

LUT-YLIOPISTO  
LUT School of Energy Systems  
LUT Kone  
BK10A0402 Kandidaatintyö

LUISTIRAKENTEEN VALMISTUSYSTÄVÄLLISYYDEN ERITYISPIIRTEET  
ROBOTTIHITSAUKSESSA

DFMA CHARACTERISTICS OF A SLIDE STRUCTURE IN ROBOTIZED WELDING

Lappeenrannassa 27.11.2019

Janne Savolainen

Tarkastaja TkT Harri Eskelinen

Ohjaaja TkT Harri Eskelinen

Ohjaaja Insinööri Johannes Västi, Junttan

## **TIIVISTELMÄ**

LUT-Yliopisto  
LUT Energiajärjestelmät  
LUT Kone

Janne Savolainen

### **Luistirakenteen valmistusystävällisyyden erityispiirteet robottihitsauksessa**

Kandidaatintyö

Työn valmistumisvuosi 2019

45 sivua, 17 kuvaa ja 1 liite.

Tarkastaja: TkT Harri Eskelinen

Ohjaaja: TkT Harri Eskelinen

Ohjaaja: Insinööri (AMK) Johannes Västi, Junttan

Hakusanat: Valmistusystävällisyys, DFM, Robottihitsaus, Automaatio, Hitsaustuotanto

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on tunnistaa ne erityispiirteet, jotka on otettava huomioon valmistusystävällisyyttä arvioitaessa, kun siirrytään manuaalisesta robotisoituun hitsaukseen. Tunnistettuja tekijöitä sovelletaan paalutuskoneissa käytettävän luistirakenteen kehittämiseksi.

Työ on kirjallisuustutkimus, josta saatuja tuloksia sovelletaan kohdeyrityksen valmistamaan tuotteeseen. Erityispiirteitä on haettu kirjallisuudesta hyödyntämällä LUT-yliopiston kirjallisia ja sähköisiä tietolähteitä. Erityispiirteiden tunnistamiseksi tutkitut aihealueet ovat hitsaustuotanto, hitsattavuus ja automaation taso. Kirjallisuustutkimuksen pohjalta laaditaan robottihitsauksen valmistusystävällisyyden kehittämiseen hyödynnettävä arviointilomake, johon keskeisimmät tunnistetut erityispiirteet on muotoiltu kysymyksiksi. Kokonaisuuden kannalta merkittävimpien tekijöiden erottelemiseksi erityispiirteille määritetään kolme luokkaa.

Luistirakenteen valmistettavuuteen vaikuttavia erityispiirteitä tutkitaan hyödyntämällä kehitettyä arviointilomaketta. Tuotteelle tunnistetut erityispiirteet jaotellaan nimettyihin luokkiin. Merkittävimpinä tuloksina luistirakenteelle on pidetty mahdollisuutta tuotevariaatioiden väliseen modulaarisuuteen, josta voidaan hyötyä siirryttäessä robotisoituun valmistukseen. Luistirakenteelle tunnistettuja erityispiirteitä hyödynnetään rakenteen kehityksessä, mutta tuotteelle tehtäviä muutoksia ei käsitellä tässä työssä.

Työtä voidaan hyödyntää osana robottihitsattavan tuotteen suunnitteluohjeita. Erityispiirteiden tarkastelun lisäksi suunnittelussa tulee kuitenkin huomioida myös yleiset valmistettavuuden tekijät.

## **ABSTRACT**

LUT University  
LUT School of Energy Systems  
LUT Mechanical Engineering

Janne Savolainen

### **DFMA characteristics of a slide structure in robotized welding**

Bachelor's thesis

Year of completion of the thesis 2019

45 pages, 17 figures and 1 appendix.

Examiner: D. Sc. (Tech.) Harri Eskelinen

Supervisor: D. Sc. (Tech.) Harri Eskelinen

Supervisor: B. Eng. Johannes Västi, Junttan

Keywords: Manufacturability, DFM, Robotized welding, Automation, Welding Production

Aim of this bachelor's thesis is to recognize the characteristics of manufacturability that shall be considered when changing from manual to robotized welding. Achieved results are utilized to improve the manufacturability of the slide structure which is used in piling rigs.

This thesis is a literature study, which results are applied for industrial product. The characteristics are searched from the literature using written and electronic databases of LUT-University. Areas that are studied in order to recognize the characteristics are welding production, weldability and the level of automation. Evaluation form which may be utilized to enhance manufacturability for robotic welding is constructed based on the literature study. Essential recognized characteristics are presented as questions in the evaluation form. Three classes are defined in order to categorize aspects that are the most significant for the big picture.

DFMA-characteristics of the slide structure are categorized for the three classes utilizing the evaluation form. Possibility for modularization of the slide structure is considered to be the most significant result since it may have a large impact in robotized production. Recognized characteristics are utilized in the design of the slide structure, but design changes are not presented in this paper.

This work may be utilized as a part of design guides for robot welded structure. However, general manufacturability factors shall be considered during the design in parallel with presented DFMA-characteristics.

## **ALKUSANAT**

Tein tämän kandidaatintyön yhteistyössä Junttan Oy:n kanssa, jonne kuuluu kiitokset mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö mielenkiintoisesta aiheesta. Kiitos myös mahdollisuudesta osallistua robotin operaattoreille järjestettyyn koulutuspäivään sekä yrityksen tuotteiden ja tuotantotilojen esittelystä. Erityiskiitokset kuuluvat Johannes Västille työhön liittyneestä ohjauksesta ja tehdystä yhteistyöstä.

Janne Savolainen

Lappeenrannassa 27.11.2019

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>TIIVISTELMÄ .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>ALKUSANAT .....</b>	<b>4</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO .....</b>	<b>5</b>
<b>LYHENNELUETTELO.....</b>	<b>7</b>
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>8</b>
1.1 Tavoite .....	8
1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset .....	8
1.3 Rajaukset.....	8
1.4 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne .....	9
<b>2 VALMISTUSYSTÄVÄLLISYYDEN ERITYISPIIRTEET</b>	
<b>ROBOTTIHITSAUKSESSA .....</b>	<b>10</b>
2.1 Valmistusystävällisen suunnittelun periaatteita ja tavoitteita.....	10
2.2 Robottihitsauksen lähtökohdat.....	12
2.3 Robottihitsauksen erityispiirteet .....	13
2.3.1 Hitsaustuotannon näkökulma.....	14
2.3.2 Hitsattavuuden näkökulma .....	18
2.3.3 Automaation tason merkitys .....	25
<b>3 MENETELMÄT ROBOTTIHITSATTAVUUDEN ERITYISPIIRTEIDEN</b>	
<b>ANALYSOIMISOIMISEKSI .....</b>	<b>29</b>
3.1 Robottihitsauksen erityispiirteiden DFMA-arviointilomakkeen kehittäminen ...	29
3.2 Konseptisuunnittelusta yksityiskohtien suunnitteluun.....	30
3.3 Valmistusystävällisyyden tasot.....	31
<b>4 LUISTIRAKENTEEN VALMISTUSYSTÄVÄLLISYYDEN</b>	
<b>ERITYISPIIRTEET ROBOTTIHITSAUKSESSA.....</b>	<b>32</b>
4.1 Tutkittava luistirakenne .....	32
4.2 Tuoteperhe- ja konseptitaso .....	33
4.3 Rakennetaso ja tuotannon toteutus .....	34
4.4 Komponenttitaso ja tuoteyksityiskohdat.....	36
<b>5 ANALYYSI JA POHDINTA .....</b>	<b>37</b>
5.1 Vertailu ja yhtymäkohdat aiempaan tutkimukseen.....	37

5.2 Tutkimuksen luotettavuus.....	38
5.3 Avaintulokset.....	38
5.4 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys .....	39
5.5 Jatkotutkimusaiheet .....	39
<b>6 YHTEENVETO .....</b>	<b>40</b>
<b>7 LÄHTEET .....</b>	<b>42</b>

## **LIITTEET**

LIITE I: Robottihitsauksen valmistusystävällisyyden erityispiirteiden arviointilomake.

**LYHENNELUETTELO**

DFM	Design For Manufacturing, Valmistusystävällinen suunnittelu
DFMA	Design For Manufacturing and Assembly, Valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu
DFX	Design For X
HAZ	Heat Affected Zone, Muutosvyöhyke
UHSS	Ultra-High Strength Steel, Ultraluja teräs

## 1 JOHDANTO

Kohdeyrityksessä otetaan käyttöön uusi hitsausrobotti, jolla ryhdytään valmistamaan tuotteita, jotka on ennen hitsattu käsin. Tässä tutkimuksessa halutaan selvittää tuotteisiin mahdollisesti vaadittavia muutoksia tuotannon automaation tason muuttumisen vuoksi. Kohdeyritys haluaa parantaa robottihitsattavien tuotteiden valmistusystävällisyyttä, jotta päästäisiin tehokkaampaan tuotantoon ja jotta hitsausrobotista olisi enemmän hyötyä kustannustehokkuuden parantamiseksi.

### 1.1 Tavoite

Työn konkreettisenä tavoitteena on tunnistaa kohdeyrityksen tarpeisiin ne erityispiirteet, jotka on otettava huomioon valmistusystävällisyyttä arvioitaessa, kun siirrytään manuaalisesta hitsauksesta robotisoituun hitsaukseen. Tavoitteena on hyödyntää saatuja tuloksia kohdeyrityksen valmistaman luistirakenteen robottihitsattavuuden parantamiseksi.

### 1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Robottihitsattavuutta parannettaessa keskeisin seikka on tunnistaa, mitkä asiat vaikuttavat robottihitsattavuuteen, ja miten ne tulisi huomioida jo tuotteen suunnitteluvaiheessa. Kohdeyrityksessä ei aikaisemmin ole ollut tutkittavan tuotteen valmistuslinjalla hitsausrobottia, jonka vuoksi tuote on suunniteltu manuaalisesti hitsattavaksi. Sekä tuotteen yksityiskohdat että tuotannon toteutus vaativat kehitystyötä, jotta tuotannon kannattavuutta voitaisiin kasvattaa, ja jotta robottia voitaisiin käyttää mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavasti hyväksi.

Tästä tutkimusongelmasta johdetut tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Mitkä tekijät vaikuttavat tuotteen valmistusystävällisyyteen robottihitsaussolussa?
- Mitkä ovat tutkittavan tuotteen valmistusystävällisyyteen vaikuttavat robottihitsauksen erityispiirteet?

### 1.3 Rajaukset

Tässä työssä robottihitsauksen valmistusystävällisyyteen vaikuttavia tekijöitä haetaan kolmesta aihealueesta, jotka ovat hitsaustuotanto, hitsattavuus ja automaation taso.



Aihealueiden valinnalla rajataan työn laajuutta. Valmistusystävällisyys-käsite on niin laaja, että kaikkien valmistusystävällisyyteen vaikuttavien tekijöiden huomioimisen sijaan työ painottuu robottihitsauksen erityispiirteisiin tutkittavalle tuotteelle. Tutkittava tuote hitsataan MAG-hitsausprosessilla, joten erityispiirteiden tarkastelu toteutetaan pääasiassa MIG/MAG-robottihitsauksen näkökulmasta. Työssä käsitellään tekijöitä, joiden kautta luistirakenteen robottihitsattavuutta voidaan kehittää, mutta lopullinen suunnittelutyö rajataan työn ulkopuolelle.

#### 1.4 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Työn sisältö painottuu kirjallisuustutkimukseen, josta saatua tietoa hyödynnetään case-tuotteen kehittämistä varten. Luvussa kaksi tutkitaan kirjallisuutta, joka käsittelee valmistusystävällisen suunnittelun sekä robottihitsauksen lähtökohtia ja käsitteitä, sekä robottihitsauksen erityispiirteitä. Kolmannessa luvussa määritetään menetelmät ja periaatteet robottihitsauksen valmistusystävällisyyden erityispiirteiden analysoimiseksi kirjallisuuteen perustuvien lähteiden pohjalta. Neljännessä luvussa kehitettyä menetelmää sovelletaan case-tuotteen robottihitsauksen valmistusystävällisyyteen vaikuttavien erityispiirteiden tunnistamiseksi. Viides luku on pohdinta, jossa arvioidaan tutkimuksen luotettavuutta ja saavutettuja avaintuloksia.

## **2 VALMISTUSYSTÄVÄLLISYYDEN ERITYISPIIRTEET ROBOTTIHITSAUKSESSA**

Tässä luvussa tutkitaan robottihitsattavan tuotteen erityispiirteitä kirjallisuustutkimuksen muodossa. Ensimmäinen ja toinen kappale tässä luvussa käsittelevät valmistusystävällisen suunnittelun sekä robottihitsauksen taustoja. Kolmannessa kappaleessa käsitellään robottihitsauksen erityispiirteitä valmistusystävällisyyden näkökulmasta.

Lähteinä tutkimuksessa on käytetty yliopiston tiedekirjaston aineistoa, ja verkkotietokantoja. Lisäksi lähteinä on käytetty avoimia internet-lähteitä ja hitsaustekniikka-aiheisten lehtien artikkeleita.

### **2.1 Valmistusystävällisen suunnittelun periaatteita ja tavoitteita**

Tässä työssä käsitellään valmistusystävällisyyden erityispiirteitä robottihitsauksessa. Robottihitsattavan tuotteen valmistusystävällisyyden parantamiseksi on oleellista valmistusystävällisen suunnittelun perusteiden tunteminen sekä valmistusystävälliseen suunnitteluun kehitettyjen yleisten apuneuvojen käyttö.

Tuotteen suunnittelulla ja siihen käytetyillä menetelmillä on merkittävä rooli tuotteen valmistuskustannuksien määräytymiseen. Suunnittelulla voidaan vaikuttaa jopa 80 %:iin valmistuskustannuksista (Kalpakjian & Schmid 2014, s. 7). Tästä syystä suunnittelijoiden tueksi on pyritty kehittämään systemaattisia menetelmiä, jotka auttavat huomioimaan jo suunnitteluvaiheessa tuotteiden valmistettavuuteen liittyvät tekijät (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 13).

