

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan osasto

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

## ROBOTISOITU PUTKIYHTEIDEN HITSAUS SÄILIÖIDEN VALMISTUKSESSA

Lappeenrannassa 5.5.2010

Sami Haaja

## Sisältö

1 JOHDANTO .....	1
1.1 Tavoite .....	1
1.2 Rajaus.....	2
2 ROBOTIT .....	3
2.1 Hitsausrobottiasema ja laitteisto .....	4
2.2 Robottien ohjelmointi .....	5
2.2.1 On-line ohjelmointi (opettamalla ohjelmointi) .....	5
2.2.2 Off-line ohjelmointi (etäohjelmointi) .....	5
3 HITSUKSEN ROBOTISOINTI .....	6
3.1 Robotisoinnin tuomat vaatimukset ja haasteet.....	6
3.2 Railonvalmistus.....	7
3.3 Juurituen käyttö.....	7
3.4 Railonseuranta.....	8
3.4.1 Adaptiivinen hitsaus.....	10
3.5 Kaarihitsausprosesseja joita käytetään robotioinnissa .....	10
3.5.1 MIG-/MAG .....	10
3.5.2 MAG-täytelanka .....	11
3.5.3 TIG.....	11
3.5.4 Plasma .....	12
4 SÄILIÖIDEN KÄSITTELYLAITTEISTOT.....	14
4.1 Käsittelypöydät .....	14
4.2 Käsittelyrullastot .....	15
5 ROBOTISOITU PLASMALEIKKAUS JA AUKOTTAMINEN.....	16
5.1 Plasmaleikkaus.....	16
5.2 Plasmaleikkaus robotilla .....	17
5.3 Robotisoitu säilön aukottaminen plasmaleikkaamalla.....	19
6 OHJELMISTOJA ROBOTISOITUUN AUKOTUKSEEN JA PUTKIYHTEIDEN HITSAAMISEEN .....	20
6.2 Moses – pipe .....	20
6.2 IGRIP for pipes and tanks.....	23
7 MATERIAALEISTA.....	25
7.1 Kuumalujat teräkset .....	25

8 HITSAUSKOE .....	27
8.1 Koekappale ja materiaali.....	27
8.2 Robottihitsauskokeen suoritus .....	28
10.3.1 Parametrien hakeminen sekä selvitys palkojen hitsauksen suorittamisesta.....	28
10.4 Makrohie ja kovuusmittauskoe .....	31
9 TULOSTEN ANALYSOINTI.....	32
9.1 Ongelmat.....	32
9.2 Parannusedotukset.....	34
9.3 Muuta huomioitavaa .....	35
9.4 Jatkotutkimusedotukset.....	36
10 JOHTOPÄÄTÖKSET & TULEVAISUUS.....	36
11 YHTEENVETO .....	39
LÄHTEET.....	41
LIITTEET	
Liite 1. Hitsausliitoksen kovuuskoe	

# 1 JOHDANTO

Hitsauksen robotisoinnilla pyritään ensisijaisesti poistamaan työntekijät raskaista ja vaativista työolosuhteista sekä parantamaan tuottavuutta. Säiliöiden putkiyhteiden hitsaus voi käsin tehtynä parhaimmillaan olla hyvinkin raskasta ja aikaavievää. Käsin hitsauksesta robotisointiin siirtyminen ei kuitenkaan aina ole kovin yksinkertaista. Esimerkiksi robottihitsaus vaatii paljon enemmän tilaa ympäriltä verrattuna käsin tapahtuvaan, sekä robotisointi vaatii paljon enemmän tuotteen esivalmistelulta. Säiliöiden tapauksessa haastetta lisää näiden lisäksi säiliön pinnan kaareva muoto.

Robotisointi on hyvin nopeasti kehittyvä ala. Säiliön valmistuksessa putkiyhteitä ei vielä juuri robotisoidusti etenään Suomessa hitsata. Aihealueen harvinaisuudesta johtuen aiheesta ei juuri julkista kirjallisuutta löydy. Työssä käytetään hyväksi artikkeleita uusista sovelluksista, yhteydenottoja yrityksiin jotka tutkivat kyseistä asiaa sekä hyödynnetään käytännön osuuden koehitsauksesta saatuja tuloksia.

## 1.1 Tavoite

Työn tavoitteena on saada selville kuinka säiliöiden robotisoidun putkiyhteiden hitsaamisen kanssa yleensä toimitaan. Tavoitteena on myös selvittää ongelmia jota aiheen kanssa esiintyy. Suppeasti pyritään esittämään myös ratkaisuja löydetyille ongelmille.

Työn teoriaosuus käsittelee robotisointia yleisesti, mihin robotisoinnilla pyritään sekä esitellään robotisointiin soveltuvia hitsausprosesseja. Teoriaosassa otetaan esille myös putkille tarvittava säiliöiden aukotus, jonka osalta käsitellään robotisoitu plasmaleikkaus. Teoriaosuudessa esitellään myös kaksi etäohjelmointisovellusta, jotka on kehitetty säiliöiden aukotusta ja putkiyhteiden hitsaamista varten.

Työn käytännön osuudessa tutkitaan Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa erään säiliötä valmistaman yrityksen lähettämän koekappaleen robottihitsattavuutta. Tutkimuksen suorittamisesta sekä tuloksista kerrotaan. Käytännön osuudessa esitetään myös joitakin pieniä ratkaisuehdotuksia tutkimustuloksissa ilmenneille ongelmille.


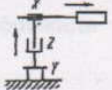


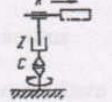





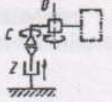


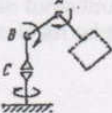


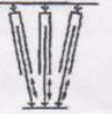

## 1.2 Rajaus

Työn aiheen pääpaino on teräksistä valmistettavien pyörähdyssymmetristen säiliöiden kehälle liitettävien putkiyhteiden robotisoitu hitsaus. Säiliöiden ja putkien ainevahvuudet on rajattu noin 10-50 mm. välille, jolloin joudutaan käyttämään monipalkohitsausta. Läpihitsautuvuusvaatimus on edellytyksenä. Oletuksena on myös, että robotilla ei voida suorittaa hitsaus kuin yhdeltä puolelta.

## 2 ROBOTIT

Kansainvälisen robotiikkayhdistyksen määrittäminen robotille on seuraavanlainen. ”Robotti on uudelleen ohjelmoitavissa oleva monipuolinen vähintään kominivellinen mekaaninen laite, joka on suunniteltu liikuttamaan kappaleita, osia, työkaluja tai erikoislaitteita ohjelmoitavin liikkein monenlaisten tehtävien suorittamiseksi teollisuuden sovelluksissa” (Kuivanen 1999, 13.)

Erilaisia teollisuusrobotteja on suunniteltu runsaasti. Kuvassa 1 on esitettyä yleisempien robottityyppien rakenteet, niiden kinemaattiset kaaviot ja työalueet standardin ISO 8373 mukaan.. (Kuivanen 1999, 12-14.)

Nimitys pääakseleiden mukaan	Rakenne	Kinemaattinen kaavio	Työalue
Suorakulmainen robotti			
Sylinterirobotti			
Napa-koordinaatirobotti			
Scara-robotti			
Kiertävänivelinen robotti			
Rinnakkaisrakenteinen robotti			

Kuva 1. Yleisempien robottityyppien rakenne-esimerkkejä ISO 8373 mukaan (Kuivanen 1999, 12).

Kiertyvänivelrakenteiset robotit ovat tavallisimpia teollisuusrobotteja. Hitsausrobotit ovat lähes poikkeuksetta 6-akselisia, kiertyvänivelvarsirakenteisia sekä niiden ohjaus toteutetaan servomoottoreilla. Kiertyvänivelisessä robotissa kaikki vapausasteet ovat kiertyviä. Vapausasteita tarvitaan kuusi, jolloin työkalun saa mihin tahansa asentoon ja paikkaan työalueella. Tukivarret kytketään lähes poikkeuksetta peräjälkeen nykyaikaisiin teollisuusrobotteihin. Tästä seuraa että robottien kuormankantokyky on melko pieni mutta ulottuvuus on sitä vastoin suuri. (Kuivanen 1999, 16-18.)

Robottivalmistajat ovat viimeisten vuosien aikana robottien valmistuksessa ottaneet huomioon kaarihitsauksessa huomioitavia asioita, ja valmistajilta löytyy nykyisin pelkästään kaarihitsaukseen tarkoitettuja robotteja. Ennen robotit olivat yleisiä teollisuusrobotteja, joihin liitettiin vain hitsauspää. Kaarihitsausrobottien yksi isoin uudistus on käsivarren läpi kulkevat poltinkaapelit. Tämä helpottaa oleellisesti ohjelmointia, luoksepäästävyttä sekä estää kaapeleiden vaurioitumista tai kulumista (kuva 2). (Veikkolainen 2005, 38.)



Kuva 2. Motomanin EA 1900 N kaarihitsaukseen tarkoitettu robotti (Motoman 2010).

## 2.1 Hitsausrobottiasema ja laitteisto

Hitsausrobottiasema koostuu tavallisesti robotista, robottiohjaimesta, käsittelypöydästä, hitsausvirtalähteestä, langansyöttölaitteesta sekä hitsauskiinnittimistä eli jigeistä. Itsestään selviä apulaitteita robottiasemissa ovat myös polttimen puhdistus- ja langankatkaisulaite, törmäyssuoja sekä ”tynnyrilanka”. Usein esiintyy myös polttimen vaihtojärjestelmä, jonka integroiminen robottiasemaan lisää aseman käyttömahdollisuuksia oleellisesti. Polttimen vaihtoyksikkö mahdollistaa hitsausrobotin käytön myös esimerkiksi termiseen leikkaukseen.

Näin ollen robottiasemat ovat kehittyneet pelkistä hitsausasemista monitoimiasemiksi. (Hiltunen & Naams 2000, 20-23.)

## 2.2 Robottien ohjelmointi

Robotit pitää ohjelmoida jotta ne osaavat suorittaa niille tarkoitetut tehtävät. Robottien ohjelmointi voidaan suorittaa joko käsiohjainta hyväksi käyttäen on-line tilassa tai etäohjelmointiohjelmia hyväksi käyttäen off-line tilassa.

### 2.2.1 On-line ohjelmointi (opettamalla ohjelmointi)

Perinteisin ohjelmointitekniikka on opettamalla ohjelmointi. Siinä hitsauspoltin paikoitetaan robotin käsiohjaimen avulla haluttuun kohtaan ja tallennetaan asema muistiin. Tämä on työlästä etenkin jos opetuspisteitä on runsaasti. Robotti on ohjelmoinnin ajan myös poissa tuottavasta työstä. (Hiltunen 2006, 26.)

### 2.2.2 Off-line ohjelmointi (etäohjelmointi)

Erilaisia off-line -ohjelmointimenetelmiä on kehitetty poistamaan tai ainakin vähentämään opettamalla ohjelmoinnin epäkohtia. (Hiltunen 2006, 26.)

Mallipohjaisessa ohjelmoinnissa eli off-line ohjelmoinnissa ohjelmointi tapahtuu tuotannon ulkopuolisessa tietokoneessa. Off-line ohjelmoinnissa käytetään 3D graafista käyttöliittymää ja robotin ja sen oheislaitteiden simulointimalleja sekä hyödynnetään valmistettavan tuotteen suunnittelun 3D-muototietoa. Off-line ohjelmointi on paras vaihtoehto ohjelmointiin esim. kun; (Kuivanen 1999, 81–82.)

- Tuotanto on asiakasohjautuvaa
- pienet tuotantosarjat
- tuotteiden elinkaaret ovat lyhyet
- Valmistusprosessi edellyttää robotilta suurta määrää opetuspisteitä.



Kynnys off-line ohjelmoinnin käyttöön ottamiseen on kuitenkin korkea. Syynä tähän on markkinoilla olevien ohjelmien vaikeakäyttöisyys. Niiden käyttöönotto edellyttääkin käyttäjiltä pitkää opettelua ja koulutusta. (Kivioja et al. 2007, 42.)

## 3 HITSUKSEN ROBOTISOINTI

Robotit pystyvät tekemään nykyään monimutkaisiakin tehtäviä joustavasti. Hitsauksen robotisoinnilla pyritään parantamaan niin tuottavuutta kuin poistamaan hitsarit epämiellyttävistä ja raskaista työolosuhteista. Hitsauksen robotisoinnin tuomia etuja tiedetään olevan mm: (Cary et al. 2005, 289; Veikkolainen 1998, s. 26.)

- Korkea käyttösuhte
- Korkea hitsiaineentuotto
- Suuri hitsausnopeus
- Hyvä, tasainen laatu, työkierron toistettavuus
- Kustannukset ennakoitavissa, hitsausaika tiedossa
- Hitsarin ei tarvitse altistua haitallisille kaasuille

### 3.1 Robotisoinnin tuomat vaatimukset ja haasteet

Robotisoinnin avulla hitsilaadusta saadaan vakio. Robotti suorittaa hitsauksen aina samalla tavoin. Tästä johtuen, jotta laadusta saataisiin hyvä, on hitsausta edeltävät työvaiheet ja suunnitteluun kiinnitettävä erityistä huomiota. Robotisoitu hitsauksella on vaikutusta kaikkiin sen edeltäviin työvaiheisiin lähtien materiaalin puhtaudesta, varastoinnista, esikäsittelystä päätyen osavalmistukseen sekä esikasaukseen. Nämä on tuttuja jo käsihitsauksesta, mutta robotisoidussa hitsauksessa nämä korostuu entisestään. (Veikkolainen 1998, s. 27.)

