



- OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# CMT-TEKNOLOGIA ROBOTTI- HITSAUKSESSA

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Joonas Pesonen			
Työn nimi CMT-teknologia robottihitsauksessa			
Päiväys	30.4.2015	Sivumäärä/Liitteet	46/11
Ohjaaja(t) Lehtori Mika Mäkinen ja projekti-insinööri Aku Tuunainen			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonlinna Works Oy			
Tiivistelmä  Opinnäytetyön tavoitteena oli parantaa robottihitsauksen laatua ja nostaa tuottavuutta hyödyntämällä CMT-teknologiaa. Tutkimus tehtiin Savonlinna Works Oy:lle.  Opinnäytetyössä tutkimuksen avulla tarkasteltiin CMT-hitsausteknologian ominaisuuksia perinteiseen MIG/MAG-hitsaamiseen verrattuna. Työ koostui neljästä päävaiheesta: robottikoulutuksesta, koekappaleiden hitsaamisesta, näytekappaleiden valmistuksesta sekä materiaalien testaamisesta ja tutkimuksista. Tutkimuksessa hitsaukset tehtiin päällehitsauksena, jossa hitsaukselta tavoiteltiin hitsiaineen ominaisuuksia. Tutkimuksessa verrattiin kolmea hitsauslisäainetta, joita hitsattiin kolmella hitsausprosessilla: CMT:llä, CMT-pulssilla ja MAG-pulssilla. CMT-hitsaukset, kovuustutkimukset sekä mikro- ja makrohietutkimukset tehtiin Savonia-ammattikorkeakoululla ja vastaavat MAG-hitsaukset Savonlinna Worksilla.  Tutkimuksessa selvisi, että CMT:llä tuottavuutta nostavia ominaisuuksia ovat tietyillä hitsauslisäaineilla nopeampi hitsaus, suurempi sulatusteho ja pienempi energian käyttö. Hitsauksen laatua parantavat ominaisuudet olivat roiskeettomampi hitsi, tasaisen hitsimuodon laaduntuottokyky, vakaampi valokaari, pienempi lämmöntuonti ja hitsiaineen seostumimen, parempi hitsin ulkonäkö ja epäpuhtauksien vähyyys.			
Avainsanat CMT, MAG, robottihitsaus			
Julkinen			

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS  
Abstract

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programmed Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Joonas Pesonen			
Title of Thesis CMT-technology in Robot Welding			
Date	April 30, 2015	Pages/Appendices	46/11
Supervisor(s) Mr Mika Mäkinen, Senior Lecturer and Mr Aku Tuunainen, Project Engineer			
Client Organisation /Partners Savonlinna Works Oy			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this final year project was to improve quality and productivity in robot welding by using CMT- technology. The project was commissioned by Savonlinna Works Oy</p> <p>First, the features of CMT-welding technology were examined and compared to the traditional MIG/MAG welding types. Examination was conducted in four phases: robot training, welding the test pieces, producing the samples and testing and examining the materials. The welding type used in this project was cladding, which means that the weld is expected to get the same abilities as the deposited material. The main purpose in this project was to compare three different deposited metals which were welded in three different processes. The welding processes used were CMT, CMT-pulse, MAG-pulse. CMT weldings, hardness examination and micro and macrographig examination were conducted in Savonia University of Applied Sciences and MAG-weldings was conducted in Savonlinna works Oy.</p> <p>As a conclusion, this project proved that by using CMT in certain deposited metal, the qualities that improve productivity are faster welding, bigger melting power and smaller energy usage. The features that improve quality are welding with fewer spatter, ability to produce smoother welding form, stability of arc, smaller heat input and dilution, better look in deposit material and lesser impurities.</p>			
Keywords CMT, MAG, robot welding			
Public			

## ESIPUHE

Haluan kiittää työnantajaa ja työpaikkaohjaajaa opinnäytetyöaiheesta ja opinnäytetyöprojektiin saamastani tuesta. Opinnäytetyön tekemiseen liittyvät edellytykset olivat hyvät. Lisäksi haluan kiittää ohjaajia lehtori Mika Mäkistä ja projekti-insinööri Aku Tuunaista tuesta ja joustavasta ohjauksesta opinnäytetyöprosessin aikana

Savonlinnassa 30.4.2015

Joonas Pesonen

## SISÄLTÖ

MÄÄRITELMÄT .....	7
1 JOHDANTO .....	9
2 SAVONLINNA WORKS OY .....	10
3 TYÖN TOTEUTUS .....	11
4 HITSAUS .....	12
4.1 Hitsi ja sen käsitteet.....	12
4.2 Päällehitsaus.....	13
4.3 MIG- ja MAG-hitsaus .....	13
4.3.1 Lyhytkaarihitsaus .....	15
4.3.2 Välikaarihitsaus .....	15
4.3.3 Kuumakaarihitsaus .....	16
4.3.4 Pulssikaarihitsaus .....	16
4.4 CMT-hitsaus .....	17
4.4.1 CMT-kaarihitsaus .....	18
4.4.2 CMT-pulssikaarihitsaus .....	18
4.5 Hitsauksen työturvallisuus .....	19
5 ROBOTTIIKKA.....	20
5.1 Teollisuusrobotit .....	20
5.1.1 ABB-robotti.....	20
5.1.2 Motoman-robotti .....	20
5.1.3 Etäohjelmointi.....	21
5.1.4 Opettamalla ohjelmointi.....	21
5.2 Robottityöturvallisuus.....	21
6 MATERIAALIEN AINEENKOETUKSET .....	24
6.1 Makro- ja mikrohie.....	24
6.2 Vickersin kovuusmittaus .....	24
7 HITSUKSEN LABORAATIOT .....	26
7.1 Työn valmistelu .....	26
7.2 CMT-hitsauskokeet.....	27
7.3 MAG-hitsauskokeet .....	27

8	NÄYTEAIHIODEN VALMISTAMINEN.....	29
9	TUTKIMUKSET .....	30
9.1	Makrohieiden tutkimus .....	30
9.2	Mikrohieiden tutkimus .....	31
9.3	Horisontaalinen kovuusmittaustutkimus.....	34
9.4	Vertikaalinen kovuusmittaustutkimus.....	37
10	TAVOITTEET JA TULOKSET .....	41
11	YHTEENVETO.....	42
12	POHDINNAT JA JATKOKEHITYS.....	43
	LÄHTEET .....	44

## MÄÄRITELMÄT

A	Hitsauslisäaine A
A1 - A3	Hitsauslisäaine A:n koekappaleet ja testausaihiot 1-3
B	Hitsauslisäaine B
B1 - B3	Hitsauslisäaine B:n koekappaleet ja testausaihiot 1-3
C	Hitsauslisäaine C
C	Hiili
C1 - C3	Hitsauslisäaine C:n koekappaleet ja testausaihiot 1-3
CMT	Cold Metal Transfer
Cr	Kromi
EN	European Standard, eurooppalainen standardi, joka on laadittu CENissä, CENELECISSÄ, tai ETSI:ssä.
ha	Hitsiaine
HV5	Kovuuden tunnus, nimellinen voima F, 49,03 N
HV10	Kovuuden tunnus, nimellinen voima F, 98,07 N
ISO	The International Organization for Standardization, kansainvälinen standardisointijärjestö
MAG	Metal-arc active gas welding
MAG –p	Metal active gas- pulsed arc
MIG	Metal Inert Gas Welding
MIG –p	Metal inert gas- puls welding
Mo	Molybdeeni
Mn	Mangaani
N	Typpi
Nb	Niobi
SFS	Suomen Standardisointiliitto SFS ry, standardisoinnin keskusjärjestö Suomessa
Si	Pii
pa	Perusaine

## Symbolit

$V_d$	Langansyöttönopeus, metriä / minuutti	[ m/min ]
$V_s$	Hitsausnopeus, millimetriä / sekunti	[ mm/s ]
$\alpha$	Poltinkulma alpha, astetta	[ ° ]
$\beta$	Kallistuskulma beta, astetta	[ ° ]
$E$	Hitsausenergia	[ Kj/cm ]
$R$	Resistanssi, milliohmi	[ mOhm ]
$L$	Induktanssi, mikrohenry	[ $\mu$ H ]
$F, \nu$	Taajuus / levitystaajuus, hertsi	[ Hz ]
$I_s$	Virta / hitsausvirta, ampeeri	[ A ]
$U_s$	Kaarijännite, voltti	[ V ]



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää robottihitsausta CMT-tekniikan avulla. Opinnäytetyö sai alun yrityksen tarpeesta tehdä selvitystyö CMT- tekniikasta ja sen hyödynnettävyydestä.

Työssä selvitettiin tuottavuutta ja laatua parantavia ominaisuuksia vertaamalla CMT- ja MAG-hitsausprosesseja mm. kovuustutkimuksen, makro- ja mikrohietutkimuksen, hitsauksessa syntyneen datan sekä hitsauksen aikana ja jälkeen tehtyjen havaintojen perusteella. Ennen opinnäytetyön aloittamista voitiin todeta lehtijulkaisuista ja tutkimuksista muun muassa (ks. mm. Karjalainen 2012 ja Pronius Oy 2012), että CMT-prosessilla on edellytykset mm. pienempään lämmöntuontiin ja vaakaampaan valokaareen ja sen avulla voidaan päästä nopeampaan hitsaamiseen.

Opinnäytetyön tilaaja oli Savonlinna Works Oy ja toimeksiantaja Savonia-ammattikorkeakoulu. Hitsattavista koekappaleista osa tehtiin Savonlinna Worksin tiloissa ja osa Savonian hitsauslaboratoriossa.

Opinnäytetyöraportista haluttiin korvata lisäaineiden nimet kirjaintunnuksilla A, B ja C. Lisäksi joihinkin tuloksiin liittyviin kaavoihin sijoitettiin x-, y- tai z-kirjaimia yhtiön salassapidettävien tietojen turvaamiseksi.

## 2 SAVONLINNA WORKS OY

Savonlinna Works Oy on savonlinnalainen konepaja, joka kuuluu ANDRITZ Oy:n omistukseen sekä ANDRITZ-konserniin. Savonlinna Worksilla valmistetaan sellu- ja paperiteollisuuden koneita ja laitteita maailmanlaajuisesti. (Savonlinna Works Oy 2015.)

Konepajan historia alkoi 1917-luvulta, jolloin yrityksen nimi oli Lypsyniemen konepaja. Konepaja yhtiöitettiin vuonna 1948 Enso-Gutzeitin kanssa. Vuonna 1987 konepajan omistajaksi tuli Ahlström Oy ja vuonna 2000 konepaja siirtyi ANDRITZin omistukseen. Savonlinna Works Oy yhtiöitettiin vuonna 2004. (Savonlinna Works Oy 2015.)

Savonlinna Worksin palveluksessa työskentelee n. 130 henkilöä. Yhtiön valmistamat päälaitteet ovat massanpesulaitteet, rumpusuodattimet, kiekkosuodattimet, keittämön laitteet, painelaitteet ja lajitimet. (Savonlinna Works Oy 2015.)

Savonlinna Worksin huoltovalmistus toimittaa asennus-, huolto-, seisokki- ja varaosapalveluita sekä lisäksi korjauksia, päivityksiä ja modernisointeja suunnittelusta käynnistykseen asti. Huoltovalmistus korjaa, huoltaa ja modernisoi massan valmistuksen, keittämön sekä puunkäsittelyn laitteita. Savonlinna Worksilla on käytössä sertifioitu laatujärjestelmä ISO 9001:2008, 3834-2:2005 ja sertifioitu työterveys- ja turvallisuusjärjestelmä OHSAS 18001. (Savonlinna Works Oy 2015.)

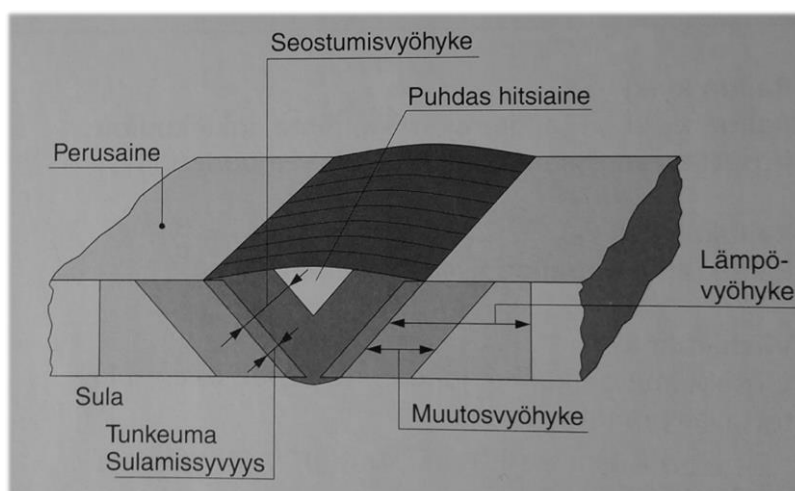
### 3 TYÖN TOTEUTUS

Työ toteutettiin yhteistyönä Savonia-ammattikorkeakoulun kanssa. Työ koostui neljästä päävaiheesta: robottikoulutuksesta, koekappaleiden hitsauksista Savonialla ja Savonlinna Worksilla, näytekapaleiden valmistamisista sekä materiaalien testaamisista ja hietutkimuksista. Toteutuksen ensimmäisessä vaiheessa opeteltiin käyttämään Savonia-ammattikorkeakoulun hitsausrobotia, sen ohjausta ja hitsauslaitteistoa projekti-insinööri Aku Tuunaisen perehdyttämänä. Työn toteutuksen toisessa vaiheessa hitsattiin koekappaleet CMT-prosessilla ja CMT-pulssiprosessilla kolmella hitsauslangalla, jotka nimettiin kirjaimin: A, B ja C. Työn toteutuksen toisessa vaiheessa tehtiin myös vastaavanlaiset testaukset MAG-pulssiprosessilla. Työn toteutuksen kolmannessa vaiheessa valmistettiin hitsatuista koekappaleista testaus- ja näyteaihiot aineenkoetusta varten. Työn toteutuksen neljännessä vaiheessa testaus- ja näyteaihioihin tehtiin kokeellisia testauksia mm. makro- ja mikrohiet ja kovuusmittaukset Savonian materiaalilaboratoriossa.

