellä laserteholla. Oikeanlaisilla leikkausparametreilla vältetään myös leikkaamista vaikeuttavan plasman muodostuminen leikkaurailon yläpuolelle. (A. Stournaras et al. 2009, s.62)

3.1.2 Plasmaleikkaus

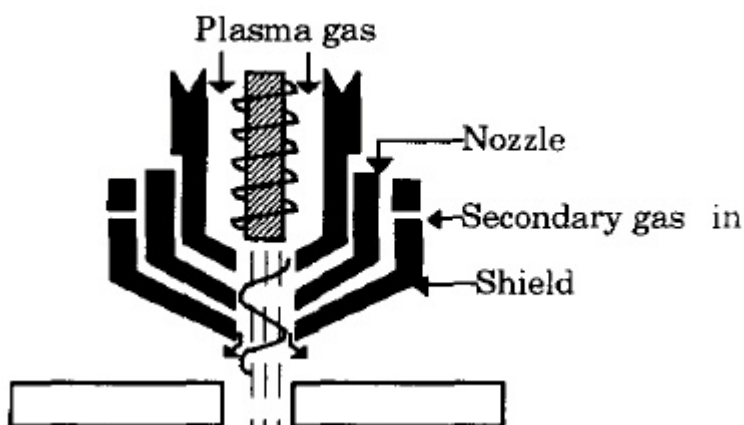
Plasmaleikkaus on terminen leikkausmenetelmä, jossa lämpö tuodaan valokaaren lämmittämästä plasmakaasusta. Kaasu muodostaa kuumentuessaan plasmaliekkin, joka sulattaa leikattavan metallin ja puhaltaa sen pois. Valokaari plasmaleikkauksessa palaa elektrodin ja työkappaleen (plasmakaari) tai elektrodin ja plasmasuuttimen (plasmasuihku) välillä. Plasmasuihkua voidaan käyttää sähköä johtamattomille materiaaleille, sillä kun valokaari palaa elektrodin ja suuttimen välillä, ei ole tarpeellista maadoittaa työkappaletta. Plasmakaasu ei yleensä riitä suojaamaan leikkausprosessia ympäröivältä ilmalta, joten yleensä on tarpeellista käyttää suojakaasua. Laitteiston periaate esitetty kuvassa 4. (Lukkari 2002, s.272)



Kuva 4. Plasmaleikkaukselaitteisto (Mathers, 2002 s.53)

Plasmaleikkausprosessin parantamiseen on kehitetty useita erilaisia menetelmiä. Hienosädeplasma on prosessivariaatio, jossa plasmakaarta voidaan supistaa kierteyttämällä

plasmakaasua sen lähestyessä plasmasuutinta ja lisäämällä suuttimeen ylimääräinen plasmakaasusuihku (ks. kuva 5). Plasmakaarta voidaan myös stabiloida erillisen käänin aiheuttamalla magneettikentällä. Menetelmän leikkausjäljen tarkkuus on perinteisen plasmaleikkauksen ja laserleikkauksen välimaastossa, sekä leikkaurailo ja HAZ-vyöhyke ovat pienemmät. Hienosädeplasmassa kuitenkin levynpaksuus rajoittuu noin kuuteen millimetriin ja leikkauksenopeus on hieman hitaampi kuin perinteisessä plasmaleikkauksessa. (WTIA 2006, s.3-4)



Kuva 5. Hienosädeplasmasuutin. (Hoult et al. 2000)

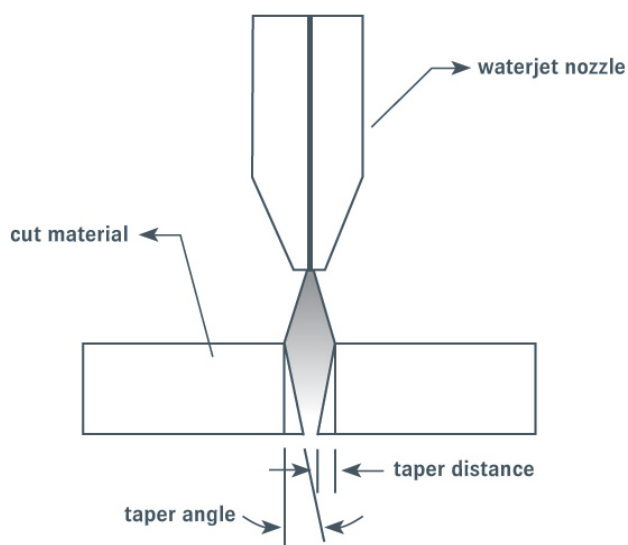
Plasmakaarta voidaan myös kuristaa kohdistamalla siihen vesisuihku. Tällä saadaan aikaan laadukkaampi leikkausjälki, suurempi leikkauksenopeus, sekä pidempi suuttimen käyttöikä. Plasmaleikkausta voidaan myös suorittaa lisäämällä vesisuihku leikattavan materiaalin viereen, tai suorittamalla plasmaleikkaus 50-75 mm vedenpinnan alapuolella erillisessä vesialtaassa. Näin saavutetaan merkittävä leikkaushöyryjen sekä leikkauksesta aiheutuvan melun väheneminen. Kun plasmaleikkauksesta tyypillisesti aiheutuva melu on n. 100 dB luokkaa, saadaan vesisuihkulla vähennettyä melua 96 dB:iin ja altaassa leikkaamalla jopa 52-85 dB:iin. (WTIA 2006, s.4)

3.2 Vesisuihkuleikkaus

Vesisuihkuleikkauksessa materiaalia leikataan kohdistamalla pienelle alueelle hyvin suurella paineella ja virtausnopeudella vettä, johon on lisätty sekaan abrasiivista jauhetta. Leikattava materiaali siis ”kuluu” pois eroosion avulla leikkaurailossa. Leikkausprosessin suurimpia etuja ovat olematon lämmöntuonti kappaleeseen, sekä mahdollisuus leikata

paksujakin materiaaleja, yli 300 mm paksuuteen asti. Leikattujen kappaleiden tarkkuus on myös erittäin hyvä. (Mathers 2002, s.63-64) Esim. 5 mm paksulla levyllä leikkausnopeus voi olla 400 mm/min luokkaa, mutta 50 mm paksulla levyllä leikkausnopeus hidastuu 30 mm/min:iin. (Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit, s.207) Vesisuihkuleikkauksessa käytettäviä abrasiiveja ovat mm. granaatti, kvartsihiekkä, oliviini, alumiinioksidi, piikarbidi, teräshiekka ja lasikuulat. (Matilainen et al. 2010, s.195)

Vesisuihkuleikkauksen jälki ei ole täysin suora, vaan jälki on hieman kartiomainen, kuten kuvassa 6 on esitetty. Leikkausnopeuteen vaikuttaa mm. kappaleen paksuus, materiaali ja geometria. Mikäli joudutaan leikkaamaan monimutkaisempia muotoja tai kulmia, leikkausnopeus hidastuu huomattavasti. Leikkauksen reunan laatu on suoraan yhteydessä leikkausnopeuteen. Hitaammalla leikkauksella saadaan tarkempi reuna ja siten voidaan vähentää leikkauksen jäljen kartiomaisuutta. (Waterjets.org 2011)



Kuva 6. Vesisuihkuleikkauksen kartiomainen geometria (Millay 2010)

3.3 Mekaaninen leikkaus

Alumiinia voidaan leikata eri käyttötarkoituksiin mekaanisesti useilla erilaisilla sahoilla ja suuntaisleikkureilla, mutta railonvalmistustarkoituksiin jyrsintä on käyttökelpoisin.

