

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Hugo Lappalainen

KÄÄNTÖLAITTEEN HITS AUS JOUSTAVALLA ROBOTTIHITSAUSSOLULLA

Työn tarkastajat:

Professori Harri Eskelinen
DI Ari Pirhonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Hugo Lappalainen

Kääntölaitteen hitsaus joustavalla robottihitsaussolulla

Diplomityö

2018

107 sivua, 41 kuvaa, 7 taulukkoa ja 7 liitettä

Tarkastajat: Professori Harri Eskelinen
DI Ari Pirhonen

Hakusanat: robottihitsaus, robotisoitu kappaleenkäsittely, kappaleenkäsittelyrobotti joustava tuotanto, miehittämätön hitsaus, pylväs, kääntölaite, tarrain, arvoanalyysi

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia Kesla Oyj:lle suunniteltuun joustavaan robottihitsaussoluun sopivaa robottitarrainta. Miehittämättömästi ajettavan robottihitsaussolun kappaleenkäsittely tapahtuu lineaariradalla liikkuvalla nivelvarsirobotilla. Tällöin valittavan robottitarraimen tulee pystyä liikuttamaan mahdollisimman monipuolisesti erilaisia kappaleita, kestää massiivisista kappaleista aiheutuvat kuormitukset ja vikatilanteissa säilyttää kiinnitys pudottamatta kappaletta.

Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja käytännön osuudesta. Kirjallisuusosuudessa käsitellään robottihitsausta yleisesti, siihen liittyvää laitteistoa, ohjelmointi- ja anturointitapoja sekä joustavuuden saavuttamista. Lisäksi kirjallisuusosuudessa käsitellään erilaisia robottitarraimiksi soveltuvia laitteistoja sekä auto- ja teollisuusnosturin kääntölaitteen hitsausta. Käytännön osuudessa määritellään kääntölaitteen osien robottihitsauksen kappaleenkäsittelyn kiinnityskohdat ja valitaan arvoanalyysiä apuna käyttäen kappaleenkäsittelyrobotille tarrain.

Kappaleenkäsittelyn kiinnityskohdiksi valittiin kääntöpylvään selkäpuoli ja kääntölaitteen rungon valukappale. Arvoanalyysin perusteella parhaimmaksi tarraintyypiksi käyttökohteeseen osoittautui nollapistekiinnitin. Eri valmistajien nollapistekiinnittimistä robottitarraimeksi valittiin AMF:n K20.3 perustuen sen ominaisuuksiin ja omakohtaisiin kokemuksiin nollapistekiinnittimistä. Nollapistekiinnitintä varten suunniteltiin tarrainlaippa, jonka avulla kiinnitin saadaan toimimaan robotin rannelaipassa. Liikuteltaville kappaleille suunniteltiin myös kiinnityslaipat, joihin nollapistevetotapit saadaan kiinnitettyä ja kappaleet kohdistettua oikeaan asemaan robotin suhteen. Nollapistetarraimen keskittävän ja kohdistavan kiinnityksen lisäksi kappaleille tulee valmistaa riittävän tarkat telineet, joista robotti saa helposti noudettua hitsattavat kappaleet.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Hugo Lappalainen

Welding of rotating device using flexible robot welding cell

Master's thesis

2018

107 pages, 41 figures, 7 tables and 7 appendices

Examiners: Professor Harri Eskelinen
M. Sc. (Tech.) Ari Pirhonen

Keywords: robot welding, robotic material handling, flexible manufacturing, unattended welding, crane, post, rotating device, welding, gripper, value analysis

Kesla Oyj is planning to invest in a flexible robot welding cell. The aim of this thesis was to find suitable robot gripper for planned robot welding cell. In this unattended welding cell the workpiece positioning is done by industrial robot which lays on linear axis. In this case the robot gripper must be able to grab and move various workpieces, withstand strain from heavy workpieces and maintain the grip in case of system failure or power outage.

The study consists of literature review and practical part. The literature review comprises robot welding in general, robot welding equipment, programming methods, sensors and how to achieve flexibility in robot welding. Also different types of robot grippers and welding of truck and stationary cranes' rotating device are discussed. In the practical part the workpieces' gripping points for the material handling robot are defined and the most suitable robot gripper is selected by using value analysis.