## 4 HITS AUS

### 4.1 Hitsi ja sen käsitteet

Hitsauksella tarkoitetaan standardin SFS 3052 (SFS 1996) mukaan osien liittämistä yhteen lämmön ja/tai puristuksen avulla siten, että osat muodostavat yhteyden. Hitsaamista voidaan suorittaa lisäaineiden avulla tai ilman lisäaineita. Hitsiaineella ja perusaineella tulisi olla lähes sama sulamispiste. Hitsaaminen on mm. teräksten ja alumiinien yleinen ja tärkeä liittämismuoto. Hitsaamisessa tarvitaan energiaa perus- ja hitsiaineen sulattamiseen. Energia tuotetaan erilaisilla virtalähteillä. (Kyröläinen ja Lukkari 1999, 50.) Tässä opinnäytetyössä käsitellään kaarihitsausta.



KUVA 1. Hitsi ja sen osat (Lepola ja Makkonen 2011, 22.)

Hitsausta ja sen yleisiätermejä käsitellään standardissa SFS 3052 (SFS 1996) Kuvassa 1 esitellään lyhyesti seuraavat perus- ja yleistermit: perusaine, puhdas hitsiaine, tunkeuma, seostumisvyöhyke ja muutosvyöhyke. Perusaineet ovat hitsillä liitettäviä osia tai sitä materiaalia, johon hitsiä tuodaan. Kuvan 1 levyyn ja sen perusaineeseen on tehty päittäisliitos ja siihen muotoiltu v-railo, johon hitsi hitsataan. Hitsauksen keskellä hitsissä on lähes seostumatonta puhdasta hitsiainetta. Tunkeumalla tarkoitetaan hitsauslisäaineen sulautumissyvyyttä perusaineeseen. Seostumisvyöhykkeellä tarkoitetaan aluetta, jossa lisä- ja perusaine sulavat ja seostuvat. Muutosvyöhykkeellä tarkoitetaan sitä perusaineen vyöhykettä, jossa lämpö tai hitsaus on aiheuttanut mikrorakenteeseen muutoksia (Suomen hitsausteknillinen yhdistys r.y. 2014, 281).

## 4.2 Päällehitsaus

Päällehitsausta käytetään kohteisiin, joissa halutaan parantaa kappaleen tiettyjä ominaisuuksia. Seuraavassa listassa on eri päämääriä, johon päällehitsauksella pyritään (Kyröläinen ja Lukkari 1999, 286) esimerkiksi:

- kovahitsauksella pyritään saamaan hitsattavalle kohteelle kulumista kestävä ominaisuus
- korroosionkestohitsauksella pyritään saamaan kohteeseen korroosion, syöpmisen ja happettumisen kestävä pinta
- täyttöhitsauksella pyritään saamaan kappaleeseen tietyt mitat
- välikerroshitsauksella eli "bufferikerroksella" pyritään saamaan hitsille ominaisuudet, jonka päälle voidaan tämän jälkeen hitsata tavoiteltavilta ominaisuuksilta oleva hitsi (Kyröläinen ja Lukkari 1999, 286).

Päällehitsaamisprosesseilta vaaditaan yleensä pientä hitsiaineen seostumista, jolla tavoitellaan hitsiaineen ominaisuuksia. Päällehitsaukselta vaaditaan myös vähäistä lämmöntuontia hitsattavaan kohteeseen, jottei syntyisi haittaavia muodonmuutoksia. Näiden ominaisuuksien vuoksi opinnäytetyössä tutkittavaksi hitsausprosessiksi valittiin CMT.

Tässä opinnäytetyössä käytettiin kahta erityyppistä hitsiainetta: Tavallista hitsiainetta, missä valokaari sulattaa perusainetta ja seostuu siihen. Hitsausprosessissa syntyy syvätunkeuma. Toinen päällehitsattavista hitsiaineista hitsattiin kaarijuottamalla, missä perusaine sulaa vain vähän tai ei ollenkaan. Hitsiaine diffundoituu hitsin pintaan, jossa se muodostaa metallisen liitoksen. Kaarijuotossa vastaavasti hitsi- ja perusaineen seostuminen on hyvin vähäistä.

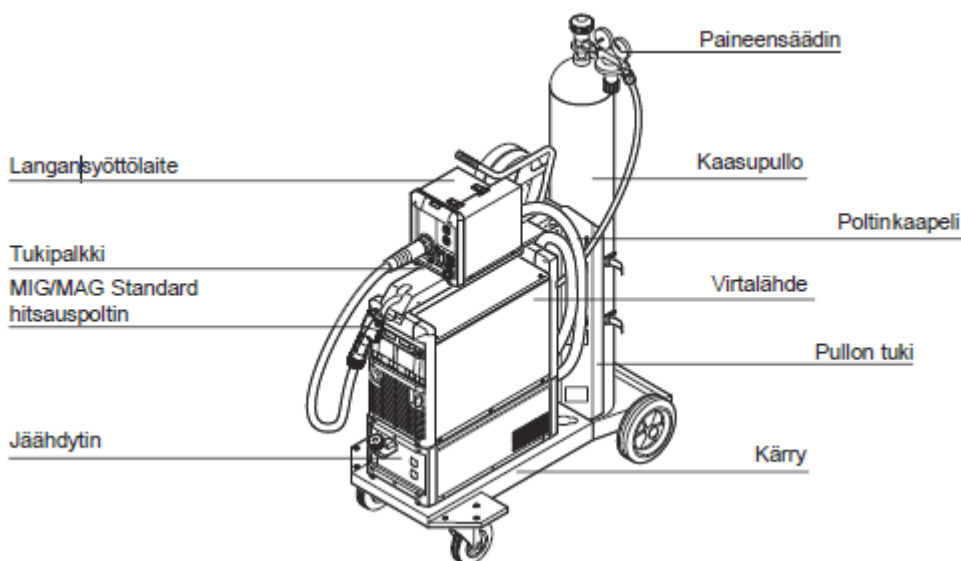
Pinnoitusta voidaan tehdä myös esimerkiksi jauhekaarinauhahitsaamalla, laserilla tai termisesti ruisuttamalla. Tässä opinnäyte työssä pinnoitushitsaukset tehdään MAG- pulssilla ja CMT prosesseilla.

## 4.3 MIG- ja MAG-hitsaus

MAG-hitsaus tulee lyhenteestä Metal-arc activ gas welding (Kyröläinen ja Lukkari 1999, 282) tai Metal Activ Gas welding (Kuusisto 2014, 4). Se tarkoittaa metallikaasukaarihitsausta aktiivisella suojakaasulla, aktiivisia suojakaasuja ovat happi, hiilidioksidi ja näiden argonseokset. MIG-hitsaus tulee lyhenteestä Metal-arc inert gas welding (Kyröläinen ja Lukkari 1999, 282) tai Metal Inert Gas Welding (Kuusisto 2014, 4). Se tarkoittaa metallikaasukaarihitsausta inertillä eli reagoimattomalla suojakaasulla. Reagoimattomia suojakaasuja ovat helium ja argon sekä näiden seokset. (Kuusisto 2014, 4.) Tässä opinnäytetyössä käytetään MIG- ja MAG-hitsaustermeistä pelkästään termiä MAG.

MAG-hitsauslaitteistoon kuuluu monia osia. Virtalähteen tehtävänä on muuttaa sähköverkosta otettu energia hitsaukseen tarvittavaksi energiaksi. Tavallisesta virtalähteestä voidaan säätää virtaa ja jännitettä. Synergisen virtalähteen säätäminen poikkeaa tavallisesta virtalähteestä siten, että yhden arvon muuttaminen muuttaa myös muita arvoja. MAG-hitsauslaitteistoon kuuluu langansyöttölaitteisto,

jonka tarkoitus on kuljettaa hitsauslisäainelankaa langanjohdinta pitkin hitsauspolttimolle. MAG-hitsauslaitteistossa on myös monitoimihitsauspoltinkaapeli, joka sisältää langanjohdinputken, virtakaapelin, ohjauskaapelin, jäähdytysnesteputket, suojakaasuputken ja hitsauspistoolin (Kyröläinen ja Lukkari 1999, 286). Hitsauspistoolista käynnistetään hitsaustapahtuma, jolloin hitsausvirta ohjataan kosketussuuttimesta lisäainelankaan. Hitsaustapahtumassa käynnistyy samalla myös suojakaasun virtaus. Hitsauspolttimoita on työntäviä ja vetäviä malleja. Työntäväpoltin on yleisempi ja siinä tapahtuu langansyöttö ainoastaan langansyöttömootorilla. Vetävässä polttimossa on vetomoottori syöttömoottorin lisäksi auttamassa langan syöttöä.

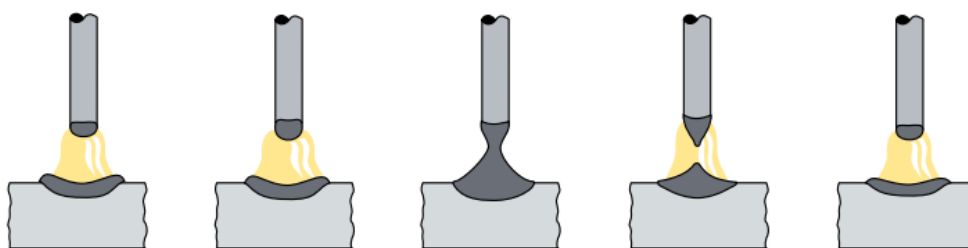


KUVA 2. MAG-hitsauslaitteisto (Fronius 2012, 41.)

Kuvassa 2 on MAG-hitsauslaitteisto ja siihen kuuluvat osat. MAG-hitsausprosessi tapahtuu virtalähteen tuottamasta valokaaresta, joka ohjataan hitsauslangan ja perusaineen välille suojakaasun suojaamana. Lisäainelanka syötetään langansyöttölaitteesta vakionopeudella valokaareen, jossa lanka sulaa ja aineen siirtyminen tapahtuu. MAG-hitsauksessa umpilangoille käytetään tasavirtaa, jolloin plus-napa on kytkettynä hitsauspolttimoon.

### 4.3.1 Lyhytkaarihitsaus

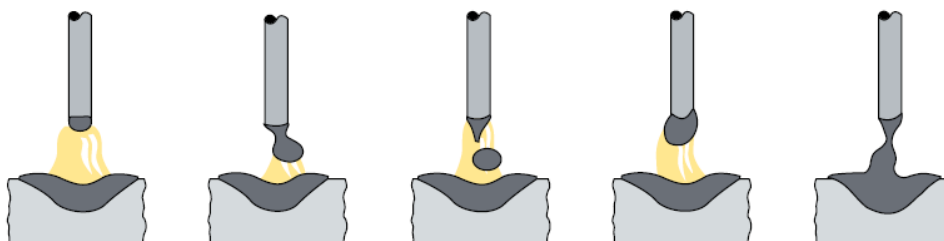
Hitsattaessa lyhytkaarialueella hitsiaine siirtyy oikosulkujen välityksellä. Lisäainelanka joutuu oikosulkuun, kun pisara siirtyy hitsiin. Oikosulkuja voi olla 20–200 kappaletta sekuntia kohden. Valokaaren palamisaika on vain osa hitsausajasta, joten lämmöntuonti säilyy vähäisenä. Lyhytkaarihitsaus soveltuu ohuille levyille ja asentohitsaukseen. (Kuusisto 2014, 15.) Lisäaineen siirtyminen on kuvattu seuraavassa kuvassa 3.



KUVA 3. Lisäaineen siirtyminen lyhytkaarihitsauksessa (Kuusisto 2014, 16.)

### 4.3.2 Välikaarihitsaus

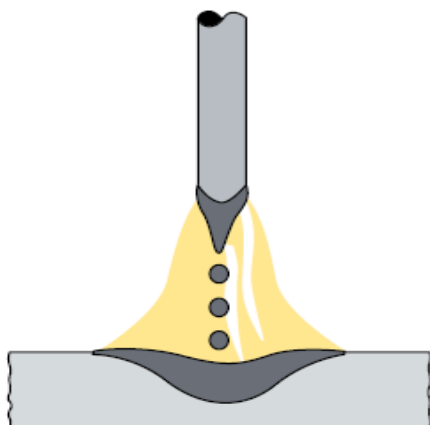
Välikaarihitsauksessa lisäainelanka sulaa pisaroina ja osittain myös oikosulkujen avulla. Kookas-pisarainen hitsiaineen siirtyminen sekä vallitsevat kaarivoimat saavat aikaan roiskeita ja nopeuttaa hitsaushuuruksen kehittymistä. Välikaarialueella hitsaamista ei suositella käytettävän (Kuusisto 2014, 17.) Lisäaineen siirtyminen välikaarialueella on kuvattu seuraavassa kuvassa 4.



KUVA 4. Lisäaineen siirtyminen välikaarihitsauksessa (Kuusisto 2014, 17.)

### 4.3.3 Kuumakaarihitsaus

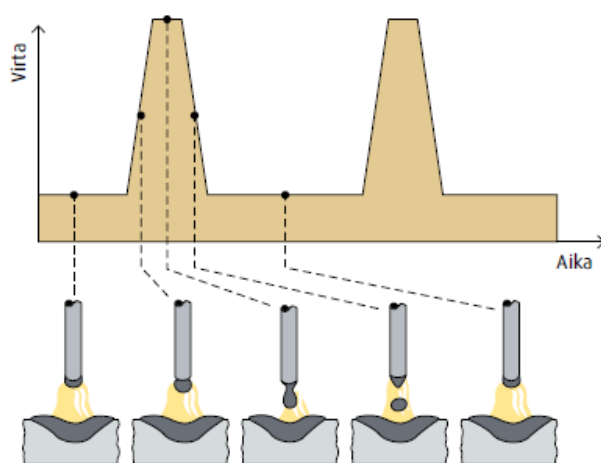
Hitsatessa kuumakaarialueella lisäaine siirtyy pelkästään pisaroina ilman oikosulkuja. Kuumakaarihitsauksessa käytetään argonia tai argonpohjaisia seoskaasuja hiilidioksidin sijaan. (Kuusisto 2014, 17.) Lisäaineen siirtyminen kuumakaarialueella on kuvattu seuraavassa kuvassa 5.



KUVA 5. Lisäaineen siirtyminen kuumakaarihitsauksessa. (Kuusisto 2014, 17.)

