



# **ROBOTTIHITSAUSSOLUN KÄYTTÖASTEEN KASVATTAMINEN KESKIRAS- KAASSA KONEPAJASSA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2021

Juha Leppänen

Tarkastajat: Professori Timo Björk

TkT Tuomas Skriko

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Juha Leppänen

### **Robottihitsaussolun käyttöasteen kasvattaminen keskiraskaassa konepajassa**

Konetekniikan diplomityö

131 sivua, 53 kuvaa, 14 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Björk ja TkT Tuomas Skriko

Avainsanat: robotti, hitsaus, piensarja, kiinnitin, valmistettavuus

Robottihitsaus on tekniikan kehittymisen myötä siirtynyt tavallisiin konepajoihin. Suurissa ja keskikokoisissa sarjoissa robottihitsaus on tehokas prosessi, mutta piensarjoja valmistavissa yrityksissä kamppaillaan robottihitsauksen tehokkuuden kanssa. Tämän diplomityön aihe tuli suomalaiselta keskiraskaalta piensarjoja valmistavalta konepajalta, joka haluaa kasvattaa MIG/MAG-robottihitsaussolun käyttöastetta. Työssä selvitettiin syitä käyttöasteen nykytilaan ja mitä yrityksen olisi tehtävä omassa toiminnassaan, jotta suurempi osa tuotteista hitsattaisiin robotilla. Lisäksi tutkittiin millainen on robottihitsaukseen hyvin soveltuva terästuote hitsattavuuden, valmistuksen ja kiinnitinsuunnittelun näkökulmasta, sekä millainen kiinnitintekniikka olisi paras pienissä sarjoissa.

Tutkimuskysymyksiin vastattiin kirjallisuustutkimuksen, systemaattisen suunnitteluprosessin ja simuloinnin menetelmiä käyttäen, jotka muodostavat menetelmätriangulaation. Kirjallisuustutkimuksella ja systemaattisella suunnitteluprosessilla kartoitettiin piirteitä, joita hyvin piensarjatuotantoon soveltuvilla kiinnittimillä ja tuotteilla on. Systemaattisen suunnitteluprosessin ja simuloinnin avulla selvitettiin kiinnittimen ja tuotteen rakenteen suunnittelun vaikutusta tuotettavuuteen. Simuloinnin ja kirjallisuustutkimuksen avulla tutkittiin, kuinka valmistettavuutta voidaan parantaa valmistusvälineillä.

Tuloksena saatiin toimenpidelistaus tarvittavista toimista käyttöasteen kasvattamiseksi, sekä muodostettiin esitys yleiskäyttöisestä loppuhitsauskiinnittimestä, jossa kappaleen kiinnitys tapahtuu kartioruuveilla ja tätä kiinnitintä varten muokatuista robottihitsattavista kokoonpanoista. Toimenpidelistaus on suoraan yleistettävissä piensarjatuotantoon, jossa samantyyppisiä tuotteita hitsataan robotilla tai jossa pohditaan robotti-investointia. Lisätutkimusta tarvitaan työkappaleen kiinnitysmenetelmistä, sekä tavanomaisesti nosturilla käsiteltävistä osista koostuvien kokoonpanojen jigittömästä hitsauksesta.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Juha Leppänen

### **Increasing the utilization rate of a robot welding cell in a medium-heavy machine shop**

Master's thesis

2021

131 pages, 53 figures, 14 tables and 3 appendices

Examiners: Professor Timo Björk and D.Sc Tuomas Skriko

Keywords: robot, welding, small series, fixture, manufacturability

With the development of technology, robot welding has been introduced in ordinary machine shops. In large and medium-sized series, robot welding is an efficient process, but companies manufacturing small series struggle with the efficiency of robot welding. The subject of this thesis came from a Finnish medium-heavy machine shop, which manufactures small series and wants to increase the utilization rate of the MIG/MAG robot welding cell. The work investigated the reasons for the current state of utilization and what the company should do in its own operations in order for more products to be welded with a robot. In addition, a steel product well suited for robot welding was studied in terms of weldability, fabrication and fixture design, as well as what kind of fastening method would be best in small series.

Research questions were answered through literature research, systematic design process and simulation, which form the method triangulation. A literature review and a systematic design process were used to research the features of fixtures and products suitable for small series production. Using a systematic design process and simulation, the effect of fixture and product structure design on productivity was investigated. Using simulation and literature research, it was investigated how manufacturability can be improved with different tools.

As a result, a list of measures required to increase the utilization rate was obtained, as well as a representation of a general-purpose welding fixture in which the part is fastened with conical screws and the robot-weldable assemblies modified for this fixture. The list of measures can be directly generalized to small series production, where products of the same type are welded by a robot or where a robot investment is considered. Further research is needed into the methods of fastening the workpiece, as well as the jigless welding of assemblies consisting of parts normally handled by a crane.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

$A$	hitsin poikkipinta-ala	[m <sup>2</sup> , mm <sup>2</sup> ]
$a$	pienahitsin a-mitta	[mm]
$e$	kaariaikasuhde	
$i$	ilmarako	[mm]
$L$	hitsin pituus	[m]
$M$	hitsiainemäärä	[kg, kg/m]
$n$	kappalemäärä	
$s$	levynpaksuus	[mm]
$T$	hitsiaineentuotto	[kg/h]
$t_{ap}$	apuaika	[s]
$t_{as}$	asetusaika	[s]
$t_{ka}$	kaariaika	[s]
$t_{kä}$	käsittelyaika	[s]
$t_{te}$	tehtävääika	[s]
$t_{si}$	kaarisivuaika	[s]
$t_{va}$	vaiheaika	[s]
$v_l$	langansyöttönopeus	[m/min]

### Kreikkalaiset

$\alpha$	railokulma	[°]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

Lyhenteet

C_DFMA	Conceptual Design For Manufacturing and Assembly
DFA	Design For Assembly
DFM	Design For Manufacturing
DOE	Design Of Experiments
FEM	Finite Element Method
FMS	Flexible Manufacturing System
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
QFD	Quality Function Deployment
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
TIG	Tungsten Inert Gas
TS	Tuotantosuunnitelma

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Tutkimuksen tausta .....	9
1.2	Tutkimusongelma ja -kysymykset .....	9
1.3	Tutkimuksen tavoite.....	10
1.4	Tutkimuksen rajaus .....	10
1.5	Tutkimusmenetelmät .....	11
2	MIG/MAG-hitsaus konepajatuotannossa .....	13
2.1	MIG/MAG-mekanisointi.....	18
2.2	MIG/MAG-robotisointi.....	20
2.2.1	Robottihitsattavan tuotteen ominaisuuksia .....	23
2.2.2	Osavalmistus .....	25
2.2.3	Ohjelmointi .....	27
2.2.4	Kappaleenkäsittely .....	27
2.2.5	Railonhaku ja -seuranta .....	29
2.2.6	Hitsauskiinnittimet.....	33
2.2.7	Jigitön hitsaus .....	40
3	Hitsauksen tunnusluvut ja kustannusten muodostuminen.....	43
4	Hitsaava konepaja.....	51
4.1	Konepajan tuotantojärjestelmä.....	51
4.2	Työnkulku ja työaika.....	54
4.3	Tuotteen variointi, standardisointi ja modulointi .....	57
4.4	Tuotettavuus .....	58
5	Case-tutkimus .....	66
5.1	Robottihitsattavan tuotteen valinta.....	67
5.1.1	Robottihitsattavuuden arviointi.....	72
5.1.2	Projektitoimitusten tuotteet.....	76

5.1.3	Varaosatuotteet .....	82
5.2	Tuotteiden muokkaus .....	83
5.3	Kiinnitinsuunnittelu.....	90
5.4	Tuotantoaikojen määrittely ja hitsauksen simulointi .....	98
6	Tulokset .....	100
6.1	Toimenpidelistaus .....	101
6.2	Tuotteiden uudelleensuunnittelun vaikutukset.....	104
6.3	Käyttöasteen kasvu.....	108
7	Pohdinta.....	110
7.1	Tuotteen valinta ja uudelleensuunnittelu .....	111
7.2	Kiinnitinsuunnittelu.....	112
7.3	Tutkimuksen sensitiivisyys .....	113
8	Johtopäätökset .....	115
9	Yhteenveto.....	117
	Lähteet .....	119

## Liitteet

Liite 1. Huomiot yrityksen tuotannosta

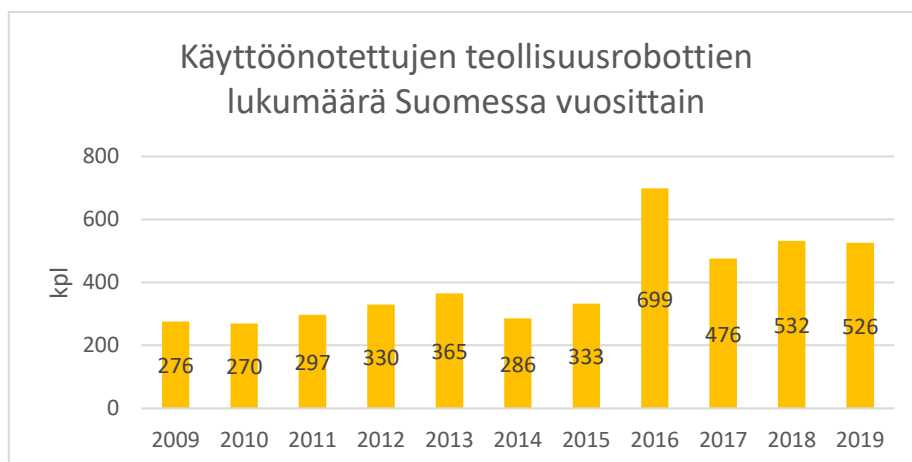
Liite 2. Toimenpidelistaus jaoteltuna tuotantojärjestelmän ja sen osien mukaisesti

Liite 3: Robottihitsattavuuden arviointitaulukko

# 1 Johdanto

Monilla teollisuuden aloilla hitsaus on yksi valmistuksen avainprosesseista. Huomattava määrä hitsaustyötä on siirtynyt pohjoismaista halvemmän hintatason maihin. Osaltaan tuotannon siirtojen taustalla voi olla halu päästä lähemmäs loppumarkkinoita, mutta pääasiallinen tavoite on alentaa työnteon kustannuksia. Tämä johtaa siihen, että tuotannon pitämiseksi täällä, sitä täytyy automatisoida työkustannusten osuuden pienentämiseksi. Samalla täytyy pitää yllä korkea laatuaso. (Stenbacka 2011, s. 27–37.)

Suomessa teollisuusrobottien käyttöönotot ovat nousseet 2010-luvulla, mutta kehitys robottien määrässä on kärkimaiden takana ja esimerkiksi robotitiheys on vain hieman yli puolet Ruotsin vastaavasta arvosta. Jos autoteollisuuden vaikutus tilastoista poistetaan, niin Suomen asema paranee suhteessa muihin maihin. Kuvassa 1 on esitetty Suomessa asennettujen teollisuusrobottien määrät 2010-luvulla. Lempiäisen mukaan vasta viime vuosien yli 500 robottiyksikön määrät ovat uudistaneet tuotantotekniikkaa, kun pienemmät määrät riittävät korvaamaan vain käytöstä poistuvia laitteita. Vuoden 2019 526 käyttöönotetusta robotista 69 meni hitsaussovelluksiin ja loput 457 kappaleenkäsittelyyn. (Lempiäinen 2020, s. 13–14.)



Kuva 1. Käyttöönotetut teollisuusrobotit Suomessa 2010-luvulla (mukaihen Lempiäinen 2020, s. 13).



## 1.1 Tutkimuksen tausta

Tämän diplomityön aihe tuli suomalaiselta keskiraskaalta konepajalta, jolla on halu nostaa robottihitsaussolun käyttöastetta. Investointi hitsausrobottiin on tehty vuosia aiemmin, eikä käyttöastetta ole vielä saatu nostettua riittävälle tasolle. Yrityksessä valmistetaan teollisuuden investointituotteita ja tuotteet ovat suurelta osin asiakaskohtaisesti räätälöityjä yksittäiskappaleita hitsattavien sarjojen ollessa pääasiassa 5–15 kpl. Vuoden aikana valmistetaan yhtä tuotetta enimmillään muutamia sarjoja ja hitsattavan kappaleen vuosittaiset hitsausmäärät ovat suurimmillaan noin 100 kpl.

## 1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Ongelmana kiteytettynä on, että robottihitsaussolun käyttöaste on liian matala. Monessa aiheeseen liittyvässä tutkimuksessa ongelmana on, että tulokset ovat haasteellisia soveltaa toiseen yritykseen tuotteiden, laitteiden ja sarjakokojen erilaisuudesta johtuen. Toisaalta monessa tutkimuksessa keskitytään yhteen osa-alueeseen, jolloin tuotannon kokonaisoptimointi ja mahdolliset tutkimuksen ulkopuoliset tuotannon ongelmat jäävät pienemmälle huomiolle. Työn tekijälle on tullut useasti ilmi, että pienille sarjoille, joita yleisesti suomalaisessa teollisuudessa tehdään, ei ole riittävän tehokasta kiinnitintekniikkaa, eikä yksiselitteistä hyvin toimivaa tapaa toteuttaa tuotteen robottihitsausta.

Tutkimusongelmasta johdettu päätutkimuskysymys on, miksi robotilla ei ole tarpeeksi hitsattavaa?

Alatutkimuskysymykset:

- Mitä toimenpiteitä yrityksen olisi tehtävä omassa toiminnassaan, jotta tuotteista suurempi osa hitsattaisiin robotilla?
- Millaisia ominaisuuksia on MIG/MAG-robottihitsaukseen hyvin soveltuvalla terästuotteella hitsattavuuden, valmistuksen kannattavuuden ja kiinnitinsuunnittelun näkökulmasta?

- Millainen kiinnitintekniikka soveltuu pieniin sarjoihin parhaiten, vai onko jigiton hitsaus paras ratkaisu?

### 1.3 Tutkimuksen tavoite

Työn tavoitteena on muodostaa toimenpidelistaus tarvittavista toimista sekä periaatteet robottihitsattavien kappaleiden ja kiinnittimien suunnittelusta, jotka toteuttamalla yrityksen hitsaustoiminta saadaan nostettua tavoitetasolle. Lyhyellä aikavälillä, seuraavan vuoden aikana, robottisolun käyttöasteen tulisi nousta 25 prosenttiyksikköä ja pidemmällä, parin vuoden aikavälillä 50 prosenttiyksikköä.

### 1.4 Tutkimuksen rajaus

Työssä käsitellään MIG/MAG-hitsausprosessia ja kappaleenkäsittelijöinä ovat jigittömän hitsauksen kirjallisuustutkimusta lukuun ottamatta grillimäinen yksiakselinen servopöytä sekä kaksiakselinen puolta vaihtava L-pöytä. Hitsausrobotti on yrityksen käytössä oleva noin 5 vuotta vanha malli rajoittaen tutkimusta sen ominaisuuksien ja mahdollisuuksien puolesta. Työssä käsitellään yrityksen jo olemassa olevia tuotteita, joiden materiaalina on S355, S235 tai E470 teräs ja ne koostuvat pääsääntöisesti levyistä, ainesputkista sekä rakenneputkista. Hitsattavan kappaleen kehittämisestä ulos rajataan hitsien mitan optimointi sekä railogeometrioiden muokkaus ja kappaleen suurin koko rajataan kappaleenkäsittelijän rajoitusten mukaan ollen lieriö, joka on halkaisijaltaan 3 metriä ja pituudeltaan 5 metriä. Suurin sallittu massa kappaleella on 2000 kg. Työn tilaajan toimintaympäristö rajaa tutkimusta niin, että se asettaa tietyn näkökulman tuotteiston, tuotantotavan sekä tuotantoketjun ja alihankintaverkoston suhteen.

Yrityksen toiminnan tarkastelussa keskitytään ensisijaisesti robottihitsattavien tuotteiden tunnistamiseen, tuoteperheiden muodostamiseen, tuotteiden modulointiin, robottihitsattavien tuotteiden merkintään tuotannon järjestelmissä ja tiedonkulkuun eri osastojen välillä. Hyvin robottihitsaukseen soveltuvaa tuotetta arvioidaan hitsattavuuden, robottihitsauksen kannattavuuden ja kiinnitinsuunnittelun näkökulmasta.

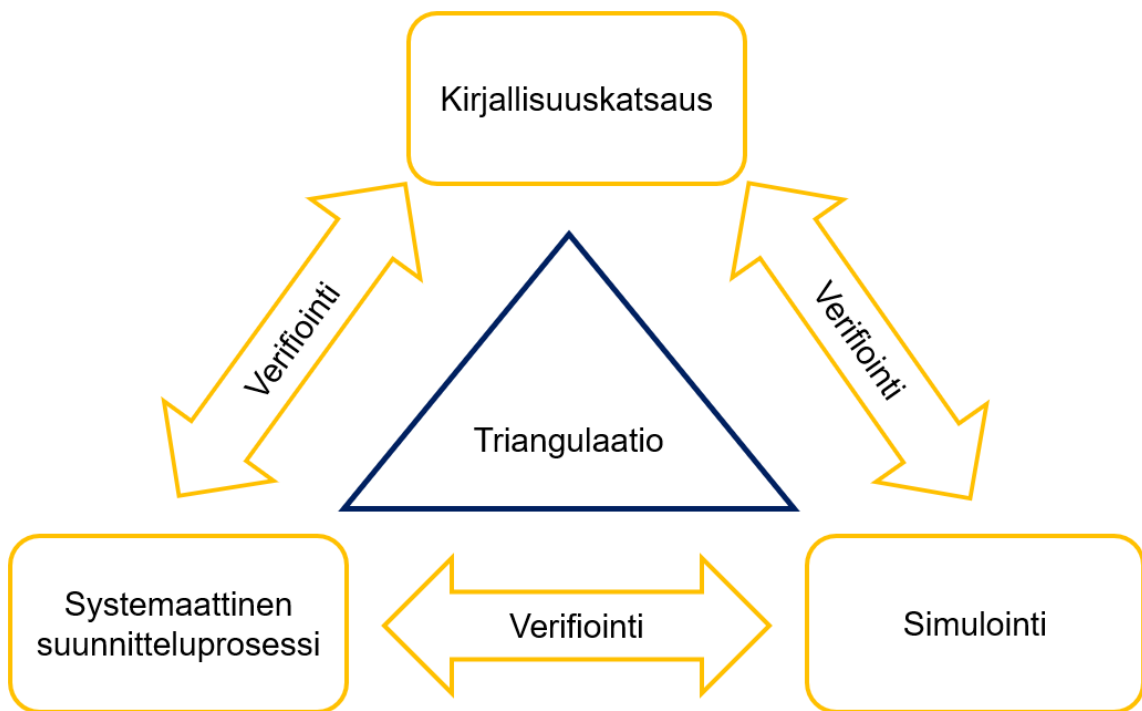
## 1.5 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen viitekehyksenä on robottihitsaustoiminta ja työ koostuu kirjallisuustutkimuksesta sekä case-osuudesta. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on tukea työn käytännön osuutta. Kirjallisuustutkimuksessa selvitetään menetelmiä robottihitsattavien tuotteiden sekä kiinnittimien suunnitteluun ja robottihitsattavien tuotteiden tunnistamiseen sekä niiden ominaisuuksiin. Tutkimuksessa selvitetään myös jigitöiden hitsauksen nykytilan mahdollisuuksia ja soveltuvuutta yrityksen tuotantoon.

Kirjallisuustutkimuksen aineisto sisältää tieteellisiä kirjoja, artikkeleita ja konferenssipapereita. Aineisto on erityisesti jigitöntä hitsausta käsiteltäessä riittävän uutta ottaen huomioon aineiston saatavuuden. Osa lähteistä on kaupallisia ja näitä on käytetty pääasiassa asioiden esittämiseen kuvamuodossa.

Case-osuudessa konepajan tuotantoa käydään läpi alkaen suunnittelusta loppuen tuotteen valmistumiseen. Yrityksen nykyisten robottihitsattavien tuotteiden tuotannon vaiheista kerätään tietoa ja pyritään etsimään kehityksen kohteita. Yrityksen tuotteistosta etsitään robottihitsaukseen soveltuvia kappaleita projekti- ja varaosien joukosta. Hitsattavien kappaleiden valmistusmäärät arvioidaan niin, että varaosien kohdalla tarkastellaan kuluneen vuoden aikana myytyjä varaosia ja projektikohtaisia osia arvioidaan tulevan vuoden ajanjakson aikana tuotantoon tulevien toimitusten perusteella. Robottihitsattavat tuotteet valitaan vaatimuslistaa käyttäen ja kiinnitinsuunnittelu suoritetaan kirjallisuustutkimukseen pohjautuen. Kiinnitinratkaisun suunnittelu perustuu kirjallisuustutkimukseen ja siinä huomioidaan myös kaupalliset kiinnitinratkaisut. Kirjallisuustutkimukseen ja ehdotettuun kiinnitinratkaisuun perustuen sopivimmat yrityksen tuotteet muokataan robottihitsausta varten.

Kirjallisuustutkimus, systemaattinen suunnitteluprosessi yhdessä simuloinnin kanssa muodostavat kuvan 2 menetelmätriangulaation, jossa itsenäisten osa-alueiden tuloksia vertaamalla todennetaan tutkimuksen tulokset. Saatujen tulosten luotettavuus vahvistetaan vertaamalla niitä kirjallisuuskatsauksessa löydettyihin vastaavien tutkimusten tuloksiin.



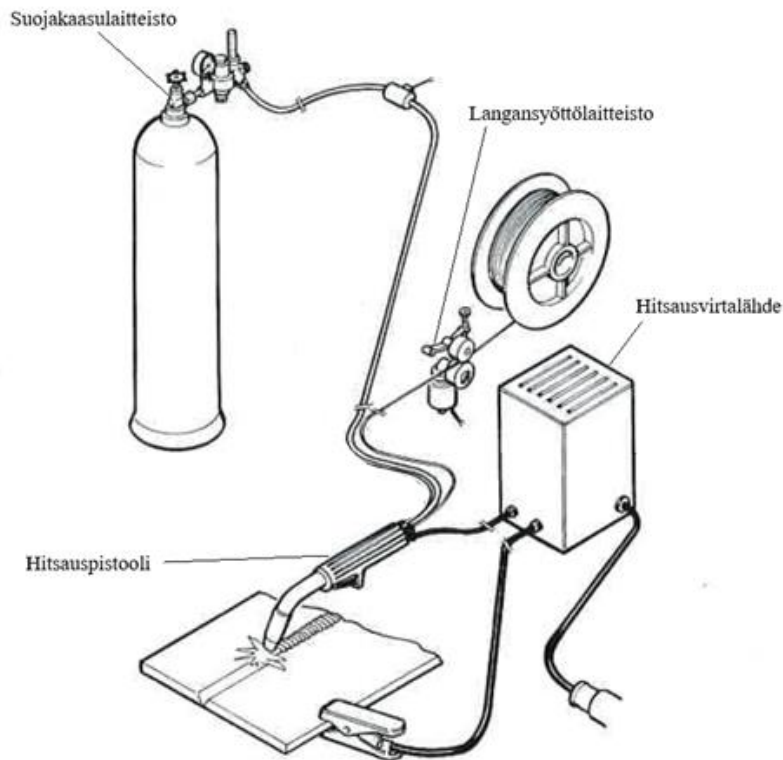
Kuva 2. Tutkimuksen toteutus menetelmätriangulaatioon perustuen.

## 2 MIG/MAG-hitsaus konepajatuotannossa

Hitsausprosessit jaetaan kahteen eri pääryhmään, sulahitsaukseen ja puristushitsaukseen. Sulahitsauksessa kappaleet liitetään kuumentamalla liitoskohtien pinnat sulaan lämpötilaan, jolloin ne sulautuvat yhteen ja jäähtyessään muodostavat kiinteän liitoksen. Sulahitsaus voidaan suorittaa lisäaineella tai ilman. (Lepola & Makkonen 2005, s. 8.)

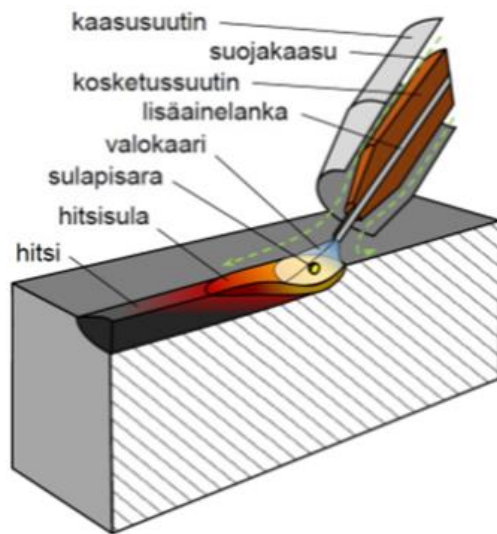
MIG/MAG-hitsaus kuuluu sulahitsaukseen ja siellä kaasukaarihitsausprosesseihin. Lyhenne MIG on lyhenne sanoista Metal-arc, Inert Gas eli metallikaari, inertti kaasu. MAG on lyhenne sanoista Metal-arc, Active Gas eli metallikaari, aktiivinen kaasu. MIG/MAG-hitsaus on puoliautomaattinen hitsausprosessi, jossa suojakaasulla suojatussa kohdassa lisäainelangan kärjen ja perusaineen välillä palaa valokaari. Lisäainelankaa syötetään automaattisesti lisää samalla kun valokaari sulattaa lisä- sekä perusainetta. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 71.)

MIG/MAG-hitsaus on monipuolinen ja yleisesti käytetty menetelmä. Laitteisto on hitsaajalle suhteellisen helppo käyttää ja sula sekä valokaari ovat hitsauksen aikana hyvin näkyvissä. (Hobart Institute of Welding Technology 2012, s. 1.) Kuvassa 3 on esitetty MIG/MAG-hitsauslaitteiston pääosat, jotka ovat hitsausvirtalähde, langansyöttölaitteisto, suojakaasulaitteisto ja hitsauspistooli (Lepola & Ylikangas 2016, s. 71).



Kuva 3. MIG/MAG-hitsauslaitteiston pääkomponentit (mukaillen Lepola & Ylikangas 2016, s. 71).

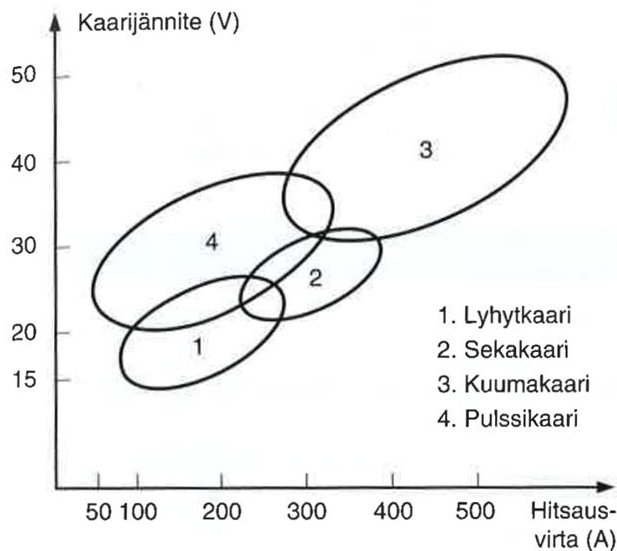
MIG/MAG-hitsauksen periaate esitetään kuvassa 4. Valokaari muodostuu, kun virta kulkee työkappaleen ja elektrodin välillä ionisoituneen kaasun läpi. Elektrodina toimiva lisäainelanka kulkee valokaaren läpi hitsisulaan, joka lisää lämmöntuontia verrattuna moneen muuhun kaarihitsausprossiin. Hitsaus alkaa, kun suojakaasulla suojatussa tilassa lisäainelanka koskettaa perusainetta ja valokaari syttyy. Hitsisula muodostuu ja hitsauspoltinta liikutetaan liitosta pitkin, jolloin liitospinnat sulavat yhteen lisäaineen avulla. Hitsisula jähmettyy kaaren mentyä kauemmas ja kiinteä liitos muodostuu. (Hobart Institute of Welding Technology 2012, s. 3; Lepola & Ylikangas 2016, s. 71–76.)



Kuva 4. MIG/MAG-prosessin periaate (Ionix 2021).

Valokaaren tyyppiin ja lisäaineen siirtymiseen voidaan vaikuttaa suojakaasun valinnalla sekä hitsausparametrejä muuttamalla. Kuvassa 5 esitetään MIG/MAG-hitsauksen neljän eri kaarityypin sijoittuminen kaarijännitteen ja hitsausvirran suhteen, jotka ovat: (Lepola & Ylikangas 2016, s. 81–82.)

- lyhytkaari
- sekakaari
- kuumakaari
- pulssikaari.

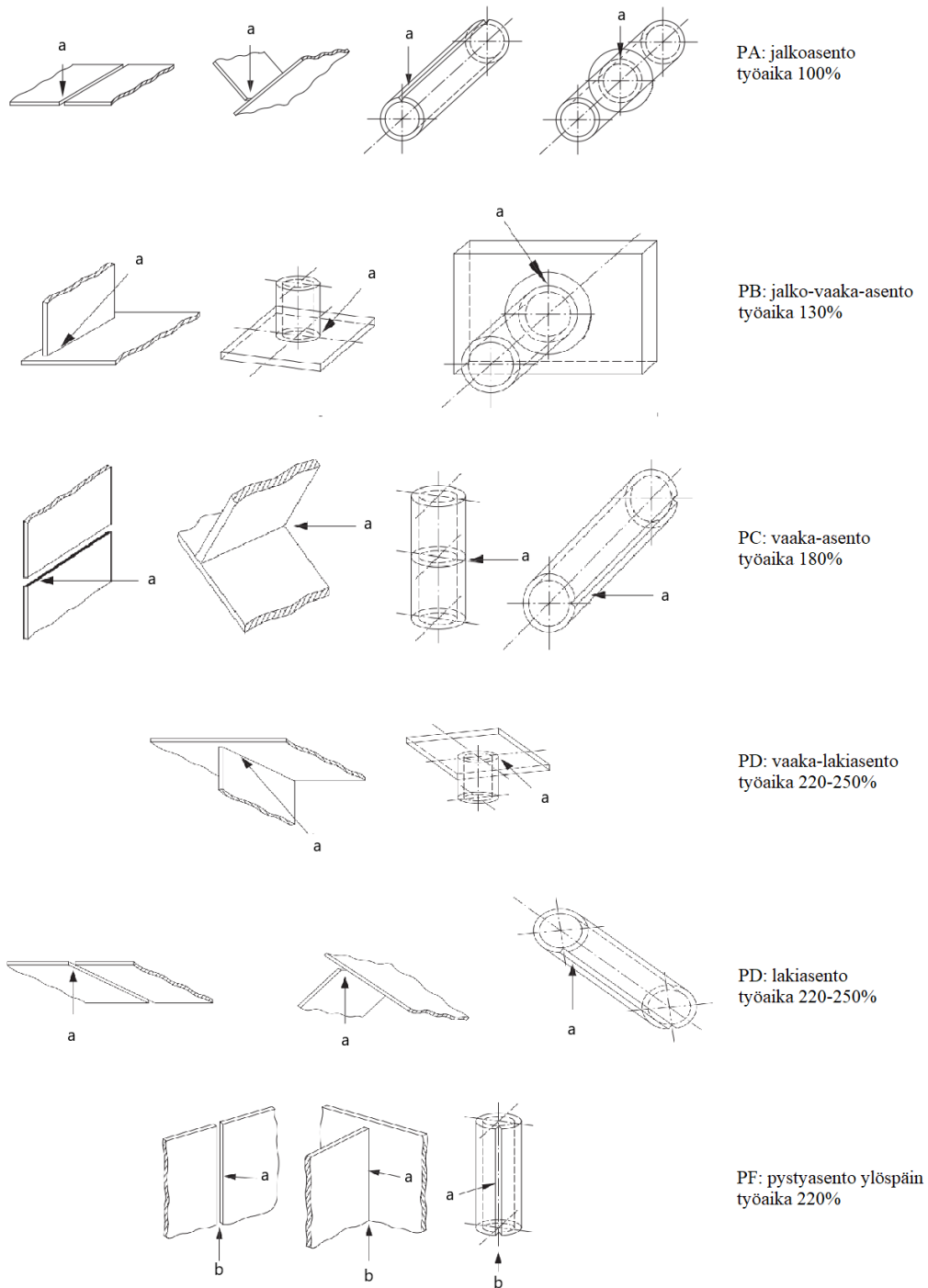


Kuva 5. Valokaarityyppien sijoittuminen hitsausvirran ja kaarijännitteen suhteen (Lepola & Ylikangas 2016, s. 81).

Lisäainelanka valitaan usein perusaineen kemiallista koostumusta vastaavaksi. Joissain tapauksissa lisäainelangan seostuksella voidaan kompensoida hitsaustapahtuman aiheuttamaa häviötä hitsissä. Sen lisäksi, että suojakaasua tarvitaan hitsisulan suojaamiseksi, suojakaasun valinnalla voidaan vaikuttaa huomattavasti mm. valokaaren ominaisuuksiin, hitsausnopeuteen, tunkeumaan ja hitsipalon muotoon. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 83; O'Brien 2004, s. 172–173.)

Kuvassa 6 esitetään päittäis- ja pienahitsien perushitsausasennot. Nuoli a osoittaa hitsin pinnan ja siten hitsausasennon. Nuoli b osoittaa hitsaussuunnan liitosta pitkin. Hitsausasennon yhteydessä esitetään hitsausasennon vaikutus hitsausaikaan, jossa jalkoasento tuottavimpana hitsausasentona on arvolla 100 %. Kuvasta voi todeta, että hitsausaika kasvaa yli kaksinkertaiseksi, kun siirrytään hitsaamaan pysty- tai lakiasentoja. Piironen 2013, s. 43).





Kuva 6. Hitsausasennot ja niiden tunnuksat sekä niiden vaikutukset työaikaan (mukaiillen SFS-EN ISO 6947, s. 8–9; Piironen 2013, s. 43).

MIG/MAG-prosessilla on monia hyviä puolia verrattuna muihin hitsausprosesseihin, joka tekee siitä hyvin soveltuvan korkeatuottoisiin hitsausmenetelmiin sekä robotisoituun hit-saukseen (Hobart Institute of Welding Technology 2012, s. 2):

- ainut menetelmä, jossa sulatettavalla elektrodilla voidaan hitsata suurinta osaa kuppallisista metalleista
- aiheuttaa vain vähän roiskeita
- hyvät asentohitsausominaisuudet
- valokaari ja sula ovat hyvin näkyvissä
- sopivalla lisäainelangalla vain vähän tai ei ollenkaan kuonaa
- pieni läpimittainen elektrodi mahdollistaa suuret virtatiheydet
- lähes kaikki lisäaine päätyy hitsiin
- hyvä lisäaineen tuotto verrattuna TIG (Tungsten Inert Gas) ja SMAW (Shielded Metal Arc Welding) prosesseihin
- kuumakaarialueella SMAW-prosessia parempi tunkeuma.

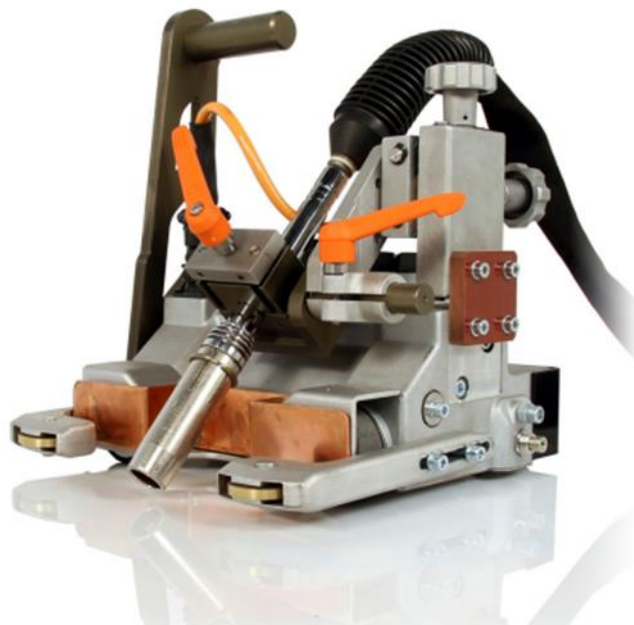
Prosessin heikkouksia (Hobart Institute of Welding Technology 2012, s. 2):

- monimutkaisempi ja kalliimpi laitteisto verrattuna SMAW-prosessiin
- kaasusuojauksen heikkous tuulisissa olosuhteissa
- huonompi ulottuma verrattuna SMAW-prosessiin
- suhteellisen korkeat lämmön ja kaaren säteilyn tasot.

## 2.1 MIG/MAG-mekanisointi

MIG/MAG-prosessi soveltuu hyvin myös mekanisoituun hitsaukseen. Tämä voidaan päätellä lukuisista markkinoilla olevista hitsauspolttimen kuljetinlaitteista. Kevytmekanisointilaitteet ovat järkevä vaihtoehto erityisesti suurten, hankalasti siirrettävien kappaleiden hitsauksessa. Markkinoilla on kevyitä kiskoilla liikkuvia kuljettimia sekä akkukäyttöisiä magneeteilla varustettuja asentohitsaukseen soveltuvia laitteita (kuva 7). Laitteiden käytettävyys on parantunut jatkuvasti ja asetusajat ovat lyhentyneet aikaisempiin malleihin verrattuna. Mekanisoidussa hitsauksessa hitsin laatu on tasaisempaa kuin käsinhitsauksessa ja

hitsiaineen tuotto paranee. Nykyisissä laitteissa on laajat polttimen säätömahdollisuudet ja kehittyneimmissä laitteissa voidaan ottaa käyttöön polttimen levitysliike, jolloin asentohitsaus mahdollistuu piena- ja päittäisliitoksissa. Kevytmekanisoinnilla saadaan hitsausaikaa pienennettyä sopivissa olosuhteissa jopa kuudesosaan käsinhitsaukseen tarvittavasta ajasta asetusajat huomioituna. (Haula 2008, s. 2–6.)



Kuva 7. Magtrac F 61 hitsauskuljetin (Kemppi 2021, s. 6).