The selected gripping point for the rotating column was its backside and the point for the base of the rotating device was its steel casting. Based on value analysis the most suitable robot gripper for the flexible robot welding cell was zero point clamping system. In the end AMF K20.3 zero point clamping system was chosen based on its properties and previous experience of zero point clamping systems. A gripper flange was designed for the zero point clamping system so it can be attached to the robot mounting flange. Also attachment flanges for the workpieces were designed. The zero point clamping nipples are installed to the attachment flanges and the flanges also help to align the workpieces. For unobstructed and precise gripping, racks for weldable parts must be manufactured.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Kesla Oyj:tä ja tuotantojohtaja Paavo Hopposta mahdollisuudesta opettavaiseen diplomityöaiheeseen. Kiitos tuotantopäällikkö Ari Pirhoselle työn ohjaamisesta ja tarkastamisesta sekä muille Kesla Oyj:n työntekijöille, jotka olivat suurena apuna diplomityön tekemisessä. Haluan kiittää myös Lappeenrannan teknillisen yliopiston professori Harri Eskelistä diplomityön tarkastuksesta ja laboratorioinsinööri Esa Hiltusta asiantuntemuksesta robottihitsaukseen liittyen.

Lisäksi kiitokset kuuluvat kaikille opiskelukavereille, nykyisille ystäville, jotka saivat opiskeluajan lentämään kuin siivillä. Teidän ansiosta jopa välillä ylitsepääsemättömän vaikeilta tuntuvat opinnot olivat äärimmäisen hauskoja ja ikimuistoisia. Erityiskiitos omille vanhemmilleni, jotka ovat aina olleet tarvittaessa tukena niin henkisesti kuin taloudellisesti.



Hugo Lappalainen

Joensuussa 16.3.2018

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | JOHDANTO | 9 |
| 1.1 | Kesla Oyj | 11 |
| 1.2 | Työn tavoitteet ja rajausta..... | 12 |
| 1.3 | Tutkimusongelma ja -kysymykset..... | 13 |
| 2 | ROBOTTIHITSAUS | 14 |
| 2.1 | Laitteisto | 14 |
| 2.1.1 | Robotti | 14 |
| 2.1.2 | Robottiohjain | 15 |
| 2.1.3 | Hitsauslaitteisto..... | 16 |
| 2.1.4 | Kappaleenkäsittely..... | 17 |
| 2.2 | Ohjelmointitavat | 19 |
| 2.2.1 | Opettamalla ohjelmointi | 19 |
| 2.2.2 | Etäohjelmointi..... | 19 |
| 2.2.3 | Kädestä pitäen ohjelmointi | 20 |
| 2.3 | Robottihitsattava tuote ja laatu | 20 |
| 2.3.1 | Osavalmistuksen tarkkuus | 21 |
| 2.3.2 | Liitos- ja railomuodot | 21 |
| 3 | RAILONHAKU, -SEURANTA JA ANTUROINTI | 25 |
| 3.1 | Railonhaku | 25 |
| 3.2 | Anturointi ja railonseuranta | 27 |
| 3.2.1 | Parametrien anturointi..... | 28 |
| 3.2.2 | Geometrinen anturointi | 29 |
| 4 | JOUSTAVA ROBOTTIHITSAUSSOLU | 34 |
| 4.1 | Joustava valmistusjärjestelmä..... | 35 |
| 4.1.1 | Joustava valmistussolu..... | 36 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.2 | Miehittämätön robottihitsaus | 37 |
| 4.3 | Keslalle suunniteltu joustava robottihitsaussolu | 38 |
| 5 | ROBOTITARRAIMET | 41 |
| 5.1 | Mekaaniset tarraimet | 42 |
| 5.1.1 | Käyttövoimat | 43 |
| 5.1.2 | Vakiotarraimet | 44 |
| 5.2 | Alipainetarraimet | 45 |
| 5.3 | Magneetitarraimet | 46 |
| 5.4 | Nollapistekiinnittimet | 47 |
| 5.4.1 | Nollapistesylinteri | 49 |
| 5.4.2 | Vetotappi | 51 |
| 5.4.3 | Toiminta | 54 |
| 6 | NOSTURIN KÄÄNTÖLAITE | 56 |
| 6.1 | Kääntöpylväs | 56 |
| 6.1.1 | Pylvään hitsaus | 57 |
| 6.2 | Kääntölaitteen runko | 59 |
| 6.2.1 | Rungon hitsaus | 60 |
| 6.3 | Osavalmistuksen tarkkuuden haasteet | 60 |
| 6.4 | Rakenteiden muutosehdotukset robottihitsaukseen | 62 |
| 7 | KAPPALEENKÄSITTELYN KIINNITYSKOHDAT | 63 |
| 8 | TARRAIMEN VALINTA | 70 |
| 8.1 | Arvoanalyysi | 71 |
| 8.2 | Tarraimen valinta | 73 |
| 8.3 | Nollapistekiinnitin tarraimena | 77 |
| 8.4 | Hitsausmuodonmuutosten vaikutus nollapistetarraimen toimintaan | 79 |
| 8.5 | Nollapistekiinnittimen valinta | 81 |
| 8.6 | Nollapistekiinnittimeltä vaadittava pitovoima | 82 |
| 8.7 | Tarrain- ja kiinnitysleipä | 86 |
| 9 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 91 |
| 9.1 | Jatkotutkimusaiheet | 94 |
| 10 | YHTEENVETO | 97 |
| | LÄHTEET | 100 |
| | LIITTEET | |

LIITE I: Pylvään hitsauspiirustus ja osaluettelo.