Liitoksen luoksepäästävyys nousee erittäin tärkeään osaan hitsauksen robotisoinnissa. Hitsi on sijoitettava niin, että sen ympärillä on riittävästi tilaa hitsauspäälle. Ehtona on myös, että kaikkien hitsien luokse päästään yhdessä hitsausvaiheessa. Lisäksi, kappaleenkäsittelylaitteet ja kiinnikkeet jotka pitävät kappaletta paikoillaan voivat häiritä hitsauslaitteita. (Leino 1998, s. 23; Norris & Clayton 2008 s.68.)

Saadakseen työstä mahdollisimman kannattavaa tulisi investoinnissa parantaa kappaleen valmistusprosessia suurempiin kappalemääriin ja taata että kappaleet suunnitellaan robottiystävällisiksi. Kappaleiden pitää olla johdonmukaisia ja tarkkoja mitoiltaan sekä niiden paikka pitää olla toistettavissa hitsauskiinnittimissä. Näin turvataan hitsauspaikat toleranssien sisällä toistettavasti sijoittamalla kappale aina samaan paikkaan tuotannon eri kierroksissa. Robottiystävälliset liitokset ovat jatkuvia tavalla, että tuotantoseisauksia tapahtuu mahdollisimman vähän. (Norris & Clayton 2008, s. 68.)

### 3.2 Railonvalmistus

Railonvalmistukselta vaaditaan paljon, jotta robottihitsaus onnistuisi. Railotilavuudesta tai railogeometriasta esiintyvät erovaisuudet aiheuttavat ongelmia. Oikein valitulla railolla varmistetaan niin hitsin hyvä laatu kuin työn mielekkyys. Tästä johtuen railonvalmistus liittyy kiinteästi myös hitsauskustannuksiin ja laatuun. Railopintojen oikea korkeus, puhtaus, muoto, juurisärmien murtaminen jne. ovat kaikki esimerkkejä jotka on hallittava hyvään hitsilaatuun pyrittäessä. (Veikkolainen 1998, s. 26; Tekninen tiedotus 6/90, s. 5.)

Robottihitsattavat tuotteet vaativat tarkkuutta osavalmistukseen. Automatisoidussa hitsauksessa puutteellisen tunkeuman tai läpipalamisen vaara on suurempi kuin käsin hitsatessa. Osien valmistustarkkuuden lisäksi osat kiinnitetään usein hitsausta varten epäsuorasti, jolloin mittojen tulee olla niin tarkat, että railosta tulee vaatimukset täyttävä ilman railosta suoraan tapahtuvaa kohdistamista. Käsin tapahtuvan sekä tavanomaisen optisen polttoleikkauskoneen tarkkuus ei välttämättä riitä robottihitsauskappaleiden valmistukseen. Parempaan tarkkuuteen päästään käyttämällä numeerisesti ohjattuja koneita, plasmaleikkausta, laserleikkausta jne. Erittäin hyvään tulokseen päästään koneistamalla leikatut railon pinnat ennen hitsauksen suorittamista. (Tekninen tiedotus 16/88, s. 28.)

### 3.3 Juurituen käyttö

Yhdeltä puolelta hitsatessa läpihitsautuminen voi aiheutua ongelmaksi. Se on käsin hitsatessakin ammattitaitoa vaativaa ja hidasta. Juurituen käytön tarkoituksena on tukea ja suojata hitsisulaa sekä antaa hyvä muoto pohjapalon juurenpuolelle. Juurituet asennetaan siten, että juurituen ura asettuu keskelle hitsattavan railoin juurta. Juuritukina voidaan

käyttää irrotettavaa tai kiinteää juuritukea. Irrotettava juurituki on yleisesti keraaminen, kuparinen tai lasinauha. (Lepola et. al. 1998, s. 187-188.)

### 3.4 Railon seuranta

Railon seurannaksi kutsutaan kaikkia toimenpiteitä, joilla hitsauspään asema ohjataan oikealle kohdalle raitoa. Railon seurannan avulla korjataan poikkeamia railon ja hitsauspään aseman välillä. Näitä poikkeamia aiheuttaa erityisesti kappaleen kiinnittäminen, railon sovittaminen sekä hitsauspään liikuttaminen (työaseman epätarkkuudet). Myös hitsauksen aikaiset vetelyt muuttavat railon asemaa. Adaptiivisessa hitsauksessa ohjelma muuttaa automaattisesti hitsausarvoja railon seurannan lisäksi. (Jenström & Kujanpää 2001, s. 5; Martikainen 2008, 194.)

Railon seurantaa on käytettävä, kun

- Hitsattavia osia ei saada paikoitettua tarkasti ja hyvällä toistettavuudella
- Osat ovat massiivisia ja monimutkaisia, ja niiden kiinnittäminen tulee erityisen kalliiksi
- Osilla on huono valmistustarkkuus
- Tarkkojen osien valmistus esimerkiksi koneistamalla katsotaan liian kalliiksi
- Syntyy suurempi hitsausmuodonmuutoksia kuin mitä hitsausprosessin parametrit sallivat
- Käytetään etäohjelmointia.

(Martikainen 2008, 195).

Railon seurantamenetelmät on jaettavissa kosketukseen perustuviin sekä ilman kosketusta tapahtuviin menetelmiin. Kosketukseen perustuvat anturit voivat olla mekaanisia tai sähköisiä. Ilman kosketusta tapahtuvat anturit voidaan jakaa valokaaren läpi tapahtuvaan railon seurantaan ja esimerkiksi optisiin antureihin. (Martikainen 2008, 196–202.)

Valokaaren läpi tapahtuvassa railon seurannassa valokaari itsessään toimii ”anturina”. Menetelmällä railon haku tapahtuu käyttäen hitsauslangan päätä tai kaasusuutinta korkeajännitteisenä alhaista virtaa käyttävänä anturina. Menetelmä perustuu valokaaren vaaputukseen hitsausrailon sivuille, ja hitsausvirran muutoksien mittaamiseen

ääriassennoissa. Alkupiste määräytyy muutaman ohjelmoidun referenssipisteen avulla. Löydettyään railonkyljet, paikoitus tapahtuu railoin keskiviivan yläpuolelle. Sisä- ja ulkonurkat pystytään määrittämään ”kolmen pisteen haun avulla”. Menetelmä on selvästi yleisin mig/mag-hitsauksessa. Tarkkuus on tyypillisesti +/-0,4 mm tietämällä. (Martikainen 2008, 196-197.)

Valointensiteettiä mittaavassa menetelmässä laserdiodilta tuleva valo kohdistaan railoon hitsauspään eteen. Työkappaleen pinnalta heijastuneesta valosta, saadaan jännitejakauma, jonka avulla voidaan päätellä railon sijainti. Valointensiteettiä mittaavat menetelmät sopii I- ja V-railoille sekä piena- ja päittäisliitoksille. Menetelmällä päästään parhaimmillaan jopa noin +/- 0,1 mm. tarkkuuteen. Puuttena on, että menetelmällä pystytään määrittelemään ainostaan railon sijainta ja ilmaraon suuruus. Yleensä muuta railoinfomaatiota ei menetelmällä saada selville. Ruosteen, hilseen, maalin sekä naarmujen heijastavuus on myös ongelmana. Menetelmää ei ole vielä kaupallisesti hitsausovelluksissa. (Martikainen 2008, 196-197.)

Strukturoidun laservalon menetelmässä anturin lasersäde hajoitetaan valotasoksi ja projisoidaan hitsauspään eteen. Valojuovaa tarkastellaan kameralla hieman vinosta suunnasta jättämällä varsinainen hitsauskohta havaintokentän ulkopuolelle. Tuloksena saadaan tietoa niin railon paikasta kuin geometriasta. Voidaan tehdä myös muutoksia hitsausarvoihin. Seurantatarkkuus on parhaimmillaan +/- 0,1 mm. (Martikainen 2008, 199.)

Lasersäteen pyyhkäisyyn perustuvat menetelmässä HeNe-laserin sädettä poikkeutetaan peilien avulla jatkuvasti hitsauskohdan edellä railoon nähden kohtisuorassa suunnassa. Heijastuneesta säteestä määritetään komiomittausperiaattella heijastuspisteen etäisyys, josta saadaan railon paikka, leveys ja syvyys selville. Menetelmällä päästään noin +/- 0,2 mm tarkkuuteen. (Martikainen 2008, 199.)

Hitsisulan tarkkailuun perustuvassa menetelmässä käytetään apuna infrapunaa, konenäköä, ultraääntä tai erilaisia säteilyjä. Menetelmä on periaatteessa parhaita, mutta vaikea toteuttaa ja onkin vielä laboratorioasteella. (Martikainen 2008, 200.)

Kosketukseen perustuvat menetelmät eli mekaaniset ja sähkömekaaniset menetelmät tarvitsevat jonkin pinnan, josta se voi ottaa suunnan. Menetelmä on yksinkertainen ja halpa ja soveltuu monille hitsausprosesseille. Tuntoelin soveltuu kuitenkin yleensä vain tietyn

tyyppisen railon seuraamiseen ja jyrkkien mutkien ja monimutkaisten muotojen seuraaminen on vaikeaa. Tuntoelimet menettävät myös helposti kosketuksen hitsausrailoon. Mekaaniset menetelmät ovat yksinkertaisia, mutta kömpelöitä laitteita. (Martikainen 2008, 201.)

Induktiivisessa railon seurannassa anturi toimii muuntajana, josta verrataan syöttökäämiin ja mittauskäämeihin indusoituneita jännitteitä. Kun ulosjännite on nolla, anturi on tasapainossa, ja tässä sitä pyritään pitämään. Poikkeamat ovat merkkejä korkeuden -tai materiaalin epäjatkuvuudesta. (Martikainen 2008, 202.)

### 3.4.1 Adaptiivinen hitsaus

Adaptiivinen hitsaus on hitsausta, jossa prosessin hallintalaitteisto mittaa hitsausolosuhteita kuten railon geometriaa tai syntynyttä hitsiä automaattisesti. Saatua tietoa käsitellään ja muutetaan takaisinkytkennän kautta siten, että jatkuvasti saavutetaan vaadittu laatu. (Cary et al. 2005, s. 291.)

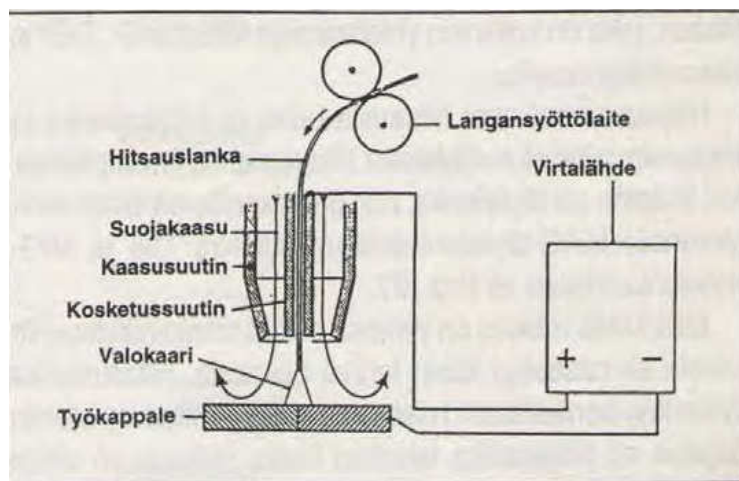
## 3.5 Kaarihitsausprosesseja joita käytetään robotioinnissa

Tässä kappaleessa esitellään robotisointiin käytettävistä kaarihitsausprosesseista. Esiteltävinä prosesseina on mig/mag-, tig- sekä plasmahitsaus. MAG-täytelankahitsauksesta kerrotaan myös, koska se on käytetty prosessi säiliön putkien hitsauksessa sekä vaikeissa asentohitsauksissa.

### 3.5.1 MIG-/MAG

MIG-/MAG hitsaus on metallikaasukaarihitsausta, jossa valkokaari palaa työkappaleen ja hitsauslangan välillä (Kuva 4). Prosessissa käytettävä suojakaasu, joka suojaa kaaritilaa ja hitsisulaa ympäröivältä ilmalta määrää onko kyseessä mig- vai mag-hitsaus. MIG-hitsauksella hitsataan ei-rautametalleja inertillä suojakaasulla. MAG-hitsauksella hitsataan sitä vastoin teräksiä ja ruostumattomia teräksiä aktiivisella suojakaasulla. MIG-/MAG-hitsaus on yleisprosessi hitsattaville materiaaleille, ja se soveltuukin yhtä hyvin niin teräksille kuin useimmille ei rautametalleille. Valitsemalla sopivat hitsausarvot MIG-/MAG hitsaus voidaan suorittaa missä tahansa hitsausasennossa. Tämä on etu erityisesti silloin kun edullisiin hitsausasentoihin ei ole mahdollisuutta. MIG-/MAG hitsauksella voidaan hitsata

0,8 mm aineenpaksuudesta ylöspäin. MIG-/MAG-hitsaus on käytetyin prosessi robotisoidussa hitsauksessa., koska se on helposti automatisoitavissa. Lähes kaikki robotisoitu hitsaus suoritetaan mig/mag-prosesseilla. (Lukkari 2002, s. 159; 175-177.)