Markkinoilla on olemassa myös hitsattavaan kappaleeseen liittyviä MIG/MAG-mekanisointilaitteita, kuten rullastoja ja pyörityspöytiä, joita käytetään kappaleen liikuttamiseen hitsauksen aikana ja näin mekanisoimaan hitsausta. Hitsauslaitteiston liikuttamiseen tarkoitettut kevytmechanisointilaitetyypit voidaan jakaa neljään osaan (Haula 2008, s. 5–6):

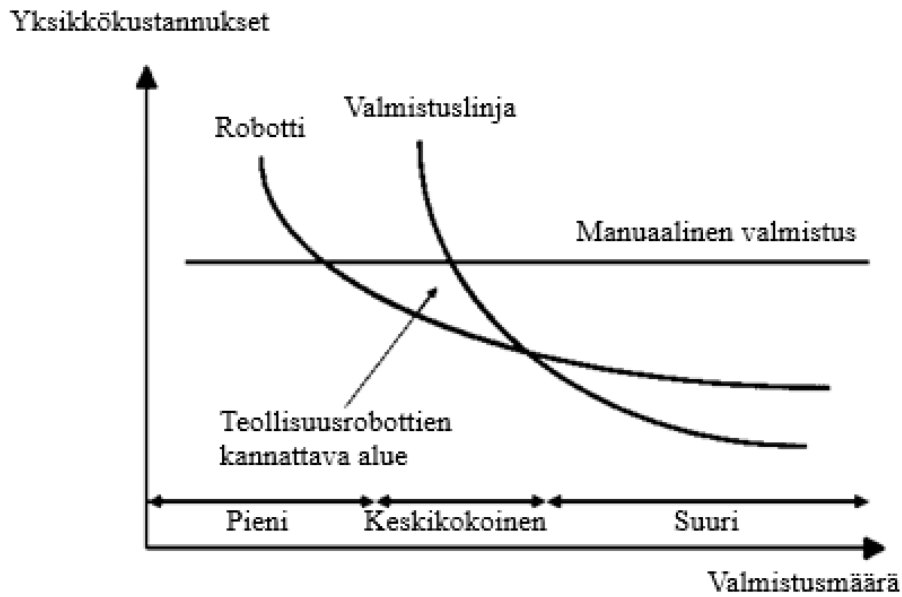
- pyörillä liikkuvat kuljettimet eli ns. hitsaustraktorit
- kiskoilla kulkevat hitsauskuljettimet
- työkappaleeseen kiinnitettävät mekanisointilaitteet
- putkiyhteiden, holkkien ja ympyrämäisten pintojen mekanisointilaitteet.

Mekanisoidussa hitsauksessa hitsaajasta tulee operaattori. Hitsaaja ohjaa laitteen toimintaa, mutta kone tekee itse hitsauksen. Hitsaaja on vähemmän altis hitsaushuuruille, hankalille työasennoille ja yksitoikkoisuudelle. Hitsaajan vireystila pysyy parempana ja tällä on vaikutusta myös tapaturmien esiintyvyyteen. (Haula 2008, s. 2.) Hitsauksen mekanisoinnin onnistuminen vaatii asian huomioimista koko tuotannossa suunnittelusta lähtien. Liitostyypit täytyy olla suunniteltu mekanisointi mahdollistaen, railosovitteet täytyy olla hyvät ja viisteet täytyy olla hyvin valmistettuja. Myös laitteiston täytyy olla hyvin huollettu, jotta jälki on tasalaatuista ja toiminta häiriötöntä. (Haula 2008, s. 3; Weman 2012, s. 157–158.)

## 2.2 MIG/MAG-robotisointi

Standardin SFS-EN 10218-1 mukaan teollisuusrobotti on kiinteästi asennettu tai liikkuva teollisuuden monikäyttöinen automaattisesti toimiva käsittelylaite, joka on varustettu vähintään kolmella ohjelmoitavalla akselilla (SFS-EN 10218-1, s. 12). Teollisuusrobotti koostuu usein kuudesta akselista, joka on alin akselien lukumäärä, jolla työkalu pystytään liikuttamaan mielivaltaiseen asentoon. Robotteja käytetään teollisuudessa esimerkiksi maalaukseen, hitsaukseen ja kappaleenkäsittelyyn. (Bajd, Mihelj, Lenarcic, Stanovnik & Munih 2010, s. 3–7.)

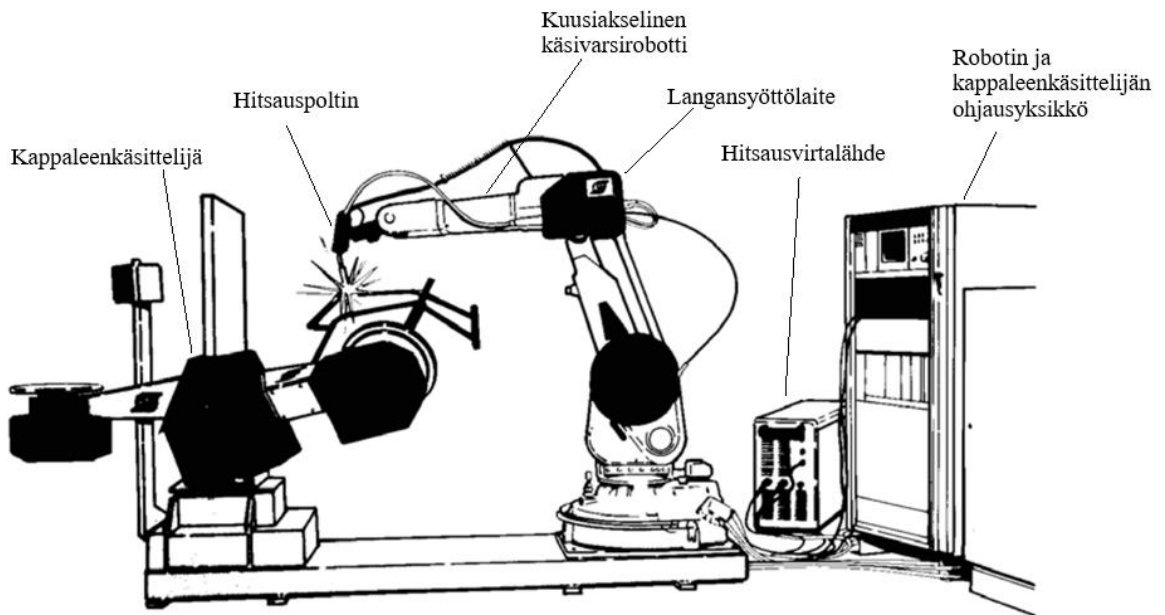
Hitsaus on yksi teollisuusrobottien yleisimmistä käyttökohteista. Robotteja käytettiin aluksi lähinnä autoteollisuudessa pistehitsauksessa, mutta mm. anturoinnin ja ohjelmoinnin kehittymisen myötä robottihitsaus on yleistynyt myös pienemmissä tuotantomäärissä ja eri hitsausprosesseilla (Lin & Luo 2015, s. 2404). Hitsausrobotisolu on taloudellisesti kannattava tuotantomäärissä 1000–60000 kappaletta vuodessa. Alle 1000 kappaleen tuotannossa uudelleenohjelmointi ja kiinnittimien valmistus ei välttämättä ole kannattavaa ja yli 60000 kappaleen tuotantomäärissä hienostuneempi useamman hitsin samaan aikaan hitsaava automaatiikka voi olla tuottavampi. Samansuuntainen kannattavuusalue voidaan nähdä kuvassa 8, kun puhutaan yleisesti teollisuusroboteista. Hitsausrobotisolun kannattava tuotantomäärä on kuitenkin tapauskohtainen ja joustavaa tuotantoautomaatiota sekä etäohjelmointia hyödyntämällä pienemmätkin tuotantomäärät voivat olla kannattavia. (Weman 2012, s. 162.)



Kuva 8. Teollisuusrobottien taloudellisesti parhaiten kannattava alue (Pires, Loureiro & Bölmsjö 2006, s. 2).

Robottien käyttöä hitsauksessa tuottavuuden lisäksi puoltavat toistettavuus ja tasainen laatu. Käsinhitsauksen laatu vaihtelee ajan mittaan, mutta robotti toistaa hitsit samanlaisena edellyttäen, että olosuhteet ovat vakiot. Hitsausrobotti tekee välittömästi halutun laatutason hitsin, mutta laatutason täytyy panostaa ennen itse hitsausprosessia. Robottihitsauksessa tuotteen hitsausohjelmien huolellisen ohjelmoinnin ja tuotannon ylös ajon jälkeen riittää usein osien, raaka-aineiden ja silloitushitsauksen laadun valvonta. Vaikeissa, korkean laatutason hitsejä vaativissa kohteissa, ammattihitsaaja päihittää yhä usein robotin. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 33–35.)

Tyypillisen MIG/MAG-robottihitsausaseman (kuva 9) pääkomponentit ovat kuusiakselinen käsivarsirobotti, hitsauspoltin, langansyöttölaite, kappaleenkäsittelijä, hitsausvirtalähde oheislaitteineen ja robotin sekä kappaleenkäsittelijän ohjausyksikkö. (Lin & Luo 2015, s. 2404).



Kuva 9. Robottihitsaussolun pääkomponentit (Weman 2012, s. 162).

Hitsauksen robotisoinnin etuja verrattuna käsinhitsaukseen (Weman 2012, s. 162):

- korkeampi tuottavuus
- hitsin laatu on tasaisempi
- henkilöstön olot paranevat
- liittyvien toimintojen organisointi ja parantunut hallinta parantaa yleistä tehokkuutta.

Robotisoinnin haasteet (Weman 2012, s. 162):

- koulutuksen tarve
- toleranssien tiukentuminen
- osien uudelleensuunnittelun tarve robottiystävällisemmäksi.

Robottihitsauksessa huomiota täytyy kiinnittää myös silloitusvaiheeseen ja toimenpiteistä on syytä tehdä kunnolliset ohjeet, jotta silloitus tehdään aina laadukkaasti ja tasalaatuisesti. Ilman ohjeita silloituksen laatu voi heiketä, ja lopputuotteen laatu ei yllä toivotulle tasolle. Lisäksi kunnolliset ohjeet helpottavat uusien työntekijöiden kouluttamista. Silloitusvaiheessa on myös järkevää hitsata tietynlaiset piirteet, kuten robotille haastavat pienisäteiset ulkonurkat. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 34.)

Robottihitsauksen onnistumisen kannalta oleellista on koko valmistusketjun tasalaatuisuus ja toimitusvarmuus. Yleisesti ongelmaksi muodostuu sarjaa uudelleen tehtäessä, että osat eivät sovi paikalleen, niitä puuttuu tai hitsit eivät osu kohdalleen. Erityisesti osavalmistuksen heikko laatu vaikeuttaa robottihitsauksessa onnistumista. Operaattorit saattavat myös kilpaa hienosäätää ohjelmia omaan makuun sopivaksi. Osittain edellä mainituista syistä johtuu, että robotin kaariaika jää lyhyeksi ja aikaa kuluu osien sovittamiseen ja ohjelmien korjaamiseen. (Haapakoski 2008, s. 29.) Robottihitsaustoimintaa ei myöskään voi jättää vain yrityksen hit-saajien vastuulle, vaan johdon on myös taustalla seurattava yleistä toimintaa ja hitsauksen sekä tuotannon laatua. Pahimmillaan toistuvia osavalmistuksen virheitä voidaan hyväksyä hitsareiden osalta talon tapana ja paikataan tarpeettomilla ratkaisuilla hitsausvaiheessa. Virheet kasaantuvat robotille, jonka hitsaamien tuotteiden laatu ei enää täytä vaatimuksia. Usein syy tuotteen heikkoon robottihitsauksen laatuun löytyy hitsausta edeltävistä työvaiheista. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 34.)

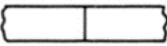
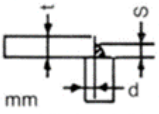

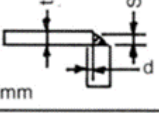


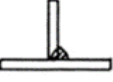
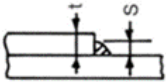
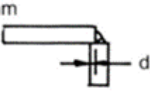
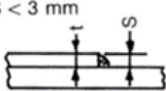
### 2.2.1 Robottihitsattavan tuotteen ominaisuuksia

Tuotteen valmistuskustannuksista noin 70–80 % määräytyy jo rakennesuunnitteluvaiheessa, jonka suunnitteluratkaisut määrittelevät osin tuotteen valmistustapaa. Myös suurin osa hitsauskustannuksista määräytyy tässä vaiheessa, sillä suunnittelussa määritellään hitsausprosessi ja automatisointiaste. Valintaan voidaan vaikuttaa esimerkiksi materiaalin valinnalla, rakenneratkaisuilla ja hitsien sijoituksella sekä luoksepäästävyydellä. (Lukkari 2011, s. 7–8; Stenbacka 2009, s. 15.)

Robottihitsaus vaatii yleensä tuotteiden uudelleensuunnittelua ja rakenteiden läpikäyntiä. Hyvin MIG/MAG-robottihitsattava tuote on sarjakooltaan riittävän suuri ja sisältää riittävästi hitsejä. Lähtökohtana hitsattavan kappaleen tulisi sisältää mahdollisimman vähän liitettäviä osia. Robotti hitsaa tehokkaasti paljon pieniä, erisuuntiin olevia hitsejä. Suorat ja pitkät hitsit soveltuvat hyvin myös mekanisointilaitteille. Itsepaikoittuvuuden ja paikoitusnastojen käyttö tuotteissa yksinkertaistaa silloitus- ja hitsauskiinnittimiä, jolloin kustannukset pienissä sarjoissa alenevat. Lisäksi paikoitusnastat lisäävät rakenteen jäykkyyttä, jolloin hitsausmuodonmuutokset vähenevät. (Haapakoski 2008, s. 27; Hiltunen 2005, s. 5–25.) Itsepaikoittavia piirteitä käytettäessä on huomioitava kappaleen lujuustekniset vaatimukset, jotta esim. väsymiskriittisiä kohtia ei pääse syntymään.

Kuvassa 10 vertaillaan eri liitosmuotojen soveltuvuutta robottihitsaukseen valmistettävyyden näkökulmasta. Soveltuvuutta arvioidaan asteikolla 1–4 ja suurempi luku kertoo paremmasta soveltuvuudesta, joten kuvan mukaan kaaren läpi tapahtuvaa railonseurantaa käyttäville robotille parhaiten soveltuvat pienahitsejä sisältävät kappaleet. Pienahitsit ovat erinomaisia robotisoitavia silloin kun läpihitsausvaatimusta ei ole. Tällöin hitsi ei pääse ”palaamaan läpi” ja osien paikoitustarkkuusvaatimus on väljempi. (Hiltunen 2005, s. 5–21.) Pienahitsin langankohdistusvaatimus jalko-vaaka-asennossa on pystysuunnassa 2 mm ja sivusuunnassa 1 mm. Hitsauspolttimen vaaputus väljentää kohdistusvaatimusta ja jalkoasennon käyttö mahdollistaa noin puolitoistakertaa väljemmän kohdistustarkkuusvaatimuksen vaaka- ja pystyhitseihin verrattuna. (Lempiäinen & Savolainen 2003, 85.) 6 mm paksuisten levyjen pienaliitos sallii 0,5 mm ilmaraon niin, että sillä ei ole merkitystä näkyvään a-mittaan. Yli 1 mm ilmarako pienentää näkyvää a-mittaa ja yli 1,5 mm ilmaraolla hitsin ja perusaineen liittymään syntyy reunahaavaa. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 34.) Pienahitsin hyvinä puolina on, että railotilavuus pysyy tasaisena ja lisäainelangan kohdistusvaatimus on väljä verrattuna muihin hitsityyppeihin. Pienahitsejä käytettäessä on syytä ottaa huomioon väsymisriski dynaamisessa kuormituksessa sekä korroosioalttius. Väsymisriskiin vaikuttaa liitokseen kohdistuvan kuormituksen suunta ja sitä kautta kriittisen detaljin kohta liitoksessa (Hiltunen 2005, s. 5–26).



Liitosmuoto		Soveltuvuus	Liitosmuoto		Soveltuvuus
Päittäisliitos		1	Nurkka-liitos	 $d \geq 3 \text{ mm}$ $t - S \geq 3 \text{ mm}$	4
		3		 $d \geq 3 \text{ mm}$ $t - S < 3 \text{ mm}$	2
T-liitos		4	Reuna-liitos		1
		3	Päällekkäis-liitos	$t - S \geq 3 \text{ mm}$ 	4
Nurkka-liitos	$d < 3 \text{ mm}$ 	2		$t - S < 3 \text{ mm}$ 	2

Kuva 10. Eri liitosmuotojen sopivuus robottihitsaukseen (Hiltunen 2005, s. 26).

Mikäli hitsattava sarjakoko jää pieneksi, yksi ratkaisu tilanteeseen voi olla tuotteen standardisointi ja modulointi. Tavoitteena on vähentää tuotteen erilaisten toimintojen, nimikkeiden ja osien lukumäärää, jolloin tuotevariaatioiden lukumäärä vähenee. Standardisointi on syytä viedä aina liitostyyppihin, hitsausparametreihin, levynpaksuuksiin ja railogeometrioihin asti. Lisäksi alkuperäinen tuote voidaan jakaa useassa tuotekonstruktion kohdassa tai useassa tuotteessa käytettäviksi toimiviksi fyysisiksi kokonaisuuksiksi eli moduuleiksi, johon tuotekohtaisia osia lisäämällä voidaan valmistaa eri tuotevariaatioita. (Hiltunen 2005, s. 11–14.)

### 2.2.2 Osavalmistus

Hitsattavat kokoonpanot muodostuvat usein ainakin osin levyleikkeistä ja usein myös särämätyistä osista. Yleisesti leikkausmenetelmä valitaan niin, että se on tehokkain ja edullisin laatuvaatimukset täyttävä menetelmä toimitusaika ja -varmuus huomioon ottaen. Levyn leikkaus mahdollistaa muutakin kuin pelkän ulkomuodon leikkauksen ja samalla usein kannattaakin tehdä mahdolliset aukot ja ruuvin reiät. Leikkausta tehdään mekaanisesti ja termisesti. Mekaanisia menetelmiä ovat esimerkiksi suuntaisleikkaus levyleikkurilla ja vesileikkaus. Levyleikkurilla voi leikata tehokkaasti suorakulmaisia kappaleita. Vesisuihkuleikkaus on

paksummillekin ainepaksuuksille sopiva menetelmä, jossa tarkkuus ja leikatun pinnan laatu ovat erinomaisia. Mekaanisten menetelmien hyvä puoli on, että prosessista ei tule kappaleeseen lämpöä, joka aiheuttaa muodonmuutoksia. Eniten käytetyt termiset menetelmät ovat kaasus-, plasma- ja laserleikkaus. Taulukossa 1 on esitetty seostamattomien terästen eri termisille leikkausmenetelmille soveltuvat ainepaksuudet sekä menetelmien tarkkuus, leikkauksenopeus ja leikkausjäljen laatu. (Matilainen, Parviainen, Havas, Hiitelmä & Hultin 2011, s. 142–205; Piironen 2013, s. 17.)

Taulukko 1: Termisten leikkausmenetelmien soveltuvat ainepaksuudet ja leikkauksen ominaisuudet (Piironen 2013, s. 19)

Leikkausmenetelmien vertailu	Kaasuleikkaus	Plasmaleikkaus	Laserleikkaus
Ainepaksuus [mm]	3 - 250...3200	...30	...25
Tarkkuus [mm]	0,5 - 5	0,1 - 0,5	0,05 - 0,1
Leikkauksenopeus [mm/min]	60 - 800	1000 - 10 000	500 - 2000
Leikkausjälki	Tyydyttävä	Kiitettävä	Kiitettävä

Laserleikkaus on tarkka ja yleispätevä leikkaustapa kaikille levyateriaaleille. Plasmaleikkausta käytetään, jos tarkkuudesta tai pinnanlaadusta ei ole hyötyä. Kaasuleikkaus on edullinen menetelmä ja se sopii hyvin paksuille materiaaleille sekä vähän tarkkuutta vaativiin osiin. Vesileikkaus sopii hyvin ei metalleille ja paksuille teräksille, jossa hyvän leikkaustarkkuuden ansiosta voidaan välttää esimerkiksi koneistusvaihe. Termisesti leikattavien osien suunnittelussa tulee välttää hoikkia, ohuita ja pitkiä ulokkeita kappaleessa muodonmuutosriskin vuoksi. (Matilainen et al. 2011, s. 205; Piironen 2013, s. 18–20.)

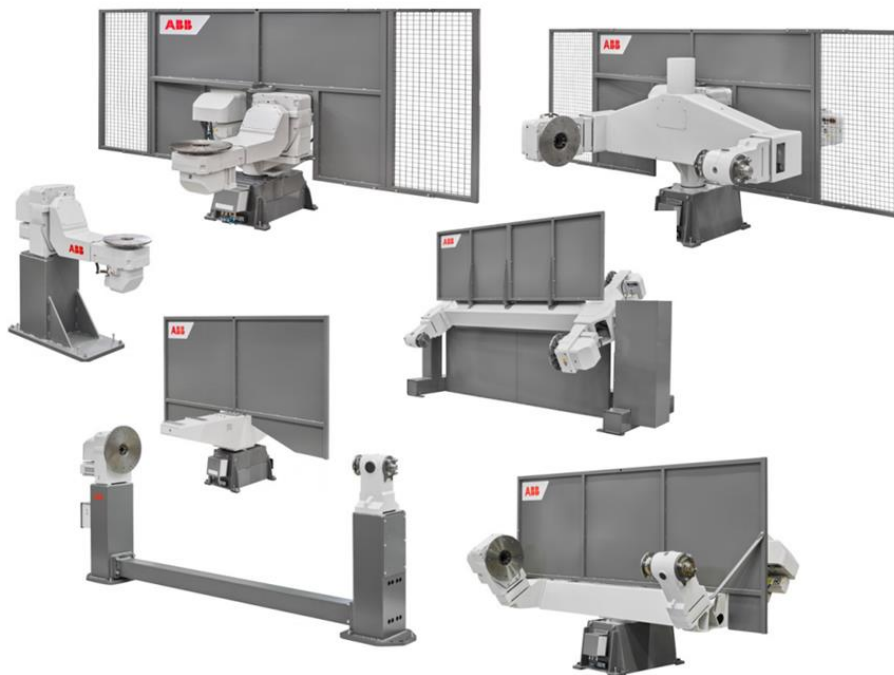
Särmättyjä osia käyttämällä voidaan vähentää hitsaamista, sillä tietyissä tilanteissa särmätyllä osalla voidaan korvata useammasta osasta koostuva hitsattu kokonaisuus. Särmäys on usein pitkää hitsiä edullisempi, tehokkaampi ja riskittömämpi vaihtoehto. Myös särmättävän osan tulee olla hyvin suunniteltu ja menetelmän rajoitukset on huomioitava, jotta menetelmän käyttö olisi kannattavaa. Särmäys on verrattain epätarkka prosessi, jossa yleisesti valmistustarkkuudet ovat alle 10 mm paksuisilla levyillä useita millejä ja ainepaksuuden tai särmien lukumäärän kasvaessa valmistustarkkuus heikkenee. (Piironen 2013, s. 25–27.)

### 2.2.3 Ohjelmointi

Hitsausrobotin ohjelmointi voidaan jakaa kahteen osaan, online- ja offline-ohjelmointiin. Perinteisesti online-ohjelmointi tehdään opettamalla, jossa operaattori siirtää robottiohjainta käyttämällä työkalua haluttuihin pisteisiin ja näin tallentaa piste kerrallaan radan robotin ohjelmaan. Ohjelmaan lisätään samalla liikekäskyt ja usein myös hitsauskomennot. Menetelmä on hidas ja se sopiikin hyvin tilanteisiin, jossa operaattorilla ei ole juurikaan ohjelmointikemusta ja kappaleet ovat yksinkertaisia. Menetelmää voidaan nopeuttaa johdattamalla robottia esimerkiksi rannelaippaan asennetusta anturista, jolloin robotin siirto pisteisiin helpottuu. (Kuivanen 1999, s. 78; Pan, Polden, Larkin, Van Duin, Norrish 2012, s. 88.) Online-ohjelmointi kuluttaa hitsaussolun tuotantoaika tuottamattomaan työhön. Offline-ohjelmointi puolestaan suoritetaan nimensä mukaisesti robotista erillään. Mallipohjaisessa ohjelmoinnissa hyödynnetään työkappaleen ja hitsaussolun CAD-malleja. Robottisolu voidaan pitää toiminnassa ohjelman robotille lataamiseen saakka. Tietokoneella ohjelmoitaessa voidaan ohjelman valmistuksen yhteydessä tarkistaa robotin ulottuvuus, tehdä törmäystarkastelu, suunnitella kiinnittimet ja todentaa tuotantoaikoja. Tehokkaita etäohjelmointivälineitä käyttämällä voidaan pienentää kannattavan sarjakoon suuruutta robottihitsauksessa. (Alonen, Jääskeläinen, Nissinen, Pirinen, Solehmainen, Toivanen & Tuunainen 2014, s. 39.)

### 2.2.4 Kappaleenkäsittely

Robottihitsaussolussa työkappale kiinnitetään yleensä kappaleenkäsittelijään, jolle robottiohjain antaa liikekäskyt. Robotin kappaleenkäsittelijän tehtävä on pitää kappale paikallaan ja kääntää sitä haluttuun asentoon hitsauksen sekä siihen liittyvien prosessien suorittamiseksi. Kappaleenkäsittelijät voidaan jakaa karkeasti kolmeen tyyppiin liikeakseliensa perusteella. Yksiakselisissa kappaleenkäsittelijöissä kappaletta yleensä pyöritetään. Laitteet ovat usein pyöritysrullia tai kääntöpöytiä, jotka soveltuvat hyvin raskaille kappaleille. Kaksiakseliset kappaleenkäsittelijät ovat usein nk. L-pöytiä, joissa on pyöritys ja kallistus samassa laitteessa. Nämä mahdollistavat yksiakselista kappaleenkäsittelijää paremmat hitsausasennot. Kolmeakselinen kappaleenkäsittelijä sisältää usein edellisen lisäksi korkeudensäätömahdollisuuden. (Jenney & O'Brien 2001, s. 403–406.) Kuvassa 11 on esitetty erilaisia kappaleenkäsittelijöitä.



Kuva 11. Kappaleenkäsittelijät (ABB 2021).

Hitsaussolussa voi sijaita myös kappaleenkäsittelyrobotti, jolla voidaan asettaa hitsattavia osia kokoonpanoon hitsausrobotin hitsattavaksi tai tuoda silloitettuja kokoonpanoja lopulliseen hitsaukseen. L-mallisen hitsauskääntöpöydän korvaaminen kuusiakselisella teollisuusrobotilla mahdollistaa paremmat hitsausasennot ja voi olla jopa kääntöpöytää edullisempi vaihtoehto, mutta samalla ohjelmointi muuttuu haastavammaksi. Tavoitteena kappaleenkäsittelyrobotin lisäämisellä soluun on päästä eroon perinteisistä hitsauskiinnittimistä ja niihin liittyvistä kustannuksista. Karkeasti arvioituna vuonna 2016 kappaleenkäsittelyrobotin hinnan verran pääomaa sitoutuu noin kymmeneen hitsauskiinnittimeen. Kappaleenkäsittelyrobotia käyttämällä voidaan myös vähentää hitsauskiinnittimiin sitoutuvaa pääomaa, koska hitsauskiinnittimen rakenteen ei tarvitse yleensä olla niin monimutkainen kuin kappaleenkäsittelijään kiinnitettäessä. Edellytyksenä menetelmän toimivuudelle on kuitenkin rakenteen valmistettavuus vähäisin kiinnittimin. (Solehmainen, Tuunainen, Räsänen & Jääskeläinen 2016, s. 15–16.)

Yksi tapa toteuttaa kappaleen kiinnitys kappaleenkäsittelijään tai robottiin on käyttää paremmin koneistuslaitteista tuttua nollapistekiinnitintä. Kokonaisuus koostuu kuvassa 11 esitetyistä kiinnityssylinteristä ja -tapista. Yleensä kiinnityselementtejä tarvitaan vähintään kaksi kappaletta, jolloin ensimmäisen määrittää nollapisteen ja toinen orientaation. (Solehmainen et al. 2016, s. 88.)



Kuva 12. Nollapistekiinnitin (Shunk 2021a; Shunk 2021b).

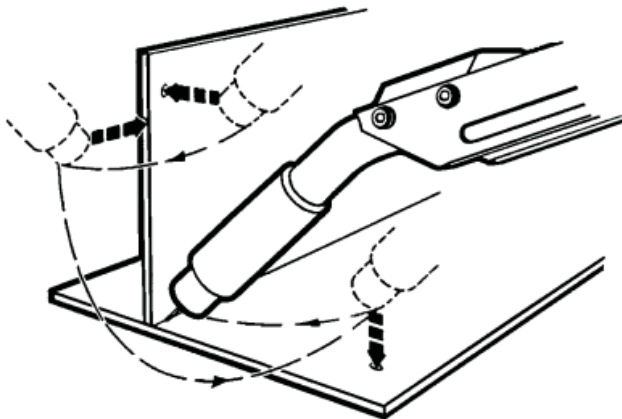
Nollapistekiinnittimiä voidaan käyttää hitsauskiinnittimien pikakiinnitykseen kappaleenkäsittelijään tai kiinnitystapit voivat sijaita hitsattavassa tuotteessa. Lisäksi samaa kiinnitystä voidaan käyttää koneistuksessa. Mikäli tuote silloitetaan erikseen, on syytä käyttää samaa nollapistekiinnitystä jo silloituksen paikoituksena mittavirheiden vähentämiseksi. Kiinnityspisteiden sijoittelussa on huomioitava tuotteen muodonmuutokset hitsauksessa, jotta tuote ei takerru kiinnittimeen. (Solehmainen et al. 2016, s. 91–92.)

### 2.2.5 Railonhaku ja -seuranta

Robotin ja ihmisen oleellisin ero hitsaajana on se, että siinä missä ihminen osaa muuttaa hitsauspolttimen kuljetusta kulloinkin vallitsevan tilanteen mukaan, robotti tekee hitsin täsmälleen ohjelman mukaan, ellei järjestelmä ole adaptiivinen. Hitsaaja hidastaa polttimen liikettä, mikäli railon tilavuus on suurempi tai muuttaa jännitettä ja muuttaa polttimen liikettä, mikäli ilmarako on tavallista suurempi. Hitsaaja havaitsee myös osien taivutustarpeen tai muut tarvittavat toimenpiteet hyvään lopputulokseen pääsemiseksi. Robotteihin on lisätty erilaista anturointia antamaan lisätietoa, jotta ohjelmaa voidaan hienosäätää vallitsevan tilanteen mukaan mahdollisesti myös reaaliajassa. Useimmissa tapauksissa olisi mahdollista

päästä riittävän hyvään paikoitukseen ilman anturointia, mutta tietyissä tilanteissa sen käyttö voi olla välttämätöntä. (Weman 2012, s. 165.) Käytössä olevat railonhaun ja -seurannan menetelmät voidaan jakaa kahteen osaan, optisiin menetelmiin ja ei-optisiin menetelmiin (Muhhammad, Altun & Abo-Serie 2016, s. 1).

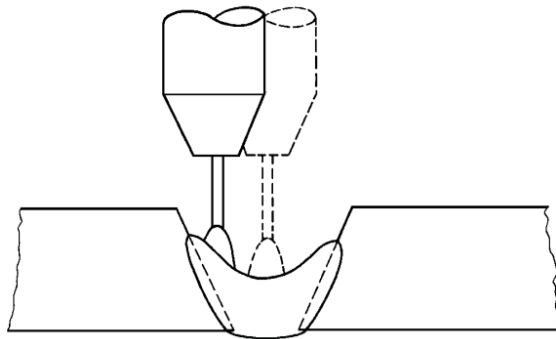
Railonhaku hitsauspolttimella (kuva 13) tapahtuu lisäämällä robotin hitsausohjelmaan kohta, jossa polttimen langalla tai kaasuholkilla kosketetaan työkappaleeseen. Paikka määritellään esimerkiksi koskettamalla kolmeen toisiinsa nähden kohtisuorasti olevaan pintaan. (Weman 2012, s. 166.) Langassa tai kaasuholkissa on pieni jännite ja virtapiiri sulkeutuu sen osuessa työkappaleeseen, jolloin robotin paikkatieto jää muistiin. (Jääskeläinen, Solehmainen & Tuunainen 2010, s. 45). Menetelmän etuna on pieni tilantarve, sillä polttimeen ei tarvita ylimääräisiä laitteita. Haittapuolena on se, että menetelmä on hidas, sillä hakua ei voi suorittaa suurilla liikenopeuksilla. Lisäksi, koska haku käyttää suhteellisen pientä jännitettä, työkappaleen likaisuus voi estää virtapiirin sulkeutumisen. (Kara & Rajamäki 1983, s. 33–35.) Railonhaun hitaudesta huolimatta se on kuitenkin nopeampi tapa työkalun paikkavirheen korjaamiseksi kuin ohjelman muokkaaminen operaattorin toimesta.



Kuva 13. Polttimella tapahtuvan railonhaun periaate (Weman 2012, s. 165).

Perinteisin tapa toteuttaa railonseuranta on toteuttaa se ns. kaaren läpi. Hitsauspoltinta liikutetaan hitsausrailoon nähden poikkisuunnassa (kuva 14) eli tehdään levitysliikettä. Vapaalangan pituus muuttuu, joka aiheuttaa muutoksia hitsausvirtaan ja jännitteeseen. Mitatun

arvon muutoksesta saadaan tietoon railon keskikohta, jolloin robotin rataa voidaan korjata ja hitsi saadaan keskelle railoa. Hyvänä puolena menetelmässä on sen yksinkertaisuus, kustannustehokkuus ja se on useimmissa tapauksissa riittävän hyvä, eikä lisälaitteita tarvitse asentaa. (Pires et al. 2006, s. 84; Jääskeläinen et al. 2010, s. 46.) Huonona puolena menetelmässä on, että levyn reunan täytyy jatkua 3 mm hitsin ja perusaineen liityntää leveämmälle, jotta railoa voi seurata ja lisäksi hitsauksessa on käytettävä levitysliikkettä. (Hiltunen 2005, s. 19–26.)

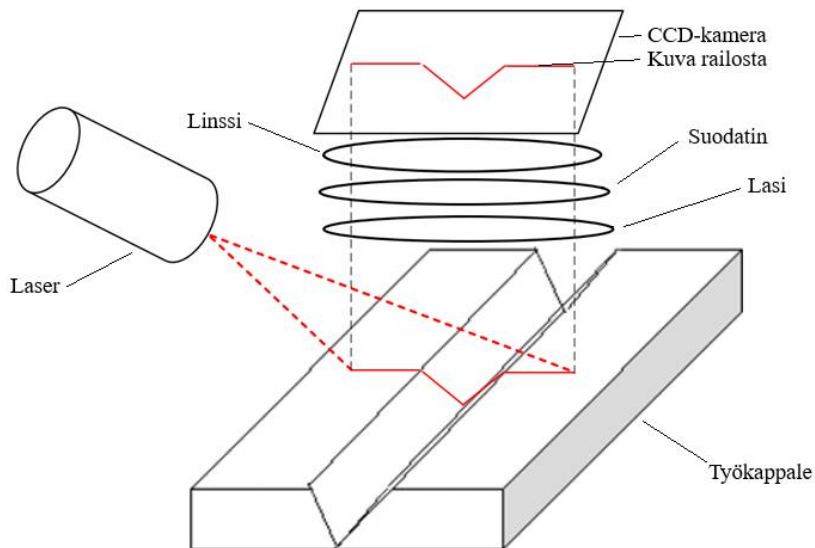


Kuva 14. Railonseuranta valokaaren läpi (Weman 2012, s. 166).

Railonseuranta sekä kappaleen paikoitus suoritetaan nykyaikaisemmin optisesti. Optiset menetelmät ovat usein nopeampia ja mittaukset suoritetaan kosketuksettomasti. Optisesti saadaan myös monipuolisempaa tietoa hitsauksesta ja sitä voidaan kerätä hitsausprosessin aikana. Saadun informaation perusteella muokataan hitsausparametreja reaaliaikaisesti, jolloin puhutaan adaptiivisesta hitsauksesta. (Jääskeläinen et al. 2010, s. 46–50). Optiset menetelmät voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin, joissa oleellisimpana erona on aktiivisten menetelmien käyttämä oma valonlähde (Muhammad et al. 2016, s. 1).

Aktiivisessa menetelmässä järjestelmä koostuu kuvassa 15 esitetyn mukaisesti kamerasta, valonlähteestä sekä linseistä ja suotimista (Gu, Xiong & Wan, 2013, s. 451). Lisäksi järjestelmään kuuluu ohjauksikkö sekä ohjelmisto kuvan käsittelyyn ja laitteiston ohjaukseen. Menetelmässä laservalo hajotetaan valotasoksi ja projisoidaan hieman viistosti polttimen

lähelle haluttuun kuvauskohtaan. Heijastuva valokuuva muuttaa muotoaan ja paikkaansa kappaleen muotojen mukaan kameran kuvassa. (Jääskeläinen et al. 2010, s. 47).



Kuva 15. Aktiivinen optinen railonseuranta (Gu et al. 2013, s. 451).

Järjestelmän hyviä puolia ovat:

- Samaa laitteistoa voidaan käyttää eri hitsausprosesseissa.
- Menetelmä soveltuu myös suurille eli yli 2 m/min nopeuksille.
- Myös hyvin pienet railot ja I-hitsien ilmaraot ovat havaittavissa järjestelmällä.
- Railonhaku on nopea suorittaa sekä ohjelmoida.
- Hitsauksen aloitus- ja lopetuspistettä ei tarvitse ohjelmoida tarkasti, josta on etua etäohjelmoinnissa.
- Seuranta ei tarvitse levitysliikettä.
- Monipalkohitsauksessa jokainen palko on seurattavissa ja mitattavissa.
- Menetelmän käyttö mahdollistaa adaptiivisen hitsauksen.

(Jääskeläinen et al. 2010, s. 52–53.)



Järjestelmän heikkoutena ovat:

- Tilantarpeen vuoksi käyttö ahtaissa kotelorakenteissa estyy.
- Perusaineen pinnan vaihteleva kyky peilata lasersädettä hankaloittaa mittausta.
- Pienillä railotilavuuksilla perusaineen pinnalla olevat naarmut voivat heikentää menetelmän luotettavuutta.
- Laserkamera kääntyy polttimen mukana, jolloin hitsaus onnistuu vain tiettyyn suuntaan.
- Pienissä, alle 100 mm pyörähdysmuodoissa, railon seurannan käyttö on ongelmallista.

(Jääskeläinen et al. 2010, s. 47–54.)