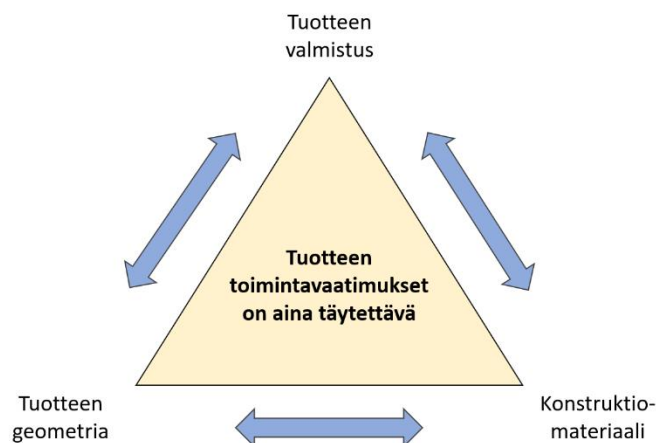
Valmistettavuudesta, tai valmistusystävällisestä suunnittelusta, käytetään usein lyhennettä DFM (Design for Manufacturing). DFM:n lisäksi niin kutsuttujen DFX-menetelmien (Design for X) avulla suunnittelussa pyritään huomioimaan valmistuksen lisäksi tuotteen koko elinkaari, tai sen yksittäinen vaihe ja siihen liittyvät kustannukset. Esimerkkejä DFX-menetelmistä on suunnittelu huollettavuutta, luotettavuutta tai kierrätettävyyttä ajatellen. (Filippi & Cristofolini 2010, s. 15) Valmistus- ja kokoonpanoystävällisestä suunnittelusta käytetään lyhennettä DFMA (Design For Manufacturing and Assembly) (Eskelinen &

Karsikas 2013, s. 7). Kokoonpano on tärkeä osa valmistusprosessia, sillä siinä eri osat on kyettävä yhdistämään valmiiksi tuotteeksi. Tuotteen tyypistä riippuen kokoonpanokustannukset voivat nousta 10 - 60 %:iin tuotteen kokonaisvalmistuskustannuksista (Kalpakjian & Schmid 2014, s. 10).

Tuotteen valmistusystävällisellä suunnittelulla pyritään muun muassa seuraaviin päämääriin (Eskelinen & Karsikas 2013, s. 9; Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 20 – 21):

1. Tuotekehitykseen kuluvan ajan -ja rahan säästöt.
2. Tuotteen laadun ja luotettavuuden parantaminen.
3. Läpimenoaikojen lyhentäminen.
4. Tuottavuuden parantaminen.
5. Tuotantokustannusten alentaminen.
6. Yrityksen nopeampi kyky vastata asiakkaiden toiveisiin.

Valmistusystävällisellä suunnittelulla pyritään helpottamaan valmistusta, mutta tärkein asia suunnittelussa on aina tuotteiden toimintovaatimusten täyttämisen. Kuva 1 mukaisesti tuotteen geometria, materiaali ja valmistustapa valitaan niin, että tuote on mahdollisimman valmistusystävällinen, mutta toimintavaatimukset on aina täytettävä. (Eskelinen & Karsikas 2013, s. 7.)



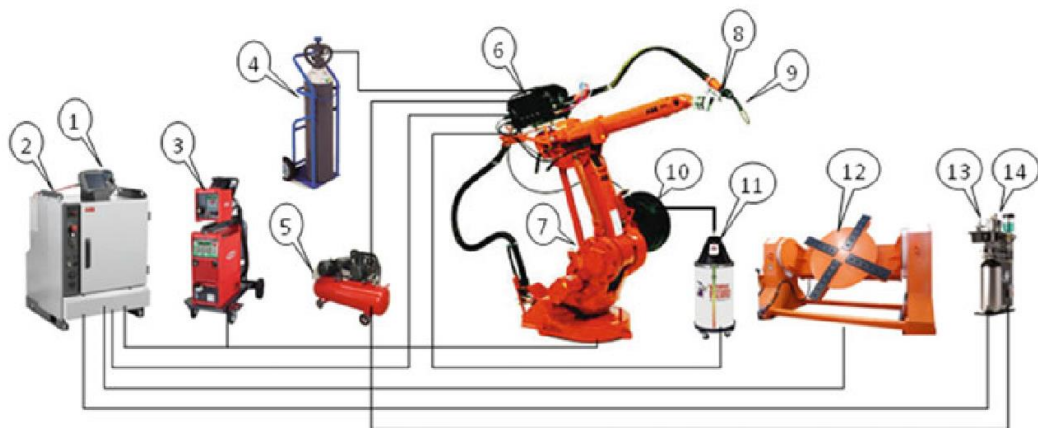
**Kuva 1.** Tuotteen toimintavaatimukset on aina täytettävä, mutta tuotteen geometria, materiaali ja valmistusmenetelmät valitaan niin, että tuotteen valmistus on mahdollisimman helppoa. (Mukaillen, Eskelinen & Karsikas 2013, s. 7)

## 2.2 Robottihitsauksen lähtökohdat

Hitsaus on ollut yksi robottien merkittävimmistä käyttökohteista, joissa niitä on käytetty laajassa mittakaavassa 1980-luvulta alkaen. Ensimmäiset hitsausrobotit olivat autoteollisuudessa toimineita vastuspistehitsausrobotteja (Lin & Luo 2015, s. 2404).

Suurimmiksi hyödyiksi robottihitsauksessa luetaan hitsauksen kasvanut tuottavuus ja laatu sekä laskeneet tuotantokustannukset, joissa merkittävänä tekijänä on inhimillisten virheiden vähentäminen (Lin & Luo 2015, s. 2404). Robottihitsauksella on myös työterveydelle positiivisia vaikutuksia, kun hitsaajan ei tarvitse altistua läheltä hitsauksessa syntyville lukuisille haitallisille kaasuille, ja työergonomiaa voidaan parantaa (Chen, Tarn, Zhou 2007, s. V).

Robottihitsaussolujen konstruktiot vaihtelevat laajasti, mutta robottihitsauslaitteistoon kuuluu tyypillisesti muun muassa kuuden vapausasteen robottikäsi, hitsauslaitteisto, kappaleenkäsittelylaite, hitsauspään puhdistus- ja kalibrointilaitteet, sekä ilmanvaihto ja tarvittavat turvalaitteet (Lin & Luo 2015, s. 2404). Tyypillinen robottihitsaukseen kuuluva laitteisto on esitetty alla (Kuva 2).



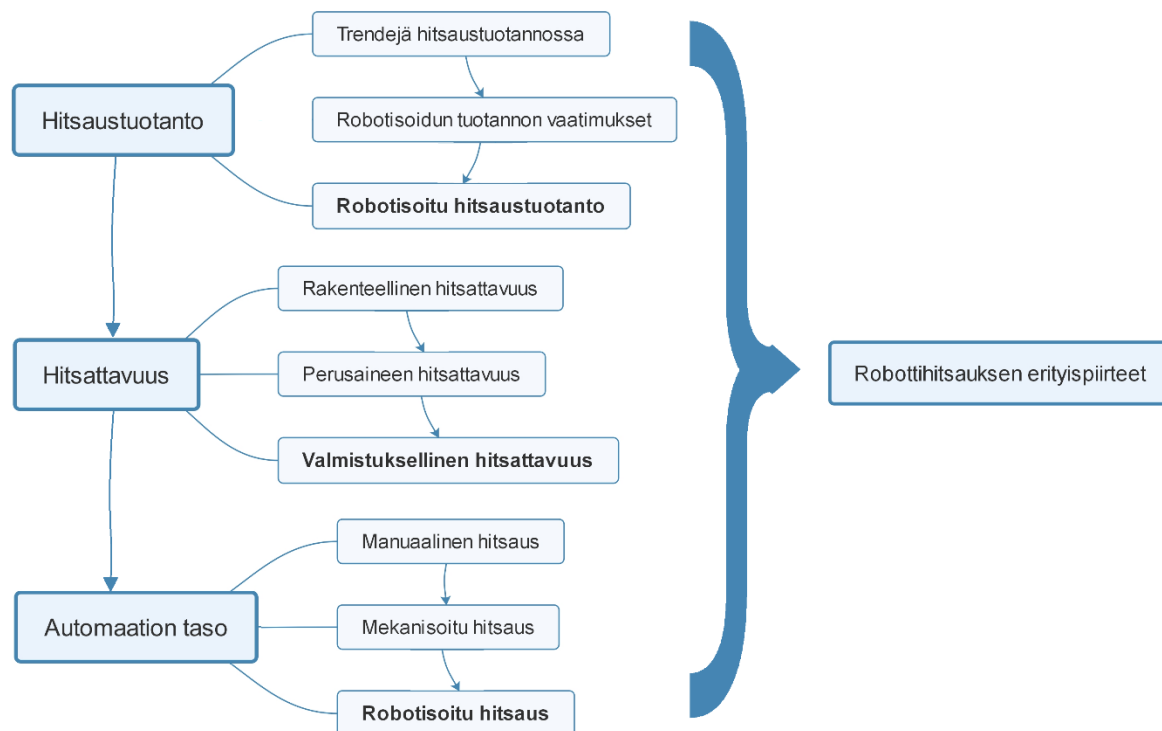
**Kuva 2.** Esimerkki robottihitsauslaitteistosta: (1) Käsiohjelmointilaitte, (2) ohjauskeskus, (3) hitsausvirtalähde, (4) kaasupullo, (5) paineilmajärjestelmä, (6) langansyöttölaite, (7) robottikäsi, (8) kiinnitin, (9) hitsauspoltin, (10) hitsauslankarulla, (11) lankatynnyri, (12) kappaleen käsittelylaite, (13,14) hitsauspään puhdistus- ja kalibrointilaitte. (Lin & Luo 2015, s. 2429)

Nykykaikaiseen robottihitsaukseen kuuluu paljon järjestelmään integroituja mittalaitteita, joista yleisimmin käytössä on kappaleen geometrian tunnistamiseen- ja hitsausparametrien

säätöön liittyvät laitteet, esimerkiksi railonhaku ja -seuranta. Älykkäässä hitsausjärjestelmässä voidaan käyttää aiemmin mainittujen lisäksi muun muassa konenäköä, ultra-ääntä ja muita sensoreita, jotka lisäävät robotin ympäristöön mukautuvuutta ja niin sanottua älykkyyttä. (Chen, Tarn, Zhou 2007, s. V; Li W., Luo H 2015 s. 2404)

### 2.3 Robottihitsauksen erityispiirteet

Valmistusystävällisyys on monitasoinen kokonaisuus, johon vaikuttaa tuotteen suunnittelun lisäksi muun muassa tuotteen toimintojen ja tuotantolaitteiden optimaalisuus sekä tuotannon toteutustapa (Eskelinen & Karsikas 2013, s. 22). Robottihitsaukseen vaikuttavien erityispiirteiden tunnistamiseksi tässä työssä tutkittavat aihealueet ovat hitsaustuotanto, hitsattavuus ja hitsauksen automaation taso. Tutkimalla näihin aihealueisiin liittyvää kirjallisuutta muodostetaan yleiskuva robottihitsauksen valmistusystävällisyyteen vaikuttavista tekijöistä. Kuva 3 on kaavio, jossa on esitetty tutkittavat aihealueet ja niihin kuuluvat alaotsikot, joista tietoa on haettu.



**Kuva 3.** Tutkittavat aihealueet ja robottihitsauksen erityispiirteiden tunnistaminen.

### 2.3.1 Hitsaustuotannon näkökulma

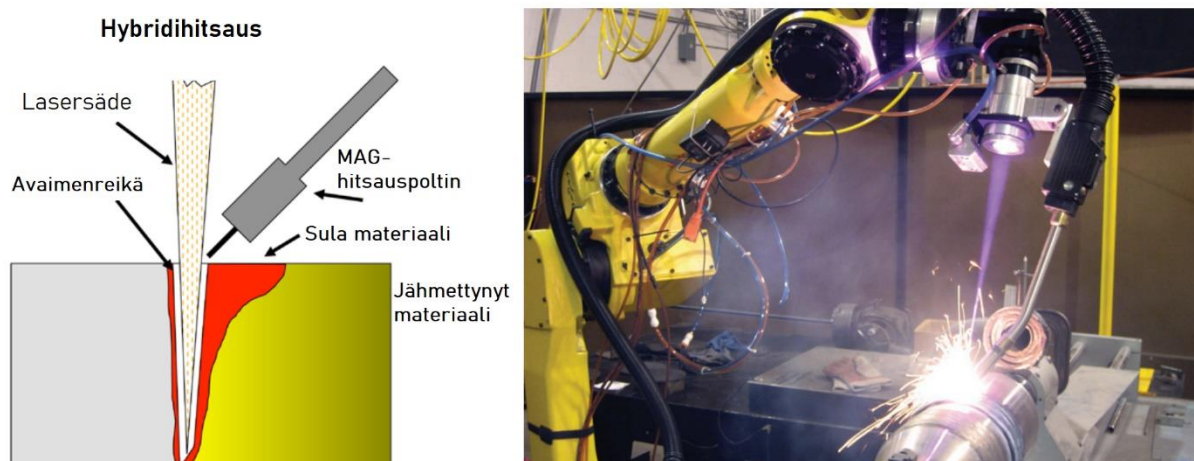
Hitsaustuotanto kehittyi jatkuvasti tavoitteenaan tuottavuuden ja tuotteiden laadun parantaminen. Näiden saavuttamiseksi voidaan hyödyntää esimerkiksi tehokkaampia hitsausprosesseja, uusia materiaaleja, automatisointia sekä sensoriteknologian kehittyessä lisääntyvää dataa. Tuotannon automatisoinnilla voidaan havaita rooli niin tuottavuuden kuin myös laadun parantamiseen. Tuotantoteknologian lisäksi myös tuotannon toimintatapojen ja ohjauksen kehittäminen on tärkeässä roolissa. Toimintatapojen kehittämiseen voidaan hyödyntää esimerkiksi Lean-toimintaperiaatteita (Kuhmonen 2012, s.4 – 6). Automatisoidun tuotannon ohjattavuus helpottaa tuotannon suunnittelua ja Leanin toteutusta (Glaser 2009, s. VIII).

Hybridihitsaus on esimerkki tehokkaasta ja kasvavassa määrin käytettävästä hitsausprosessista. Hybridihitsauksessa laserhitsaukseen yhdistetään toinen hitsausprosessi, jotka muodostavat yhdessä tehokkaan hybridihitsausprosessin. Hybridihitsauksessa laserin korkea tehotiheys voidaan yhdistää valokaareen, sekä mahdolliseen lisäaineen tuontiin, joka mahdollistaa esimerkiksi hitsauksen korkeaan I-railoon ja jouhevan liittymisen hitsin ja perusaineen välille. (Denney 2019, s. 1 – 3.) Hybridihitsausta on käytetty paljon etenkin telakkateollisuudessa, mutta sen käyttö on lisääntynyt myös muilla teollisuuden aloilla, johtuen sen hyödyistä niin puhtaaseen laser- kuin kaarihitsaukseen verrattuna.