Kuva 4. MIG-/MAG-hitsauksen periaatekuva (Lukkari 2002, s. 159).

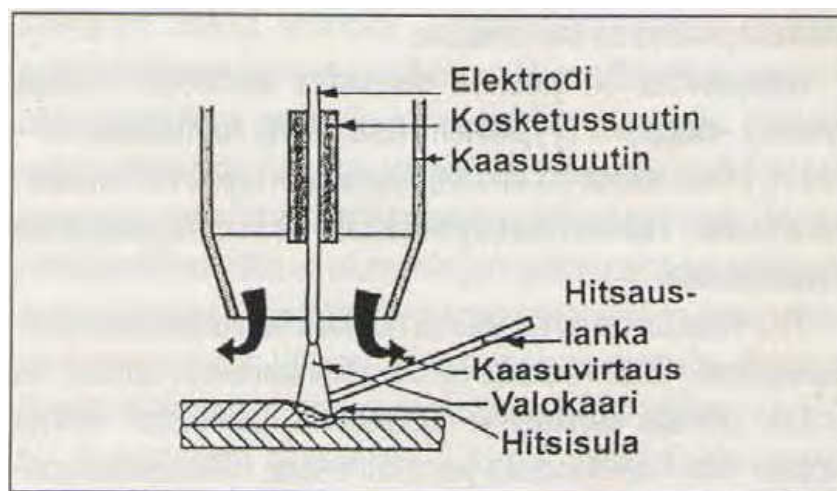
### 3.5.2 MAG-täytelanka

MAG-täytelankahitsaus on toimintaperiaatteeltaan hyvin samankaltainen kuin mag-hitsaus. Erona on että hitsauslankana käytettävä umpilanka on korvattu täytelangalla. Täytelanka on putkimainen, jonka teräskuoren sisällä on täytejauhe. Kuoren tehtävänä on suojata täytejauhetta, antaa muoto hitsiaineelle, tuottaa sulatessaan hitsiainetta ja toimia virtajohtimina. Prosessissa käytetään mag-hitsauksen tavoin aktiivista suojakaasua ja prosessinumero on tällöin 136. Täytelankahitsaus voidaan suorittaa myös ilman suojakaasua, jolloin prosessinumero on 114. Tällöin lisäainelankana käytettävä täytelanka suorittaa itse suojaus. Tätä on kuitenkin harvemmin käytetty etenkin Suomessa. Yleisemmin käytetty langanpaksuus on 1,2 mm, ja tällöin hitsaus on soveltuva 3 mm. aineenpaksuudesta ylöspäin. Menetelmä sopii hyvin terästen hitsaukseen, ja sitä käytetään raskaan ja keskiraskaan hitsaavan teollisuuden aloilla niin levy, -kuin putkihitsaukseen sekä asentohitsauksissa. MAG-täytelankahitsaus on umpilanka- MIG-/MAG hitsauksen tavoin helposti automatisoitavissa. (Lukkari 2002, s. 228; 231-235.)

### 3.5.3 TIG

TIG-hitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa sulamattoman volframelektronidin ja työkappaleen välillä. Kuvassa 5 on esitettyä TIG-hitsauksen periaate. Prosessissa käytetään suojakaasua suojaamaan elektrodin kuumaa kärkeä sekä hitsisulaa.

Suojakaasuina käytetään argonia tai heliumia. Menetelmällä voidaan hitsata lisäaineen kanssa tai ilman lisäainetta. TIG-hitsaus on ylivoimainen muihin hitsausprosesseihin verrattuna hitsatessa ohuita ainevahvuuksia sekä pohjapalkoja. Yleisemmät ainevahvuudet joita TIGillä hitsataan, on 0,5-6 mm. välillä. TIG-hitsausta käytetään myös suurempien ainepaksuuksien pohjapalojen hitsaukseen. Yksi tärkeimmistä TIG-hitsauksen käyttökohteista onkin kuumalujien paineenalaisten putkistojen hitsaus. Niistä ohuet putket hitsataan kokonaan TIG – hitsauksella ja paksuseinäisistä vain pohjapalko. Menetelmä soveltuu hyvin kaikille hitsausasennoille. (Lepola & Makkonen 1998, s. 197-199; Lukkari 2002, s. 255.)



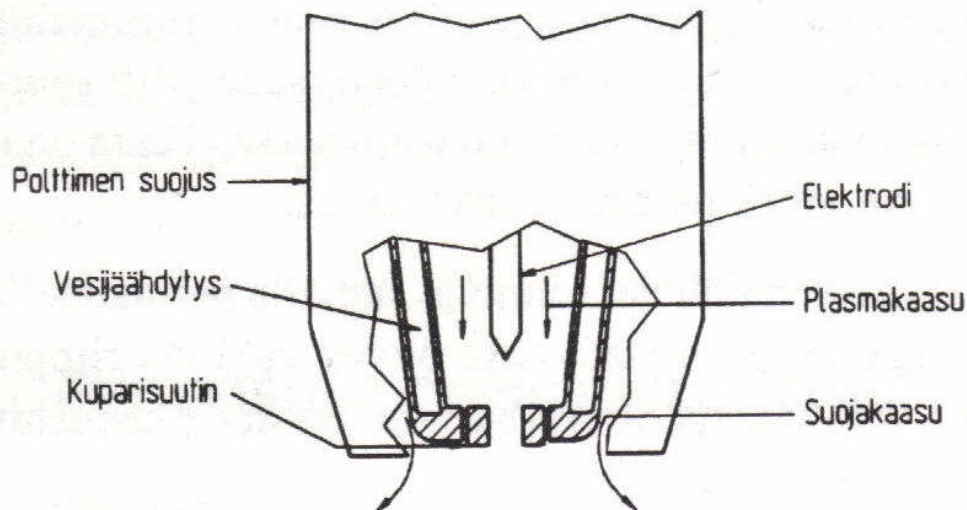
Kuva 5. TIG-hitsauksen periaate (Lukkari 2002, s. 249).

MIG-MAG – hitsaukseen verrattuna TIG- hitsaus on paljon vaikeammin robotisoitavissa. Elektrodi on erityisen herkkä vioittumiselle. Ahtaita railoja hitsatessa robotisoitu tig hitsaus voi myös koitua ongelmaksi etenkin jos käytetään lisäainelangansyöttöä. Tähän on kehitetty robotisointia varten TOP TIG-menetelmä. Menetelmällä polttimen kokoa on saatu pienennettyä syöttämällä lisäainelanka polttimen kaasusuuttimen läpi lähelle elektrodin kärkeä. Samalla menetelmällä myös hitsausnopeus on tavanomaiseen korkeampi. Toinen TIG –robotihitsaussovellus, jolla on saatu hitsausnopeutta kasvatettua on TIP TIG. (Norris & Clayton 2008, s. 68; Fortain et al. 2008, s. 38.)

### 3.5.4 Plasma

Plasmahitsauksessa hitsauslämmönlähteenä on valokaaren muodostama plasma. Hitsauksessa plasma saadaan aikaiseksi valokaarella, joka palaa elektrodin ja suuttimen välissä ionisoiden suuttimessa virtaavaa plasmakaasua. Näin valokaaren lämpö siirtyy tehokkaasti virtaavaan plasmakaasuun, joka muodostaa plasman kuroutuessaan suuttimen

läpi. TIG-hitsauksesta poiketen plasmahitsauksessa elektrodi on suojuissa polttimen sisällä. Periaatekuva plasmapolttimen rakenteesta on kuvassa 6. Plasmahitsaus on ainoa kaarihitsausprosessi jonka energiateho riittää sulattavan hitsauksen lisäksi myös lävistävään hitsaukseen. (Lukkari 2002, s. 272-273.)



Kuva 6. Periaatteellinen kuva plasmapolttimen rakenteesta. (Tekninen tiedotus 5/97, s. 12.)

Plasmahitsauksesta jauheplasmahitsaus on hyvin robotisoitavissa. Jauheplasmahitsauksessa polttimen liikuttelu on riippumatonta lisäaineentuonnista, koska lisäaine syötetään menetelmässä jauheen joukossa. Edullista tälle menetelmälle on robotisointia ajatellen myös polttimen pieni koko. Jauheplasmahitsauksen haittana on perinteiseen plasmahitsaukseen verrattuna polttimen pienempi virrankestokyky sekä pienempi hitsiaineentuotto. (Tekninen tiedotus 5/97, s. 10.)

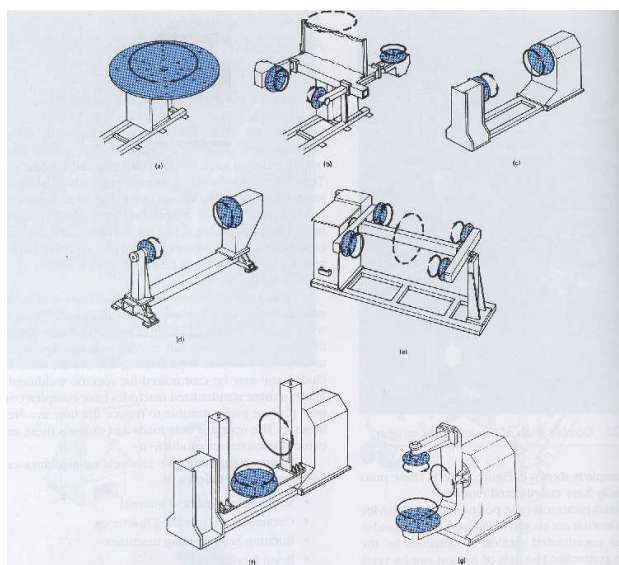


## 4 SÄILIÖIDEN KÄSITTELYLAITTEISTOT

Säiliöille mahdolliset käsittelylaitteet riippuvat siitä, minkälaisista ja kokoisesta säiliöstä on kyse. Jotta robotisoitu hitsaus onnistuisi joustavasti, olisi käsittelypöydän hyvä toimia synkronissa hitsaavan robotin kanssa. Kiinnikkeet eivät myöskään saa häiritä hitsausta.

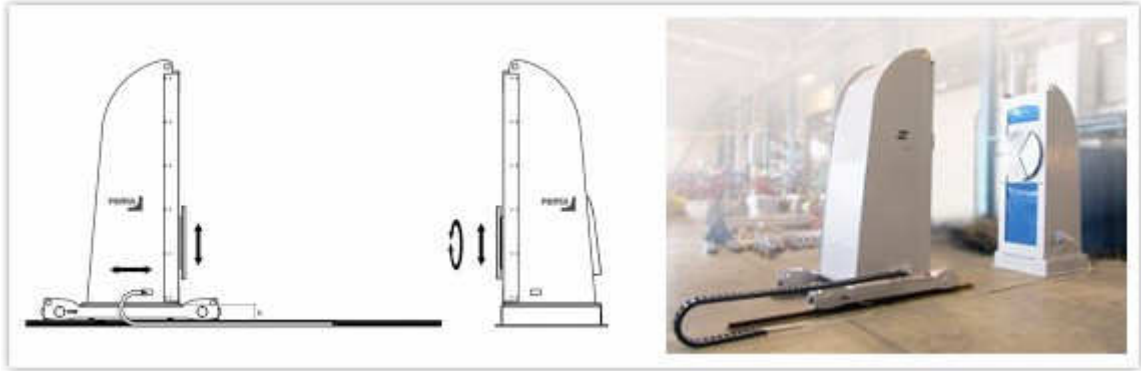
### 4.1 Käsittelypöydät

Käsittelypöytiä on olemassa 1 ja 2 akselisia. 2-akselisten etuina on että, kappaleen saa käännettyä aina hitsausta varten edulliseen asentoon verrattuna 1-akseliseen käsittelypöytään. Käsittelylaitteisto voi olla myös 2-asemainen, jolloin toista puolta voidaan koota kun toista puolta hitsataan. Kuvassa 7 on esitettyinä erilaisia käsittelypöytämalleja. (Cary et al. 2005, 301-302.)



Kuva 7. Erilaisia kappaleenkäsittelypöytiä a, c, d ovat yksiakselisia, e), g) 2 – akselinen vastapöytä f) 2-akselinen hitsauspöytä, b) kaksiasemainen vastapöytä. (Cary et al. 2005, 301-302.)

Pemamek Oy:n tuotteissa on vastapöytiä, jotka sopivat pitkien pyöritettävien kappaleiden käsittelyyn. 3500-40000 HSLA-TSLA vastapöydän kuormankantokyky on 3,5 tonnista 40 tonniin (kuva 8). (Pemamek 2010.)