#### 2.2.6 Hitsauskiinnittimet

Hitsauskiinnittimet ovat laitteita, jotka helpottavat ja vakioivat hitsausta sekä siihen liittyviä toimia. Kiinnittimien tulee olla helppokäyttöisiä ja niiden tulee tehostaa tuotantoa ja parantaa tuotteiden laatua. Hitsauskiinnittimien suunnittelu on haastavaa ja robotisoidussa hitsauksessa kiinnittimien merkitys kasvaa verrattuna käsinhitsaukseen. Luotettava ja toistettava kiinnitys mahdollistaa hitsauksen mekanisoinnin ja robotisoinnin. Pahimmillaan hitsattava kappale ei irtoa hitsauskiinnittimestä virheellisen kiinnitinsuunnittelun vuoksi tai kiinnitin voi jopa estää kappaleen hitsauksen. Kiinnittimet voivat olla prototyyppejä, koska ensimmäinen kiinnitin on tehty kiireellä ylijäämäpaloista ja kohtalaisen hitsattavuuden saavuttamisen jälkeen panostusta kiinnittimen kehittämiseen ei ehkä nähdä tarpeellisena. Kiinnitin voi lisäksi olla valmistettu ilman dokumentaatiota ja hitsaajan omien mieltymysten mukaan, joka ei välttämättä ole aina loppuun asti mietitty ratkaisu. (Solehmainen et al. 2016, s. 4–8.)

Merkittävä osuus kiinnitinkustannuksista muodostuu sen suunnittelusta ja valmistuksesta. Lisäksi kiinnittimestä muodostuu varastointi, huolto ja ylläpitokuluja. Suunnittelulla voidaan vaikuttaa erityisesti kiinnittimen toimintaan ja toisaalta myös kustannuksiin. Kiinnittimien suunnittelijalla täytyy olla riittävästi kokemusta tuotannosta, jotta hän pystyy suunnittelemaan toimivia kiinnitinratkaisuja. (Solehmainen et al. 2016, s. 7.)

Käytettävät hitsauskiinnittimet voidaan jakaa kahteen ryhmään, silloituskiinnittimiin ja hitsauskiinnittimiin. Silloituskiinnittimillä nopeutetaan tuotteen kokoamista ja suoritetaan osien tarkka paikoitus. Silloituskiinnitin on usein kevytrakenteisempi kuin varsinainen hitsauskiinnitin, koska silloituksesta aiheutuvat voimat ovat pienehköjä verrattuna lopulliseen hitsaukseen. Hitsauskiinnitin pitää hitsattavan kappaleen luotettavasti kiinni hitsauksen ajan ja tarvittaessa estää kappaleen muodonmuutoksia. (Solehmainen et al. 2016, s. 7–8.)

Hitsauskiinnittimet voidaan jakaa tuotekohtaisiin ja yleiskäyttöisiin kiinnittimiin. Edelleen yleiskäyttöiset kiinnittimet voidaan jakaa mukautuviin ja uudelleenkonfiguroitaviin kiinnittimiin, jotka käyvät useille erikokoisille ja -muotoisille kappaleille. Yleiskäyttöisistä kiinnittimistä eniten käytetty on modulaarinen kiinnitin, jonka vahvuuksia ovat helppokäyttöisyys, monipuolisuus ja mukautuvuus. Modulaarisen kiinnittimen joustavuus johtuu standardikiinnitysosilla saatavasta suuresta eri kiinnityskombinaatioiden määrästä. (Wang, Rong, Li & Shaun 2010, s. 1087–1088.) Standardiosat ovat usein erilaisia kiinnitys- ja paikoitusosia, tappeja ja kiinnityspuristimia, jotka on tyypillisesti kiinnitetty T-urapöytään tai perusalustaan, jossa on kierrereikiä (Solehmainen et al. 2016, s. 24). Käyttämällä modulaarista kiinnitintä voidaan lyhentää läpimenoaikaa ja pienentää kuluja piensarjatuotannossa. Modulaarisen kiinnittimen huonoja puolia ovat (Wang et al. 2010, s. 1087–1088):

- kiinnittimellä ei välttämättä saada aikaiseksi haluttua kiinnitystä
- optimaalista kiinnitystapaa ei välttämättä saada aikaiseksi
- ei sovi massatuotantoon
- monimutkaisissa tuotteissa käytettävyys heikkenee.

Haittana modulaarisessa kiinnittimessä on myös se, että useita moduuleita peräkkäin asentamalla kiinnittimen jäykkyys voi heikentyä. Modulaarisen kiinnittimen käytettävyyttä voi parantaa suunnittelemalla ja valmistamalla itse standardikomponenttien lisäksi erikoismoduuleja esimerkiksi levyleikkeistä, jolloin kustannustehokkuutta pienillä sarjoilla saadaan parannettua. (Solehmainen et al. 2016, s. 26.)

Koneistuskiinnittimien suunnitteluun on saatavissa laajasti suunnitteluohjelmistoja, mutta hitsauskiinnittimien suunnittelussa tilanne on heikompi (Solehmainen et al. 2016, s. 7). Hitsattavien kokoonpanojen ohella myös hitsauskiinnittimissä on järkevää käyttää kuvan 16 mukaisesti laserleikattuja muotoja. Kiinnittimistä saadaan nykyaikaisella leikkaustekniikalla tarkkoja, joten leikkeisiin voidaan lisätä suoraan paikoituspintoja. Lisäksi levyleikkeisiin voidaan helposti lisätä pitkiä reikiä säätöjä varten ja ylimääräinen materiaali voidaan leikata pois. (Haapakoski 2008, s. 27.)

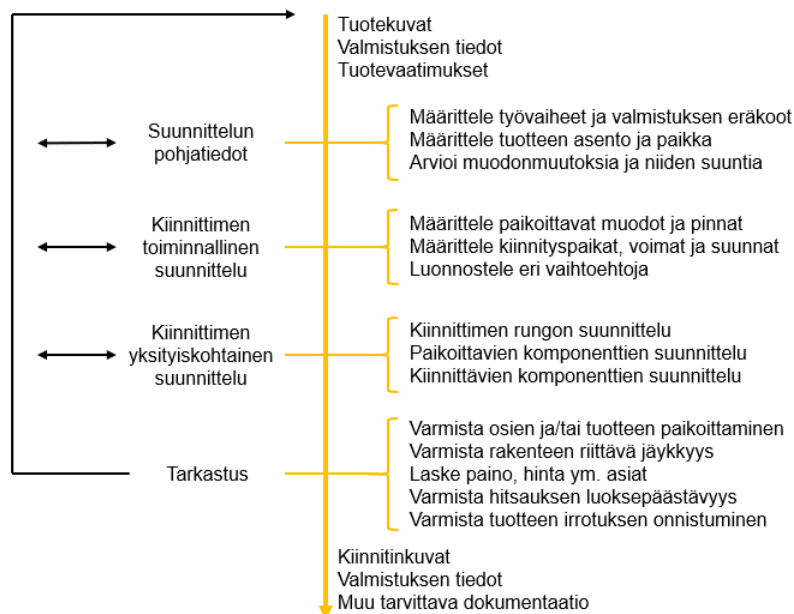


Kuva 16. Levyleikkeiden käyttö hitsauskiinnittimissä (Solehmainen et al. 2016, s. 41).

Solehmainen et al. (2016, s. 9) esittää hitsauskiinnittimen suunnitteluprosessin vaiheistukseksi kuvassa 17 olevaa tapaa, jossa on neljä päävaihetta:

- pohjatietojen määrittely
- kiinnittimen toiminnallinen suunnittelu
- kiinnittimen yksityiskohtainen suunnittelu
- tarkastus.

Kiinnittimen suunnittelun toteuttaminen on hyvä suorittaa samaan aikaan tuotteen suunnittelun kanssa, jolloin takaisinkytkentä suunnitteluun on helpompaa. Kuvassa 17 takaisinkytkentä on esitetty kaksisuuntaisilla nuolilla. Pohjatietoja määriteltäessä on syytä miettiä, kuinka robottihitsaus onnistuisi parhaiten ja kuinka kiinnittimestä saataisiin mahdollisimman yksinkertainen. Parhaassa tapauksessa kokoonpanosta saadaan itsepaikoittuva ja silloituskiinnitin voi jäädä tarpeettomaksi. Kiinnitinsuunnittelun pohjatiedot kannattaa määritellä huolella ja kiinnittimien toiminnalliseen suunnitteluun kannattaa käyttää aikaa sekä luonnostella useita versioita. Luonnoksien arviointi kannattaa tehdä useamman henkilön ryhmässä, johon kuuluu myös hitsaajia. Toimien tarkoituksena on viedä toimivat ideat yksityiskohtien suunnitteluun ja löytää kompromissi eri intressien ja vaatimusten välille. (Solehmainen et al. 2016, s. 13.)

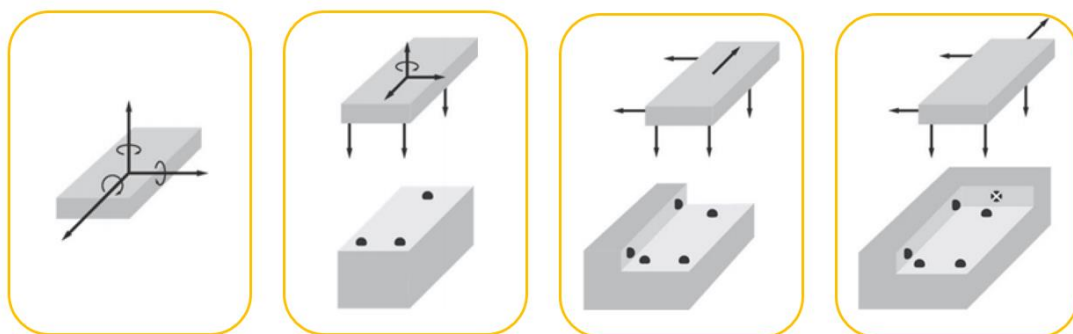


Kuva 17. Kiinnitinsuunnittelun vaiheet (Solehmainen et al. 2016, s. 9; Wang & Rong 2008, s. 1121–1122; Wang et al. 2010, s. 1088).

Hitsattavan kappaleen massan lisäksi kiinnittimeen kohdistuu usein myös hitsauksen aiheuttamasta lämmöstä johtuvat jännitykset. Hitsattavan tuotteen ja kiinnittimen kannalta parasta olisi, että kappaleen muodonmuutokset pääsisivät tapahtumaan vapaasti hitsauksen aikana, jolloin jäännösjännitykset jäisivät pieneksi ja kiinnittimeen kohdistuva rasitus olisi pieni.

Hitsattavan kappaleen muodonmuutoksiin pystyy vaikuttamaan hitsien suunnittelulla ja hitsausjärjestyksellä. Viimekädessä muodonmuutoksia on kompensoitava suurempina koneistusvaroina ja osien paikoituksen ennakoina. Varsinkin suuria sarjoja valmistettaessa myös itse kiinnittimen lämpeneminen ja siitä aiheutuvat muodonmuutokset voivat aiheuttaa ongelmia, jolloin rakennetta voi joutua vahvistamaan. Muodonmuutoksia rajoittaessa on syytä muistaa, että mitä järeämpi kiinnitin on, sitä enemmän se todennäköisesti maksaa. (Solehmainen et al. 2016, s. 13–16.)

Kiinnittimen mitoituksen perustana ei kannata käyttää valmista tuotetta, mikäli vastinpintoja ei ole varustettu säätömahdollisuudella. Kiinnittimen paikoittavat pinnat tulee valita niin, että tuotteen toiminnalliset mittavaatimukset täyttyvät. Tuotteen muodostuessa osakokoonpanoista, tulee osakokoonpanojen välisien rajapintojen mittatarkkuuteen kiinnittää huomiota. Kuvassa 18 esitetään hyvänä periaatteena kappaleen paikoittamisessa toimiva 3-2-1-sääntö. Sääntö ilmentää jäykän kappaleen vapausasteiden rajoittamista kolmiulotteisessa avaruudessa, jossa suurimmalle tasolle asetetaan vähintään 3 tukevaa pistettä, joka poistaa kappaleen 3 vapausastetta. Kappale linjataan vähintään kahdella pisteellä, jolloin poistetaan 2 vapausastetta lisää. Viimeiseen vapausasteen poistamiseen tarvitaan enää yksi piste. (Nee 2010, s. 100–324; Solehmainen et al. 2016, s. 16–17.)



Kuva 18. 3-2-1-sääntö (Solehmainen et al. 2016, s. 17).

Lisäksi myös kaksi pyöreää reikää voi olla käyttökelpoinen tapa paikoittaa kappale. Tässä tavassa toinen reikä toimii tuotteen nollapisteen määrittelijänä ja toinen määrää kappaleen orientaation. Tasopinta ja kaksi reikää riittää lukitsemaan kaikki vapausasteet. Tässä tavassa

täytyy ottaa huomioon, että kappaleen muodonmuutokset saattavat aiheuttaa sen jumiutumiseen kiinnittimeen. Jumiutumistaipumusta voi pienentää muotoilemalla kiinnitystappeihin helpotuksia. (Nee 2010, s. 99–101; Solehmainen et al. 2016, s. 18.)

Hyvä kiinnitin toimii myös osavalmistuksen ja kokoonpanon tulkkina estäen virheellisten tai väärinpäin olevien tuotteiden asetuksen kiinnittimeen. Tuotteen hyvän hitsattavuuden lisäksi kappaleen tulee irrota kiinnittimestä helposti, joka tulee huomioida jo hyvissä ajoin suunnittelussa. Suunnittelussa on myös syytä miettiä nostopisteiden sijoittelu niin, että kiinnitin ja tuote saadaan helposti siirrettyä hitsausasemalle ja sieltä pois. (Nee 2010, s. 101–102; Solehmainen et al. 2016, s. 18.)

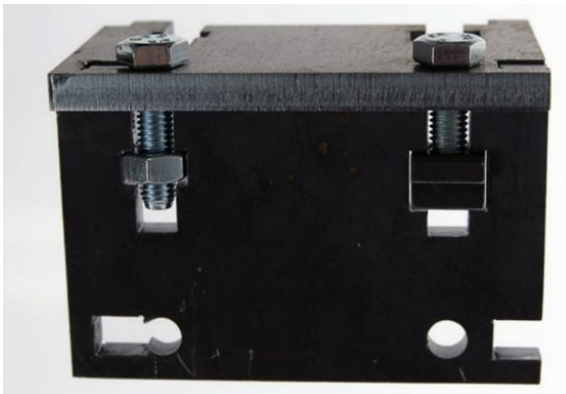
Hitsauskiinnitintä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon valmistettavien tuotteiden materiaalit, jotta esimerkiksi ruostumattomia teräksiä hitsatessa tavallisesta rakenneteräksestä valmistetussa kiinnittimessä ei tapahdu hitsattavan kappaleen kontaminaatiota. Lisäksi on huomioitava hitsausvirran johtaminen työkappaleeseen, jolloin varmistetaan valokaaren vakaus, eikä toisaalta tapahdu ennakoimatonta lämpenemistä virran kulkiessa kappaleeseen väärästä kohdasta. (Solehmainen et al. 2016, s. 16–20.)

Työkappaleen kiinnitykseen tarvitaan erilaisia kiinnityselementtejä, kuten ruuveja, tappeja ja pikakiinnikkeitä. Kiinnityselementtejä valittaessa on syytä varmistua, että energiansyötön katketessa kappale ei saa aiheuttaa vaaratilannetta pudotessaan kiinnittimestä. Kuvan 19 pikakiinnityspuristimet ovat yleisesti käytettyjä kiinnityselementtejä ruuvien ja muttereiden ohella. (Solehmainen et al. 2016, s. 20.)



Kuva 19. Pikakiinnityspuristimia (Bernd Siegmund 2021).

Ruuvit ja mutterit ovat edullisia ja usein varmatoimisia kiinnityselementtejä. Kiinnittimen kriittiset osat täytyy rikkoontuessaan olla nopeasti korvattavissa. Ruuveja löytyy helposti ja rikkoontuneen osan korvaaminen onnistuu helposti. Ruuvien ja muttereiden kiinnityksessä voi hyödyntää laserleikkausta muodostamaan liitoksia kuvan 20 tapaan. Heikkoutena ruuvien ja muttereiden käytössä on mm. irtonaiset osat sekä työkalujen tarve. (Solehmainen et al. 2016, s. 21–23.)



Kuva 20. Laserleikattujen piirteiden käyttö yhdessä ruuvien ja muttereiden kanssa (Solehmainen et al. 2016, s. 22).

Ennen kiinnittimen valmistumista ja mieluiten suunnittelun aikaisessa vaiheessa tulee varmistua siitä, että kappale voidaan hitsata suunnitellusti. Kevyempi tapa on 3D-ympäristössä testata hitsauspolttimen mallilla tilantarve. Robottihitsauksessa kannattavaa on mallintaa hitsaus virtuaalisessa robottisolussa ja samalla luoda etäohjelmoinnilla hitsausohjelma oikeaan soluun ladattavaksi, mikäli tällainen ominaisuus on käytössä. Tällöin saadaan selville osa mahdollisista parannuskohteista jo suunnitteluvaiheessa. Etäohjelmointi vähentää prototyypikiinnittimien ja -tuotteiden valmistustarvetta, vaikka harvoin täydelliseen suoritukseen ylletään ensiyrittämällä. Kiinnittintä suunnitellessa tulee pitää mielessä, että samaa tuotetta ei valmisteta ikuisesti, vaan todennäköisesti siihen tehdään vähintään muutoksia, jotka täytyisi pystyä hitsaamaan mahdollisimman pienillä muutoksilla kiinnittimeen. (Solehmainen et al. 2016, s. 22–23.)

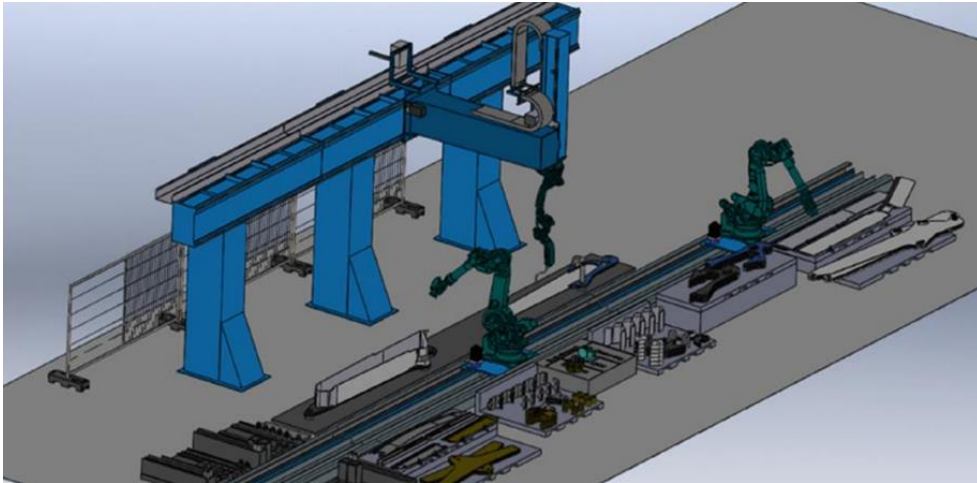
### 2.2.7 Jigitön hitsaus

Hitsaus on yksi vanhimpia teollisuusrobotin käyttökohteita ja tieteellisen tutkimuksen aiheita. Kaikesta huolimatta täysin automatisoitua hitsausjärjestelmää ei ole pystytty vielä luomaan. Tämä johtuu pääasiassa hitsaukseen liittyvistä olosuhteista ja useista muuttujista, kuten lämmöstä johtuvat muodonmuutokset ja erilaiset geometriat niin kappaleissa kuin hitsaissa. (Muhammad et al. 2016, s. 1.)

Pelkän hitsauksen robotisointi soveltuu parhaiten sarjatuotantoon ja myös piensarjoihin varsinkin tilanteessa, jossa kappalekohtainen hitsausaika on suhteellisen pitkä. Automatisoidut järjestelmät, kuten FMS (Flexible Manufacturing System), voivat mahdollistaa jopa yksittäisten kappaleiden kannattava hitsauksen robotilla. Merkittävin etu FMS-järjestelmässä on kappaleiden varastointi puskurivarastoon ja miehittämätön ajo vapaasti valitussa järjestyksessä. Automatisointi voidaan toteuttaa hitsausrobotin lähelle sijoitettavalla kappaleenkäsittelyrobotilla, jolla poimitaan hitsattavat kappaleet hitsausrobotille. Vain vähän hitsausta sisältäviin pieniin tuotteisiin näistä menetelmistä ei välttämättä löydy kustannustehokasta ratkaisua. (Jääskeläinen et al. 2010, s. 9.)

Yksi vaihtoehto on käyttää kappaleenkäsittelyrobotia hitsauskokoontalon kasaamiseen samalla kun hitsausroboti suorittaa hitsauksen (Jääskeläinen et al. 2010, s. 10–11). Aiemmin jigitömyys on tarkoittanut joustavuuden kasvattamista tuottavuuden kustannuksella, mutta nykyajan tekniikalla toteutettuna joissain tapauksissa jigitön hitsaus vaikuttaa tarjoavan suuren joustavuuden yhdessä tuottavuuden kanssa, vaadittua laatutasoa unohtamatta. Jigitön hitsaus (kuva 21) on varteenotettava tuotantomuoto, sillä se poistaa kiinnittimien asennukseen tarvittavan ajan ja toisaalta säästää kiinnittimien suunnittelusta, valmistuksesta ja säilytyksestä aiheutuvat kulut. (Bejlegaard, Brunoe & Nielsen 2018, s. 306–307.)





Kuva 21. Jigitön robottihitsaussolu (Bejlegaard et al. 2018, s. 309).

Jigitön hitsaus tuo mukanaan haasteita verrattuna perinteiseen tuotantoon

- Osavalmistuksen vaatimukset kasvavat ja poikkeamat laadussa altistavat tuotantokatkoksille.
- Jigitön hitsaus tarvitsee uudenlaista osaamista, jotta järjestelmää voi käyttää tai sinne voi viedä uusia tuotteita valmistettavaksi.
- Vaikka kiinnittimiä ei enää tarvitse suunnitella tai valmistaa, niin vastaavasti uusia robottiohjelmia täytyy luoda.
- Pieninä määrinä valmistettujen monimutkaisten kappaleiden ohjelmointiaika voi olla huomattava, johon apua voi löytyä osien ja liitosten standardisoinnista.
- Tuotantoympäristössä, jossa valmistetaan yksittäisiä monimutkaisia kappaleita, robotin ohjausjärjestelmältä vaaditaan enemmän, jotta robottien liikkeet saadaan synkronoitua tarkasti.
- Hitsauksesta johtuva lämmöntuonti aiheuttaa muodonmuutoksia, joka johtaa tarpeeseen kompensoida niitä robotilla.
- Työkappaleen paikoituksen varmistaminen automaattisessa solussa, kun operaattori ei ole sitä tekemässä.

(Bejlegaard et al. 2018, s. 308–309.)

Vaikka jiggittömän hitsausjärjestelmän investointikustannukset ovat korkeat, niin kulut jakautuvat pitkälle ajalle ja usealle tuotesukupolvelle, joka voi tehdä investoinnista kannattavan. Lisäksi järjestelmä suurentaa kapasiteettia vaihto- ja prosessiaikaa pienentämällä, joka täytyy ottaa huomioon myös järjestelmän mitoituksessa. (Bejlegaard et al. 2018, s. 308–309.)

### 3 Hitsauksen tunnusluvut ja kustannusten muodostuminen

Teollisuustuotanto, kuten muukin tuotanto, tähtää arvon lisäämiseen. Tässä raaka-aineita ja tuotantoresursseja käytetään tuottamaan tuotteita, jotka myydään markkinoille. Tuottavuus voidaan ilmaista yksinkertaisesti kaavalla, jossa tuotos on valmistetut tuotteet ja panos on tuotantopanoksia, kuten esimerkiksi materiaaleja tai työtunteja: (Stenbacka 2011, s. 21.)

$$Tuottavuus = \frac{Tuotos}{Panos} \quad (1)$$

Hitsauskustannuksia ei voi hallita ilman laskelmia. Hitsauksen kustannuksia voidaan laskea esimerkiksi tarjouksen tekemistä tai kustannusrakenteen selvittämistä varten. Kustannuslaskelmat ovat hyvä apuväline tuotantomenetelmien, erilaisten kappaleen rakenteiden ja hitsausprosessien vertailuun. (Lukkari 2011, s. 2; Stenbacka 2011, s. 49–50.) Kustannuslaskelmien tulokset ovat yhtä tarkkoja kuin on lähtötietojen tarkkuus. Lisäksi käytettyjen mittarien ja kriteerien tulee olla oikein valittuja. Kokemusperäisellä tiedolla tai aikaisemmilla laskelmilla voidaan vähentää laskelmien epävarmuutta ja niiden tueksi voidaan lisäksi tehdä koehitsauksia tai simulointeja. (Stenbacka 2011, s. 83.)

Riippuen kulloinkin valittavista tuotoksista ja panoksista, voidaan saada erilaisia tuottavuuden mittoja. Robottihitsauksessa käytännöllisiä mittoja voivat olla esimerkiksi hitsatut metrit tai kappaleet vuorokaudessa. (Stenbacka 2011, s. 21.) Hitsauksen ja osavalmistuksen osajat ovat periaatteeltaan samoja, mutta termeissä on hieman eroja. Hitsauskustannuksiin ei yleensä lasketa valmistamisessa käytettyjä raaka-aineita eikä muita liittyviä työvaiheita, joita voivat olla (Lukkari 2011, s. 3):

- raaka-aineiden leikkaus
- railojen valmistus
- esikuumennus
- lämpökäsittelyt

- tarkastukset
- korjaukset.

Hitsausprosessien tärkeimpiä avainlukuja, jotka esiintyvät useimmissa laskelmissa, ovat hitsiaineentuotto, hyötyluku ja paloaikasuhte. Hitsiaineentuotto ( $T$ ) [kg/h] on aikayksikköä kohti sulatetun lisäaineen määrä. (Stenbacka 2011, s. 67–68.) Tämä voidaan laskea langansyöttönopeuden funktiona 1,2 mm umpilangalle seuraavasti (Lukkari 2007, s. 6):

$$T = 0,53 \times v_l, \quad (2)$$

jossa

$v_l$  on langansyöttönopeus [m/min].

Kaariaikasuhde ( $e$ ) kuvaa, kuinka suuren osan vaiheajasta valokaari palaa. Kaariaikasuhdeesta käytetään myös nimitystä paloaikasuhte. Yleisimpiä hitsausprosessikohtaisia kaariaikasuhdeita on esitetty taulukossa 2. Kaariaikasuhdetta käytetään myös tuottavuusindeksinä, mutta sen käytössä tulee olla varovainen, sillä se kuvaa tuottavuuden sijasta ennemminkin vain muun ajan suhdetta kaariaikaan. Mikäli hitsausta optimoidaan ja hitsausnopeus paranee, pienenee kaariaikasuhde, vaikka prosessi on tehostunut ja tuottavuus parantunut. Kaariaikasuhde lasketaan seuraavan kaavan mukaan: (Stenbacka 2011, s. 71.)

$$e = \frac{t_{ka}}{t_{va}}, \quad (3)$$

jossa

$t_{ka}$  on kaariaika [s],

$t_{va}$  on vaiheaika [s].

Taulukko 2: Yleisimpiä prosessikohtaisia kaariaikasuhteita (Lukkari 2007, s. 7)

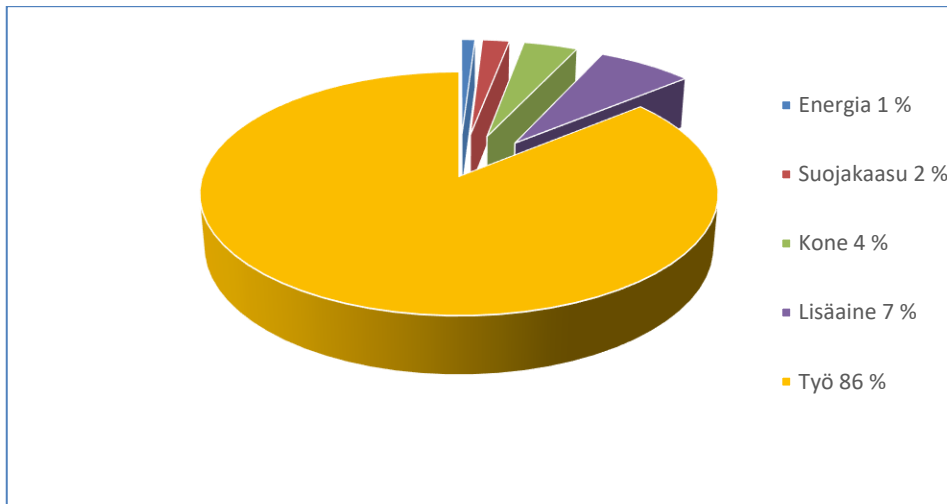
Prosessi	Kaariaikasuhde [%]
Puikkohitsaus	10 - 40
MIG/MAG umpi- sekä täytelanka	10 - 40 käsin 70 - 90 mekanisoidusti tai automatisoidusti
Jauhekaarihitsaus	40 - 70

Sulahitsauksessa hitsauskustannukset muodostuvat seuraavista osakustannuslajeista (Stenbacka 2011, s. 84):

- työkustannukset
  - palkat
  - sosiaalikulut
- hitsausainekustannukset
  - lisääineet
  - suojakaasut
  - hitsausjauheet
- konekustannukset
  - pääoma
- energiakustannukset
  - sähkö
- kunnossapitokustannukset
  - huolto
  - varaosat.

Työkustannukset seostamattoman teräksen käsinhitsauksessa MAG-prosessilla ovat 70–90 %. Loput jakautuvat pieninä osuuksina muille kustannustekijöille, joka on esitetty kuvassa 22. Työn määrän merkittävä osuus kokonaiskustannuksista johtaa siihen, että 80 % työkuiluista 10 % säästö näkyy 8 % säästönä kokonaiskustannuksissa. 10 % säästö muussa

osakustannuslajeissa vaikuttaa loppurivillä murto-osan työnteon kustannuksista, joten työn määrän vähentäminen on hyvä lähtökohta toiminnan tehostamisessa. Mekanisoidussa ja robotisoidussa hitsauksessa konekulujen osuus nousee suuremmaksi suhteessa muihin kuluihin johtuen kalliista investointikuluista. (Lukkari 2011, s. 4.)



Kuva 22. Kokonaishitsauskustannusten jakaantuminen käsin suoritettussa MAG-hitsauksessa (mukaiillen Lukkari 2011, s. 4).

Kaariaika ( $t_{ka}$ ) [s] on nimensä mukaisesti aika, jolloin valokaari palaa. Kaariajan voi laskea seuraavasti: (Stenbacka 2011, s. 67.)

$$t_{ka} = \frac{M}{T}, \quad (4)$$

jossa

$M$  on hitsiainemäärä [kg],

$T$  on hitsiaineentuotto [kg/h].

Kaarisivuaika ( $t_{si}$ ) on suoraan hitsaukseen liittyvä aika, joka voi MIG/MAG-hitsauksessa olla esimerkiksi lankakelman tai kaasupullon vaihto. Käsittelyaikaan ( $t_{kä}$ ) sisällytetään kappaleen käsittelyyn liittyvät kiinnitykset ja irrotukset, mutta myös silloitusvaihe mahdollisine

mittauksineen. Apuaika ( $t_{ap}$ ) otetaan monesti huomioon prosenttilisänä ja se eroaa kaarisivuajasta siinä, että apuaika ei liity suoraan hitsaustyöhön. (Stenbacka 2011, s. 67.)

Vaiheaika ( $t_{va}$ ) [s] on kaariajan, kaarisivuajan, käsittelyajan ja apujan summa (Stenbacka 2011, s. 67):

$$t_{va} = t_{ka} + t_{si} + t_{kä} + t_{ap}, \quad (5)$$

jossa

$t_{ka}$  on kaariaika [s],

$t_{si}$  on kaarisivuaika [s],

$t_{kä}$  on käsittelyaika [s],

$t_{ap}$  on apuaika [s].

Vaiheaika ja asetusaika muodostavat tehtävääjan. Asetusaikaan kuuluu esimerkiksi hitsauskiinnittimen vaihto kappaleenkäsittelijään. Sarjaa valmistettaessa tehtävääika ( $t_{te}$ ) [s] lasketaan valmistettua kappaletta kohden. Yhden kappaleen tehtävääika lasketaan seuraavasti. (Stenbacka 2011, s. 67–68.)

$$t_{te} = \frac{t_{as}}{n} + t_{va}, \quad (6)$$

jossa

$t_{as}$  on asetusaika [s],

$n$  on kappalemäärä,

$t_{va}$  on vaiheaika [s].

Hitsiainemäärä ( $M$ ) [kg] voidaan laskea hitsin railomuodon avulla, joka on poikkipinta-alan, pituuden ja hitsiaineen tiheyden tulo seuraavasti (Stenbacka 2011, s. 73):

$$M = A \times L \times \rho, \quad (7)$$

jossa

$A$  on hitsin poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ],

$L$  on hitsin pituus [ $\text{m}$ ],

$\rho$  on tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Seuraavissa kaavoissa on esitetty hitsien poikkipinnan teoreettisten tilavuuksien kaavoja. Todellisuudessa hitsin poikkipinta-ala poikkeaa laskennallisesta arvosta, johtuen esimerkiksi ylisuuresta hitsistä, poikkeavasta ilmaraosta tai railokulmasta. Jos pienahitsin  $a$ -mitta on 10 % suurempi, poikkipinta-ala kasvaa yli 20 %. Koska hitsauskustannukset ovat pitkälti riippuvaisia hitsattavan lisäaineen määrästä, kasvavat hitsauskustannukset saman verran, koska hitsattavan aineen määrä vaikuttaa lisäainekustannusten lisäksi myös lähes kaikkiin muihinkin osakustannuslajeihin. Lisäksi, jos hitsin muotona on kupu eli pinta on kupera, hitsin tilavuus kasvaa huomattavasti. Suuri kupu lisää pienahitsin tilavuutta ja samoin kustannuksia helposti kymmeniä prosentteja verrattuna tasahitsiin. Lisäksi kupuhitsi aiheuttaa tasahitsiä enemmän muodonmuutoksia kappaleeseen sekä suuremmat jännitykset hitsin ja perusaineen liittymäkohtaan. Pienahitsin teoreettinen poikkipinta-ala ( $A$ ) [ $\text{mm}^2$ ] lasketaan tasapienahitsille seuraavan kaavan mukaan. (Stenbacka 2011, s. 73–78.)

$$A = a^2, \quad (8)$$

jossa

$a$  on pienahitsin  $a$ -mitta [ $\text{mm}$ ].

Hitsin teoreettinen poikkipinta-ala ( $A$ ) [ $\text{mm}^2$ ] päittäisliitoksessa tasahitsille V-railossa saadaan seuraavan kaavan mukaisesti (Stenbacka 2011, s. 73):



$$A = s^2 \times \tan \frac{\alpha}{2} + s \times i, \quad (9)$$

jossa

$s$  on levynpaksuus [mm],

$\alpha$  on railokulma [ $^\circ$ ],

$i$  on ilmarako [mm].

Päittäisliitoksessa I-tasahitsin teoreettinen poikkipinta-ala ( $A$ ) [mm<sup>2</sup>] lasketaan seuraavan kaavan mukaan (Stenbacka 2011, s. 73):

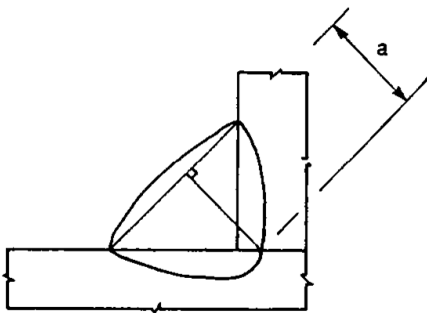
$$A = s \times i, \quad (10)$$

jossa

$s$  on levynpaksuus [mm],

$i$  on ilmarako [mm].

Yliuuren  $a$ -mitan lisätessä hitsauskustannuksia, kuvassa 23 esitetty tunkeuman huomioiminen pienahitsin  $a$ -mitassa puolestaan vähentää tarvittavan lisäaineen määrää ja laskee kustannuksia (Stenbacka 2011, s. 80). Käytettäessä mekanisoituja tai automatisoituja hitsausprosesseja, pienahitsin  $a$ -mittaa lisättynä tunkeumalla perusaineeseen voi käyttää efektiivisenä  $a$ -mittana. (SFS-EN 1993-1-8, s. 45; Stenbacka 2011, s. 80).



Kuva 23. Hitsin tunkeuman hyödyntäminen (SFS-EN 1993-1-8, s. 45).

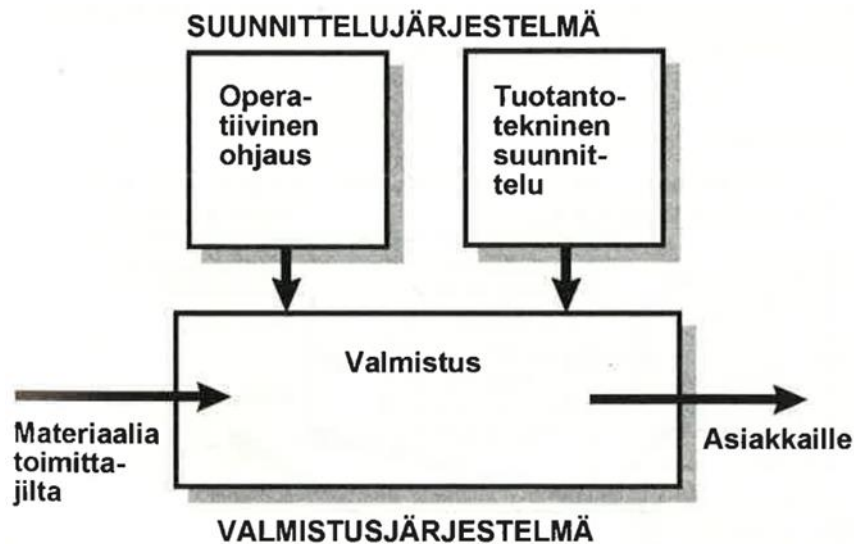
Tunkeuman hyödyntämistä pohdittaessa on huomioitava, että se on mahdollista vain ko-  
kein todennettuna ja lisäksi käyttöä voidaan rajoittaa standardeissa. Samantyyppiseen lop-  
putulokseen päästään tekemällä pienahitsi osaviistettyyn railoon. (Stenbacka 2011, s. 80).