LIITE II: Tukijalkapalkin hitsauspiirustus ja osaluettelo.

LIITE III: Kääntölaitteen rungon hitsauspiirustus ja osaluettelo.

LIITE IV: Vääntömomentit ja lukitusvoiman kaava.

LIITE V: Nollapistetarrainlaippa.

LIITE VI: Vetotappien kiinnityslaipat.

LIITE VII: Robotin suurimmat sallitut kiihtyvyydet.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|---------|--|
| a | Kiihtyvyys [m/s^2] |
| F_E | Lukitusvoima [N] |
| G | Painovoima [N] |
| g | Putoamiskiihtyvyys [m/s^2] |
| M | Momentti [Nm] |
| m | Massa [kg] |
| n | Varmuusluku |
| r | Voiman varsi [m] |
| CCD | Charge-Coupled Device, valoherkkä kenno |
| CMOS | Complementary Metal Oxide Semiconductor, valoherkkä kenno |
| CNC | Computerized Numerical Control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus |
| FMC | Flexible Manufacturing Cell, joustava valmistussolu |
| FMS | Flexible Manufacturing System, joustava valmistusjärjestelmä |
| MIG/MAG | Metal Inert Gas / Metal Active Gas, kaasukaarihitsausmenetelmä |

1 JOHDANTO

Kehittyneiden maiden, kuten Suomen, yritykset ovat ennen voineet kilpailla kansainvälisillä markkinoilla esimerkiksi siirtämällä tuotantoa maihin, joissa työkustannukset ovat todella alhaiset verrattuna kotimaahan. Näissä maissa tuotannon laatu ei kuitenkaan aina vastaa haluttua tai ole muutoin tasaista johtuen inhimillisistä virheistä ja kouluttamattomista työntekijöistä. Maihin on sittemmin viety yhä enenemissä määrin koulutusta ja osaamista laadun parantamiseksi. Samanaikaisesti työkustannukset ovat lähteneet nousuun, eikä työn teettäminen kehittyvissä maissa enää kannata samalla tavalla kuin aiemmin. Suomessa tähän voidaan vastata kouluttamalla työntekijöitä edistyksellisistä valmistusmenetelmistä ja tuotannon automatisoinnista. (Anteroinen 2013, s. 28; Anteroinen 2014, s. 38.)

Jarmo Hyvösen mukaan (2013, s. 24) tuotannon automatisointi on Suomessa ainoa keino, millä teollisuus saadaan nousuun ja työpaikat säilytettyä kotimaassa. Vaikka usein mielletään, että tuotannon automatisointi olisi moraalitonta sen viedessä ihmisten työpaikat, on se kuitenkin välttämätöntä kehityksen ja kansainvälisen kilpailun kannalta. Jos yritykset haluavat pysyä kannattavana ja edistää kilpailukykyään, on niiden uusiuduttava. Yrityksen on oltava kannattava, jotta työpaikkoja ei tarvitsisi vähentää entisestään. Tuotannon automatisointi ei siis suoranaisesti vie kenenkään työpaikkoja. Työntekijöiden työtehtävät voivat joka tapauksessa muuttua erilaisiksi ja yrityksen parempi kannattavuus voi avata uusia työpaikkoja. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 10-11; Hyvönen 2013, s. 24.)

Ammattitaitoisista hitsaajista on Pohjois-Karjalan alueella pula ja alueen hitsaavilla konepajoilla alkaa loppua työvoima kesken. Työikäisten, 15–64 vuotiaiden, määrä on laskenut vuodesta 2003 eteenpäin johtuen suurten ikäluokkien ikääntymisestä ja väestön huonosta syntyvyydestä. Tällä vuosikymmenellä viimeisetkin suurten ikäluokkien edustajat ovat tämän ikähaarukan ulkopuolella ja eläköityvät. (Hernesniemi 2007, s. 28.) Moni suurten ikäluokkien edustaja on toiminut metalliteollisuuden ammattilaisena ja valtava määrä tietoutta sekä osaamista on hävinnyt konepajoilta.

Nuoria ei tällä hetkellä kouluttaudu metalliteollisuuden aloille niin paljoa kuin aiemmin. Syynä tähän voi olla, että metalliteollisuuden työskentelyolosuhteet mielletään tunkkaisiksi ja likaisiksi. Tästä mielikuvasta huolimatta konepajat ovat nykypäivänä hyvin siistejä verrattuna aiempiin vuosikymmeniin. Osittain nuorten viimeaikaisiin kouluttautumisvalintoihin on vaikuttanut myös huonot ajat maailmantaloudessa ja olettaus, että tutkinnon saatua ei töitä olisikaan tarjolla. Edellä mainituista syistä johtuen Suomen konepajateollisuusyritysten on tehtävä investointeja kotimaassa, että yritykset pystyvät kilpailemaan paremmin kansainvälisesti, työpaikkoja saadaan lisää ja ne saadaan säilytettyä Suomessa.