Hybridihitsauksen etuja ovat muun muassa (Wolf 2011, s. 280):

- Suurempi hitsausnopeus ja tuottavuus kuin pelkällä kaari -tai laserhitsauksella.
- Alemmat railon tarkkuusvaatimukset lisäainetta käytettäessä kuin laserhitsauksessa.
- Matala lämmöntuonti ja kapea HAZ (Heat Affected Zone) kaarihitsausprosesseihin verrattuna.

Paljon käytetty yhdistelmä on laser-MAG-hybridihitsaus. Havainnollistava kuva prosessista ja käytössä olevasta hitsauslaitteistosta on esitetty alla (Kuva 4). (Denney 2019, s. 1.) Laserhitsauksen tavoin myös hybridihitsaus vaatii hitsauspään kuljetuksen mekanisointia tai automatisointia riittävän kuljetustarkkuuden saavuttamiseksi. Robotisoituun hitsaustuotantoon siirryttäessä kynnys myös uusien robotisointia vaativien hitsausprosessien käyttöönotolle alenee.



**Kuva 4.** Laser-MAG-hybridihitsaus periaate ja esimerkkilaitteisto. (Denney 2019, s. 1 – 2. muokattu)

Teollinen internet (Industrial Internet of things = IIoT), eli kuluttajatuotteista tutun *esineiden internetin* teollisuudessa hyödynnettävä versio, on noussut 2010-luvun lopulla kiinnostusta herättäväksi aiheeksi. Teollisen internetin lähtökohta on datan hyödyntäminen joko yrityksen sisäisissä prosesseissa tai asiakkaalle lisäarvoa tuovana tekijänä (Collin & Saarelainen 2016, s. 58). Teollisen internetin soveltamismahdollisuudet ovat rajattomat. Sitä voidaan soveltaa esimerkiksi seuraaviin toimintoihin, Collin & Saarelainen (2016, s. 61) kirjan mukaisesti:

1. "Etävalvonta, etähallinta, optimointi ja etäpäivitykset
2. Ennakoiva huoltopalvelu ja analytiikka
3. Datapohjainen palveluliiketoiminta
4. Älykäs tehdas ja autonomiset tuotteet"

Hitsaustuotannossa tällä hetkellä käytössä olevia kaupallisia sovelluksia ovat muun muassa *Kemppi WeldEye*, *Esab Weld Cloud* ja *EWM Xnet*. Hitsausrobotteihin liittyvät kaupalliset teollisen internetin järjestelmät toimivat esimerkiksi huoltojen ennakoinnissa ja kunnan seurannassa. (Tepponen 2018, s. 23 – 28) Automatisoinnin myötä kasvavan sensori- ja datamäärän kautta myös teollisen internetin hyödyntämismahdollisuudet laajenevat (Collin & Saarelainen 2016, s. 49). Teollinen internet voi toimia osatyökaluna valmistusystävällisessä tuotannossa esimerkiksi tuotekohtaisten valmistusvaiheiden parametrien hyödyntämisessä tuotannon muissa vaiheissa ja vikaantuvien tuotteiden

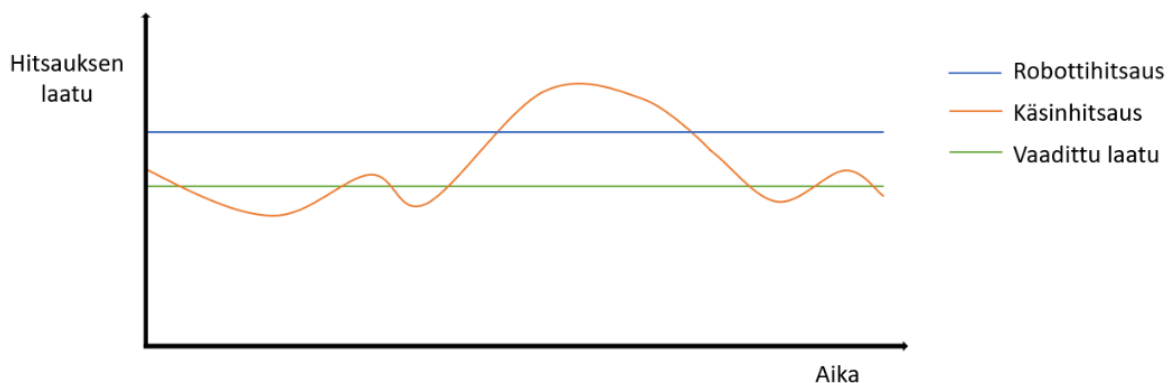
jäljityksessä. Robotisointi puolestaan mahdollistaa esimerkiksi laajemman hitsauksen aikaisen datan keräämisen.

Ympäristöystävällisyys sekä rakenteiden keventämisen ja suorituskyvyn parantamisen tarve ovat syitä uusien materiaalien kehittämiseksi. Teräsrakenteissa suur- ja ultralujien terästen käyttö (UHSS – Ultra High Strength Steel) mahdollistaa rakenteiden keventämisen tai suuremman kuormitettavuuden kautta kilpailukykyisempien tuotteiden valmistamisen (Nevasmaa et al. 2010, s. 4).

Suurlujuusterästen mahdollistaman kevyemmän rakenteen avulla saavutettavilla polttoainesäästöillä tai hyötykuorman kasvattamisella voidaan saavuttaa selkeitä taloudellisia hyötyjä tuotteen elinkaaren aikana, joka on etu niin asiakkaalle kuin valmistajalle. Ympäristöystävällisyyteen erityislujuisten terästen käytöllä voidaan vaikuttaa sekä pienentämällä materiaalin kulutusta että elinkaaren aikana syntyvien hiilidioksidipäästöjen kautta. Kulutusta kestävien erityislujuisten teräksien käytöllä puolestaan voidaan pidentää tuotteiden käyttöikä. (SSAB, 2018)

Erityislujuisten terästen tehokas käyttö edellyttää materiaalien ja niihin sovellettavien valmistusmenetelmien syvällistä tuntemusta. Materiaalin suuremman lujuuden hyödyntäminen hitsatun rakenteen väsymiskestämisen parantamiseen asettaa hitsauksen laadulle korkeat vaatimukset, jolloin hitsauksen mekanisointia tai automatisointia voidaan pitää onnistumisen lähtökohtana. (Nevasmaa et al. 2010, s. 4) Näin ollen robottihitsattua rakennetta suunniteltaessa on hyvä pohtia, voidaanko rakenteen kilpailukykyä lisätä käyttämällä erikoisteräksiä ja siten robotin ominaisuuksia päästä hyödyntämään rakenteen parantamiseksi. Kuva 5 on periaatekuva hitsauksen laadusta käsinhitsauksessa ja robottihitsauksessa.





**Kuva 5.** Robottihitsauksella voidaan oikein toteutettuna saavuttaa tasainen vaadittu laatu. (Mukaiillen, Hiltunen & Purhonen 2008, s. 33.)

Käsiteltäessä yleisesti robotisoitua tuotantoa robotisoinnin tarkoituksena on aina saada yritykselle taloudellista hyötyä. Samalla voidaan kuitenkin parantaa myös työturvallisuutta ja työn mielekkyyttä, kun vaaralliset tai samaa rutiinia toistavat tehtävät voidaan automatisoida.

MIG/MAG-hitsauksen kaariaikasuhte on tyypillisesti noin 20 % manuaalisessa hitsauksessa ja robotisoinnilla se voidaan nostaa 40 – 90 %:iin (Stenbacka 2009, s. 72). Kaariaikasuhteen nostamisella voidaan pienentää tuotteen hitsaukseen kuluva aikaa merkittävästi, mutta mikäli hitsauksen kasvanut tuottavuus ei sovi tuotannon muuhun virtaukseen, syntyy vain hitsattujen tuotteiden puolivalmisteverastoja. Suurin hyöty hitsauksen robotisoinnista saadaan, kun robotilla voidaan jatkuvasti hitsata osia, jotka nopeuttavat lopputuotteen valmistumista. (Glaser 2009, s. 29; Lahti 2011, s. 4) Robottihitsauksen sovittaminen muuhun tuotantoon sopivaksi voi onnistua esimerkiksi sopivan tuotemiksausuksen avulla. Tuotemiksausella tarkoitetaan sarjakohtaista valmistusjärjestystä ja eräkokoja. Oikean tuotemiksausuksen kautta robotille riittää koko ajan hitsattavaa niin että hitsaustuotannon läpäisy aika on lyhin. Samalla säästytään myös turhien väliavarastojen syntymiseltä. (Aalto 2010, s. 31)

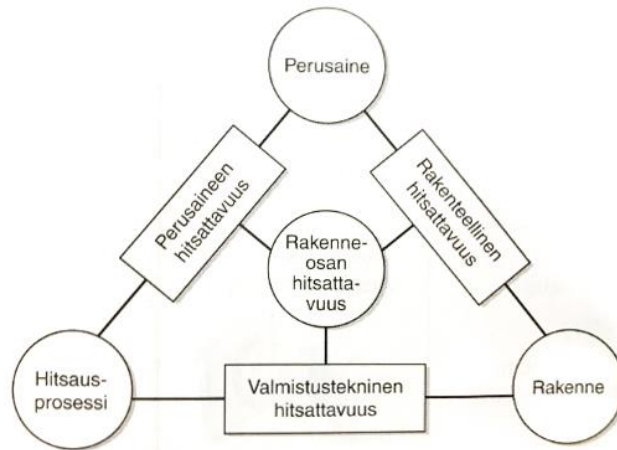
Kaikkia tuotteita ei voi eikä kannata hitsata robotilla, joten tehokkaalle robottihitsaustuotannolle on vaatimuksena määrittää ne tuotteet, joiden hitsaus robotilla on kannattavaa. Robottihitsattavista tuotteista voidaan siten muodostaa sopiva tuotemiksaus, ja näin robottihitsausaseman tuottavuus optimoida. Robottihitsattaville tuotteille yleinen piirre on luonnollisesti se, että suurin osa hitseistä voidaan hitsata robotilla. (Glaser 2009, s. 18)

Vaikka tuote olisi muuten robottihitsaukselle sopiva, voi pieni tuotantomäärä nousta syyksi kannattamattomuudelle. Robottihitsauksella saavutettava tuottavuuden nousu muodostuu yleensä robotin kyvystä toistaa samaa tehtävää vaiheajan muuttumatta. Hitsari voi hitsata yksittäisen tuotteen kasaan nopeammin, kuin sen asetus ja hitsaus tapahtuisi robotilla, mutta sarjamäärän kasvaessa robotti peittoaa hitsarin tuottavuudessa (Glaser 2009, s. 24). Pienen tuotantomäärän rajoittamaa automatisoinnin kannattavuutta voidaan parantaa esimerkiksi tekemällä rakenteista modulaarisia. Modulaaristen ratkaisujen avulla tuotteen hitsaaminen robotilla voi nousta taloudellisesti kannattavaksi, kun asetus/kaariaika suhdetta voidaan laskea. Esimerkki yksinkertaisesta moduloinnista on saman hitsatun osan käyttäminen sekä ajovalon että astinlaudan kannattimena. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 84.) Käytännössä siis tuotteen tuotantomäärän tai robottihitsattavien hitsien määrä on oltava riittävä, jotta tuote sopii automatisoituun tuotantoon.

Robotisoidussa hitsauksessa hitsauspolttimen kuljetus siirtyy ihmiseltä koneelle ja työntekijän tehtäväksi jää robotin toiminnan ylläpito. Robottihitsaussolun työntekijän eli hitsausoperaattorin työtehtäviin kuuluu automaation tasosta riippuen muun muassa osien lastaus ja purkaminen, silloitus hitsaus, robotin ohjelmointi ja huolto sekä mahdollinen vianetsintä. Operaattorien koulutus on tärkeää tuotannon sujuvuuden ja laadun seurannan kannalta. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 35.)

### 2.3.2 Hitsattavuuden näkökulma

Hitsattavuutta arvioidessa huomioidaan rakenteen geometria ja käyttöympäristö, liitettävien materiaalien ominaisuudet sekä valmistukselliset rajoitukset ja vaatimukset. Hitsattavuuden voidaan sanoa olevan sitä parempi, mitä vapaammin hitsausmenetelmä voidaan valita ja mitä vähemmän esivalmisteluja ja jälkikäsittelyä joudutaan tekemään. (Lepola & Makkonen 2005, s. 28.) Hitsattavuus-käsite voidaan jakaa rakenteelliseen, valmistustekniseen ja perusaineen hitsattavuuteen. Hitsattavuuskäsitteen muodostuminen on havainnollistettu Kuva 6.