Kuva 8. Pemamekin tarjoama vastapöytä 3,5-40 tonnin painoisille pitkien pyörähdyssymmetristen kappaleiden käsittelyyn. (Pemamek 2010.)

#### 4.2 Käsittelyrullastot

Suurten pyörähdyssymmetristen kappaleiden käsittelyyn on olemassa rullastoja. Rullien malleja ja kokoja löytyy käyttötarkoituksesta riippuen laajalla alueella, ja kuormankantokyky voi nousta useisiin tuhansiin tonneihin asti. Rullien pyöritys voi olla automatisoidusti asetettu tai manuaalinen. (Cary 2005, 298.)

Pemamekiltä löytyy rullastoja kappaleiden painosta, halkaisijasta ja muodoista riippuen erilaisia vaihtoehtoja. Valikoimasta löytyy rullastoja 10 tonnista aina 1200 tonnin kuormituskapasiteettiin saakka. Rullastojen avulla kappale voidaan asettaa hitsausta tai muita työvaiheita varten aina parhaimpaan asentoon. Kuvassa 9 on esitettyä Pemamikin rullasto joka käsittelee suurta pyörähdyssymmetristä kappaletta. (Pemamek 2010.)



Kuva 9. Säiliöiden käsittelylaitteena voi olla rullastot, jolloin säiliön saa käännettyä hitsausta varten edullisimpaan asentoon. (Pemamek 2010)

Kuvassa 10. on tapaus joka on varmasti toimivin ja käyetetyin ratkaisu säiliöiden käsittelylaitteeksi. Tapauksessa säiliön pää lepää rullien päällä ja toinen pää kiinnitetty laitteeseen, joka pyörittää säiliötä.



Kuva 10. Säiliön käsittelylaitteisto. Toinen pää makaa rullien päällä ja toinen pää kiinnitetty laitteeseen, joka pyörittää säiliötä. (Cloos 2003.)

## 5 ROBOTISOITU PLASMALEIKKAUS JA AUKOTTAMINEN

Jotta yhteiden robotisoitu hitsaus olisi mahdollisimman vaivatonta, olisi hyvä jos myös yhteelle tarvittava säiliöiden aukotus tehtäisiin robotisoidusti. Tällä tavalla sen saisi leikattu tarkemmin, nopeammin ja paremmalla jäljellä kuin käsin tehtynä. Tässä kappaleessa käsitellään plasmaleikkausta yleisesti sekä sen robotisointia sekä mitä vaikeuksia menetelmällä ilmenee.

### 5.1 Plasmaleikkaus

Plasmaleikkaus on termistä leikkaamista, jossa suuren lämpötilan omaava plasmavalokaari sulattaa metallin, ja kaasun suuri virtausnopeus puhaltaa sulan metallin pois railosta. Plasmavalokaaren tuottamiseen tarvitaan avoin valokaari, sopiva kaasu sekä sähköenergiaa. Kaasuna voi olla typpi, vety, argon, helium tai ilma. Prosessissa käytetään tasavirtalähdettä energialähteenä ja virtalähteeltä tulevaa virran voimakkuutta voidaan säätää käyttötarkoituksen mukaan. Näiden lisäksi plasmaleikkauksessa tarvitaan vielä tarkoitukseen sopiva plasmapoltin. Plasmakaaripolttimia voidaan käyttää sekä leikkauksissa että hitsauksessa. (Lepola & Makkonen 1998, s. 316-317.)

Plasmaleikkauksen etuina voidaan pitää sen nopeutta, tarkkuutta sekä menetelmällä pystyy leikkaamaan lähes kaikkia metalleja ja metalliseoksia. Esilämmitystä materiaalille ei tarvita. Lämmöntuonti on myös menetelmässä pientä, jolloin muodonmuutokset jäävät pieneksi ja leikkaus on tarkkaa.

## 5.2 Plasmaleikkaus robotilla

Plasmaleikkaus on todistanut olevansa soveltuva prosessi robotisoinnille. Automatisoitu plasmaleikkaus on tehnyt prosessista joustavamman monimuotoisten kappaleiden leikkaukseen. Robotisoidulla plasmaleikkauksella voi suorittaa leikkauksen lisäksi myös muita tehtäviä, esimerkiksi kaiverrusta. (Trumbull 2006, s. 48.)

Robotisoitu plasmaleikkausta voidaan käyttää useisiin leikkaustehtäviin, kuten myös monimutkaisille pyörähdyssymmetrisille osille. Yksittäistä robottia voidaan käyttää niin plasmaleikkaukseen ja hitsaukseen. Tämä auttaa vähentämään osien kappaleenkäsittelyä ja tuotantoaikaa. Roboteilla voidaan myös hallita nopeaa työstönopeutta. (Trumbull 2006, s. 48.) Markkinoilla on eri valmistajilta useita eri robottimalleja joita käytetään plasmaleikkaukseen. Kuvassa 3 on esitettyä ABB:n robottimalli jota käytetään kappaleenkäsittely- ja hiomistehtävien lisäksi myös plasmaleikkaukseen. (used-robots 2010)



Kuva 3. ABB:n 4400/60 robotti jota käytetään plasmaleikkaukseen (abb 2010).

Robotisoitu plasmaleikkauslaitteisto käyttää samoja virtalähteitä ja useita samoja polttimia kuten käsikäyttöiset laitteet ja leikkauspöydät. Lisäksi robotisoituun plasmaleikkauslaitteistoon kuuluu: (Trumbull 2006, 48.)

- Robotille erityinen plasmapolttimenpidin
- Työkalun vaihtojärjestelmä, jos useampia polttimia käytetään
- Työkalunpitimiä käyttökelpottomille polttimille
- Kaapeleiden turvallinen johtaminen virtalähteeltä polttimelle
- Savunpoisto
- Robotille roiskesuoja
- Lisäksi ylimääräisiä komponentteja estämään suurtaajuuksine virta kulkemasta robotin käsivarren läpi

Työkalunvaihdinta tarvitaan kun käytetään useita polttimia samalla robotilla. Työkalunvaihdin sijaitsee robotin ranteessa ja siinä voi olla useita erilaisia työkalunpitimiä. Työkalunvaihdin voidaan ohjelmoida tarttumaan oikeisiin pitimiin ja vaihtamaan takaisin lukemattomia kertoja työkierron aikana. (Trumbull 2006, 48.)

Tyypillinen työkalupidin voi pitää useita polttimia. Sijainti voi olla missä tahansa, mihin robotti voi vaan ylettyä ottamaan tarvitsemansa työkalun. On kuitenkin tärkeää, että työkalupidin sijaitsee paikassa, jossa ei ole kaapeleiden sotkeutuminen tai vaurioituminen mahdollista. Kaapelienpitimiä käytetään estämään kaapelien sotkeutuminen ja vaurioituminen. Robotin ohjauslaitteiden suojaksi on hyvä asentaa myös erillisiä eristesuojauksia, jotta korkeataajuinen virta ei pääse iskemään takaisin robotin käsivarren läpi. (Trumbull 2006, 48.)

Leikkauskohdan sijainnin määrittämiseen voidaan käyttää erilaisia hakumenetelmiä, kuten hitsauksessakin käytetään. Tämä voidaan suorittaa joko käyttämällä hitsauspoltinta, tai plasmapolttimeen asennettua erillistä anturia. Usein hitsauspolttimessa on jo erityinen kosketusanturi joka voidaan kytkeä päälle kun kappaleen sijainti pitää määrittää. Leikkauspään erillistä anturointia voidaan myös käyttää leikkauskohdan etsimiseen. Yleensä helpoin tapa kappaleen oikean sijainnin määrittämiseen on tehdä varmaksi se, että työkappaleen kiinnitys on tehty juuri oikein ja oikeaan paikkaan täsmällisesti. (Trumbull 2006, 48.)

Robotille tarvitaan myös erillistä suojausta leikkauksesta syntyvän lian ja kipinöiden varalta. Ilman suojausta robotin käsivarren käyttöikä lyhenee. Roiskeilta voidaan usein välttyä ohjelmoimalla roiskeet suuntautumaan robotista poispäin. Tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista, ja tällöin tarvitaan erillistä roiskesuojaa. Lisäksi savunpoistosysteemit voidaan asentaa laitteistoon vähentämään leikkaussavun määrää. (Trumbull 2006, 49.)

Riippuen käyttökohteesta, voidaan valita monenlaisia virtalähteitä. Yksinkertaisia laitteita voidaan käyttää kun robotin on lähetettävä virtalähteelle ainoastaan on/off- signaalit. Monimutkaisemmissa leikkaustehtävissä, kuten säiliöiden aukotus on, tarvitaan useita erilaisia parametriasetuksia. Mikäli halutaan että robotti hoitaa nämä automaattisesti, niin tarvitaan paljon parempi ja kalliimpi leikkauslaitteisto.

Kolme päätyyppiä leikkauspolttimen korkeuden säätöön plasmaleikkauksessa ovat: 1. ohjelmoidut pisteet, 2. mekaaninen korkeuden kontrollointi, sekä 3. Kaarijännitteen seuraamiseen perustuva säätö. (Trumbull 2006, 49.)

Ohjelmoitujen pisteiden käyttäminen vaatii säännöllisiä mittatarkkoja kappaleita ja leikkaus tapahtuu robotin opetettua rataa pitkin. Tämä toimii usein putkien leikkaamiseen, koska tällöin sijainti muuttuu hyvin vähän leikattavan putken pinnalla. Mekaaninen korkeuden säätö, jossa esim. polttimeen on asennettu pyörät, ei ole kovin laajasti käytetty menetelmä. Mekaanisen menetelmän heikkous tulee esille erityisesti silloin kun tarvitsee leikata kulmien ympäri. Kaarijännitteen seuraamiseen perustuva menetelmä on yleisemmin käytetty plasmaleikkauksessa. Tämä menetelmä vaatii yleensä erityisen robottiohjelman. (Trumbull 2006, 49.)

### 5.3 Robotisoitu säilön aukottaminen plasmaleikkaamalla

Putkiyhteisiin tarvittava aukotus voisi olla mahdollista tehdä robotisoidusti plasmaleikkaamalla. Menetelmällä korkeuden seuranta on kaikkein haastavinta saada onnistumaan. Varsinkin, jos aukko vaatii viisteen, niin kaarevaan pintaan tämän leikkaaminen on haasteellista.

Kappaleessa 6.1 esiteltävä mooses ohjelmistosovellus ottaa plasmaleikkauksen vaatimukset huomioon. Ohjelman kautta robotilla on käytössään kaksi sensoria. Itse leikkauksessa käytetään hyväksi kaarijännitettä, jonka avulla poltin pysyy kohtisuoraan leikattavaan pintaan nähden. Jos aukotus vaatii viisteen, niin aukotuksen jälkeen on kosketustappisensori

(jännite-kontakti), jolla ko. kohdasta mitataan sekä aukon sisähalkaisija että lieriön ulkopinta. Näiden tietojen perusteella tehdään viisteleikkaus. Lisäksi jos mittauksessa ilmenee että esiohjelmoituun rataa on korjaamista, niin korjaus tehdään. (Meuronen 2010.)

Korkeudenseurannassa valokaaren jännitteen seuranta vaatii ulkopuolisen juuri siihen tarkoitukseen vaaditun tietokoneen. Jos anturointina käytetään laseria niin sitä voi häiritä plasmaleikkauksen roiskeisuus, joka sekoittaa anturoinnin. Robottikäsiavarteen voi liittää myös lyhyellä lineaariliikkeellä varustetun komponentin, joka olisi tarkoitettu vain plasmaleikkauksen säätämiseen. Tämä komponentin kuorma voi kuitenkin koitua ongelmaksi jos käytetään robottia, jonka kuormankantokyky on noin 4-6 kg. Adaptiivinen korkeudensäätäminen on siis plasmaleikkauksessa hankalaa. (Kuikka 2009, s. 102.)

## 6 OHJELMISTOJA ROBOTISOITUUN AUKOTUKSEEN JA PUTKIYHTEIDEN HITSAAMISEEN

Ohjelmistovalmistajat ovat kehittäneet putkien tai säiliöiden leikkaamisen ja hitsaukseen tarkoitettuja omia ohjelmistosovelluksia. Tässä kappaleessa esitellään Igripin jo kymmenen vuotta sitten kehitelty ohjelma sekä uudempi vasta tullut Autocamin MOSES-pipe ohjelmastosovellus. Tässä kappaleessa käsiteltävät ohjelmien tiedot on otettu pääasiassa ohjelmistojen esitteistä, joten ohjelmien huonoja puolia ei tule esille. Yhteistä näille ohjelmille on se, että molempien ohjelmointi suoritetaan etäohjelmointina sekä leikkauksessa poltin pysyy halutessaan koko ajan samansuuntaisena leikattavaan pintaan nähden.