Tuotantolaitokset ovat yhä enemmän asiakasohjautuvia, mistä johtuen tuotteiden sarja- ja eräkoot ovat pieniä, mutta tuotevalikoima kasvaa. Asiakkaat vaativat tuotteilta laatua, nopeaa toimitusta ja räätälöintiä heidän tarpeet huomioon ottaen. Tuotannon joustavuudella pystytään vastaamaan asiakkaiden tarpeisiin taloudellisesti kannattavasti. Hitsauksen robotisointi on yksi keino tuotantoautomaatioon, millä pyritään joustavaan ja mukautumiskykyiseen tuotantoon. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 150-151; Jain et al. 2013, s. 5946.)

Robotisoinnilla voidaan edistää työntekijöiden terveyttä ja mielekkyyttä työtehtäviin. Robotilla on mahdollista teettää ihmisille yksitoikkoiset työtehtävät, jolloin ammattitaitoisilla työntekijöillä voidaan teettää mielekkäämpiä ja vaativimpia tehtäviä. Robotin tehdessä niin sanotut likaiset työt työntekijät välttyvät hitsauksesta aiheutuilta epäterveellisiltä savukaasuilta ja kuumuudelta. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 150-153.) Myös työntekijöiden ergonomia paranee, kun hitsaajan ei tarvitse olla yhtäjaksoisesti epämiellyttävissä asennoissa tai ahtaissa paikoissa.

Laatu on keskeisessä roolissa yrityksen kilpailukyvyn säilyttämisessä ja parantamisessa. Robotisointi kasvattaa toimintavarmuutta ja mahdollistaa tasalaatuisten hitsien valmistamisen toinen toisensa jälkeen. Tällöin välttyään inhimillisistä tekijöistä johtuvista virheistä. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 150-152.)

Kun halutaan investoida hitsausautomaatioon, on investoinnin kannattavuuden parantamiseksi pyrittävä alusta lähtien miehittämättömiin tuotantopakkeihin ja saamaan

kaariaikasuhteiden mahdollisimman suureksi. Hitsauksen robotisoinnilla miehittämättömien tuotantoketjujen pituudet on mahdollista saada jopa kokonaisten työvuorojen pituisiksi. Miehittämättömyys vaatii erityisiä turvatoimilaitteita, jotta mahdollisten virheiden ilmetessä robotit lopettavat toiminnan ja muilta vahingoilta vältytään. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 152.)

Tuotantolaitosten kilpailu on kasvanut globaaliksi ja kysynnän vaihtelut ympäri maailmaa aiheuttaa yrityksille epävarmuutta. Robotisoinnin avulla voidaan parantaa tuottavuutta ja alentaa tuotantokustannuksia, jolloin kilpailukyky niin sanottuihin halpamaihin parantuu kansainvälisillä markkinoilla. Näin tuotantolaitokset saadaan pidettyä kotimaassa ja jopa lisättyä tuotannon kapasiteettia. (Aaltonen & Torvinen 1997, s. 150-154; Jain et al. 2013, s. 5946.)

1.1 Kesla Oyj

Kesla Oyj on vuonna 1960 perustettu suomalainen pörssiyritys, joka on erikoistunut metsäteknologian tuotteisiin. KESLA tuotteisiin kuuluu hakkurit, metsäkonenosturit, harvesterikourat, traktorien metsävarusteet, kahmarit sekä auto- ja teollisuusnosturit. Tuotteet mahdollistavat kokonaisvaltaisen tuotantoketjun puunkorjuulle metsästä tuotantolaitokselle. Käyttökohteita metsäteollisuuden lisäksi KESLA-tuotteille löytyy satamista, aluksista sekä energia- ja kierrätysteollisuudesta. Keslan tuotantolaitokset sijaitsevat Pohjois-Karjalassa: Joensuussa, Kesälahdella ja Ilomantsissa. Kesla Oyj:llä on tuotantolaitosten lisäksi Saksassa sijaitseva myynnin tytäryhtiö Kesla GmbH. Päätoimipiste sijaitsee Joensuussa, jossa toimii Keslan hallinto, tuotesuunnittelu sekä auto- ja teollisuusnosturien tuotanto. Vahvan kotimaanmarkkinan lisäksi KESLA-tuotteita viedään ympäri maailmaa yli 35 maahan ja liiketoiminnasta yli 70 % koostuu viennistä. (Kesla Oyj 2016; Kesla Oyj 2017.)

