

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

KAARIJUOTON PERIAATE JA SOVELLUSKOHTEET  
ARC BRAZING AND ITS APPLICATIONS

Eeki Väänänen 27.5.2015

Tarkastaja: Professori Jukka Martikainen

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>3</b>
1.1	Työn tausta.....	3
1.2	Työn tavoite ja rajausta.....	4
<b>2</b>	<b>KAARIJUOTON PERIAATE</b> .....	<b>5</b>
2.1	Menetelmän kuvaus .....	5
2.2	Kaarimuodot .....	6
2.3	Edut ja haitat .....	6
<b>3</b>	<b>LAITTEISTO</b> .....	<b>8</b>
3.1	Kaarijuottolaitteisto .....	8
3.1.1	Kemppi.....	8
3.1.2	ESAB .....	11
3.1.3	EWM.....	12
3.2	Lisäaineet .....	13
3.3	Suojakaasut .....	15
<b>4</b>	<b>LIITOKSEN OMINAISUUDET JA LAATU</b> .....	<b>17</b>
4.1	Liitoksen lujuus.....	17
4.2	Sitkeys.....	17
4.3	Väsymislujuus.....	18
4.4	Kovuus .....	18
4.5	Liitosvirheet .....	18
<b>5</b>	<b>SOVELLUSKOHTEET</b> .....	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>YHTEENVETO</b> .....	<b>25</b>
	<b>LÄHTEET</b> .....	<b>26</b>

## 1 JOHDANTO

Kaarijuotto muistuttaa ulkoisesti paljon tavallista metallikaasukaari- (MIG-) hitsausta. Olennaisena erona on, että valokaari ei sulata liitettävää perusainetta. Ero on siis sama kuin normaalisti hitsauksessa ja juottamisessa. Tällöin lämmöntuonti on huomattavasti alhaisempaa ja juottopäällä on suurempi kuljetusnopeus MIG-hitsaukseen verrattuna. Kaarijuottoa on käytetty Euroopassa jo 80-luvulta lähtien autoteollisuudessa ohutlevyjen liittämismenetelmänä. (Leino, 1996, s. 33–34.)

Kaarijuotosta käytetään myös muita nimiä: MIG-juotto, MIG-lankajuotto ja lankajuotto. Englanninkielen yleisimmät nimitykset kaarijuotolle ovat arc brazing, MIG brazing, GMA brazing ja MIG soldering. Mikäli käytetään suojakaasuja, joissa argonin lisäksi on 1-2 % happea ja hiilidioksidia, niin oikea nimi olisi terminologisesti MAG-juotto. Esab, joka tarjoaa lisäaineita kaarijuottoon, käyttää kaarijuotosta nimitystä MAG brazing. Saksankielessä käytetään nimitystä MIG löten. (Lukkari, 2002, s. 3.)

### 1.1 Työn tausta

Sinkittyjen levyjen ja rakenteiden hitsaukseen liittyy huomattava määrä ongelmia. Roiskeet, vaikeasti hallittava valokaari, sinkkihöyryt, muodonmuutokset työkappaleessa, sinkkikerroksen vaurioituminen hitsin ympäriltä sekä hitsin vaatima jälkikäsitteily ovat tavallisia ongelmia sinkittyjen levyjen ja rakenteiden hitsauksessa. Sinkki höyrystyy hitsin reunoilta riippuen lisäaineesta ja energiantuonnista niin, että noin 2 mm leveällä alueella ei ole lainkaan sinkkipinnoitetta korroosionsuojana. Pinnalle höyrystynyt sinkki voidaan poistaa hitsauskohdista teräsharjalla. (Raekorpi, 2000, s. 5-6.)

Useimmat sinkin aiheuttamat ongelmat voidaan poistaa tai niitä voidaan vähentää käyttämällä kaarijuottoa. Menetelmänä se on kauan tunnettu ja autonvalmistajat ovat kiinnostuneet siitä sinkittyjen peltien lisääntyessä. (Raekorpi, 2000, s. 6.)

Suuraluusterästen hitsauksessa on haasteita, sillä hitsauksen suuri lämpö tuhoaa suurlujuuksille suunnitellut mikrorakenteet. Kaarijuotto voisi olla haastava prosessi suurlujuisten terästen liittämässä. (Shelley, 2009.)

## 1.2 Työn tavoite ja rajaus

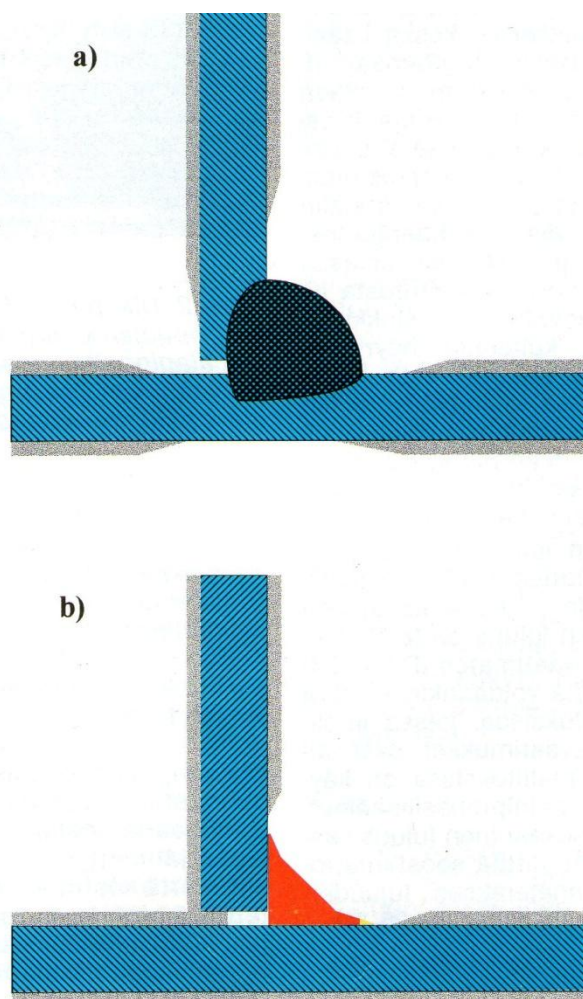
Työ rajataan kaarijuottomenetelmään, -laitteistoon, -liitokseen ja kaarijuoton sovelluskohteisiin. Työn tavoitteena on esitellä kaarijuottomenetelmä laitteistoinen ja sovelluskohteinen. Tutkimusmenetelmänä työssä käytetään kirjallisuustutkimusta. Tietolähteinä käytetään verkkotietokantoja ja eri lisäaine- ja kaarijuottolaittevalmistajien asiantuntijoita.

## 2 KAARIJUOTON PERIAATE

Kappaleessa esitellään kaarijuoton periaate kaari- ja railomuotoineen. Lisäksi käsitellään kaarijuottoprosessin edut ja haitat.