### 4.3.4 Pulssikaarihitsaus

Hitsattaessa pulssikaarialueella hitsauslisäaine siirtyy isopisaraisena eikä oikosulkuja ilmenny. Hitsausvirran pulssituksella saavutetaan säännöllinen hitsauslisäaineen siirtyminen ja vakaampi valo-kaari. Pulssikaarialueella saavutetaan tasainen tunkeuma ja roiskeettomampi hitsi sekä myös pienempi lämmöntuonti perusaineeseen. (Kuusisto 2014, 17.) Lisäaine siirtyminen pulssikaarialueella on kuvattu seuraavassa kuvassa 6.



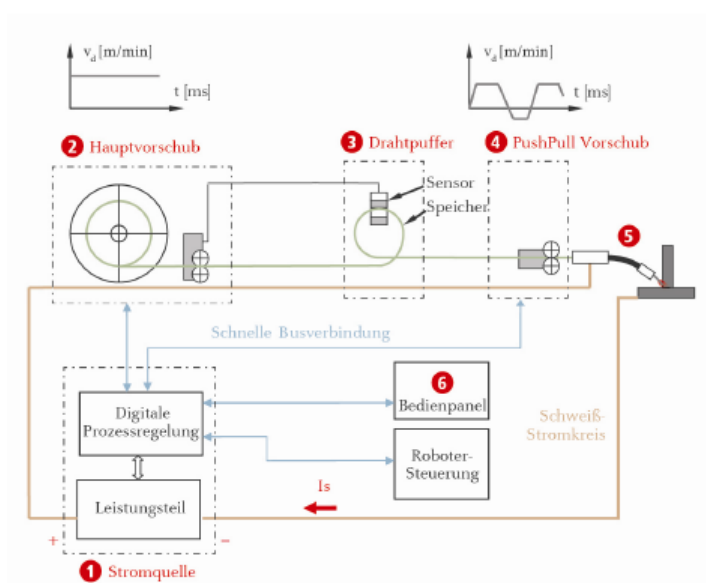
KUVA 6. Lisäaineen siirtyminen pulssikaarihitsauksessa (Kuusisto 2014, 17.)



#### 4.4 CMT-hitsaus

CMT-hitsausteknologian kehitti Fronius International GmbH vuonna 2004. CMT-hitsaus tulee lyhenneestä Cold Metal Transfer eli kylmähitsaus. CMT-hitsaus on MAG-hitsauksen kaltainen hitsausprosessi, jossa langansyöttö perustuu edestakaiseen liikkeeseen, joka vaihtuu jopa 140 kertaa sekunnissa. CMT:llä hitsattaessa prosessi vaihtelee kylmän ja kuumen kaaren alueella. CMT-prosessi saa vakaan valokaaren digitaalisesta virtalahteesta, joka tunnistaa ja mittaa valokaaren pituutta ja säätelee tämän mekaanisesti. CMT-prosessi saa sulapisaran siirtymään liki nollavirralla. Sulapisaran irtoamista avustaa langan veto taaksepäin. (Fronius Oy 2011.) Myös muiden hitsauslaittevalmistajien kylmähitsausprosesseihin soveltuvia hitsauslaitteita ovat esimerkiksi, Kempin FastMIG Wise root ja EWM valmistama ColdArc. (LUKKARI 2009.)

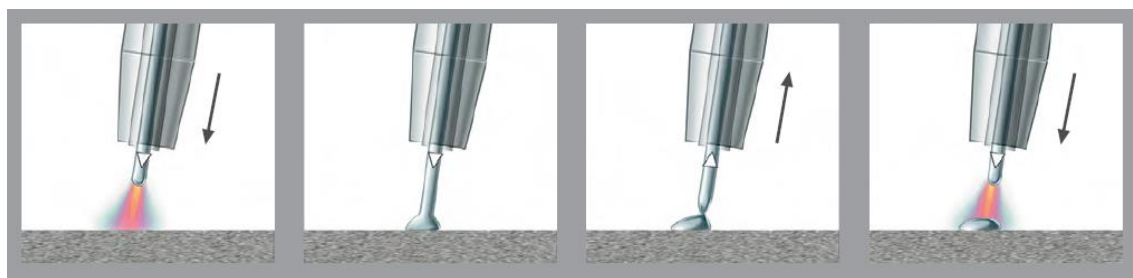
Mekaanisilta ominaisuuksiltaan CMT-hitsauslaitteisto poikkeaa normaalista MAG-hitsauslaitteistosta muun muassa lankabufferin (3), push-pull-hitsauspolttimon (4) ja nopeamman tiedonsiirtoväylän osalta. Seuraavassa kuvassa 7 on Fronius CMT-hitsauslaitteiston järjestelmä ja sen osat.



KUVA 7. Lohkokaavio CMT-järjestelmästä (Fronius International GmbH 2013, 14.)

#### 4.4.1 CMT-kaarihitsaus

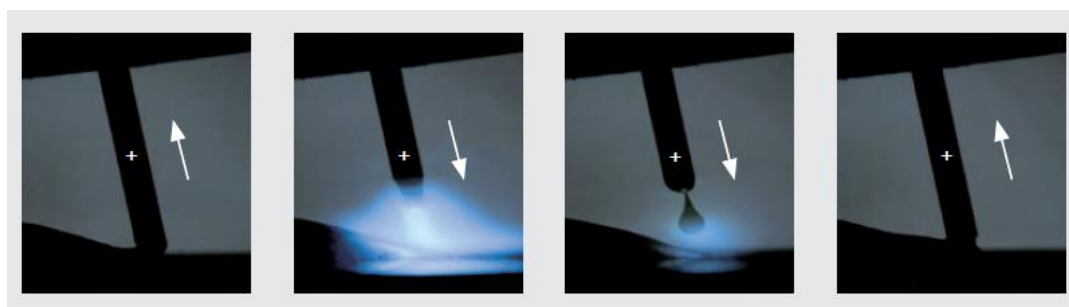
Hitsattaessa CMT-kaarialueella prosessi koostuu neljästä osasta, joita tarkastellaan kuvassa 8. Ensimmäisessä vaiheessa valokaaren palaessa hitsauslisäainelanka liikkuu kohti hitsisulaa. Toisessa vaiheessa langan koskettaessa hitsisulaa valokaari sammuu ja samalla hitsausvirta on madallettuna. Kolmannessa vaiheessa langansyöttölaite vetää lisäainelankaa taaksepäin, mikä auttaa samalla pisaran irtoamista oikosulun aikana. Oikosulkuvirtaa pidetään edelleen alhaalla. Neljännessä vaiheessa lisäainelangan suunta on päinvastainen ja prosessi aloittaa uuden kierron. (Pronius Oy 2012.)



KUVA 8. Lisäaineen siirtyminen CMT-kaarihitsausprosessissa (Pronius Oy 2012, 4.)

#### 4.4.2 CMT-pulssikaarihitsaus

CMT-pulssikaarihitsauksessa yhdistyvät CMT-kierto ja pulssikierto. CMT-pulssikaarihitsauksessa CMT-kierron ja pulssikierron suhde on säädettävissä. CMT-pulssikaarihitsauksessa lämmöntuonti on suurempaa kuin pelkällä CMT-kaarella hitsattaessa. Ensimmäisessä vaiheessa lankaa vedetään sisäänpäin kaaren ollessa CMT-positiivinen. Toisessa vaiheessa lanka liikkuu ulospäin kaaren ollessa positiivinen CMT-pulssi. Kolmannessa vaiheessa lanka liikkuu ulospäin kaaren ollessa CMT-pulssi, jolloin pisara irtoaa. Neljännessä vaiheessa lankaa vedetään sisäänpäin kaaren ollessa CMT-positiivinen. Tämän jälkeen prosessi aloittaa uuden kierron. (Pronius Oy 2012.) Seuraavassa kuvassa 9 on esitelty CMT-pulssikierto.



KUVA 9. Esimerkki CMT-pulssikaaren kierrosta (Pronius Oy 2012, 5.)

## 4.5 Hitsauksen työturvallisuus

Hitsaaja altistuu työssään haitallisille olosuhteille, joko hitsausprosessin tuottamiin tai ympäristön tuottamiin olosuhteisiin. Olosuhteet eivät ole hyväksi terveydelle, minkä vuoksi turvallisuuteen liittyviin asioihin tulee olla perehtynyt. Hitsaukseen liittyviä terveydellisiä riskitekijöitä ovat mm. hitsauksesta syntynyt lämpö, sähkö, melu, hitsaushuurut, valokaaren tuottama UV-säteily, kuumat roiskeet ja vaikeat työskentelyasennot. Hitsausta suunniteltaessa on hyvä tunnistaa siihen liittyvät riskit ja tehdä riskien arviointia ja tarkastella niiden hallintaa. Lukkarin (2006, 4) mukaan riskien arvioinnissa tulee ottaa huomioon ainakin seuraavia asioita:

- riskeihin liittyvien tekijöiden tarkasteleminen (vaarojen tunnistaminen)
- mahdollisten vahinkojen kohteeksi joutuvien selvittäminen
- direktiivissä asetettujen raja-arvojen mahdollisten ylitysten selvittäminen
- riskien merkityksen suuruuden arvioiminen
- haitallisten ja terveydellisten seurausvaikutusten tarkasteleminen
- varotoimien riittävyden tarkasteleminen
- havaintojen kirjaaminen
- arviointien kokoaminen ja tarvittavien korjaustoimenpiteiden tekeminen

Hitsauksen työturvallisuuteen löytyy lisätietoja laajemmin seuraavista lähteistä: työturvallisuuslaista (738/2002) ja työterveyshuoltolaista (1383/2001), SFS-KÄSIKIRJASTA 66-12 hitsauksen työturvallisuus.

## 5 ROBOTIIKKA

### 5.1 Teollisuusrobotit

Stadardissa SFS-EN 10218 (Teollisuusrobotit 2011, 12) teollisuusrobotin määritelmä on ilmaistu seuraavasti: "Automaattisesti ohjattu, uudelleen ohjelmoitava ja monikäyttöinen käsittelylaite, jolla on useita vapautusasteita, ja joka voi olla joko kiinteästi paikalleen tai liikkuvaksi asennettuna, käytettäväksi teollisuuden automaatiojärjestelmissä". Tässä opinnäytetyössä käsitellään ainoastaan hitsausrobotteja teollisuusrobottien kategorioista.

#### 5.1.1 ABB-robotti

Opinnäytetyössä käytetään Savonia ABB IRB-1600-6 / 1.45- teollisuusrobottia, jossa on ForceControl- voimaohjausjärjestelmä Programming Handle-varustuksella, ks. kuva 10. Robotin voimaohjaukseen liittyviä parametreja voidaan säätää robotin ohjainyksiköstä. (Alonen, Jääskeläinen, Nissinen, Pirinen, Solehmainen, Toivanen ja Tuunainen 2014, 75 - 76.) Robotin ohjaukseen liitettynä lisävarusteena on 500 kg kantavuudella oleva servo-ohjattu L-mallin pöytä. Robotti on ohjelmoitavissa opettamalla sekä Robot Studion avulla myös offline-tilassa.



KUVA 10. Savonian hitsausrobotti (Savonia 2013, 14.)

#### 5.1.2 Motoman-robotti

Savonlinna Worksilla tehtävissä hitsauksissa käytettiin NX 100 ohjauksista 6 akselista Motoman HP-20-teollisuusrobottia. Robotin varustukseen kuuluu mm. vaaka-akseli suunnassa oleva käsittelypöytä.

### 5.1.3 Etäohjelmointi

Robotin ohjelmointeja voidaan luokitella muun muassa kahdella tavalla: mallipohjaisena etäohjelmointina tai fyysisenä lähiohjelmointina. Etäohjelmointia tehdään tietokoneen avulla käyttämällä 3D-malleja ilman robottia. Monesti ohjelmaan on luotu todellisuutta vastaava robottisolun, johon tuotetta vastaava 3D-malli tuodaan. Lyhykäisytydessään 3D-suunnitteluohjelmalla oikeilla mitoilla tuotu kappale siirretään sille suunnitellulle hitsauskiinnittimelle, joka keskitetään sille määrättyyn kohtaan. Robotille luodaan liike- ja hitsausradat sekä määrätään niille nopeudet ja muut tarvittavat parametrit. Etäohjelmointi toimii myös apuna tuotteiden robottihitsattavuussuunnittelussa. Ohjelmista voidaan lukea mm. työkiertoajat, valokaariajat ja automaatiokiertoajat. Valmis ohjelma siirretään robotille, joka koeajetaan ja hienosäädetään ennen tuotantokäyttöä. Etäohjelmoinnilla pyritään pitämään robotin käyttöaste korkealla tekemällä ohjelmia hitsauksen aikana.

### 5.1.4 Opettamalla ohjelmointi

Opettamalla ohjelmointi on robotin lähiohjelmointia, jota tehdään fyysisessä läheisyydessä. Opettamalla ohjelmointi on ehkä yleisin tapa luoda robotin ohjelmia. Opettamalla ohjelmointia tehdään robotin käsiohjaimella, jota kutsutaan myös opetusyksiköksi. Opettamalla voidaan tehdä valmis ohjelma ja suorittaa koeajo. Robottia liikutetaan joystick-ohjaimella tai liikekäskynäppäimillä. Ohjelmointia tehdään liikuttamalla robottia haluttuihin pisteisiin, jotka tallennetaan muistiin. Kun pisteitä, joilla voidaan suorittaa haluttu toiminto, on tarpeeksi, tätä voidaan kutsua ohjelmaksi.

## 5.2 Robottityöturvallisuus

Robottihitsauksen turvallisuuteen vaikuttavana lähtökohtana on EU:n asettama konedirektiivi 2006/42/EY, jonka tavoitteena on yhdistää koneiden rakentamisen ja suunnittelun lainsäädäntö eurooppalaiselle konepajateollisuudelle. Toisena tavoitteena on vaikuttaa koneiden turvallisemmiksi muuttumista. Pyrkimys on vähentämään kotona sekä työpaikoilla tapahtuvia tapaturmia ja terveyteen kohdistuvia yhteiskunnallisia kustannuksia. (Konedirektiivin 2006/42/EY soveltamisopas 2010, 16.)

Koneturvallisuutta käsitellään standardissa SFS EN ISO 12100, jossa on kolmetasoinen konedirektiivin vaatima suunnittelumetodi. Suunnittelumetodin ensimmäinen tarkoitus on poistaa vaaroja tai alentaa riskejä vaikuttamalla parempiin ja turvallisempiin suunnittelutoimenpiteisiin. Toisessa suunnittelumetodissa käytetään suojuksia, teknisiä turvalaite- ja apuvälineratkaisuja sekä kokonaisuutta parantavia suojaavia toimenpiteitä, kuten hätäseis ja poistumistiet, lisäämään turvallisuutta ja poistamaan olemassa olevia riskejä sekä tekemään näistä vaarattomampia. Kolmannessa suunnittelumetodissa informoidaan käyttäjälle henkilön suojaamisen käytöstä, käyttöohjeista ja merkinnöistä sekä riskeistä ja vaaroista, joita on vielä jäänyt jäljelle suunnittelusta sekä suojaavista toimenpiteistä huolimatta. (SFS 2014, 7.)