Joensuun tehtaalla auto- ja teollisuusnosturien valmistuksessa hitsaus on merkittävä valmistusmenetelmä. Käsinhitsauksen lisäksi tehtaalla löytyy hitsausautomaatti ja hitsausrobotti kappaleenkäsittelylaitteella, jossa on kaksi yksiakselista asemaa. Hitsausautomaattia ja -robottia käytetään tällä hetkellä pääasiassa jatkeiden, nosto- ja siirtopuomien hitsaamiseen. Nyt Joensuun tehtaalla halutaan nostaa hitsauksen automaatioastetta ja joustavuutta sekä edistää Keslan kilpailukykyä.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on Kesla Oyj:lle suunnitellun joustavan robottihitsausyksikön kappaleenkäsittelyrobotin tarraimen valinta. Tulevaan robottihitsausyksikköön kuuluu kaksi nivelvarsirobottia: hitsausrobotti MIG/MAG-hitsauslaitteistolla ja lineaariradalla liikkuva kappaleenkäsittelyrobotti. Työssä käydään läpi robottihitsaukseen ja joustavaan robottihitsaussoluun liittyviä toimintoja, kuten railonhakua ja -seurantaa sekä kappaleenhakua, -kiinnitystä ja -käsittelyä. Joustavassa robottihitsaussolussa kappaleenkäsittelyrobotti hakee silloitetut kappaleet paikoitusalueelta, tarttuu niihin kiinni, vie kappaleet tarvittaessa esilämmitysuuniin ja sieltä hitsausrobotille. Kappaleenkäsittelyrobotin avulla hitsattavat kappaleet saadaan asemoitua ja hitsaus suoritettua hitsausrobotille optimaalisissa asennoissa. Hitsauksen jälkeen kappaleenkäsittelylaite vie kappaleet takaisin paikoitusalueelle. Tavoitteena on selvittää, mitä kappaleenkäsittelyrobotin tarraimelta vaaditaan, että kappale saadaan hitsattua miehittämättömästi, miten kappaleenkäsittelyrobotti tarraa kappaleeseen ja miten kappale saadaan kiinnitettyä kappaleenkäsittelyrobottiin joustavasti.

Työ rajataan KESLA 2109 -mallin suorapuomisen auto- ja teollisuusnosturin (kuva 1) kääntölaitteen robottihitsaukseen ja kappaleenkäsittelyyn. Nosturin kääntölaite koostuu kääntöpölvästä ja kääntölaitteen rungosta. Hitsausrobottiyksikön joustavuuden ansiosta työstä saatuja tuloksia voidaan myöhemmin helposti soveltaa myös muiden nosturimallien, nosturin eri rakenteiden ja muiden hitsausta vaativien kappaleiden valmistukseen.



Kuva 1. KESLA 2109 suorapuominen auto- ja teollisuusnosturi (Kesla Oyj 2015a).

1.3 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Tyypillisessä robottihitsaussolussa hitsattavat kappaleet ovat joko paikallaan tai kappaleita liikuttaa yksinkertainen kappaleenkäsittelylaite. Tällöin hitsattavat kappaleet asetetaan hitsauspöytään kiinni käsin. Kun hitsattavat kappaleet ovat erilaisia ja hitsaustuotantoa halutaan ajaa miehittämättömänä, vaaditaan robottihitsaussolulta joustavuutta. Hitsauksen robotisointiin joustavuutta saadaan esimerkiksi käyttämällä kappaleenkäsittelyyn nivelvarsirobotti. Tässä työssä tutkimusongelmaksi muodostuu, miten lähes 300 kg kappaleet saadaan hitsattua miehittämättömänä käyttämällä kappaleenkäsittelyrobottia. Työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten robotisoidusta hitsauksesta saadaan mahdollisimman joustava?
- Mistä kohtaa kappaleita kappaleenkäsittely suoritetaan, että kappaleet voidaan hitsata kerralla ja robotti kestää kappaleista aiheutuvat rasitukset?
- Millainen tarrain vaaditaan, että robottihitsaussolu kykenee hitsaamaan kappaleet?
- Miten kappaleenkäsittelyrobotti saa otettua kappaleista kiinni aina samasta kohdasta?

2 ROBOTTIHITSAUS

Hitsauksessa on pystyttävä mukautumaan muuttuviin olosuhteisiin kuten railotilavuuden vaihteluun, mikä on ammattitaitoiselle hitsarille helppoa. Ammattitaitoisista hitsaajista on työvoimapula ja tuottavuuden parantaminen on elinehto Suomessa valmistukselle. Tällöin avuksi tarvitaan robotteja suorittamaan hitsausta. (Pashkevich 2009, s. 1038; Pires, Loureiro & Bölmsjö 2006, s. 105.) Toisin kuin ihmiset, robotit soveltuvat hyvin ankariin olosuhteisiin. Robotteihin ei vaikuta hitsauksesta aiheutuvat palokaasut, korkea lämpö tai valokaaren säteily. Robotisoidussa kaarihitsauksessa käytetyin hitsausprosessi on MIG/MAG-hitsaus umpilangalla tai täytelangalla. Robotit ovat väsymättömiä ja tarjoavat hitsaukselle hyvää toistettavuutta ja hitsauksen laadun luotettavuutta. (Hägele, Nilsson & Pires 2008, s. 969; Noruk et al. 2001, s. 467.)