### 2.1 Menetelmän kuvaus

Kaarijuottamisessa valokaari palaa normaaliin tapaan. Sillä ei kuitenkaan sulateta perusainetta, vaan ainoastaan sulaa lisäainetta, jolla on matala sulamispiste. Sula kostuttaa liitospinnat ja tunkeutuu liitettävien osien väliseen rakoon. Tämän jälkeen sula jähmettyy ja muodostaa liitettävien kappaleiden välille juotosliitoksen. Kaarijuotto ei ole siis hitsausta, vaan juottamista, jossa käytetään valokaarta kuumennuslähteenä. Hitsaus- ja kaarijuottoliitoksen ero on esitetty kuvassa 1. (Lukkari, 2002, s. 5.)



**Kuva 1.** Levyjen hitsaus- (a) ja kaarijuottoliitoksen (b) vertailu (Leino, 1996, s. 33).

## 2.2 Kaarimuodot

Lyhytkarta käytetään yleensä käsinhitsauksessa, kuten esimerkiksi autokorjaamoiden ohutlevyjen korjaushitsaukset. Lyhytkaaressa tyypilliset juottoarvot (Lukkari, 2002, s. 5; Chovet & Guiheux, 2006, s. 50):

- suojakaasu argon
- langanhalkaisija 1,0 mm
- langansyöttö 2-3 m/min
- virta 100 - 120 A
- jännite 15 - 18 V
- lämmöntuonti ~ 0,2 kJ/mm

Kuumakaari ja pulssi vaativat suurta tehoa ja suurta kuljetusnopeutta, minkä takia ne tehdään yleensä mekanisoidusti. Kuumakaaren ja pulssin tyypilliset juottoarvot (Lukkari, 2002, s. 5-6; Chovet et al., 2006, s. 50):

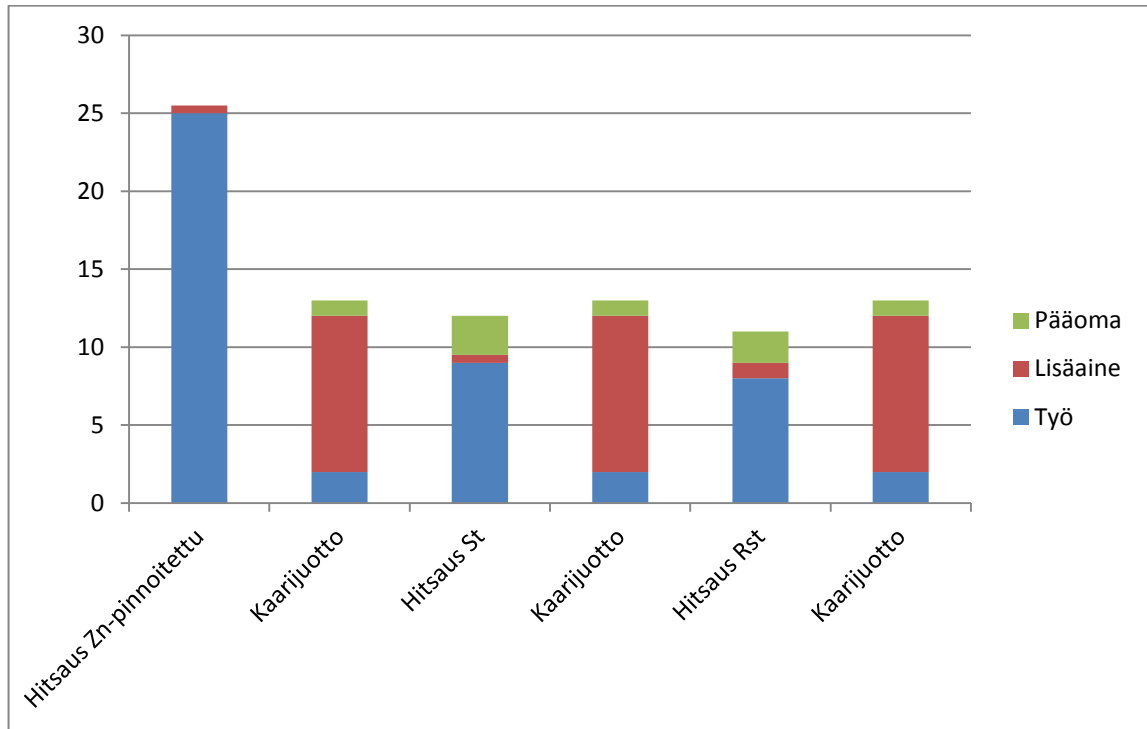
- suojakaasu argon
- langanhalkaisija 1,0 mm
- langansyöttö 6 - 12 m/min
- virta 190 - 280 A
- jännite 25 - 30 V
- lämmöntuonti ~ 0,7 kJ/mm

## 2.3 Edut ja haitat

Kaarijuotolla on pienempi lämmöntuonti ja suurempi liittämisenopeus ja prosessissa tapahtuu vähemmän muodonmuutoksia MIG-hitsaukseen verrattuna, koska perusaine ei sula prosessissa. (Raekorpi, 2000, s. 6.) Kaarijuottoliitos ei vaadi jälkikäsittelyjä ja liitos on helposti hiottava. Liitoksella on hyvä korroosionkestävyys. Juotettaessa syntyy vähemmän roiskeita. Juotettaessa sinkkipinnoitettuja levyjä sinkkiä palaa vähemmän pois hitsin vierestä ja sinkkihöyryä syntyy vähemmän. Kaarijuotto sopii myös erittäin ohuille levyille. (Lukkari, 2002, s. 6.)

Kaarijuoton merkittävin haitta on noin 10-kertainen lisäaineen hinta, johon vaikuttaa luonnollisesti vähäinen kysyntä ja koostumus (Leino, 1996, s. 35). Kustannusvertailu MIG-

juoton ja hitsauksen välillä on esitetty kuvassa 2. Etenkin suuremmilla ilmaraoilla kaarijuotto on hitsausta herkempää. Kaarijuotolla on huonommat mekaaniset ominaisuudet, etenkin käytettävässä CuSi 3 -lisäainelankaa. (Raekorpi, 2000, s. 6.)



**Kuva 2.** Kustannusvertailu MIG-juoton ja hitsauksen välillä sinkkipinnoitetun sekä pinnoittamattoman rakenneteräksen ja austeniittisen ruostumattoman ohutlevyn liittämässä (mukaillen: Leino & Hiltunen, 2001, s. 15).

### 3 LAITTEISTO

Käytännössä kaarijuottoon soveltuu mikä tahansa MIG/MAG -hitsauslaitteisto (Martiskin, 2015). Kappaleessa esitellään soveltuvia kaarijuottolaitteistoja, sekä lisäaineita ja suojavaasuja.

#### 3.1 Kaarijuottolaitteisto

Kaarijuotto on käytännössä mahdollista millä tahansa MIG/MAG -hitsauslaitteistolla. Perinteisellä "2-nuppi" MIG/MAG -laitteella voidaan kaarijuottaa, mutta niiden dynaamiset ominaisuudet on useimmiten optimoitu teräksen hitsaukseen, jolloin kaarijuottoon tarvittavat ominaisuudet eivät yllä aivan pulssi- tai synergisen hitsauslaitteen tasolle. Roiskeettomampaan kaarijuottoon päästään pulssiprosessilla, mutta synergisellä MIG-prosessillakin päästään riittävän hyvään lopputulokseen. Seuraavaksi esitellään kolmen laitevalmistajan tarjoamat laitteet kaarijuottoon. (Martiskin, 2015.)