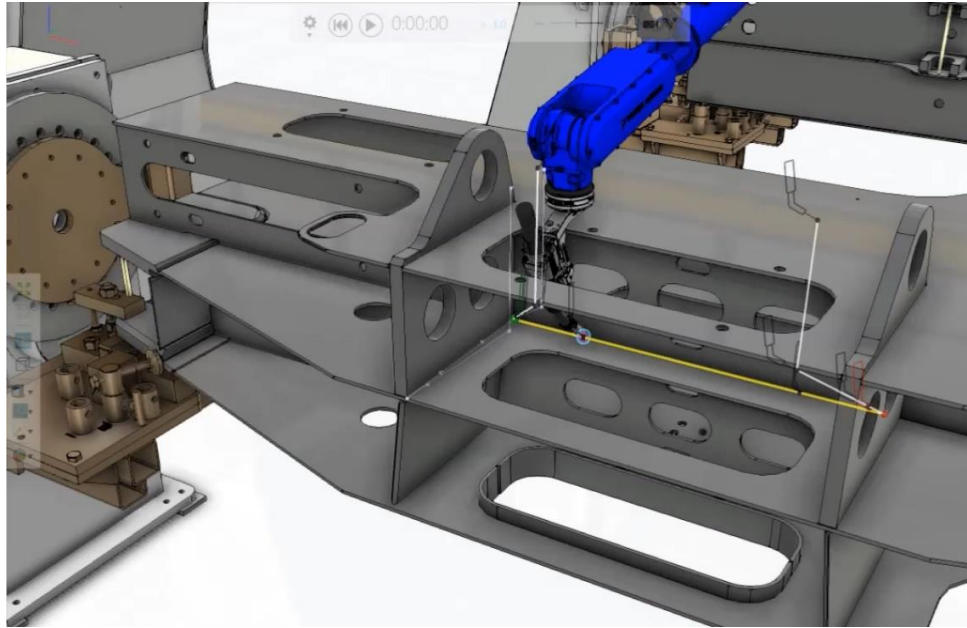


**Kuva 6.** Hitsattavuuskäsitteen muodostuminen. (Lepola & Makkonen 2005, s. 28.)

Rakenteellinen hitsattavuus kuvaa rakenteen sopivuutta hitsattavaksi rakenteeksi. Siihen vaikuttaa rakenteen geometria ja sen sopivuus käyttöympäristöön sekä siihen vaikuttaviin kuormituksiin. (Lepola & Makkonen 2005, s. 28.) Rakenteelliseen hitsattavuuteen vaikuttavia tekijöitä on Lepola & Makkonen (2005, s. 28) mukaisesti:

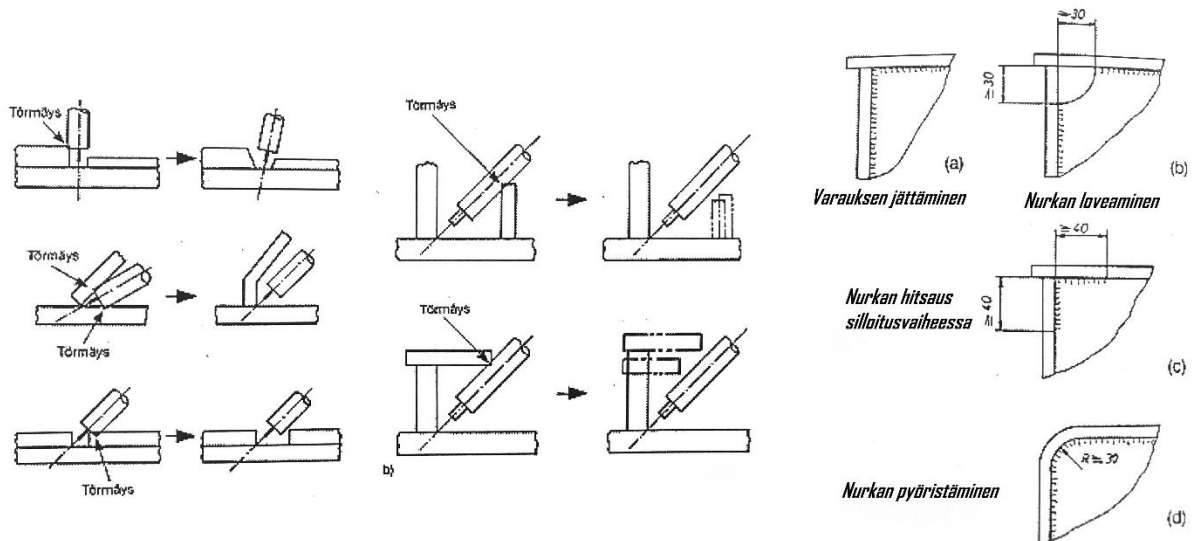
- Rakenteen muotoilu
- Hitsausliitosten sijainti
- Liitosten luoksepäästävyys
- Liitoksiin vaikuttavat voimat ja niiden suunta
- Kuormituslaji (staattinen/dynaaminen) ja vaadittu kestoikä

Rakenteellisen hitsattavuuden arviointi on tärkeässä roolissa tuotteen suunnittelu- ja kehitystyössä. Robottihitsauksen erityispiirteeksi siitä voidaan tunnistaa liitosten luoksepäästävyys ja rakenteen muotoilu. Yleisesti helpoin tapa liitoksen luoksepäästävyuden varmistamiseksi on suunnitella avoimia rakenteita ja yksinkertaisia liitosmuotoja. Aina näitä ei kuitenkaan ole mahdollista toteuttaa. Robottihitsauksessa luoksepäästävyteen vaikuttaa tuotteen lisäksi hitsaussolun konstruktio ja käytössä oleva robotti, joten varmin keino sen todentamiseksi on hitsauksen simulointi. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 91.) Hitsausrobotille riittävän tilan lisäksi tulee huomioida, että tilaa on myös tarvittaville kiinnittimille ja mahdollisille tarttujille (Eskelinen & Karsikas 2013, s. 11). Kuva 7 on robottihitsauksen ohjelmointiin ja simulointiin käytetystä ohjelmistosta, jossa on mallinnettu hitsattavan tuotteen lisäksi hitsausrobotti ja kappaleenkäsittelylaitteisto.



**Kuva 7.** Robottihitsauksen simuloinnissa on mallinnettu hitsattavan tuotteen ja hitsausrobotin lisäksi kappaleen kiinnitys käsittelylaitteeseen. (Delfoi Channel, 2017)

Kuva 8 on robottihitsattavuuden luoksepäästävyyden parantamiseksi ja liitosten muotoilun kehittämiseksi kirjallisuudessa esitettyjä periaatteita ja esimerkkejä.



**Kuva 8.** Robottihitsattavan liitoksen luoksepäästävyyden parantaminen (vasemmalla) ja nurkan muotoilu robottihitsausta varten (oikealla). (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 91 – 92, muokattu)

Perusaineen hitsattavuuteen vaikuttavat tekijät ovat hitsattavan materiaalin kemiallinen koostumus, metallurgiset ominaisuudet sekä fysikaaliset ominaisuudet. Hitsauksessa

materiaaliin tuodaan nopeasti suuri määrä energiaa, joka aiheuttaa muutoksia perusaineen ominaisuuksiin. Tuntemalla perusaineen ominaisuudet, voidaan ennustaa materiaalin käyttäytymistä ja muutoksia sen ominaisuuksissa hitsaustapahtuman vaikutuksesta, sekä valita niihin sopiva hitsausmenetelmä -ja parametrit. (Lepola & Makkonen 2005, s. 28 – 30.)

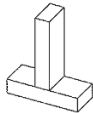
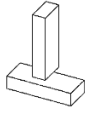


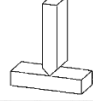
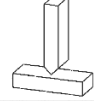
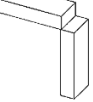
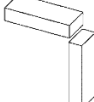


Hitsausliitoksen täyttäessä vaatimukset kemiallisten, fysikaalisten ja metallurgisten ominaisuuksien osalta voidaan perusainetta pitää hitsaukseen soveltuvana (Penttinen et al. 2004 s. 103). Terästen hitsattavuudessa arvioidaan muun muassa liitosalueen sitkeyttä sekä taipumusta kuuma- ja kylmähalkeamiin sekä lamellirepeilyyn. Terästen hitsattavuuteen vaikuttavat tekijät ovat käytännössä hiilipitoisuus sekä seosaineiden määrät. (Lepola & Makkonen 2005, s. 30.) Perusaineen hitsattavuutta voidaan arvioida niin sanottujen hiiliekvivalenttien, tai muiden materiaalin kemiallisesta koostumuksesta riippuvien herkkyyksindeksien avulla (Ovako 2019, s. 7 – 11). Oikeiden materiaalivalintojen avulla voidaan parantaa tuotteen valmistusystävällisyyttä ja hitsauksen tuottavuutta (Lepola & Makkonen 2005, s. 30).

Kolmas hitsattavuuden osa-alueista on valmistustekninen hitsattavuus, johon vaikuttaa puolestaan hitsaukseen vaadittavat esivalmistelut, hitsausmenetelmä ja hitsauksen jälkeen tarvittavat käsittelyt (Lepola & Makkonen 2005, s. 28). Valmistustekniseen hitsattavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa (Lepola & Makkonen 2005, s. 28):

- Railomuoto
- Liitosmuoto
- Hitsausprosessi
- Mahdollinen esilämmityksen tarve
- Hitsausmenetelmä
- Lämmöntuonti ja hitsausjärjestys
- Jälkikäsittelyt (työstö, peittäus jne.)

Robotisoituun hitsaukseen parhaiten sopiva liitosmuoto on pienaliitos, jolle railonhaku ja -seuranta on helpoiten toteutettavissa. Pienaliitoksella kappaleiden keskinäinen asemointi on helppoa, eivätkä pienet sovituserheet heikennä hitsin laatua, ja läpipalamisen vaara on pieni.

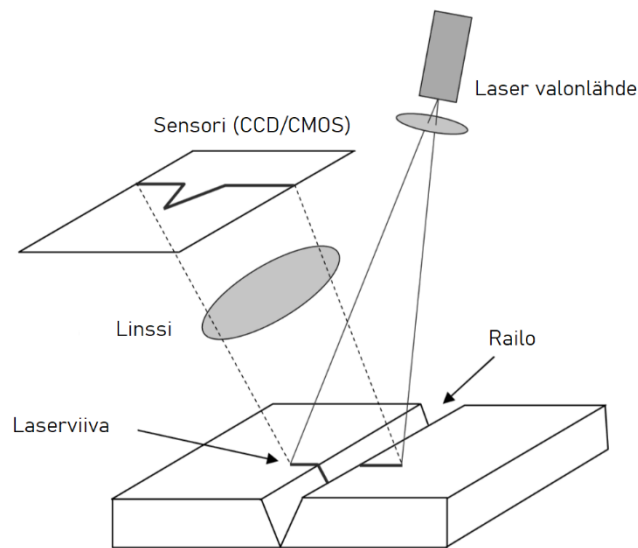
Kuva 9 esittää eri liitosmuotojen sopivuuden robotisoituun MIG/MAG-hitsaukseen sekä sovitusrvirheiden merkittävyyden. (Aaltonen et al. 1997, s. 258)

Liitosmuoto	Periaatekuva	Soveltuvuus robotisoituun MIG/MAG-hitsaukseen	Virheellinen sovitus ja sen vaikutus robottihitsattavuuteen	
Pienaliitos		5		Vähäinen
Päällekkäisliitos		4		Vähäinen
T-liitos		3		Merkittävä
Nurkkaliitos		2 - 3		Merkittävä
Päittäisliitos		1		Erittäin merkittävä

**Kuva 9.** Railomuotojen sopivuus ja sovitusrvirheiden suhteellinen vaikutus robotisoidussa hitsauksessa. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 33.)

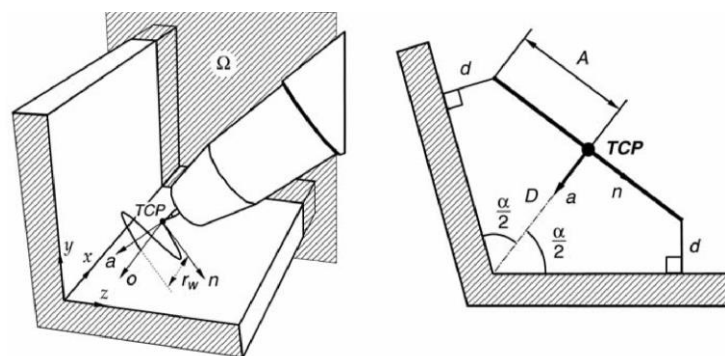
Yksinkertaiset liitosmuodot ovat robotisoituun hitsaukseen suositeltuja, mutta esimerkiksi laserkolmiomittaukseen perustuvalla railon seurannalla haastavampiakin liitosmuotoja voidaan hitsata luotettavasti. Railon sijainnin lisäksi optisella anturilla voidaan havaita muun muassa muutokset railotilavuudessa ja ilmaraossa, asentopoikkeamat sekä tunnistaa siltahitsit. Tämä data mahdollistaa monipuolisen hitsauksen adaptiivisen säädön. Järjestelmä voidaan ohjelmoida reagoimaan muutoksiin halutulla tavalla esimerkiksi pienentämällä hitsausvirtaa, muuttamalla kuljetusnopeutta tai -rataa. Monipalkohitsauksessa alempien palkojen muototietoa voidaan hyödyntää täyttö- ja pintapalkojen hitsauksessa. (Pires et al. 2006, s. 80 – 81.)

Laserkolmiomittaukseen perustuvan optisen railon seurannan periaate on esitetty alla Kuva 10. Haittapuolena optisessa seurannassa on anturin suuri koko, joka rajoittaa hitsauspolttimen mahtumista rakenteen ahtaisiin kohtiin. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 35.)



**Kuva 10.** Laserkolmiomittaukseen perustuvan optisen railon seurannan periaate (Pires et al. 2006, s. 110, käsitteet suomennettu).

Yleisimmin käytetty tapa railon seurantaan on kuitenkin valokaaren läpi tapahtuva seuranta, joka perustuu hitsausvirran muutoksiin elektrodin ja kappaleen välisen etäisyyden muuttuessa. Seuranta toimii poltinta vaaputtamalla, jolloin railon sijainti voidaan laskea ja siten säätää kuljetusta railopintojen mukaan (Kuva 11). Menetelmä on yksinkertainen ja edullinen, mutta vaatii toimiakseen riittävän selkeät railopinnat. (Pires et al. 2006, s. 84 – 85.)



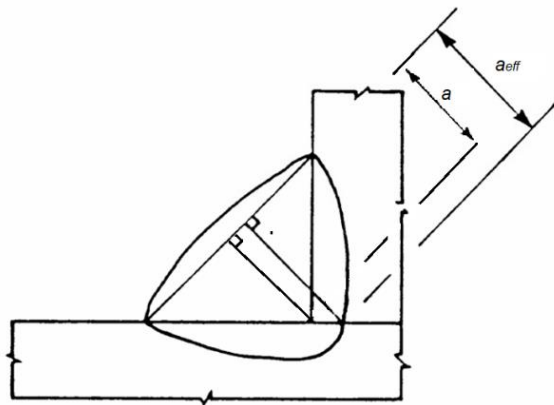
**Kuva 11.** Polttimen vaaputus valokaaren läpi tapahtuvassa railon seurannassa. (Pires et al, 2006 s. 85)

Robotisoitu hitsaus asettaa usein vaatimuksia liitettävien kappaleiden mitta- ja muototarkkuuksille. Vaihtelut liitettävissä kappaleissa voi aiheuttaa virheitä valmiiseen tuotteeseen, mikäli käytössä olevat säätöjärjestelmät eivät pysty korjaamaan poikkeaman

vaikutusta. Kappaleiden epätarkkuudet voivat myös vaikuttaa osien keskinäiseen paikoittamiseen. Railonvalmistuksessa tarkkuutta vaaditaan erityisesti tietyillä railomuodoilla, joilla poikkeamien merkitys laatuun on suurin. Sovitusvirheiden vaikutus robottihitsattavuuteen eri railomuodoilla on esitetty (Kuva 9). (Aaltonen et al. 1997, s. 257; Hiltunen & Purhonen 2008, s. 34 – 35.)