2.1 Laitteisto

Robottihitsausjärjestelmä koostuu päälaitteista ja lisälaitteista. Robottihitsaukseen vaadittavat päälaitteet ovat robotti, robottiohjain, hitsausvirtalähde, hitsauspoltin, suojakaasulaitteisto, langansyöttölaite ja vaadittavat kaapelit sekä letkut. Lisälaitteita robottihitsaukseen voidaan varustella niiden tarpeellisuuden ja budjetin mukaan. Lisälaitteita, joita robottihitsauksessa on hyvä olla, ovat muun muassa hitsauspolttimen vesijäähdytysjärjestelmä ja puhdistusasema sekä työkalupisteen paikoituslaite. Muita lisälaitteita ovat esimerkiksi railonseurantalaitteet, kappaleenkäsittelylaitteet, lineaarirata tai puoliportaali. Kappaleenkäsittelylaitteilla saadaan robottiaseman käyttöön lisää vapausasteita ja lineaariradalla tai puoliportaalilla saadaan laajennettua robotin liikerataa. (Noruk et al. 2001, s. 468; Pashkevich 2009, s. 1035-1036.)

2.1.1 Robotti

Teollisuusrobotin määritelmä standardin SFS-EN ISO 10218-1 (2011, s. 12) mukaan on ”teollisuuden automaatio-sovelluksissa käytettäväksi tarkoitettu automaattisesti ohjattu, uudelleen ohjelmoitavissa oleva monikäyttöinen käsittelylaite, jonka akseleista vähintään kolme on ohjelmoitavissa ja joka voi olla kiinteästi asennettu tai liikkuva.” Nivelvarsirobotti (kuva 2) on teollisuusroboteista käytetyin robottityyppi eri sovelluksiin, kuten myös robotisoituun kaarihitsaukseen. Tyypillisesti hitsauksessa käytetyissä

nivelvarsiroboteissa on kuusi ohjelmoitavaa vapausastetta tai jopa enemmän. Nivelvarsirobotti muistuttaa liikeradoiltaan hyvin paljon ihmisen käsivartta, mikä tarjoaa hitsauspolttimen paikoittamiselle äärimmäisen hyvät mahdollisuudet. (Pashkevich 2009, s. 1036; Noruk et al. 2001, s. 469.)



Kuva 2. KUKA AG KR 30 L16-2 kuusiakselinen nivelvarsirobotti (KUKA 2014a, s. 11).

Teollisuusroboiteilla on tyypillisesti erittäin hyvät liike- ja toistotarkkuudet. Nivelvarsiroboiteilla toistotarkkuus on parempi kuin ± 0.1 mm. Tämä tarkoittaa sitä, että robotin hitsauspolttimen pää palaa jokaisen ohjelman suorituskerran aikana samaan pisteeseen 0.1 mm tarkkuudella. Liiketarkkuudella tarkoitetaan robotin kykyä suorittaa ennalta määriteltyjen liikkeiden pituudet ja suunnat oikein. Liikkeen tarkkuus on tyypillisesti ± 1.0 mm rajoissa. Tarkkuutta on vaikea määrittellä, sillä se vaihtelee riippuen, millä robotin ulottuvuusalueella työskennellään. (Hägele et al. 2008, s. 969; Noruk et al. 2001, s. 470.)

2.1.2 Robottiohjain

Robottisolujen tärkein laite on robottiohjain, jota voidaan sanoa solun aivoiksi. Se hallitsee ja ohjaa hitsaussolun kaikkia toimintoja robotin liikkeistä turvalaitteisiin sekä robottisolun suorittamaa työjonoa. Robottiohjaimet pystyvät yhden robotin lisäksi ohjaamaan ulkoisia akseleita, kuten kappaleenkäsittelylaitteita ja lineaarirataa tai jopa toista nivelvarsirobottia. Robottiohjaimen käyttämiseen tarvitaan graafinen käyttöliittymä, joka suoritetaan joko erillisellä kiinteällä tietokoneella tai käsiohjaimella. Käyttöliittymän avulla voidaan tehdä

robottiohjelmia, noutaa valmiita ohjelmia ja tallentaa robottiohjaimeen hitsauksessa tarvittavia parametriarvoja. (Lin & Luo 2015, s. 2426, 2429.)