##### 3.1.1 Kemppi

Kemppi Oy tarjoaa seuraavia pulssilaitteita kaarijuottoon: FastMig Pulse, FastMig X ja Kempact Pulse (kuva 3). Lisäksi robottivirtalähteistä löytyy Kemparc Pulse (kuva 3). Näihin laitteisiin on saatavilla kaarijuotto-ohjelmia. (Martiskin, 2015.)





**Kuva 3.** Pulssilaitteet kaarijuottoon: a) FastMig Pulse, b) FastMig X, c) KempactPulse ja d) Kemparc Pulse (Product Showroom, 2015).

Kempillä on synergisiä hitsauslaitteita, joihin löytyy omat hitsausohjelmat kaarijuottoa varten. Tällaisia hitsauslaitteistoja ovat FastMig M ja Kempact A (kuva 4) (Martiskin, 2015).



**Kuva 4.** Synergiset hitsauslaitteet kaarijuottoon. a) Fastmig M ja b) Kempact A (Product Showroom, 2015).

Synergisten- ja pulssilaitteiston lisäksi Kempin Minarc EVO 200 (kuva 5) soveltuu kaarijuottoon. Se on ns. adaptiivinen hitsauskone eli laite muuttaa automaattisesti hitsausarvoja. Laitteesta löytyy oma ohjelma kaarijuottoon. (Martiskin, 2015.)



**Kuva 5.** Adaptiivinen Minarc EVO -hitsauslaite kaarijuottoon (Product Showroom, 2015).

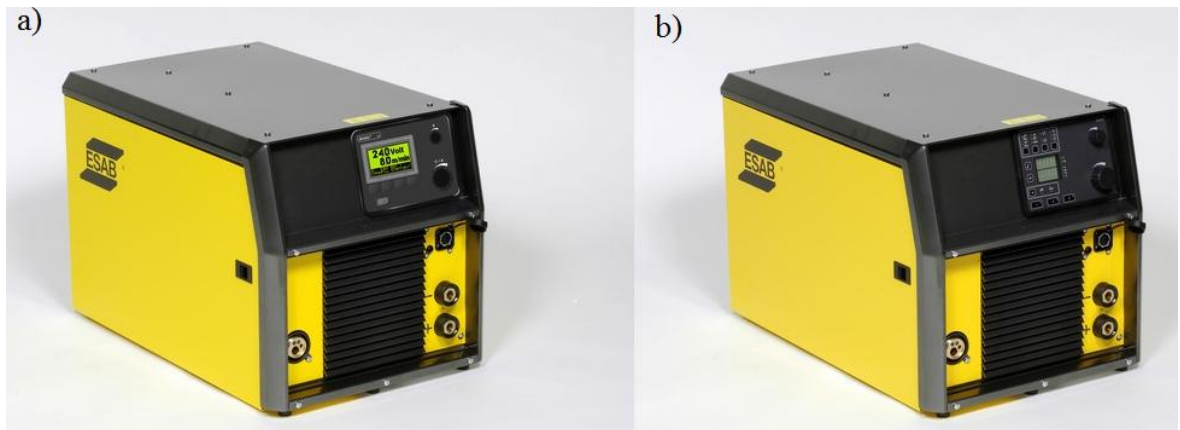
### 3.1.2 ESAB

Lähes kaikki ESABin MIG/MAG -laitteet soveltuvat kaarijuottoon. Kaarijuotossa oikeiden parametrien löytäminen on hankalampaa kuin perinteisessä hitsauksessa, joten ESAB suosittelee sellaisia laitteita, joissa on sopivat toiminnot kaarijuottoa ajatellen. Pienin ESABin laite, josta löytyy esiasetus kaarijuotolle, on CaddyMig C200 (kuva 6). (Hurтта, 2015.)



**Kuva 6.** ESABin kannettava CaddyMig C200, joka soveltuu kaarijuottoon (Arc Welding Equipment, 2013).

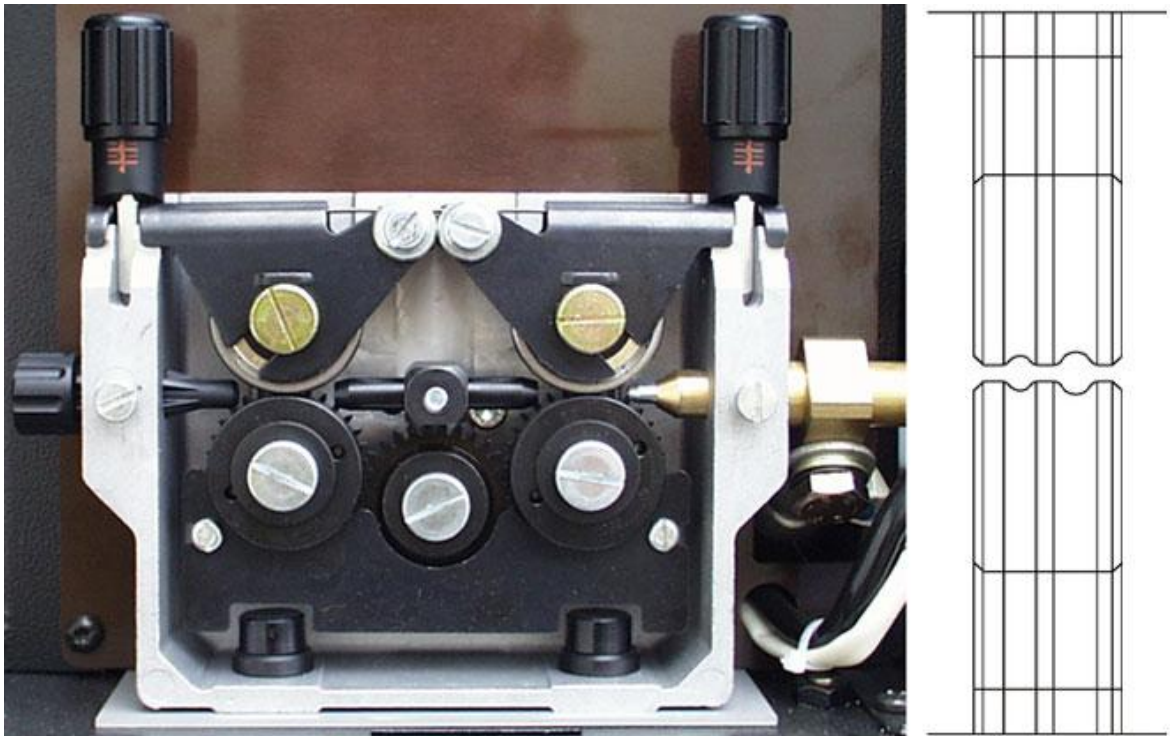
ESABin MIG/MAG -laitteet, joissa on Qset-toiminto, soveltuvat erinomaisesti kaarijuottoon. Qset-toiminto muun muassa säätää koneen arvot oikeiksi, vaikka lisäainelanka vaihdettaisiin erityyppiseksi. Tällaisia laitteita CandyMig C200:n lisäksi ovat Aristo Mig C3000i U6 ja Origo Mig C3000i MA24 (kuva 7). Aristo Mig C3000i U6 -laitteessa on valmiita synergialinjoja kaarijuottolangoille. (Hurтта, 2015.)