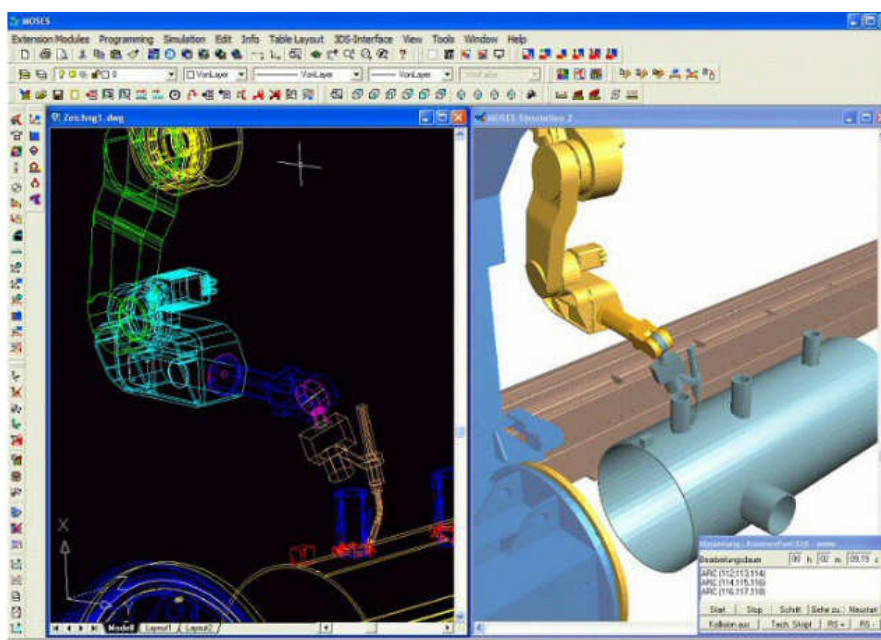
### 6.2 Moses – pipe

Moses-pipe on autocad sovellus ja se operoi autocadin käyttäjäympäristössä. Sovellus on graafinen etäohjelmointijärjestelmä joka on tarkoitettu putkien ja säiliöiden leikkaamiseen ja hitsaamiseen. Ohjelman ominaisin piirre on se, että se kykenee luomaan robottiohjelman täysin automaattisesti. (Moses 2009, s. 1)

Säiliöön tehtävät aukot sekä niihin hitsattavat yhteydet voidaan luoda ja tallentaa yhdessä kaikkine niihin liittyvine teknillisine tietoineen liittyen hitsaamiseen ja leikkaamiseen. Tämän johdosta muuttujia pystytään käsittelemään tehokkaasti ja edellisen työkappaleeseen tallennettuihin kappaleisiin voidaan tehdä muutoksia. Sekä leikkaukseen liittyvät tiedot että

hitsausrailon valmistelut ohjelma liittää automaattisesti suunniteltuun tuotteeseen. (Moses 2009, s. 1.)

Putkien ja säiliön graafiset mallit ovat helposti muodostettavissa ilmoittamalla mittatiedot, seinämän paksuus, halkaisijat sekä putken pituus. Ohjelma luo nämä mallit näin automaattisesti. Putkiyhteiden paikat on myös mallinnettavissa pelkästään niiden paikkatietojen asettamisella. Kuva 11 on todellinen tilanne ohjelmoinnin aikana. (Moses 2009, s. 2.)



Kuva 11. Moses-pipe ohjelman kuva simulointitalanteessa jossa ohjelmoidaan hitsausratoja yhteisiin (Autocam 2010).

Vakiotilavuuksisen hitsirailon muodostamiselle on valmiit valikot olemassa. Siihen liittyvät parametrit sisältyvät ohjelmaan, jotta robotti suorittaisi leikkauksen tarkasti. (Moses 2009, s. 2.)

Kaikkien polkujen tiedot sekä ohjelmointikoodit ohjelma luo automaattisesti. Mukaan lukeutuu myös ulkoisten akselien hallinta. Ohjelmointi ottaa huomioon aukotukseen liittyvät asiat, kuten leikkausnopeuden mukautumisen, leikkaustehon kuten myös aloitus ja lopetuskohdan suunnitelmat. Plasmaleikkausta varten on olemassa myös lisäasetuksia. Leikkausnopeuden sekä leikkaustehon laskeminen perustuu materiaaliin, leikkaussyvyyteen sekä muihin parametreihin. (Moses 2009, s. 2.)



Jotta poltin liikkuisi oikeaa rataa pitkin ilman törmäyksiä, ohjelma pyrkii luomaan sekä ottamaan tämän huomioon hitsin ohjelmoinnin aikana.. Ohjelma käsittelee hitsaukseen liittyvät parametrit hyvin samalla tavalla kuin Cloossin robottikontrolleri tekee. Valikosta on valittavissa eri hitsityypit. Lista voidaan luoda robotilla optimaalisine parametreineen, ja siirtää sieltä takaisin moseksen ohjelmaan. Sieltä ne sitten voi valita, jolloin ohjelmointi voi tapahtua automaattisesti. (Moses 2009, s. 2.)

Tällä tavalla manuaalinen hitsauksen laadun optimointi on vähentynyt minimiin ja automaattinen ohjelman luonti pienille erä-koille on tullut mahdolliseksi. Hitsauspolkujen luominen sekä parametrien määrittäminen monipalkohitsaukseen on myös käsiteltävissä automaattisesti. (Moses 2009, s. 3.)

Graafisessa simuloinnissa kappaleeseen kuuluva ympäristö on saatavana. Siihen kuuluvat robotti ja sen laitteet ja myös ulkoiset pyörimisakselit, ulkoiset lineaariakselit ja yläpuolella olevat mahdolliset nostotelineet ja laitteet. Graafista simulointia käytetään tarkistamaan ohjelman käytännöllisyys, johon kuuluu törmäystarkastelut jne. Simuloinnin jälkeen ohjelma siirretään robottiohjaimeen. (Moses 2009, s. 3.)

Mittaamalla todellisista säiliöistä ja putkista referenssipisteitä pystyy liikkeensopeuttamisohjelma muodostamaan säiliön ja putket oikeaan paikkaan ohjelmassa, kun todellinen säiliö on jo kiinni kappaleenpitimessä. Silloitushitsin jälkeen putket sijaitsevat ohjelmassa samalla paikalla kuin todellisuudessa. Siten erot simulointimallin ja todellisen työympäristön välillä ovat todella verrattavissa. (Moses 2009, s. 3.)

Hyödyt joita ohjelma tarjoaa:

- Helppokäyttöisyyttä, muukaan kuuluu asiankuuluvat teknilliset tiedot, joita vaaditaan leikkaamis- sekä hitsaus tehtävissä.
- Putken hitsien sijaintien helppoa määrittämistä. Ei tarvitse syöttää kuin mittatiedot ja todellinen asema.
- Ohjelma luo automaattisesti Cad-pohjan.
- Automaattinen hitsirailon koon laskenta, joka perustuu vakiosuuruiseen hitsiin tai vakioon särmän halkaisijaan.
- Ohjelmaan on integroituna leikkaukseen sopivat parametrit kulloiseenkin tilanteeseen.

- Luotujen hitsausparametrien takaisinsiirto Moses ohjelmaan robotin omasta ohjaimesta.
- Hitsin luominen automaattisesti Cad-mallista käyttäjän vuorovaikutuksen avulla
- Graafinen simulointi sisältäen törmäystarkastelut ja helpot säädöt polttimen aseman määrittämiselle
- Laskee paloajan ja kokonaisajan
- Todellisten osien kalibrointi luotujen osien kanssa
- Taloudellinen käyttö robotille jopa hyvin pienillä eräkoilla

(Moses 2009, s. 4.)

Ohjelmiston toimituksia on tähän mennessä Autocamilla ollut maailmalle noin 30-40 kappaletta (Meuronen 2010.)

## 6.2 IGRIP for pipes and tanks

IGRIP for pipes and tanks sovellus on kehitetty alun perin leikkaamaan aukotuksia ydinvoimalan vesikiertoputkistoon. Sovellusta on myyty myös ruotsalaiselle yritykselle säiliöiden robotisoituun aukotukseen. Ohjelma toimii nykyisin DELMIA Robotics V5-alustalla, toiminnot eivät ole vuosituhannen alusta muuttuneet. (Aalto 2010.)

Ohjelman tarkoitus on tehdä mahdolliseksi ja joustavaksi robotisoitu putkien ja säiliöiden leikkaus sekä niiden osien hitsaus: (Aalto 2002, s. 15.)

- T-putkiliitokset
- Putken päiden leikkaus
- Vinot laippaliitokset
- Säiliöiden putkiaukotus ja liitoshitsaus: sekä runko että päädyt
- Erilaisten putkiyhteiden liittäminen toinen toisiinsa

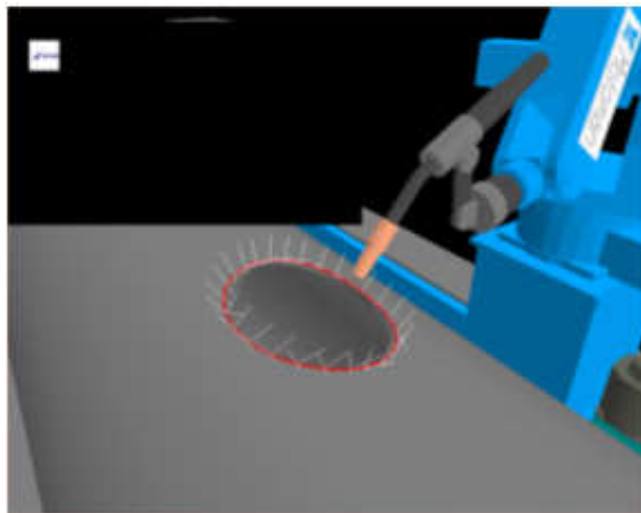
Ohjelmisto ottaa seuraavat seikat huomioon ohjelmoinnissa: (Aalto 2002, s. 15.)

- polttimen asento pysyy samassa suhteessa leikkausviivaan ja putken pintaan
- polttimen TKP pysyy aina samalla etäisyydellä leikkauspinnasta
- leikkausnopeus koko ajan vakio
- T-putkiliitoksessa myös kaksiakselisen käsittelypöydän ohjelmointi siten, että hitsi on koko ajan jalkoasennossa

- putken pään seivileikkauksessa leikkauskulma vaihtuu portaattomasti siten, että putkien liitoskohtana oleva hitsirailo pysyy haluttuna
- liitettäessä pienempiä putkia vapaasti ison putken kylkeen kykenee ohjelmointi mukautumaan putkien leikkauskäyrän muutoksiin

Ohjelmointi perustuu leikattavien osien CAD-malleihin. Ohjelmisto lukee yleisempiä CAD-formaatteja, kuten SolidWorks tai AutoCad. Jos CAD-malleja ei ole tehty, niin ohjelma voi myös luoda itse putkimallit, kun lähtötietona annetaan putken halkaisija, pituus sekä seinämävahvuus. Putkiyhteen liitospaikka ja liitoskulma tulee tietää. (Aalto 2002, s. 16.)

Haluttuun säiliön kohtaan, johon liitos halutaan, ohjelmisto piirtää matemaattisen ratakäyrän. Tällä kohdalle ohjelmisto luo automaattisesti robotin paikoituspisteet halutulla tavalla. Pisteiden syntymiseen vaikuttavina parametreina ovat leikkauskulma ja työntökulma sekä leikkaus- nopeus ja etäisyys. Hitsaukseen on samat parametrit käytössä, mutta niihin lisätään erikseen vielä railokohtaiset hitsausarvot. Parametrien asetuksen jälkeen käyttäjä valitsee käyrän ja ohjelmisto luo pisteet automaattisesti. Kuvassa 12 on graaffinen malli, kun pisteitä ohjelmoidaan. (Aalto 2002, s.16.)



Kuva 12. Igripin graaffinen malli ohjelmoidessa (Aalto 2002, s. 16).

Ohjelmalla voidaan suorittaa simulointi ennen tuotantoon siirtymistä. Simuloinnissa ohjelma suorittaa törmäystarkastelun, ulottovuustarkastelun sekä nopeustarkastelun. Robottisolun simulointimalli kalibroidaan ennen tuotantoon siirtämistä. Jos robotti on ohjelmoitu

opettamalla, voidaan ohjelma ladata tuotannosta IGRIPIIN muutoksia varten. (Aalto 2002, s. 16.)

Kun ohjelma on valmis, syntynyt leikkausjälki on hyvää, koska leikkauskulma pysyy koko ajan samansuuntaisena suhteessa leikattavaan pintaan. Hitsatessa vapaalangan pituus pysyy aina samana. Lisäksi polttimen kulma pysyy myös aina samansuuruisena, jolloin hitsistä tulee laadukas ja tasainen. (Aalto 2002, s. 16.)

## 7 MATERIAALEISTA

Säiliöihin ja putkistoihin käytettävien materiaalien skaala on laaja. Tässä osiossa käsitellään ainoastaan kuumalujat teräkset, koska käytännön osuuden hitsauskokeissa käytetään kuumalujia teräksiä.

### 7.1 Kuumalujat teräkset

Kuumalujat teräkset ovat teräksiä joilla on korkeissa käyttölämpötiloissa hyvät mekaaniset ominaisuudet. Kuumalujien terästen käyttölämpötilat ovat noin 300–650 °C, jolloin hapettuminen ei ole vielä kuumissa kaasuissa erityisen voimasta. (Lukkari 1998, s. 3.)