3.3.1 Tappijyrsintä

Alumiini on hyvin jyrsittävässä, kunhan valitsee oikeanlaisen terän ja lastuamisarvot. Terämateriaaliksi sopivat hyvin pinnoittamattomat kovametallit ja mikäli Si-pitoisuus on yli 7-8 %, suositellaan käytettäväksi timanttisia teriä (PCD). Kun käytetään suurempia lastuamisnopeuksia ja riittävän pientä syöttöä, saadaan usein aikaan parempaa pinnanlaatua kuluttamatta teriä enempää. Hyvän pinnankarheuden varmistamiseksi ja että voidaan estää lastujen tarttuminen terään, tulee lastuamisnestettä käyttää aina. Lastunpaksuudeksi suositellaan 0,10-0,20 mm. Liian pieni lastunpaksuus saattaa aiheuttaa irtosärmän muodostumista. Liian pitkien lastujen muodostuminen voidaan estää varmistamalla sopivat syöttö- ja lastuamisnopeuden arvot, sekä valitsemalla jyrtimeen terävasärmäinen ja positiivinen terägeometria. (Sandvik Coromant 2010, Technical guide)

4 LEIKKAUSMENETELMIEN SOVELTUVUUS RAILONVALMISTUKSEEN

”Jotta vältetään haitalliset vaikutukset hitsauksen laatuun, railopintojen laatu pitää olla yhteensopiva käytettävän hitsausprosessin kanssa. Pinnoissa ja reunoissa ei saa olla halkeamia tai koloja ja ne pitää olla kuivat ja puhtaat liiallisesta oksidista, öljystä, rasvasta, maalista yms.” (SFS-EN 1011-4)

Railonvalmistusmenetelmää valitessa tulee ensimmäisenä pohtia millä menetelmillä haluttu railo pystytään valmistamaan. Esim. laserilla voi olla hankala tehdä viistettyjä railoja tai pyöreitä muotoja kuten U- tai J-railoissa. Yleensä pyöreitä railomuotoja ei tehdä muuten kuin mekaanisesti, mutta se on mahdollista myös plasmaleikkaamalla. Myös leikattavan levyn paksuus tai materiaali voi rajoittaa joitakin leikkausmenetelmiä pois. Hitsattua rakennetta suunnitellessa kannattaa myös miettiä tarkkaan millä leikkausprosessilla saadaan metallurgisesti ja mittatarkkuudeltaan riittävän laadukas railopinta. Taulukossa 2 on esitetty eri leikkausmenetelmien ominaisuuksia. (Grönlund 1990, s.39-40)

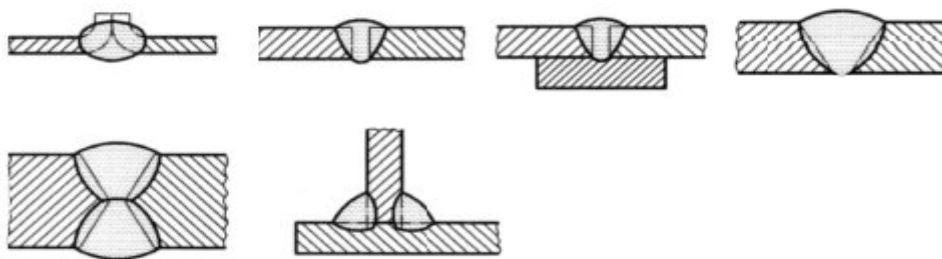
Taulukko 2. Leikkausmenetelmien ominaisuuksia (Grönlund 1990, s.40. Muokattu)

	Plasmaleikkaus	Laserleikkaus	Jyrsintä	Vesisuihk.
Viisteytys	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Max levynpaks. (mm)	100	6-10	-	300
Leikkausnopeus:				
Viisteitys	400-500	-	300-900	?
Leikkaus (mm/min)	3500-4500 (t=5) 1200-1400 (t=20)	6000-15000	-	~400 (t=5) 30 (t=50)
Pinnan ulkonäkö	Hyvä, mahd. kuonaa	Hyvä	Erittäin hyvä	Hyvä
Lämpövaikutus	Suuri	Pieni	Pieni	Ei ole

t = aineenpaksuus

4.1 Alumiinin hitsauksessa vaadittavat railot, tarkkuudet ja toleranssit

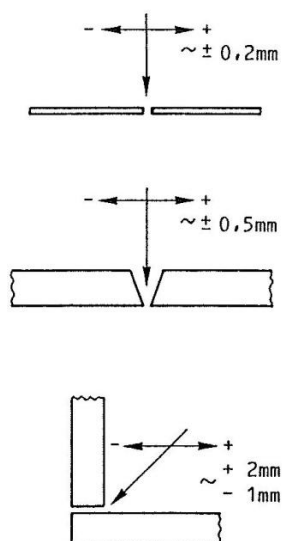
MIG- ja TIG-hitsauksen vaatimia railomuotoja on esitetty tarkemmin standardissa SFS EN ISO 9692-3. 2 mm paksuille ohutlevyille suositellaan laippaliitosta ilman ilmarakoa, 4 mm paksuuteen asti I-railoa ja sitä paksummille levyille V- tai Y-railoa, juurituen kanssa tai ilman. Myös erikoisempien railomuotojen, kuten X- ja K-railojen käyttö on mahdollista, tapauksesta riippuen. V-railoille suositellaan 60°-90° ja osaviistetyille yli 50° railokulmia. Yleinen nyrkkisääntö viistettyihin railoihin on, että railon tulee olla leveämpi kuin railon syvyys. Pienaliitoksiin suositellaan 2 mm ilmarakoa, riippumatta aineenpaksuudesta. Liitosmuotoja on esitetty kuvassa 7. (SFS-EN ISO 9692-3) MIG- ja TIG-käsinhitsauksessa railon mittatarkkuudelle ei ole erikseen määritelty kovin tarkkoja toleransseja. Standardissa SFS-EN ISO 13920 on määritelty hitsattavien kappaleiden nimellismitoille toleransseja, mutta käsinhitsauksessa railon tarkkuusvaatimus ei ole läheskään niin suuri kuin robotisoidussa hitsauksessa. (SFS-EN ISO 13920)