## 4 Hitsaava konepaja

Tässä osiossa käydään läpi konepajan tuotantojärjestelmän rakennetta, työkulkua, tuotteen variointia, standardointia ja modulointia. Lopuksi laajennetaan näkökulmaa koskemaan koko toimitusverkostoa ja yrityksen toimintaa, jossa tutkitaan tuotettavuutta parantavia seikkoja.

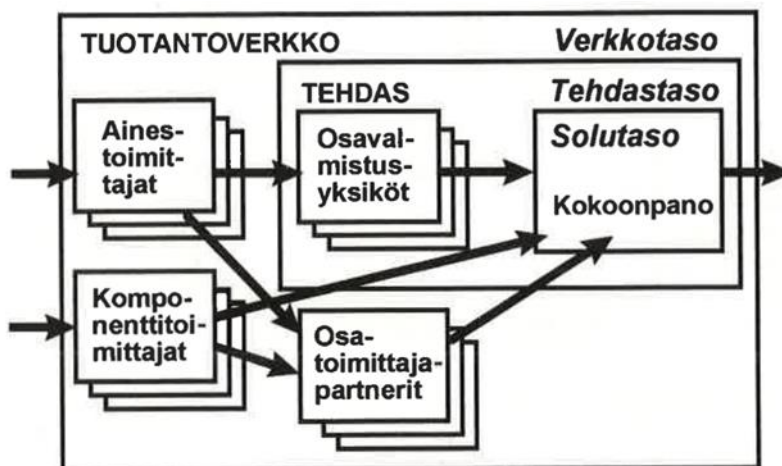
### 4.1 Konepajan tuotantojärjestelmä

Tuotannon perusjärjestelmän voidaan katsoa koostuvan kahdesta osasta, suunnittelujärjestelmästä ja valmistusjärjestelmästä (kuva 24). Varsinainen materiaalin jalostus tapahtuu tuotantojärjestelmässä, jonka valmistusvalmiudet luodaan tuotantoteknisellä suunnittelulla ja siihen liittyvillä työvälinevalinnoilla. Tuotannon operatiivinen ohjaus vaiheistaa tuotannon ja antaa toteutuskäskyt. (Lapinleimu, Kauppinen & Torvinen 1997, s. 15.)



Kuva 24. Tuotantojärjestelmän peruseriaate (Lapinleimu, Kauppinen & Torvinen 1997, s. 15).

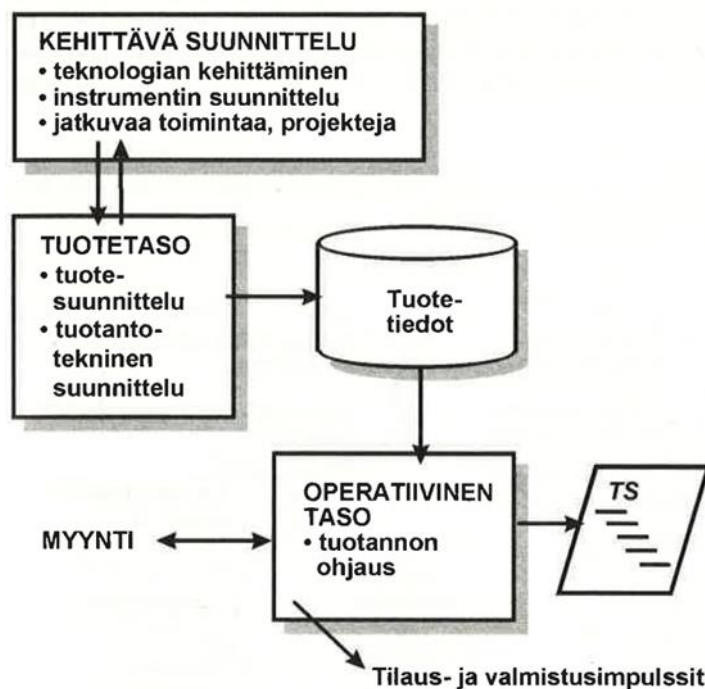
Tuotteita valmistavalla yrityksellä on yleensä päätehdas, joka voi koostua useista valmistus- ja kokoonpanoyksiköistä. Valmistusyksiköt voivat myös sijaita päätehtaan ulkopuolella. Yhdessä tuotantoyksiköt muodostavat tuotantoverkoston (kuva 25). Tuotantojärjestelmä voidaan jakaa neljään eri tasoon hierarkkisessa järjestyksessä. Ylimpänä on verkostotaso, jota seuraa tehdastaso. Seuraavana on valmistusyksiköitä edustava solutaso ja viimeisenä työasemataso. Järjestelmän ohjaus tapahtuu yleensä tehdastasolla ja niinpä se muodostaa koko järjestelmän ytimen. Suunnittelujärjestelmä toimii lähtökohtaisesti tehdastasolla, mutta osa suunnittelua voi tapahtua myös valmistusjärjestelmän sisällä. (Lapinleimu et al. 1997, s. 16.)



Kuva 25. Tuotantoverkosto (Lapinleimu, Kauppinen & Torvinen 1997, s. 16).

Osavalmistus ja kokoonpano muodostavat tehtaan valmistuksen ydinjärjestelmän. Hyvin toimiakseen ne tarvitsevat kuitenkin suunnittelu- ja tukijärjestelmiä. Ydinjärjestelmää sitoo materiaalin siirto- ja varastointijärjestelmä. Valmistuksen edellytykset luodaan järjestelmässä, johon kuuluu työvälinejärjestelmä sekä tuotantotekninen suunnittelu. Operatiivinen ohjausjärjestelmä vaiheistaa tuotannon ja toteuttaa materiaalihankinnat. Tehtaan ylläpitojärjestelmiin kuuluu kunnossapito, laadunvarmistus ja laaduntuottokyvyn ylläpito. Toiminnot ja järjestelmät integroituvat toisiinsa tietojärjestelmien kautta. (Lapinleimu et al. 1997, s. 19.)

Suunnittelu liittyy tavalla tai toisella jokaiseen tuotantoverkoston osaan ja tasoon. Yrityksen suunnittelujärjestelmä voidaan jakaa kolmeen pääosaan kuvan 26 mukaisesti, joita ovat kehittävä suunnittelu, tuotetason suunnittelu ja operatiivinen suunnittelu. Kehittävässä suunnittelussa tehdään päälinjauksia tuotekehitykseen ja tutkitaan mahdollisuuksia soveltaa toiminnassa eri tuote- ja tuotantoteknologioita. Tuotetasolla luodaan valmiudet tuotteen valmistamiseksi. Tuotetaso voidaan jakaa kahdeksi osaksi, jossa ensimmäisellä, tuotesuunnittelussa, luodaan tuotteen rakenne ja piirustukset. Toisella tasolla tuotantoteknisessä suunnittelussa päätetään mm. valmistusyksikkö, menetelmät ja työajat. Tuotetason tuottamat valmiudet tuotteen valmistamiseksi ovat lähinnä ohjelmia ja tietoa. Operatiivinen suunnittelu käsittää tuotannosuunnittelun, jonka pääasiallinen tehtävä on tuotantosuunnitelman laatiminen. Tuotantosuunnitelma ilmenee toteutuskäskyinä valmistusyksiköille ja tilauksina tehtaan ulkopuolisille toimittajille. (Lapinleimu et al. 1997, s. 20–21.)



Kuva 26. Suunnittelujärjestelmän kolme tasoa (Lapinleimu et al. 1997, s. 21).

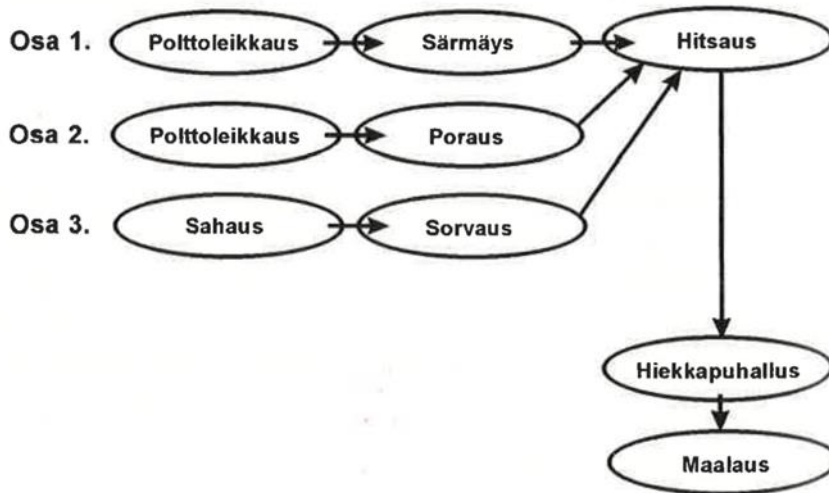
Tuotannon tavoitteena on valmistaa laadukkaita, asiakkaiden yksilöllisiin toiveisiin vastaavia tuotteita, nopealla ja varmallalla aikataululla kilpailukyiseen hintaan. Erityisesti investintihyödykkeitä valmistavissa yrityksissä asiakkaalle räätälöidyt tuotteet ovat tyypillisiä.

Tällöin paras tapa toteuttaa tuoterakenne on muodostaa moduuleja ja variantteja. (Lapinleimu et al. 1997, s. 37.)

Tuotteiden läpimeno olisi saatava niin lyhyeksi, että joitain poikkeuksia lukuun ottamatta tuotteen valmistus voidaan aloittaa vasta tilauksesta, sillä asiakasversioiden kaikkien tuotevarianttien ja moduulien varastointi on mahdotonta. Varastoon valmistus on lisäksi pääomaa sitovaa ja riskialtista, sillä varasto saattaa muodostua epäkurantiksi. Asiakaskohtainen valmistus pakottaa valmistuserät pieniksi. Suomessa kone- ja metalliteollisuus tuottaa pääasiassa investointi- ja kestokulutushyödykkeitä. Yksittäisten tuotteiden tuotantomäärät jäävät pieniksi ja tuotantojärjestelmiltä vaaditaan suurta nopeutta ja joustavuutta. Suomen teollisuudessa toistuva erätuotanto on yleisin tuotantomuoto, johon lasketaan myös yhden kappaleen toistuva erä. Eräkoot ovat tyypillisesti yhdestä sataan ja eriä tehdään vuodessa kahdesta viiteenkymmeneen. Erätuotannossa kilpailukyky perustuu siihen, että suunnitteluvaiheessa valmiudet valmistukseen ovat jo niin pitkällä, että valmistus on lähes häiriötöntä jalostavaa työtä. Erätuotannossa joudutaan usein tekemään lisäsuunnittelua, joka kasvattaa kustannuksia ja läpimenoaika. Tilauskohtaisen suunnittelun vähentämiseksi olisi pyrittävä siihen, että valinta tehdään jo olemassa olevista ratkaisuista. (Lapinleimu et al. 1997, s. 38–47.)

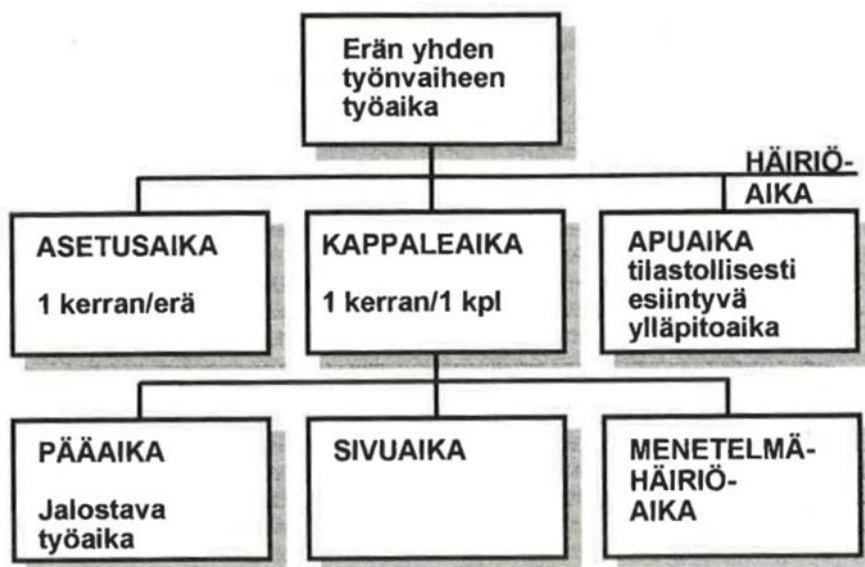
#### 4.2 Työnkulku ja työaika

Työvaihe käsittää kokonaisuuden, joka tehdään yhden työntekijän toimesta yhtäjaksoisesti yhdellä työpisteellä. Peräkkäiset työvaiheet muodostavat työkulun, jota voidaan havainnollistaa kuvan 27 mukaisella työkulkukaaviolla. Kaavio keskittyy valmistusprosessiin ja siinä ei esitetä työvaiheiden väissä olevia varastointeja, siirtoja eikä muita aputoimintoja. (Lapinleimu et al. 1997, s. 49.)



Kuva 27. Työnkulkukaavio (Lapinleimu et al. 1997, s. 48).

Erän yhden työvaiheen työaika muodostuu kuvan 28 mukaisesti asetusajasta, kappaleajasta ja apuajasta. Näiden lisäksi on häiriöaikaa, jotka käsitellään erikoistapauksina. Häiriöajat ovat ennakoimattomia tilanteita, kuten koneiden rikkoontumisia, lakkoja ja sähkökatkoja. (Lapinleimu et al. 1997, s. 50–51.)



Kuva 28. Työajan jakaantuminen (Lapinleimu et al. 1997, s. 50).

Asetusaika koostuu valmistettavan tuotteen vaihtoon tarvittavista toimenpiteistä. Erätuotannossa tällainen aika esiintyy kerran erää kohden. (Lapinleimu et al. 1997, s. 49.)

Kappaleaika jakaantuu pääaikaan, menetelmähäiriöaikaan ja sivuaikaan. Pääaika on jalostavan työn aikaa, jolloin valokaari palaa tai työstökone työstää kappaletta. Menetelmähäiriöaika on esimerkiksi työstökoneiden terien vaurioitumisesta johtuvaa hukkaa, jolloin sillä voi olla automatisoidussa tuotannossa huomattava merkitys. (Lapinleimu et al. 1997, s. 50.)

Koneilla tehtävä tuotanto aiheuttaa paljon sivuaikaa, joka koostuu (Lapinleimu et al. 1997, s. 50):

- työkappaleiden siirrosta ja kiinnittämisestä
- työkalujen vaihdosta
- koneen paikoituksista.

Apuajalla tarkoitetaan nykyisin tuotannon tuotantoedellytysten ylläpitämiseen käytettyä aikaa, joka voi olla esimerkiksi terien vaihtoa, tai koneeseen erikseen tehdyt puhdistukset ja voitelut. Läpimenoaika on tuotantojärjestelmän tehokkuuden tärkeimpiä mittareita. Läpimenoaika kuuluu jonkin toimintakokonaisuuden toteuttamiseksi. Kokonaisuus voi olla vaikkapa kokonainen tilaus, yksittäinen tuote tai työvaihe. Lyhyt läpimenoaika on merkki tehokkaasta tuotantojärjestelmästä ja se antaa pelivaraa tuotannon tasoittamiseen sekä ajoittamiseen. Osavalmistuksen läpimenoaikaa voidaan kevyessä ja keskiraskaassa tuotannossa lyhentää vähentämällä työvaiheiden määrää seuraavasti: (Lapinleimu et al. 1997, s. 51–56.)

- muuttamalla kappaleen konstruktiota
- käyttämällä useamman työvaiheen samalla tekevää konetta
- yhdistämällä työvaiheita soluperusteisella valmistusjärjestelmällä.



Suuret erät voivat varata tuotantolaitteita pitkäksikin aikaa, joka näkyy muiden tuotteiden valmistuksessa pidentäen läpimenoaikaa. Tällaisessa tapauksessa asetusaikaa olisi pyrittävä pienentämään mahdollisimman paljon ja mahdollisuuksien mukaan jaettava erä pienempiin osiin. Kokoonpanojen läpimenoaikaa puolestaan voi pienentää jakamalla kokoonpanotyötä rinnakkain tehtäviin osakokoonpanoihin ja kehittämällä osien valmistuksesta ja ohjauksesta häiriöttömämpää. (Lapinleimu et al. 1997, s. 58.)

Valmistettavuuden huomioon ottamista suunnittelussa pidetään tärkeänä tuotteen suunnittelussa ja korostetaan sen merkitystä kilpailukyvyn ja muiden tavoitteiden kannalta. Yrityksissä on taitavia suunnittelijoita ja tuotannon asiantuntijoita, jotka osaavat oman tehtävänsä hyvin. Suunnittelijan ensisijainen tehtävä on suunnitella mahdollisimman hyvä tuote asiakkaalle ja silloin esimerkiksi valmistettavuuden kehittäminen voi jäädä pienemmälle huomiolle. Oman työn näkökulmasta rinnakkaisen alueen tietämys on ymmärrettävästi pinnallista. Yhteistyön aikaansaaminen kokonaisuuden kannalta tärkeiden toimijoiden kesken on haasteellista. Yhteistoiminnan kehittämiseksi on erilaisia työvälineitä, joita ovat arvoanalyysi, suunnittelukatselmus, DFM (Design For Manufacturing)- ja DFA (Design For Assembly)-menetelmät ja laatutekniikan menetelmiä, kuten DOE (Design Of Experiments)- ja QFD (Quality Function Deployment)-menetelmät. (Lapinleimu et al. 1997, s. 280–281.)

#### 4.3 Tuotteen variointi, standardisointi ja modulointi

On olemassa karkeasti kaksi varioinnin pääluokkaa – sisäinen ja ulkoinen variaatio. Ulkoinen variaatio on asiakkaan ja myynnin kokemaan variaatiota, kun taas sisäinen variaatio ilmenee tuotantoverkostossa. Asiakkaan tarpeeseen vaikuttamattomat variantit tulee poistaa tuotteistosta. Ulkoisen variaation tulisi näkyä mahdollisimman myöhään sisäisessä variaatiossa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tuotteen varioituvat osat on kannattavaa asentaa koneeseen mahdollisimman myöhään. Täten aines- ja aihiovariantteja täytyy vältellä kokoonpanovarianttejakin enemmän. Tavoitteena on valmistaa mahdollisimman pienestä määrästä aines- ja aihiovariantteja suuri joukko osavariantteja, joista taas tulisi saada muodostettua mahdollisimman suuri määrä tuotevariantteja. Turhia variantteja on tietenkin vältettävä, koska se lisää kustannuksia. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 295–297.)

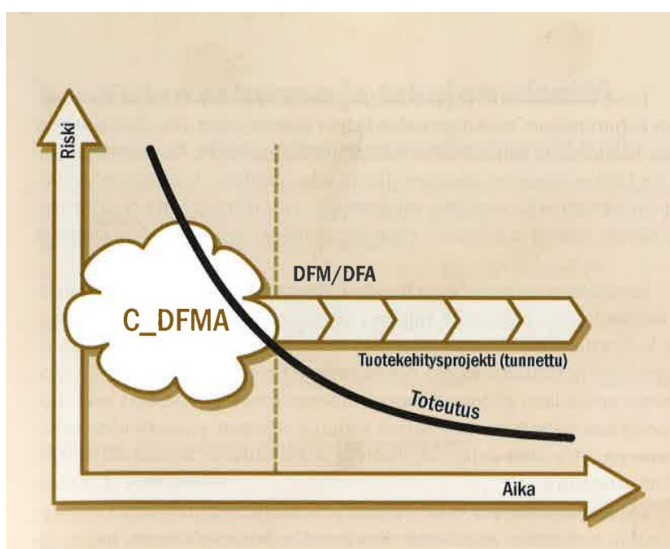
Standardisointi on toimintatapojen ja valikoimien tai vaikka suunnitteludetaljien yhtenäistämistä. Hyvä standardi edistää toimintaa eikä rajoita tai kahlitse. Standardisointia tapahtuu kansainvälisesti ja kansallisesti sekä yritystasolla. Yritysstandardi on hyvä tapa ohjata organisaatiota ja sen avulla voidaan ratkaista ongelmat aina samalla tavalla. Standardisoinnilla voidaan vaikuttaa yksittäisistä tuotedetaljeista kokonaiseen tuotteeseen. Standardisoinnin kevein taso on käytettävien materiaalien ja tarvikkeiden standardisointi. Tällä tasolla yksittäisen toimen vaikutus on pieni, mutta kokonaisuutena vaikutus on suuri. Seuraavaksi laajempi on komponenttistandardisointi ja laajin taso on tuotestandardisointi. (Lapinleimu et al. 1997, s. 291–293.) Tuotteiden standardisoinnilla pyritään vakioimaan asiakkaalle tarjottavia ominaisuuksia ja näin valmistaa enemmän vakiotuotteita. Standardisoinnin sovelluksena voidaan tuottaa moduuleja, joiden tarkoitus ei ole kaventaa tuotevalikoimaa, vaan tarjota strategisesti tärkeitä ominaisuuksia sisältäviä variantteja. (Österholm & Tuokko 2001, s. 8.) Standardituote on kerralla valmistettava kokonaisuus, jota tarvittaessa varioidaan standarditarvikkeita ja -komponentteja käyttäen. Mikäli standardituote ei sovellu asiakkaan tilaukseen, se pyritään kokoamaan moduuleista. Moduulituotteen tekeminen vaatii suhteellisen vakiintuneen tuotteen, johon ei suuresti tule muutoksia, eikä modulointia ilmeisistä syistä kannata tehdä yksittäistuotteelle. Modulointi tarvitsee suhteellisen ison työpanoksen, mutta onnistuessaan tulokset ovat hyvät. Onnistuminen edellyttää usein valmistuksen ja suunnittelun yhteistyötä. (Lapinleimu et al. 1997, s. 293–298.)

#### 4.4 Tuotettavuus

Kansainvälisessä kilpailussa menestymiseksi ei vaadita ainoastaan kehittyneempiä tuotteita vaan myös tuotteen valmistusta on kehitettävä. Tuotteen valmistettavuuden kehittämällä on saavutettu hyviä tuloksia, ja kokonaiskustannukset ovat joissain tapauksissa pienentyneet 5–10 %. Yksi valmistettavuuden kehittämisen työkalu on DFM. Laajassa merkityksessä DFM-menetelmä kattaa kaikki tuotekonstruktion ja kustannusten alentamiseen tähtäävät menetelmät ja järjestelyt. Suppeammin kyseessä on tietokantapohjainen systemaattinen tuotekehitysmenetelmä. Lempiäinen ja Savolainen painottavat teoksessaan DFM-menetelmän käyttöä jo konseptisuunnitteluvaiheessa, jolloin tuotteen rakenteeseen voidaan vielä vaikuttaa. Vaikka DFM-menetelmä suppeassa merkityksessään koostuu erilaisista tarkistuslistoista ja peukalosäännöistä, niin yhteistyö valmistuksen ja suunnittelun välillä on oleellinen osa menetelmää. Myös kokoonpantavuuden kehittämiseen kehitetty työkalu DFA on paljon

käytetty ja se tuo esiin kokoonpanon kannalta olennaiset seikat. Myös DFA on systemaattinen menetelmä, joka kulminoituu osien yhdistämiseen ja lukumäärän vähentämiseen kokoonpanossa. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s. 6–69.) DFA- ja DFM- menetelmiä käytetään usein yhdessä DFMA- (Design For Manufacturing and Assembly) menetelmänä, jolloin pelkäästään valmistuksen tai kokoonpantavuuden suosimisesta johtuvaa osaoptimointia voidaan välttää (Lapinleimu 2001, s. 30).

DFM- ja DFA-menetelmiin pohjautuva konseptivaiheen C\_DFMA-menetelmä muodostettiin Masina-teknologiaohjelmaan liittyvän tutkimushankkeen yhteydessä. Lyhenne tulee sanoista Conceptual Design For Manufacturing and Assembly ja se oli samalla myös hankkeen nimi. Hanke toteutettiin vuosina 2005–2008, ja siihen osallistui useita suomalaisia teollisuusyrityksiä ja yliopistoja. Menetelmä alleviivaa sitä, että tuotettavuus on otettava huomioon jo tuotekehityksen konseptivaiheessa ennen yksityiskohtaisia malleja ja sen on otettava huomioon laajempia kokonaisuuksia kuin pelkät konkreettiset yksityiskohdat. Menetelmä ei sulje pois muita tuotekehityksen menetelmiä, vaan tarjoaa parhaassa tapauksessa hyvän lähtökohdan jatkokehitykselle. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 4–15.) Kuvassa 29 esitetään C\_DFMA-menetelmä suhteessa perinteisesti toteutettuihin DFM- ja DFA-menetelmiin koordinaatistossa aika- ja riskiakselin suhteen.



Kuva 29. C\_DFMA-menetelmän sijoittuminen DFM- ja DFA-menetelmiin verrattuna riski-aika-koordinaatistossa (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 15).

DFM- ja DFA-menetelmillä tavoitellaan valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden parantamista. Menetelmät kohdistetaan perinteisesti osiin ja osatyyppeihin sekä niiden valmistukseen tai kokoonpanoihin ja kokoonpanotyyppihin. Menetelmiä käytetään yleensä vaiheessa, jossa tuotteita suunnitellaan jo tiettyä projektia varten. Menetelmien heikkoutena on, että niissä on käytetty yleistyksiä, kuten pinottavan kokoonpanotavan suosimista osa- ja kokoonpanomyönteisen suunnittelun periaatteena sekä analyysimenetelmänä, joilla valmistettavuutta ja kokoonpantavuutta on arvioitu. Mainitut periaatteet ja menetelmät johtavat siihen, että tehostetaan yksittäistä työvaihetta tai -menetelmää. Tilannetta katsotaan yksittäisen toimijan näkökulmasta, jolla ei ole rakenteellista vaikutusmahdollisuutta. Lopputuloksena saadaan osaoptimoituja vaiheita kokonaisoptimoinnin sijaan. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 15.)

Vaatus tuotettavuuden huomioimiseksi koko tuotteen elinkaaren ajaksi konseptivaiheessa on haasteellinen, sillä tuote on vielä abstraktilla tasolla. Menetelmän tavoitteen saavuttamiseksi seuraavat osa-alueet täytyy huomioida: (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 12.)

- tuotettavuus konseptivaiheesta alkaen
- tuotettavuuden hallinta, kun
  - tuotteessa käytetyt teknologiat muuttuvat
  - materiaalit muuttuvat
  - manuaalista työtä automatisoidaan tai päin vastoin
  - valmistus ulkoistetaan, siirretään ulkomaille tai siirretään erilaiseen yritysverkostoon
  - valmistusprosessi vaihdetaan
- kustannusten kokonaisvaltainen minimointi ja tuotettavuus
- innovaatiot ja tuotettavuus
- hiljaisen tiedon hyödyntäminen ja välittäminen
- saavutettujen hyötyjen jakaminen verkostossa

- kehittämisen organisointimallit mukaan lukien koulutus- ja ohjeistusmateriaalit.

Aihepiiriä tarkastellessa törmää nopeasti keskeisiin käsitteisiin valmistettavuus, kokoonpantavuus ja tuotettavuus. Nämä eivät ole pelkästään tuotteen, valmistusmenetelmien tai tuotantojärjestelmien ominaisuuksia. Ominaisuudet ovat suhteellisia ja määrittyvät kun tuote kohtaa tuotantojärjestelmän. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 13.)

Valmistettavuus on tuotteen ominaisuus, jonka ansiosta tuotteen osavalmistusmenetelmät, kuten yleisimmin koneistaminen ja hitsaaminen, onnistuvat tavoitteiden mukaisesti. Tavoitteiden täyttymisen kriteerit voivat olla esimerkiksi tavoiteltu kustannustaso, tasalaatuisuus ja tehokkuus. Näkökulma tarkastelussa on paikallinen, rajoittuen valmistusyksikköön tai -teknologiaan. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 13.)

Kokoonpantavuus on ominaisuus, jonka ansiosta tuote voidaan kokoonpanna laadukkaasti ja kustannustehokkaasti. Kokoonpantavuudella on sama vaikutus kokoonpanossa kuin tuotettavuudella on osavalmistuksessa. Tuotetta ja tuotantoa tarkasteltaessa kokoonpantavuuden viitekehityksessä, tuotteen osalta näkökulma laajenee osajoukkoihin ja tuotteiden välisiin sisäisiin kytkentöihin. Tuotantojärjestelmän näkökulma on yhä paikallinen, valmistusteknologiaan tai -yksikköön rajautuva. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 13.)

Tuotettavuus huomioi erityisesti järjestelmät edellisiä laajemmin. Järjestelmän näkökulma vaihtuu paikallisesta valmistusyksiköstä kokonaiseksi tuotantojärjestelmäksi. Tuotettavuus ilmentää tuotteen ja tuotantojärjestelmän yhteensopivuutta, kun tarkastellaan koko tuotantoverkosta. Tuotettavuus tuotenäkökulmasta suppeasti käsitettynä tarkoittaa tuotetta ja sen osia. Laajemmin tulkittuna tuotettavuus voi tarkoittaa koko tuotteistoa laajentaen tuotettavuuden ominaisuudeksi, jossa kohtaavat yrityksen tuotteisto ja koko tuotantoverkosto. C\_DFMA-menetelmän ydin koostuu tuotekehitystä ohjaavista 12 kehotuksesta, jotka esitetään irrallisina, mutta ovat yhteydessä toisiinsa muodostaen ajattelumallin. Näistä teeseistä valitaan kulloinkin sopiva kokonaisuus yrityksen ympäristön ja tarpeiden mukaan. (Huhtala

& Pulkkinen 2009, s. 13–58.) Seuraavassa on kirjoitettu auki työn kannalta oleellimmat teesit.

#### Keskity tuotteistoon yksittäisen tuotteen sijaan

Arkkitehtuurista lähtevä tuotekehitys antaa paremmat mahdollisuudet tuotekehitykseen, joka voi näkyä esimerkiksi suunnittelupiirteiden karsimisena tai yhdistelynä ja tuotteen elinkaaren vaiheista lähtevänä kehitystarpeena. Tuotteistoa mallintamalla voidaan osoittaa variaatioiden esiintyminen ja sijainti. Variaatioiden vähennystä koskevat päätökset tulee tehdä arkkitehtuurin lähtökohdista, mutta myös tuotantojärjestelmä ja toimitusverkosto tulee huomioida. Oleellista tuoteperheiden kehittämisessä on eri toimijoiden näkökulmista tapahtuva vakioitujen osien ja rakenteiden systemaattinen käyttö. Standardisoinnissa oleellista on erottaa vakioidulla tavalla ratkaistavat ongelmat varioidusta yksittäistapauksesta ja toisaalta kyky tuottaa kokonaisratkaisu ongelmaan. Keskittyminen yksittäisten tuotteiden sijaan tuotteistoon, tuoteperheisiin ja -alustoihin ei vain tehosta suunnitteluratkaisujen uudelleenkäyttöä, vaan myös mahdollistaa systemaattisen kehittämisen. Tuotteistoa tai tuoteperhettä koskevan tuotekehityksen tuloksena syntyneitä vakioituja ratkaisuja voi pitää pysyvämpänä kuin yksittäisiä suunnitelmia, jolloin tuotestrategia saadaan jalkautettua tehokkaasti yleisillä tuotteistoa ja tuotantoa koskevilla päätöksillä yrityksen toimintaan. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 59–61.)

#### Tunnista ja hyödynnä tuotteen liityntöjen ja vuorovaikutusten eri tasoja

Tuote vuorovaikuttaa ja liittyy toisiin tuotteisiin usealla tasolla ja eri asiayhteyksissä. Tuote voidaan esittää koostumusrakenteena, joka koostuu osakokoonpanoista, osista ja komponenteista. Osat ja komponentit voidaan jakaa vielä raaka-aineisiin ja erilaisiin aihioihin. Puhuttaessa tuotteen liitynnöistä muihin tuotteisiin, tarkoitetaan koostumusrakenteen liityntöjä toisiin yrityksen tuotteisiin. Koostumusrakenteessa liityntöjä muodostuu kaikilla sen tasolla. Tärkeän liitynnän muodostaa tuotteen liityntä kulloisenkin työvaiheen tuotantojärjestelmään. Välittömät hyödyt saavutetaan yhtenäistämällä suunnitteluratkaisuja ja käyttämällä samoja osia sekä moduuleja useissa tuotteissa. Välillisesti hyötyjä tulee esimerkiksi dokumentoinnin sekä varastoinnin määrään ja ylemmällä tasolla etua voidaan saada esimerkiksi

johdon strategisilla päätöksillä esimerkiksi tuotteissa käytettävän teknologian suhteen. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 61–63.)

#### Kasvata tuotteen ja järjestelmän kohtaamisen aluetta

Perinteisellä toimintatavalla kehitysjärjestelmä ja tuotantojärjestelmä kohtaavat, kun valmiit piirustukset toimitetaan tuotantoon. Tuotteen suuret muutokset on tehty, mutta tuotannon osallistuminen on jäänyt vähäiseksi. Tässä vaiheessa suunnitelmiin ei haluta enää tehdä suuria muutoksia ja tuotannon tehtäväksi jää toiminnan viilaaminen ja tilanteeseen sopeutuminen. Parempi tapa on oman tuotteiston ja tuotannon ymmärtämisellä sekä suunnittelu- ja tuotantojärjestelmän integroimisella pyrkiä tilaan, jossa syöte tuotannolta saadaan aikaisemmassa vaiheessa ja siirtyminen tuotteen valmistusvaiheeseen helpottuu. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 63–64.)

#### Arvioi tuotettavuutta tuotteen, prosessin ja verkoston muodostamassa kokonaisuudessa

Suunnittelun aiheuttamat kustannusvaikutukset eivät rajoitu pelkästään lopputuotteeseen. Tuotantoa kehitettäessä pelkästään tuotteeseen tai tuotantomenetelmiin keskittyminen ei riitä. Toimitusaika, tuotantokustannukset ja muut tuotannon ominaisuudet muodostuvat sen mukaan, miten tuotteita valmistetaan tuotantoverkostossa. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 66.)

#### Siirrä kehitystoiminnan painopistettä aikaisemmaksi

Tarkoituksena on jo konseptivaiheessa konkretisoida eri luonnostasolla olevia vaihtoehtoja tuotannon arvioitavaksi (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 67–69).

#### Hyödynnä tietoa pelkän tuottamisen sijaan

Perinteisesti suunnittelijan on ollut helpompaa tehdä uusia variantteja osista sen sijaan, että olemassa olevia rakenteita hyödynnettäisiin. Jokainen uusi nimike kasvattaa nimikkeistön

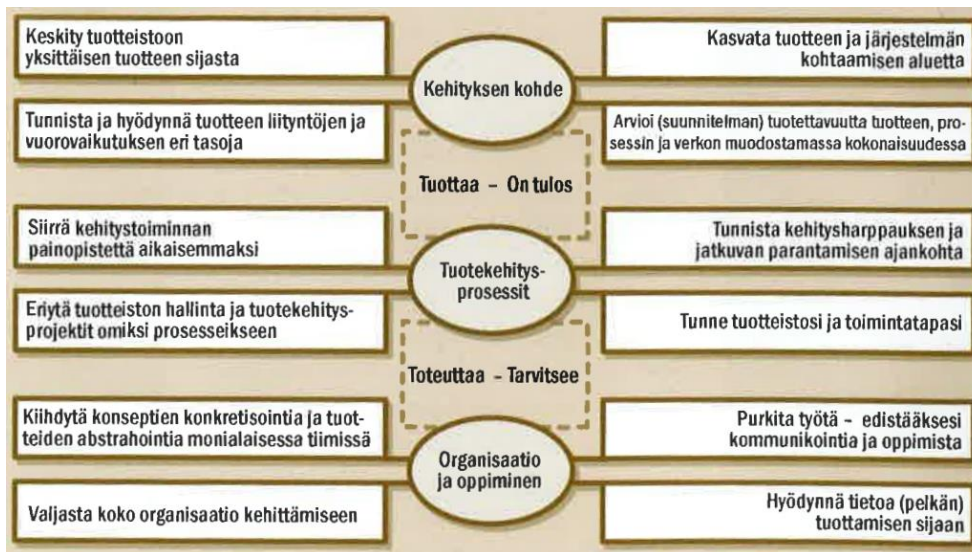
hallintakuluja ja lisää suunnittelijan käyttämää aikaa tuotetiedon etsintään ja oikeellisuuden varmistamiseen. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 78.)

Loput teesit Huhtala & Pulkkinen (2009, s. 70–78) mukaan ovat:

- eriytä tuotteiston hallinta ja tuotekehitysprojektit omiksi prosesseikseen
- tunne tuotteistosi ja toimintatapasi
- tunnista kehitysharppauksen ja jatkuvan kehittämisen ajankohta
- kiihdytä konseptien konkretisointia ja tuotteiden abstrahointia monialaisessa tiimissä
- valjasta koko organisaatio kehittämiseen
- purkita työtä – edistääksesi kommunikointia ja oppimista.

Kuvassa 30 esitetään teesit kolmen asiayhteyden mukaan, joita ovat kehityksen kohde, prosessit ja organisaatio. Tuotekehitysprosessin selkärangan muodostaa tuotteen, prosessien ja organisaation vuorovaikutus. Kehityksen kohde saadaan tuloksena tuottavista ja jalostavista prosessista, jotka organisaatio toteuttaa ja jotka tarvitsevat organisaation toimiakseen. Vaikka tuotekehityksellä ensisijaisesti haetaan vaatimusten mukaisen tuotemäärityksen aikaansaamista, se on myös oppimisprosessi, joka ei tapahdu ilman vuorovaikutusta tuotteiston ja tuotteen tai tuotteiston ja elinkaarijärjestelmien välillä. (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 58–59.)





Kuva 30. C\_DFMA-menetelmän ydin ryhmiteltyä kolmen asiayhteyden mukaan (Huhtala & Pulkkinen 2009, s. 58).

## 5 Case-tutkimus

Tässä osiossa esitellään työn tilaajan toimintaa, tuotteistoa ja tutkimuksen lähtötietojen keräyksen käytännön toteutusta. Seuraavissa kohdissa esitetään, kuinka tuotteet valittiin ja muokattiin robottihitsausystävällisemmäksi, sekä miten kiinnittimet suunniteltiin. Vaikka tekstistä voi saada kuvan vaiheittaisesta työjärjestyksestä, tuotteiden valinta, muokkaus ja kiinnitinsuunnittelu toteutettiin samanaikaisesti toistensa kanssa. Tämä johtuu siitä, että vuorovaikutus kiinnitinsuunnittelun ja tuotesuunnittelun välillä on kaksisuuntainen. Lisäksi suunnitteluratkaisuiden kehitys vaikuttaa samantyyppisten tuotteiden hitsattavuuden kannattavuuden mahdolliseen parantumiseen, joka aiheuttaa tarpeen käydä tuotteistoa uudelleen läpi.