Koneturvallisuuden riskien arviointia voidaan tehdä standardin EN ISO 14121-2 mukaan. Standardissa on käytännönläheinen opastus, esimerkit ja työkalut riskien arviointiprosessiin. Riskin arvioinnin päävaiheet ovat:

- koneen raja-arvojen määrittäminen
- vaaran tunnistaminen
- riskin suuruuden arviointi
- riskin merkityksen arviointi

Riskianalyysin jälkeen päätetään, pienennetäänkö riskiä. Mikäli riskiä pienennetään, sen jälkeen on tehtävä uusi riskinarviointikierrös. Uudella arviointikierröksellä varmistetaan, että riskin pienentämisellä saavutetaan tavoiteltu taso. (MetSta 2009, 22–29.)

Robotin suojain- ja turvalaitetason määrittelee se, minkälaisessa vuorovaikutuksessa ihminen ja roboti ovat. Ellei ihmisellä ja robotilla ole vuorovaikutusta, turvataso on alempi kuin sellaisessa tapauksessa, jossa ihmisellä ja robotilla on rajoittamaton yhteistyö.

Työterveyslaitoksen (2009, 1) mukaan robottihitsauksessa yleisiä esiintulevia riskejä voivat olla mm. seuraavat:

#### Mekaaniset vaaratekijät

- voimanjaosta johtuvat liikkuvat osat sekä kappaleet, joista voi aiheutua puristumisia ja takertumisia
- viilto-, leikkautumis- tai pistohaavat, esimerkiksi osien kiinnityksessä tai muussa käsittelyssä
- sinkoutuvat kappaleet, esimerkiksi lastut, työstettävän osan tai työkalun irtoaminen, törmäys ja särkyminen
- koneen tai laitteen ennakoimaton käynnistyminen epäluotettavien turvalaitteiden vuoksi
- ongelmat käsikäytön aikana turvalaitteiden ollessa tilapäisesti pois käytöstä.

#### Muuntyyppiset vaaratekijät

- ihottumat, esimerkiksi kemikaaleista tai leikkuuneisteistä
- liukastumiset
- ilman epäpuhtaudet, esimerkiksi pöly, huurut ja savut
- palo- ja räjähdysvaarat
- ergonomiaan liittyvät tekijät, kuten työasennot, raskaat taakat tai hankalasti käytettävät henkilösuojaimet
- sähköiskut
- lämpö
- melu ja värinä
- säteily
- eri vaaratekijöiden yhdistelmät.

Robottityöturvallisuuteen löytyy lisää tietoa laajemmin mm. 2006/42/EY konedirektiivistä ja seuraavista standardeista: SFS-EN 14199 Suojusten kytkentä koneen toimintaan, SFS-EN 13849-1 Turvalli-

suuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat, SFS-EN 953+A1 Suojukset kiinteiden ja avattavien suojusten suunnittelun ja rakenteen yleiset periaatteet, SFS-EN 349+A1 Vähimmäisetäisyydet kehonosien puristumisvaaran välttämiseksi, SFS-EN 10218-1 Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset SFS-EN 13857 Turvaetäisyydet yläraajojen ja alaraajojen ulottumisen estämiseksi vaaravyöhykkeelle, SFS-EN 1037+A1 Odottamattoman käynnistyksen estäminen, SFS-EN 13850 Hätäpysäytys.

## 6 MATERIAALIEN AINEENKOETUKSET

### 6.1 Makro- ja mikrohie

Makrohietutkimuksissa tutkitaan metallin poikkileikkauksen murtopintaa esimerkiksi hitsausvirheiden osalta tai perusaineen ja hitsiaineen sulamis-, lämpö- ja muutosvyöhykkeitä (Suomen hitsausteknillinen r.y. 2014, 276).

Standardin SFS-EN 17639 mukaan makrohietutkimuksessa tutkitaan silmämääräisesti tai lievästi suurentamalla syövyttämätöntä tai syövytettyä koekappaletta. Mikrohietutkimus puolestaan tarkoittaa syövytetyn tai syövyttämättömän koekappaleen tutkimista 50 - 500 kertaa suurentavalla mikroskoopilla. Mikro- ja makrohietutkimusta tehdään yleensä hitsin ja/tai hitsatun kappaleen poikkileikkaukseen, josta halutaan selvittää mikro- tai makroalueen ominaisuuksia. (Hitsien rikkova aineenkoetus metalleille 2013, 8-10.)

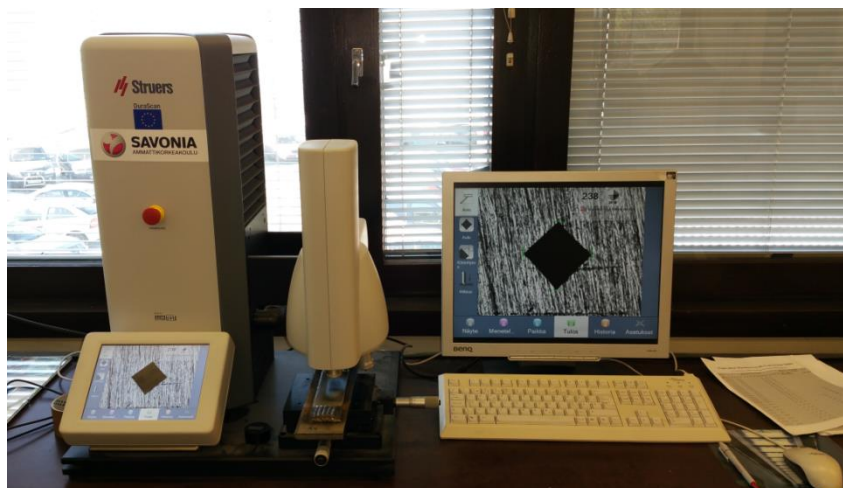
### 6.2 Vickersin kovuusmittaus

Materiaalin kovuutta voidaan pitää kykynä kestää kovemman kappaleen tai esineen aiheuttamia painaumuksia. Pehmeisiin materiaaleihin tulee helpommin isompi painauma kuin koviin materiaaleihin. Kovuuskokeita tehdään mm. siksi, että halutaan tuntea materiaalin ominaisuuksia, tunnistaa materiaaleja tai materiaalin toimivuuteen liittyviä seikkoja. (Suomen hitsausteknillinen r.y. 2014, 41.)

Vickersin kovuuskoe määritellään standardin SFS-EN ISO 6507-1 mukaan siten, että mittaus suoritetaan laitteella, jonka paininkärki on säännöllinen neliönmallinen timanttipyramidi ja paininkärjen vastakkaisen sivujen kulma on määriteltä. Koe suoritetaan vakiovoimalla painamalla kappaleeseen jälki, minkä jälkeen mitataan koekappaleen pintaan jääneen painuman lävistäjät. (Metallin Vickersin kovuuskoe 2006, 10.) Seuraavassa listassa ovat koekappaleen vaatimukset ja suoritustavat (Metallin Vickersin kovuuskoe 2006, 14 - 16):

- kovuusmittaus tehdään koekappaleen tasomaiselle pinnalle, jolla on hieno pinnankarheus ja joka on vapaa epäpuhtauksista
- kappaleen pinnanlaatu valmistetaan siten, ettei kappale kuumene eikä lujitu iskuista
- mitattavan materiaalin tai pintamateriaalin vahvuus tulee olla minimissään 1,5-kertainen uppouman lävistäjään nähden
- epäsäännöllisen muotoisiin kappaleisiin käytetään lisätuentaa ja kaareville pinnoille korjausker-toimia
- Vickersin kovuuskoe suoritetaan 10–35 °C lämpötilassa tai lämpötilaa pidettynä 18–28 °C välillä
- koekappale tulee olla tukevasti kiinnitettynä ja koelaitteeseen ei saa kohdistua värinäjä eikä isku- ja





KUVA 11. Savonian Vickers-kovuusmittauslaite

## 7 HITSUKSEN LABORAATIOT

### 7.1 Työn valmistelu

Työ aloitettiin hitsauskokeen suunnittelulla, jossa valittiin tietyn tyyppinen perusaine ja hitsiaineet. Hitsiaineina käytettiin A:ta, B:tä ja C:tä ja perusaineena XX:ää (ks. johdanto). Materiaalivalintojen jälkeen valittiin vertailtavat hitsausprosessit, jolloin päädyttiin CMT:hen, CMT-pulssiin ja MAG-pulssiin.

Koehitsausalusta valmistettiin HEB 160 -palkista, jonka pituus on 600 mm. Palkin jokaiselle sivulle hitsattiin 150 mm levyinen ja 600 mm pitkä koekappale, ks. kuva 12.



KUVA 12. Koehitsausalusta ja hitsattava koekappale

Testattavia ja tutkittavia kappaleita oli kaikkiaan yhdeksän, kolme kappaletta/lisäaine. Koekappaleet nimettiin seuraavasti: A1 - A3, B1 - B3 ja C1 - C3, jossa A, B ja C ovat eri lisäaineita sekä numerot 1, 2 ja 3 tarkoittavat CMT- prosessia, CMT-pulssiprosessia ja MAG-pulssiprosessia.

Kokeen suunnittelussa oli tärkeää kappaleen nimeäminen ja nimen siirto. Kappaleen nimissä ei saisi sattua erehdyksiä, sillä ne vaikuttaisivat kaikkiin vaiheisiin ja lopputuloksiin. Erehdyksien estämiseksi näytteet kuvattiin nimensiirtovaiheessa. Seuraavassa kuvassa 13 on havainnollistettu työn aikana tehdyt nimensiirrot:



KUVA 13. Nimensiirtovaiheet

## 7.2 CMT-hitsauskokeet

Koekappaleiden hitsaaminen, hitsausarvojen ja parametrien säätäminen aloitettiin asettamalla vapaan langan pituus sekä kuljetusnopeus. Tämän jälkeen asetettiin virta-arvo, joka valittiin kyseiselle prosessille aiemman kokemuksen perusteella. Nämä arvot olivat oletusarvoja, joita lähdettiin muuttamaan ja hienosäätämään hitsauksen aikana. Liitteistä 1 - 9 löytyvät hitsauksen pöytäkirjat, joista löytyvät hitsauksessa käytetyt arvot ja hitsausparametrit. CMT-hitsausprosessiparametrien säätäminen oli alussa haasteellista sen vuoksi, että CMT-prosessilla hitsaaminen näyttää ja kuulostaa erilaiselta kuin MAG-prosessilla hitsaaminen. Hitsausarvojen hienosäätöä tehdään aistienvärisesti. FRONIUS (2009, 7 - 14) on kirjoittanut säätämiseen liittyviä ohjeita.

Koekappaleissa A1 ja B1 CMT-prosessi vaikutti hallitulta ja tasaiselta sekä valokaari näytti rauhalliselta. Valokaari ei näyttänyt tunkeutuvan kovin syvälle perusaineeseen. Lanka syttyi herkästi hitsauksen aloituksessa. Hitsin pinta jäi kiiltäväksi sekä hitsin viereen jäi vähän epäpuhtautta ja roiskeita. Hitsipalosta tuli kupumainen.

Koekappaleissa A2 ja B2 CMT-pulssiprosessi tuotti alussa haasteita säätöjen osalta. CMT-pulssilla hitsattaessa jouduttiin kokeilemaan eri synergiakäyriä ja nostamaan vapaan langan pituutta kahdella millimetrillä, jotta valokaari saatiin vakaammaksi. Muutoksien avulla saatiin testauksiin säädettyä hyvät hitsausarvot. CMT-pulssi vaikutti lähes yhtä vakaalta, mutta valokaari näytti tunkeutuvan hieman syvempään perusaineeseen. Hitsauksessa oli ongelmia langan syttymisen kanssa. Tämä ongelma olisi ehkä ollut korjattavissa, mikäli hitsauksen aloittamiseen liittyviä parametreja olisi säädetty. Hitsin pinta ei jäänyt yhtä kiiltäväksi kuin CMT-prosessilla. CMT-pulssi jätti enemmän epäpuhtautta hitsauksen jälkeen. Hitsipalot liittyivät toisiinsa jouheammin ja palkojen väliin jäi pienempi uuma.

Koekappaletta C1 hitsattiin CMT-kaariprosessilla, jossa oli alussa haasteita sopivan synergiakäyrän löytämiseen. Synergiakäyrä löytyi lopulta ja testaukset saatiin tehtyä. Hitsauksessa oli ongelmia, kun jokaiseen hitsipalkoon jäi liitosvirhe samaan kohtaan eikä ongelman syytä löytynyt. Kappaleesta saatiin silti mittaustulokset hitsausvirheestä huolimatta.

Koekappaletta C2 hitsattiin CMT-pulssiprosessilla, jossa säädöt onnistuivat hyvin. Hitsauksessa ei syntynyt roiskeita juuri ollenkaan ja lanka sulii tasaisesti. Hitsipaloista tuli jouheat mutta samalla myös matalat.

## 7.3 MAG-hitsauskokeet

Koekappaleet A3 ja B3 hitsattiin samoilla hitsausparametreilla lankojen hitsattavuuden ollessa lähes samanlaisia. MAG-prosessilla hitsaus onnistui tasaisesti ja valokaari oli vakaa. Valokaari sulatti juuren puhtaasti ja näytti tunkeutuvan syvälle. Valokaari näytti laajemmalla muihin testauksiin nähden. Hitsin pintaan jäi epäpuhtautta ja roiskeita jonkin verran. Koekappaleiden kääntöpuolelta oli nähtävissä

lämpötilan vaikutus värimuutoksena. Kun levy irrotettiin palkista, siinä oli reilusti lämmöstä johtuvia muodonmuutoksia, kaareutumia ja kulmavääntymiä.

Koekappaleen C3 hitsaaminen tapahtui lyhyellä ja keskitetyllä valokaarella. Hitsissä palkojenvälinen liittymä ja juuri sulivat hyvin. Hitsistä tuli kiiltävä ja hitsauksessa syntyi jonkin verran roiskeita. Palkojenvälinen uuma jäi matalaksi.