Hitsausasento vaikuttaa hitsisulan hallintaan. Parhaana hitsausasentona voidaan pitää jalkoasentoa, jolloin painovoima ei häiritse hitsisulan käyttäytymistä. Huonommissa hitsausasennoissa ei voida käyttää tuottavuuden kannalta optimaalisia hitsausparametrejä (Niemi & Kemppi 1993, s. 15). Robottihitsaus pyritään suorittamaan aina jalko- tai alapienasennosta. Kappaleen kiinnitys robotisoituun kappaleenkäsittelijään mahdollistaa erisuuntaisten liitosten hitsauksen optimaalisesta hitsausasennosta yhdellä kiinnityksellä.

Kuva 12 on esitetty pienahitsi, johon on merkitty sekä näkyvä a-mitta ( $a$ ) että efektiivinen a-mitta ( $a_{eff}$ ), jossa on huomioitu hitsin tunkeuma. SFS-EN 1993-1-8 (s. 45) mukaisesti ”Tunkeumaa voidaan hyödyntää määritettäessä pienahitsin kestävyyttä, --, edellyttäen, että ennakkoon tehtävin kokein osoitetaan, että vaadittu tunkeuma voidaan jatkuvasti saavuttaa.”



**Kuva 12.** Pienahitsi, jossa on tunkeuma. Kuvaan merkitty efektiivinen- ja näkyvä a-mitta. (SFS-EN 1993-1-8, muokattu)

Käytännössä tunkeuman hyödyntäminen on mahdollista mekanisoidussa ja robotisoidussa hitsauksessa, jossa hitsauksen tasaisesta laadusta ja sitä kautta tunkeuman jatkuvasta saavuttamisesta voidaan varmistua. Tunkeumaa hyödyntämällä voidaan merkittävästi pienentää hitsiaineen tilavuutta, mikä vaikuttaa suoraan myös hitsausnopeuteen ja



tarvittavaan lisääinemäärään. Pienemmän fyysisen a-mitan myötä voidaan pienentää rakenteeseen syntyviä muodonmuutoksia tai jäännösjännityksiä, joka puolestaan vähentää hitsauksen jälkityön tarvetta. (Stenbacka 2011 s. 80)

### 2.3.3 Automaation tason merkitys

Hitsauksen automaation tason nostamisella tavoitellaan parempaa tuottavuutta ja taloudellisia hyötyjä. Tietty automaation taso ei ole aina paras, vaan sopivan tason löytäminen riippuu muun muassa hitsien ominaisuuksista ja määrästä, hitsausprosessista ja laitteiston takaisinmaksuajasta, sekä sen sopivuudesta muuhun tuotantoon. (Salkinoja 2010, s. 10 – 12.)

Hitsauksen automaation tasot voidaan jakaa karkeasti kolmeen; Manuaalinen hitsaus, mekanisoitu hitsaus ja robotisoitu hitsaus. Tasot voidaan jakaa tarkemmin useampaan kuin kolmeen, esimerkiksi automaatio tason optimointia varten (Salkinoja 2010, s. 11). Tässä työssä jaon tarkennuksella ei kuitenkaan saavuteta lisäarvoa.

Manuaaliseen hitsauksessa hitsari asemoi liitettävät osat, säätää hitsauslaitteiston ja suorittaa polttimen kuljetuksen. Manuaalisessa hitsauksessa etuna on joustavuus muutoksiin, niin tuotteissa kuin tuotannossa. Manuaalisen hitsaukseen kuuluu esimerkiksi puikkohitsaus. (Cary 2005, s. 290; Salkinoja 2009, s. 18.)

Mekanisoidussa hitsauksessa kappaletta tai hitsauspoltinta liikutetaan mekanismilla, mutta hitsari valvoo hitsaustapahtumaa ja säätää laitteistoa tarpeen mukaan. Mekanisoitu hitsaus sopii esimerkiksi pitkien suorien, tai pyörähdyssymmetristen hitsien hitsaukseen. Esimerkiksi jauhekaarhitsaus, jossa on mekanisoitu lisääineen syöttö ja polttimen kuljetus tai putken kehähitsien hitsaus pyörityspöytää käyttäen. (Cary 2005 s. 290; Salkinoja 2009, s. 21.)

Robotisoidussa hitsauksessa kappaleen liikuttaminen sekä hitsauspolttimen kuljetus tapahtuu automatisoidusti, eikä vaadi ihmisen valvontaa. Laitteiston mukaan voidaan puhua joko esiohjelmoidusta hitsauksesta tai adaptiivisesti säätävästä hitsauksesta. Laitteistoon kuuluu yleensä moniakselinen liikemanipulaattori ja usein myös hitsattava kappale kiinnitetään liikutettavaan alustaan. (Cary 2005 s. 290; Salkinoja 2009, s. 45.)

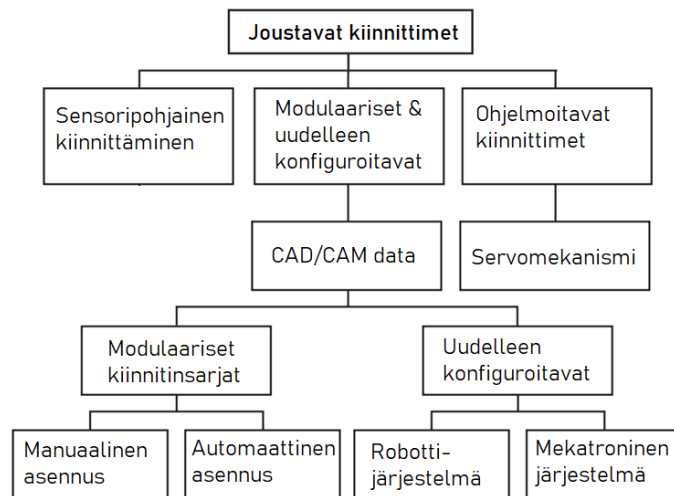
Hitsausprosessi voi olla esimerkiksi MIG/MAG-, plasma-, tai laser-MAG-hybridihitsaus ja robotin konstruktio vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan.

Robotisoidussa hitsauksessa vaatimustenmukaiset hitsit on kyettävä hitsaamaan ilman ihmisen valvontaa, joten robotin on kyettävä mukautumaan mahdollisiin muutoksiin tai olosuhteet on pidettävä vakiona niin, ettei robotin adaptiivisuutta tarvita. Liitettävät osat on kyettävä kiinnittämään myös niin, että robotti voi suorittaa hitsauksen ilman ihmisen vaikutusta. Automaatioasteen kasvaessa on siis pystyttävä huomioimaan paljon muuttujia, jotka käsinhitsaaja hoitaisi normaalin työn ohella. (Lahti 2011, s. 2, Cary 2005, s. 290)

Valmistusystävällisessä suunnittelussa suosittujen rakenteellisten ja toiminnallisten modulaarisuuksien lisäksi robottihitsauksessa saavutetaan hyötyä valmistuksellisilla modulaarisilla ratkaisuilla. Tällaisia ratkaisuja ovat muun muassa vakioidut a-mitat, levynpaksuudet, liitosmuodot, railogeometriat sekä hitsausparametrit ja -aliohjelmat. Modulointi vähentää tarvittavien parametrikokeiden määrää sekä selkeyttää ohjelmointia ja laadunvarmistusta. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 84 – 85)

Robottihitsauksessa hitsattavat kappaleet on kyettävä asemoimaan paikalleen ennen hitsausta riittävällä tarkkuudella. Osien kiinnittämisen yhteydessä on huomioitava hitsausmuodonmuutoksien kompensoimiseksi mahdollisesti vaadittavat ennakot sekä se, että kiinnittimet eivät voi olla esteenä robotin liikkeille. Kiinnittimien on myös kestävä hitsausmuodonmuutoksista- ja kappaleenkäsittelypöydän liikuttelusta syntyvät voimat. (Aaltonen et al. 1997 s.257-259)

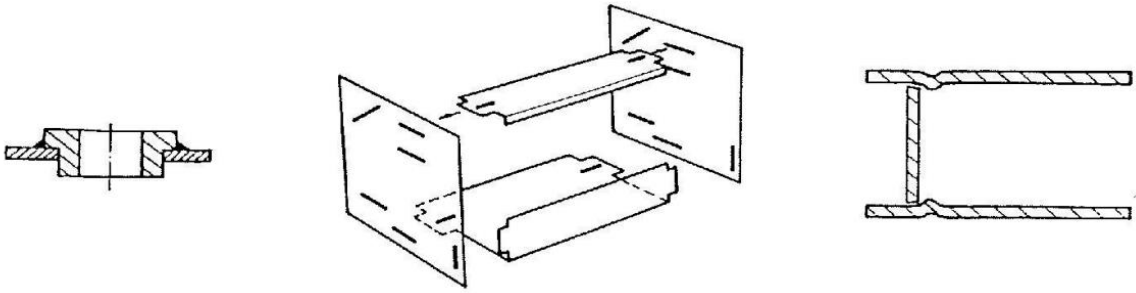
Robottihitsauksessa aihoiden kiinnitykseen ja asemointiin voidaan toteuttaa käyttämällä tuotekohtaisia hitsauskiinnittimiä eli jigejä, joustavia kiinnittimiä (Kuva 13), silloitushitsausta tai hitsauksen robottikokoonpanoa. Robottikokoonpano tarkoittaa sitä, että solussa toimii hitsausrobotin lisäksi robotti, jolla aihioita voidaan tuoda liitettäväksi ja pitää paikallaan hitsauksen aikana (Jääskeläinen 2011, s. 20).



**Kuva 13.** Joustavia kiinnitysratkaisuja. Robottikokoonpano voidaan ajatella myös joustavana kiinnittimenä. (Shirinzadeh 2002, s. 114, muokattu)

Joustavat kiinnittimet ja robottikokoonpano ovat helposti tuotteiden ja tuotannon muutoksiin sopeutuvia ratkaisuja (Demers 2013, s. 34). Silloitushitsauksella voidaan hitsata robotille vaikeita kohtia valmiiksi tai muodostaa osakokoonpanoja, joista lopullinen tuote hitsataan kasaan. Haittapuolena silloituksella kasatuissa kokoonpanoissa on kuitenkin manuaalisen hitsauksen tarve (Kebler, C. 2003). Silloitushitsauksen suunnittelu ja ohjeistus on tärkeässä roolissa robottihitsattavan tuotteen valmistuksessa, koska tuotteilta odotetaan tasaista ja jatkuvaa laatua. Silloituksen riippuessa työvuorossa olevasta operaattorista syntyy tuotteen laatuun poikkeamia. Selkeän silloitusohjeen laatiminen ja päivittäminen nopeuttaa myös uusien silloittajien koulutusta ja poistaa niin sanottua hiljaista tietoa. Silloitusvaiheessa voidaan hitsata myös osa lopullisista hitseistä, jotka ovat muutoin vaikea hitsata robotilla. Robotille nivelten liikkuvuuden tai tilan puutteen takia haasteellinen kohta voi olla esimerkiksi terävien ulkonurkkien tai levyreunan yli menevien hitsien yhtenäinen hitsaus. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 34.)

Hitsauskiinnittimien määrää voidaan vähentää integroimalla rakenteeseen itsepaikoittavia liitoksia, joilla liitettävät osat asemoituvat keskenään tarkasti, vastinpintojen toimiessa samalla myös juuritukena liitokselle (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 87). Esimerkkejä itsepaikoittuvista liitoksista on esitetty Kuva 14. Itsepaikoittavia liitoksia suunniteltaessa tulee kuitenkin kiinnittää huomiota niiden rakenteelliseen hitsattavuuteen.



**Kuva 14.** Esimerkkejä itsepaikoittavista liitoksista. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 88)

Sensoreiden avulla prosessia voidaan seurata ja säätää tarkasti, tarkkailemalla esimerkiksi railon ja hitsisulan muotoa (Pires et al. 2006 s. 80 – 81; Reisgen et al. 2014 Käytännössä robotin paikkatiedon kytkeminen muilta sensoreilta saatavaan dataan, mahdollistaa tarkkojen laadunvarmistusmenetelmien kehittämisen.

Robottihitsaukseen siirryttäessä ihmisen mahdollisuus vaikuttaa prosessiin hitsauksen aikana poistuu. Manuaalisessa ja mekanisoidussa hitsauksessa hitsari tarkkailee hitsin laatua hitsauksen aikana ja sen jälkeen. Robottihitsauksessa visuaalinen tarkastus on mahdollista suorittaa vasta hitsauksen jälkeen. Adaptiivisen säädön lisäksi hitsauksen aikaista sensorien keräämää dataa voidaan hyödyntää robottihitsauksessa laadun seurannassa (Zhang 2015, s. 409). Näin ollen robotin hyödyntäminen osana laadunvarmistusta on mahdollista sensorien välityksellä. Robottihitsauksessa voidaan tallentaa hitsauksen aikaista dataa, kuten hitsausvirta ja suoritettu kuljetusradan säätö, joita on mahdollista hyödyntää myöhemmin osana laadunvarmistusta ja tuotannon kehitystä.

### 3 MENETELMÄT ROBOTTIHITSATTAVUUDEN ERITYISPIIRTEIDEN ANALYSOIMISOIMISEKSI

Tässä luvussa esitellään case-tuotteen analysoimiseksi käytettävät menetelmät ja periaatteet. Kirjallisuustutkimuksen pohjalta kehitetään systemaattinen arviointimenetelmä robottihitsauksen erityispiirteiden huomioimiseksi. Lisäksi kappaleessa esitellään ne periaatteet, joiden pohjalta valmistusystävällisyyden tekijöiden merkittävyyttä kokonaisuuteen voidaan arvioida. Valmistusystävällisyyden mittaamiseksi oleellisena kvantitatiivisena mittarina voidaan pitää esimerkiksi kokonaistuotantoaikaa. Työn tavoitteiden kannalta on kuitenkin epäoleellista tutkia tarkemmin tuotteen kaikkien valmistusvaiheiden vaiheajoja, joten työssä käsitellään valmistusystävällisyyden tekijöitä pääasiassa kvalitatiivisesti. Kehitettävän arviointilomakkeen pisteytys mahdollistaa kuitenkin tuotevariaatioiden välisen kvantitatiivisen vertailun.