Kuva 7. Yleisimpiä liitosmuotoja MIG- ja TIG-hitsauksessa. Vasemmalta oikealle laippaliitos, I-railo, I-railo juurituella, V-railo, alhaalla X-railo ja pienaliitos. (SFS-EN ISO 9692-3)

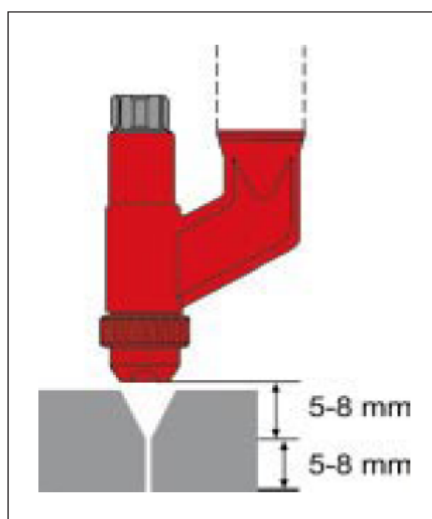
Kuten johdannossa on mainittu, robottihitsaus asettaa railonvalmistukselle tarkempia vaatimuksia kuin käsinhitsaus. Ensimmäinen vaihteleva tekijä, joka kannattaa ottaa huomioon robotisoidun hitsauksen railotoleransseissa, on käytettävän hitsausrobotin rata- ja toistotarkkuus. Nykyisin ratatarkkuutta pidetään tärkeämpänä tekijänä robotisoidussa hitsauksessa, koska toistotarkkuus on nykyään yleensä aina riittävä. Toistotarkkuudelle n. 0.1 mm on yleinen arvo. (Koukkunen 2010, s.31)

Robotisoidussa MIG-hitsauksessa suositellaan käytettäväksi piena- ja päällekkäisliitoksia, sillä niiden tarkkuusvaatimus voi olla jopa viisi kertaa väljempi kuin päittäisliitoksissa. Kuvassa 8 on esitetty railotoleransseja 2-10 mm paksuille päittäisliitoksille ja pienahitsille. Mikäli kuitenkin halutaan tehdä päittäisliitoksia, kannattaa toleranssien takia käyttää V-railoa I-railon sijaan. Yleensä tulisi käyttää alle 1mm ilmarakoa, jotta saavutetaan riittävän laadukas hitsi. (Koukkunen 2010, s.31) Samaan tutkimusprojektiin liittyvässä Asko Salmisen diplomityössä on tehty hitsausrobotilla piena- ja päällekkäishitseille rakokokeet. Näissä tultiin siihen tulokseen, että pienahitseillä liittymä huononee ilmaraon kasvaessa 1 mm tienoille, sekä päällekkäishitsillä jo selvästi alle 1 mm raolla. (Salminen 2010)



Kuva 8. Railotoleransseja robotisoidussa MIG-hitsauksessa (Koukkunen 2010, s.31)

Kun hitsataan alumiinia plasmalla, käytetään yleisesti I-railoa 5-8 mm aineenpaksuuteen asti. Y-railoa tulee käyttää 10-16 mm paksuille levyille, kuten kuvassa 9 esitetään. Plasmahitsaus kuitenkin rajoittuu jalkoasentoon (PA), vaaka-asentoon (PC) ja pystyasentoon (PF). Plasmahitsauksen railonvalmistukseen vaadittavia toleransseja on esitetty taulukossa 3. (Lahti et al. 1999, s.26-27)



Kuva 9. Y-railo plasmahitsaukseen. (Lahti et al. 1999 s.1)

Taulukko 3. Plasmahitsauksessa vaadittavat railotoleranssit. Suuremmatkin ilmaraoit ovat joissain tapauksissa sallittuja, mikäli käytetään lisäainelankaa. (Lahti et al. 1999, s.2)

Menetelmä	Mat. Paksuus (mm)	Sallittu virhe (mm)	Ilmarako (mm)
Sulattava	1.0-2.5	0.2-0.4	0.5-1.0
Keyhole	2.5-4.0	0.4-1.0	1.0-1.5
Keyhole	>4.0	1.0-1.5	1.5-1.5

Laserhitsauksessa tarvitaan hyvin tarkat railopinnat, jotta levyt saadaan hitsautumaan kunnolla. Päittäisliitoksessa pinnankarheus (Ra) tulee olla 12.5 – 25 μm , sekä ilmarako saa vaihdella 2-10 mm paksuilla levyillä 0.1-0.3 mm. T-liitoksissa ilmarakojen toleranssi on samaa luokkaa. Yleensä laserhitsattavat pinnat viimeistellään koneistamalla tai suoraan laser- tai vesisuihkuleikkaamalla. Mikäli railopinta pääsee hapettumaan, oksidi täytyy poistaa esim. teräsharjalla tai hiekkapuhaltamalla. Railopintoja ei saa virsteyttää, koska tavallinen laserhitsaus on lisäaineeton prosessi. Laserhybridihitsauksessa saadaan toisaalta käyttöön viistettyjä railomuotoja ja railopinnan mittatarkkuus ei ole niin vaativa. Päittäisliitoksissa on suurimmat tarkkuusvaatimukset, mutta niitä voidaan pyrkiä korvaamaan esim. limiiliitoksilla. (A. Salminen, Sädetyöstö s. 74-82)

4.2 Menetelmillä saavutettavat tarkkuudet

Leikkausmenetelmällä saavutettavalla tarkkuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä lähinnä leikatun pinnan pinnankarkeutta. Osiossa 4.3 on käsitelty muita leikatun pinnan ominaisuuksia.

4.2.1 Vesisuihkuleikkaus

Pienemmillä levyillä päästään yleensä laitteistosta ja abrasiivisesta jauheesta riippuen +/- 0.025 mm leikkaustarkkuuteen. Paksummilla materiaaleilla tarkkuus on hieman huonompi, n. +/- 0.075-0.125 mm. Taulukossa 4 on erään valmistajan ilmoittamia tarkkuuksia vesisuihkuleikkaukselle. Taulukossa ilmoitettujen laatu- ja 3 leikkausjälkiä on esitetty kuvassa 10.