Case-tutkimuksessa kohteena olevan yrityksen tuotteisto koostuu pitkälti asiakkaan tarpeen mukaan räätälöityistä tuotteista, joka näkyy erilaisten osien ja kokoonpanojen suurena määränä. Tuotteista on tehty paljon variaatioita, mutta moduloituja osia on vähän. Yrityksen hitsattava tuotteisto koostuu suurelta osin kokoonpanoista, joita valmistetaan yksittäisiä kappaleita vuodessa. Vuosittain tuotantoon tulevissa osissa ja niiden määrässä on huomattavaa vaihtelua. Suurimmat valmistetut sarjat ovat noin 100 kpl, jotka ovat erilaisia teloja. Yleinen suuren tuotekohtaisen sarjan koko on 10–15 kpl, joka voi jäädä ainoaksi tuotteen sarjaksi kyseisenä vuonna.

Hitsattavat kappaleet koostuvat pääpiirteittäin teräslevyistä, erilaisista tangoista, profiileista, rakenne- ja ainesputkista. Osa hitsatuista kokoonpanoista sisältää esikoneistettuja osia ja hitsatuista kappaleista suurin osa koneistetaan hitsauksen jälkeen. Hitsattavat materiaalit ovat pääosin rakenneteräksiä. Yrityksellä on oma tehdas, jossa pääosa tuotteista valmistetaan ja kasataan. Osa tuotteista ja kokoonpanoista valmistetaan alihankintana. Alihankinnasta voidaan tilata myös erilaisia palveluja, kuten lämpökäsittelyjä ja pinnoituksia. Yritys tilaa levyleikkeet ja joidenkin osien osavalmistuksen ulkoa. Hitsaamossa pääasiallinen hitsaustapa on manuaalinen umpilanka-MAG-hitsaus. Lisäksi hitsaamossa on robottisolu, joka koostuu radalla liikkuvasta hitsausrobotista, puolta vaihtavasta L-pöydästä ja yksiakselisesta

kääntöpöydästä. Hitsauksen laatuluokka on pääsääntöisesti C SFS-EN ISO 5817:n mukaisesti (SFS-EN ISO 5817, s. 6–21). Hitsaajat sekä robottioperaattorit suorittavat kappaleen viimeistelyn sekä hitsien silmämääräisen tarkastuksen.

Tutkimuksen lähtötiedot kerättiin haastatteleamalla valmistuksesta vastaavaa henkilöä sekä vierailemalla yrityksen tehtaalla. Haastattelussa kerättiin pohjatietoja yrityksen järjestelmistä ja toimintatavoista, joita tarkennettiin myöhempien vierailujen aikana. Vierailujen aikana käytiin läpi yrityksen tuotteistoa suunnitteluvastaavan kanssa, sekä tutkittiin itsenäisesti tuotteistoa robottihitsauksen mahdollisuuksien näkökulmasta. Tuotannosta haastateltiin yrityksen hitsausoperaattoreita ja hitsaamon työnjohtajaa. Keskusteluissa pyrittiin selvittämään tuotannon ja erityisesti hitsaavan valmistuksen tilaa yrityksessä. Haastatteluissa käytiin läpi mm. seuraavia asioita:

- robottihitsausjärjestelmän toiminta ja koetut haasteet
- toimintatavat robottihitsauksessa
- käytössä olevat hitsauskiinnittimet
- robotilla nykyisin hitsattavat kokoonpanot.

Vierailun aikana käytyjen keskustelujen ja havaintojen perusteella listattiin kategorioittain huomiot (liite 1) yrityksen toiminnasta. Oleellisimpana ilmi tuli, että hitsausrobotin kaikkia toimintoja ei käytetä ja kokoonpanojen rakenne hankaloittaa robottihitsausta. Jigittömän hitsauksen käyttöönoton pohdinta kuului toimeksiantoon ja sen mahdollisuuksia sekä haasteita pohdittiin tuotteiden valinnan, muokkauksen ja kiinnitinsuunnittelun ohessa, mutta se osuus työstä rajattiin kirjallisen esityksen ulkopuolelle, sillä tuotteiden muokkauksen tavoitteet eroavat osin tässä esitetystä perinteisestä piensarjatuotannon robottihitsauksesta.

## 5.1 Robottihitsattavan tuotteen valinta

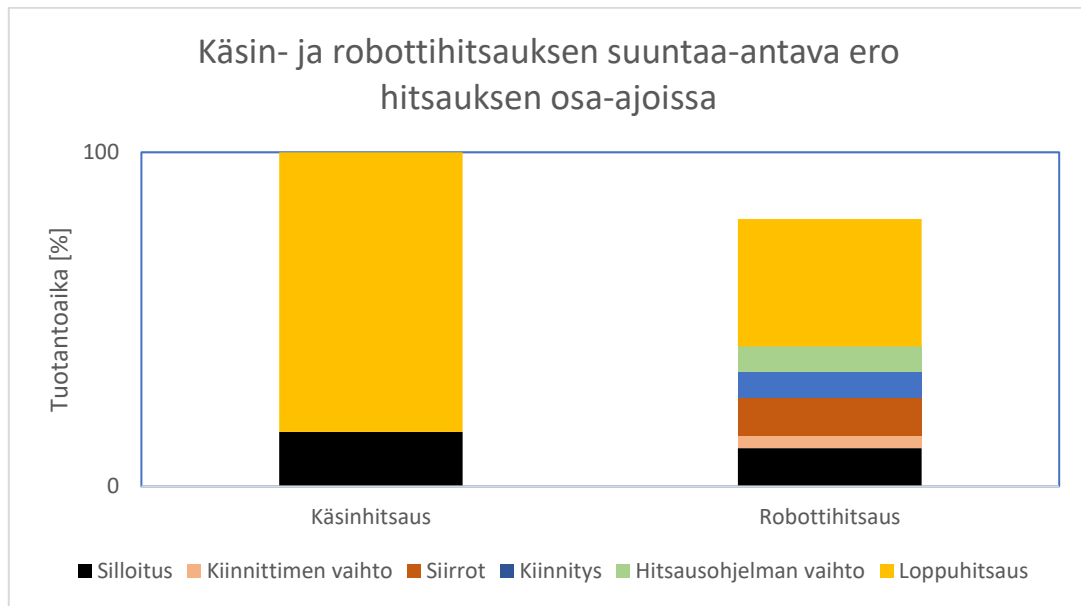
Robottihitsattavia tuotteita etsittiin kahdesta joukosta, joista ensimmäinen koostui seuraavan vuoden aikana tuotantoon tulevista tuotteista. Toinen joukko koostuu edeltäneen vuoden ajanjakson varaosamyynnin nimikkeistä. Varaosatuotteiden valmistusmääriä voidaan

joissain määrin ennustaa, joten suuntaa antavat tuotantomäärät ovat tiedossa ja tuotteita on mahdollisuus tehdä pieniä eriä varastoon.

Robottihitsattavan tuotteen valintaa pohjustettiin pohtimalla kannattavinta hitsattavan kappaleen ja kiinnittimen kokonaisuutta suhteessa tuotteistoon ja tuotantoon. Pohdinnassa huomioitiin myös valmistettavien tuotteiden vuosittainen määrä ja sarjakoko. Robottihitsauksella pyritään ensisijaisesti tehostamaan tuotantoa ja laskemaan kustannuksia. Jotta tähän tavoitteeseen päästään, täytyy hitsauksen nopeutua ilman että kustannukset nousevat ajansäästöä johtuvaa kustannusten alenemaa merkittävämmiin. Pieniä vuosittaisia kappalemääriä hitsatessa kokoonpanokohtaisista kiinnittimistä aiheutuvat kustannukset nousevat helposti kannattavuutta rajoittavaksi tekijäksi. Vaikka kyse olisi itsepaikoittuvan tuotteen loppuhitsauksesta, tarvitsee se jonkinlaisen kiinnityksen kappaleenkäsittelijään. Toiminnan tehostamiseksi ja kustannusten laskemiseksi kiinnityksen tulisi olla edullinen suhteessa sillä hitsattavien kokoonpanojen määrään. Lisäksi kiinnityksen kustannuksia tulee peilata käytön helppouteen ja nopeuteen turvallisuudesta tinkimättä. Tuotevalinnan alussa standardityypistä kiinnitysmahdollisuutta loppuhitsaukseen voimakkaalla magneetilla tai ruuvein pidettiin hyvänä lähtökohtana ja sen todettiin olevan toteutettavissa useimpiin tapauksiin.

Robottihitsauksen kustannukset muodostuvat pääosin itse tuotteesta, kiinnittimestä sekä suunnittelupanoksesta. Itsepaikoittuvat silloitetut kappaleet, jotka kiinnitetään yleiskäyttöiseen loppuhitsauskiinnittimeen, ovat pelkän tuotannon läpimenoajan näkökulmasta kannattavia hitsata seuraavilla ehdoilla

- Kun robottihitsauksen ja käsinhitsauksen loppuhitsausajan erotus on enemmän kuin ohjelman teko aika jyvitettyinä noin vuoden aikana valmistettaville tuotteille yhdistettynä aikaan, joka kuluu kappaleen robotille vientiin, tuontiin ja kiinnitykseen (kuva 31).
- Hitsauksen tasalaatuisuus ja oikea hitsiainemäärä huomioituna robottihitsaus voi olla kannattavaa hieman aiemmin.



Kuva 31. Käsin- ja robottihitsauksen suuntaa-antava ero hitsauksen osa-ajoissa.

Kokonaiskustannusten kannalta loppuhitsauskiinnittimen suunnittelu- ja valmistuskustannukset sekä tuotteiden mahdollisen uudelleensuunnittelun työpanokset täytyy myös huomioida. Lisäksi kustannuksia koostuu kiinnittimien varastoinnista, huollosta ja ylläpidosta.

Tuotekohtainen silloitus- tai loppuhitsauskiinnitin on kannattava valinta, mikäli hitsauksen jossain vaiheessa kiinnitin on välttämätön ja kiinnitinkustannukset ovat pienemmät kuin sillä saavutettu etu vaihtoehtoiskuluihin. Vaikka kiinnitin ei olisi välttämätön kappaleen hitsaamiseksi, voi se joissain tilanteissa nopeuttaa ja helpottaa hitsauskokoontalon asemointia niin, että ajansäästö asemoinnissa ja mahdolliset lisäsäästöt esimerkiksi laatukustannuksissa kattavat kiinnittimen kulut. Tuotekohtaisen kiinnittimen kannattavuutta arvioitaessa tulee huomioida ainakin seuraavat asiat:

- valmistusmäärät ja sarjakoko
- kokoonpanon rakenne
- kiinnittimen rakenne
- kiinnittimen materiaali- ja työkustannukset
- hitsauksen suoritus aika käsin ja robotilla sekä hitsien määrä

- suunnittelun tarve niin kiinnittimessä kuin työkappaleessa
- käsittelyajat
- asetusajat.

Lähtökohtana tässä työssä on saman kiinnittimen käyttö silloituksessa ja loppuhitsauksessa. Kiinnitinsuunnittelussa on myös huomioitava, että tuote voi olla lujustechnisten vaatimusten salliessa suurelta osin itsepaikoittuva ja vain yksittäiset osat tarvitsevat kiinnitintä, jolloin hitsit ovat usein paremmin robotin ulottuvissa ja kiinnitinkustannukset ovat pienemmät. Mikäli tuotannossa työn toistuvuuden tuomaa tehostumista sarjoissa ja mahdollisia uudelleensuunnittelupanoksia ei oteta huomioon, sarjakoko vaikuttaa yleiskäyttöisessä kiinnittimessä hitsattavan tuotteen kannattavuuteen vain, jos tuotekohtaisia kiinnittimiä on käytössä.

Paikoituspiirteiden ja sitä kautta osin tai kokonaan itsepaikoittuvien kappaleiden teko onnistuu hyvin riittävän tarkkoilla toleransseilla laserleikkeistä, joka tarkoittaa käytännössä 25 mm ja sitä ohuempia levynpaksuuksia. Vaikka niukkaseosteisten terästen laserleikkeitä on mahdollista yleisesti saada 30 mm paksuuteen saakka, usein leikatun reunan laatu kärsii lähellä laitteen suurinta kapasiteettia ja samalla leikkausnopeus laskee lisäten kustannuksia. Levyleikkeiden reikiä mitoittaessa käytettiin yrityksen linjausta ja toimintamallia, jossa reiän halkaisija saa olla pienimmillään puolet levyn paksuudesta laserleikkeessä ja plasma- tai polttoleikkeessä levyn paksuuden verran. Reikien mitoituksen sääntö on käytännössä todettu toimivaksi. Tietyissä tilanteissa osien teossa voidaan käyttää vesileikkausta paksujen ja tarkkojen levyosien valmistamiseksi, mutta kustannusvaikutus täytyy huomioida. Paikoituspiirteiden tarkkuuden ohella myös levyleikkeiden tasomaisuus vaikuttaa hitsauskokoontalon tarkkuuteen. Leikkeiden tasomaisuutta voidaan parantaa käyttämällä esimerkiksi SSAB:n laser-teräslaatuja, joille luvataan standardeja tiukemmat tasomaisuudet myös laserleikkauksen jälkeen (SSAB 2021). Toinen vartenotettava vaihtoehto tasomaisuuden parantamiseksi on oikaista levyjä leikkauksen jälkeen tätä varten valmistetulla valssaimella.

Käsittelyajan merkitystä kappaleen valmistuksessa ei kannata väheksyä. On loogista ajatella, että vähiten käsittelyaikaa tulee kappaleille, jotka ovat ilman nosturia siirrettävissä. Tämä todennäköisesti tarkoittaa sitä, että yli 25 kg painavien osien tulee sisältää enemmän hitsejä tai sarjan tulee olla suurempi. Toisaalta painavien kappaleiden käsittely tapahtuu nopeammin robotin kappaleenkäsittelijässä verrattuna kappaleen käsittelyyn siltanosturilla käsinhit-sauksessa. Tässä tapauksessa voisi ajatella, että yleisesti robottihitsauksessa nostoja tulee vähemmän, sillä tuote siirretään kappaleenkäsittelijään ja sieltä pois. Myös muut työturvallisuutta sekä ergonomisuutta ja viihtyvyyttä parantavat seikat huomioituna robottihitsaus voisi olla kannattavampi hitsaustapatapa myös suurilla kokoonpanoilla.

Tuotteen uudelleensuunnittelu on kannattavaa, jos suunnittelupanokset maksavat itsensä takaisin tuotteen elinkaaren aikana. Uudelleensuunnittelu ei koske pelkästään robottihitsattavia kappaleita, vaan tuotettavuutta parantavalla suunnittelulla voidaan tehostaa muutakin tuotantoa huomattavasti. Mahdollisia uudelleensuunnittelusta tulevia säästöjä:

- valmistuskustannukset
  - osien määrän väheneminen
  - hitsien määrän väheneminen
  - osavalmistuksen kulujen pieneneminen
  - käsittelyaikojen väheneminen
- laatukustannukset
- asennuskustannukset
  - kokoonpano
  - asennustyömaa
- kuljetuskustannukset.

Teoreettisesti yksittäiselle pienelle tuotteelle robottihitsausohjelmaa ei ole kannattavaa tehdä. Robottihitsaus on kannattavaa läpimenoajan näkökulmasta ohjelman teko huomioon otuna, kun kappaleiden valmistuksessa säästetty aika ylittää ohjelman tekoon kuluvan ajan. Ohjelman teon kannattavuutta arvioidessa tulee huomioida myös mahdollisten varianttien robottiohjelmien hyödyntäminen, jolloin ohjelmointi voi tulla pienemmällä valmistusmäärillä kannattavaksi. Myös käytännöt ohjelmien rakenteessa vaikuttavat toiminnan tehokkuuteen. Käyttämällä standardisoituja hitsejä ja selkeää standardisoitua aliohjelmiin jaoteltua ohjelmarakennetta, jossa on yleiskäyttöisiä ohjelman osia, voidaan ohjelmointiaikaa lyhentää merkittävästi.

Oma pohdintansa tulee siitä, että onko vastoin yleistä periaatetta valmistuksen nopeuttamiseksi järkevää lisätä kappaleeseen asemointia helpottava osa, mikäli sillä vältetään kiinnittimen valmistus. Lisäksi voi tulla pohdittavaksi, kannattaako valmistaa kokoonpano- tai sarjakohtaisia tulkkausosia valmistettavuuden parantamiseksi.

### 5.1.1 Robottihitsattavuuden arviointi

Valinnan pohjituksen jälkeen luotiin taulukon 3 mukainen vaatimuslista tuotteen valintakriteerien muodostamiseksi. Vaatimuslista muodostettiin ohjeistukseen VDI-2221 perustuen (Pahl, Beitz, Feldhusen & Grote 2007, s. 128–168.) Vaatimuslista perustuu kirjallisuustutkimukseen, tuotevalinnan pohjukseen, hitsaussolun ominaisuuksiin ja tuotannosta saatuun tietoon. Vaatimukset on jaoteltu ehdottomiin vaatimuksiin ja toiveisiin.

Taulukko 3: Robottihitsattavan tuotteen vaatimuslista

Vaatimukset			26.7.2021
Robottihitsattava tuote			
Muutokset	V= Vaatimus T= Toive	Vaatimukset	Vastuuhenkilö
		<b>Fyysiset vaatimukset</b>	
	V	Kääntöpöytään asennettaessa kappaleen on mahdollista 3 m lieriön sisään, jonka pituus on 5 m ja kappaleen massan on oltava alle 2000 kg	
	V	L-pöydällä massan on oltava alle 500 kg ja pyörintähalkaisijan alle 1600 mm	



Taulukko 3 jatkuu: Robottihitsattavan tuotteen vaatimuslista

	T	Levyleikkeiden paksuus oltava alle 30 mm	
	T	Yksi alle 30 mm paksuinen levyosa tai rakenneputki, jonka ympärille kokoonpano koostuu	
	T	Enemmän pienhitsejä kuin muita hitsityyppejä	
	T	Paljon robotilla hitsattavia hitsejä suhteessa kiinnityksen kustannuksiin	
	T	Itsepaikoittuva tuote	
	T	Mikäli tarvitaan kiinnitin, niin se on yksinkertainen ja koostuu levyleikkeistä	
	T	Kappale on käsiteltävissä käsin tai siinä on nostopisteet	
	T	Itsepaikoittuvan tuotteen hitsauskiinnitys onnistuu olemassa olevilla järjestelyillä	
	V	Tuote on S235, S355 tai E470 terästä	
	V	Hitsien täytyy olla robotin ulottuvissa	
		<b>Muut vaatimukset</b>	
	V	Sarjakoko ja/tai vuosittain valmistettava määrä on riittävä suhteessa robottihitsauksen mahdollistaviin toimiin (suunnittelu, kiinnitin).	

Päävaatimukset ja keskeiset asiat vaatimuslistasta saadaan abstrahoimalla vaatimuslistaa seuraavan vaiheistuksen mukaisesti (Pahl et al. 2007, s. 165).

1. Poistetaan vaatimuksista henkilökohtaiset mieltymykset.
2. Poistetaan vaatimukset, jotka eivät suoraan vaikuta toimintaan tai välttämättömiin rajoitteisiin.
3. Muutetaan kvantitatiiviset tiedot laadullisiksi ja jätetään jäljelle vain välttämättömät kohdat.
4. Toistetaan edellistä kohtaa, kunnes pääongelma muotoutuu.
5. Ilmaistaan ongelma ratkaisuneutraalein termein.

Abstrahointiprosessin vaiheet ja abstrahoimalla saadut tulokset esitetään taulukossa 4. Vaiheet 1 ja 2 on yhdistetty samaan, sillä vaiheella 1 ei todettu olevan merkittävää vaikutusta vaatimuslistaan.

Taulukko 4: Robottihitsattavan tuotteen vaatimuslistan abstrahointi

<b>Ratkaisun abstrahointi</b>
<b>Vaihe 1&amp;2</b>
Kääntöpöytään asennettaessa kappaleen on mahduttava 3 m lieriön sisään, jonka pituus on 5 m ja kappaleen massan on oltava alle 2000 kg
L-pöydällä massan on oltava alle 500 kg ja pyörintähalkaisijan alle 1600 mm
Enemmän pienhitsejä kuin muita hitsityyppejä
Paljon robotilla hitsattavia hitsejä suhteessa kiinnityksen kustannuksiin
Tuote on S235, S355 tai E470 terästä
Hitsien täytyy olla robotin ulottuvissa
Sarjakoko ja/tai vuosittain valmistettava määrä on riittävä suhteessa robottihitsauksen mahdollistaviin toimiin (suunnittelu, kiinnitin).
<b>Vaihe 3</b>
Kappaleenkäsittelijän täytyy pystyä käsittelemään kappaletta
Riittävästi robotisoitavia hitsejä suhteessa kiinnityksen kustannuksiin
Tuote on S235, S355 tai E470 terästä
Hitsien täytyy olla robotin hitsattavissa
Kappaleen uudelleensuunnittelu ja kiinnitinkustannukset ovat kannattavia suhteessa robottihitsauksen hyötyihin
<b>Vaihe 4</b>
Kappaleenkäsittelijän täytyy pystyä käsittelemään kappaletta
Tuote on S235, S355 tai E470 terästä
Hitsien täytyy olla robotin ulottuvissa
Kappaleen uudelleensuunnittelu ja kiinnitinkustannukset ovat kannattavia suhteessa robottihitsauksen hyötyihin
<b>Vaihe 5</b>
Robottihitsattavaksi tuotteeksi valitaan S235, S355 tai E470 teräksisistä muodostuvia kannattavasti robottihitsattavia kappaletta, joissa robotti ulottuu hitseihin ja kappaletta pystytään käsittelemään kappaleenkäsittelijöillä

Abstrahoinnin vaiheen neljä vaatimuksista muodostettiin kappaleen robottihitsattavuuden arviointitaulukko (taulukko 5). Kannattavuus on robottihitsauksessa monimutkainen yhtälö, joka muodostuu useasta eri tekijästä, joten vaatimus purettiin keskeisimpiin osatekijöihinsä arvioinnin helpottamiseksi. Arviointitaulukossa arviointikriteerit ovat osin abstrakteja ja suhteellisia, joita käyttäessä tulee osata sijoittaa ne yrityksen tuotteistoon ja toimintaan.

Taulukko 5: Robottihitsattavuuden arviointi

KAPPALEEN ROBOTTIHITSATTAVUUDEN ARVIOINTI	26.8.2021	Tuote 1	Tuote 2
Vaatimukset	Arvosteluasteikko		
Kappaleenkäsittelijä pystyy käsittelemään kappaletta	Ehdoton vaatimus	X	X
Tuote on S235, S355 tai E470 terästä	Ehdoton vaatimus	X	X
Hitsit ovat robotin ulottuvissa	Ehdoton vaatimus	X	X
Osien mittatarkkuudesta johtuva railon sijainnin epätarkkuus	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii käsinhitsausta tai railonhakua 3 = mahdollista paikoittaa jigillä tai hitsauksen aloituspiste on tarkka 5 = railojen sijaintitoleranssi on alle 1,5 mm	5	3
Vaatii esikoneistuksen lisäyksen jollekin osalle	<b>-5, 0</b> -5 = esikoneistuksen lisäys yhdelle osalle 0 = ei tarvetta lisätä esikoneistuksia	0	0
Kappaleen konstruktio	<b>1, 5, 10</b> 1 = monimutkainen kokoonpano tai kerrosrakenne, osilla useita asennussuuntia 5 = kohtuullisen yksinkertainen kokoonpano 10 = yksinkertainen kokoonpano, osilla yksi asennussuunta	5	5
Silloituskiinnittimen monimutkaisuus	<b>1, 3, 7</b> 1 = monimutkainen tai koneistusta vaativa silloituskinnitin 3 = yksinkertainen silloituskinnitin 7 = ei silloituskinnintä	3	7
Kappaleen siirto	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii nostimia ja kääntöjä, ei nostopisteitä 3 = vaatii nostimia, nostopisteet on tai ei tarvitse kääntöjä 5 = voidaan käsitellä käsin	3	3
Mahdollisuus käyttää jo olemassa olevia kiinnittimiä	<b>1, 3, 7</b> 1 = ei 3 = osittain 7 = kyllä	3	7
Nimikkeen uudelleensuunnittelun määrä [h]	<b>1-5</b> 1 = yli 50 tuntia 2 = 20-50 3 = 10-20 4 = 5-10 5 = alle 5	3	1
Vuosittainen valmistusmäärä [kpl] Mahdollisten variaatioiden määrä lisää lukua x 0,5	<b>1,3,10,15,20</b> 1 = alle 5 3 = 5-20 10 = 20-50 15 = 50-100 20 = yli 100	10	15
Robottihitsattavien hitsien tilavuus [mm <sup>3</sup> ]	<b>1-5, 7, 10</b> 1 = alle 25 000 2 = 25 000-50 000 3 = 50 000-75 000 4 = 75000-100 000 5 = yli 100000 7 = yli 150 000 10 = yli 200 000	2	4
<b>Yhteensä</b>		<b>34</b>	<b>45</b>

Arviointikriteerien käyttö vaatii alustavan näkemyksen, miten tuotetta voidaan kehittää paremmin robottihitsattavaksi, sillä taulukon vaatimukset joudutaan arvioimaan tässä tapauksessa uudelleensuunnitellusta kappaleesta. Tämä johtuu siitä, että uudelleensuunnittelulla voidaan parantaa robottihitsattavuutta monen tuotteen kohdalla ja osittain uudelleensuunnittelu on myös ainut keino mahdollistaa kannattava robottihitsaus. Taulukko soveltuu hyvin käytettäväksi myös tuotteille, jossa uudelleensuunnittelua ei tarvita. Taulukossa on ehdottomia vaatimuksia, joiden täyttymättömyys johtaa tuotteen hylkäämiseen. Tässä on huomioitava ehtojen suhteellisuus, eli esimerkiksi yhteen lyhyeen hitsiin puutteellinen ulottuvuus ei aiheuta kappaleen hylkäämistä. Loput kohdat pisteytetään kriteerikohtaisesti. Arviointikriteereihin ei otettu mukaan kokoonpanon osien lukumäärää, sillä osien suuri määrä ei välttämättä heikennä kappaleen robottihitsattavuutta, vaan ennemmin tilanteeseen vaikuttaa tuotteen konstruktion monimutkaisuus ja railojen sijainnin suuret toleranssit ketjuuntuvien paikoittavien piirteiden ja osavalmistuksen seurauksena. Suurimmat pisteet kerännyt tuote on potentiaalisin robottihitsaukseen siirrettävä kappale. Kappaleet, joiden pisteet ylittävät 35 ovat pääsääntöisesti hyvin robottihitsaukseen soveltuvia ja voidaan valita robotille hitsattavaksi. Kappaleiden robottihitsaukseen siirtämisestä muokkauksineen tulee tehdä alustava kustannusarvio ja erityisesti se tulee tarpeelliseksi pistevälin 30–35 kappaleille, joille valintataulukon tarkkuus ei riitä antamaan tarkkaa vastausta robottihitsauksen kannattavuudesta.

### 5.1.2 Projektitoimitusten tuotteet

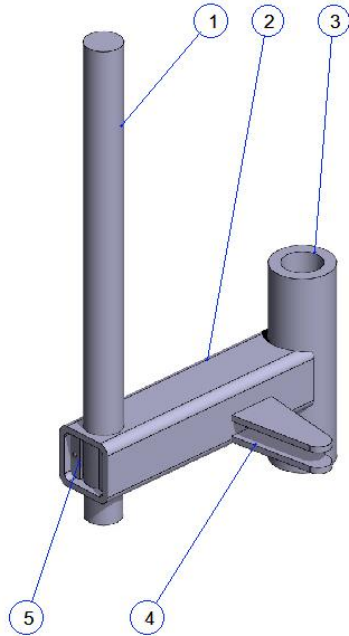
Tuotteistosta esivalittiin 7 hitsattavaa kappaletta painottaen kappaleenkäsittelijöiden kapasiteettia, tuotteen materiaalia ja tuotteen sekä sen varianttien valmistusmääriä. Perusteena näille esivalintakriteereille on se, että uudelleensuunnittelulla pystytään vaikuttamaan monessa tapauksessa muihin tekijöihin, joten huolellisempi arviointi tulee tarpeelliseksi esivalinnan jälkeen.

Projektitoimitusten kappale 1 esitetään kuvassa 32. Kappale sisältää 7 osaa, jotka ovat seuraavat:

1. Ø60 pyöröteräs
2. 100x100 RHS-rakenneputki
3. ainesputki

4. 2 x PL10 levyleike

5. 2 x 6x20 lattateräs.



Kuva 32. Kappale 1.

Kokoonpanon osista akseli ja rakenneputki ovat esikoneistettuja ja lisäksi kokoonpano koneistetaan hitsauksen jälkeen. Kappaleelle suoritettiin taulukon 5 mukaisesti robottihitsattavuuden arviointi. Tuotteen kohdalla ehdottomat kriteerit täyttyivät. Loput kriteerit arvioitiin taulukon 6 mukaisesti, jossa on taulukosta 5 poiketen lisätty sanallinen arvio selvittämään arvioinnin perusteita. Kappale sai kokonaispisteiksi 34.

Taulukko 6: Kappaleen 1 robottihitsattavuuden arviointi

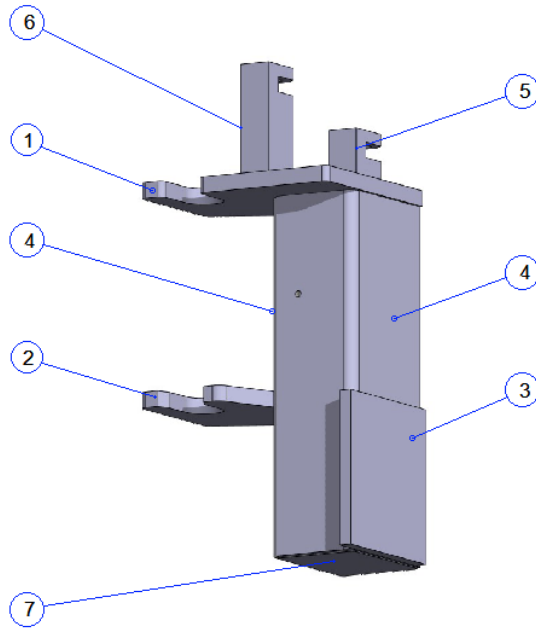
Vaativuudet	Arvosteluasteikko	Sanallinen arvio	Pisteet
Osien mittatarkkuudesta johtuva railon sijainnin epätarkkuus	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii käsinhitsausta tai railonhakua 3 = mahdollista paikoittaa jigillä tai hitsauksen aloituspiste on tarkka 5 = railojen sijaintitoleranssi on alle 1,5 mm	Kappale sisältää esikoneistettuja osia, joten railojen sijaintitoleranssi tulee olemaan oletettavasti alle 1.5 mm	5
Vaatii esikoneistuksen lisäyksen jollekin osalle	<b>-5, 0</b> -5 = esikoneistuksen lisäys yhdelle osalle 0 = ei tarvetta lisätä esikoneistuksia	Ei tarvetta lisätä esikoneistuksia	0

Taulukko 6 jatkuu: Kappaleen 1 robottihitsattavuuden arviointi

Kappaleen konstruktio	<b>1, 5, 10</b> 1 = monimutkainen kokoonpano tai kerrosrakenne, osilla useita asennussuuntia 5 = kohtuullisen yksinkertainen kokoonpano 10 = yksinkertainen kokoonpano, osilla yksi asennussuunta	Lähtökohtaisesti kokoonpano on kohtuullisen yksinkertainen ja uudelleensuunnittelulla on mahdollista vähentää osien määrää	5
Silloituskiinnittimen monimutkaisuus	<b>1, 3, 7</b> 1 = monimutkainen tai koneistusta vaativa silloituskiinnitin 3 = yksinkertainen silloituskiinnitin 7 = ei silloituskiinnitintä	Silloituskiinnitin ja hitsauskiinnitin voisivat olla sama, mikäli silloituskiinnitintä edes tarvitaan. Rakenne tulee olemaan arvion mukaan yksinkertainen	3
Kappaleen siirto	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii nostimia ja kääntöjä, ei nostopisteitä 3 = vaatii nostimia, nostopisteet on tai ei tarvitse kääntöjä 5 = voidaan käsitellä käsin	Kappaleen massa on noin 40 kg eli se vaatii nostinta siirtelyyn. Tuote voidaan siirtää ilman kääntöjä kappaleenkäsittelijään, mutta rakenteessa ei ole nostopistettä painopisteen lähellä	3
Mahdollisuus käyttää jo olemassa olevia kiinnittimiä	<b>1, 3, 7</b> 1 = ei 3 = osittain 7 = kyllä	Samantyyppisiä tuotteita ei ole, joten jos tuotekohtainen kiinnitin tarvitaan, kiinnitys on oletettavasti uniikki	3
Nimikkeen uudelleensuunnittelun määrä [h]	<b>1-5</b> 1 = yli 50 tuntia 2 = 20-50 3 = 10-20 4 = 5-10 5 = alle 5	Arvioitu uudelleensuunnittelun tarve on noin 15 tuntia, mikäli tuotekohtaista jiggiä ei tarvita	3
Vuosittainen valmistusmäärä [kpl] Mahdollisten variaatioiden määrä lisää lukua x 0,5	<b>1,3,10,15,20</b> 1 = alle 5 3 = 5-20 10 = 20-50 15 = 50-100 20 = yli 100	Tätä samaa nimikettä on menossa tuotantoon seuraavan vuoden ajanjaksolla 21 kpl ja varianteja 27 kpl, josta lasketaan arvo seuraavasti: 21 + 0,5 x 27 = 34,5	10
Robottihitsattavien hitsien tilavuus [mm <sup>3</sup> ]	<b>1-5, 7, 10</b> 1 = alle 25 000 2 = 25 000-50 000 3 = 50 000-75 000 4 = 75000-100 000 5 = yli 100000 7 = yli 150 000 10 = yli 200 000	Tuote sisältää a5 hitsiä 1088 mm ja puoli-V10 hitsiä 222 mm, yhteensä 33608 kuutiomillimetriä	2
<b>Yhteensä</b>			<b>34</b>

Kappale 2 (kuva 33) koostuu kahdeksasta osasta, joista osa on esikoneistettuja:

1. PL25 levyleike 1
2. PL25 levyleike 2
3. PL20 levyleike
4. 2 x särmätty PL10 teräslevy
5. esikoneistettu korvake 1
6. esikoneistettu korvake 2
7. PL2 teräslevy.



Kuva 33. Kappale 2.

Kappaleen valmistus sisältää koneistuksen ennen esikoneistettujen korvakkeiden hitsausta tarkan paikoituksen aikaansaamiseksi. Kappaleelle löytyi 9 varianttia ja kokoonpanorakenteen muokkauksella voitaisiin siirtää variointia myöhempään vaiheeseen. Löydettyjen varianttien suuri määrä johtuu siitä, että kappaleen liityntöjä selvittäessä kävi ilmi, että vastaavaa kappaletta käytetään myös toisessa tuotteessa pienin rakenteellisin muutoksin, jolloin samaa perusosaa olisi mahdollista käyttää molemmissa tuotteissa. Alkuperäinen kokoonpano tarvitsisi suhteellisen monimutkaisen kiinnittimen silloitukseen, mutta uudelleensuunnittelulla ja kahdella iterointikierröksellä kiinnittimestä päästiin kokonaan eroon. Kappaleen robottihitsattavuus arvioitiin ja tulokset esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7: Kappaleen 2 robottihitsattavuuden arviointi

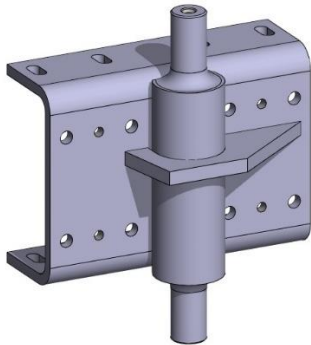
Vaativuudet	Arvosteluasteikko	Sanallinen arvio	Pisteet
Osien mittatarkkuudesta johtuva railon sijainnin epätarkkuus	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii käsinhitsausta tai railonhakua 3 = mahdollista paikoittaa jigillä tai hitsauksen aloituspiste on tarkka 5 = railojen sijaintitoleranssi on alle 1,5 mm	Uudelleensuunnittelussa kappaleessa on särmättyjä levyjä, joten railon sijainti voi muuttua. Hitsin alkupiste saadaan kuitenkin määriteltyä tarkasti	3
Vaatii esikoneistuksen lisäyksen jollekin osalle	<b>-5, 0</b> -5 = esikoneistuksen lisäys yhdelle osalle 0 = ei tarvetta lisätä esikoneistuksia	Ei tarvetta lisätä esikoneistuksia	0

Taulukko 7 jatkuu: Kappaleen 2 robottihitsattavuuden arviointi

Kappaleen konstruktio	<b>1, 5, 10</b> 1 = monimutkainen kokoonpano tai kerrosrakente, osilla useita asennussuuntia 5 = kohtuullisen yksinkertainen kokoonpano 10 = yksinkertainen kokoonpano, osilla yksi asennussuunta	Kokoonpano on kohtuullisen yksinkertainen ja uudelleensuunnittelulla saadaan konstruktiota parannettua	5
Silloituskiinnittimen monimutkaisuus	<b>1, 3, 7</b> 1 = monimutkainen tai koneistusta vaativa silloituskiinnitin 3 = yksinkertainen silloituskiinnitin 7 = ei silloituskiinnitintä	Silloituskiinnitin ja hitsauskiinnitin voisivat olla sama, mikäli silloituskiinnitintä edes tarvitaan. Rakente tulee olemaan arvion mukaan yksinkertainen	7
Kappaleen siirto	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii nostimia ja kääntöjä, ei nostopisteitä 3 = vaatii nostimia, nostopisteet on tai ei tarvitse kääntöjä 5 = voidaan käsitellä käsin	Kappaleen massa on noin 70 kg eli se vaatii nostinta siirtelyyn. Tuote voidaan siirtää ilman kääntöjä kappaleenkäsittelijään, mutta rakenteessa ei ole nostopistettä painopisteen lähellä	3
Mahdollisuus käyttää jo olemassa olevia kiinnittimiä	<b>1, 3, 7</b> 1 = ei 3 = osittain 7 = kyllä	Hahmoteltu perusmallin kiinnitysjärjestelmä voisi sopia osittain tuotteen kiinnittämiseen.	7
Nimikkeen uudelleensuunnittelun määrä [h]	<b>1-5</b> 1 = yli 50 tuntia 2 = 20-50 3 = 10-20 4 = 5-10 5 = alle 5	Arvioitu uudelleensuunnittelun tarve on noin 60 tuntia	1
Vuosittainen valmistusmäärä [kpl] Mahdollisten variaatioiden määrä lisää lukua x 0,5	<b>1,3,10,15,20</b> 1 = alle 5 3 = 5-20 10 = 20-50 15 = 50-100 20 = yli 100	Tätä samaa nimikettä on menossa tuotantoon seuraavan vuoden ajanjaksolla 60 kpl ja varianteja 60, josta lasketaan arviointi seuraavasti 60+ 0,5 x 60 = 90	15
Robottihitsattavien hitsien tilavuus [mm <sup>3</sup> ]	<b>1-5, 7, 10</b> 1 = alle 25 000 2 = 25 000-50 000 3 = 50 000-75 000 4 = 75000-100 000 5 = yli 100000 7 = yli 150 000 10 = yli 200 000	Tuote sisältää a5 hitsiä 3046 mm ja tilavuus on 76150 kuutiomillimetriä	4
<b>Yhteensä</b>			<b>45</b>

Projektiosien kappale 3 (kuva 34) koostuu akselista, PL20 levyleikkeestä ja särmätystä PL15 levyleikkeestä. Kappale suunniteltiin loppuhitsattavaksi yleiskiinnittimessä. Kappaleen konstruktio on varsin yksinkertainen ja osat ovat paikoituspiirteiden vuoksi jo nyt lähes itsepaikoittuvia. Tuotantomäärä kappaleella on variantit mukaan luettuina 120 kpl seuraavan vuoden aikana. Näiden tekijöiden perusteella tuote sai robottihitsattavuuden arvioinnista yhteispisteet 54.