#### 3.1 Robottihitsauksen erityispiirteiden DFMA-arviointilomakkeen kehittäminen

Yleisesti valmistusystävällinen suunnittelu sisältää kaikki periaatteet ja järjestelyt, joiden avulla voidaan kehittää tuotteen valmistettavuutta. DFMA-suunnittelussa käytettäviä apuvälineitä on useita, joihin kuuluu muun muassa monialaiset tuotekehitystiimit, erilaiset CAD, CAM ja simulointiohjelmit sekä suunnatut tarkastus ja kysymyslistat. (Eskelinen & Karsikas 2013, s. 7 – 12; Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 13)

Tuotteiden valmistusystävällisyyden arvioimiseen voidaan soveltaa pisteytettyjä kysymyslistoja tai taulukoita. Taulukot voidaan toteuttaa pisteyttämällä piirteiden lukuarvoja, tai yksinkertaisella kyllä/ei-rakenteella (Eskelinen & Karsikas 2013, s. 98). Edellisessä luvussa tunnistettujen erityispiirteiden pohjalta kehitetään robottihitsauksen DFMA-erityispiirteiden arviointilomake. Tarkastuslistan pohjana käytetään yleiset DFMA-tekijät huomioivaa listaa, joka ohjaa robottihitsauksen erityispiirteiden muotoilua tuotesuunnittelun kannalta hyödyllisiksi kysymyksiksi. Kehitetyn listan avulla voidaan arvioida hitsauskokoontamokohtaisesti robottihitsaukseen liittyvien DFMA-erityispiirteiden täyttymistä. Kysymysten pisteytys mahdollistaa kvantitatiivisen vertailun tuotevariaatioiden välillä. Robottihitsauksen erityispiirteitä tarkasteleva DFMA-arviointilomake on esitetty liitteessä I.

Tuotesuunnittelussa ei voida unohtaa kuitenkaan muihin tuotantovaiheisiin liittyvien valmistusmenetelmäkohtaisten ohjeiden huomiointia, joten robottihitsattavan tuotteen suunnittelu vaatii tuekseen joukon valmistusmenetelmiin sopivia DFM-apuneuvoja.

### 3.2 Konseptisuunnittelusta yksityiskohtien suunnitteluun

Valmistusystävällisyyttä analysoidessa on oleellista tunnistaa ne valmistusystävällisyyteen vaikuttavat tekijät, joilla on suurin vaikutus tuotteen kokonaisvalmistuskustannuksiin ja valmistusystävällisyyteen. Merkittävimpinä tekijöinä voidaan pitää konsepti- ja tuoteperhetason ratkaisuja, jotka rajoittavat myöhemmin tehtäviä päätöksiä ja mahdollisuuksia. Tästä syystä myös suunnittelu täytyy aloittaa konseptitasolta edeten kohti yksityiskohtia. (Lempiäinen & Savolainen, 2003 s. 15 – 18.)

Tuotesuunnittelun tehostamiseksi on kehitetty systemaattisen tuotesuunnittelun menetelmä, jossa suunnittelu alkaa ongelman selkeyttämisestä ja määrittämisestä. Tämän jälkeen määritetään funktiot, jotka ongelman ratkaisemiseksi täytyy toteuttaa huomioimatta vielä fyysisiin ominaisuuksiin tai valmistusmenetelmiin liittyviä rajoitteita. Funktioiden selvittämisen jälkeen aloitetaan optimaalisten muotojen, materiaalien ja laitteiden etsiminen, joilla vaaditut funktiot voidaan toteuttaa. (Hundal 1997, s. 43 – 44.)

Systemaattisen tuotesuunnittelun menetelmä sekä konseptitason suunnittelu on tuotu esille, koska soveltamalla näitä menetelmiä yhdessä DFM-työkalujen kanssa valmistusystävällisyyden tekijät tulee huomioiduksi loogisessa järjestyksessä. Tällöin vältytään osaoptimoinnilta, jossa keskitytään vain yksityiskohtien valmistettavuuteen. Kustannusten kannalta merkitys pienenee siirryttäessä konseptisuunnittelusta yksityiskohtiin (Hundal 1997, s. 43 – 44; Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 15). Näin ollen myös tässä työssä tutkittavien robottihitsauksen valmistusystävällisyyden erityispiirteiden tunnistaminen on mielekästä suorittaa suunnittelu- ja valmistuskonseptiin liittyvistä valmistusystävällisyyden tekijöistä kohti yksityiskohtia. Tunnistettaessa kustannusten kannalta merkittävimpiä tekijöitä voidaan suunnitteluresursseja ohjata oikeisiin kohteisiin kustannustehokkuuden parantamiseksi.

### 3.3 Valmistusystävällisyyden tasot

Valmistusystävällisyyden tekijät voidaan jakaa usealle tasolle. Tutkimalla DFM-tekijöitä tietoisesti kaikilta neljältä hierarkiatasolta voidaan havainnoida valmistusystävällisyystekijöiden jakautumista yrityksen sisällä. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 15 – 18.) Tasot voidaan jakaa Lempiäinen & Savolainen (2003, s. 15 – 18.) mukaisesti:

- Yritystaso
- Tuoteperhetaso
- Rakennetaso
- Komponenttitaso

Yritystasolla kehitettävää tuotetta vertaillaan muihin yrityksen valmistamiin tuotteisiin. Tavoitteena on, että yritys ei valmista perusteetta useassa paikassa samanlaisia tuotteita, ja että yrityksen tuotteissa käytetään mahdollisimman paljon samoja teknisiä ratkaisuja. Tuoteperhetasolla tarkastellaan eri tuoteversioiden suhtautumista toisiinsa. Se mahdollistaa esimerkiksi rinnakkaisessa tuotteessa hyväksi todettujen ratkaisujen hyödyntämistä uudessa tuotteessa skaalaamalla tuotteen kokoa tai tehoa. Rakennetasolla puolestaan tutkitaan tuotteen rakenteen sopivuutta tuotannon järjestelyihin ja tuotantolaitteisiin. Komponenttitasolla ideointi on helpointa ja huomio pitäisi kohdistaa nimenomaan kriittisiin komponentteihin, esimerkiksi kalliisiin osiin tai niihin osiin, joiden valmistuksessa on havaittu ongelmia. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 16 – 17.)

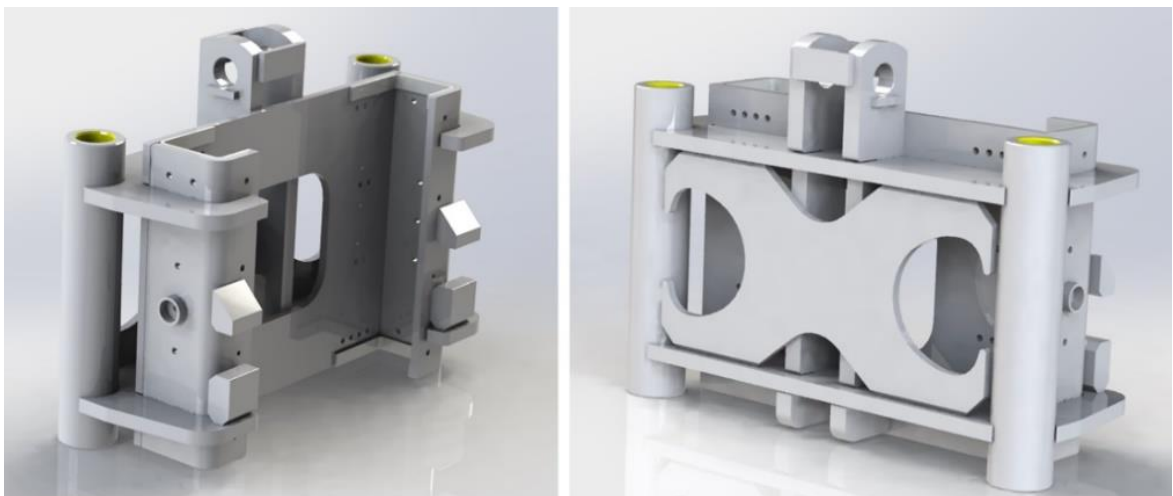
Hyödyntämällä kirjallisuustutkimuksessa tunnistettuja erityispiirteitä sekä kehitetyn arviointilomakkeen kysymyksiä, robottihitsattavan tuotteen valmistettavuuteen vaikuttavat erityispiirteet voidaan jaotella yllä esitettyjen periaatteiden pohjalta kolmeen kategoriaan; tuoteperhe ja konseptitaso, rakennetaso ja tuotannon toteutus sekä komponenttitaso ja tuoteyksityiskohdat. Tätä luokittelua hyödynnetään case-tuotteen erityispiirteiden jaottelemiseksi.

## 4 LUISTIRAKENTEEN VALMISTUSYSTÄVÄLLISYYDEN ERITYISPIIRTEET ROBOTTIHITSAUKSESSA

Tässä luvussa tarkastellaan valmistusystävällisyyden erityispiirteitä robottihitsauksessa kohdeyrityksen valmistamalle luistirakenteelle. Tavoitteena on tunnistaa kyseisen tuotteen suunnitteluun ja tuotantoon vaikuttavat robottihitsauksen DFMA-erityispiirteet sekä jaotella tekijät luotuihin kategorioihin. Luistirakennetta käsitellään tässä työssä itsenäisenä tuotteena, vaikka kohdeyrityksessä se on käytännössä vain osa lopputuotteen rakennetta.

### 4.1 Tutkittava luistirakenne

Tutkittava tuote on paalutuskoneissa käytettävä teräksinen luistirakenne (Kuva 15). Rakenne koostuu pääosin levyleikkeistä sekä koneistetuista putkiosista, jotka on aiemmin hitsattu kokoonpanoksi manuaalisesti MAG-hitsausprosessilla. Käytettävät materiaalit ovat S355 terästä. Tuotteita valmistetaan 5 – 10 kappaleen sarjoissa. Luistin toiminnot ovat lineaarisen liikkeen mahdollistaminen paalutuskoneen keilin ja hydraulijärkäleen välillä, nostavan voiman välittäminen hydraulijärkäleeseen sekä järkäleen ja koneen rungon välisen lukituksen mahdollistaminen kuljetuksen aikana. Kohdeyritys valmistaa samantapaisista luistirakenteista eri versioita ja kokoluokkia tuotevarianttien välillä. Luistirakenteista osa toimii vain kytkentänä kappaleiden väliseen lineaariseen liikkeeseen, ilman voiman välitys funktiota.

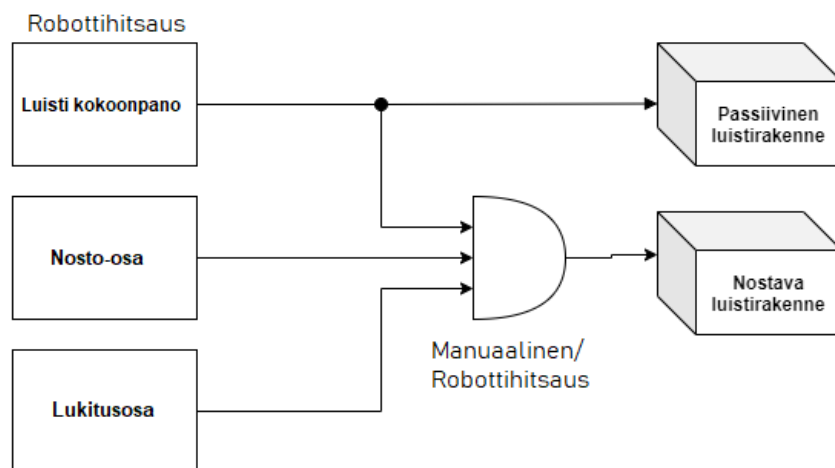


**Kuva 15.** Case-tuote.



#### 4.2 Tuoteperhe- ja konseptitaso

Luistirakenteista valmistetaan useita versioita erituotevarianttien välillä sekä paalutuskoneessa käytetään erilaisia saman osafunktion omaavia luisteja. Rakenteen moduloinnilla voidaan vähentää rakennevariaatioiden määrää, jolloin samanlaisten kappaleiden valmistusmäärä kasvaa. Sarjakokojen kasvattaminen robotisoidussa hitsauksessa parantaa valmistusystävällisyyttä, kun hitsaussolun asetus-kaariaika suhdetta voidaan laskea. Modulaarisen luistirakenteen ratkaisua voi hyödyntää tuotevariaatioihin kokoa skaalaamalla, jolloin myös muut kehitetyt valmistusystävälliset ratkaisut voidaan uusiokäyttää. Modulaarisuus voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä samaa perusrakennetta sekä nostavien että passiivisten luistien kanssa. Mahdollinen rakenteen toteutustapa on havainnollistettu alla (Kuva 16).



**Kuva 16.** Luistin toteutus modulaarisesti osakokoonpanoista mahdollistaa suuremmat sarjakoot robottihitsaukseen. Samalla robottihitsaukseen sopimattomat osat voidaan erottaa manuaalisesti hitsattaviksi.