**Kuva 7.** ESABin Qset-toiminnolla varustetut laitteet kaarijuottoon: a) Aristo Mig C3000i U6 ja b) Origo Mig C3000i MA24 (Arc Welding Equipment, 2013).

### 3.1.3 EWM

EWM suosittelee kaarijuottoon MIG/MAG -laitteita, joissa kaarijuottolanka syötetään polttimelle neljän rullan kautta. Nelirullaohjaus on esitetty kuvassa 8. (Knopp & Killing, 2005, s. 3.)



**Kuva 8.** EWM:n "nelirullaohjaus", joka soveltuu kaarijuottolangan syöttöön (Knopp et al., 2005, s. 3).

EWM suosittelee kaarijuottolaitteessa olevan tasavirtalähde, jossa on tasaiset jänniteominaisuudet. Esimerkkilaitteena mainittakoon alpha Q 351 Progress puls MM D FDW, kuva 9. (Knopp et al., 2005, s.3.)



**Kuva 9.** EWM:n alpha Q 351 Progress puls MM D FDW -hitsauslaite, joka soveltuu kaarijuottoon (Alpha Q Puls, 2015).

### 3.2 Lisäaineet

Kaarijuotossa käytetään lisäaineena pääasiassa pronseja, jotka ovat kuparivaltaisia seoksia. Taulukossa 1 on esitetty muutamien tyypillisesti käytettyjen laatuojen mekaaniset ominaisuudet, koostumus ja sulamislämpötila-alue. Leino ja Hiltunen (2001, s. 13.) tutkivat näiden lisäaineiden ominaisuuksia. Taulukosta 1 nähdään, että alumiinipronssi vastaa tyypillisiä rakenneteräksiä mekaanisilta ominaisuuksiltaan, kun taas alumiini-nikkeli-pronssi vastaa lujia rakenneteräksiä. Pii- ja tinapronssi ovat huomattavasti niitä pehmeämpiä. (Leino et al., 2001, s. 13.)

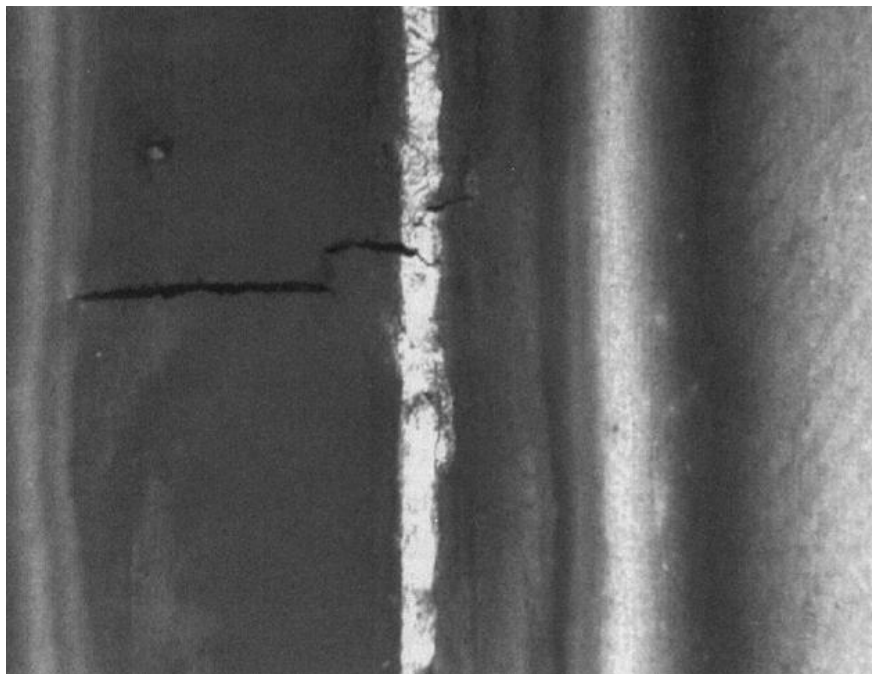
Taulukko 1. Kaarijuotossa käytettyjä lisäaineita ominaisuuksineen (Leino et al., 2001, s. 13; Lepistö, 2004, s. 8).

Lisäaine	SG-CuAl8	SG-CuSn8	SG-CuSi3	SG-CuAl8Ni2	SG-CuMn13Al7
Koostumus	Al 8 Fe < 0,5 Mn < 1 Ni < 0,8 Cu bal	Sn 5 - 8 P < 0,35 bal	Si 3 Mn 1 Fe < 0,3 Sn < 0,2 bal	Al 8 Fe 2 Ni 2 Mn 1,5 bal	Al 7,5 - 8,3 Mn 12 - 14 Ni 2,0 - 2,5 Fe 2-3 bal
Re [MPa]	min. 180	150	min. 120	min. 300	Min. 400
Rm [MPa]	min. 400	300	min. 350	min. 650	Min. 800
A5 [%]	40	20	40	25	10
kovuus	120 HB	80 HB	80 HB	160 HB	180 - 240 HB
Sulamislämpötila [°C]	1030-1040	910-1040	910-1025	1030-1050	945-985

Tutkimuksessa kokeet tehtiin pääosin alumiinipronssilisäaineella, jota verrattiin muihin lisäaineisiin. Kaarijuotossa alumiininikkelipronssi käyttäytyy suunnilleen samalla tavalla kuin alumiinipronssi. Pii- ja tinapronssi tuottavat herkkäliikkeisemmän sulan matalamman sulamislämpötilan takia. Se parantaa juotteen tunkeutumista kapeaan railoon päittäisliitoksessa, mutta juote voi valua liitoksesta läpi ilmaraon ollessa liian suuri. (Leino et al., 2001, s. 13.)

Tinapronssilla on taipumus tunkeutua juotettavan perusaineen raerajoille, jolloin syntyy poikittaisia juotosvikoja juotteen alle (kuva 10). Leino et al. (2001, s. 13) havaitsi ilmiön selvimmin ruostumattomille teräksillä, mutta pieniä viitteitä poikittaisista juotosvioista saatiin myös pinnoitetuilla ja pinnoittamattomilla hiiliteräksillä. Tällaisilla juotosvioilla ei ole käytännössä merkitystä liitoksen staattisiin lujuusominaisuuksiin, etenkin poikittaiseen lujuuteen. Tämä juotosvika ei ole särö, vaan perusaineeseen tunkeutunut vierasfaasinen "uloke". Raerajalle tunkeutuneen faasin mekaaniset ominaisuudet saattavat kuitenkin poiketa perusaineesta, jolloin juotosvialla saattaa olla heikentävä vaikutus liitoksen

pituussuuntaiseen lujuuteen, muodonmuutoskykyyn ja väsymiskestävyyteen. (Leino et al., 2001, s. 13.)