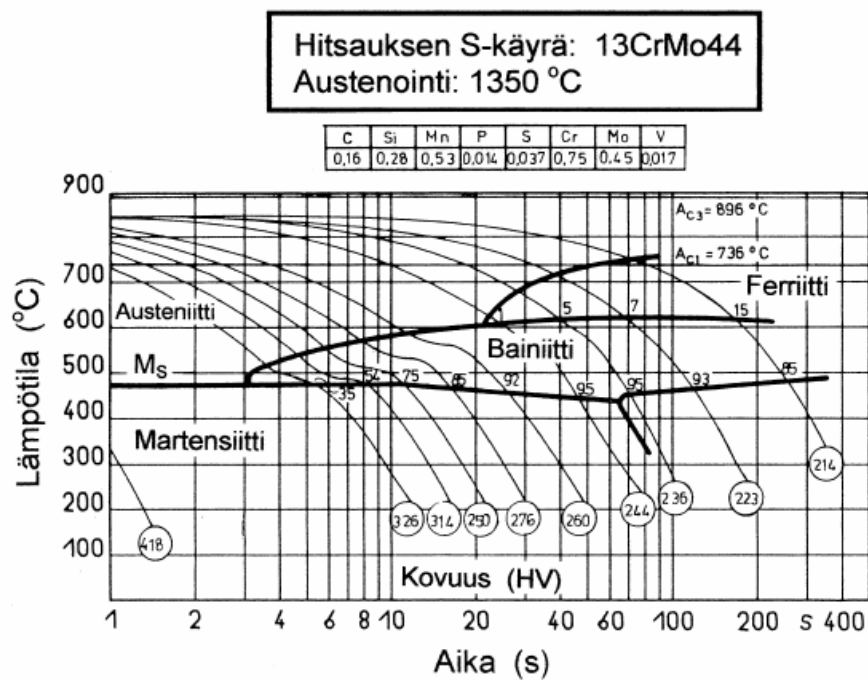
Kuumalujia terästen hitsaukseen soveltuvat kaikki kaarihitsausprosessit, puikko-, MAG-, täytelanka-, TIG- ja jauhekaarhitsaus. Näille on myös saatavilla laaja valikoima hitsauslisäaineita. Pohjapalo hitsataan yleisemmin TIG-hitsauksella, koska sillä saadaan hitsattua se luotettavimmin. (Lukkari 1998, s. 8.)

Hitsattavuuden kannalta tärkein asia kuumalujilla teräksillä on niiden karkenevuus. Yleisesti voidaan sanoa, että hitsattavuus huononee teräksissä seostusasteen kasvaessa, koska tällöin myös teräksestä tulee helpommin karkeneva. Näin myös kuumalujuusominaisuuksia parantavat seosaineet lisäävät hitsauksen kannalta karkenevuutta ja näin taipumusta erityisesti kylmähalkkeiluun. Hitsauksen seurauksena tapahtuu rajua lämpökäsittelyä, nopea kuumennus ja nopea jäähtyminen. Teräksen ollessa karkeneva karkenee se erityisen helposti juuri hitsatessa. Kuinka karkenevaa teräs on, voidaan kuvata hiiliekvivalentti

$$CE(IIW)= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%), \quad (1)$$

kaavan avulla. Mitä korkeampi CE on, sitä karkenevampaa teräs on. Kun CE:n arvo ylittää 0,40 % esikuumennus tulee tarpeelliseksi. (Lukkari 1998, s. 14; Lukkari 2004, s. 17.)

Terästen käyttäytymistä hitsauksessa voidaan tarkastella jatkuvan jäähtymisen S-käyrien avulla. Nämä käyrät näyttävät austeniitin hajaantumista ajan funktiona teräksen jäähtyessä. Kuvassa 13 on esitettyä teräksen 13CrMo4-5 jatkuvan jäähtymisen S-käyrä. Käyrien avulla voidaan arvioida muutosvyöhykkeen mikrorakenne, kun se jäähtyy hitsauksen jälkeen huoneenlämpötilaan. Nopeassa jäähtymisessä teräs karkenee kokonaan eli mikrorakenne tulee martensiittiseksi. Hitsauksessa nopeaa jäähtymistä voidaan estää esikuumennuksen avulla, jolloin jäähtymiskäyrä siirtyy kuvassa oikealle päin, jolloin rakenteeseen tulee martensiitin rinnalle mukaan myös enemmän ja enemmän pehmeämpää bainiittia. (Lukkari 1998, s. 14.)



Kuva 13. CCT-käyrät teräkselle 13CrMo4-5 (Lukkari 2004, s. 17).

## 8 HITSAUSKOE

Lappeenrannan teknillisessä yliopiston FMS-laboratoriossa suoritettiin putkiyhteen robotisoitu hitsauskoe. Kyseisen putkiyhteen esivalmisteli ja lähetti eräs yritys, joka valmistaa säiliöitä.

Koehitsauksen tavoitteena oli tutkia hitsattavan kappaleen soveltuvuutta robottihitsaukseen. Tutkimuksessa ohjelmoitiin robottiohjelma opettamalla kyseisellä kappaleella ja hitsattiin se. Näin tuloksina saatiin niin hitsauksessa ilmenneet ongelmat, sekä hitsausaika joka robotilla kuluu tällaisen tuotteen hitsaukseen. Hitsatusta koekappaleesta tehtiin myös makrohietutkimus sekä kovuusmittaus.

### 8.1 Koekappale ja materiaali

Tässä hitsauskokeessa putkiyhde kuuluu säiliöön, jonka halkaisija on noin 1,6 m ja pituus noin 9m. Tällaisia yhteitä kysyisessä säiliön kehällä on jopa yli 30 kappaletta. Koehitsattavan kappaleen putken sisähalkaisija oli 128 mm ja seinämänvahvuus 20,5 mm. Säiliötä kuvastavan osan paksuus oli 18 mm. Todellisessa säiliössä seinämänvahvuus on kuitenkin paljon suurempi, jopa 50 mm.

Koehitsattavan tuotteen materiaalina olivat säiliötä kuvastavalle osalle painelaiteteräs P355GH ja putkelle kuimaluja teräs 16Mo3. Taulukossa 1 ja 2 on esitettyä kyseisten terästen seosaineden prosentuaaliset osuudet. Materiaalit ovat verrattavissa tavanomaisiin rakenneteräksiin esim. S355J2G3. Teräkset ovat hitsattavuudeltaan hyviä ja kyseisillä teräksillä on pieni karkenevuustaipumus. Teräksillä on kuitenkin esikuumennus aiheellista silloin kun paksuus on yli 20 mm. (Lukkari 2004, s. 17.)

Taulukko 1. Teräksen P355GH (1.0473) kemiallinen koostumus (EN- 10216-2).

C	Si	Mn	P	S	N, max	Al total	Cu	Cr	Mo	Nb	Ni	Ti max	V
0,10..0,22	<0,60	1,7	0,025	0,02	0,02	>0,020	<0,30	<0,30	<0,08	<0,020	<0,30	0,03	<0,02

Taulukko 2. Teräksen 16Mo3 (1.5415) kemiallinen koostumus (EN 10216-2).

C	Si	Mn	P	S	N, max	Al, total	Cu	Cr	Mo	Nb	Ni	Ti	V
0,12..0,20	<0,35	0,9	0,025	0,025	0,012	ainetod.	0,3	0,3	0,35		0,3		<0,02

## 8.2 Robottihitsauskokeen suoritus

Kokeen suoritus aloitettiin tekemällä väliaikainen hitsauskiinnitin koehitsattavalle kappaleelle, jossa hitsauskoe pystytettiin suorittamaan. Koekappale asetettiin putken suuaukko kohtisuoraan ylöspäin osoittaen (kuva 14). Tämä kuvasti tällöin tilannetta, jossa putki hitsattaisiin säiliön päälle.



Kuva 14. Kokkappale asetettiin putken suuaukko kohtisuoraan ylöspäin.

Hitsauskoe suoritettiin Motomanin EA 1900 N robotilla ja prosessina oli MAG. Virtalähteenä oli käytössä Froniuksen CMT. Kokeet oli tarkoitus suorittaa PZ 6105 R 1,4 mm. paksuista täytelankaa käyttäen. Tämä ei ollut kuitenkaan mahdollista, koska Froniukseella ei ollut tarjota oikeanlaisia syöttörullia tälle langanpaksuudelle. Tämän johdosta kokeet suoritettiin 1.2 mm paksuisella OK Autrod 13.12 umpilankaa käyttäen. Suojakaasuna oli MISON 18 (Ar + 18%CO<sub>2</sub> + 0,03%NO). Hitsaamiselle oli myös esilämmitysvaatimus 100 °C asteeseen. Tämäkin jätettiin kuitenkin huomioimatta käytännön ongelmista johtuen ja hitsattiin palot ilman esilämmitystä.

### 10.3.1 Parametrien hakeminen sekä selvitys palkojen hitsauksen suorittamisesta

Hitsauskokeen suorituksen pyrkimyksenä oli saada hyvä ja roiskeeton hitsi aikaiseksi suurella kuljetusnopeudella ja suurilla virranarvoilla, kuitenkin sallituissa lämmöntuontirajoissa. Suurilla virroilla ja suurella kuljetusnopeudella aikaansaadaan suuri hitsiaineentuotto. Tällöin hitsaus tapahtuu kuumakaarialueella jolloin roiskeita syntyy vähemmän. Taulukossa 1 on merkitty koekappaleen jokaisen palon lämmöntuonti, hitsausarvo, jännite, langansyöttönopeus sekä hitsausnopeus. Kuvassa 15 on esitettyinä palkojen hitsausjärjestys. Lämmöntuonti Q on laskettu kaavasta

$$Q=k*E, \quad (2)$$

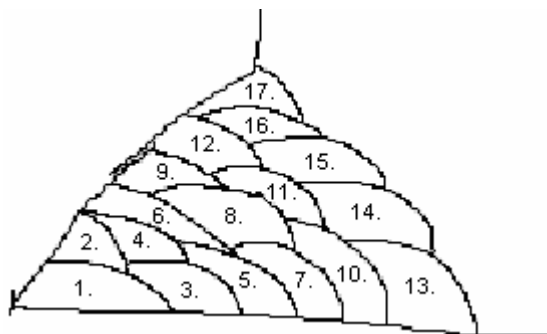
missä k on termien hyötysuhde MAG-hitsaukselle 0,80 ja E on kaarienergia, joka saadaan kaavasta

$$E=\frac{U*I}{1000*v}, \quad (3)$$

missä v on hitsausnopeus mm/s, U on jännite ja I on hitsausvirta.

Taulukko 3. Hitsauksen eri palkojen hitsausparametrit sekä lämmöntuontiarvot.

Palko nmr.	Hitsausvirta [A]	Jännite [V]	Hitsausnopeus [mm/s]	Langansyöttönopeus [m/min]	Lämmöntuonti [kJ/mm]
1	302	29,9	10	11,5	0,7
2	339	29,9	10	11,5	0,8
3	321	29,9	10	11,5	0,8
4	361	29,9	10	11,5	0,9
5	372	29,9	10	11,5	0,9
6	386	29,9	10	11,5	0,9
7	372	29,9	10	11,5	0,9
8	372	29,9	10	11,5	0,9
9	375	29,9	10	11,5	0,9
10	389	29,9	10	11,5	0,9
11	400	29,9	10	11,5	1,0
12	360	28	10	10	0,8
13	349	27	10	9,1	0,8
14	314	27	10	9,1	0,7
15	294	27	8	9,1	0,8
16	297	27	10	9,1	0,6
17	305	27	10	9,1	0,7



Kuva 15. Palkojen hitsausjärjestys.

Taulukosta 3 huomaa kuinka virran arvo kasvaa hitsauspalkokerrosten edetessä. Ensimmäisten palkojen kohdalla vapaalankaa oli pakko kasvattaa luoksepääsevyuden takia jopa 25 mm:n pituiseksi. Vapaalangan pituudesta johtuen virranarvot pysyivät ensimmäisissä paloissa keskimäärin huomattavasti pienempänä. Palkokerrosten lisääntyessä vapaalankaa pystyi lyhentämään, ja palon numero 6 jälkeen se vakiintuikin noin 17 mm:n pituiseksi.



Hitsipalot näyttivät silmämääräisesti hyvältä palko nr. 10 asti. Palko numero 11 epäonnistui ja levisi hieman. Kyseisessä palossa virta nousikin jo jopa 400 A:n suuruiseksi. Palkoon 12 koetettiin hitsiä parantaa hidastamalla langansyöttönopeutta arvosta 11,5 m/min arvoon 10 m/min. Tämäkään ei kuitenkaan tuottanut toivottua lopputulosta ja hitsistä 12 tuli lähes hitsin 11 kaltainen.