Taulukko 4. Vesisuihkuleikkauksen tarkkuus. *Laatu 5 = paras mahdollinen, laatu 3 = normaali laatu. Taulukon arvot on muunnettu tuumista millimetreihin.(Accustream 2010)

Mat. Paksuus (mm)	Reunan tarkkuus (+ / - mm)		Alareunan poikkeama (mm)	
	Laatu = 5	Laatu = 3	Laatu = 5	Laatu = 3
3.05	0.0762	0.1270	0.0508	0.1270
6.35	0.1270	0.2540	0.0889	0.1905
12.70	0.1778	0.1270	0.0762	0.2540
19.05	0.2540	0.5080	0.0889	0.3048
25.4	0.3810	0.7620	0.1016	0.3556
38.10	0.5080	1.0160	0.1524	0.4064
50.80	0.6350	1.1430	0.2032	0.4572
76.20	0.7620	1.2700	0.2540	0.5080
101.6	0.8890	1.3970	0.3048	0.5080



Kuva 10. Taulukkoon 4 liittyvät leikkausjäljet. Vasemmalla laatu 5, oikealla laatu 3 (Accustream waterjet products)

4.2.2 Laserleikkaus

Taulukossa 5 on esitetty tuloksia 2 mm paksun merialumiinin CO₂-laserleikkauksesta. Kokeessa on käytetty apukaasuna tyypä ja 127 mm linssiä, jolla saatu n. 0.15 mm leveä lasersäde. Alla olevassa taulukossa 6 on esitetty leikkausparametreja, joilla tulokset on saatu. Tutkimuksen mukaan railon leveyteen vaikuttaa eniten leikkausnopeus, sekä leikkauspinnan tarkkuuteen ja HAZ -vyöhykkeeseen laserteho. (A. Stournaras et al. 2009. s.63)

Taulukko 5. 2mm paksun AW5083-alumiinin CO₂-laserleikkauksen koetuloksia (A. Stournaras et al. 2009. s.63)

Koe	Railon leveys (µm)	Leikkauspinnan karkeus (µm)	HAZ (µm)
1	207.80	2.28	119.44
2	182.40	2.54	116.66
3	172.80	3.42	75.00
4	194.50	2.30	263.88
5	190.00	1.35	180.55
6	176.00	1.60	175.00
7	202.60	1.23	333.33
8	188.80	0.90	250.00
9	192.00	1.74	166.66

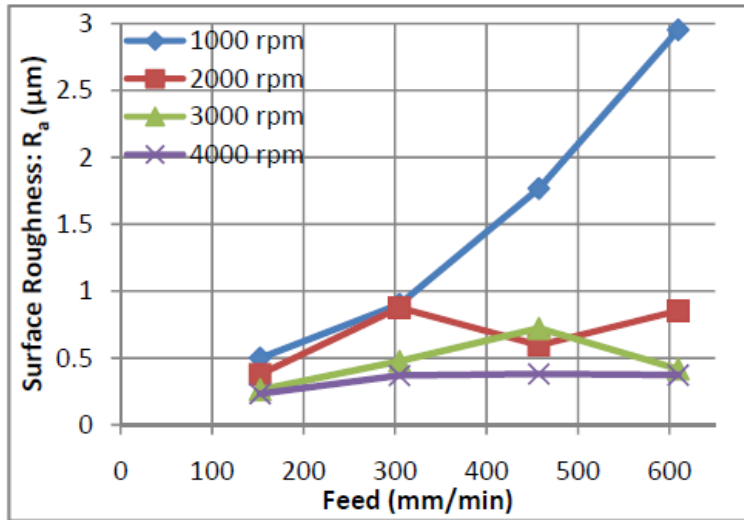
Taulukko 6. Samaan CO₂-laserleikkaukseen liittyviä parametreja (A. Stournaras et al. 2009. s.63)

Koe	Parametrit			
	Teho (W)	Leikkausnopeus (m/min)	Pulssin taajuus (Hz)	Kaasun paine (bar)
1	1500	2	8.000	10
2	1500	3	9.000	12
3	1500	4	10.000	14
4	1650	2	9.000	14
5	1650	3	10.000	10
6	1650	4	8.000	12
7	1800	2	10.000	12
8	1800	3	8.000	14
9	1800	4	9.000	10

4.2.3 Jyrsintä

Railonvalmistuksessa jyrsintä on yleensä menetelmä, jolla viimeistellään levyaihion reuna hitsausta varten tai muuten parannetaan liian huonoa leikkausjälkeä, poistetaan epätasaisuuksia, jäystettä tai pinnan huokosia ja halkeamia. Oikeilla työstäarvoilla ja työkaluilla saadaan käytännössä aina riittävän hyvä railopinta. Jyrsinnän käytön kannattavuudessa onkin ehkä kyse enemmän ylimääräisen käsittelyn taloudellisuudesta kuin tarkkuudesta. Kuvassa 11 on esitetty eräälle alumiinille tehdyn jyrsintäkokeen pinnankarheuksia eri työstäarvoilla. Voidaan havaita että ratkaisevia työstäarvoja ovat

lastuamisnopeus ja syöttö. Taulukossa 7 on esitetty jyrsimällä tavoiteltavia railotoleransseja. (Mathers 2002, s.64-65)



Kuva 11. Jyrsimen syötön ja kierrosluvun vaikutus pinnankarkeuteen. Kokeet tehty 6061-alumiinille otsajyrsimellä. (Kuttolamadam et al. 2010, s.14)

Taulukko 7. Jyrsimällä valmistettavien levyjen leikkaus- ja railotoleransseja (Grönlund 1990, s. 49)

Levyn paksuus	DIN 1543/SFS 2142
Levyn leveys	+/- 0,5mm
Levyn pituus	+/- 1,0mm
Pituus (yli 10m)	+/- 0,01%
Ristimittaero	maks. 2,0mm
Viistekulma	+/- 1,5°
Juuripinnan korkeus	+/- 1,0mm
Juuripinnan asema	+/- 0,5mm
Sivun suoruus	+/- 0,5mm / 19,5m
Yhdensuuntaisuus	+/- 0,5mm / 19,5m

4.2.4 Plasmaleikkaus

Perinteisellä plasmaleikkauksella saavutettava railonleveys riippuu suuresti leikattavan materiaalin paksuudesta, mutta se on tyypillisesti 2 mm luokkaa. Leikkaustarkkuus on noin +/- 0,5 – 1.0 mm. Lämpövyöhykkeen leveys on tyypillisesti 0.2 – 0.3 mm. Mikäli plasmalla leikataan liian paksuja levyjä, pinnat vaativat yleensä viimeistelyä jyrsimellä. Hienosädeplasmalla tyypillinen leikkauspinnan tarkkuus on 0,3 mm ja railon leveys 1 mm.

4.3 Leikkausjäljen virheet ja laatu

Leikkauspinnan laatu määritetään usein pinnan tasaisuudella ja materiaalin mikrorakenteen laadulla. Mahdollisia leikkausjäljen virheitä voivat olla esim. halkeamat, huokokset ja leikkausrailon alareunaan muodostunut purse.