**KUVA 10.** Kaarijuotossa syntynyt juotosvika, jossa juote on tunkeutunut perusaineen raerajoille (Leino et al., 2001, s. 13).

Esab tarjoaa kaarijuottoon lisäaineiksi OK Autrod 19.30 ja OK Autrod 19.40. OK Autrod 19.30 on CuSi3-seosteinen hitsauslanka, jota on käytetty eniten kaarijuottoon. Se soveltuu sinkittyjen levyjen ja kupariseosten kaarijuottoon. Tuotteen suurin tilaajaryhmä on Euroopan autoteollisuus, joka käyttää sitä todella paljon. OK Autrod 19.40 on CuAl8-seosteinen kaarijuottolanka, joka soveltuu sellaisille sovelluksille, jotka vaativat suurta lujuutta sekä hyvää kulumis- ja korroosionkestävyyttä. Safra tarjoaa kaarijuottoon myös CuSi3- ja CuAl8-lisäaineita (Spiess, 2015). Bedralta löytyy kaarijuottoon CuSi3Mn-lankoja, joiden murtolujuudet ovat jopa yli  $1000 \text{ N/mm}^2$ . Suuri lujuus antaa suunnittelijoille mahdollisuuden suunnitella entistä lujempia ja turvallisempia rakenteita. (Halonen, 2015; Raekorpi, 2006, s. 18.)

### 3.3 Suojakaasut

Kaarijuotossa käytetään seoskaasuja, jossa on argonin (Ar) joukossa 0,5 - 1 % happea ( $\text{O}_2$ ) tai 1 - 2 % hiilidioksidia ( $\text{CO}_2$ ). Aktiivinen kaasukomponentti  $\text{O}_2$  tai  $\text{CO}_2$  vakauttaa

valokaarta, mutta tuo toisaalta lisää lämpöä liitokseen. Pieni hapen osuus pienentää sulan pintajännitystä, mikä parantaa sulan kostutusta. Sinkityissä levyissä sinkin höyrystyminen on vähäistä, kun suojakaasu sisältää happea. Jo 0,5 % O<sub>2</sub> -seostus näkyy merkittävästi liitoksessa. Puhdasta argonia sekä argonin ja heliumin seoskaasuja käytetään myös kaarijuotossa. Oikean kaasuseoksen valintaan vaikuttaa muun muassa sinkkipinnoitteen ja perusaineen paksuus. (Raekorpi, 2006, s. 19; Iordachescu et al., 2005, s. 389.)



## 4 LIITOKSEN OMINAISUUDET JA LAATU

Kaarijuotetut liitokset vastaavat lähes hitsausliitoksia mekaanisilta ominaisuuksiltaan (Lukkari, 2002, s. 6). Tässä kappaleessa tarkastalleen kaarijuotetun liitoksen lujuutta, sitkeyttä, väsymislujuutta, kovuutta ja mahdollisia juotosvirheitä.

### 4.1 Liitoksen lujuus

Lisäaineen laji vaikuttaa olennaisesti siihen, kuinka luja liitos on (Lukkari, 2002, s. 6). Taulukosta 1 nähdään lisäaineiden murto- ja myötölujuuksia. Leinon et al. (2001, s. 15.) tutkimuksessa eri lisäaineilla kaarijuotettujen päittäisliitoksista valmistettiin poikittaiset vetokoesauvat ja pitkittäiset taivutussauvat. Vetokoesauvoista määriteltiin vetolujuus ja taivutussauvoilla varmistettiin liitoksen muodonmuutoskyky. Vetokokeissa sauvat murtuivat perusaineen kohdalta, jolloin mitatut lujuudet kuvaavat perusaineen arvoja. Kuroutumiskohta oli etäämpänä liitoksesta verrattaessa hitsattuun liitokseen, jossa kuroutuminen tyypillisesti alkaa liitoksen lämpövyöhykkeestä. Suuren liittämisenopeuden ja pienen lämmöntononin kaarijuottoliitoksen muutosvyöhyke on kapea ja sijoittuu pääosin liitoksen pinnalle levinneen juotokuvun reuna-alueelle. (Leino et al., 2001, s. 15.)

Poikittaisissa taivutuskokeissa koesauvat taipuivat jyrkästi juotokuvun reunan kohdalta, mutta itse juotokseen ei syntynyt merkittävää venymää. Pitkittäisissä taivutuskokeissa juotos taipui hallitusti ja taivutuksen jälkeen niissä ei havaittu säröjä. Juotettujen liitosten muodonmuutoskyky täyttää siis kriteerit, jotka on asetettu hitsatuille liitoksille. Leinon et al. (2001, s. 15–16) mukaan "kaarijuottoliitosten voidaan katsoa vastaavan hitsattuja liitoksia staattiselta lujuudeltaan ja muodonmuutoskyvyltään." (Leino et al., 2001, s. 15–16.)

### 4.2 Sitkeys

Sitkeys ei aiheuta hitseissä merkittävästi ongelmia, sillä nykyaikainen teräksen valmistustekniikka on niin kehittynyttä. Hitsien haurasmurtumat ovat nykypäivänä melko harvinaisia, kunhan sovelluskohteelle on valittu sopiva teräs. (Lepistö, 2004, s. 1.)

### 4.3 Väsymislujuus

Leino et al. (2001, s. 16) suorittivat myös suppean väsytysohjelman kaarijuottoliitoksille. Näissä kokeissa tultiin siihen johtopäätökseen, että kaarijuottoliitoksella on vähintään yhtä hyvä väsymislujuus kuin hitsatulla liitoksella.

Lepistön (2004, s. 68) tutkimuksen mukaan: "Kaarijuottoliitoksen väsymislujuus näyttää olevan 70 - 80 % parempi kuin vastaavan hitsatun rakenteen verrattuna IIW:n hot spot -tason suunnittelukäyrään." Tutkimuksen tulokset antoivat selviä viitteitä siitä, että kaarijuottoa voisi käyttää väsymiskestävyyden parantamiskeinona. (Lepistö, 2004, s. 68.)

### 4.4 Kovuus

Myös kaarijuottoliitoksen kovuus määräytyy lisäaineen laadun perusteella. Lisäaineet esiteltiin aikaisemmin ominaisuuksineen taulukossa 1. Yleisimmin käytettyjen lisäaineiden kovuus vaihtelee 80 HB:sta 160 HB:hen. CuSi3 -lisäaineen pieni kovuus (80 HB) on usein etu, sillä liitoksen mekaaninen jälkikäsitteily on helppoa. Tätä käytetään tapauksissa, joissa liitos halutaan saada mahdollisimman näkymättömäksi. Siksi esimerkiksi autoteollisuudessa käytetään tätä lisäainetta. Muita lisäaineita, joilla on kovempi lujuus, käytetään sellaisille kohteille, joissa ei tarvita jälkeinpäin tapahtuvaa työstämistä. (Lepistö, 2004, s. 6-7.) Lisäksi Lepistö (2004, s. 7) toteaa lisäaineen CuMn13Al7 olevan "varsin lujaa ja melko kovaa, joten se soveltuu kulutusta kestävään päällejuottoon".