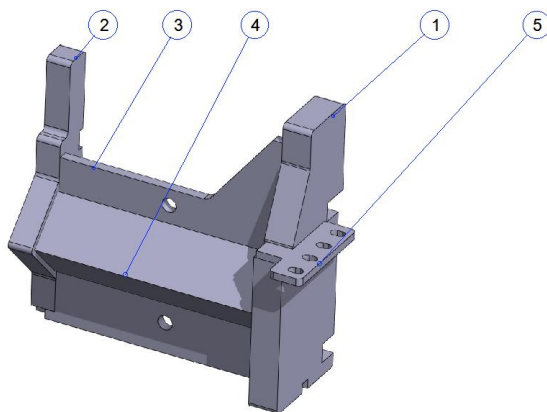




Kuva 34. Kappale 3.

Kappale 4 (kuva 35) sai kokonaispisteet 47. Kappale oli jo aiemmin suunniteltu robottihitsaus huomioituna, mutta tässä tapauksessa loppuhitsauskiinnitys haluttiin tehdä yleiskiinnittimeen modulaarisen kiinnittimen sijasta, jotta kappale saadaan hitsattua molemmilta puolilta ilman kappaleen irrotusta. Kappaleen osat ovat seuraavat:

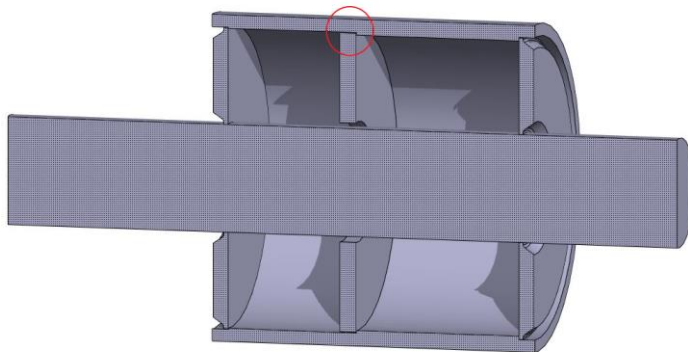
1. PL60 levyleike
2. PL50 levyleike
3. PL20 levyleike
4. 120 x 120 x 12 kulmateräs
5. PL15 levyleike.



Kuva 35. Kappale 4.

### 5.1.3 Varaosatuotteet

Varaosatuotteista valikoitiin ensiksi yli 8 kappaleen vuosittaisen menekin omaavat tuotteet. Seuraavaksi valittiin hitsaamalla valmistettavat tuotteet, joka vähensi potentiaalisten tuotteiden lukumäärän 15 kappaleeseen, joista 11 hitsataan jo nyt omalla robotilla tai valmistetaan alihankinnassa. Jäljellä oleville tuotteille tehtiin tarkempi analyysi. Huomattiin, että jäljellä olevat tuotteet ovat rakenteeltaan sellaisia, että hitsejä on haastava robotisoida. Pisteet vertailuun otetulla kokoonpanolla olivat 28, jotka ovat heikot verrattuna projektiosien potentiaalisimpiin kappaleisiin. Pääsääntöisesti tuotteet vaatisivat sellaisia muutoksia, jotka vaikuttavat mahdollisesti toimintaan ja muutamien kymmenien kappaleiden vuosittaisella volyyminä näiden kappaleiden robotisointia ei tässä tapauksessa viety pidemmälle. Sen sijaan nykyään robottihitsattavien telojen osien mittatarkkuudessa huomattiin haastattelujen perusteella robotisoitavuutta hankaloittavia poikkeamia. Telan lieriön sisämitta vaihtelee valmistustoleransseista johtuen niin, että kuvan 36 ympyröidyssä kohdassa olevaan hitsiin voi jäädä niin suuri ilmarako, että hitsi ei täytä laatuvaatimuksia. Lisäksi lieriön ulkomitta vaihtelee esikoneistetun piirteen toleroinnin puutteen vuoksi niin, että telan paikoitus loppuhitsauskiinnittimessä vaihtelee.



Kuva 36. Telan lieriön esikoneistus.

Tilanteen korjaamiseksi esitetään aineen poistamista esikoneistuksen yhteydessä niin, että lieriön sisäpinnalle syntyy keskimääräisellä sisämitalalla paikoittava olake ja lieriön sisämitta vakioituu. Samalla kuvassa olevien levyjen ulkomitta muutetaan koneistuksiin sopiviksi. Telan ulkomitan esikoneistukseen lisätään toleranssi, jolloin paikoitus hitsauskiinnittimessä vakioituu. Esikoneistuksella ei aliteta materiaalipaksuutta, joka lieriöllä pienimmillään on,

joten lujuus ei kärsi muutoksesta. Jatkokehityksessä on tarkistettava, että lieriön eri osien välisestä materiaalipaksuudesta johtuva mahdollinen muutos telan toiminnassa ei aiheuta ongelmia toimintaan ja samalla on huomioitava mahdollinen vaikutus rakenteen väsymiseen. Nyt tehdyillä muutoksilla ei arvella olevan suurta vaikutusta valmistuskustannuksiin tai läpimenoaikaan, mutta laatupoikkeamien määrän odotetaan vähenevän.

## 5.2 Tuotteiden muokkaus

Pääosa tuotteista tarvitsi jonkinlaista muokkausta robottihitsauksen mahdollistamiseksi. Robottihitsattavuudeltaan parhaaksi analysoituja tuotteita muokattiin analyysivaiheen suunnitelmien perusteella. Muokattavaksi valittiin kappaleet 2, 3 ja 4, joihin tehtiin muutoksia valmistettavuutta parantaen, mutta alkuperäinen toiminnallisuus säilyttäen. Koska näkökulmässä työssä on valmistuksellinen, tuotteiden lujuustarkastelua ei tehdä, mutta se tulee huomioida näiden toimien ohella. Lisäksi on huomioitava, että valinnat robottihitsattavuuden parantamiseksi tehdään yrityksen laitteiston suorituskyvyn ja varusteiden mukaan. Uudelleensuunnittelu on kompromissi erilaisista tavoitteista, joita tässä työssä ovat:

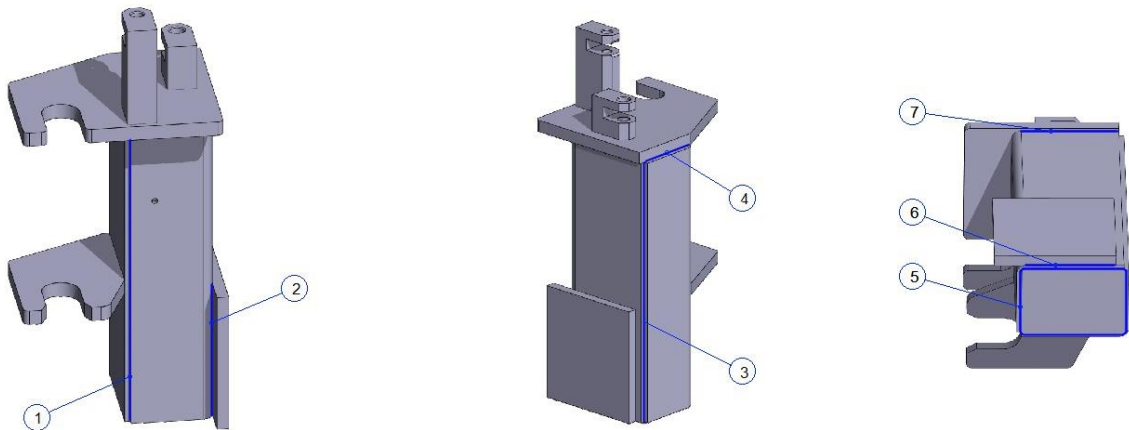
- robottihitsauksen edellytysten parantaminen
- konstruktion yksinkertaistaminen
- osien vähentäminen
- osien yhdistäminen
- kustannusten alentaminen.

Tässä tapauksessa robottihitsauksen edellytysten parantaminen on ensisijainen tavoite, koska sillä saavutetaan etuja myös tuotantotavan tehostumisena. Täten muilla arviointikriteerien osa-alueilla hyväksytään pieni negatiivinen kehitys, mikäli saavutetaan hyvä kokonaisratkaisu.

Uudelleensuunnittelun tarve kappaleissa 3 ja 4 oli vähäisempää, joten seuraavassa keskitytään kappaleeseen 2, jonka avulla esitetään työssä tuotteen muokkauksen periaatteet.

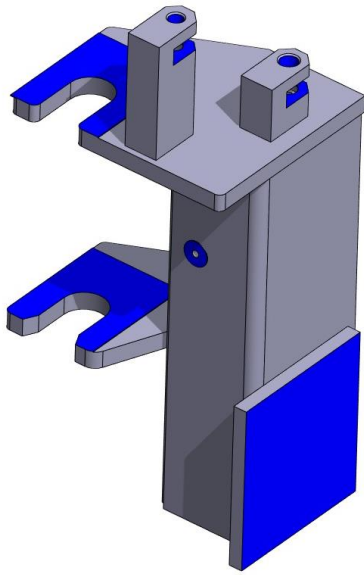
Kappale 2 oli kolmanneksi potentiaalisin kappale siirrettäväksi robottihitsaukseen suurehkoista uudelleensuunnittelutarpeesta huolimatta. Kappale tulee dynaamiseen rasitukseen ja etäisyyden toleranssi joidenkin levyleikkeiden välillä on - 0, + 2 mm. Pääasiallinen syy toleranssiin ovat pienet koneistusvarat, jolloin pystytään välttämään paksumman teräslevyn käyttö. Kappaleen uudelleensuunnittelu aloitettiin kartoittamalla kappaleen robottihitsausta vaikeuttavat kohdat. Pääongelma alkuperäisessä kappaleessa on, että se ei ole itsepaikoitettava, joten se tarvitsisi silloituskiinnittimen, jotta se voitaisiin asemoida riittävän tarkasti. Lisäksi osien lisäys tuotteeseen tapahtuu useasta suunnasta ja hitsit on sijoitettu niin, että robottihitsaus on haastavaa. Kuvassa 37 esitetään kappaleen muutamia ongelmakohtia.

1. Levyjen nurkkaliitoksessa oleva hitsi on riskialtis läpipalamiselle, eikä railonseurantaa voida käyttää.
2. Särmätyn levyn taivutuksen ja levyosan väliin tuleva hitsi on robotille haastava, koska railo on kapea ja syvä.
3. Myös toinen nurkkaliitos on riskialtis läpipalamiselle, eikä railonseurantaa voi käyttää.
4. Särmätyn PL10 levyn ja PL25 levyn välinen hitsi ei mahdollista railonseurantaa, eikä railon sijainti ole särmäyksen toleransseista johtuen kovin tarkka. Lisäksi hitsissä on läpipalamisen vaara.
5. Palkin pää tulpataan PL2 levyllä, joka on todella haastava paikoittaa ja hitsata robotilla.
6. Särmätyn PL10 ja PL20 levyn liitokseen hitsataan puoli-V-hitsi, jolloin railon paikoitus on haastavaa ja railonseuranta mahdotonta.
7. Särmätyn PL10 ja PL25 levyn liitoksen pienahitsissä ei voi käyttää railonseurantaa matalan levyn reunan vuoksi.



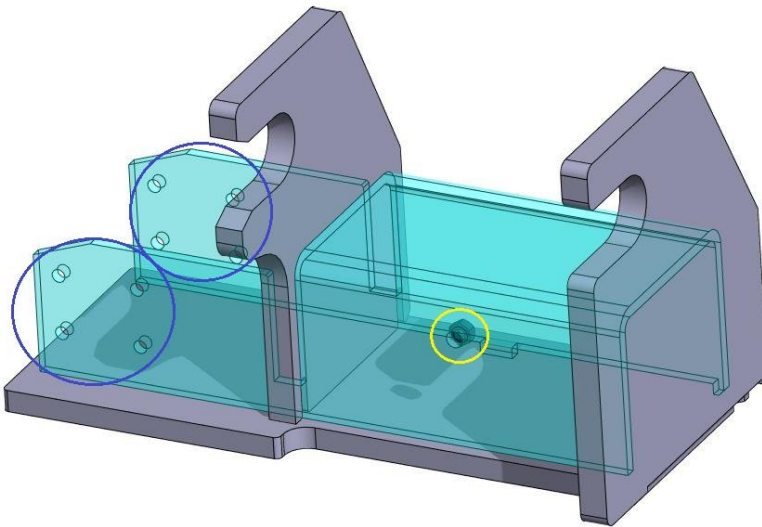
Kuva 37. Kappaleen 2 ongelmakohdat robottihitsauksen näkökulmasta.

Uudelleensuunnittelua rajoittavat kappaleen liityntäpinnat muihin tuotteen osiin, jotka on esitetty kuvassa 38. Särnätyistä levyistä koostuva palkki muodostaa riittävän lujuuden ja jäykkyyden kappaleeseen, sekä pitää liitospintoja sisältävät osat kiinni toisissaan. Teräslevyjen paksuudet määräytyvät osin riittävästä koneistusvarasta ja lisäksi koneistettavien kierneiden kestoon tarvittavasta materiaali-paksuudesta. Lähtökohtana uutta konstruktiota muodostaessa oli, että kappaleen lujuus ei saa laskea alle lähtötason. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että materiaali-paksuudet ja hitsit pysyvät vähintään samana. Teräslevyistä valmistettua palkkia ei voi korvata standardimitoitetulla kuumavalssatulla teräspalkilla, sillä saatavilla ei ole sopivan kokoista palkkia. Liityntä- tai ulkomittojen muutos aiheuttaisi suuret muutokset liittyvissä osissa tai lisäisi vastaavasti kuluja muualla tuotteen valmistusketjussa.



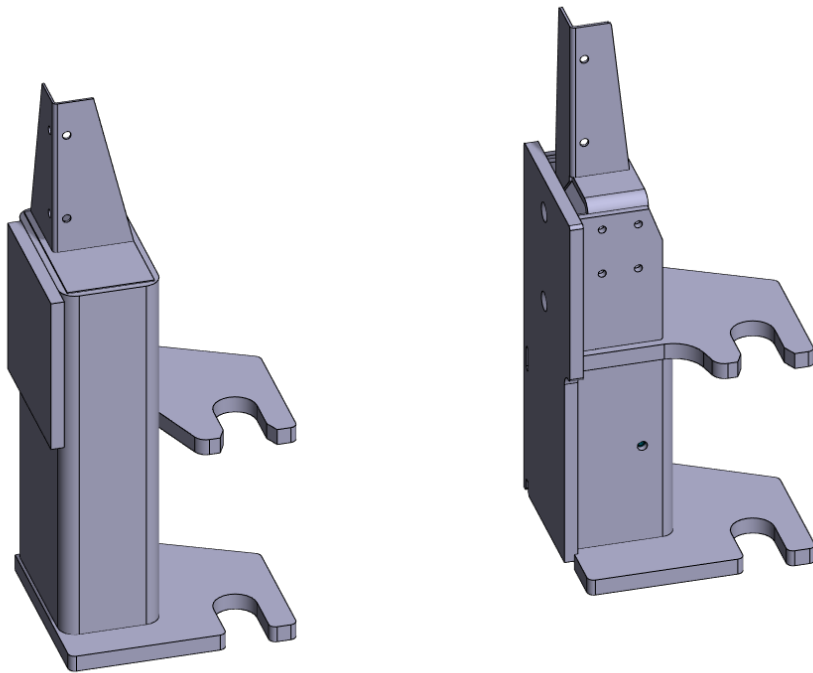
Kuva 38. Kappaleen 2 liityntäpinnat.

Kappaleesta on kaksi eri liityntäpinnoilla olevaa variaatiota, jotka poikkeavat toisistaan siinä määrin, että ne päätettiin pitää erillisinä variaatioina. Uudelleensuunnittelun konseptivaiheessa tuotosta esiteltiin suunnittelusta vastaavalle henkilölle sekä tuotantoon, jotta saataisiin laajasti ulkopuolista näkemystä ja palautetta. Kappaleesta tehtiin kaksi luonnosta kiinnittimiseen, ennen kuin lopulliseen ratkaisuun päästiin. Uudelleensuunnittelun kappaleen oleellisin ero alkuperäiseen on särmättyjen PL10 levyjen vaihto yhteen levyleikkeeseen (kuva 39) ja tuotteen modulointi niin, että luotiin erillinen hitsauskokoontalo, jolloin variantin luonti siirtyy seuraavaan vaiheeseen, jossa koneistuksen jälkeen liitetään korvakkeet. Kuvassa 39 on ympyröitynä keltaisella aiemmin levyleikkeeseen ennen hitsausta kierteitetyn reiän korvaus hitsausmutterilla.



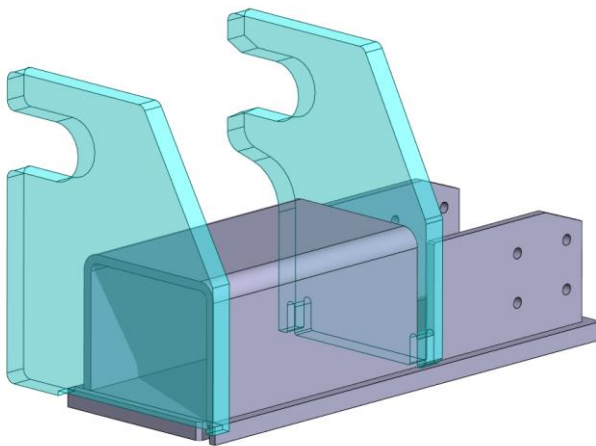
Kuva 39. Uudelleensuunniteltu kappale 2.

Kahdessa variantissa pystyttiin variantin luonti siirtämään vielä pidemmälle kokoonpanovaiheeseen, jossa aiemmin hitsattu lisäosa voidaan liittää ruuviliitoksella levyleikkeessä kuvassa 39 sinisellä ympyröityihin reikiin. Vertailu alkuperäisen variantin ja uudelleensuunnitellun kokoonpanon välillä esitetään kuvassa 40, jossa vanha variantti on vasemmalla ja uusi oikealla. Vanhassa variantissa käytettiin rakenneputkea levyleikkeiden sijaan, koska rajoitetta ulkomittojen ja levyn reunojen sijaintien suhteen ei ole. Tässä tapauksessa nähtiin järkevämmäksi korvata vanha rakenne uudella hitsauskokoonpanolla, jotta varianttien lukumäärä saadaan pidettyä minimissä. Variantit ovat lähes identtisen kuormituksen alaisena, joten palkin poikkileikkauksen pienehkö muutos ei vaikuta kappaleen lujuuteen tai taipumiin. Vanhalle ja uudelle kappaleelle tehtiin alustava FEM (Finite Element Method) -lujuustarkastelu, jotta voitiin varmistua jo tässä vaiheessa, että paikoituspiirteiden sijainti ei aiheuta merkittäviä jännityspiikkejä ja jännitykset pysyvät turvallisella tasolla.



Kuva 40. Kappaleen 2 variantin vanha ja uusi versio.

Uusi kappale rakentuu yhden levyn päälle, johon kuvassa 39 korostettuna esitetty särmätty levy paikoittuu toisen sivun paikoituspiirteillä. Muiden levyjen paikoitus toisiinsa esitetään kuvassa 41.

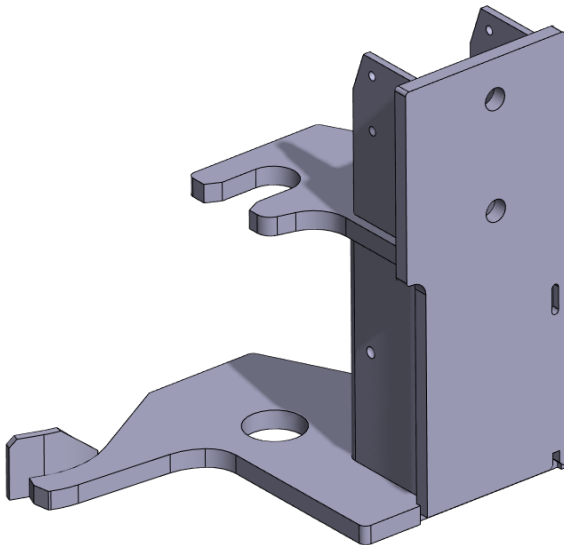


Kuva 41. PL25 levyleikkeiden paikoitus kappaleessa 2.



Levyleikkeet on tarkoitus leikata laserilla, jotta lopputulos on tarkka ja lämmön aiheuttamat muodonmuutokset ovat kohtuullisia verrattuna leikkauskustannuksiin. Kaikki hitsit lukuun ottamatta paikoittavien piirteiden tulppahitsejä ja yhtä silloitusvaiheessa hitsattavaa lyhyttä hitsiä, ovat hitsattavissa robotilla ja railojen sijainti on tarkka. Kokoonpano on tarkoitus silloittaa hitsaajan työpisteellä ja siirtää kuvan 41 asennossa loppuhitsauskiinnittimeen.

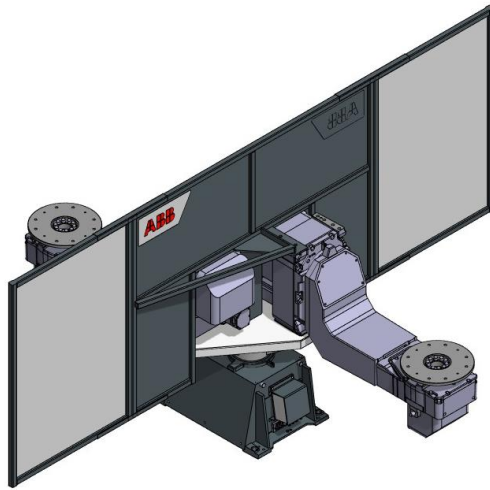
Alkuperäisessä tuotteessa olleet esikoneistetut korvakkeet hitsataan vasta seuraavassa vaiheessa koneistuksen jälkeen. Koneistuksessa tehdään muiden piirteiden ohella korvallisten paikan merkintä, joita on muutamia riippuen mikä variaatio on kyseessä. Uuteen moduuli-osaan on tarkoitus koneistaa kohdistusmerkinnät kaikille mahdollisille korvallisen sijainneille, jolloin kahta peruskokoonpanoa käyttäen voidaan kiinnitettävien osien valinnalla valmistaa kaikki variaatiot. Myös kuvassa 42 esitetty toinen peruskokoonpano käyttää pitkälti samoja osia, joka standardoi tuotteistoa.



Kuva 42. Kappaleen 2 variantti eri liityntäpinnoilla.

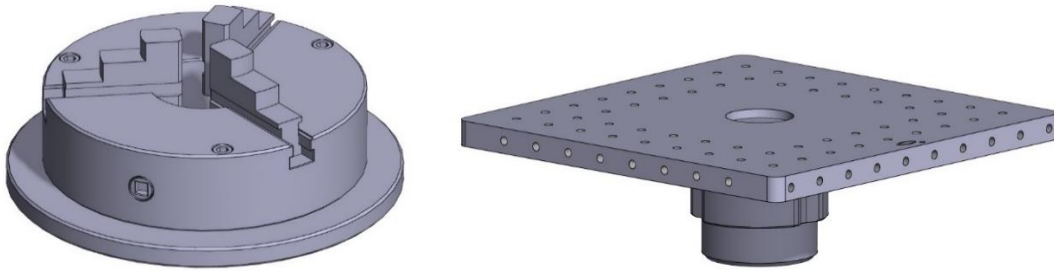
### 5.3 Kiinnitinsuunnittelu

Kappaleenkäsittelijänä puolta vaihtava kaksiakselinen L-pöytä (kuva 43) mahdollistaa monipuolisemmat hitsausasennot yksiakseliseen pöytään verrattuna, joka tarkoittaa keskimäärin enemmän hitsattavia hitsejä, joista useampi voidaan hitsata jalkoasennossa. Täten kaikki L-pöytään soveltuvat kappaleet kannattaa hitsata siinä, mikäli kapasiteettia on käytettävissä. Lisäksi kaksipuoleinen pöytä mahdollistaa toisen puolen latauksen sillä aikaa, kun toista hitsataan, joka lisää tehokkuutta entisestään.



Kuva 43. Puolta vaihtava kaksiakselinen servopöytä.

Pöydän varusteina kummallakin puolella on kuvassa 44 esitetty itsekeskittävä kolmileukapakka, johon voidaan tarvittaessa lisätä samassa kuvassa oleva modulaarisen kiinnittimen kiinnityslevy. Modulaarinen kiinnitysjärjestelmä sisältää tällä hetkellä standardinomaisia itse valmistettuja kiinnitystarvikkeita.



Kuva 44. Kolmileukapakka (vasemmalla) ja kiinnityslevy (oikealla).

Kolmileukapakka toimii hyvin tietyn tyyppisten kappaleiden, kuten telojen hitsauksessa, joskin kiinnitystapa saattaa vaatia kappaleen käännön, jotta kaikki hitsit saadaan hitsattua. Modulaarinen kiinnitin on yleiskäyttöinen ja sopii hyvin moneen hitsauskoonpanoon. Ongelmaksi muodostuu tämän työn osalta, että modulaarinen kiinnitin ei mahdollista standardikiinnitysosilla kaikkien hitsien hitsausta tai osaa ei saada kiinnitettyä toivotulla tavalla. Modulaarinen kiinnitin toimii parhaiten yksinkertaisissa kokoonpanoissa ja esimerkiksi jo silloitetuttujen kappaleiden loppuhitsauskiinnittimissä.

Kiinnitinsuunnittelua pohjustettiin miettimällä ominaisuuksia, mitä ideaalilla kiinnittimellä on. Lähtökohta tässä tapauksessa on, että tuote tarvitsee jonkin kiinnittimen. Tässä vaiheessa ei eroteltu, onko kyseessä silloitus- vai loppuhitsauskiinnitin. Tavoiteltavia ominaisuuksia ovat:

- yksi kiinnitin sopii kaikille tuotteille
- työkappale maadoittuu hitsausta varten ilman erillisiä toimenpiteitä
- tuote paikoittuu toistettavasti oikealle paikalleen
  - vastinpinnat eivät kulu
  - kiinnitin ottaa huomioon hitsauksen muodonmuutokset
  - kiinnitin itsessään ei muuta muotoaan lämmön johtumisen seurauksena
- materiaali- ja työkustannukset ovat alhaiset

- kiinnitin mahdollistaa kaikkien hitsien hitsauksen jalkoasennossa
- työkappaleen kiinnittäminen onnistuu ilman työkaluja
- kiinnitin itsessään on käsin helposti siirrettävissä ja ilman työkaluja yksinkertaisesti kiinnitettävissä
- kiinnitin on turvallinen käyttää
  - työkappaleen kiinnitys on turvallinen energiansyötön katketessa
- työkappale on vaivaton irrottaa hitsauksen jälkeen.

Ideaalin kiinnittimen ominaisuuksien perusteella luotiin taulukon 8 mukainen vaatimuslista, jossa eriytettiin muutamia ideaalin kiinnittimen ominaisuuksia osatekijöihinsä ja annettiin lukuarvoja vaatimuksille, joille niitä pystyi antamaan. Koska kaikkia ideaalin kiinnittimen vaatimuksia ei voida täyttää, kiinnittimen ominaisuudet ovat kompromissi, jossa pyritään kokonaiskuvassa parhaaseen mahdolliseen tuottavuuteen kaavan 1 mukaan.

Taulukko 8: Hitsauskiinnittimen vaatimuslista

Vaatimukset			16.8.2021
Hitsauskiinnitin			
Muutokset	V= Vaatimus T= Toive	Vaatimukset	Vastuuhenkilö
		<b>Fyysiset vaatimukset</b>	
	V	Kestää hitsauksesta aiheutuvan lämmön eli ei sula, mutta ei myöskään muuta muotoaan liikaa prosessista aiheutuvan lämmön vaikutuksesta	
	V	Kestää hitsattavan kappaleen muodonmuuoksista aiheutuvat voimat ja lisäksi kappaleen massasta sekä kappaleen käsittelystä aiheutuvat voimat.	
	T	Ei saa estää hitsausta	
	T	Kiinnitin on käsin siirrettävissä eli massa on alle 25 kg	
	V	Kiinnitin ja kappale yhdessä ei saa ylittää kappaleenkäsittelijän suurinta sallittua kuormitusta	
	V	Kiinnitin ei saa estää kappaleenkäsittelijän liikkeitä	
	T	Materiaalina teräs	
		<b>Toiminnalliset vaatimukset</b>	
	T	Kiinnittimen irrotus ja kiinnitys tapahtuu ilman työkaluja	
	V	Hitsattava kappale on nopea irrottaa suhteessa hitsin määrään	
	V	Pitää kappaleen luotettavasti kiinni	

Taulukko 9 jatkuu: Hitsauskiinnittimen vaatimuslista

	T	Sopii mahdollisimman monelle eri kappaleelle ilman merkittäviä toimintaa heikentäviä kompromisseja tai kustannusten nousua	
	T	Nostokahvat/nostolenkki	
	V	Nosturilla siirrettävien kappaleiden ja kiinnittimien kiinnityssuunta on ylhäältä alas	
	V	Kiinnitinkohtainen merkintä tunnistuksen	
	V	Turvallinen käyttäjälle	
		<b>Kustannukset</b>	
	T	Vältetään koneistusta	
	V	Kiinnitinratkaisu mahdollistaa kohtuudella arvioitavissa olevan mahdollisimman suuren tuottavuuden tuotteen/tuotteiden elinkaaren aikana	

Vaatimuksia abstrahoiitiin tässä tapauksessa vaiheeseen 2 saakka, jonka tulokset ovat taulukossa 9. Loput ratkaisun tiivistämisen ja yleistämisen vaiheet jätettiin pois, sillä tämän riittävän tarkkoja vaatimuksia sisältävän listauksen arveltiin toimivan parhaiten kiinnittimen suunnittelussa.

Taulukko 10: Kiinnitinratkaisun abstrahointi

<b>Ratkaisun abstrahointi</b>
<b>Vaihe 1&amp;2</b>
Kestää hitsauksesta aiheutuvan lämmön eli ei sula, mutta ei myöskään muuta muotoaan liikaa prosessista aiheutuvan lämmön vaikutuksesta
Kestää hitsattavan kappaleen muodonmuuoksista aiheutuvat voimat ja lisäksi kappaleen massasta sekä kappaleen käsittelystä aiheutuvat voimat.
Kiinnittimen irrotus ja kiinnitys tapahtuu ilman työkaluja
Kiinnitin ei saa estää kappaleenkäsittelijän liikkeitä
Hitsattava kappale on nopea irrottaa suhteessa hitsin määrään
Pitää kappaleen luotettavasti kiinni
Kiinnitinkohtainen merkintä tunnistuksen helpottamiseksi
Turvallinen käyttäjälle
Kiinnitinratkaisu mahdollistaa kohtuudella arvioitavissa olevan mahdollisimman suuren tuottavuuden tuotteen/tuotteiden elinkaaren aikana

Mahdollisimman suuren tuottavuuden aikaan saamiseksi panokset tulee saada pieneksi tulokseen nähden, joka tarkoittaa sitä, että kiinnittimen kustannusten tulee olla alhaiset, ellei suuremmilla panoksilla saada aikaan tuotannon tehostumista tai kustannussäästöjä jossain muussa tuotteen valmistuksen vaiheessa. Tutkimuksen kohteena olevat kappaleet saadaan itsepaikoittuviksi, joten kiinnittimen edullisuus on hyvä näkökulma suunnitteluun edellyttäen, että muut vaatimukset täyttyvät. Kiinnittimen materiaaliksi valittiin teräs seuraavilla perusteilla:

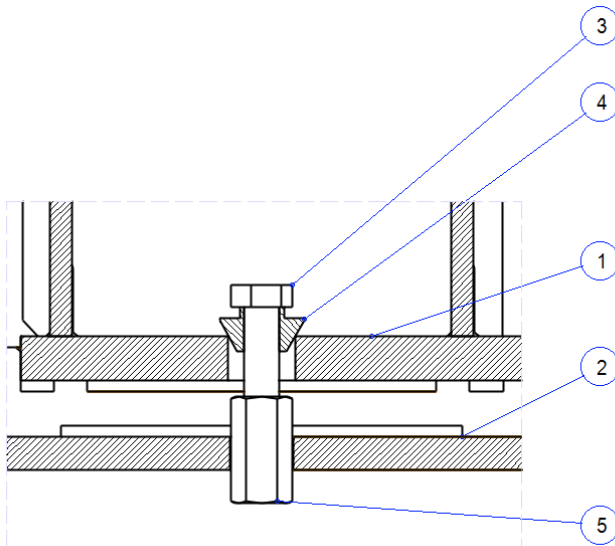
- edullinen suhteessa moneen muuhun materiaaliin
- luja materiaali, joka kestää korkeita lämpötiloja
- lämpötilan muutos vaikuttaa teräkseen vähemmän verrattuna vaikkapa alumiiniin
- yrityksen nykyinen tuotanto tukee teräksen käyttöä
- saatavissa riittävän mittatarkkoja levyleikkeitä, johon myös kiinnittimen yksilöintitunnus voidaan merkitä.

Itsepaikoittuvissa tuotteissa loppuhitsauskiinnitin on yleensä varsin yksinkertainen, joten kiinnittimen massan suhteen ei pitäisi ilmetä suuria ongelmia. Jäljelle jää vaatimukset, jossa kiinnittimen tulee olla turvallinen käyttää ja mahdollisimman monelle työkappaleelle sopivan kiinnityksen tulee olla nopea ja luotettava. Vaihtoehtoisiksi kappaleen kiinnittämiseksi loppuhitsauskiinnittimeen hahmottuivat pikakiinnityspuristin, hitsausmagneetti, ruuvit ja nollapistekiinnitin. Ruuvikiinnitys suunniteltiin tapahtuvan kahdella kartioruuvilla, jotka voidaan kiinnittää hitsauskiinnittimeen esimerkiksi hitsaamalla jatkomutteri DIN 6334 kiinnittimen laserleikattuun reikään tai kiinnittimeen koneistettuihin kierrereikiin. Työkappaleet kiinnitetään halkaisijaltaan 30 mm reiästä kartioruuveilla kiinnittimeen, jolloin lämmöstä aiheutuvat muodonmuutokset eivät aiheuta takertumista kiinnittimeen. Vastepintana toimivat ruuvien kannat tai kiinnitinlevyn tasopinta. Esimerkki ruuvikiinnityksestä on esitetty kuvassa 45, jossa merkityt osat ovat seuraavat:

1. työkappale
2. loppuhitsauskiinnitin
3. kuusioruuvi M16

4. kartio

5. jatkomutteri DIN 6334.



Kuva 45. Ruuvikiinnityksen periaate.

Magneetikiinnitys suunniteltiin toteutettavaksi kuvan 46 käsikäyttöisellä hitsausmagneetilla, jonka suurin pitokyky on 454 kg. Magneetilla on joitain rajoitteita, esimerkiksi magneetin pitokyky on pienempi liukumista vastaan ja se tarvitsee 13 mm paksuisen ferromagneettisen työkappaleen magneetin kohdalle muodostaakseen täyden pidon. Lisäksi magneettia ei saa altistaa yli 80 C° lämpötiloille. (Magswitch Technology 2011 s. 1; Pirkka-hitsi 2021.) Magneetit voivat lisäksi aiheuttaa magneettista puhallusta, joka voi vaikuttaa merkittävästi hitsin laatuun.



Kuva 46. Hitsausmagneetti (Pirkka-hitsi 2021).

Kiinnitystapoja arvioitiin kriteerien perusteella, josta jätettiin pois turvallisuus, jonka tulee olla itsestäänselvyys ja jonka jokainen vaihtoehto oikein toteutettuna mahdollistaa. Valintakriteereille annettiin pisteet yhdestä kolmeen taulukon 10 mukaisesti. Ruuvikiinnitys sai parhaimmat pisteet ja se valikoitui kehitettäväksi kiinnitysmenetelmäksi.