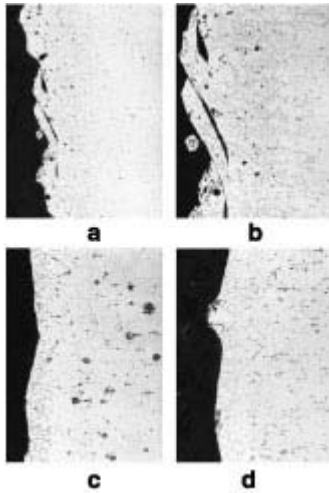
4.3.1 Vesisuihkuleikkaus

Vesisuihkuleikkauksen jälki on oikeilla parametreilla lähes aina erinomaista. Pinta on aina lähes purseeton, vain poikkeustapauksissa tarvitaan jälkityöstöä. Paksumpien materiaalien leikkauspinoille tulee vesisuihkun jättämä ja pinnan epätasaisuus tulee vesisuihkun urista. (Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit, s.207)

4.3.2 Plasmaleikkaus

Perinteisellä plasmaprosessilla leikatun levyn reunaan muodostuu helposti jäystettä ja leikkauspinta on hieman kartiomainen. Kuitenkin hienosädeplasmalla saadaan huomattavasti laadukkaampi leikkausjälki, jonka laatu lähenee laserleikkausta. (Koukkunen 2010, s.32) Leikkauksen jälki voi vaihdella paljonkin riippuen käytettävästä plasmaprosessista, sekä leikkaus- ja suojakaasuista. Leikatun reunan tarkkuutta arvioidaan reunan karkeudella, muodostuneella oksidikerroksella, halkeamilla ja pinnan huokoisuudella. Oikeanlaisen kaasun valinnalla on suuri vaikutus leikkauspinnan laatuun. Kuvissa 12 ja 13 on esitetty leikatun 6061-alumiinin ulkonäköä ja mikrorakennetta eri kaasuilla ja leikkausvirroilla. (Hackett 2001) Leikatessa vedyllä yleisiä vikoja alumiinin plasmaleikkauksessa aiheuttaa liian suuri tai liian pieni kaasun määrä. Liian suuri

vetykaasun syöttö voi aiheuttaa leikkauspinnan vinoutta, kun taas liian pieni vetykaasun määrä voi jättää leikkausrailon yläreunan liian karkeaksi. Liian suuri leikkausnopeus voi aiheuttaa levyn yläreunaan parran muodostumista. Liian hidas leikkausnopeus taas aiheuttaa levyn yläreunaan syvennyksiä. (Matilainen et al. 2010, s.155)



- a) Plasmakaasuna ilma, suojakaasuna metaani, 70A
- b) Sama lähempää
- c) Plasmakaasuna ilma
- d) Plasmakaasuna argon-vety

Kuva 12. Suurennettuja kuvia plasmaleikatun 6061-alumiinin pinnasta. Levyn paksuus 6.3 mm. (Hackett 2001)



1# - Plasmakaasu H35 (argon-vety-tyyppi), suojakaasuna typpi. Leikkausvirta 200A

2# - Plasmakaasuna ilma, suojakaasuna ilma-metaani (CH₄). Leikkausvirta 70A

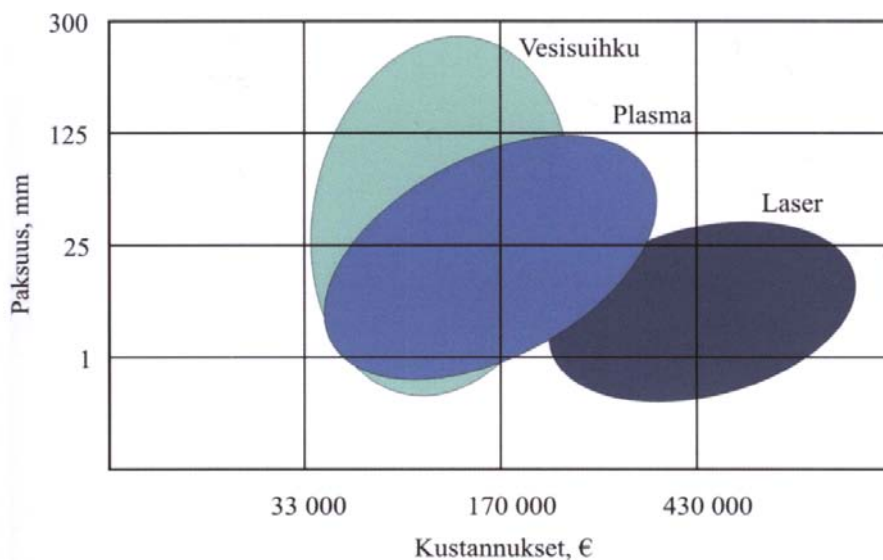
3# - Plasmakaasuna typpi, vesisuojaattu. Leikkausvirta 400A

4# - Plasma- ja suojakaasuna ilma. Leikkausvirta 100A

Kuva 13. Plasmaleikkauksen leikkausjälkiä vertailtuna erilaisilla kaasuilla ja virroilla 6061-alumiinille. (Hackett 2001)

5 LEIKKAUSMENETELMIEN TALOUDELLINEN VERTAILU

Leikkausmenetelmiä vertaillessa on huomioitu laitteiston kertainvestoinnit, jatkuvia kuluja aiheuttavat tekijät sekä prosessien leikkausnopeus. Railonvalmistuksessa on myös merkitystä hitsauksessa aiheutuviin kuluihin. Eniten kustannuksia aiheuttava tekijä hitsauksessa on kuluvan hitsiaineen määrä, joten railon leveydellä ja railokulmilla pystytään valmistuksessa vaikuttamaan siihenkin. (Grönlund 1990, s.5)



Kuva 14. Leikkausmenetelmien hintavertailua materiaalin paksuuden mukaan (Matilainen et al. 2010, s. 205)

Koneistamisessa huomioitaviin kustannuksiin lasketaan yleensä laitteiston hinnan ja huollon lisäksi työkalujen kestoikä, laitteen kuluttama energia, lastuamismesteen kulutus, sekä lastujen kierrätys/poistaminen. (www.custompart.net 2011)

Laserleikkauslaitteisto vaatii huomattavan kertainvestoinnin ja sen kannattavuus vaatii jatkuvaa käyttöä. Lisäksi jatkuvia kustannuksia aiheuttavat esim. leikkaus- ja suojakaasut (ks. taulukko 8), suuttimet ja suodattimet. Työaseman investointi on yleensä 70 000-200 000€ ja jatkuva energiankulutus esim. CO₂-lasereilla 1.5–40 kW. (Matilainen et al. 2010, s.206)