### 4.5 Liitosvirheet

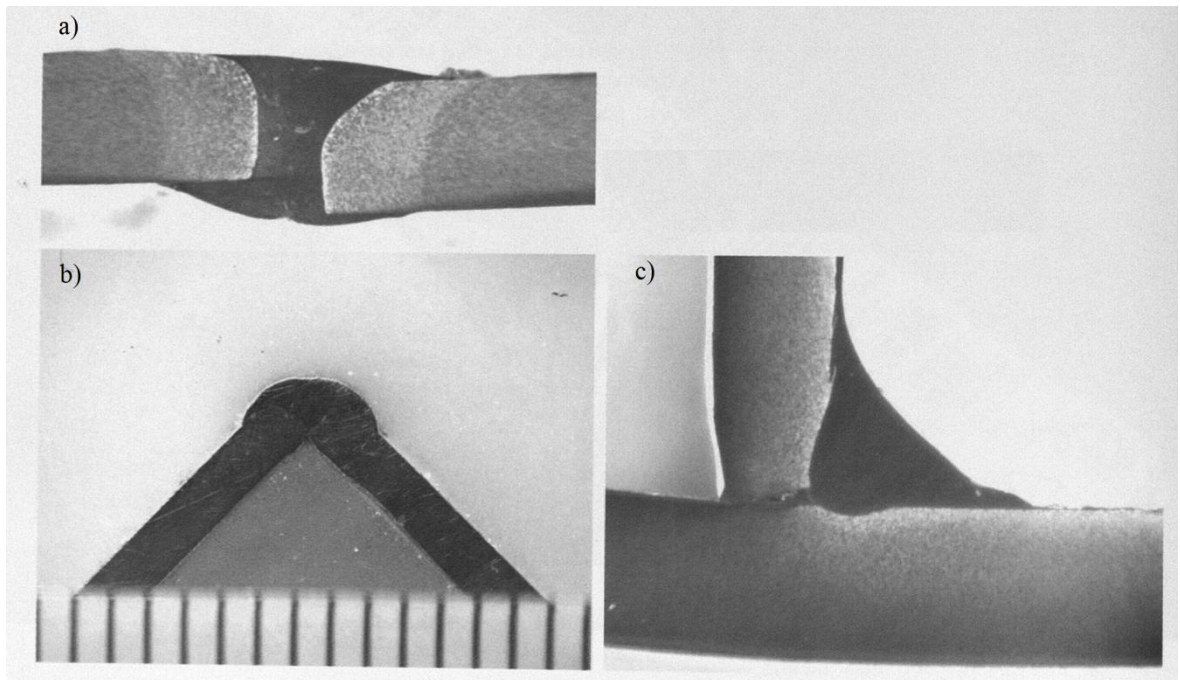
Kaarijuottoliitoksen hyvän laadun saavuttamiseksi vaaditaan oikea parametrijohdistelmä. Sen löytäminen on huomattavasti työlämpää kaarijuotossa kuin hitsauksessa. Parametreissa ei sallita suurta vaihtelua, että prosessi toimisi halutulla tavalla. Laittevalmistajien tarjoamien synergisten pulssiohjelmien avulla parametrien löytäminen on helpompaa. Täysin roiskeeton lopputulos edellyttää tarkkaa kaaripituuden hienosäätöä. (Leino et al., 2001, s. 15.)

Lisäaineista tina- ja piipronssi tuottavat herkkäliikkeisen sulan, mikä johtaa helposti juotteen läpivalumiseen ilmaraon ollessa liian suuri. Aikaisemmin todettiin, että tinapronssilla on taipumus tunkeutua perusaineen raerajoille, jolloin juotteen alla syntyy juotosvikoja (kuva 10). (Leino et al., 2001, s. 13.)

Vähiten roiskeita syntyy käytettäessä suojakaasuna 0,5 - 1 % O<sub>2</sub>:lla seostettua argonia, jolloin aineensieruminen on stabiilimpaa verrattuna puhtaaseen argonin käyttöön. Vähäinen roiskeen määrä parantaa juotteen ulkonäköä. (Leino et al., 2001, s. 13.)

## 5 SOVELLUSKOHTEET

Kaarijuotto soveltuu erityisesti kuumasinkittyjen ohutlevyjen liittämiseen. Tosin seostamattomat ja niukkaseosteiset rakenneteräkset sekä austeniittiset ruostumattomat teräkset soveltuvat myös perusaineksi. Kaarijuotolla voidaan tuottaa sekä nurkka- ja T-liitoksia että päittäis- ja limiliitoksia, kuva 11. Päittäisliitoksissa pitää käyttää pientä ilmarakoa, josta juote pääsee tunkeutumaan railopinnoille ja liitoksen takapinnalle. Kapillaari-ilmiötä ei juuri tapahdu, koska sula jähmettyy nopeasti. Kaarijuotto soveltuu 1-3 mm paksuisille ohutlevyille. (Leino et al., 2001, s. 12.)



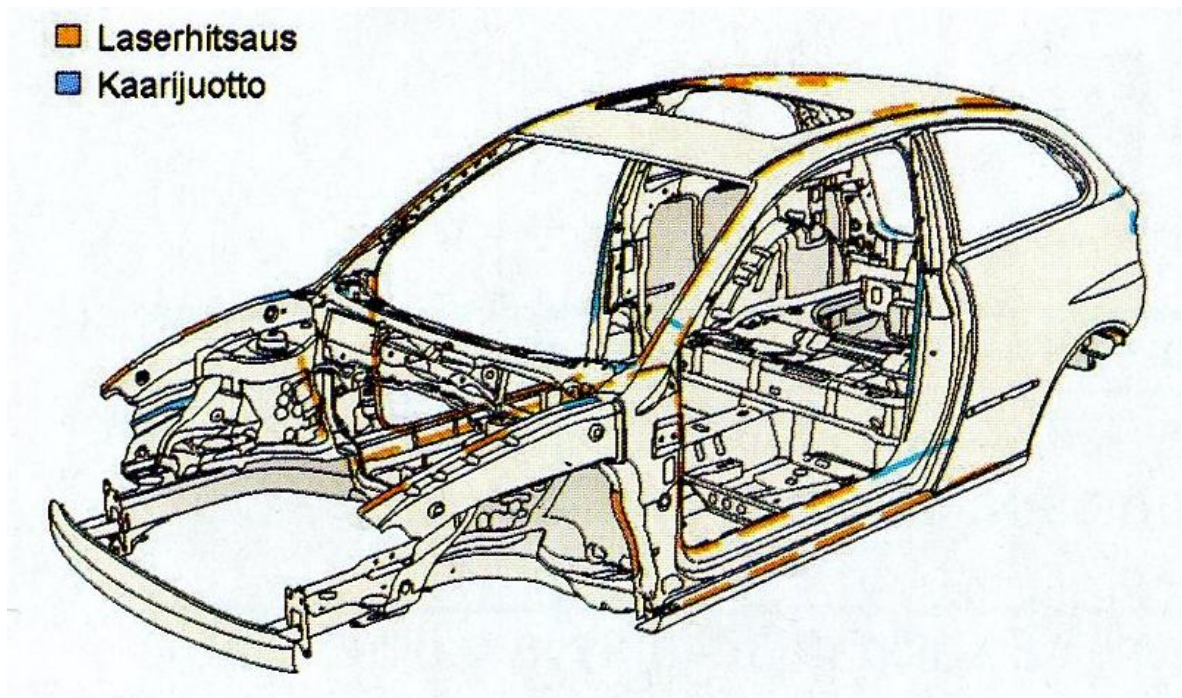
**Kuva 11.** Kaarijuotettujen liitosten poikkileikkauksia: a) päittäis-, b) nurkka- ja c) T-liitos (Leino et al., 2001, s. 12).