Kahden hieman epäonnistuneemman palon jälkeen suoritettiin hitsauskokeita erilliseen kappaleeseen. Palkoon 13 muutettiin lähes kaikkia parametreja, ja kyseinen palko onnistuikin hyvin, mitä nyt roiskeita turhan paljon kyllä esiintyi! Palko nr. 13 eteenpäin pyrittiin paloista saamaan jouheva koska kyseessä oli pintapalot. Railogeometrian epätasaisuudesta johtuen, laskettiin hitsausnopeutta palkoon nr. 15 arvosta 10 mm/s arvoon 8 mm/s. Tällä tavoin yritettiin saada railo täyttymään paremmin. Hitsistä tuli hyvä mutta huomattiin että on mahdotonta saada railo täyttymään yhdellä palolla. Palko 16 on ”ylimääräinen” palko jossa hitsattiin pelkästään puolet railon ympäryksestä, ja näin pyrittiin tasoittamaan railon epätasaisuutta. Tämä onnistuikin tyydyttävästi ja viimeisellä palolla saatiin täyttymään loppu yhtä pientä kohtaa lukuun ottamatta. Tähän kohtaan syntyi valitettava selvästi erottuva liitosvirhe. Kuvassa 16 on esitettyä koekappale hitsattuna.



Kuva 16. Kappale kaikki palkokerrokset hitsattuna.

#### 10.4 Makrohie ja kovuusmittauskoe

Hitsatusta kappaleesta tehtiin hie sekä kovuuskoe. Makrohieestä (kuva 17) näkee, että hitsi onnistui hyvin. Täydellinen hitsi ei kuitenkaan ole, koska hitsin kuvassa oikeassa alhaalla noin neljännän palon kohdalla on näkyvissä pieni liitosvirhe. Lisäksi hitsatusta koekappaleesta ei leikattu kuin yksi hiepala satunnaisesta kohtaan. Mikäli enemmän hieitä olisi tehty, olisi luultavasti virheitä ilmennyt jossain hieeissä enemmän.



Kuva 17. Makrohie koehitsatusta kappaleesta. Yksi liitosvirhe on havaittavissa kuvan oikeassa alareunassa muutosvyöhykkeen reunalla. Muita virheitä hieessä ei ole näkyvissä.

Makrohien lisäksi tehtiin Vickers kovuuskoe viiden kilon kuormaa käyttäen. Liitteessä 1 on esitettyä kovuuskokeen tuloksen kovuusjakaumineen. Perusaineet kuuluvat standardin EN 13480-2 mukaan materiaaliryhmään 1. Standardin CR ISO 15608 ryhmän 1 terästen suurin sallittu kovuusarvo lämpökäsittämättömille teräksille on 380 HV10. Tuloksista näkee että suurin kovuus joka mittattiin on 376 HV5. Tätä yhtä poikkeutta lukuun ottamatta kaikki tulokset pysyivät kevyesti alle 350 HV5. Näin tässä kokeessa kovuudet pysyivät suurimman sallitun kovuuden alapuolella.

## 9 TULOSTEN ANALYSOINTI

Lopputulosta ajatellen koehitsaus onnistui hyvin. Tavoitteena oli saada selville miten hitsaus onnistuu ja samalla saatiin selville hitsaukseen kuluva kokonaisaika. Robotin kokonaiskiertoaika tällaisen tuotteen hitsaamiseen tässä tapauksessa oli 19 minuuttia 2 sekuntia. Kiertoaikaa olisi saanut pienennettyä tästäkin poistumis- ja lähestymisratojen liikkeitä ja nopeuksia parantelemalla. Palkoja joutui hitsaamaan jopa 17 kappaletta, joten yhden palon hitsaika oli vähän reilu minuutin. Alustavan hitsausohjeen mukaan hitsausnopeus käsin on nopeimmillaan 3,5 mm/s ja robotilla se oli 10 mm/s, joten puhutaan reippasti yli kaksinkertaisesta nopeudesta.

Kovuusarvot pysyivät sallitun arvon alapuolella. Standardin SFS-EN 1011-2 mukaan lämmöntuonti tulisi olla 1-2 kJ/mm välillä. Hitsauskokeessa lämmöntuonti vaihteli 0,6 kJ/mm ja 1,0 kJ/mm välillä. Suurimmissa osissa paloja lämmöntuonti oli siis turhankin pientä. Lämmöntuontia olisi saanut suurennettua virtaa lisäämällä ja hitsausnopeutta pienentämällä.

### 9.1 Ongelmat

Hitsaus ei ollut täysin vaivatonta ja koehitsauksessa esiintyi muun muassa seuraavia ongelmia tai häirttekijöitä:

- luoksepääsevyys, jolloin mm. vapaalankaa jouduttiin kasvattamaan tolkkuttoman suureksi
- roiskeita syntyi joissakin paloissa turhan paljon
- kaikki hitsipalot eivät onnistuneet vaan levisivät vähän ym.
- epätasainen railo

Koekappaleiden railot oli valitettavasti tehty käsivaraisesti polttoleikkaamalla. Robottihitsattavaksi tarkoitetun tuotteen railot tulisi olla huomattavasti tarkemmilla railonvalmistusmenetelmillä tehty. Tämän koekappaleen railo oli epätasainen. Tästä johtuen mm. poltinkulmaa ei pystytty pitämään tasaisena joka kohdassa. Tämän lisäksi lopussa huomasi, ettei railoa saa täyttymään tasaisesti.

Robottihitsattavaksi valittuihin säiliöiden yhteisiin oli hitsattu pohjapalko valmiiksi käsivaraisesti TIG-hitsausprosessia käyttäen. Ilman käsinhitsattua pohjapalkoa tällaisten kappaleiden, joissa näin epätasainen railo, robotisoitu hitsaus on luonnollisesti täysin mahdotonta. Kuitenkin vaikka railot olisi tehty tarkasti ja huolellisesti, robotilla hitsattavana pohjapalo olisi todella haasteellista saada onnistumaan. Huomioitavaa on että robotilla ei pystytä hitsaamaan kuin yhdeltä puolelta, jolloin läpihitsautuvuutta ei voida taata. Läpipalamisen vaara on myös aina suuri. Yritys lähetti samoja koekappaleita ilman valmiiksi hitsattuja pohjapalkoja. Näille ei kuitenkaan luonnollisesti lähdetty edes yrittämään robotisoitua hitsausta, koska hitsiä ei saisi onnistumaan laadullisesti eikä ohjelmoinnissa olisi muutenkaan järkeä. Kuvissa 18 on kappale jossa pohjapalko on hitsattu valmiiksi ja kuvassa 19 on tilanne, jossa näin ei ole tehty.



Kuva 18. Koekappale, jolle hitsauskoe suoritettiin. Pohjapalko on hitsattu valmiiksi käsivaraisesti TIG-hitsausprosessilla.



Kuva 19. Käsivaraisesti polttolaikattu railo, johon siltahitsillä kiinnitetty putki. Robotisointia tällaiseen ei kannata lähteä yrittämään, koska hitsiä ei saa onnistumaan laadullisesti.

Koehitsauksen alun ongelmana esiintyi railoon luoksepääsevyys, jolloin vapaalanka kasvoi pitkäksi. Lisäksi todellisessa tilanteessa, jossa hitsattava putki on kiinni oikeassa säiliössä, ei olisi näin tässä kokeessa suoritettuna tällä laitteistolla todellisuudessa luultavasti pystytty tekemään. Syynä tähän on se, että useiden palkojen hitsaamiseen poltinkulma jouduttiin asettamaan täysin vaaka-asentoon. Todellisessa säiliössä putket on asetettu puolen metrin välein, jolloin robotti ei mahtuisi hitsaamaan putken ympäri. Kuvassa 20 on esitettyä kuinka poltinkulma oli vaakatasossa ja näin robotin noin 750 mm. pitkä varsi saattaisi osua vieressä olevaan putkeen.



Kuva 20. Hitsauksessa jotkin palot joutui hitsaamaan täysin vaaka-asennossa, jolloin robotin käsivarsi vei paljon tilaa sivulta.

Joitakin palkoja hitsatessa esiintyi turhan paljon roiskeita sekä jotkin palot epäonnistuivat leviten hieman. Tässä koehitsauksessa hitsattiin vain yksi kappale. Luonnollisesti enemmän kokeita tekemällä päästäisiin paljon optimaalisempiin hitsausparametriarvoihin. Tällä tavoin saataisiin roiskeita vähennettyä sekä jokainen hitsipalko onnistumaan paremmin.

## 9.2 Parannushedotukset

Robotin työkalut, jolla tämä koehitsaus suoritettiin eivät olleet täysin optimaalisia tällaisen tuotteen hitsaamisen. Luoksepääsevyyden ratkaisemiseksi markkinoilla on olemassa erilaisia hitsauspäitä, joissa jyrkempi mutka, jolloin käsivarsi ei tarvitsisi olla noin vaakatasossa. Kuvassa 21 on esitetty jyrkemmällä mutkalla oleva hitsauspolttimen kaula. Lisäksi markkinoilla on olemassa litteällä päällä olevia hitsauspäitä. Litteämmän pään eli kaasuholkin avulla vapaalanganpituus saataisiin pysymään lyhyempänä ensimmäisiä paloja hitsatessa.



Kuva 21. Hitsauspoltin jonka jyrkemmän kulman avulla tilaa kertyisi ympärille enemmän hitsatessa vaaka-asennossa. (Cloos 2010.)

Pohjapalon hitsaaminen robotilla voisi olla mahdollista juuritukea hyväksi käyttäen. Juurituen kokeileminen olisi todella kokeilemisen arvoinen asia robotilla hitsatessa. Säiliön yhteiden hitsauksessa juuritukena voisi käyttää esim. kuparista hieman säiliöön hitsattavan putken sisähalkaisijaa pienempää avonaista putkea.

### 9.3 Muuta huomioitavaa

Tässä kokeessa hitsattiin vain yksi kappale, mitenkään ei voi mennä takuuseen, että hitsaus olisi täsmälleen samanlaista samoilla arvoilla muissa samanlaisissa koekappaleissa. Olosuhteiden muuttuessa hitsit voivat muodostua eri tavoin. Tästä johtuen robotille ohjelmoidut radat eivät välttämättä ole toimivia muissa koekappaleissa, etenkin näissä koska railo ei ollut tasainen! Vaikka ensimmäinen palko sattuisikin samalla ohjelmoinnilla railoon, mitenkään ei voi olla varma että seuraavat 15 ohjelmoitua kierrosta toimisi samalla tavoin. Koekappaleita tulisi hitsata useita jotta robottihitsauksen laatu saataisiin hyväksi ja tasaiseksi. Tämän lisäksi todellisessa tilanteessa hitsatessa robottia sekä säiliötä joutuu myös siirtelemään, jolloin paikoitustarkkuus tuo lisähaastetta.

Alustavan hitsausohjeen mukaan näiden kappaleiden hitsaamiseen tulisi käyttää esilämmitystä, jota tässä kokeessa ei käytetty. Koehitsaustilanne kuitenkin poikkesi paljon todellisesta tilanteesta. Muun muassa kokeessa käytetyn säiliötä kuvastavan osan suuruus oli huomattavasti pienempi kuin todellisessa säiliössä olisi. Tämän takia koehitsaustilanne ei ole

täysin vertailukelpoinen todelliseen tilanteeseen verrattuna. Lisäksi palkokerroksia ei hitsattu peräjälkeen. Aina yhden palon hitauksen jälkeen ohjelmoitiin seuraava. Tästä johtuen kappale ehti jäähtyä hitsausten välissä. Palkojen välinen maksimilämpötila saa standardin EN 1011-2 mukaan olla 250 °C 16Mo3 teräkselle. Todellisessa tilanteessa, jossa palkoja hitsataan peräjälkeen, tämä maksimilämpötila luultavasti ylittyisi. Tällöin palkojen välissä kappaletta joutuisi jäädyttämään ennen kuin seuraavan palon hitsaus voisi aloittaa. Tietysti jäädytyksen aikana robotti voisi mahdollisuuksien mukaan esimerkiksi hitsata vieressä olevan seuraavan yhteen hitsejä.

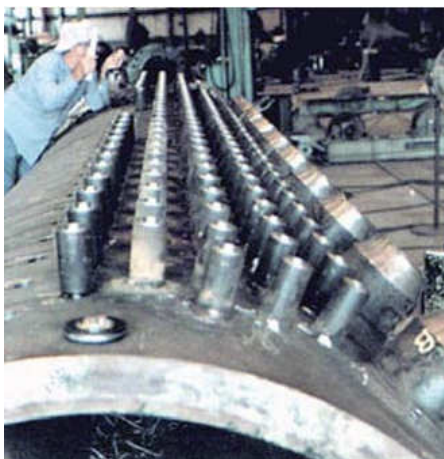
#### 9.4 Jatkotutkimusehdotukset

Koehitsauksessa ilmenneitä jatkotutkimuksia:

- Hitsaus täytelankaa käyttäen
- Hitsaus erilaisella hitsauspäällä varustettuna
- Hitsaus juuritukea käyttäen, jolloin pohjapalonkin hitsaus robotisoidusti
- Hitsaus esilämmityksen kanssa, jolloin saisi selville myös sen kuinka korkealle palkojen välinen lämpötila nousee hitsatessa palot peräjälkeen robotilla
- Tehdään koehitsaus paljon useammalla kappaleella kuin vain yhdelle, ja tällä tavoin haetaan oikeat hitsausparametriarvot.