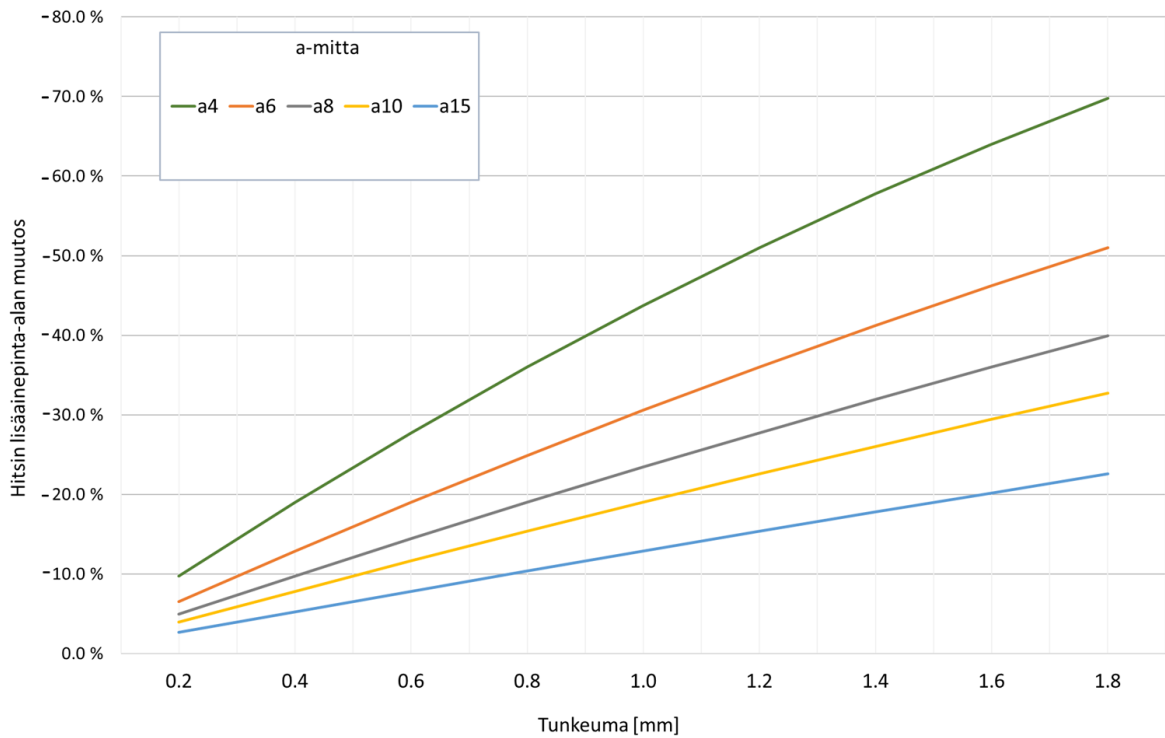
Tuotteet on valmistettu S355 materiaaleista, joiden hitsattavuutta voidaan pitää hyvänä. Käyttämällä vain yhtä materiaalia, voidaan taata kaikille liitoksille samat ominaisuudet. Luisti ei altistu käytössä kulutukselle, joten kulutusta kestävien terästen käyttämisellä ei lisätä tuotteen kilpailukykyä. UHSS-terästen käytöllä voidaan vaikuttaa hieman lopputuotteen kokonaisuudessaan, ja käyttämällä lujia lisäaineita myös hitsien koot pienenevät, joka nopeuttaa hitsausvaihetta.

### 4.3 Rakennetaso ja tuotannon toteutus

Tuotteen liitosmuodot on suunniteltu manuaaliselle MAG-hitsaukselle sopiviksi. Siirryttäessä robottihitsaukseen oleellista liitosmuotojen kannalta on se, että voidaanko robotin sensorien avulla tunnistaa hitsattavan railon sijainti ja mahdolliset muotovirheet tai voidaanko osat valmistaa niin tarkasti, että sensoreita ei välttämättä tarvita. Suurin osa case-tuotteen hitseistä on pienahitsejä, joihin railonhaku -ja seuranta voidaan toteuttaa MIG/MAG-hitsauksessa yksinkertaisesti hitsauspolttimen päällä tehtävällä kosketuksella sekä hitsausvirran muutoksien perusteella. Osien valmistuksessa on huomioitava, ettei esimerkiksi mahdollisten valmistusvirheiden summautumisesta syntyvä ilmarako ylitä sallittua rajaa, ja siten riittävästä laadusta voidaan varmistua. Tuotteen v-railohitsien sijainnit ovat avoimilla paikoilla, joten niiden hitsauksessa voidaan hyödyntää myös optista railonseurantaa tasaisen laadun varmistamiseksi. Osa rakenteen hitseistä on ahtaissa paikoissa, joten liitosten luoksepäästävydestä ei nykyisellä rakenteella voida varmistua ilman hitsauksen simulointia.

Manuaalisesti hitsattaessa luistirakenne on valmistettu lisäämällä osia hitsaustyön edetessä. Robottihitsattavalle tuotteelle on suotavaa, että kaikki osat on mahdollista asemoida paikoilleen niin, että hitsaus voidaan suorittaa ilman keskeytyksiä. Robottikokoonpanon käyttäminen mahdollistaisi kokoonpanon hitsauksen ilman keskeytyksiä. Tältä kannalta tuotteen robottihitsattavuutta voidaan kehittää esimerkiksi muokkaamalla hitsien luoksepäästävyttä niin, että suurin osa hitseistä on mahdollista hitsata yhdellä asetuksella. Tuotannossa ratkaisu voidaan toteuttaa ilman rakenteellisia muutoksia jakamalla tuote hitsauksen osakokoonpanoihin tai hitsaamalla osa hitseistä manuaalisesti.

Case-tuotteen pienahitsitseissä tunkeumaa hyödyntämällä, voidaan vähentää lisäaineen kulutusta, kasvattaa hitsausnopeutta sekä pienentää syntyviä hitsausmuodonmuutoksia. Tunkeuman vaikutus pienahitsien lisäainepinta-alaan olettaen, ettei kappaleiden välissä ei ole ilmarakoa on esitetty Kuva 17. Tunkeuman hyödyntäminen parantaa valmistusystävällisyyttä erityisesti, jos case-tuotteen monipalkohitsejä voidaan muuttaa yhdellä palolla hitsattaviksi.



**Kuva 17.** Tunkeuman vaikutus symmetrisen pienahitsin lisäainepinta-alaan.

Robottihitsauksen valmistuksellisia modulaarisia ratkaisuja voidaan hyödyntää hitsausparametreihin ja railomuotoihin. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että suunnittelussa hyödynnetään esimerkiksi listaa, jossa on esitetty valmiiksi menetelmäkokeissa määritetyt a-mitat, materiaalikohtaisesti saavutettavat tunkeumat ja mahdolliset liitosmuodot tunnetuille hitsausparametreille. Tällaisen suunnitteluohjeen avulla voidaan välttyä ylimääräisiltä kyselyiltä ja piirustusten revisioilta.

Tuotteen hitsejä hitsataan jokaisen sivun suunnasta, mikä asettaa haasteita kappaleen kiinnittämiseen hitsauksen ajaksi. Hitsaussuuntien määrää voidaan vähentää ilman suuria rakenteellisia muutoksia esimerkiksi hitsaamalla kahden puolen sijasta vain yhdeltä puolelta. Käytännössä tämä vaatii kuitenkin valmistettavuuden kannalta huonoja muutoksia railomuotoihin. Rakenteellisten muutosten avulla tuotetta pyritään muokkaamaan, niin että vähintään yksi tuotteen sivu jää vapaaksi kappaleen kiinnitystä varten.

Robottihitsattavuutta tarkastellessa on syytä pohtia vaihtoehtoisten robottihitsaukseen soveltuvien hitsausprosessien mahdollisuuksia tuotteille. Esimerkiksi case-tuotteen pienahitsien hitsaus laser tai laser-hybridihitsauksella mahdollistaisi teoriassa liitosten

läpihitsauksen yhdeltä puolelta, joka vähentäisi hitsaussuuntien ja hitsien määrää, mutta aiheuttaisi puolestaan entistä haastavimmat tarkkuusvaatimukset osanvalmistukseen.

#### 4.4 Komponenttitaso ja tuoteyksityiskohdat

Rakenteessa on käytetty itsepaikoittavia liitoksia useissa kohdissa. Tämä helpottaa kappaleiden asemointia ja kiinnitystä robottihitsauksen ajaksi. Case-tuotteen eräs kulma on valmistettu kahdesta levystä yhteen hitsaamalla. Muodon toteuttaminen särmäämällä vähentää robotille haasteellisempien v-railohitsien määrää, sekä terävän nurkan sijaan, kulman hitsit muuttuvat robottihitsaukseen sopivaksi ympyräkaareksi. Muotojen toteuttaminen särmäämällä vähentää myös tarvittavien osien määrää. Särmäyksellä saavutettava mittatarkkuus voi kuitenkin aiheuttaa haasteita, koska tältä muodolta vaaditaan tarkkoja mitta- ja muototoleransseja.

Isompien levyleikkeiden lisäksi rakenteessa on pienempiä hitsaamalla liitettäviä varusteluosia, kuten voitelunippojen suojat, lukituspalat ja niveltappiliitoksen vahvikelevyt. Osien määrää voidaan vähentää esimerkiksi; yhdistelemällä osia, integroimalla vahvikelevyt osaksi muita levyosia tai kompensoimalla vahvikelevyjen funktio kasvattamalla levynpaksuutta niveltappiliitoksen levyissä. Osien määrän vähentäminen helpottaa hitsauksen aikaista kiinnitystä.

## 5 ANALYYSI JA POHDINTA

Case-tuotteen kehitysvaiheessa ei ole mietitty robottihitsattavuutta, jonka takia tuotteen toteutus nykyisellään robotisoidusti tuo haasteita. Edellisessä kappaleessa tuotiin esille nykyiseen konstruktion liittyviä ongelmakohtia sekä tekijöitä, joilla case-tuotteen valmistusystävällisyyttä voidaan kehittää. Johtopäätöksenä rakenteen toteutuksesta päädyttiin siihen, että tuotteen hitsaus kokonaan robotisoidusti ei ole kannattavaa nykyisellä rakenteella. Rakenne voidaan toteuttaa robotisoidussa hitsauksessa valmistusystävällisemmin pienillä muutoksilla sekä laitteisto ja materiaalikohtaiset ominaisuudet huomioimalla. Tällöin kuitenkin vain osa rakenteesta hitsataan robotisoidusti. Vaihtoehtoisesti rakennetta muokataan radikaalimmin niin, että kaikki hitsit voidaan hitsata robotisoidusti yhdellä asetuksella. Suurempiin muutoksiin voidaan sisällyttää tuotevariaatioiden välinen modulaarinen ratkaisu.

Tuotteen lopullinen suunnittelu rajattiin työn ulkopuolelle, koska suunniteltaessa luistirakennetta automatisoituun tuotantoon on syytä perehtyä rinnakkaisiin tuotteisiin. Nykyisen rakenteen ja yksittäisen tuotevariaation tarkastelulla suunnittelussa olisi päädytty helposti nimenomaan vain osaoptimointiin. Aloitettaessa tuotteen valmistus automatisoidusti on rakenteen toteutusta hyvä miettiä tarkkaan, jotta robotisoidun tuotannon potentiaalista saadaan kaikki irti. Nykyisen rakenteen toteutus on manuaalisessa tuotannossa toimiva, mutta automatisoituun tuotantoon siirryttäessä modulaarisien rakenteiden ja niistä saatavien hyötyjen merkitys kasvaa. Huomiona kuitenkin, että myös ”yksityiskohtien” kehittämällä voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä suuren volyymin tuotteilla automatisoidussa tuotannossa.

### 5.1 Vertailu ja yhtymäkohdat aiempaan tutkimukseen

Kirjallisuustutkimuksessa kerättiin robottihitsauksen valmistusystävällisyyden tekijöitä yhdistämällä aiempien tutkimusten ja artikkelien sisältöä eri lähteistä. Vastaavan laajuista koontia robottihitsauksen valmistusystävällisyyteen vaikuttavista tekijöistä ei työn aikana löydetty.

Arviointiin kehitetyn lomakkeen pohjana käytettiin yleisten DFMA-tekijöiden huomioimiseksi kehitettyä listaa. DFMA tekijöiden samankaltaisuuksien kautta valmista lomaketta pystyttiin soveltamaan robottihitsauskokoontamiseen. Samankaltaisuudet johtuvat siitä, että valmistusystävällisen suunnittelun peruseriaatteet pätevät kaikille valmistusmenetelmille. Lisäksi suuri osa robottihitsattavan tuotteen suunnitteluun liittyvistä ohjeista on samoja kuin manuaalisessa hitsauksessa, mutta esimerkiksi liitosmuotojen virheiden kriittisyydellä on suurempi merkitys robottihitsauksessa.

## 5.2 Tutkimuksen luotettavuus

Tutkimalla toisen henkilön toimesta kirjallisuudesta samoja aihealueita samoilla tavoitteilla, joita tässä työssä on tutkittu, oletetaan päädyttävän samankaltaisiin havaintoihin. Ei voida kuitenkaan varmistua siitä, että kaikkia valmistusystävällisyyteen vaikuttavia erityispiirteitä robottihitsauksessa olisi pystytty tämän työn aikana esittämään. Tutkimalla robottihitsausta syvällisemmin tai useampia siihen vaikuttavia aihealueita kirjallisuudesta voidaan löytää uusia tekijöitä ja näkökulmia. Lisäksi osa tekijöistä on mahdollisesti käytännössä opittua konepajojen sisäistä ”hiljaista tietoa”, jota ei ole kirjallisuudessa esitetty.

Esitelty lähestymistapa robottihitsattavan tuotteen valmistusystävällisyyteen, erityispiirteiden huomioivan arviointilomakkeen kautta, on kuitenkin vain yksi suunnittelun apuneuvo. Huomioimalla työssä esitetyt erityispiirteet, sekä käyttämällä kehitettyä arviointilomaketta yhdessä muiden DFM-suunnitteluapuneuvojen kanssa, tulee valmistettavuutta käsiteltyä useammasta näkökulmasta. Kun suunnittelumetodi sisältää valmistettavuuden tarkastelun useasta näkökulmasta, tulee kokonaisuus huomioitua. Täten myös yksittäisen suunnitteluapuneuvon mahdollisten puutteiden merkitys pienenee, kun puuttuvat tekijät voivat tulla huomioiduksi muiden apuneuvojen kautta.

## 5.3 Avaintulokset

Työn aikana tunnistettiin joukko robottihitsaukseen vaikuttavia valmistusystävällisyyden erityispiirteitä. Näiden piirteiden pohjalta kehitettiin pisteytettävä arviointilomake robottihitsauksen erityispiirteiden analysointiin. Lomakkeen kysymyksien kautta voidaan tunnistaa kriittisiä robottihitsattavaan tuotteeseen vaikuttavia valmistusystävällisyyden erityispiirteitä ja vertailla tuotevariaatioita kvantitatiivisesti.