Taulukko 8. kaasujen kulutus CO2-laserissa (Matilainen et al. 2010, s.206)

Laserkaasut:	Leikkauskaasut:
He 44-190 l/h	O ₂ , N ₂ 500-2000 l/h
N ₂ 12-65 l/h	
CO ₂ 2-10 l/h	

Plasmaleikkaukslaitteiston työasema vaatii yleensä alle 50 000 € kertakustannuksen. Automaattinen kappaleenkäsittely voi kuitenkin nostaa työaseman hintaa n. 80 000 €asti. Jatkuvia kustannuksia aiheuttavat suuttimien ja elektrodien vaihto, sekä plasmakaasujen kulutus. Energiankulutus plasmaleikkauksessa on n. 55 kW luokkaa. (Matilainen et al. 2010, s.202)

Vesisuihkuleikkaus ei ole erityisen tehokas leikkausprosessi taloudellisesti, kun tarkastellaan pelkästään leikkausvaihetta, mutta kun huomioidaan kappaleen koko valmistusketju se voi olla hyvinkin järkevä ratkaisu. Vesisuihkuleikattu kappale tarvitsee hyvin harvoin jälkityöstöä ja sillä on mahdollista leikata hankalampiakin muotoja. Vesisuihkuleikkaus on myös materiaalien suhteen erittäin joustava menetelmä. Sillä pystytään leikkaamaan myös ei-metallisia aineita ja pinnoitettuja materiaaleja niin, ettei pinnoite vaurioidu. Laitteistolla, jossa on usea leikkauspää ja automaattinen suuttimen kunnonvalvonta maksaa noin 10 000-50 000€ (Matilainen et al. 2010, s.204-208)

Vesisuihkuleikkauksessa huomioitavia jatkuvia kustannuksia ovat:

- Abrasiivisen jauheen käyttö n. 36 kg/min
- Laitteiston energiakustannukset 22-35 kW
- Vesi n. 10 l/h
- Suuttimien käyttöikä vaihtelee n. 40-100 h välillä
- Leikkausjätteen hävittäminen

(Matilainen et al. 2010, s.204-208)

6 CASE: ALUMIINIVENEEN RUNKO

Tässä osiossa tutkitaan 5000-sarjan alumiinista valmistettavan veneenrunkon railonvalmistusta robotisoitavan MIG-hitsauksen kannalta. Yleensä kohteessa käytettävä alumiinilaatu on AW5754 tai AW5083. 5000-sarjan alumiinit on seostettu pääasiassa magnesiumilla, joka korostaa niiden hitsattavuutta ja korroosionkestoa. Niitä ei kuitenkaan voida erkautuskarkaista. Lisäksi rungossa on käytetty 6060-alumiinista tehtyjä pursoteprofiileja.

Veneenrunkon (ks. kuva 15) liitosmuodot ovat enimmäkseen pienahitsejä, pisimmät viisi metriä ja lyhimmät 50 mm. Rungon kölissä on viisi metriä pitkä, molemmilta puolin hitsattu nurkkahitsi, sekä veneen peräpeili on hitsattu nurkkaliitoksena. Rungon pohja koostuu kahdesta levystä ja reunoilla ponttonilevyt kiinnittyvät pohjalevyyn välissä olevan pursoteprofiilin avulla pienahitsillä. Keskimmäisten runkolevyjen paksuus on 4 mm ja reunimmaisten 2 mm. Keskimmäisiin runkolevyihin tulee yhteensä kuusi U-profiilia, jotka hitsataan pienahitsinä runkolevyihin kiinni. Pitkien U-profiilien päälle tulee poikittain kaaren muotoiset jäykisteet jotka hitsataan pienahitsinä. Levyjen ulkopintaan hitsataan L-profiileja kuusi kappaletta, suoraan toisella puolella olevien U-profiilien kohdalle. Rungon hitsejä on esitetty kuvissa 16-19 sivulla 28.



Kuva 15. Silver Hawk –veneen runko. (www.silverboats.fi 2011)

Rungon nykyisellä rakenteella pystytään hitsaamaan robotilla kölin ulkopuolinen hitsi, pohjalevyn pituusjäykisteet, pohjan L-profiilit, sekä pohjalevyn ja laitamoduulin välinen pursoteprofiililla tuettu hitsi. Koko veneen hitsien pituus yhteensä on 116,25 m, josta 66,8% on hitsattavissa robotilla. Robottihitsaukseen valmistettavaa hitsausrailoa olisi siis n. 77,7 m.

Runkolevyjen ollessa 2 ja 4 mm paksut, ne pystyy leikkaamaan suhteellisen nopeasti vesisuihkulla. Tällöin kölin hitsi saa oikeilla leikkausparametreilla riittävän mittatarkkuuden, eikä levyihin tulisi leikkausprosessissa muodonmuutoksia, jotka saattavat aiheuttaa railoihin leikkausjäljestä riippumattomia ilmaraon muutoksia. Viisi metriä pitkät railot ovat haastavia leikattavia termisillä leikkausmenetelmillä, varsinkin kun ilmaraon toleranssi on robotisoidussa hitsauksessa selkeästi pienempi. Eräs vesisuihkuleikkauslaitteiston valmistaja on ilmoittanut 5 mm paksulle alumiinille leikkausnopeudeksi 500–750 mm/min. Jos oletetaan nopeuden olevan karkeasti esim. 600 mm/min, koko veneen robottihitsattavan railon teoreettinen leikkausaika ilman kappaleenkäsittelyjä vesisuihkulaitteistolla on noin 130 minuuttia. Vastaavasti, jos leikattaisiin laserilla jonka leikkausnopeus olisi esim. 2m/min, koko leikkausaika olisi noin. 39 minuuttia.

Lopulta kannattaa harkita, saako käyttökohteessa oleviin pitkiin railoihin riittävän mittatarkkuuden laserleikkaamalla vai vaatiiko se vesisuihkuleikkausta. Täytyy kuitenkin muistaa, että suurimman haasteen ilmaraon tarkkuuteen todennäköisesti aiheuttaa itse hitsauksen lämmöntuonti hitsauksen aikana.

Kuvissa 16–19 on esitelty LUT:n hitsaustekniikan laboratoriossa hitsatun koekappaleen hitsejä.