## 8 NÄYTEAIHIODEN VALMISTAMINEN

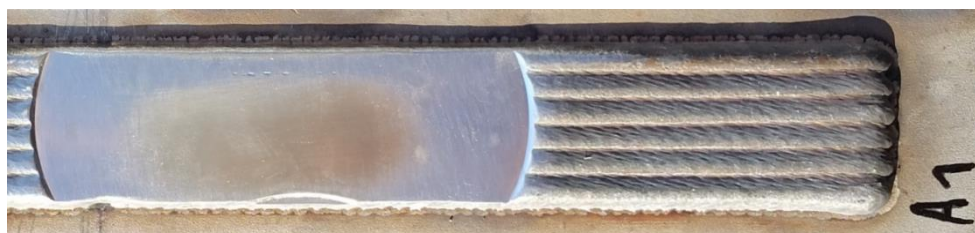
Hitsatuista koekappaleista valmistettiin näyteaihiot tutkimista ja aineenkoetusta varten. Hitsatut koekappaleet irrotettiin palkista siten, että kappaleista saatiin sahattua 38 mm pitkät ja 15 mm leveät näyteaihiot. Näyteaihiot otettiin noin 100 mm etäisyydeltä hitsauksen aloituksesta. Näyteaihiot tarvittiin hietutkimusta varten. Näyteaihiot laitettiin näytepuristimen sylinteriputkeen, johon lisättiin muovivaluaine. Hienäyteaihion valmistamiseen kuului sulatus ja jäähdytys, mihin kului aikaa noin 10 - 15 min kappaletta kohden. Seuraavassa kuvassa 14 on näytepuristin, jolla hienäyteaihiot valmistettiin.



KUVA 14. Näytepuristin

Näyteaihion valmistamiseen liittyi useampia hiontavaiheita, jossa ensimmäisenä näyteaihiolle tehtiin oikaisuhionta ja sen jälkeen tarkempi hionta vesihiomapapereilla, joiden karkeus oli P320, P600, P1000 ja P1200. Viimeistelykiillotus tehtiin huovalla ja kiillotusaineella. Lopuksi näyteaihiot syövytettiin hapolla, jotta hitsauksen ja perusaineen väliset erot saataisiin näkyviin. Kahdessa näytteessä ei näkynyt ollenkaan rajapintoja ennen syövytystä.

Hitsatusta koekappaleesta jäi jäljelle noin 200 - 300 mm pitkä palanen, johon valmistettiin tasomainen pinta horisontaalista kovuusmittausta varten. Näyteaihiosta pinta oikaistiin tasaiseksi jyrsimellä ja viimeisteltiin hiomalla. Seuraavassa kuvassa 15 on esimerkki yhdestä näyteaihiosta, johon horisontaalinen kovuusmittaus tehtiin.



KUVA 15. Näyteaihio horisontaaliseen Vickers-kovuuskokeeseen

## 9 TUTKIMUKSET

### 9.1 Makrohieiden tutkimus

Koekappaleista haluttiin tutkia hitsiaineen sulamis-, lämpö- ja muutosvyöhykkeitä sekä tunkeuman syvyyttä. Tunkeuman syvyyden mittaaminen oli haasteellista, kun hiekkappale ei mahtunut kokonaan mittalaitteen kuvaruudulle sopivan suurennosalueen puuttuessa. Tunkeuman syvyyttä ei päässyt mittaamaan suunnitellusti Picsara-ohjelmalla, vaan mittaamisen joutui tekemään käsin työntömitalla.

Hitsattujen koekappaleiden A1, A2 ja A3 hitsausenergiat olivat 4,34 Kj/cm, 6,97 Kj/cm ja 10,83 Kj/cm ja hitsien tunkeumien enimmäissyvyydet 0,8 mm, 2,1 mm ja 3,4 mm. Hitsausenergioiden vaikutus tunkeuman syvyyteen oli huomattava: Hitsausenergian suurentuessa tunkeuman syvyys kasvoi. Pienin tunkeuma oli CMT- ja CMT-pulssiprosessilla ja suurin MAG-prosessilla. Kaikissa hitsauksissa lisäaine oli sulanut tasaisesti perusaineeseen. Alla olevasta hiekuvasarjasta 16 näkyvät hitsauksen poikkileikkaus, tunkeuma ja palkojen välisen liittymän jouheus. Liitteissä 1 - 3 on hitsauspöytäkirjat, joista löytyvät hitsauksessa käytetyt parametrit.



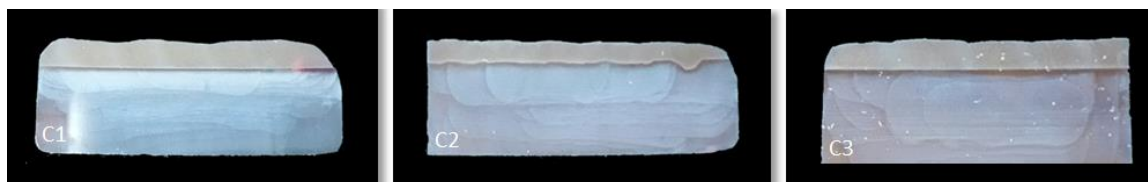
KUVA 16. Koekappaleiden poikkileikkauksien hiekuvat hitsiaine A:lla

Hitsattujen koekappaleiden B1, B2 ja B3 hitsausenergiat olivat 4,18 Kj/cm, 6,99 Kj/cm ja 10,98 Kj/cm ja hitsien tunkeumien syvyydet 1,2 mm, 2,7 mm ja 4,3 mm. Samoin kuin edellä olevissa hitsauksissa A, koekappaleissa B hitsausenergioiden vaikutus tunkeuman syvyyteen oli huomattava ja hitsausenergian suuruus vaikutti tunkeuman syvyyteen. Pienin tunkeuma oli myös CMT- ja CMT-pulssiprosessilla ja suurin tunkeuma MAG-prosessilla. Näissäkin hitsauksissa lisäaine oli sulanut tasaisesti perusaineeseen. Alla olevasta hiekuvasarjasta 17 näkyvät hitsauksen poikkileikkaus, tunkeuma ja palkojen välisen liittymän jouheus. Liitteissä 4 - 6 on hitsauspöytäkirjat, joista löytyvät hitsauksessa käytetyt parametrit.



KUVA 17. Koekappaleiden poikkileikkauksien hiekuvat hitsiaine B:llä

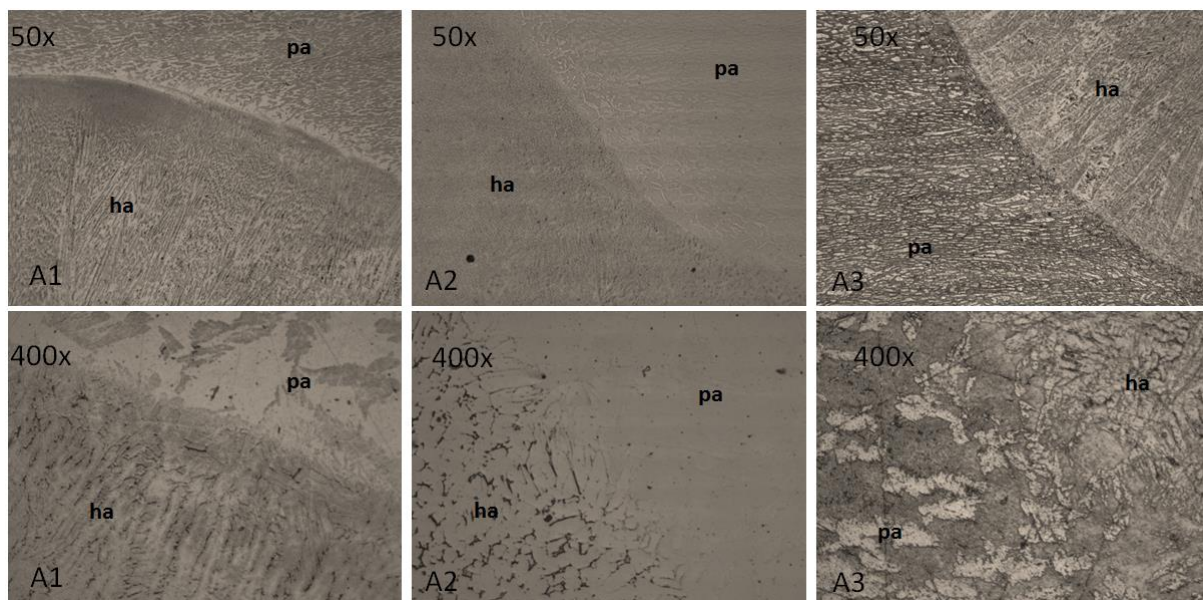
Hitsattujen koekappaleiden C1, C2 ja C3 hitsausenergiat olivat 2,74 Kj/cm, 3,68 Kj/cm ja 3,71 Kj/cm. Näistä koekappaleista tunkeuman syvyyttä ei voitu mitata, koska hitsi oli tasaisesti koekappaleen pinnassa. Hiessä käytetty syövyte vaikutti hitsin ja pesuaineen rajapinnalle. Hiekuvasarjasta 18 näkyvät hitsauksen poikkileikkaus. Liitteistä 7 - 9 on hitsauspöytäkirjat, joista löytyvät hitsauksessa käytetyt parametrit.



KUVA 18. Koekappaleiden poikkileikkauksien hiekuvat hitsiaine C:llä

## 9.2 Mikrohiiden tutkimus

Mikrohietutkimuksessa haluttiin tutkia perusaineen kiderakenne, hitsiaineen kiderakenne sekä hitsin ja perusaineen liittymä sekä mahdolliset hitsausvirheet. Mikroskooppikuvassa käytettiin 50- ja 400-kertaista suurennosta. Kuvasarjoissa 19 - 21 alimmaisat kuvat ovat yläpuolella olevien kuvien suurennoksia. Kuvasta puuttuu mittaviivaimet. Kuvissa ha tarkoittaa hitsiainetta ja pa tarkoittaa perusainetta. Alla olevista mikrohiekuvista näkyy hitsauksen poikkileikkaus.



KUVA 19. Mikroskooppikuva hitsiaine A:sta pintasuurennos 50- ja 400-kertainen

Kiderakenteessa on nähtävissä perusaineen valssaussuunta. Sulanjähmettymisrintama etenee kohti viimeistä loppusulaa. Kuvissa A1 on loiva ja matala hitsiaineen sulatunkeuma. Kuvissa A2 ja A3 on huomattavasti syvämpi tunkeuma, joka myös näkyy jyrkkänä rajana vertikaalissa suunnassa. Mikroskooppikuvista on vaikea todeta prosessien välisiä eroja kiderakenteessa. Liitteessä 10 on esitelty perusaineen ja hitsiaineen laskennallinen nikkeli- ja kromiekvivalentti, jonka arvot on sijoitettu Outokumpun (2013, 16) Shaeffler-de Long -diagrammiin hitsiaineen kiderakenteen ennustamiseksi. Liitteessä 11 on WRC- 1992-diagrammi, johon on piirretty ekvivalenttilaskentojen perusteella suora lisäaineen ja lisäaineseoksen ferriittipitoisuuden arvioimiseksi (Outokumpu 2010, 74).

Ekvivalentit laskettiin seuraavilla kaavoilla Shaeffler-de Long -diagrammiin:

Kaava 1

$$\text{Kromiekvivalentti} = \%Cr + \%Mo + 1.5 * \%Si + 0.5 * \%Nb$$

Kaava 2

$$\text{Nikkeliekvivalentti} = \%Ni + 0.5 * \%Mn + 30 * (\%C + \%N)$$

Ekvivalentit laskettiin seuraavilla kaavoilla WRC- 1992-diagrammiin:

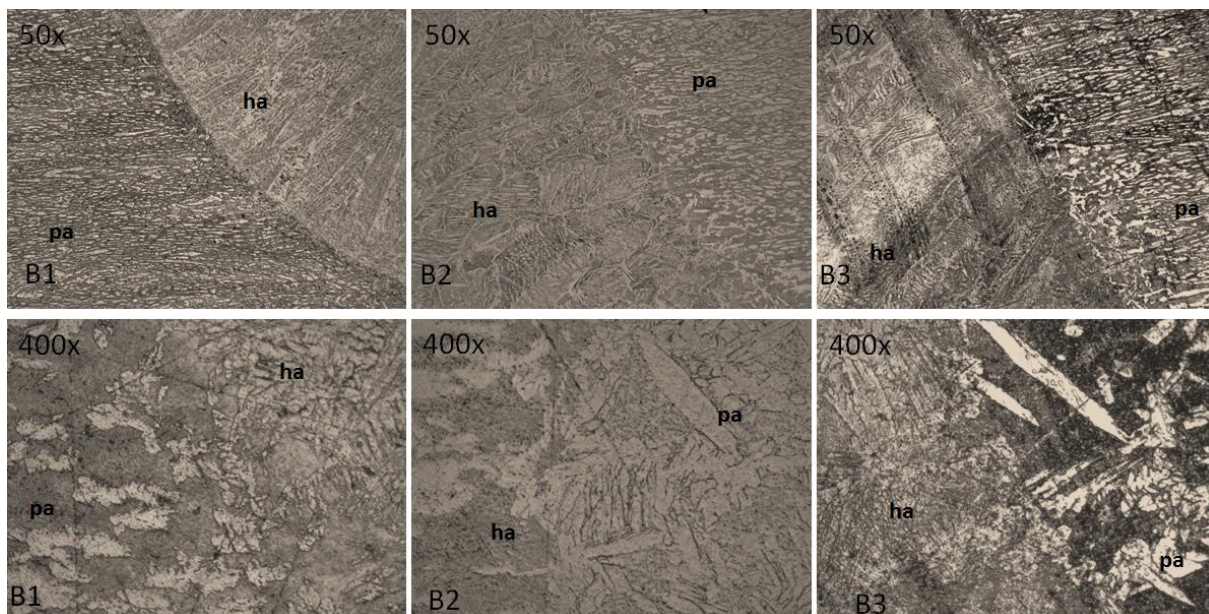
Kaava 3

$$\text{Kromiekvivalentti} = \%Cr + \%Mo + 0.7 * \%Nb$$

Kaava 4

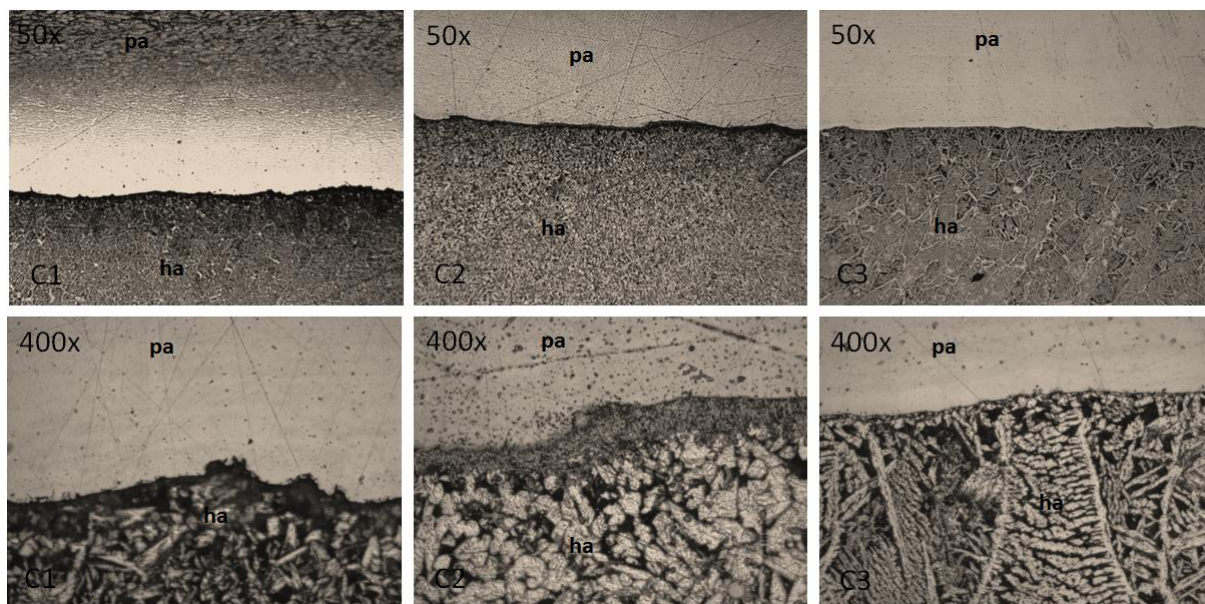
$$\text{Nikkeliekvivalentti} = \%Ni + 35 * \%C + 20 * \%N + 0.25 * \%Cu$$





KUVA 20. Mikroskooppikuva hitsiaine B:stä, suurennos 50- ja 400-kertainen

Myös kuvista B1 - B3 on nähtävissä perusaineen valssaussuunta. Näistäkin kuvista nähdään, että sulan jähmettymisrintama etenee kohti viimeistä loppusulaa. Mikroskooppikuvista on vaikea todeta prosessien välisiä eroja kiderakenteen perusteella. Hitsiaine B:ssä on erilainen kiderakenne kuin A:ssa. Liitteessä 10 on perusaineen ja hitsiaineen laskennallinen nikkeli- ja kromiekvivalentti, joiden arvot on sijoitettu Outokummun (2013, 16) Shaeffler-de Long -diagrammiin kiderakenteen ennustamiseksi. Liitteessä 11 on WRC- 1992-diagrammi, johon on piirretty ekvivalenttillaskentojen perusteella suora lisäaineen ja lisäaineseoksen ferriittipitoisuuden arvioimiseksi (Outokummun 2010, 74).

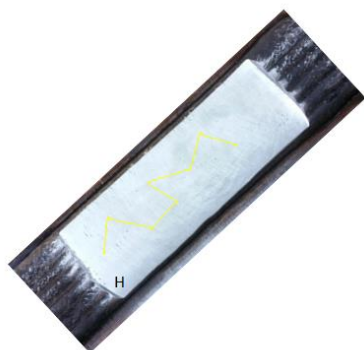


KUVA 21. Mikroskooppikuva hitsiaine C:stä suurennos 50- ja 400-kertainen

Kuvassa 21 hitsi ei ole sulattanut lähes ollenkaan perusainetta. Hitsiaine on diffundoitunut kiinni perusaineeseen, jossa ne muodostavat yhdessä metallisen liitoksen. Hitsiaine ja lisäaine ovat kaksi eri faasia, joissa sulassa tilassa on ollut ainoastaan hitsiaine.

### 9.3 Horisontaalinen kovuusmittaustutkimus

Hitsatuille koekappaleille tehtiin kovuusmittaus tasomaiseksi koneistetusta pinnasta määrittelemättömistä kohdista. Horisontaalisella kovuuskokeella haluttiin selvittää tasopinnan kovuus ja siinä olevat vaihtelut. Kovuuskoe tehtiin Vickers HV 10 -menetelmällä. Kuvassa 22 on esimerkki koekappaleesta ja siihen merkityistä mittauspisteistä.



KUVA 22. Horisontaalisen kovuusmittauksen koekappale

Seuraavissa kuvioissa 1 - 3 näkyvät jokaisen mittauksen tulos sekä hitsausprosessikohtainen keskiarvo ja keskihajonta. Kuvioissa keskiarvot näkyvät suorina hitsausprosesseille määritetyillä väreillä.

Taulukot noudattavat seuraavaa värinimeämistä hitsausprosessikohtaisesti: CMT on violetti, CMT-pulssi on sininen ja MAG-pulssi on vihreä. Kuvioon on lisätty mustalla värillä suora, joka kertoo perusaineen keskiarvokovuuden.

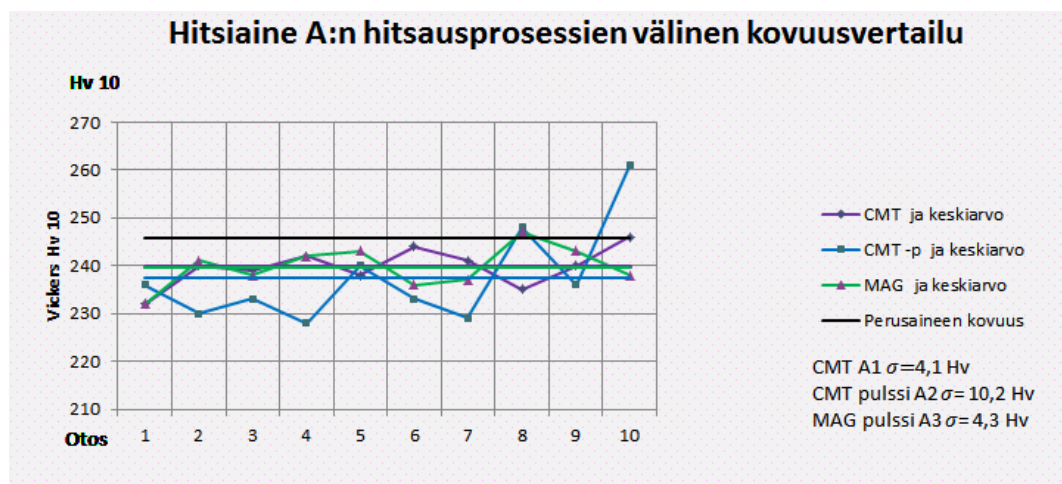
Keskihajonta lasketaan seuraavalla kaavalla 5

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$\bar{x}$  = Havaintoarvojen keskiarvo

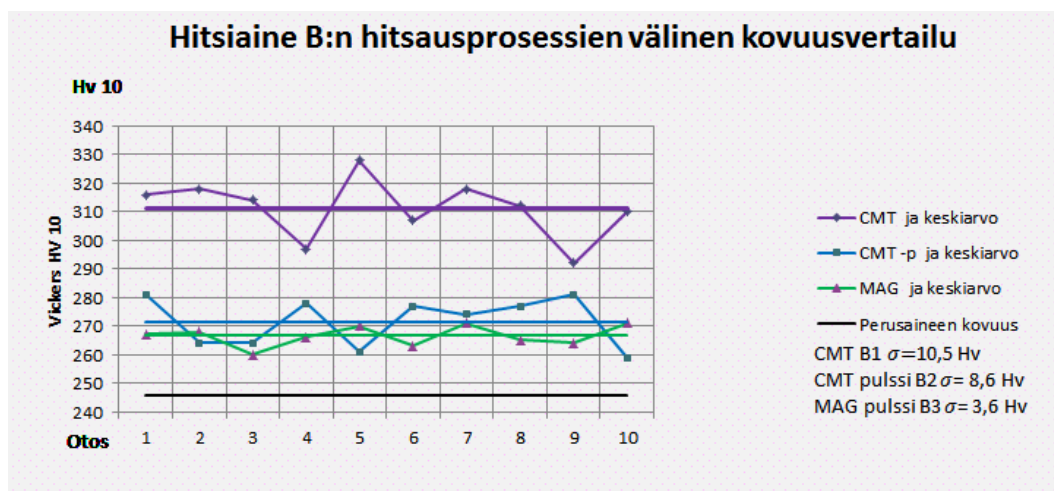
$n$  = Havaintoarvojen lukumäärä

Mitatuista kovuuksista voidaan kuvion 1 mukaan päätellä, että kovuus ei ole hitsausprosessista riippuva. Kovuuksien keskiarvot ovat samat CMT-prosessilla ja MAG-pulssiprosessilla eli 239 HV:tä. CMT-pulssiprosessilla hitsi oli noin 2 HV:tä pehmeämpi. CMT-prosessilla ja MAG-pulssiprosessilla (4,1 HV ja 4,2 HV) kovuuden tulosten keskihajonnat ovat lähes samat. CMT-pulssiprosessilla hitsatuissa hitseissä kovuudessa oli enemmän vaihtelua, tällöin keskihajonta oli 10,2 HV:tä.



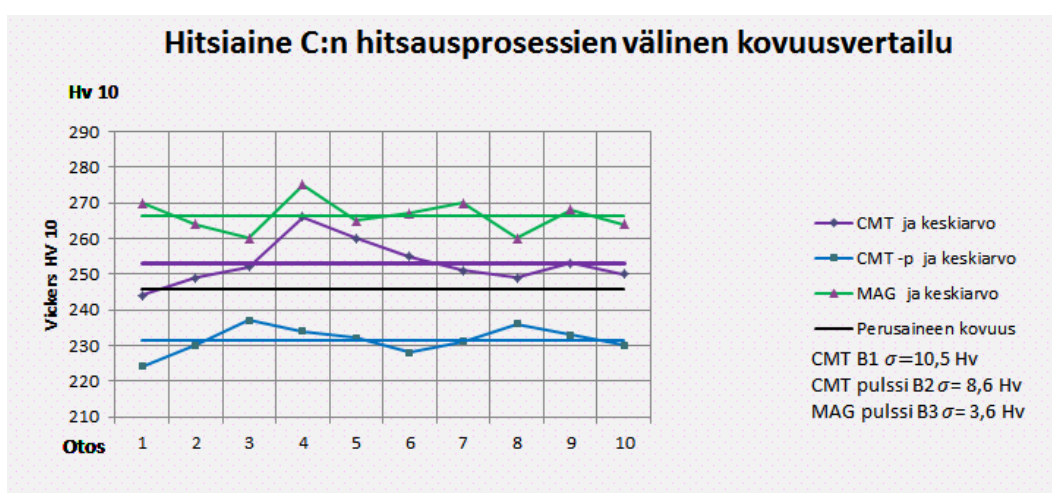
KUVIO 1. Hitsiaine A:n hitsausprosessien välinen kovuusvertailu

Mitatuista kovuuksista voidaan kuvion 2 mukaan päätellä, että kovuus riippuu selkeästi siitä, millä hitsausprosessilla hitsataan. Kovuuksien keskiarvot ovat CMT-, CMT-pulssi- ja MAG-pulssiprosessilla 311 HV, 271 HV ja 266 HV:tä ja keskihajonta 10,5 HV, 8,6 HV ja 3,6 HV:tä. Tässä tapauksessa perusaine on pehmeämpää kuin hitsiaine.



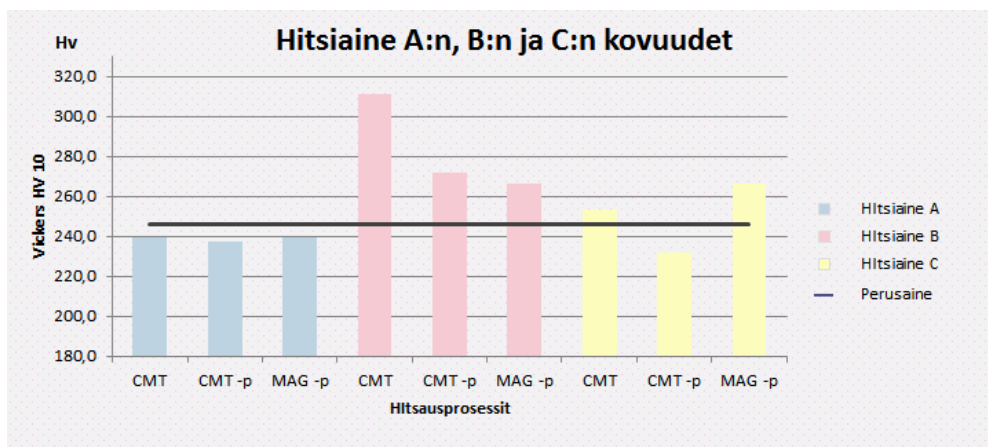
KUVIO 2. Hitsiaine B:n hitsausprosessien välinen kovuusvertailu

Mitatuista kovuuksista voidaan kuvion 3 mukaan päätellä, että kovuus on riippuvainen siitä, millä hitsausprosessilla hitsataan. Kovuuksien keskiarvot ovat CMT-, CMT-pulssi- ja MAG-pulssiprosessilla 252 HV, 231 HV ja 266 HV:tä ja keskihajonta 6,2 HV, 3,8 HV ja 4,7 HV:tä. MAG-pulssi tuotti kovimman hitsauksen ja CMT pehmeimmän hitsauksen.