Työssä valmistusystävällisyyden tekijät jaoteltiin kategorioihin tuotteen toteutukseen vaikuttavien suurimpien mahdollisuuksien tunnistamiseksi. Samalla vältetään ainoastaan vähemmän merkityksellisiin kohtiin puuttuminen. Case-tuotteelle saadut tulokset jaoteltiin kolmeen kategoriaan, joihin jokaiseen tunnistettiin valmistusystävällisyyden erityispiirteitä. ”Tuoteperhe ja konseptitaso” kategoriassa tunnistettiin mahdollisuus rinnakkaisten tuotteiden välisten modulaarisen ratkaisun kehittämiseen, josta voidaan hyötyä robotisoidussa tuotannossa. ”Rakennetaso ja tuotannon toteutus” kategoriassa havaittiin rakenteen muotojen ja liitostyyppien merkitys valmistettavuuteen ja toisaalta laadunvarmistukseen. Lisäksi merkittävässä roolissa on valmistus- ja suunnitteluosastojen välinen kommunikointi sekä konepajakohtaisten ohjeiden määrittäminen ja noudattaminen. ”Komponenttitaso ja tuoteyksityiskohdat” kategoriassa listattujen erityispiirteiden määrä on pienempi, sillä komponenttitasolla yleiset valmistettavuuden tekijät ovat suuressa roolissa.

#### 5.4 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys

Työtä voidaan käyttää pohjana suunnitteluohjeelle konepajassa, jossa siirrytään robotisoituun hitsaukseen tai robottihitsauksen valmistusystävällisyyttä halutaan kehittää. Työssä on käsitelty valmistusystävällisyyden tekijöitä MIG/MAG hitsausprosessin näkökulmasta, mutta liitosmuotoihin liittyviä tekijöitä lukuun ottamatta tunnistettuja erityispiirteitä voidaan soveltaa muillekin automatisoitaville hitsausprosesseille.

#### 5.5 Jatkotutkimusaiheet

Työn aikana ilmenneisiin jatkotutkimustarpeisiin kuuluu oleellisesti konepajakohtaisen ohjeistuksien määrittäminen, joihin sisältyy robotille mahdolliset railomuodot, a-mitat ja tunkeumat materiaalikohtaisesti. Lisäksi selvitys robottihitsauksessa vaadittavista liitettävien osien tarkkuustoleransseista on suunnittelun kannalta oleellinen tieto.

## 6 YHTEENVETO

Tämä kandidaatintyö tehtiin Junttan Oy:n tarpeesta selvittää ne robottihitsauksen valmistusystävällisyyteen vaikuttavat erityispiirteet, jotka tulee huomioida siirryttäessä manuaalisesta robotisoituun hitsaustuotantoon. Tavoitteena oli määrittää ne tekijät, jotka tulee huomioida arvioitaessa tuotteen valmistettavuutta automaation tason muuttuessa. Tekijöiden huomioimisella pyritään kehittämään nykyisten ja uusien tuotteiden valmistettavuutta hitsausrobotin kustannustehokkuuden parantamiseksi.

Robottihitsauksessa vaikuttavia valmistusystävällisyyden erityispiirteitä tunnistettiin kirjallisuustutkimuksen avulla. Tutkitut aihealueet olivat hitsaustuotanto, hitsattavuus ja automaation taso.

Kirjallisuustutkimuksen pohjalta kehitettiin robottihitsattavan tuotteen valmistusystävällisyyden erityispiirteiden DFMA-arviointilomake, jota voidaan hyödyntää suunnittelussa erityispiirteiden huomioimiseksi sekä tuotevariaatioiden väliseen kvantitatiiviseen vertailuun. Lisäksi menetelmät luvussa esiteltiin periaatteet, joiden avulla erityispiirteitä on mahdollista luokitella. Tavoitteena luokittelulla oli merkittävimpien ja taloudellisesti vaikuttavimpien erityispiirteiden erottaminen kokonaisuoptimointia varten. Esiteltyjen periaatteiden pohjalta nimettiin kolme kategoriaa, johon case-tuotteen valmistusystävällisyyden erityispiirteet haluttiin jaotella.

Hyödyntämällä kehitettyä arviointilomaketta case-tuotteena olleen luistirakenteen robottihitsauksen valmistusystävällisyyden erityispiirteet jaoteltiin nimettyihin kategorioihin. Merkittävimpinä tuloksina pidettiin mahdollisuutta tuoteperheen sisäiseen modularisointiin, joka mahdollistaa automatisoituun tuotantoon suotuisien sarjakokojen kasvattamisen. Rakenteen ja tuotannon toteutukseen liittyen käsiteltiin automatisoituun hitsaustuotantoon liittyviä valmistusystävällisyyden mahdollisuuksia sekä haasteita, jotka on huomioitava case-tuotteen toteutuksessa. Lisäksi nimettiin tuoteyksityiskohtia, joiden kehittäminen parantaa tuotteen valmistusystävällisyyttä robotisoidussa hitsauksessa.



Pohdintaosiossa tuotiin esille valmistusystävälliseen suunnitteluun kehitettyjen apuneuvojen yhteiskäytön merkitys, sillä esitettyjen robottihitsauksen valmistusystävällisyyden erityispiirteiden huomioiminen ei yksinään riitä robottihitsattavan tuotteen valmistusystävälliseen suunnitteluun. Merkittävimpinä työssä saavutettuina tuloksina pidettiin kehitettyä arviointilomaketta, sekä case-tuotteelle tunnistettuja erityispiirteitä, joita voidaan hyödyntää jatkossa tuotteen robottihitsattavuuden kehittämiseen.

## 7 LÄHTEET

- Aalto, H. 2010, tuottavuuden parantaminen. Hitsaustekniikka-lehti, Nro 5/2010. S. 31 – 32.
- Aaltonen, K., Andersson, P. & Kauppinen, V. 1997, Levytyö- ja työvälinetekniikat, WSOY, Porvoo.
- Cary, H. B. & Helzer, S. C. 2005. Modern welding technology. 6th ed. Upper Saddle River (NJ): Pearson/Prentice Hall. 715 s.
- Chen, S., Chen, X. & Tarn, T. 2015. Robotic Welding, Intelligence and Automation: RWIA 2014. Cham: Springer International Publishing.
- Collin, J. & Saarelainen, A. 2016. Teollinen internet. Helsinki: Talentum. 333 s.
- Filippi, S. & Cristofolini, I. 2010. The Design Guidelines Collaborative Framework: A Design for Multi-X Method for Product Development. London: Springer London. 186 s.
- Demers, L. & Bernier, C. 2013. Flexible Fixturing for Robotic Welding. Assembly, 56(13), S. 34 – 37.
- Delfoi Channel, 2017. Delfoi ARC 4.0 – Fast Programming. [Kuvakaappaus videosta]. Saatavissa: <https://youtu.be/pH54tu-tDxQ?t=303>. [Viitattu 25.11.2019].
- Densey, P. 2019. “Hybrid Laser Arc Welding – Has Its Time Finally Arrived?”. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.lincolnelectric.com/assets/US/EN/literature/mc1129.pdf> [Viitattu 25.11.2019]
- Eskelinen, H., Karsikas, S. 2013. DFMA-OPAS – Valmistus- ja kokoonpanoystävällisen tuotteen suunnittelu. Lappeenranta University of technology: Lappeenranta. 115 s.

Glaser, A. 2009. Industrial robotics: How to implement the right system for your plant. New York: Industrial Press. 252 s.

Hiltunen, E., Purhonen, A. 2008. Robottihitsauksen laatu - monen tekijän summa. Hitsaustekniikka-lehti, Nro 4/2008. S. 33 – 36.

Hundal, M. S. 1997. Systematic mechanical designing: A cost and management perspective. New York: ASME Press. 561 s.

Jääskeläinen, E. 2011. Robotisoidun hitsauksen ja kokoonpanon integrointi. Hitsaustekniikka-lehti, Nro. 3/2011. S. 20 – 22

Kalpakjian, S. & Schmid, S.R. 2014, Manufacturing engineering and technology, 7th ed. in SI-units edn, Pearson, Singapore.

Keibler, C. 2003. "Are Your Parts Ready for Robotic Welding?". American Welding Society. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://app.aws.org/wj/2003/06/037/> [Viitattu 25.11.2019]

Kuhmonen, M. 2012, Taloutemme mooottori - Tuottavuuden jatkuva kasvu, Hitsaustekniikka-lehti, Nro 1/2012. S. 4 – 6.

Lahti, K. 2011, "Mekanisoitu hitsaus – Ai, mitä varten?". Hitsaustekniikka-lehti, Nro 2/2011. S. 2 – 4.

Lempiäinen, J. & Savolainen, J. 2003, Hyvin suunniteltu - puoliaksi valmistettu: lyhyt johdatus tuotteiden valmistettavuuteen ja kokoonpantavuuteen, Suomen Robotiikkayhdistys, Helsinki. 180 s.

Lepola, P. & Makkonen, M. 2005, Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. WSOY, Helsinki. 429 s.

- Lin, W. & Luo, H. 2015. Robotic Welding. Nee, A.Y.C. (toimittaja). Teoksessa: Handbook of Manufacturing engineering and Technology. Lontoo: Springer. S. 2403 – 2443.
- Niemi, E. & Kemppi, J. 1993, Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet, Painatuskeskus, Helsinki. 337 s.
- Nevasmaa, P., Karjalainen – Roikonen, P., Laukkanen, A., Kuoppala, J. Ultralujan, suorakarkaistun Optim 960 QC ohutlevyteräksen lujuus- ja sitkeysikätyminen. Hitsaustekniikka-lehti, Nro 3/2010. S. 4 – 15.
- Ovako. 2019. Ovakon terästen hitsaus. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: [http://ovako.se/PageFiles/49/Ovakon\\_terasten\\_hitsaus\\_15724.pdf](http://ovako.se/PageFiles/49/Ovakon_terasten_hitsaus_15724.pdf) [Viitattu 7.11.2019]
- Pires, J.N., Bölmsjö, G., Loureiro, A. 2006. Welding Robots: Technology, System Issues and Applications. Lontoo: Springer-Verlag. 180 s.
- Penttinen, R., Witting, L., Pullinen, A., Lindewald, C. & Kortelainen, O. 2004. Hitsauksen materiaalioppi. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. 295 s.
- Reisgen, U., Purrio, M., Buchholz, G. & Willms, K. 2014. Machine vision system for online weld pool observation of gas metal arc welding processes. Julkaisussa: Weld World, 58. S. 707 – 711.
- Salkinoja, H. 2010. Hitsauksen automatisoinnin ja mekanisoinnin tason optimointi. Hitsaustekniikka-lehti, Nro. 2/2010. S. 10 – 13.
- Salkinoja, H. 2009. Optimizing of intelligence level in welding. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- SFS-EN 1993-1-8. 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus. Suomen standardisoimisliitto SFS.

Shirinzadeh, B. 2002, Flexible fixturing for workpiece positioning and constraining, Teoksessa: Assembly Automation, vol. 22, nr. 2, S. 112 – 120.

Stenbacka, N. 2011, Hitsaustalous ja tuottavuus, Suomen hitsausteknillinen yhdistys, Helsinki. 159 s.

SSAB. 2019. Käytä erikoislujia teräksiä ja vähennä hiilidioksidipäästöjä – SSAB EcoUpgraded -konsepti. [SSAB verkkosivut] Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestava-tuotevalikoima/ecoupgraded> [Viitattu 7.11.2019]

Tarn, T., Zhou, C. & Chen, S. 2007. Robotic Welding, Intelligence and Automation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 562 s.

Tepponen, V. 2018. Teollinen internet hitsaustuotannossa. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Wolf N. (2011) Joining. Julkaisussa: Poprawe R. (Toimittaja) Tailored Light 2. RWTH edition. Springer, Berlin, Heidelberg

Zhang Z., Chen S. (2015). Data-Driven Feature Selection for Multisensory Quality Monitoring in Arc Welding. Tarn TJ., Chen SB., Chen XQ. (Toimittajat) Teoksessa: Robotic Welding, Intelligence and Automation. RWIA 2014. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 363. Springer, Cham. S. 401 – 410.

# LIITTEET

Liite I.

Robottihitsauksen valmistusystävällisyyden erityispiirteiden huomioimiseksi kehitetty arviointilomake.

Robottihitsauksen DFMA-erikoispiirteiden arviointilomake			
Kokoonpanon nimi:			pvm: _____
Dokumentin numero:			Laatija: _____
Tarkastuskysymys	Vastaus	Pisteytys	Huom!
Montako osaa hitsauskokoonpanossa on?			≤ 10 = +1 pist. > 10 = -1 pist.
Montako modulaarista ratkaisua hitsauskokoonpanossa on?			≥ 2 = +1 pist. < 2 = -1 pist.
Montako hitsaussuuntaa kokoonpanossa on?			≤ 5 = +1 pist. > 5 = -1 pist.
Voidaanko UHSS tai AR teräksien käytöllä lisätä tuotteen kilpailukykyä?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Sopiiko tuotteen sarjakoot automatisoituun tuotantoon? (Asetusaika/Hitsausaika)	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko rakenteen liitosten suunnittelussa huomioitu menetelmäkohtaiset suositukset?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Voidaanko kaikki hitsattavat osat kiinnittää kerralla tai voidaanko käyttää hitsauksen robottikokoonpanoa?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Voidaanko liitosten luoksepäästävydestä varmistua ilman hitsauksen simulointia?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko hitsauskokoonpanossa riittävästi tilaa kiinnittimille ja robotin tarttujille?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko suunnittelussa huomioitu ja hyödynnetty valmistukselliset modulaariset ratkaisut? (Konepajakohtaiset ohjeet)	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Voidaanko railonhaku ja seuranta toteuttaa kaikille hitseille? (luoksepäästävyys ja railopinnat), miten: _____	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko siltahitsien toteutus suunniteltu ja silloitushitsausohje määritetty?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko kiinnitys/valmistusepätkäkkösummautumiselle varattu jokin sallittu kohta? Mikä: _____	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Voidaanko robotin adaptiivisuuden avulla kompensoida mahdolliset muoto- ja mittavirheet?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko kappaleen kiinnitys /hitsausjigi suunniteltu robottihitsausta varten?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko osien suunnittelussa hyödynnetty itsepaikoittavia liitoksia?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko komponenttejen suunnittelussa huomioitu menetelmäkohtaisia suosituksia hitsataville muodoille?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Onko käytettävälle robotille ohjelmoitu kaikki käytettävät railotyypit?	<input type="checkbox"/> Kyllä <input type="checkbox"/> Ei		Kyllä = +1 pist. Ei = -1 pist.
Kokoonpanon yleisarviointi:	$\Sigma_{\text{kok}} =$		/ max 18