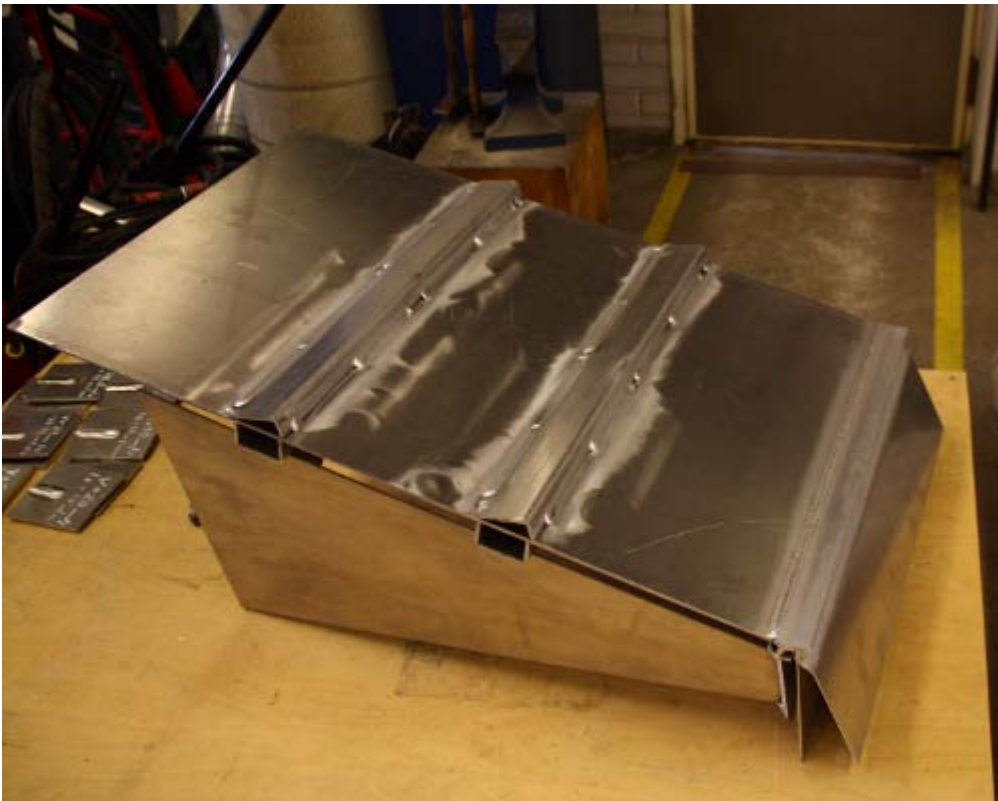
Kuva 16. Rungon päälle tulevien kaarien hitsejä.



Kuva 17. Pohjalevyn ja reunan kotelolevyjen hitsaus pursoteprofiilin avulla.



Kuva 18. Veneen pohjaan tulevat L-profiilit ja niiden vastapuolella olevat U-profiilit.



Kuva 19. Koko pohja.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Riippuen aineenpaksuudesta, robottihitsaukseen pidemmät railot kannattaa vesisuihkuleikata tai laserleikata, jotta vältetään vetelyiden aiheuttamat ilmaraon muutokset. Mittatarkkuudeltaan myös mekaaninen leikkaus tuottaa riittävän tarkkaa jälkeä. Laser soveltuu hyvin suureen sarjatuotantoon meneville ohutlevyille. Muodonmuutokset ovat kuitenkin paksummissa pitkissä railoissa kyseenalaisia. Plasmaleikkauksessa parametrien ja leikkauskaasun valinta on tärkeää, jotta saadaan riittävän tarkka leikkausrailo ilman halkeamia ja muodonmuutoksia. Kuitenkin usein plasmaleikkattu railo voi vaatia jälkityöstöä. Hienosädeplasma ja vedenalainen plasmaleikkaus ovat potentiaalisia leikkausprosesseja, joilla voi olla useaan käyttökohteeseen itsessään riittävän hyvä leikkausjälki.

8 YHTEENVETO

Leikkausmenetelmien hyvät ja huonot puolet:

Plasmaleikkaus on hyvä prosessi, kun leikataan ohuempia levymateriaaleja ja leikkauspinnan laatu ei ole kovin kriittinen tekijä. Leikkausnopeudet ovat hyviä ohuemmillä materiaaleilla, mutta levyn paksuuden noustessa nopeus ja leikkauksen laatu alkavat kärsiä. Mikäli tarvitaan laadukkaampaa pintaa plasmaleikkattuun railoon, se usein kannattaa viimeistellä jyrsimällä. Tutkituista alumiinin leikkausprosesseista perinteisellä plasmalla on suurin lämmöntuonti, mikä saattaa aiheuttaa levyille vetelyä, leikkauspinnan huokoisuutta, parran muodostumista alareunaan ja reunan halkeamia. Plasmaleikkauslaitteistoa hankittaessa kannattaa myös huomioida että siitä on olemassa paljon erilaisia paranneltuja variaatioita, kuten vedenalainen plasma ja hienosädeplasma.

Leikkauspinnan viimeistely jyrsimällä on keino, jolla saadaan käytännössä aina riittävän hyvä pinnanlaatu. Jyrsintä myös mahdollistaa vaikeampien liitosmuotojen valmistamisen. Jyrsinlaitteisto myös yleensä löytyy valmiiksi jokaisesta tavallisesta konepajasta, joten kannattaa harkita tuleeko halvemmaksi viimeistellä leikkauspinnat jyrsimellä vai panostaa leikkausprosessiin, joka tekee kerralla riittävän hyvää jälkeä.

Laserleikkaus on yleisintä ohutlevyjen leikkaamisessa yliveraisen leikkausnopeuden takia, mutta se soveltuu myös 6-10 mm paksuille alumiinilevyille. Leikkausjälki on laadukasta ja pursetta ei esiinny, mikäli parametrit saadaan kuntoon. Huonoina puolina laserleikkauksessa voidaan pitää kallista laitteistoa ja että leikkaus rajoittuu suoraan I-railoon. Laserleikkauslaitteisto kuitenkin maksanee itsensä nopeasti takaisin, mikäli se saadaan jatkuvaan käyttöön ja tuotantomäärät ovat suuria.

Vesisuihkuleikkaus on laadullisesti potentiaalinen leikkausprosessi, koska siinä ei ole lainkaan lämmöntuontia leikattavaan kappaleeseen, sillä pystytään leikkaamaan hyvin paksuja levyjä ja sillä on erittäin hyvä leikkausjäljen laatu ilman purseita. Sillä pystytään myös leikkaamaan hankalampia geometrioita, tosin silloin leikkausnopeus on huomattavasti hitaampi. Laitteisto kuluttaa vettä ja abrasiivista jauhetta energian lisäksi, mutta jos otetaan huomioon tuotteen koko valmistuskaari, se voi olla myös taloudellisesti hyvinkin kannattava leikkausprosessi.