2.1.3 Hitsauslaitteisto

MIG/MAG-robottihitsaukseen vaadittavaan hitsauslaitteistoon kuuluu hitsausvirtalähde, lisäainelangan ja suojakaasun syöttölaite sekä hitsauspoltin. MIG/MAG-hitsauksessa käytetään vakiojännitevirtalähdettä, jonka ominaiskäyrä on lähes vaakasuora. Vakiojännitevirtalähde mahdollistaa itsesäätävän ja vakaan valokaaren hitsauspolttimen etäisyyden vaihdellessa hitsattavan kappaleen suhteen. Lisäainelankaa syötetään tasaisella nopeudella hitsaustapahtumaan ja valokaari sulattaa lisäainelangan pisaroina hitsattavaan perusaineeseen. Jos hitsauspoltin viedään hitsatessa lähemmäksi kappaletta, vapaalangan pituus lyhenee. Tällöin valokaari lyhenee hetkellisesti ja virtalähde pyrkii vastamaan nostamalla hitsausvirtaa. Kohonnut hitsausvirta sulattaa lisäainetta nopeammin ja valokaaren pituus muuttuu halutuksi. Vastaavasti vapaalangan pidentyessä nostamalla hitsauspoltinta kappaleesta valokaaren pituus pääsee kasvamaan. Virtalähde reagoi laskemalla hitsausvirtaa, jolloin lisäainelanka sulaa hitaammin ja valokaari lyhenee. (Pires et al. 2006, s. 38.)

Langansyöttölaite sijaitsee nivelvarsirobotin käsivarressa mahdollisimman lähellä hitsauspoltinta. Sen tehtävänä on kuljettaa lisäainelankaa hitsauspolttimelle. Robottihitsauksessa lisäainelanka syötetään kelalta tai tynnyristä. Tynnyrissä on lankakelaan nähden moninkertainen määrä lisäainetta. Langansyöttölaitteen syöttörullat kuljettavat lisäainelangan ohjaimia pitkin ohjauskaapeliin. Lisäainelangan ohjauskaapeli sijaitsee monitoimijohtimessa, jonka kautta lanka kulkeutuu hitsauspolttimelle. Lisäainelangan syöttämisen lisäksi langansyöttölaite ohjaa monitoimijohtimen lävitse suojakaasun virtausta, hitsausvirtaa ja hitsauspolttimen jäähdytystä. Monitoimijohdin voi sijaita hitsausrobotin ulkopuolella tai kulkea nivelvarsirobotin käsivarren sisällä. Käsivarren sisällä kulkevan johtimen etuna on sen vähäisempi hankauksesta ja hitsiroiskeista aiheutuva kuluminen. (Pires et al. 2006, s. 39-40.)

Hitsauspolttimen tehtäviä ovat lisäainelangan ja suojakaasun kuljettaminen hitsaustapahtumaan. Hitsauspolttimen pään sisällä on kosketussuutin, jonka lävitse lisäainelanka kulkee ja hitsausvirta välittyy langalle. Suojakaasu syötetään

hitsauspolttimen pään kautta kaasusuuttimesta, joka ohjaa suojakaasun hitsisulalle laminaarisena virtauksena. Hitsauspolttimet voivat olla joko kaasu- tai vesijähdytteisiä. Vesijähdytetyjä hitsauspolttimia käytetään erityisesti, kun hitsataan suurilla virroilla ja suurella kaariaikasuhteella. Yleisesti robottihitsauksessa käytetyt hitsauspolttimet ovat vesijähdytetyjä niiden kestävyuden kannalta. Hitsauspoltinta varten robottihitsausjärjestelmässä on yleensä automaattinen polttimenpuhdistusasema. Puhdistusasemassa hitsauspolttimen kaasuholkkiin tarttuneet hitsausroiskeet poistetaan ja suutin käsitellään nesteellä, joka estää hitsausroiskeita tarttumasta. (Pires et al. 2006, s. 40.)

2.1.4 Kappaleenkäsittely

Kappaleenkäsittelylaite on hitsauksen apuväline, jolla saadaan hitsattava työkappale asemoitua hitsauksen kannalta optimaalisiin asentoihin. Optimaalisessa asennossa hitsisula ei pääse valumaan ja hitsauspolttimen luoksepäästävyys onnistuu helposti. Robottihitsauksen kannalta parhaat hitsausasennot ovat alapiena ja jalkopiena. Tyypillisesti kappaleenkäsittelylaitteilla saadaan robottihitsausjärjestelmään yksi tai kaksi ylimääräistä vapausastetta lisää. Kuvassa 3 on esitelty yksi- ja kaksiksiakseliset kappaleenkäsittelylaitteet. Joissain robottihitsaukseen suunnitelluissa kappaleenkäsittelylaitteissa on kaksi työkappaleasemaa; toiseen asemaan kiinnitettyä kappaletta voidaan hitsata samanaikaisesti, kun työntekijä irrottaa vastakkaisella puolella olevaa kappaletta ja kiinnittää uuden hitsaukseen menevän kappaleen tilalle. Kappaleenkäsittelylaitteita ohjataan samalla robottiohjaimella kuin hitsausrobottia. Ne liikuttavat kappaletta joko hitsauksen aikana yhdessä hitsausrobotin kanssa synkronoidusti tai hitsauksen välissä ennen valokaaren syttymistä. (Pashkevich 2009, s. 1036.)