## 10 JOHTOPÄÄTÖKSET & TULEVAISUUS

Säiliöiden putkiyhteiden hitsauksen robotisointi olisi etenkin työmäärään nähden katsoessa todella aiheellista. Robotisoinnilla saataisiin myös laatu pysymään tasaisena. Kuvassa 22 on esimerkkinä tilanne kuinka paljon yhteitä voi säiliössä esimerkiksi olla jolloin työmääräkin on todella suuri. Kuvasta havaitsee kuitenkin myös, ettei tilaa robotisointiin juuri ole. Robotisointiin siirtyminen ei ole yksinkertaista.



Kuva 22. Painesäiliön yhteiden hitsausta käsin (Taylor Forse 2003).

Suomessa säiliöitä valmistavat yritykset tekevät vielä niin aukotuksen kuin yhteiden hitsauksen käsivaraisesti. Maailmalla esimerkiksi Saksassa on teollisessa käytössä jo robotteja, joissa putkiyhteiden hitsaus tehdään robotilla. Kuvassa 23 on esimerkkinä Cloosin robotti joka hitsaa säiliön putkiyhteitä robotisoidusti. Kuva on esitteestä vuodelta 2003, joka vain todistaa että tuostakin tilanteesta on varmasti vielä menty eteenpäin.



Kuva 23. Robotisioitua säiliön yhteiden hitsausta (cloos 2003).

Moses-pipe on aika uusi ohjelmavaihtoehto josta kehitystä tulee varmasti vielä tapahtumaan. Saatujen tietojen mukaan ohjelmisto näyttää kuitenkin hyvin lupaavalta. Käytännön kokemuksia ei saatu kuitenkaan juuri käsille, mutta ilmeisesti ohjelma on hyvin toimiva ratkaisu. Esitteestä löytyvät tiedot kertoivat että ohjelma olisi helppokäyttöinen. Todellisuudessa ohjelma luultavasti kuitenkin on etäohjelmien tavoin vaikeakäyttöinen ja vaatii pitkää perehtymistä ennen kuin ohjelman käyttö alkaa tuntua helpolta.



Koehitsauksesta saatujen tulosten mukaan putkiyhteiden hitsaus robotilla on hyvinkin mahdollista. Robotisointiin siirtymisen esivaiheena pohjapalko olisi varmaan hyvä hitsata vielä käsivaraisesti. Näin läpihitsautuminen saataisiin aina varmistettua. Palkokerroksia kertyi koehitsauksessa pohjapalon lisäksi jopa 17 kappaletta. Tästä johtuen robotille riittäisi paljon töitä vaikka osa työstä tehtäisiinkin käsin. Tulevaisuudessa on varmasti mahdollista tehdä ja tehdäinkin niin aukotus kuin putkiyhteiden hitsaus robotilla säiliöiden valmistuksessa.

## 11 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää ongelmia joita ilmenee robotisoidussa putkiyhteiden hitsauksessa säiliöiden valmistuksessa ja katsastaa hieman kuinka maailmalla asian kanssa toimitaan.

Työn teoriaosa käsittelee robotteja yleisesti, niiden laitteistoja, railonseurantaa, ohjelmointia sekä robotisointiin soveltuvia kaarihitsausprosesseja. Osuudessa otettiin esille myös putkiyhteille tarvittava aukotus, jonka johdosta käsiteltiin robotisoitua plasmaleikkausta.

Teoriaosuudessa käsiteltiin myös, mitä vaatimuksia robotisointi tuo hitsauksen esivalmisteluun erityisesti railonvalmistukseen. Kuumalujista teräksistä kerrottiin yleistä teoriaa, koska käytännön osuudessa hitsattiin kuumalujaa terästä. Teoriaosuudessa esiteltiin myös kaksi ohjelmistosovellusta, jotka on kehitetty säiliöiden aukotukseen ja yhteiden hitsaukseen.

Käytännön osuudessa hitsattiin robotilla erään säiliöitä valmistavan yrityksen lähettämä koekappale. Koehitsauksen avulla sai selville putkiyhteiden hitsauksessa esille tulevia ongelmia. Kokeessa putken pohjapalo oli hitsattu valmiiksi käsivaraisesti TIGillä. Hitsauksessa ilmenneitä ongelmia olivat erityisesti tilanpuute ja oikeiden paremetrien löytyminen. Hitausolosuhteet muuttuivat paljon vapaalangan pituuden sekä poltinkulman vaihteluiden johdosta. Hitsatusta kappaleesta tehtiin makrohie- ja kovuusmittauskoe. Kovuusarvot pysyivät sallittujen arvojen alapuolella. Lämmöntuoti oli sitä vastoin turhankin pientä. Lämmöntuontia olisi saanut kasvatettua esimerkiksi hidastamalla hitsausnopeutta.

Robotisointia säiliöiden putkiyhteiden hitsaamiseen ei juuri vielä teollisuudessa käytetä. Läpihitsautuvuus, monipalkohitsaus sekä hitsauksessa vallitseva tilanpuute sekä luoksepääsevyys tuottavat vielä päänvaivaa robotisointia ajatellen. Tässä työssä tehty koehitsaaminen kuitenkin osoitti että putken hitsaaminen säiliöön on todella mahdollista tehdä robotisoidusti.

Työssä otettiin esille myös aukotuksen kannalta kiinnostava robotisoitu plasmaleikkaus. Plasmaleikkaus on hyvin herkkä korkeuden vaihteluille, ja korkeudenseuranta onkin vaikein asia plasmaleikkauksen robotisoinnissa. Aukotukseen ja putkiyhteiden hitsaukseen on kehitetty omia ohjelmastosovelluksia. Moses-pipe ohjelmistosovellus ottaa huomioon ainakin teoriassa plasmaleikkauksen vaatimukset säiliön aukottamisessa sekä ottaa huomioon myös

monipalkohitsauksen yhteiden hitsauksessa. Kehitystä tapahtuu, ja tulevaisuudessa putkiyhteet sekä niille tarvittava aukotus varmasti tehdään laajalla rintamalla robotisoidusti.

## LÄHTEET

Aalto, Heikki 2010. Sähköpostin välityksellä käyty keskustelu. Maaliskuu 2010.  
Haastattelijana Sami Haaja.

Aalto, Heikki. Putkenosien ja säiliöiden polttoleikkauksen ja hitsauksen automatisointi.  
Hitsaustekniikka 5/2002.

Abb 2010. Abb.com. [verkkodokumentti]. viitattu 22.4.2010. saatavana  
<<http://www.abb.com/product/seitp327/d891cb5c242fe889c1256efc002871f3.aspx?productLanguage=fi&country=FI>>

Autocam 2010. Autocam.com. [verkkodokumentti]. viitattu 4.4.2010. saatavana  
<<http://www.autocam.eu/Release%20Englisch/ROHR.htm>>

Cary, Howard B, Scott C. Modern Welding Technogy, 2005. Pearson prentlice Hall 715 s.

Cloos 2003. aktuel topic. Cloos Schweisstechnik esite 11/03.

Cloos 2010. [verkkodokumentti] viitattu 3.4.2010. saatavana  
<<http://www.cloos.de/cloos/de/produkte/qirox/index.php>>

Fortain, J-M. & Rimano, L. & Vaidya, V. 2008. Innotative Process Improves Welding of  
Sheet Metal Parts, Welding Journal Jan. 2008.

Hiltunen, E. Naams, I. Robottihitsauksen faktat ja fiktiot Suomessa. Hitsaustekniikka lehti  
5/2000.

Hiltunen, Esa. Nordic Welding Conference 2006 – Automaatio ja robotit. Hitsaustekniikka  
lehti 6/2006.

Jernström, P. 2002. Hitsin laadun reaaliaikainen hillinta automatisoidussa hitsauksessa.  
Hitsaustekniikka 2/2002.

Kivioja K, Niemi T, Vehkalahti J. Robottihitsaus kehittyy. Hitsaustekniikka lehti 4/2007.

Kuikka, Niko. Hitsaustuotannon tehostaminen robotisoinnin avulla. Diplomityö 2009. Lappeenrannan teknillinen Yliopisto. 117 s.

Kuivanen, Risto. Robotiikka. Suomen robotiikkayhdistys Ry. Talentum Oyj. Vantaa 1999. 188 s. ISBN 951-9438-58-0

Leino, Kalervo. Mekanisoinnin ja automatisoinnin vaikutus hitsauskustannuksiin. Hitsaustekniikka 6/98.

Lepola P, Makkonen M. hitsaus ja teräsrakenteet. 2. painos. WSOY. Porvoo 1999.

Lukkari, Juha. Kuumalujat teräkset ja niiden hitsaus. Osa-1. 33 s. Hitsaustekniikka 6/2004.

Lukkari, Juha. 2002. Hitsaustekniikka – Perusteet ja kaarihitsaus. Helsinki. Edita Prima Oy. 292 s.

Lukkari, Juha. Kunnossapitokoulu. Kunnossapitolehden erikoisliite nro. 49 10/1998. Kuumalujat teräkset ja niiden hitsaus. 31s.

Martikainen, J. 2008. Hitsaustekniikan jatkokurssi. Luentomoniste, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 213 s.

Meuronen, Ismo. Meurotech. sähköpostin ja puhelimitse käyty keskustelu Maalikuu 2010. Haastattelijana Sami Haaja.

Moses – pipe. Cloos Schweisstechnik. Fully automatic offline-programming of robots for cutting and welding pipes and vessels. esite ohjelmasta 2009. 4s.

Motoman 2010. kotisivut. [verkkodokumentti]. viitattu 4.4.2010. saatavana <<http://motoman.eu/fi/Tuotteet/Robotit/EA1900N/>>

Norris Cris & Clayton Pat. Automation in tube and pipe welding. The fabricator March 2008. 155 s.

EN 10216-2. Suomen standardisoimisliitto SFS. saumattomat painelaiteteräsputket. Tekniset toimitusehdot. osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräsputket. 78 s.

Taylor Forse 2003. Taylor Forse engineering system. Pressure vessel Fabrication. [verkkodokumentti]. viitattu 20.4.2010. saatavana.  
<<http://www.tfes.com/pressureVessel03.htm>>

Tekninen tiedotus 5/97. Jernström, Petteri. Plasmahitsauksen tehokas käyttö. metalliteollisuuden Keskusliitto, MET. Helsinki. 60s.

Tekninen tiedotus 6/90. Grönlund, Eero. Hitsausrailot: Vaatimukset, valmistusmenetelmät, toleranssit ja taloudellisuus.

Tekninen tiedotus 16/88. Automatisoidun kaarihitsauksen huomioon ottaminen tuotteen suunnittelussa. Helsinki. Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 45 s.

Trumbull, Ken. Plasma cutting with a robot. The Fabricator. March 2006. 110 s.

Used-Robots 2010. [verkkodokumentti]. viitattu 3.4.2010. saatavana < <http://www.used-robots.com/abb-robots.php?robot=irb+4400/60>>

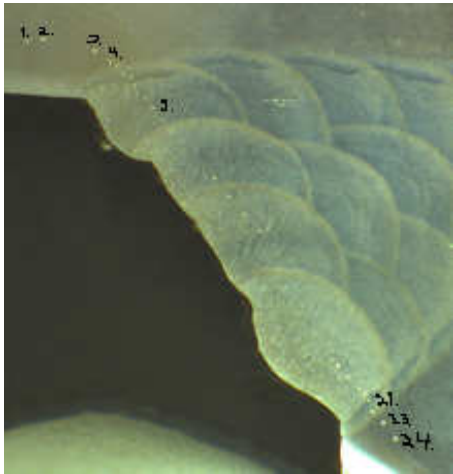
Pemamek 2010. Kotisivut. [verkkodokumentti] viitattu 4.4.2010  
<http://www.pemamek.fi/fin/tuotteet/?PAGE=2>

Veikkolainen, Mikko. Hitsausrobotiikan nykytila. Hitsaustekniikka lehti 2/2005.

Veikkolainen, Mikko. Hitsauksen robotisoinnin vaatimukset ja vaikutukset. Hitsaustekniikka 6/98.

Liite 1. Hitsausliitoksen kovuusko

Kovuuskoe	Vickers HV5
Perusaine	16Mo3 ja P355GH
Hitsiaine	OK Autrod 13.12
Hitsausprosessi	MAG



Painamat: 1-4 perusaineen 16Mo3  
 5-7 muutosvyöhykkeen  
 8-17 hitsiaineen  
 18-21 muutosvyöhykkeen  
 22-24 perusaineen P355GH

Piste	HV5	etäisyys hitsin keskikohdasta [mm]
1	165	20
2	154	18
3	185	16
4	195	15
5	199	14,5
6	274	14
7	313	13,5
8	321	13
9	332	12
10	321	11
11	289	10
12	317	9
13	289	6
14	283	4
15	314	2
16	321	0
17	290	10
18	257	11
19	303	12
20	306	12,5
21	376	13
22	265	13,5
23	182	14
24	174	15