Kaarijuotossa sinkitty pinnoite ei aiheuta merkittäviä ongelmia. Sula sinkki, joka jää prosessissa mahdollisesti lisäainesulan alle, ei synnytä roiskeita eikä kuumahalkeilu- tai sinkkihaurausriskiä samalla tavalla kuin hitsauksessa. Kaarijuottoprosessissa lisäainesula pystyy liuottamaan itseensä sulaa sinkkiä muodostaen stabiilin lejeeringin. Tämän ominaisuuden ansiosta juotettaessa voidaan kuljettaa pistoolia nopeammin kuin hitsauksessa, koska valokaaren ei tarvitse höyrystää koko pinnoitetta lisäainepalon alta.

Sulava pinnoite jopa parantaa juotteen kostutusta liitettäviin pintoihin. Päittäisliitoksen kaarijuotossa juote leviää liitoksen juuren puolella jopa leveämmälle kuin juottopuolella, kuva 11. (Leino et al., 2001, s. 12–13.)

Sinkkipinnoitettuja levyjä jälkikäsitellään, jotta voidaan estää levyjen varastoinnissa ja kuljetuksessa syntyvä valkoruostuminen sekä parantaa levyn maalausominaisuuksia. Tämä jälkikäsitely saattaa vaikeuttaa kaarijuottoa. Orgaanisen passivoinnin ja fostafoinnin on huomattu hankaloittavan kaarijuottoa selvästi enemmän kuin esimerkiksi kromipassivoinnin. (Leino et al., 2001, s. 13.)

Autonvalmistajista muun muassa BMW, Saab, Seat (kuva 12), Opel, Peugeot, Volkswagen ja Mercedes Benz käyttävät sinkittyjä korielementtejä, jotka on kaarijuotettu. Laserhitsausta käytetään huomattavasti kaarijuottoa enemmän Seat Ibizan kohdalla. Kaarijuottoa on käytetty sellaisissa liitoksissa, joilta ei vaadita suurta lujuutta. Kattopelti on liitetty kylkipaloihin käyttäen kaarijuoton ja laserhitsauksen yhdistelmäsovellusta. Sinkittyjen levyjen ja kaarijuoton käyttö vähentää korroosiota. Autovalmistajat haluavat ylläpitää hyvää laatutasoa ja vaativat autojen merkkikorjaamoita käyttämään kaarijuottoa korjaustöissä. Laserhitsauksen yleistyminen autonvalmistuksessa tulee lisäämään kaarijuoton käyttöä, koska laserhitsauksen soveltaminen autokorjaamoilla on lähes mahdotonta. (Tuntematon tekijä, 2007, s. 24; Perhoniemi, Koskinen & Koskimies, 2002, s. 16; Lukkari, 2002, s. 4.)



**Kuva 12.** Laserhitsauksen ja kaarijuoton käyttökohteet Seat Ibizaassa (Perhoniemi et. al, 2002, s. 16).

Autoteollisuuden lisäksi kaarijuottoa käytetään myös seuraavissa sovelluksissa (Rohde, Katic & Paschold, 2000, s. 20):

- Ilmastointikanavien komponentit
- Kotitaloustuotteet
- Palo-ovet
- Rakennusten julkisivu- ja kattokomponentit
- Teollisuushallirakenteet
- Elektroniikka - ja sähkökaappien valmistus
- Maatalouskoneet- ja laitteet

Kaarijuotto sopii ohutseinämäisten profiilien liittämiseen. Ruotsissa on tiedetty valmistettavan teräslevystä puristettuja moponrunkoja kaarijuottamalla. Kaarijuotolla voidaan tehdä eriparilimiliitoksia. Murakamin et. al (2003, s. 1601) mukaan kaarijuotolla voidaan liittää esimerkiksi alumiinia teräkseen ilman, että syntyy halkeiluja. (Leino, 1996, s. 35.)

Lepistön ja Marquisin (2004, s. 20) tutkimuksen mukaan kaarijuottoa voisi käyttää väsymislujuutta vaativissa rakenteissa ja niiden korjauksessa. Tarvittaisiin kumminkin aiheesta enemmän tutkimuksia, jotta kaarijuottoa voitaisiin hyödyntää tällaisten rakenteiden tuotannossa. (Lepistö et al., 2004, s.20.)

Suurlujuusterästen hitsaus on ongelmallista, sillä hitsauksen suuri lämmöntuonti muuttaa helposti mikrorakenteita. Tällöin huolellisesti suunnitellut lujuutta lisäävät mikrorakenteet tuhoutuvat. Kaarijuotto voisi olla ratkaisu tähän, sillä kaarijuoton alhainen lämmöntuonti ei vaurioita suurlujuusterästen mikrorakenteita. (Shelley, 2009.)

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kaarijuotolla on pystytty poistamaan ongelmat sinkittyjen ohutlevyjen hitsauksessa. Alhaisen lämmöntuonnin takia kaarijuotto höyrystää sinkkiä perusaineen pinnalta huomattavasti vähemmän kuin perinteinen hitsaus. Täten kaarijuottoliitoksilla päästään hyvään korroosionkestävyyteen.

Kaarijuottoliitos vastaa mekaanisilta ominaisuuksiltaan lähes hitsausliitosta. Mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti lisäaineiden välillä. Kaarijuottoliitoksen hyvä laatu saavutetaan oikealle parametrijohdistelmällä, jonka etsiminen on huomattavasti vaikeampaa kuin hitsauksessa. Myös lisäaine vaikuttaa juotteen laatuun, sillä esimerkiksi pii- ja tinapronssi ovat sulana herkkäliikkeitä ja voivat läpivalua juotteesta ilmaraon ollessa liian suuri. Tinapronssilla on taas taipumus tunkeutua perusaineen raerajoille, jolloin syntyy juotosvikoja.

Kaarijuoton etuina ovat alhainen lämmöntuonti ja tämän ansiosta saavutetaan suurempi kuljetusnopeus ja prosessissa tapahtuu vähemmän muodonmuutoksia hitsaukseen verrattuna. Kaarijuottoliitos ei myöskään tarvitse jälkikäsitteilyjä. Merkittävimpänä haittana on kaarijuottoon tarkoitettujen lisäaineiden noin 10-kertainen hinta normaaleihin lisäaineisiin verrattuna.