Taulukko 11: Kiinnitysmenetelmän arviointi

KIINNITYSMENETELMÄN ARVIOINTI	30.8.2021	Pikakiinnityspuristin	Hitsausmagneetti	Ruuvit	Nollapistekiinnit
Vaativuudet	Arvosteluasteikko				
Kustannukset	1 - 3 1 = kallis 2 = keskinkertainen 3 = edullinen	2	1	3	1
Helppokäyttöisyys	1 - 3 1 = hankala/hidas 2 = keskinkertainen 3 = helppo/nopea	3	3	1	3
Kiinnitystavan asettamat vaatimukset muulle kiinnittimen konstruktiolle	1 - 3 1 = monimutkainen/ kallis 2 = keskinkertainen 3 = yksinkertainen/ edullinen	2	1	3	1
Lämmönkesto	1 - 3 1 = pieni 2 = keskinkertainen 3 = suuri	3	1	3	1
Kiinnityskomponenttien saatavuus	1 - 3 1 = vain muutamia valmistajia 2 = keskinkertainen 3 = helposti saatavissa	2	1	3	2

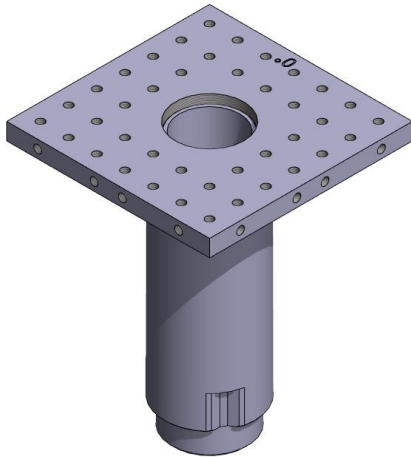


Taulukko10 jatkuu: Kiinnitysmenetelmän arviointi

Vaikutus hitsauksen suoritukseen (estää hitsauksen/ vaikuttaa valokaareen)	1 - 3 1 = suuri 2 = keskinkertainen 3 = pieni	3	2	3	3
Tilantarve	1 - 3 1 = suuri 2 = keskinkertainen 3 = pieni	2	2	3	2
Automatisoitavuus	1 - 3 1 = ei 2 = mahdollinen 3 = kyllä	1	3	1	3
Yhteensä		18	14	20	16

Ruuvikiinnityksen huonoina puolina oli automatisoitavuuden hankaluuden lisäksi menetelmän vaikeakäyttöisyys. Tilannetta helpottaa ruuvien vähäinen tarve tässä toteutuksessa ja se, että jo nyt tuotannon joissakin hitsauskiinnittimissä käytetään M16 kokoisia ruuveja, joille on olemassa akkumutterinvääntimet. Myös suuret, useamman sadan kilon kappaleet, voidaan kiinnittää ruuveilla ilman ylimääräisiä paikoittavia piirteitä. Pikakiinnityspuristimet tarvitsevat työkappaleen ulkopuolelta itselleen kiinnityspaikan, joka voi olla haasteellinen toteuttaa yleiskiinnittimessä. Toisaalta ruuvikiinnityksessä työkappaleessa tarvittavat paikoitusreiät voivat olla ongelma joissain tuotteissa ulkonäön, lujuuden tai muun syyn takia. Magneettikiinnityksen heikkoutena on pieni lämmönkesto ja mahdolliset vaikutukset valokaareen.

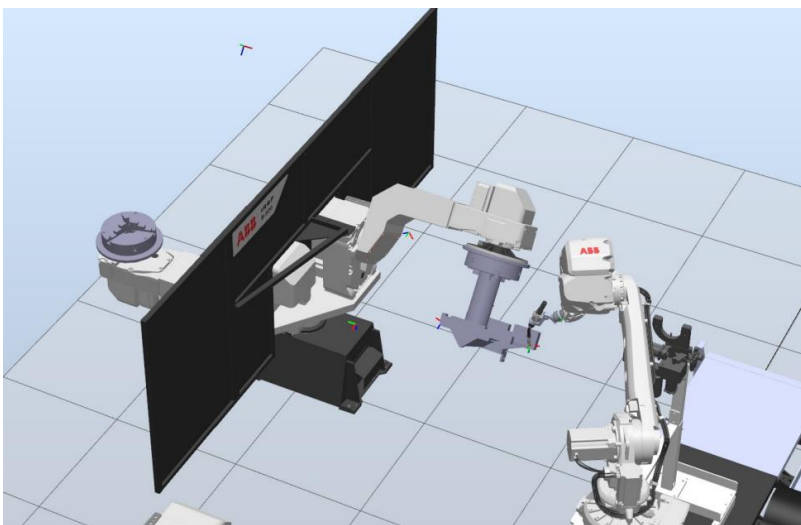
Yleismalliseksi loppuhitsauskiinnittimeksi suunniteltiin kuvan 47 mukainen rakenne. Kiinnitin on yksinkertainen ja alkuperäistä modulaarista kiinnitinlevyä kapeampana se antaa tilaa hitsauspolttimelle myös alapuolella. Kiinnittimen liittäminen kappaleenkäsittelijän tapahtuu koneistetuista piirteistä kolmileukapakkaan. Kiinnitinlevystä päädyttiin tekemään kauttaaltaan koneistettu, jolloin myös jatkomutterit korvataan koneistuspiirteillä. Täten puolta vaihtavan kappaleenkäsittelijän ollessa kyseessä, molempien puolien työkappaleen kiinnityspisteet ovat identtiset.



Kuva 47. Loppuhitsauskiinnitin.

#### 5.4 Tuotantoaikojen määrittely ja hitsauksen simulointi

Kappaleiden valmistusaikoja määriteltäessä turvauduttiin käsinhitsausaikojen osalta aiempiin tuotantotietoihin ja osittain tuotannosuunnittelun asiantuntijoiden arvioon. Käsinhitsauksen tuotantoaikojen perusteella määriteltiin uudelleensuunniteltujen robottihitsattavien kappaleiden tuotantoajat. Kappaleiden hitsaus simuloitiin RobotStudio-ohjelmistolla, johon ladattiin malli yrityksen käyttämästä hitsaussolusta (kuva 48).



Kuva 48. Hitsaussolun RobotStudio-malli.

Hitsauksen simuloinnilla varmistettiin törmäysten välttäminen, robotin ulottuvuus hitseihin ja hyvät hitsausasennot. Samalla tarkistettiin modulaarisen kiinnityslevyn sopivuus kaikille robottihitsattavaksi valituille kappaleille ja tallennettiin toteutuneet hitsausvaiheen ajat.

## 6 Tulokset

Työn tilaajan toiminnassa ongelma muodostui erityisesti kombinaatiosta, jossa suuri osa tuotteista on heikosti robottihitsattavia ja samaan aikaan hitsausrobotin kaikkia ominaisuuksia ei käytetä. Mikäli kumman tahansa osatekijän tila olisi parempi, robottihitsaussolun käyttöaste olisi todennäköisesti suurempi. Suuntaviivoiksi tilanteesta pois pääsemiseksi muodostettiin kappaleessa 6.1 esitetty toimenpidelistaus, joka sisältää 11 yleisellä tasolla ilmaistua kehotusta.

Toimenpidelistauksen perusteella muokattiin kolmea hitsauskokoontavaa ja suunniteltiin niille yleiskäyttöinen kiinnitystapa ja siihen tarvittava kiinnitin. Tehtyjen toimien vaikutusta arvioitiin laskelmien ja simulointien avulla tuotekohtaisesti sekä kokonaisvaikutuksena hitsaussolun käyttöasteeseen.

Työssä sivuttua jigittönnä hitsausta voi olla haastavaa saada nykyisellä tekniikan tasolla ja investoinnin arvolla kannattavasti otettua käyttöön. Jigittömästä hitsauksesta tulisi saada merkittävää etua, jotta investoinnille saadaan katetta. Itsepaikoittuviin kokoonpanoihin ei ole nähtävissä suuria hyötyjä jigittömästä hitsauksesta, sillä tuotekohtaisista kiinnittimistä vapautuvia resursseja ei tässä tapauksessa ole ohjelmointiin käytössä. Vaikka tuote vaatisi tuotekohtaisen kiinnittimen, niin levyleikkeistä valmistetun kiinnittimen muutamien satojen eurojen kustannukset jäävät todennäköisesti pienemmäksi, kuin jigittömän hitsauksen ohjelmointi- ja investointikulut tällä hetkellä. Tällä tekniikan tasolla menetelmä vaatisi myös oletettavasti paljon prosessin kehittämistä, ennen kuin hyvään hitsin laatuun vaadittavat tarkkuudet saavutetaan. Lisäksi todennäköisesti vaadittaisiin nykyistä parempaa tarkkuuden tasoa osavalmistukseen.

## 6.1 Toimenpidelistaus

Toimenpidelistaus ilmaistaan tässä yleisellä tasolla, sillä kaikkien asioiden viimekätistä tilaa ja syy-yhteyksiä ei tiedetä. Osa toimenpiteistä on jo käytössä työn tilaajalla, mutta kokonaisuuden hahmottamiseksi kaikki työn aikana ilmenneet seikat on listattu alle. Koska esitetyt toimenpide-ehdotukset ovat kokonaisuutena laajoja ja koostuvat useista tekijöistä, esitetään ne kehotuksina, joita on avattu kunkin otsikon alle. Liitteessä 2 on toimenpide-ehdotukset listattuna ja jaoteltuna tuotantojärjestelmän ja sen osien mukaisesti.

### Suunnittele hyvin valmistettavia tuotteita robottihitsaus huomioiden

Tuote tehdään ensisijaisesti suunniteltua loppukäyttöä ajatellen, mutta huomioimalla valmistuksen vaatimuksia, voidaan kustannuksia karsia merkittävästi ja läpimenoaikaa nopeuttaa. Tämä pätee erityisesti robottihitsaavaan piensarjatuotantoon, jossa kulut kohdistuvat pienelle määrälle tuotteita. Tästä seuraa se, että tuotteen kannattava robottihitsaus määräytyy pitkälti suunnittelussa. Hitsauskoonpanojen tulisi olla mahdollisimman pitkälle itsepaikoittuvia ja railon sijaintiin vaikuttavien osien tulisi olla mittatarkkoja. Hitsauskiinnittimien tulisi olla mahdollisimman yksinkertaisia ja yleiskäyttöisiä. Koonpanojen tulisi olla helpoja käsitellä ja nopeita kiinnittää hitsauskiinnittimeen. Rakenteensa puolesta kappaleiden tulisi olla hyvin robotilla hitsattavissa ja esimerkiksi pienahitsejä sekä jalkoasentoa tulee suosia. Valmistettavuus on kokonaisuus ja kaikkia kappaleita ei kannata hitsata robotilla, eikä välttämättä kaikkia robottihitsattavan kappaleen hitsejä kannata hitsata robotilla, tuotokset suhteessa panoksiin ratkaisevat.

### Pohdi tuotteiden tuotettavuutta tuotteen elinkaari ja valmistusverkosto huomioiden

Lähtökohtaisesti kaikki robotilla hitsattavissa olevat tuotteet kannattaa hitsata omassa tuotannossa, mikäli kapasiteettia on käytettävissä. Kuitenkaan näin ei välttämättä ole, kun huomioidaan koko tuotteen valmistusketju. Syynä voi olla esimerkiksi muut käsittelyt, joita kappaleelle tehdään ja tätä kautta järkevä kokonaisuus, joka kannattaa tilata alihankkijalta. Tästäkin tapauksessa robottihitsattavuuden mahdollistuessa kustannushyödyt saavutetaan, vaikkakin välillisesti. On myös huomioitava kappaleen robottihitsaukseen valinnan ajallinen sijainti tuotteen elinkaareissa, sillä kyseessä voi olla elinkaarensa lopussa oleva tuote, johon ei ole enää kannattavaa sijoittaa panoksia tuotettavuuden parantamiseen lyhyen

takaisinmaksuajan vuoksi. Kun panoksia on rajallisesti käytettävissä, toimenpiteiden oikea kohdistus kokonaiskuvassa on oleellista.

#### Suunnittele tuotteet ja kiinnittimet samanaikaisesti

Tuotteen ja kiinnittimen samanaikaisella suunnittelulla voidaan ottaa huomioon sekä tuotteen loppukäytön vaatimukset että valmistettavuus kustannustehokkaasti. Jälkikäteen tehdyt muutokset kuluttavat resursseja ja vakiintuneeseen kokoonpanorakenteeseen joudutaan todennäköisemmin tekemään kompromisseja valmistettavuuden kustannuksella.

#### Etsi tuotteistosta sopivia kappaleita robotille

Robottihitsattavia kappaleita voidaan joutua etsimään jälkikäteen tuotteistosta useasta erisyystä. Syitä voivat olla esimerkiksi jonkin tuotteen valmistusmäärien kasvu tai teknisten edellytysten kehitys. Tällöin tuotteistosta etsitään suoraan tai muutoksin robottihitsattavaksi sopivia kappaleita. Vaikka itsepaikoittuvat tuotteet ovat pieninäkin sarjoina kustannustehokkaita hitsata robotilla, isommista tuotantomääristä saadaan suurempi hyöty ja mahdollisiin kiinnittimiin sekä uudelleensuunnitteluun on enemmän resursseja käytettävissä. Siten robottihitsattavia kappaleita etsiessä tulee keskittyä erityisesti suurivolyymisiin tuotteisiin sekä tuoteperheisiin tai muuten yhteneviä piirteitä sisältäviin tuotteisiin.

#### Hyödynnä tuotteiden liitynnät

Tuotteiden liityntöjen hyödyntäminen osatasolta tuotteistotasolle voi avata mahdollisuuksia huomattavalle toiminnan tehostumiselle moduloinnin ja standardoinnin tai vaikkapa yhtenäisten valmistustekniikoiden myötä.

#### Standardoi ja moduloi

Käytä mahdollisuuksien mukaan useassa tuotteessa samaa moduuliosaa tai esimerkiksi samaa yrityksen sisäisesti standardoimaa liittostyyppiä. Modulointiin soveltuu parhaiten rakenteeltaan jo vakiintuneet tuotteet. Siirrä variaation teko valmistuksessa mahdollisimman

myöhäiseen vaiheeseen. Modulaarista ja standardoitua rakennetta tulee käyttää myös hitsauskiinnittimissä ja hitsausohjelmissa. Standardointi on hyvä ulottaa levynpaksuuksiin, hitseihin ja työkappaleiden kiinnityksiin. Järkeviin kohteisiin toteutetun standardoinnin ja moduloinnin seurauksena työn ja dokumentoinnin määrä pienenee.

#### Paranna tiedonkulkua yrityksen eri toimintojen välillä

Tiedonkulun parantaminen erityisesti suunnittelun ja valmistuksen välillä on robottihitsaavassa piensarjatuotannossa oleellista, joskaan sen merkitystä ei voi väheksyä muidenkaan toimintojen kohdalla. Robottihitsattavaa tuotetta suunnitellessa tulee jo konseptivaiheessa yhteistyössä suunnittelun ja valmistuksen kanssa pohtia rakenne, niin että se täyttää lopputuotteen vaatimukset ja on lisäksi hyvin valmistettavissa. Tarpeen vaatiessa pohdintaan kannattaa ottaa mukaan myös esimerkiksi johdon, myynnin ja tuotekehityksen edustajia, jolloin laajassa näkökulmassa kaikki vaikuttavat seikat huomioidaan.

#### Ohjaa toimintaa ylhäältä

Sopivassa määrin ylhäältä tuleva ohjaus on tarpeen, jotta robottihitsaus ei ole pelkästään operaattoreiden varassa. Robottihitsattavuuden edellytykset muodostetaan suunnittelussa, jotka toteutetaan valmistuksessa. Tähän tarvitaan johtoa koordinoimaan toimintaa. Robottihitsauksella olisi perusteltua olla vastaava henkilö, joka huolehtisi robottihitsauksen edellytysten toteutumisesta ja toisaalta tiedon siirtymisestä osastolta toiselle. Suunnittelussa erityisesti strategiset päätökset ja variaatioiden sekä moduloinnin hallinta tulee olla suunnitelmallista ja johtaa ylhäältä. Tuotannossa huomioitavaa on toimintatapojen yhtenäistäminen robottihitsattavien tuotteiden valmistuksessa sekä yleinen toiminnan ohjaaminen.

#### Käytä laitteiston kaikkia ominaisuuksia

Robottihitsauslaitteiston kaikkia saatavilla olevia ominaisuuksia tulee käyttää, mikäli se on tarpeen. Erityisesti railonseuranta kannattaa käyttää, mikäli siitä on hyötyä ja sen käyttö on mahdollista. Railonhakua käytetään myös, kun se on tarpeellista. Myös muita ominaisuuksia, kuten pulssihitsausominaisuutta tulee käyttää, mikäli sen on jossain tilanteessa

relevanttia esimerkiksi roiskeiden vähentämiseksi. Tavoitteena on saavuttaa tila, jossa ohjelma voidaan suorittaa ilman virheitä tai ohjelmapisteiden uudelleenohjelmointia toistettavasti.

#### Varmista että henkilöstön tiedot ja taidot ovat ajan tasalla

Operaattoreiden tulee hallita ohjelmien teko myös etäohjelmoinnilla ja kaikkia laitteiston ominaisuuksia tulee osata käyttää. Käytön on oltava jatkuvaa, jotta taidot pysyvät yllä. Tarvittaessa tulee huolehtia lisä- tai päivityskoulutuksesta. Suunnittelijalla tulee olla todenmukainen käsitys robottihitsattavan kappaleen suunnittelusta ja kappaleen tuotettavuudesta yrityksen toimintaympäristössä. Lisäksi näkemyksiä tulee vaihtaa säännöllisesti valmistuksen ja suunnittelun välillä tietojen ajantasaisuuden ylläpitämiseksi.

#### Mittaa, dokumentoi ja ohjeista

Mittaa robottihitsattavien tuotteiden valmistuksen osa-aikoja ja itse hitsausta, jotta virheet ja hukka on helpompi selvittää. Selvitä virheiden juurisyyt ja tee korjaavia toimia. Merkitse jigit, dokumentoi piirustukset ja pidä ne ajan tasalla. Näin muokkaukset ja uudelleenvalmistus ovat mahdollisia. Dokumentoi ja ohjeista robottihitsauksen suoritus, jotta työnsuoritus vakioituu. Huolehdi, että suunnittelussa on tieto käytössä olevista työkaluista ja kiinnittimien vakio-osista.

## 6.2 Tuotteiden uudelleensuunnittelun vaikutukset

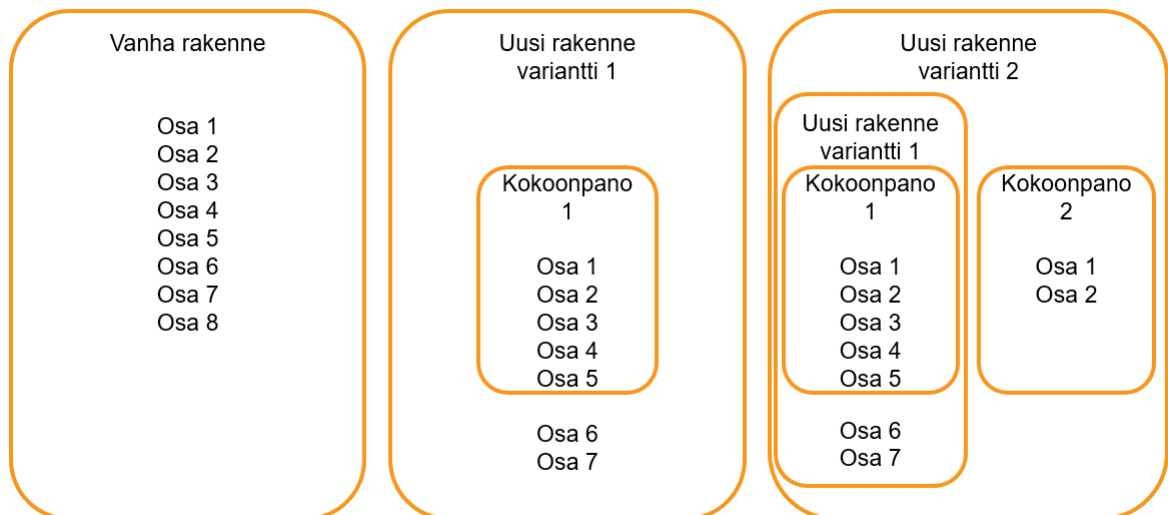
Tuotteiden uudelleensuunnittelun vaikutuksia arvioitaessa lähtökohtana oli vanhan käsin hitsatun kokoonpanon tuotantoajat. Laskelmissa käytettiin taulukon 11 arvoja. Käsin- ja robotihitsauksessa on käytetty samaa hitsausnopeutta.



Taulukko 12: Laskelmissa käytetyt arvot

Tekijä	Arvo
Kaariaikasuhde käsinhitsauksessa [%]	10
Kaariaikasuhde robottihitsauksessa [%]	40
a4 hitsin hitsausnopeus käsin ja robotilla [cm/min]	44
a5 hitsin hitsausnopeus käsin ja robotilla [cm/min]	35
a6 hitsin hitsausnopeus käsin ja robotilla [cm/min]	25

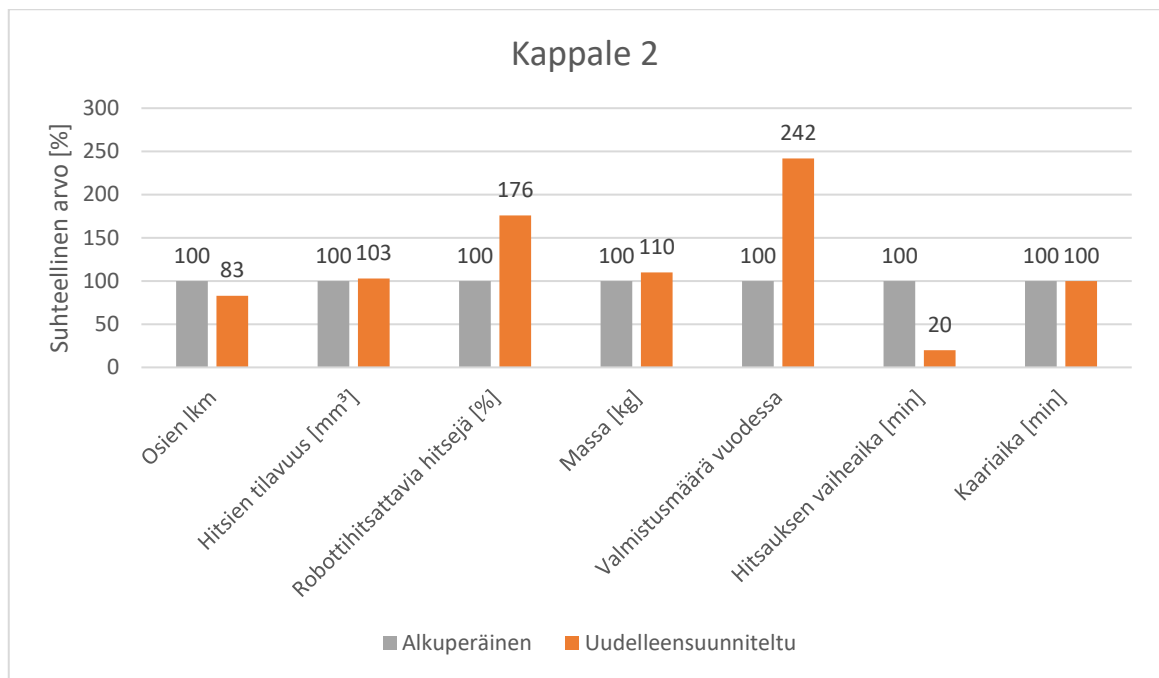
Kappaleen 2 vuosittaista valmistusmäärää kasvatettiin muokkaamalla tuoterakennetta kuvan 49 mukaisesti niin, että kuvassa kokoonpano 1 on työssä esitetty kappale 2, joka käy useaan varianttiin ja tarvittavat lisäosat liitetään vasta myöhemmässä vaiheessa.



Kuva 49. Tuoterakenteen kehitys.

Kappaleen 2 uudelleensuunnittelun vaikutukset alkuperäiseen konstruktion verrattuna esitetään kuvassa 50, jossa alkuperäisen kappaleen arvot ovat 100 %. Merkittäviä eroja esiintyy etenkin valmistusmäärässä, vaiheajassa ja robottihitsattavien hitsien määrässä. Uusi rakenne on itsepaikoittuva, kun alkuperäinen rakenne olisi käytännössä vaatinut tuotekohtaisen jigien osien paikoittamiseksi robottihitsausta varten. Paikoittavien piirteiden tulppahitsit nostavat hieman uuden rakenteen hitsien tilavuutta. Vanhan rakenteen tuotantoajat on laskettu käsinhitsausta käyttäen ja uudelleensuunnittelussa kappaleessa laskelmat on tehty robottihitsausta sekä käsinhitsausta käyttäen niiden todellisen jakauman mukaan. Alkuperäisen rakenteen

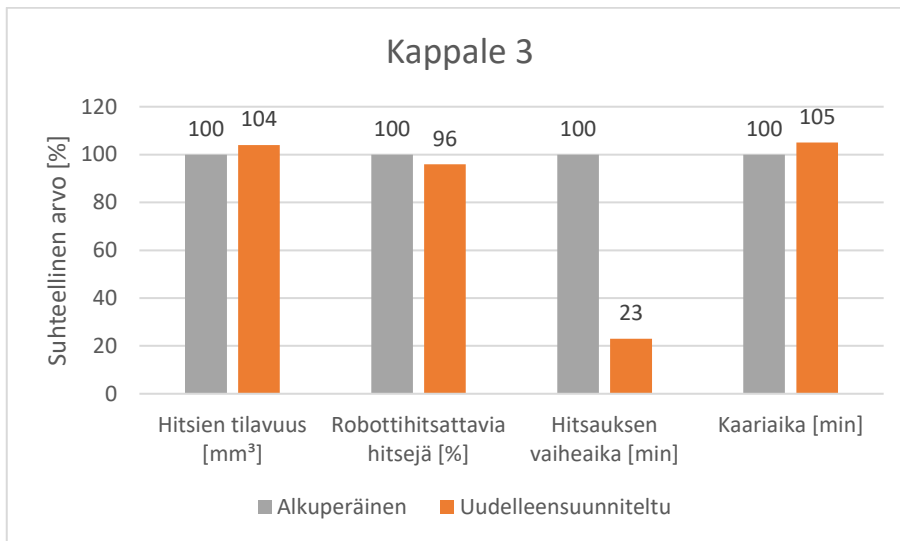
tuotantoaika on laskettu niin, että se on vertailukelpoinen uuteen rakenteeseen. Alkuperäisen kappaleen hitseistä on robottihitsattavaksi hyväksytty kaikki ilman läpipalamisen vaaraa olevat hitsit, vaikka railonseurantaa ei voida kaikissa tilanteissa levyn reunan puuttumisen vuoksi käyttää. Uudessa versiossa kaikissa robottihitsattavaksi lasketuissa hitseissä voidaan käyttää railonseurantaa.



Kuva 50. Kappaleen 2 valmistettavuuden kehitys.

Kuvassa 49 esitettyjen uusien varianttien valmistus tapahtuu käytännössä samalla tavalla kuin vanhankin rakenteen, eroten kahden variantin kohdalla ruuvein kiinnitetystä lisäosasta. Rakenteen muutoksesta ei arvioitu olevan haittaa laajemmastakaan näkökulmasta.

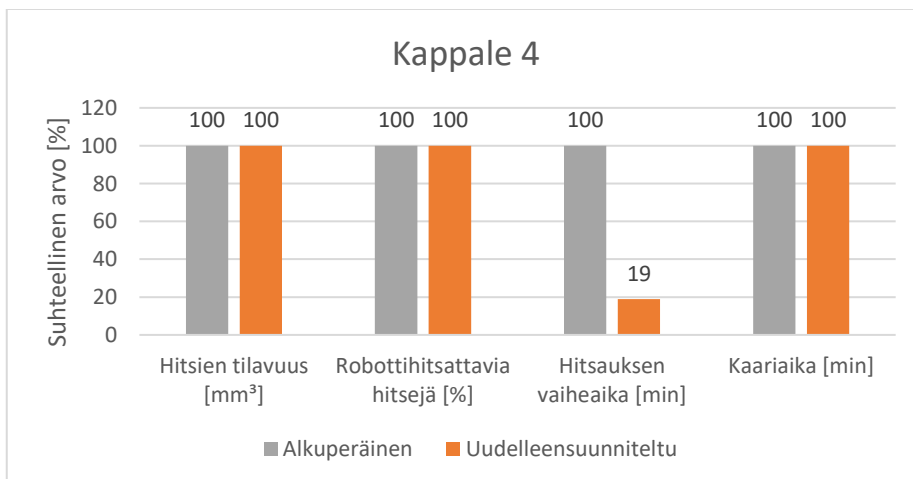
Kappaleessa 3 keskityttiin osien paikoituksen ja loppuhitsauskiinnityksen kehittämiseen. Aikaisempi kappale oli jo lähes kokonaan itsepaikoituva ja robottihitsauskoonpanon teko olisi onnistunut huolellisella silloitustyöllä. Yhden paikoituspiirteen lisäys näkyy muutamien prosenttien lisänä hitsien määrässä ja kaariajassa, kuten kuvasta 51 voidaan nähdä. Kyseinen paikoitushitsi on haasteellinen robotisoida, joten se hitsataan käsin silloitusvaiheessa. Tämä lisää käsin hitsattavien hitsien määrää.



Kuva 51. Kappaleen 3 valmistettavuuden kehitys.

Vaikka hitsien tilavuus kasvaa ja robottihitsattavien hitsien osuus pienenee, nähtiin paikoituksen lisäys kannattavaksi, sillä paikoituksen varmuus ja tarkkuus paranevat nopeuttaen koko prosessia. Lisäksi silloitushitsaus täytyisi todennäköisesti tehdä johonkin kohtaan osaa.

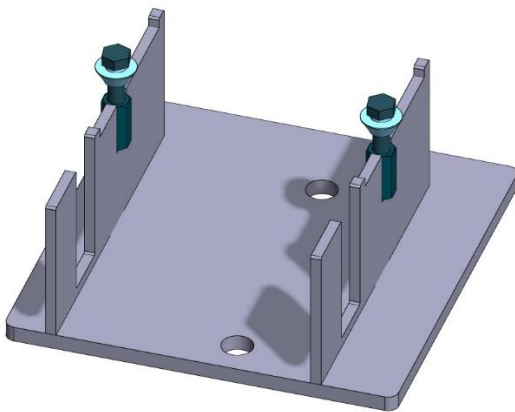
Kappaleen 4 tapauksessa kehitettiin kiinnitystä loppuhitsausjigiin. Kiinnittimen suunnittelulla mahdollistettiin tilanne, jossa loppuhitsaus voitiin suorittaa yhdellä kiinnityksellä. Tuotteen vaiheaika lyhenee kuvassa 52 esitettyjen tulosten mukaan 81 %.



Kuva 52. Kappaleen 4 valmistettavuuden kehitys.

Loppuhitsausjigin kustannuksiksi muodostui tuotannosuunnittelun ammattilaisten arvioimana noin 1000 euroa kappaleelta. Puolta vaihtavalle servopöydälle on järkevintä tehdä kaksi loppuhitsausjigiä, jotta toisen puolen lataus onnistuu hitsauksen aikana. Kartioruuveille arvioitiin noin 100 euron kustannukset. Ensimmäisille ruuveille arvioitiin tulevan hieman korkeammat kustannukset koneistuksen ohjelmoinnista johtuen. Hitsattavia tuotteita kertyi tässä kartoituksessa noin 300 kpl seuraavan vuoden aikana. Mikäli kustannusten ajatellaan jakautuvan tasaisesti eri tuotteiden kesken, vuoden käyttöajalla kiinnittimen kustannukseksi tulee 7 euroa yksittäistä hitsattavaa tuotetta kohden.

Lisäksi kappale 3 tarvitsee kiinnittimeen kuvan 53 mukaisen lisäosan, jonka kustannuksiksi tulee noin 150 euroa. Kustannuksiksi tulee noin 2,5 euroa kiinnittimellä vuoden aikana valmistettavaa tuotetta kohti.



Kuva 53. Kappaleen 3 vaatima loppuhitsauskiinnittimen moduuliosa.

### 6.3 Käyttöasteen kasvu

Työssä esitetyillä kappaleilla 2, 3 ja 4 ei saavuteta vielä tavoitteena ollutta käyttöasteen nousua, vaan lisää tuotteita täytyy seuloa robotille. Vuositasolla hitsaussoluun saatiin laskelmien mukaan 105 tuntia lisää työkuormaa (taulukko 12). Tavoitteeseen pääseminen vaatii 27 tuntia lisää työkuormaa.

Taulukko 13: Hitsausrobotisolun käyttöasteen lisäys

Robottisolun käyttöasteen lisäys	Vaiheaika ilman silloitusta [h]	Kpl/a	Yht. t [h]/a
Tuote 2	0,39	122	47,34
Tuote 3	0,29	116	33,31
Tuote 4	0,41	60	24,56
		Yht	105,21

Projektitoimitusten tuotteista löytyi työssä käsiteltyjen lisäksi useita potentiaalisia tuotteita siirrettäväksi robotille, joiden robottihitsattavaksi siirron jälkeen vuoden aikajaksolle asetettuun käyttöasteen kasvun tavoitteeseen voidaan yltää. Uusien kappaleiden robottihitsattavuuden arvioinnissa saamat pisteet olivat 30–35. Tuotteet eivät yllä tällä hetkellä pisteytyksissä tässä työssä valittujen tuotteiden tasolle, sillä erityisesti valmistusmäärät ovat pienempiä. Tuotteiden moduloinnilla ja valmistettavuuden parantamisella voidaan vielä vaikuttaa robottihitsauksen edellytyksiin ja sitä kautta pisteytykseen.

## 7 Pohdinta

Tämä tutkimus kokonaisuutena antaa samansuuntaisia tuloksia kuin aiemmat aiheeseen liittyvät tutkimukset ja teokset. Toimenpidelistaus käsittelee suurelta osin asioita tai niiden perusteita, joita robottihitsausta käsittelevässä kirjallisuudessa esitetään. Esimerkiksi Solehmainen et al. (2016) ja Hiltunen (2005) esittävät vastaavia toimia teoksissaan. Toimenpidelistaukseen on tuotu lisäksi tuotettavuuden kehittämisen piirteitä laajemmassa mittakaavassa, joita mainitaan Huhtalan & Pulkkisen (2009) teoksessa. Uusi, useista tutkimuksista poikkeava ero on tässä työssä muodostettu piensarjoja tuottavan keskiraskaan konepajan koko yrityksen toimintaa käsittelevä näkökulma. Periaatteet, joilla toimenpiteet toteutetaan, ovat yhteneväisiä lähdeteosten kanssa. Toimenpidelistauksen ohjeistusta noudattaen valittiin yleiskäyttöinen kiinnitysjärjestelmä ja muokattiin tuotteita paremmin robottihitsattavaksi. Systemaattisen suunnitteluprosessin laskelmat ja simuloinnin tulokset tukevat toimenpidelistausta, siltä osin kun niitä on työssä sovellettu. Yksittäisen toimenpiteen osalta tulosta ei voida varmentaa, mutta tulosten perusteella sovellettujen toimenpiteiden kokonaisuus kasvattaa robottihitsaussolun työkuormaa.

Muissa aiheeseen liittyvissä tutkimuksissa hieman vähemmälle huomiolle jääneet ohjeistukset suunnittelun ja valmistuksen yhteistyöstä, sekä kiinnittimien suunnittelusta saman aikaisesti tuotteen kanssa, osoittautuivat tässä tutkimuksessa piensarjatuotannon oleellisesti robotisoinnin kannattavuutta määritteleviksi tekijöiksi, sillä niillä on tuotteen kiinnitinkustannuksiin merkittävä vaikutus. Valmistuksen ja suunnittelun yhteistyöllä haetaan yhteistä käsitystä toiminnan mahdollisuuksista ja rajoitteista. Teoksissa, kuten Lapinleimu et al. (1997) ja Huhtala & Pulkkinen (2009) asia on useassa kohtaa otettu esille.

Kirjallisuustutkimuksen ja suunnittelutyön tueksi suoritettiin robottihitsattaviksi valittujen kappaleiden hitsauksen simulointi, jossa varmennettiin mm. robotin ulottuvuus kappaleeseen ja hyvien hitsausasentojen saavutettavuus. Kappaleille laskettiin hitsausajat fyysisessä hitsaussolussa käytettyjen arvojen ja työkappaleiden hitsien määrän perusteella. Laskettujen

kaariaikojen paikkansa pitävyys todennettiin hitsauksen simuloinnissa huomioiden robotin väliliikkeisiin käytetyt ajat ja samalla arvioitiin osalle muodostuva vaiheaika.

Tuotteen valmistettavuuden kehitys todennettiin vertaamalla alkuperäisen tuotteen vaiheaikaa uudelleensuunnitellun tuotteen laskelmoituun ja simuloituun vaiheaikaan. Koska tuotantokokeita ei pystytty tekemään, arvioitiin kaariaikaa lukuun ottamatta muu kuluva aika kirjallisuuden robottihitsaukselle määrittelemää kaariaikasuhdetta käyttäen. Alkuperäinen kappaleiden kaariaikasuhde käsinhitsauksessa oli hieman alle kirjallisuuden vastaavien arvojen. Syynä voi olla, että vaihe sisältää joitain ajallisesti suurehkoja töitä, kuten hitsien jälkikäsittelyjä tai osien noutoja. Itsepaikoittavien piirteiden käytön ja sitä usein seuraavan silloitus-tarpeen seurauksena robottihitsauksen kaariaikasuhde määriteltiin lähdekirjallisuuden ohjearvojen minimiin. Kappaleen 2 tapauksessa voidaan kohtuudella ajatella, että tehdyillä muutoksilla olisi huomattava vaikutus myös käsin tapahtuvan hitsauksen vaiheaikaan, sillä alkuperäisessä kappaleessa paikoituksien teko ilman jiggiä on työlästä. Epävarmuutta tuloksiin luo fyysisen robottihitsaussolun kirjallisuuslähteisiin verrattuna alhainen sulatusteho. Mikäli kappaleet hitsataan simuloinnin mukaan jalkoasennossa ja voidaan käyttää koko laitteiston potentiaali, tuotantoajat voivat olla nopeampia kuin nyt lasketut arvot.

## 7.1 Tuotteen valinta ja uudelleensuunnittelu

Robottihitsattavan tuotteen valinnassa käytettävän taulukon arviointikriteerit muodostuivat systemaattisen suunnittelun menetelmiä käyttäen. Kriteerit ovat samoja mitä lähdekirjallisuudessa mainitaan tai ne ovat osatekijöitä yleisissä hyväksi havaituissa suunnitteluperusteissa. Lisäksi simulointi ja systemaattinen suunnitteluprosessi tuki olettaa, jossa kriteerien ominaisuuksilla on selvä vaikutus hitsauksen kannattavuuteen ja toteutettavuuteen. Näkökulma valintakriteereissä on sellainen, että se sopii erityisesti työn tilaajan toimintaympäristöön. Kunkin kriteerin painotusta muokattiin sen mukaan, mikä karkeasti arvioitu kustannusvaikutus ominaisuudella on. Mittarin validiteettia koetettiin tietoisesti valitsemalla robottihitsaukseen epäsoivia tuotteita arvioitavaksi. Epäsoivat tuotteet saivat pienempiä pisteitä kuin robottihitsaukseen kohtuullisesti soveltuvat. Tarkan pistemäärän määrittäminen epäsoivien ja sopivien tuotteiden välillä on haasteellinen, sillä mittarin tarkkuus ei tähän riitä. Kokeilluista tuotteista alle 30 pistettä saaneet olivat robottihitsaukseen huonosti soveltuvia.