KUVIO 3. Kovuuden vertaaminen eri hitsausprosesseilla

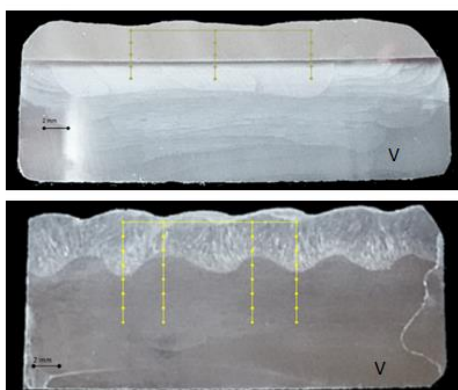
Seuraavassa kuviossa 4 on yhteenveto Vickersin kovuuskokeesta, joka tehtiin HV 10 -menetelmällä horisontaalisessa suunnassa. Kovuudet ovat keskiarvokovuuksia. Yhteenvedosta voidaan päätellä, että tietyntyyppisillä hitsauslangoilla on taipumus suurempaan kovuuteen silloin, kun hitsausenergia on pieni, esimerkiksi B / CMT sekä C / CMT ja MAG-pulssi. Hitsiaine A:lla ei ole prosessikohtaista vaikutusta hitsin kovuuteen.



KUVIO 4. Hitsiaine A:n, B:n ja C:n kovuudet

#### 9.4 Vertikaalinen kovuusmittaustutkimus

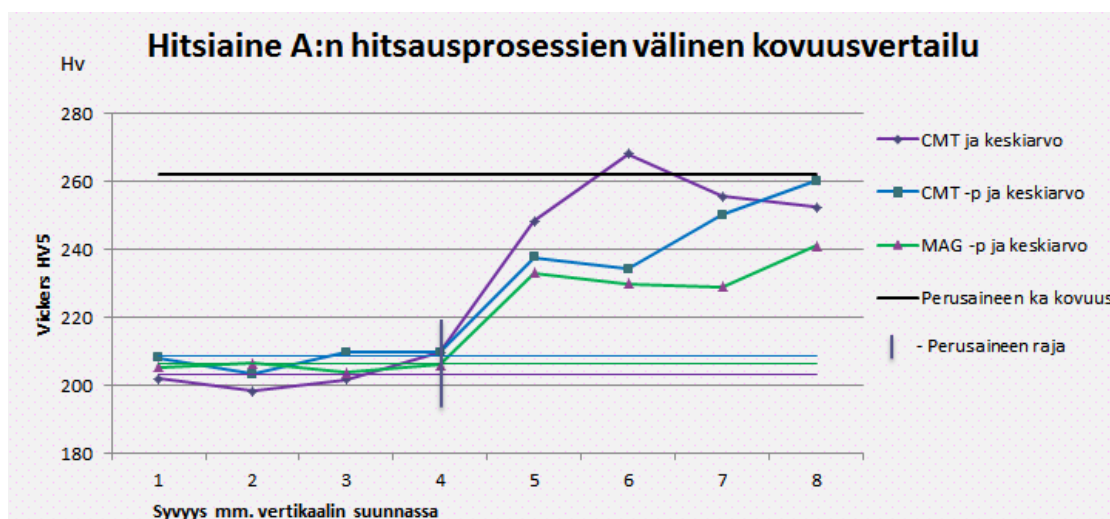
Kovuusmittaus tehtiin vertikaalisessa suunnassa hienäytteen poikkileikkauksesta. Kovuuskoe tehtiin Vickers HV 5 -menetelmällä. Kovuuskokeella haluttiin selvittää materiaalin kovuudet ja kovuuden muuttuminen hitsauksen poikkileikkauksesta vertikaalissa suunnassa. Kuvassa 23 on hienäyteaiho, johon on piirretty mittalinjat kovuusmittauspisteille havainnollistamaan mittausten suoritusta. Näyteaihoissa A1 - A3 ja B1 - B3 mittauskohdat on määritelty siten, että mittalinjat 1 ja 4 kulkevat kohdasta, jossa hitsin tunkeuma on syvin. Vastaavasti mittalinjat 2 ja 3 on sijoitettu kohtaan, jossa hitsi on tunkeutunut vähiten. Mittauspisteiden väli vertikaalissa suunnassa on 1 mm. Koekappaleet noudattavat vastaavaa mittausten ja mittalinjojen paikoitusta hieaihioiden A ja B kanssa. Hieaiho C:ssä mittalinjoja on kolme ja mittaussvälit ovat 0,5 mm välein. Näissä kappaleissa mittalinjojen paikkaa ei määrätty hitsiaineen tunkeuman mukaan, koska tunkeumaa ei ollut.



KUVA 23. Hieaihioon merkatut mittalinjat kovuusmittauspisteille

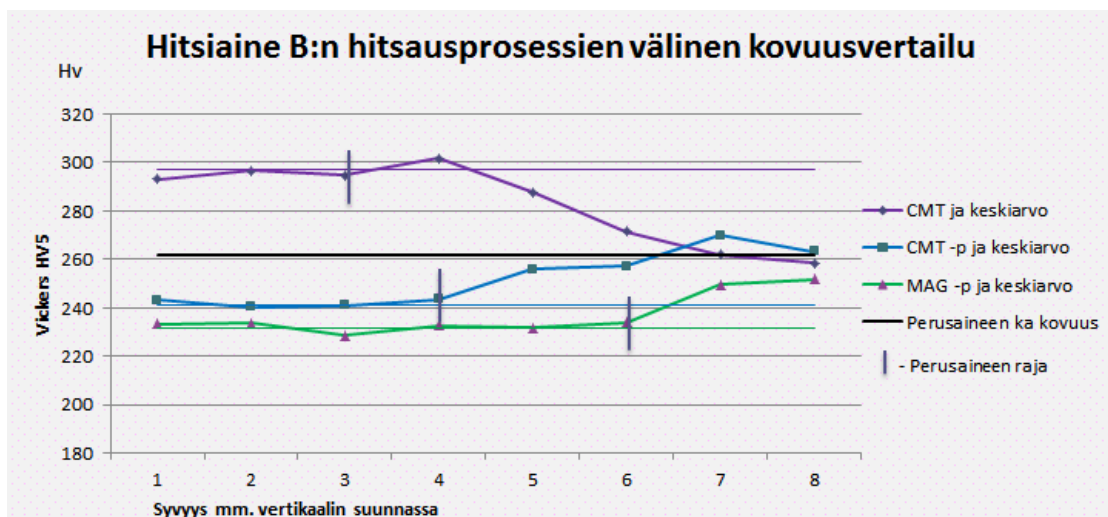
Seuraavissa kuvioissa 5 - 7 on kovuudet hitsausprosesseittain. Kuvioissa pystyviivat näyttävät hitsiaineen rajan, jossa siirrytään kohti perusainetta vertikaalissa suunnassa. Perusaineen rajalla kovuus muuttuu oleellisesti kovempaan tai pehmeämpään suuntaan. Seuraavat kuviot 5 - 7 noudattavat seuraavaa nimeämistä: CMT on violetti, CMT pulssi on sininen ja MAG-pulssi on vihreä. Kuvioihin on lisätty kunkin prosessin viiva keskiarvokovuudesta prosessille määrättyllä värillä. Perusaineen keskiarvokovuus on merkitty mustalla viivalla.

Kuviossa 5 hitsiaine A:n kovuudet eivät ole riippuvaisia hitsausprosessista. Hitsauksien kovuuksissa on hyvin pientä vaihtelua. Hitsauksen kovuus muuttuu kappaleen syvyys suunnassa vasta perusaineen rajalla ja perusaineessa. Hitsi on pehmeämpää kuin perusaine.



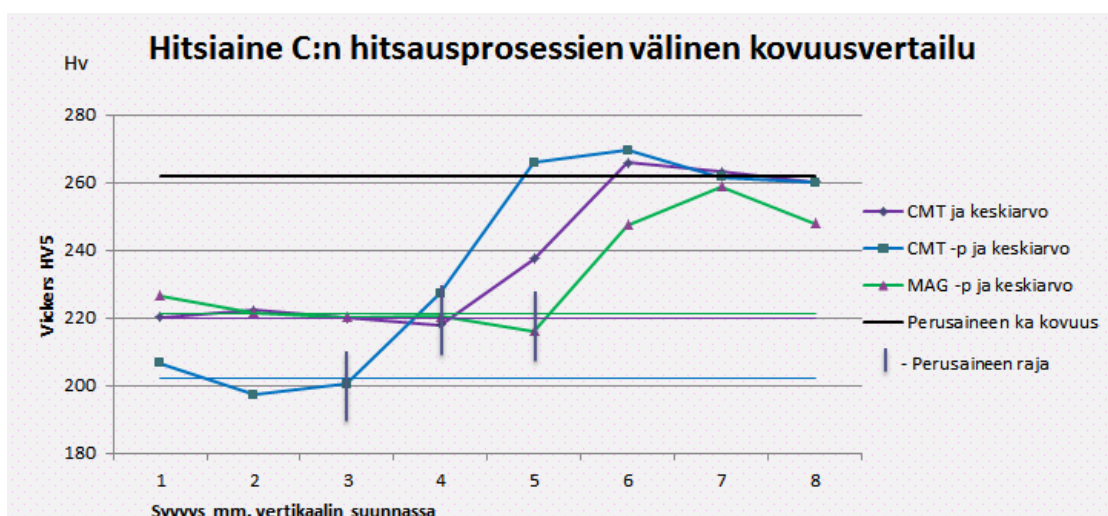
KUVIO 5. Hitsiaine A:n kovuus

Kuviossa 6 hitsiaine B:n kovuudet ovat riippuvaisia voimakkaasti hitsausprosessista. Kovin hitsaus saatiin aikaan CMT-prosessilla. Kovuuteen voi vaikuttaa esimerkiksi CMT-prosessin pienin hitsausenergia ja pienin hitsiaineen seostuminen perusaineeseen. Perusaine on tässä tapauksessa pehmeämpää kuin hitsi. CMT-pulssilla ja MAG-pulssilla vastaavasti perusaine on kovempaa kuin hitsi.



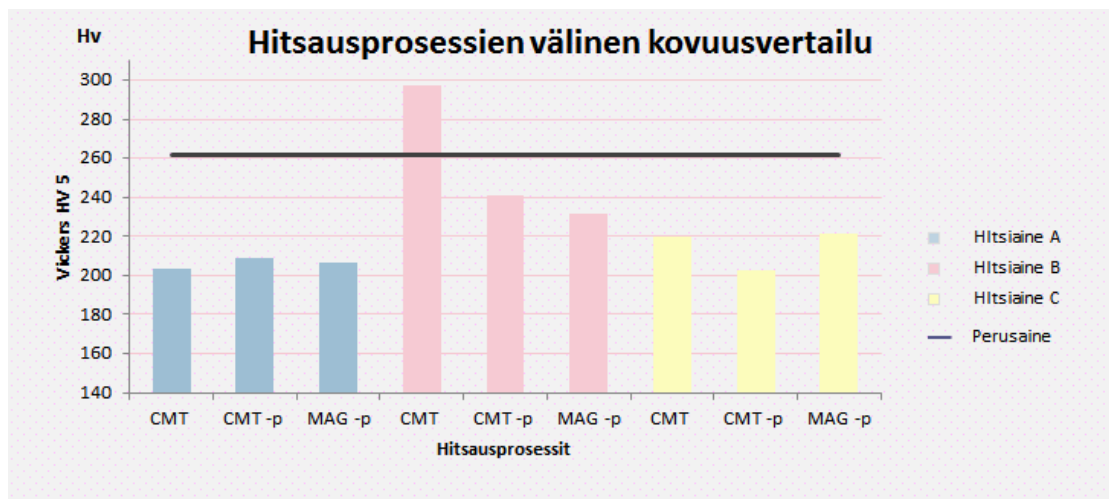
KUVIO 6. hitsiaine B:n kovuus

Kuviossa 7 hitsiaine C:n kovuudet ovat hiukan riippuvaisia hitsausprosessista. Hitsiaine on kovinta CMT:llä ja MAG-pulssilla ja vastaavasti pehmeintä hitsatessa CMT-pulssilla. Tässä kokeessa CMT-pulssilla oli suurin hitsausenergia. Perusaine on kovempaa kuin hitsaus.



KUVIO 7. hitsiaine C:n kovuus

Seuraavassa kuviossa 8 on yhteenveto Vickersin kovuuskokeesta, joka tehtiin HV 5 -menetelmällä vertikaalin suunnassa. Kovuudet ovat kunkin hitsausprosessin kovuusmittausten keskiarvoja. Kovuudet ovat lähes samoja kuin horisontaalisessa suunnassa otetussa kovuuskokeessa. Kuviossa 8 näkyy suora perusaineen kovuudesta. Yhteenvedosta voidaan päätellä, että jos hitsausenergia on pieni, tietyillä hitsauslangoilla on suurempi kovuus, kuten testeissä B/CMT sekä C/CMT ja MAG-pulssi.



KUVIO 8. Yhteenveto hitsiaineista ja kovuuksista

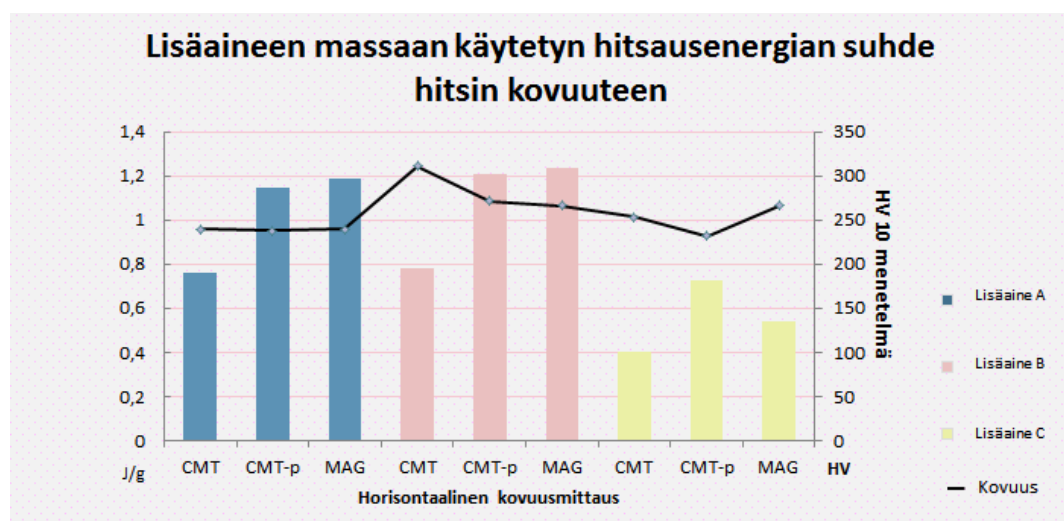


## 10 TAVOITTEET JA TULOKSET

Opinnäytötyö tutkimuksen avulla haluttiin kehittää robottihitsauksen laatua ja nostaa tuottavuutta. Tutkimuksessa selvitettiin ominaisuuksia, joilla CMT- ja MAG-prosessilla hitsaaminen poikkeavat toisistaan ja joista voisi olla hyötyä tuottavuuteen tai laatuun. Tutkimuksessa selvisi, että CMT:llä tuottavuutta nostavia ominaisuuksia ovat tietyillä hitsauslisäaineilla nopeampi hitsaaminen, suurempi sulatusteho ja vähäisempi energian käyttö. Hitsauksen laatua parantavina ominaisuuksina voidaan pitää huomattavasti roiskeettomampaa hitsiä, tasaista hitsimuodon laaduntuottokykyä, vakaampaa valokaarta, pienempää lämmöntuontia ja pienempää seostumista, parempaa hitsin ulkonäköä ja vähemmän epäpuhtauksia. Hitsaamisessa huomasi, että CMT-prosessilla langan syttyminen hitsauksen aloituksessa oli hyvä eikä tuottanut ongelmia. Testi oli kuitenkin suppea ja vaatisi jatkotutkimusta ominaisuuden todistamiseksi. Ominaisuudesta olisi kuitenkin hyötyä robottihitsauksessa.