Suurlujuusterästen liittämiseen kaarijuotto voisi soveltua hyvin, sillä alhainen lämmöntuonti ei muuta mikrorakenteita, jotka on huolellisesti suunniteltu suurten lujuuksien saavuttamiseksi. Hitsaamalla suurlujuusteräksiä mikrorakenteet vaurioituvat helposti ja tällöin lujuudet liitoskohdissa pienenevät. Lisäainevalmistajat ovat tuoneet markkinoille yhä lujempia lisäaineita, jotka sopisivat hyvin suurlujuusterästen kaarijuottoon.



## 7 YHTEENVETO

Kaarijuotto muistuttaa hyvin pitkälti MIG-hitsausta ja prosessi suoritetaan samoilla laitteilla. Erona on, että lisäaine ei sulata perusainetta. Lisäaine kostuttaa perusaineen pinnan ja tunkeutuu liitettävien osien väliseen rakkoon. Tämän jälkeen sula lisäaine jähmettyy ja muodostaa liitettävien kappalaiden välille juotosliitoksen. Kaarijuottoa voidaan tehdä sekä kylmä- että kuumakaarella.

Kaarijuottoa on käytetty 1980-luvulta lähtien eurooppalaisessa autoteollisuudessa ja lisäainevalmistajien mukaan suurin osa kaarijuottoon tarkoitetuista lisäainelangoista myydäänkin juuri eurooppalaiselle autoteollisuudelle. Kaarijuottoa hyödynnetään ohutlevyteollisuudessa muun muassa ilmastointikanavissa ja sähkökaappien valmistuksessa.

Kaarijuottoa voidaan tehdä käytännössä millä tahansa MIG/MAG -hitsauslaitteella. Joissakin laitteissa on ohjelmia, jotka on suunniteltu kaarijuotolle. Lisäaineina käytetään pronssiseoksia. Yleisimmin käytetty suojakaasu kaarijuotossa on O<sub>2</sub>:lla seostettu argon.

Tutkimukset kaarijuotosta ovat keskittyneet lähinnä sinkittyihin ohutlevyihin. Yliopistoltamme on tiedusteltu suurlujuusteräksien kaarijuottoa. Aiheesta löytyy hyvin vähän tietoa, joten jatkotutkimuksessa voitaisiin keskittyä pelkästään lujien terästen kaarijuottoon.

## LÄHTEET

Alpha Q Puls. 2015. [ EWM:n www-sivuilla]. [viitattu 6.5.2015]. Saatavissa: [https://www.ewm-group.com/en/ewmprodukte/geraete/migmag-pulse/alphaq.html?page=shop.product\\_details&flypage=ewm\\_flypage.tpl&product\\_id=159&category\\_id=7](https://www.ewm-group.com/en/ewmprodukte/geraete/migmag-pulse/alphaq.html?page=shop.product_details&flypage=ewm_flypage.tpl&product_id=159&category_id=7)

Arc Welding Equipment. 2013. [Esabin www-sivuilla]. Päivitetty 16.4.2013 [viitattu 5.5.2015]. Saatavissa: <http://www.esab.fi/fi/fi/products/index.cfm?fuseaction=home.productsbycategory&catId=65>

Chovet, C. & Guiheux, S. 2006. Possibilities offered by MIG and TIG brazing of galvanized ultra high strength steels for automotive applications. *La Metallurgia Italiana* 7-8/2006, s. 47-54.

Halonen, J. 2015. Kaarijuoton lisäaineet [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Eeki Väänänen. Lähetetty 18.3.2015 klo 10.21 (GMT +0200).

Hurta, J. 2015. Contact Us Form [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Eeki Väänänen. Lähetetty 5.5.2015 klo 09.30 (GMT +0200).

Iordachescu, D., Quintino, L., Miranda, R. & Pimenta, G. 2005. Influence of shielding gases and process parameters on metal transfer and bead shape in MIG brazed joints of the thin zinc coated steel plates. *Materials and Design* 27:5. s. 381–390.

Knopp, N. & Killing, R. 2005. Arc brazing - Innovative, safe and economical [verkkodokumentti]. Julkaistu 2003, päivitetty 19.10.2005 [viitattu 6.5.2015]. Saatavissa PDF-tiedostona: <https://www.ewm-group.com/en/service/downloads/technical-papers/soldering/818-arc-brazing-innovative-safe-and-economical.html>

Leino, K. & Hiltunen, E. 2001. MIG-juotto haastaa hitsauksen. *Hitsaustekniikka* 1/2001, s. 12–17.

Leino, K. 1996. Kaarijuotto – vaihtoehto sinkittyjen ohutlevyjen hitsaukselle. Hitsaustekniikka 5/1996. s. 33–35.

Lepistö, J. 2004. MIG-juotto väsymiskestävyyden parantamismenetelmänä [verkkodokumentti]. Lappeenranta: tammikuu 2004 [viitattu 24.9.2014]. Tutkimusraportti. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, konetekniikan osasto. 73 s. + liitt. 22 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/31051/TMP.objres.334.pdf>

Lepistö, J. & Marquis, G. 2004. MIG Brazing as Means of Fatigue Life Improvement. IIW Document XIII-2013-04. 23 s.

Lukkari, J. 2002. Ohutlevyjen MIG-juotto. Hitsausuutiset 4/2002, s. 3-6.

Martiskin, J. 2015. Opinnäytetyö kaarijuotosta [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Eeki Väänänen. Lähetetty 26.2.2015 klo 14.19 (GMT +0200).

Murakami, T., Nakata, K., Tong, H. & Ushio, M. 2003. Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel by Lap Joint MIG Arc Brazing Using Flux Cored Wire. ISIJ International 01/2003. s. 1596-1602.

Perhoniemi, P., Koskinen, A. & Kotamies, J. 2002. MIG-juoton käyttö kolariautojen hitsauksessa. Hitsaustekniikka 4/2002. s. 15–18.

Product Showroom. 2015. [Kempin www-sivuilla]. [viitattu 10.3.2015]. Saatavissa: <http://productinfo.kemppi.com/showroom/>

Raekorpi, P. 2006. Kaarijuoton kasvaneet vaatimukset. 2006. Kemppi ProNews 2/2006, s. 18-19.

Raekorpi, P. 2000. Vaihtoehtona kaarijuotto sinkittyjen levyjen hitsaukseen. Valokaari 2/2000. s. 5-7.

Rohde, H., Katic, J., Paschold, R. 2000. ESAB pulsed gas-shielded metal arc brazing of surface-coated sheets. Svetsaren nr 3. s. 20-23.

Shelley, T. 2009. Joining high strength steels [verkkodokumentti]. Päivitetty 8.6.2009 [viitattu 5.5.2015]. Saatavissa: <http://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/technology/joining-high-strength-steels/18708/>

Spiess, M. 2015. Safra Aluminium - and Copper wires [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Eeki Väänänen. Lähetetty 4.5.2015 klo 17.56 (GMT +0200).

Tuntematon tekijä. 2007. Motor Equipment News. New challenge for car repair industry. s. 24.