Mittarin heikkoutena on, että se ei ole riittävän yksiselitteinen, jolloin se vaatii käyttäjältään asiantuntemusta robottihitsattavan tuotteen suunnittelusta. Edellä mainittu vaikuttaa negatiivisesti mittarin reliabiliteettiin. Toisaalta mahdollistamalla tulkinnanvaraisuus, mittari käy laajemmalle kirjolle erilaisia tuotteita ja kohdistaa huomioita robottihitsattavuuden kehittämisen kannalta oleellisiin asioihin. Lisäksi tässä tapauksessa, jossa tuotteille tehtävät muutokset ovat tarpeellisia robottihitsauksen edellytysten parantamiseksi ja tuotteita tulee arvioida niiden muutospotentiaalin mukaan, aihepiirin tuntemus on välttämätöntä.

Robottihitsattavien kappaleiden muokkausmenetelmät pohjautuvat lähdeeteoksiin, joskaan tarkkaa toteutustapaa ei niissä ole asiasta esitetty. Erona moniin saman aihepiirin lähteisiin tässä työssä on enemmän piensarjatuotantoon soveltuvien tekniikoiden käyttöä ja hukan poistoa. Hitsauksen simulointi ja suunnittelu tukivat toteutettuja muutoksia, sillä voitiin nähdä että esimerkiksi rakenteen yksinkertaistamisella ja paikoituspiirteiden lisäyksellä voidaan keventää kiinnittimiä ja parantaa raijien paikoitustarkkuutta ilman merkittävää kustannusten nousua.

## 7.2 Kiinnitinsuunnittelu

Yleiskäyttöisen kiinnitysmenetelmän valinnassa käytettiin systemaattisen suunnittelun metodeja. Lopputuloksessa yhdistettiin Solehmainen et al. (2016) mainitsemista kiinnitysmenetelmistä ruuvi kiinnitys ja kahdella reiällä sekä niihin tulevilla kartiotapeilla tapahtuva kiinnitys yhteen modulaarisen kiinnitinlevyn kanssa. Samaa periaatetta käytetään nollapistekiinnittimissä ilman ruuveja. Menetelmä ei sovi kaikille tuotteille, sillä olennainen osa sitä on reikien teko valmistettaviin kappaleisiin. Tutkimuksen kohteena olevissa tuotteissa tämä kuitenkin todettiin olevan mahdollista. Kartioruuvien ja reikien sijaan kappaleen kiinnityksessä ja paikoituksessa voidaan käyttää muitakin kartioruuvein asennettavia elementtejä. Näitä voivat olla erilaiset vasteet tai puristimet. Kartioruuvilla toteutetun paikoituksen tarkkuus riippuu oleellisesti työkappaleen reiän paikoitustarkkuudesta, leikatun pinnan laadusta ja ruuvien kierrereian toleransseista. Parhaiten tähän kiinnitystapaan soveltuvat tuotteet ovat laserleikattuja osia sisältävät kappaleet, joihin voi esteettisesti ja rakenteellisesti tarkasteltuna tehdä paikoitusreiät. Lisäksi paikoitus tulee sitä tarkemmaksi, mitä kauempana reiät toisistaan sijaitsevat. Suunnittelun tuloksista voidaan nähdä, että kartioruuvi on työn tilaajan



toimintaympäristössä hyvin kiinnitykseen sopiva kustannustehokas ratkaisu. Myös simulointi vahvistaa tätä tulosta, sillä kartioruuvien todettiin haittaavan vain vähän hitsausta ja sillä onnistuttiin toteuttamaan kaikkien valittujen työkappaleiden kiinnitys ilman kiinnituskertumisen vaaraa. Vaikka kappaleen kiinnitystä magneetilla ei valittu tässä tapauksessa jatkokehitykseen, se voisi olla hyvä ratkaisu, kun hitsattava tuote ei salli reikien valmistusta.

Yleiskäyttöinen kiinnitin suunniteltiin ensisijaisesti mahdollistamaan nyt löydettyjen robotihitsattavien kappaleiden hitsaus, mutta se tulee mahdollistamaan myös monta muuta kiinnitysvariaatiota. Modulaariseen kiinnitysvaihtoehtoon päätymiseen piensarjatuotannossa on linjassa lähdeostosten Wang et al. (2010) ja Solehmainen et al. (2016) kiinnitinsuunnittelua koskevien tietojen kanssa. Modulaarinen kiinnityslevy todettiin myös kustannuslaskelmien osalta kannattavaksi ja simuloinnilla varmennettiin, että se soveltuu hyvin useisiin kokoonpanoihin ja se estää hitsausta mahdollisimman vähän.

### 7.3 Tutkimuksen sensitiivisyys

Tutkimuksen menetelmien sensitiivisyysanalyysi toteutettiin vastaamalla tutkimusmenetelmiä yhdistäviin keskeisiin kysymyksiin. Aineiston saturaatiopiste todettiin saavutetuksi, kun uutta tietoa aineistoa lisäämällä ei löytynyt. Analyysi esitetään taulukossa 13.

Taulukko 14: Sensitiivisyysanalyysi

Kysymys	Vastaus
Kirjallisuustutkimus - Systemaattinen suunnitteluprosessi	
Millainen on hyvin piensarjatuotantoon soveltuva tuote/kiinnitin	Hyvin piensarjatuotantoon soveltuva tuote on mahdollisimman pitkälle itsepaikoittuva, sisältää riittävästi robotilla hitsattavia hitsejä ja voidaan kiinnittää helposti kappaleenkäsittelijään. Hyvin piensarjatuotantoon soveltuva kiinnitin soveltuu mahdollisimman monelle tuotteelle moduuliosalla tai ilman ja sisältää nopean, tarkan ja yleiskäyttöisen kiinnityksen tuotteille.

Taulukko 15 jatkuu: Sensitiivisyysanalyysi

Systemaattinen suunnitteluprosessi - Simulointi	
Millaisia vaikutuksia on tuotteen/kiinnittimen rakenneratkaisuilla tuotettavuuteen?	Tuotteen rakenne määrittää oleellisesti kannattavuuden hitsien hitsattavuuden, kappaleen itsepaikoittuvuuden, railon sijainnin tarkkuuden, kokoonpantavuuden ja kappaleen käsiteltävyyden osalta. Kiinnittimen rakenne määrittelee osaltaan kiinnityksen tehokkuuden ja tarkkuuden sekä mahdollistaa mahdollisimman monen tuotteen esteettömän hitsauksen.
Simulointi - Kirjallisuustutkimus	
Kuinka valmistettavuutta voidaan kehittää piensarjatuotannossa valmistusvälineillä?	Valmistettavuutta voisi kehittää nopeuttamalla hitsauksen ohjelmointia ja tuomalla soluun 6-akselinen robotti kappaleenkäsittelijäksi, jolloin saavutetaan helpommin hyvät hitsausasennot ja miehittämätön ajo, sekä mahdollistetaan osittain tai kokonaan jigitön hitsaus.

## 8 Johtopäätökset

Työssä tutkittiin keskiraskaan konepajan hitsaustuotantoa. Työn tilaajalla on ongelma, jossa robottihitsaussolun käyttöaste on matala ja halusi toimenpidelistauksen yrityksen robottihitsaussolun käyttöastetta kasvattavista toimista. Tutkimusongelman pohjalta laadittuihin tutkimuskysymyksiin vastaukset esitetään taulukossa 14.

Taulukko 16: Vastaukset tutkimuskysymyksiin

Kysymys	Vastaus
<b>Päätutkimuskysymys</b>	
Miksi robotilla ei ole tarpeeksi hitsattavaa?	Robotilla ei ole tarpeeksi hitsattavaa, koska tuotteet eivät sovellu sellaisenaan hyvin robottihitsattavaksi ja lisäksi hitsausrobotin kaikkia toimintoja ei ole käytetty jo valmiiksi haasteellisissa kappaleissa, jonka seurauksena kappaleet on päädytty hitsaamaan käsin.
<b>Ensimmäinen alatutkimuskysymys</b>	
Mitä toimenpiteitä yrityksen olisi tehtävä omassa toiminnassaan, jotta tuotteista suurempi osa hitsattaisiin robotilla?	Yrityksen tulisi ensisijaisesti muokata potentiaalisista tuotteista paremmin robottihitsattavia rakenteen ja sarjakoon osalta, sekä ottaa hitsauslaitteiston kaikki ominaisuudet käyttöön.
<b>Toinen alatutkimuskysymys</b>	
Millaisia ominaisuuksia on MIG/MAG-robottihitsaukseen hyvin soveltuvalla terästuotteella hitsattavuuden, valmistuksen kannattavuuden ja kiinnitinsuunnittelun näkökulmasta?	Hitsien tulee olla robotin ulottuvissa ja niitä on oltava riittävästi suhteessa robotisoinnin kuluihin. Railojen tulee olla tarkasti paikoitettuja tai haku- ja seurantatoimintoja on voitava käyttää. Kappaleet ja sen osat on oltava tehokkaasti ja tarkasti paikoitettavissa sekä kokoonpantavissa tuote- ja sarjakokoiset erityispiirteet huomioiden.
<b>Kolmas alatutkimuskysymys</b>	
Millainen kiinnitintekniikka soveltuu pieniin sarjoihin parhaiten, vai onko jigitön hitsaus paras ratkaisu?	Pieniin sarjoihin parhaiten käy mahdollisimman monelle tuotteelle soveltuva osat riittävällä tarkkuudella paikoittava modulaarinen kiinnitin, jossa on standardoitu nopea kiinnitystapa. Jigitön hitsaus voi olla tulevaisuudessa parempi ratkaisu, kun osien paikoitus ja ohjelmoinnin nopeus kehittyvät.

Toimenpidelistaus käsittelee työn aikana ilmi tulleita seikkoja toiminnan kehittämiseksi ja on yleistettävissä muihinkin vastaaviin yrityksiin, joilla on piensarjatuotantoa. Suunnittelu-työn tulokset ovat myös yleistettävissä ja ne soveltuvat samantyyppiseen tuotteistoon ja valmistusympäristöön. Erityisesti kiinnitys loppuhitsauskiinnittimeen ruuveilla vaatii tietyn tyyppisiä tuotteita, joihin voidaan tehdä paikoituspiirteitä.

Työssä esitettyjen robottihitsaukseen siirrettävien kappaleiden seurauksena robottihitsausolun käyttöastetta saadaan kasvatettua n. 20 %, joka ei vielä yllä tavoitteena olevaan 25 % käyttöasteen nostoon. Työn tilaajan täytyy tehdä vielä tuotantokokeita sekä mittauksia menetelmien toiminnan verifioimiseksi, jonka jälkeen toimintatapaa voidaan laajentaa ja tavoitteeseen voidaan päästä. Valintataulukkoa tarvinnnee hienosäätää mitattujen tuotantoaikojen ja kustannuslaskelmien perusteella. Yksi kehittämiskohde voisi olla työssä esitetyn kanssa samantyyppisen modulaarisen kiinnitysjärjestelmän suunnittelu suuremmille tuotteille yksiakseliseen kääntöpöytään. Lisäksi tuotteita tulisi käydä läpi valmistettavuuden parantamiseksi ja modulaarisen tuoterakenteen lisäämiseksi, jolloin robottihitsauksen edellytykset paranisivat ja robottisolun käyttöastetta saadaan kasvatettua edelleen.

Tehdyn tutkimuksen perusteella esille tuli seuraavia jatkotutkimusehdotuksia

- Suurten levyjen jigittömän hitsauksen kannattavuuden tutkiminen, jossa levyosien käsittelystä nostimilla vapautuisi aikaa ohjelmointityöhön.
- Erilaisten yleiskäyttöisten kiinnitysratkaisujen etsiminen ja vertailu työkappaleen kiinnittämiseksi loppuhitsausjigiin. Tutkimuksessa voisi palata erityisesti magneetikinnitykseen, joka suljettiin pois tässä työssä suurelta osin lämmönkeston ja mahdollisten valokaarta häiritsevien ilmiöiden vuoksi.
- Yleiskäyttöisen modulaarisen kiinnitysmenetelmän kehittäminen yksiakseliseen kääntöpöytään.
- Tutkimusta tuotteen valmistamisen kokonaisoptimoinnin kustannusvaikutuksista.

## 9 Yhteenveto

Robottihitsauksen kehitys on laajentanut sen käytettävyyttä autoteollisuuden tuotantolinjoilta tavallisiin konepajoihin. Robotit ovat usein kustannustehokkaita keskisuurissa sarjoissa, mutta piensarjoja valmistavat yritykset ovat usein ongelmissa robottihitsauksen tuotavuuden kanssa. Robottihitsauksesta on vain vähän piensarjatuotantoa ja varsinkin sen kiinnitintekniikkaa sekä muita erityisvaatimuksia käsitteleviä tutkimuksia tai teoksia. Tässä diplomityössä keskityttiin edellä mainittuun ongelmaan tutkimalla piensarjoja tuottavan keskiraskaan konepajan toimintaa, jossa on ollut vaikeuksia kasvattaa robottihitsausolosuhteiden käyttöastetta ja esittämällä toimenpide-ehdotuksia tilan korjaamiseksi. Tutkimusongelmasta johdettu päätutkimuskysymys oli, miksi robotilla ei ole tarpeeksi hitsattavaa. Alatutkimuskysymykset olivat mitä toimenpiteitä yrityksen olisi tehtävä omassa toiminnassaan, jotta tuotteista suurempi osa hitsattaisiin robotilla, millaisia ominaisuuksia on MIG/MAG-robottihitsaukseen hyvin soveltuvalla terästuotteella hitsattavuuden, valmistuksen kannattavuuden ja kiinnitinsuunnittelun näkökulmasta ja millainen kiinnitintekniikka soveltuu pieniin sarjoihin parhaiten, vai onko jigitön hitsaus paras ratkaisu. Työssä yrityksen toimintaa tutkittiin pelkkää tuotantoa laajemmassa kontekstissa ja etsittiin käyttöasteeseen vaikuttavia seikkoja suunnitteluprosessin alusta lähtien.

Tutkimuskysymyksiin vastaamiseksi suoritettiin tutkimus kirjallisuustutkimuksen, systemaattisen suunnitteluprosessin ja simuloinnin menetelmiä käyttäen. Menetelmät muodostavat tutkimuksessa menetelmätriangulaation, jossa menetelmien tulosten välistä vertailua käytettiin tutkimustulosten verifiointiin. Kirjallisuustutkimuksella ja systemaattisella suunnitteluprosessilla kartoitettiin piirteitä, joita hyvin piensarjatuotantoon soveltuvilla kiinnittimillä ja tuotteilla on. Systemaattisen suunnitteluprosessin ja simuloinnin avulla selvitettiin kiinnittimen ja tuotteen rakenteen suunnittelun vaikutusta tuotettavuuteen. Simuloinnin ja kirjallisuustutkimuksen avulla tutkittiin, kuinka valmistettavuutta voidaan parantaa valmistusvälineillä.

Tutkimustuloksena saatiin toimenpidelistaus tarvittavista toimista robottihitsaussolun käyttöasteen kasvattamiseksi. Lisäksi muodostettiin esitys yleiskäyttöisestä loppuhitsauskiinnitimestä, jossa kappaleen kiinnitys tapahtuu kartioruuveilla, sekä tätä kiinnitintä varten muokatuista robottihitsattavista kokoonpanoista. Toimenpidelistaus on suoraan yleistettävissä piensarjatuotantoon, jossa samantyyppisiä tuotteita hitsataan robotilla tai jossa pohditaan robotti-investointia. Tuotteiden muokkaus- ja kiinnitysmenetelmät soveltuvat ruuvikiinnityksen osalta vain rajatulle tuotteistolle, mutta periaatteet ovat osin yleistettävissä. Lisätutkimusta tarvitaan työkappaleen kiinnittämisestä magneetein loppuhitsausjigiin, sekä tavanomaisesti nosturilla käsiteltävistä osista koostuvien kokoonpanojen jigittömästä hitsauksesta.

## Lähteet

- ABB. 2021. Workpiece Positioners. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 2.8.2021]. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A4120&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- Alonen, A., Jääskeläinen, E., Nissinen, J., Pirinen, M., Solehmainen, K., Toivanen J. & Tuunainen, A. 2014. Hitnet — hitsaavan teollisuuden hankintatoimen ja toimitusketjun tehostaminen. Hitnet-hankkeen loppuraportti. Savonia-ammattikorkeakoulu. 102 s.
- Bajd, T., Mihelj, M., Lenarčič, J., Stanovnik, A. & Munih, M. 2010. Robotics. Dordrecht: Springer Netherlands. 152 s.
- Bejlegaard, M., Brunoe, T.D. & Nielsen, K. 2018. A Changeable Jig-Less Welding Cell for Subassembly of Construction Machinery. Teoksessa: Moon, I., Lee, G., Park, J., Kiritsis, D. & von Cieminski, G. (eds). Advances in Production Management Systems. Production Management for Data-Driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2018. Volume 535. Switzerland. Springer. S. 305–311.
- Bernd Siegmund. 2021 Pikakiinnitys työkalut. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 14.7.2021]. Saatavissa: <https://www.siegmund.com/fi-fi/Tuotteet/Kiinnitysjarjestelma,6695.php>
- Gu, W.P., Xiong, Z.Y. & Wan, W. 2013. Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 69. London. Springer-Verlag. S. 451-460.
- Haapakoski, T. 2008. Piensarjatuotannon haasteet robottihitsauksessa. Hitsaustekniikka, 2008: Nro 4. S. 26–29.
- Haula, J. 2008. Hitsauksen kevytmekanisoinnillatehoa tuotantoon. Hitsaustekniikka, 2008: Nro 4. S. 2–6.
- Hiltunen, E. 2005. Hitsauksen automatisointimahdollisuuksien huomiointi. [viitattu 12.7.2021]. 34 s. Saatavissa PDF-tiedostona: [http://webd.savonia.fi/projektit/markkinointi/HIT/users/materials/commonmaterial/seminars/Hitsaustekniikkaa\\_suunnitteli-joille/2005-0\\_27\\_Hitsauksen\\_automatisointi\\_Esa\\_Hiltunen.pdf](http://webd.savonia.fi/projektit/markkinointi/HIT/users/materials/commonmaterial/seminars/Hitsaustekniikkaa_suunnitteli-joille/2005-0_27_Hitsauksen_automatisointi_Esa_Hiltunen.pdf)

- Hiltunen, E. & Purhonen, T. 2008. Robottihitsauksen laatu – monen tekijän summa. Hitsaustekniikka, 2008: Nro 4. S. 33–36.
- Hobart Institute of Welding Technology. 2012. Gas Metal Arc Welding. 3. painos. Hobart Institute of Welding Technology. 320 s.
- Huhtala, P. & Pulkkinen, A. 2009. Tuotettavuuden kehittäminen - Parempi tuoteisto useasta näkökulmasta. Helsinki: Teknologiateollisuus. 431 s.
- Ionix 2021. MIG/MAG-hitsaus. [viitattu 9.8.2021]. Saatavissa: <http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/kaarihitsaus/migmag-hitsaus/>
- Jenney, C., L. & O'Brien, A. 2001. Welding handbook. 9. painos. American welding Society. 872 s.
- Kara, J. & Rajamäki, P. 1983. Hitsauksen mekanisointi ja automatisointi. Tekninen tiedotus 4/83. Metalliteollisuuden kustannus Oy. 66 s.
- Kemppi 2021. MagTrac F 61. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 10.7.2021]. 11 s. Saatavissa PDF-tiedostona: [https://kemppi.studio.crasman.fi/pub/web/pdf/kemppi\\_magtrac-f-61\\_fi\\_FI.pdf](https://kemppi.studio.crasman.fi/pub/web/pdf/kemppi_magtrac-f-61_fi_FI.pdf)
- Kuivanen, R. 1999. Robotiikka. Helsinki: Suomen robotiikkayhdistys. 188 s.
- Jääskeläinen, E., Solehmainen, K. & Tuunainen, A. 2010. Uudet innovaatiot hitsausautomaatioissa. HitSavonia II -hankkeen loppuraportti. Savonia-ammattikorkeakoulu. 131 s.
- Lapinleimu, I., Kauppinen, V. & Torvinen S. 1997. Kone- ja metallituoteteollisuuden tuotantojärjestelmät. 1. painos. Helsinki: WSOY. 398 s.
- Lapinleimu, I. 2001. Ideaalitehdas: tehtaan suunnittelun teorian kiteytys. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu. 197 s.
- Lempiäinen, J. & Savolainen, J. 2003. Hyvin suunniteltu – puoliksi valmistettu. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys Ry. 180 s.
- Lempiäinen, J. 2020. Teollisuusrobottien tilastot 2019. Automaatioväylä, 2020: Nro 5. S. 12–14.
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. 1.–5. painos. Helsinki: WSOYpro. 429 s.



- Lepola, P. & Ylikangas, R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. 1. Painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 415 s.
- Lukkari, J. 2007. Työkaluja hitsauskoordinoijalle hitsausten suunnittelua varten. Hitsaustekniikka, 2007: Nro 2. S. 2–17.
- Lukkari, J. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. Hitsaustekniikka, 2011: Nro 3. S. 2–8.
- Lin, W. & Luo, H. 2015. Robotic Welding. Teoksessa: Nee, A. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. 2018. London. Springer-Verlag S. 2403–2444
- Magwitch. 2021. MagSquare. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 15.10.2021]. Saatavissa PDF-tiedostona: <https://magswitch.nl/cms/attachments/article/33/MagSquares%20Instruction%20Manual.pdf>
- Matilainen, J., Parviainen, M., Havas, T., Hiitelä, E. & Hultin, S. 2011. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. Helsinki: Teknologiainfo Teknova. 387 s.
- Muhammad, J., Altun, H. & Abo-Serie, E. 2016. Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 88. London. Springer-Verlag. S. 127-145
- Nee, J., G. 2010. Fundamentals of tool design. 6. painos. Society of Manufacturing Engineers. 404 s.
- O'Brien, A. 2004. Welding handbook Processes. Part 1. Volume 2. 9. painos. American welding Society. 782 s.
- Pan, Z., Polden, J., Larkin, N., Van Duin, S. & Norrish, J. 2012. Recent progress on programming methods for industrial robots. Teoksessa: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2012. Elsevier. S. 87–94
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K. H. 2007. Engineering Design: A Systematic Approach. 3. Painos. Lontoo: Springer-Verlag. 617 s.
- Piironen. 2013. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettavuuteen. Savonia-ammattikorkeakoulu. 65 s.
- Pires, J. N., Loureiro, A. & Bölmsjö, G. 2006. Welding Robots: Technology, System Issues And Applications. Lontoo: Springer. 180 s.

- Pirkka-hitsi. 2021. Magnetic clamp magsquare 1000 magswitch.. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 15.10.2021]. Saatavissa: <https://www.pirkkahitsi.fi/MAGNETIC-CLAMP-MAGSQUARE-1000-/ekauppa/p8100099/>
- Schunk. 2021a. NSL3 150-V1-T. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 9.8.2021]. Saatavissa: [https://schunk.com/de\\_en/clamping-technology/product/53293-1323568-nsl3-150-v1-t/](https://schunk.com/de_en/clamping-technology/product/53293-1323568-nsl3-150-v1-t/)
- Schunk. 2021b. Clamping Pins (Accessories for NSL3 150-V1-T). [www-tuotedokumentti]. [viitattu 9.8.2021]. Saatavissa: [https://schunk.com/de\\_en/clamping-technology/product/53293-1323568-nsl3-150-v1-t/accessories/clamping-pins/](https://schunk.com/de_en/clamping-technology/product/53293-1323568-nsl3-150-v1-t/accessories/clamping-pins/)
- SFS-EN 10218-1. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 28 s. Vahvistettu 5.9.2011.
- SFS-EN 1993-1-8. 2005. Teräsrakenteiden suunnittelu. Liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 149 s. Vahvistettu 15.8.2005.
- SFS-EN ISO 5817. 2014. Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 61 s. Vahvistettu 31.3.2014.
- SFS-EN ISO 6947. 2019. Hitsaus ja sen lähiprosessit. Hitsausasennot. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 47 s. Vahvistettu 8.11.2019.
- Solehmainen, K., Tuunainen, A., Räsänen, M. & Jääskeläinen, E. 2016. Hitsauskiinnitin vai joustava hitsauskiinnitin. Hitsauksen laadunhallinta ja kiinnitintekniikka (HiKi) projektin loppuraportti. Savonia-ammattikorkeakoulu. 59 s.
- SSAB. 2021. SSAB Laser® 355C. [www-tuotedokumentti]. [viitattu 6.9.2021]. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/tuotteet/brandit/ssab-laser/products/ssab-laser-355c>
- Stenbacka, N. 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. 159 s.
- Wang, H. & Rong, Y. 2008. Case based reasoning method for computer aided welding fixture design. Teoksessa: Shapiro, V. Computer-Aided Design, 2008. Volume 40. Elsevier. S. 1121–1132.

Wang, H., Rong, Y., Li, H. & Shaun, P. 2010. Computer aided fixture design: Recent research and trends. Teoksessa: Shapiro, V. Computer-Aided Design, 2010. Volume 42. Elsevier. S. 1085–1094.

Weman, K. 2012. Welding Processes Handbook. 2. Painos. Philadelphia. Woodhead Publishing. 281 s.

Österholm J. & Tuokko R. 2001. Systemaattinen menetelmä tuotemodulointiin. Helsinki: Metalliteollisuuden keskusliitto, MET. MET-julkaisu nro 21/2001. 64 s.

## Liite 1: Huomiot yrityksen tuotannosta

### Hitsaustoiminta:

- railonseurantaa ei käytetä
  - toiminnan alussa on ollut huono kokemus toiminnasta, jossa hitsi on karannut
- railonhakua kaasuholkilla käytetään pääasiallisesti vain kappaleen paikan etsimiseen ensimmäisen hitsin yhteydessä
- erityisesti käsinhitsauksessa on paljon eri toimintatapoja riippuen hitsaajan henkilökohtaisista mieltymyksistä
- käsinhitsauksessa on käytössä sekalaisesti väliaikaisia jigejä ja pysyvämpiä ratkaisuja
- hitsausrobotin hitsausohjelmissa käytetään samoja parametreja, joka vakioi toimintaa
- robottihitsauskokoospanoilla on omat silloitus-, kiinnitys- ja hitsausohjeet
- hitsaustestien teko ohjelmien hiomiseksi ja roiskeiden vähentämiseksi nähtiin positiivisena asiana
- joissain tilanteissa käytettiin vatupassia kappaleen asennon määrittelyssä kiinnittimessä.

### Laitteisto:

- polttimen ulottumaa ahtaisiin paikoihin haluttaisiin tuotannon puolelta parantaa
- poltinkaapeli takertuu helposti robotin ranteeseen
- pienten kappaleiden kiinnitys teloja lukuun ottamatta tapahtuu modulaarisen loppuhitsauskiinnittimen kierteitettyyn pohjalevyyn erilaisin tulkein ja omavalmistekiinnittimin
- robotin hitsauspolttimen puhdistuslaitteisto koettiin huonoksi

- kuona ei lähde kaasuholkista pois
- vapaalanka katkeaa vinoon.

#### Hitsattavat kappaleet:

- vaaka-asennon hitsausominaisuudet ovat robotilla varsin rajalliset
- erityisesti nosturia vaativien kokoonpanojen kääntely todettiin ongelmaksi, koska yksi kiinnitys ja nosto ei riitä
- telastoissa sisäpuolella olevien välilevyjen kiinnitys todettiin ongelmalliseksi, koska putkien sisämitat vaihtelivat
  - telojen esikoneistetuissa ulkohalkaisijoissa on myös eroja
  - haittaa jigiin asettamista ja myös hitsien paikat vaihtelevat
  - hitsit saattavat palaa läpi, koska ilmarako on suuri
- hitsaajien mielestä laserleikkeet ja esikoneistukset ovat hyviä kappaleiden paikoitukseen
- rakenneputkissa on havaittu jonkin verran mittavaihteluita ja ovat erittäin hankalia robotisoida
- yrityksen tuotteissa on lisätty pienahitsien käyttöä viime aikoina, jolla on ollut hitsaajien kokemuksen toimintaa tehostava vaikutus.

## Liite 2: Toimenpidelistaus jaoteltuna tuotantojärjestelmän ja sen osien mukaisesti

### Tuotantojärjestelmä

- Paranna kumpaankin suuntaan tapahtuvaa tiedonkulkua erityisesti suunnittelun ja valmistuksen välillä jo tuotteen konseptisuunnittelun aikana.
- Nimeä henkilö, joka vastaa robottihitsauksesta.
- Hyödynnä tuotteiden liittynät osatasolta tuotteistotasolle asti.
- Etsi tuotteistosta hyvin robottihitsattavia kappaleita suunnittelun ja valmistuksen yhteistyönä.
- Huomioi valmistusverkosto ja tuotteen elinkaari tuotettavuutta ja siihen vaikuttavia toimia pohdittaessa.

### Suunnittelu

- Tuotesuunnittelun strategiset päätökset ja variaatioiden sekä moduloinnin tulee olla ylhäältä johdettua ja suunnitelmallista.
- Moduloi tuotteita riittävän kappalekohtaisen valmistusmäärän saavuttamiseksi.
- Standardoi tuotteiden rakennetta, liittostyyppjä ja levyn paksuuksia.
- Siirrä variaatioiden teko mahdollisimman myöhäiseen vaiheeseen, mieluiten kokoonpanoon.
- Huolehdi että suunnittelussa on todenmukainen käsitys hitsattavan kappaleen suunnittelusta yrityksen tuotantoympäristössä.
- Huomioi valmistettavuus jo konseptisuunnitteluvaiheessa.
- Suunnittele kappaleista yksinkertaisia, itsepaikoittuvia ja railon sijainnin osalta mittatarkkoja.

### Suunnittelu (jatkuu)

- Poista turhia variaatioita ja muodosta tuoteperheitä.
- Vältä paikoittavien piirteiden ketjuuntumista.
- Huomioi nostot sekä kappaleen käsittely ja tee kiinnityksestä hitsauskiinnittimeen nopeakäyttöinen.
- Suunnittele hitsauskiinnittimet samanaikaisesti tuotteen kanssa, mikäli mahdollista.
- Suunnittele hitsauskiinnittimistä mahdollisimman yksinkertaisia ja yleiskäyttöisiä.
- Käytä hyödyksi olemassa olevia yleiskäyttöisiä hitsauskiinnittimiä.
- Suosi pienahitsejä sekä jalkoasentoa ja huomioi robotin tilantarve sekä esteettön pääsy hitseihin.
- Merkitse hitsauskiinnittimet.
- HUOM! Kaikkia tuotteita tai tuotteen hitsejä ei tarvitse hitsata robotilla.

### Valmistus

- Operaattorien tulee käyttää säännöllisesti laitteistoa, jotta taidot pysyvät yllä.
- Tee tarvittaessa hitsaustestejä laitteiston parametrien säätämiseksi ja toiminnan harjoittelemiseksi.
- Mittaa toimintaa ja laatua, jotta virheiden juurisyyt ja hukka saadaan selville.
- Hitsauskiinnittimet tulee olla dokumentoituja ja suunnittelussa tulee olla tieto käytössä olevista työkaluista sekä kiinnittimen vakio-osista.
- Ohjeista ja dokumentoi robottihitsauksen suoritus silloitus mukaan lukien.

### Valmistus (jatkuu)

- Standardoi ja moduloi hitsausohjelmien rakenne uuden ohjelman teon nopeuttamiseksi.
- Etsi käsin hitsattavista tuotteista potentiaalisia robottihitsattavia tuotteita.
- Tee valmistettavuutta ja robottihitsattavuutta parantavia ehdotuksia suunnitteluun.



## Liite 3: Robottihitsattavuuden arviointitaulukko

KAPPALEEN ROBOTTIHITSATTAVUUDEN ARVIOINTI				
Vaativuudet	Arvosteluasteikko			
Kappaleenkäsittelijä pystyy käsittelemään kappaletta	Ehdoton vaatimus			
Tuote on S235, S355 tai E470 terästä	Ehdoton vaatimus			
Hitsit ovat robotin ulottuvissa	Ehdoton vaatimus			
Osien mittatarkkuudesta johtuva railon sijainnin epätarkkuus	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii käsinhitausta tai railonhakua 3 = mahdollista paikoittaa jigillä tai hitsauksen aloituspiste on tarkka 5 = railojen sijaintitoleranssi on alle 1,5 mm			
Vaatii esikoneistuksen lisäyksen jollekin osalle	<b>-5, 0</b> -5 = esikoneistuksen lisäys yhdelle osalle 0 = ei tarvetta lisätä esikoneistuksia			
Kappaleen konstruktio	<b>1, 5, 10</b> 1 = monimutkainen kokoonpano tai kerrosrakente, osilla useita asennussuuntia 5 = kohtuullisen yksinkertainen kokoonpano 10 = yksinkertainen kokoonpano, osilla yksi asennussuunta			
Silloituskiinnittimen monimutkaisuus	<b>1, 3, 7</b> 1 = monimutkainen tai koneistusta vaativa silloituskiinnitin 3 = yksinkertainen silloituskiinnitin 7 = ei silloituskiinnitintä			
Kappaleen siirto	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii nostimia ja kääntöjä, ei nostopisteitä 3 = vaatii nostimia, nostopisteet on tai ei tarvitse kääntöjä 5 = voidaan käsitellä käsin			
Mahdollisuus käyttää jo olemassa olevia kiinnittimiä	<b>1, 3, 7</b> 1 = ei 3 = osittain 7 = kyllä			
Nimikkeen uudelleensuunnittelun määrä [h]	<b>1-5</b> 1 = yli 50 tuntia 2 = 20-50 3 = 10-20 4 = 5-10 5 = alle 5			
Vuosittainen valmistusmäärä [kpl] Mahdollisten variaatioiden määrä lisää lukua x 0,5	<b>1,3,10,15,20</b> 1 = alle 5 3 = 5-20 10 = 20-50 15 = 50-100 20 = yli 100			
Robottihitsattavien hitsien tilavuus [mm <sup>3</sup> ]	<b>1-5, 7, 10</b> 1 = alle 25 000 2 = 25 000-50 000 3 = 50 000-75 000 4 = 75000-100 000 5 = yli 100000 7 = yli 150 000 10 = yli 200 000			
<b>Yhteensä</b>				

## Taulukon käyttöohje:

1. Merkitse päivämäärä kohtaan pvm ja kohtaan A työkappaleen tunniste.
2. Kohtaan B merkitään kunkin rivin kohdalle täyttyykö ehdoton vaatimus.
3. Arvioi rivikohtaisesti kunkin arviointikriteerin arvo kohtaan C. Arvot määräytyvät arvosteluasteikko-sarakkeen ohjeen mukaan.
4. Laske arviointikriteerien arvot (C) yhteen kohtaan D.

KAPPALEEN ROBOTTIHITSATTAVUUDEN ARVIOINTI	pvm	A		
Vaatimukset	Arvosteluasteikko			
Kappaleenkäsittelijä pystyy käsittelemään kappaletta	Ehdoton vaatimus	B		
Tuote on S235, S355 tai E470 terästä	Ehdoton vaatimus	B		
Hitsit ovat robotin ulottuvissa	Ehdoton vaatimus	B		
Osien mittatarkkuudesta johtuva railon sijainnin epätarkkuus	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii käsinhitsausta tai railonhakua 3 = mahdollista paikoittaa jigillä tai hitsauksen aloituspiste on tarkka 5 = railojen sijaintitoleranssi on alle 1,5 mm	C		
Vaatii esikoneistuksen lisäyksen jollekin osalle	<b>-5, 0</b> -5 = esikoneistuksen lisäys yhdelle osalle 0 = ei tarvetta lisätä esikoneistuksia	C		
Kappaleen konstruktio	<b>1, 5, 10</b> 1 = monimutkainen kokoonpano tai kerrosrakente, osilla useita asennussuuntia 5 = kohtuullisen yksinkertainen kokoonpano 10 = yksinkertainen kokoonpano, osilla yksi asennussuunta	C		
Silloituskiinnittimen monimutkaisuus	<b>1, 3, 7</b> 1 = monimutkainen tai koneistusta vaativa silloituskinnitin 3 = yksinkertainen silloituskinnitin 7 = ei silloituskinnittintä	C		
Kappaleen siirto	<b>1, 3, 5</b> 1 = vaatii nostimia ja kääntöjä, ei nostopisteitä 3 = vaatii nostimia, nostopisteet on tai ei tarvitse kääntöjä 5 = voidaan käsitellä käsin	C		
Mahdollisuus käyttää jo olemassa olevia kiinnittimiä	<b>1, 3, 7</b> 1 = ei 3 = osittain 7 = kyllä	C		
Nimikkeen uudelleensuunnittelun määrä [h]	<b>1-5</b> 1 = yli 50 tuntia 2 = 20-50 3 = 10-20 4 = 5-10 5 = alle 5	C		
Vuosittainen valmistusmäärä [kpl] Mahdollisten variaatioiden määrä lisää lukua x 0,5	<b>1,3,10,15,20</b> 1 = alle 5 3 = 5-20 10 = 20-50 15 = 50-100 20 = yli 100	C		
Robottihitsattavien hitsien tilavuus [mm <sup>3</sup> ]	<b>1-5, 7, 10</b> 1 = alle 25 000 2 = 25 000-50 000 3 = 50 000-75 000 4 = 75000-100 000 5 = yli 100000 7 = yli 150 000 10 = yli 200 000	C		
<b>Yhteensä</b>		D		

Tulosten tulkinta:

- Pääsääntöisesti yli 35 pistettä saaneet kappaleet ovat kannattavia siirtää robotille hitsattavaksi.
- Alle 30 pistettä saaneet ovat todennäköisesti varsin haastavia hitsata robotilla kannattavasti.
- Pisteillä 30–35 olevat tuotteet vaativat usein taulukon lisäksi kustannusarviota tukemaan päätöstä.

Kriteereiden painotukset on määritelty vastaamaan tämän työn tilaajan tuotteistoa ja toimintaa, joten eri tuotteistossa käytettynä tuloksiin pitää suhtautua varauksella ja kriteeristön painotuksia voi joutua muuttamaan.