Vertikaalin suuntaisessa kovuuskokeessa ei ollut havaittavissa syyvyys suunnan kovuusvaihtelua, vaan hitsit olivat lähes tasakovia perusaineen rajalle asti.

Seuraavassa kuviossa 9 on lisäaineen massaankäytetyn hitsausenergian suhde hitsin kovuuteen, jossa pylväät (vasen pysty (arvo) -akseli) osoittavat energian määrän joulea/grammaa hitsiainetta kohden ja viiva (vasen pysty (arvo) -akseli) osoittaa hitsin kovuuden suhteessa kullekin hitsausprosessille. Kuvioista näkyy kun hitsiainetta sulattamiseen tuodaan enemmän energiaa, se muuttaa vastaavasti hitsiainetta pehmeämmäksi.



KUVIO 9. Hitsausenergian suhde lisäaineen massaankäyttöön ja sen vaikutus hitsin kovuuteen

## 11 YHTEENVETO

Testauksissa pyrittiin jäljittelemään todellisia olosuhteita, jotta vertaaminen olisi realistisempaa. Vertailututkimus oli varsin suppea mutta suuntaa antava. CMT:n ja MAG:n vertaaminen suoraan keskenään on hyvin haasteellista, koska monet ominaisuudet ovat suhteessa toisiinsa ja monesti vaikeasti verrattavissa. Tutkimuksessa kävi ilmi, että kun yhtä ominaisuutta parannetaan, se vastaavasti vaikuttaa toiseen ominaisuuteen heikentävästi. Hyvien ja tuottavien ominaisuuksien tasapainon määrittäminen on monen asian kompromissi ja siten vaikea määrittää.

Makro- ja mikrohietutkimuksesta selvisi, miten pienet muutokset mm. hitsausenergiassa näkyvät muutoksina kiderakenteessa ja tunkeumassa. Kaikkissa CMT-prosesseilla hitsatuissa kappaleissa tunkeumat jäivät alle 1 mm, kun vastaavat tunkeumat MAG-pulssilla yltyivät 3,4 mm - 4,3 mm tuntumaan. Mikro- ja makrohietutkimus antoi syvempää oppia ja ymmärrystä hitsausohjeista sekä niiden merkityksestä ja samalla nosti arvoa ohjeiden käytön noudattamisesta.

Kovuusmittauksista voidaan todeta, että tietyillä hitsiaineilla joko seostuminen ja/tai lämmöntuonti vaikuttaa suurempaan pinnan kovuuteen ja hitsin muodostaman faasin kovuuteen, johon CMT-hitsausprosessilla on vaikutusta pienen hitsausenergian vuoksi.

CMT-hitsausprosessin hyötyominaisuuksina voidaan pitää vakaata valokaarta, joka oli jokaisella testatulla hitsiaineella. Valokaari pysyi rauhallisena, vaikka vapaan langan pituus muuttui. CMT-hitsausprosessilla lanka syttyi herkästi hitsauksen aloituksessa, mistä voisi olla hyötyä myös robottihitsauksessa. Jokaisella langalla hitsattaessa päästiin roiskeettomampaan hitsaamiseen kuin MAG-pulssilla. CMT:llä pystyttiin myös hitsaamaan suuremmalla kuljetusnopeudella. Lisäksi koekappaleita valmistettaessa havaitsin sen, että CMT:llä hitsattujen koekappaleiden kääntöpuolelle ei ollut tullu värimuutoksia ja muodonmuokset olivat vähäisempiä kuin vastaavasti MAG hitsatuissa kappaleissa.

CMT:n heikkoutena voidaan pitää täydellisen railon seurannan puutetta, koska robotit eivät vielä tällä hetkellä pysty tarpeeksi hyvin mittaamaan jännitevaihtelua CMT-prosessista. Railon seurantaan joudutaan toteuttamaan ulkoisilla tavoilla kuten optisilla laitteilla.

Opinnäytetyössä testattiin kolmea hitsausprosessia kolmella lisäaineella. Tutkimusta on syytä laajentaa, mikäli halutaan selvittää kattavasti eri prosessien erot.

## 12 POHDINNAT JA JATKOKEHITYS

CMT:llä hitsaaminen on erilaista kuin MAG-prosessilla hitsaaminen. Hitsaukseen liittyvien parametrien säätämiseksi joutuu varaamaan enemmän aikaa ja koekappaleita kuin perinteisessä MAG-hitsauksessa. CMT-hitsaaminen poikkeaa prosessitapahtumaltaan melkoisesti, kun sitä seuraa ja havainnoi. CMT:llä hitsiaine sulaa materiaalin pinnassa eikä lanka silmämääräisesti juurikaan tunkeudu. Hitsausparametrien säätö oli tämän takia haasteellista, koska aiempaan kokemukseen ei voi peilata.

CMT-hitsausprosessia valittaessa on tunnistettava, mihin vähäisempää lämmöntuontia tarvitaan. Monissa tapauksissa siitä voi saada hyötyä päällehitsauksessa, jossa tavoitellaan perusaineen pinnalle lisäaineen ominaisuuksia. Joissakin monipalkohitsauksissa voi taas olla etuna korkeampi lämmöntuonti, koska palkojen välinen liittymä jää yleensä jouheammaksi. Päällehitsauksessa voidaan säästää tasaisuuden avulla parempi hitsauksen hyötypinta-ala. Hyvänä puolena kuitenkin voidaan pitää sitä, että CMT on hitsauskoneen lisäominaisuus, joka ei sulje pois muita ominaisuuksia.

Jatkotutkimuksissa olisi hyvä tehdä vastaavanlaisille kappaleille myös vetokoe kappaleiden ja lisäaineiden lujuuksien selvittämiseksi, jotta voitaisiin huomioida isomman sulatunkeuman vaikutus lujuuteen.

## LÄHTEET

ALONEN, Antti, JÄÄSKELÄINEN, Esa, NISSINEN, Juha, PIRINEN, Markku, SOLEHMAINEN, Kari, TOIVANEN, Jenni ja TUUNAINEN, Aku 2014. HITNET - Hitsaavan teollisuuden hankintatoimen ja toimitusketjun tehostaminen. Loppuraportti. Savonia-ammattikorkeakoulun julkaisusarja D4/4/2014. [Viitattu: 2015-04-04.] Saatavissa:

[http://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/tki\\_ja\\_palvelut/julkaisut/2014-hitnet-loppuraportti.pdf](http://portal.savonia.fi/amk/sites/default/files/pdf/tki_ja_palvelut/julkaisut/2014-hitnet-loppuraportti.pdf)

FRONIUS 2009. MIG/MAG & CMT Parameter Adjusting. Wels: Tech-Support International.

FRONIUS 2012. Time 5000, Trans synergic 4000/5000, Transpuls synergic 2700/3200/4000/5000. Käyttöohjekirja / Varaosaluettelo. v.01/2012.

FRONIUS INTERNATIONAL GMBH 2013. Fronius CMT Welding Technology. Düsseldorf: DVS Media GmbH.

HITSIEN RIKKOVA AINEENKOETUS METALLEILLE 2013. Hitsien makro- ja mikrohietutkimus. SFS-EN 17639. Vahvistettu 2013-12-09. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

KARJALAINEN, Samuel 2012. Fronius CMT mustan teräksen hitsauksessa – kasvata kilpailuetua puoltamalla suojakaasun hankintakustannukset. Hitsaustekniikka 5/2012, 33–34.

KONEDIREKTIIVIN 2006/42/EY soveltamisopas 2010. Vahvistettu 2010. EUROOPAN KOMISSIO YRITYS- JA TEOLLISUUSTOIMINTA. Toinen painos. [Viitattu 2015-03-01] Saatavissa:

[http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/files/machinery/guide-appl-2006-42-ec-2nd-201006\\_fi.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/files/machinery/guide-appl-2006-42-ec-2nd-201006_fi.pdf)

KONETURVALLISUUS 2008a. Häätöäyitys. suunnitteluperiaatteet. SFS-EN ISO 13850. Vahvistettu 2008-11-24. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys. Toinen painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

KONETURVALLISUUS 2008b. Odottamattoman käynnistämisen estäminen. SFS-EN 1037+A1. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

KONETURVALLISUUS 2008c. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1. Yleiset suunnitteluperiaatteet. SFS-EN ISO 13849-1. Vahvistettu 2008-11-24. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys. Toinen painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

KONETURVALLISUUS 2008d. Turvaetäisyydet yläraajojen ja alaraajojen ulottumisen estämiseksi vaaravyöhykkeelle. SFS-EN ISO 13857. Vahvistettu 2008-06-23. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

KONETURVALLISUUS 2008e. Vähimmäisetäisyydet kehonosien puristumisvaaran välttämiseksi. SFS-EN 349+A1. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

KONETURVALLISUUS 2009. Suojukset. Kiinteiden ja avattavien suojusten suunnittelun ja rakenteen yleiset periaatteet. SFS-EN 953+A1. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

KONETURVALLISUUS 2013. Suojusten kytkentä koneen toimintaan. Suunnittelu ja valinta. SFS-EN 14199. Vahvistettu 2013-12-09. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

KUUSISTO, Tuomo 2014. Käytännön ohjeita MIG/MAG-hitsaukseen. 4. uudistettu painos. Oy AGA Ab.

KYRÖLÄINEN, Antero ja LUKKARI, Juha 1999. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaukset MET-julkaisuja nro 2/1999.

LEPOLA, Pertti ja MAKKONEN, Matti 2011. Hitsautekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOYpro Oy.

LUKKARI, Juha 2006. Hitsauksen työturvallisuus. Suojaudu savuilta ja säteilyltä. Hitsaustyön riskinarviointi ja riskinhallinta. Hitsausuutiset 2/2006, 4.

LUKKARI, Juha 2009. Hitsauksen olympialaiset Essenissä 14-19.9.2009. Räätelöityjä MIG/MAG-valokaaria. Hitsaustekniikka 6/2009, 7.

METALLIN VICKERSIN KOVUUSKOE 2006. OSA 1: MENETELMÄ. SFS-EN ISO 6507-1. Vahvistettu 2006-04-18. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys ry. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

METSTA 2009. Koneturvallisuuden standardit. Luentomateriaalia koneturvallisuuden standardeista. Päivitetty 2009-08-14. Metalliteollisuuden standardisointiyhdistys ry. [Viitattu 2015-03-07.] Saatavissa: [www.sfsedu.fi/files/129/Koneturvallisuudenstandardit.ppt](http://www.sfsedu.fi/files/129/Koneturvallisuudenstandardit.ppt)

OUTOKUMPU 2013. Handbook of Stainless Steel. Päivitetty 8/2013. Outokumpu Stainless AB. [Viitattu 8.4.2015] Saatavissa: <http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/outokumpu-stainless-steel-handbook.pdf>

OUTOKUMPU STAINLESS AB. 2010. Welding Handbook. Ensimmäinen korjattu painos. Sweden: Outokumpu Stainless AB.

PRONIUS Oy 2011. TUOTTEET / MIG/MAG-HITSAUS / TRANS PULS SYNERGIC 5000 CMT. [Viitattu 2015-03-07.] Saatavissa: <http://pronius.fi/?p=71>

PRONIUS Oy 2012. Cold Metal Transfer. / Teknologia. V.01/2012.

ROBOTIT JA ROBOTIIKKALAITTEET 2011a. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. 2011. SFS-EN ISO 10218-1. Vahvistettu 2011-09-05. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys ry. Kolmas painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

ROBOTIT JA ROBOTIIKKALAITTEET 2011b. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. 2011. SFS-EN ISO 10218-1. Vahvistettu 2011-09-05. Metalliteollisuuden Standardisoimisyhdistys ry. Kolmas painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SAVONIA 2013. Laiteluettelo. Konetekniikka. Päivitetty 24.4.2013. Savonia-ammattikorkeakoulu. [Viitattu 23.3.2015] Saatavissa: [http://portal.savonia.fi/pdf/tki/2013-Koneosaston\\_Laiteluettelo.pdf](http://portal.savonia.fi/pdf/tki/2013-Koneosaston_Laiteluettelo.pdf)

SAVONLINNA WORKS OY 2015. SW Company Presentation [Viitattu 2015-04-20]. Saatavissa: <http://intranet.andritz.com>

SFS 1996. SFS-Käsikirja 54. Hitsaussanasto SFS 3052. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS 2014. Koneturvallisuuden standardit. Standardeilla turvallisuutta. [Viitattu 2015-03-01]. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. Saatavissa: <http://www.sfs.fi/files/63/koneturvallisuusesite2014web.pdf>

SUOMEN HITSAUSTEKNILLINEN YHDISTYS R.Y. 2014. Hitsauksen materiaalioppi. Neljäs korjattu painos. Helsinki: Suomen hitsausteknillinen yhdistys r.y.

TYÖTERVEYSLAITOS 2009. Käytössä olevien koneiden riskinarviointi. Malliratkaisu metallin työstöön. [Viitattu 2015-03-01]. Saatavissa: [http://www.tyosuojelu.fi/upload/TTL\\_Malliratkaisu\\_Kaytossa\\_olevien\\_koneiden\\_riskinarviointi.pdf](http://www.tyosuojelu.fi/upload/TTL_Malliratkaisu_Kaytossa_olevien_koneiden_riskinarviointi.pdf)