Huomioitavia seikkoja railonvalmistukseen:

- Railomuotojen valinta käyttökohteeseen
- Leikkausmenetelmän valinta
 - o Reunan tarkkuus
 - o Lämmöntuonti
 - o Leikkausnopeus
 - o Eri muotojen valmistusmahdollisuus
- Materiaalin leikattavuus
 - o Perusaineen ja seosaineiden vaikutus
 - o Paksuus
 - o Muoto
- Taloudellisuus
 - o Laitteiston hinta
 - o Jatkuvat kustannukset
 - o Käyttöaste
 - o Leikkausnopeus
 - o Viimeistelyn tarve

LÄHTEET

AccustreamWaterjet products [verkkodokumentti] Abrasive waterjet cutting, Application and Capability [Viitattu 27.3.2011] Saatavissa: <http://www.accustream.com/pdf/waterjet-cutting-white-papers.pdf>

Chryssolouris, George. 1991. Laser machining: theory and practice. New York:Springer cop.

Custompart.net <http://www.custompartnet.com/wu/milling>, viitattu 27.7.2011

ESAB 2010, Question and Answers [Esabin www-sivuilta].[Viitattu 27.3.2011] Saatavissa: <http://www.esabna.com/us/en/education/knowledge/qa/How-to-Avoid-Cracking-in-Aluminum-Alloys.cfm>

Grönlund, Eero. Hitsausrailat: Vaatimukset, valmistusmenetelmät, toleranssit ja taloudellisuus. Tekninen Tiedote 6/90. MET

Hackett, Charles M. 2001, Plasmacutting stainless steel and aluminum [verkkodokumentti] The Fabricator, kesäkuu 2001 [viitattu 27.3.2011] Saatavissa: <http://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/plasma-cutting-stainless-steel-and-aluminum>

Hoult, A. P Pashbyja, I. R. Chan, K. 2000, Fine plasma cuttign of advanced aerospace materials. [verkkodokumentti]. [Viitattu 26.2.2011] Saatavana LUT:in verkossa PDF-tiedostona: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TGJ-3YVD032-3K&_user=10&_coverDate=01%2F15%2F1995&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1695109649&_rerunOrigin=google&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=33a424cf78f43755e78fb8324d8d7002&searchtype=a

Karhula, Jukka. 2009. Metalliopin perusteita. Toinen, uudistettu painos. LUT Digipaino 2009

Koukkunen, Kimmo. 2010. Alumiiniveneen rungon modulointi robottihitsauksen tehostamiseksi. [verkkodokumentti] Lappeenrannan teknillinen yliopisto, konetekniikka. [Viitattu 28.3.2011] Diplomityö. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/67044/nbnfi-fe201101141054.pdf?sequence=3>

Kuttolamadam, Mathew A. Hamzehlouia, Sina ja Mears, M. Laine 2010, Effect of Machining Feed on Surface Roughness in Cutting 6061 Aluminum. [verkkodokumentti] Clemson University [Viitattu 27.3.2011] Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.clemson.edu/manufacturing-lab/documents/publications/kuttolamadam%202010b.pdf>

Lukkari, Juha. 2002, Hitsaustekniikka: perusteet ja kaarihitsaus. 4. Tarkistettu painos. 1997 Tekijä ja opetushallitus

Mathers, Gene. 2002. The welding of aluminium and its alloys [verkkodokumentti] Käytettävissä LUT:n verkossa [viitattu 25.3.2011] Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=826>

Matilainen J, Parviainen M., Havas T, Hiitelä E. ja Hultin S. 2010. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. Teknologiateollisuus

Metalliteollisuuden keskusliitto MET 2002. Raaka-ainekäsikirja 5: Alumiinit. Uudistettu painos. Metalliteollisuuden Kustannus Oy

Millay, Marjorie 2010. How new waterjet technology simplifies the complex. [verkkodokumentti] The Fabricator, syyskuu 2010 [viitattu 27.3.2011] Saatavissa: <http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/how-new-waterjet-technology-simplifies-the-complex>

Salminen, Antti 2010. BK30A0000 Sädetyöstö, laserhitsaus. [verkkodokumentti] viitattu 27.3.2011] Saatavissa PDF LUT nopasta: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bk30a0000/luennot>

Salminen, Asko 2010. Alumiiniveneen hitsauksen robotisointi. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Konetekniikka

Sandvik Coromant 2010, Technical guide D: Jyrsintä [verkkodokumentti] Viimeksi päivitetty 9.12.2010 [viitattu 27.3.2011] Saatavissa PDF-tiedostona: http://www2.coromant.sandvik.com/coromant/downloads/tech_guide/FIN/MTG_D.PDF

Sarrafi and R. Kovacevic 2010. Cathodic Cleaning of Oxides from Aluminum Surface by Variable-Polarity Arc. Welding journal [verkkolehti] no. 1/2010 [Viitattu 23.3.2011], Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.aws.org/wj/supplement/wj0110-1.pdf>

SFS-EN ISO 13920 Hitsaus. Hitsattuja rakenteita koskevat yleistoleranssit. Pituus- ja kulmamitat. Muoto ja sijainti

SFS-EN 1011-4 Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituksukset. Osa 4: Alumiinin ja alumiiniseosten kaarihitsaus

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

Silver boats tuotekatalogi, [viitattu 27.4.2011], saatavissa PDF-tiedostona: http://www.silverboats.fi/pdf/Silver_2011_Broch_FI_191010_v2.pdf

Songmene V, Khettabi R, Zaghbani I, Kouam J, ja Djebara A, 2011. Machining and Machinability of Aluminum Alloys [verkkodokumentti] [Viitattu 17.3.2011] Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/machining-and-machinability-of-aluminum-alloys>

Stournaras A, Stavropoulos P, Salonitis K, Chryssolouris G. 2009, An investigation of quality in CO2 laser cutting of aluminum [verkkodokumentti]. [Viitattu 25.2.2011] Saatavissa LUT:in verkossa PDF-tiedostona: http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B8JGX-4X9NJHM-2&_user=10&_coverDate=12%2F31%2F2009&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&_view=c&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=9026784bf05386e215253ffa078f51fa&searchtype=a

TkL Kari Lahti & Petteri Jernström 1999, Plasma welding aluminium. [verkkodokumentti] Svetsaren no.3 1999. [viitattu 27.3.2011] Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.infosolda.com.br/download/16DPC.pdf>

Wandera, Catherine 2010. Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminium. [verkkodokumentti]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, [viitattu 27.3.2011] Konetekniikan väitöskirja. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-214-974-9>

Waterjet equipment 2011 [Waterjet.org www-sivuilla]. [Viitattu 27.3.2011] Saatavissa: http://waterjets.org/index.php?option=com_content&task=category§ionid=6&id=40&Itemid=55

WTIA, Welding Technology Institute of Australia 2006, TGN D 05 Control of plate preparation [verkkodokumentti]. Päivitetty 30.5. 2006 [viitattu 20.3.2011] Saatavissa PDF-tiedostona: <http://ebookbrowse.com/tgn-d-05-control-of-plate-preparation-pdf-d65534552>