Kuva 3. Vasemmalla yksiakselinen ja oikealla kaksiksiakselisen kappaleenkäsittelylaite (mukailten: KUKA 2017).

Kappaleenkäsittelylaitteena on mahdollista käyttää samankaltaista nivelvarsirobottia kuin hitsaukseen. Kappaleenkäsittelyroboteilla voidaan korvata ylimääräiset kuljetinlaitteet ja parantaa tuotannon joustavuutta, tuotantokapasiteettia sekä laatua. Työntekijöiden ergonomia paranee, kun ihmisten tekemät raskaat ja yksitoikkoiset kappaleensiirrot teetetään roboteilla. Kappaleenkäsittelyrobotteja käytetään kaikilla teollisuudenaloilla lääketeollisuudesta autoteollisuuteen. Teollisuudessa käytettyjen kappaleenkäsittelyrobottien hyötykuorma ylittää jopa kaksi tuhatta kilogrammaa. Hyötykuormalla tarkoitetaan teollisuusrobotin ranteeseen liitettyä suurinta mahdollista massaa, jota robotti kykenee käsittelemään. Riittävää hyötykuormaa mietittäessä on tiedettävä, mitä käytettävä työkalu painaa ja minkä painoisia kappaleita robotilla käsitellään. (Brumson 2012.)

Kappaleenkäsittelyrobotin ansiosta robottihitsausasemaan saadaan jopa kuusi vapausastetta lisää (kuva 4). Tällöin hitsattava kappale saadaan aina paikoitettua hitsausrobotille optimaaliseen asentoon. Tästä on erityisesti hyötyä silloin, kun hitsattavat kappaleet ovat isoja ja niissä on hitsejä monessa eri tasossa moneen eri suuntaan. Kappaleenkäsittelyrobotit mahdollistavat myös kiinnittämättömän hitsauksen, mikä on eduksi valmistettavissa pieniä sarjoja tai jopa yksittäisiä kappaleita. Kiinnittämättömän hitsaus nopeuttaa robottihitsauksen läpimenoaikaa, kun kappaleen kiinnittämiseen ei kulu ylimääräistä aikaa. (Miller Electric 2012.)



Kuva 4. Robottihitsaussolu, jossa kappaleenkäsittely tapahtuu robotilla (Panasonic 2017).

2.2 Ohjelmointitavat

Robottihitsauksen mahdollistamiseksi, on robotille tehtävä kappalekohtainen hitsausohjelma. Robottiohjelma koostuu peräkkäisistä komennoista, joita robotti seuraa tarkasti. Jokaiselle erilliselle robottihitsattavalle kappaleelle on tehtävä oma ohjelma, joka on käytettävissä uudestaan samanlaisille kappaleille. Ohjelmoinnista aiheutuneet kustannukset tulee ottaa huomioon robottihitsausyksikön investointilaskelmissa. Kustannuksia on vaikea arvioida, sillä niihin vaikuttavat robottijärjestelmän monimutkaisuus, ohjelmoijan taidot, käytettävä hitsausprosessi ja ohjelmointitapa. Yleisimmät hitsausrobotin ohjelmointimenetelmät ovat opettamalla ohjelmointi ja etäohjelmointi. Teollisuusrobotteja voidaan ohjelmoida myös niin kutsutulla kädestä pitäen -ohjelmoinnilla, mutta se ei ole yleisesti käytössä robottihitsauksessa. (Kah et al. 2015, s. 3-4; Noruk et al. 2001, s. 471-472.)

2.2.1 Opettamalla ohjelmointi

Opettamalla ohjelmointi on manuaalinen ohjelmointitapa, jossa käytetään robottiohjaimen käsiohjainta ohjelmointiin. Menetelmässä hitsausoperaattori liikuttaa käsiohjaimen näppäimillä tai ohjaussauvalla robotin käsivarteen asennettua hitsauspoltinta haluttuihin pisteisiin hitsattavan kappaleen railoihin ja tallentaa pisteet robotin massamuistiin. Tallennettujen pisteiden perusteella muodostetaan robotille väliliikkeet ja hitsausliikkeet. Modulaarista ohjelmointia ja parametritaulukoita käytetään apuna opettamalla ohjelmoinnin nopeuttamiseen. Modulaarisessa ohjelmoinnissa käytetään valmiiksi ohjelmoituja mahdollisimman monikäyttöisiä aliohjelmiä, joita kutsutaan pääohjelman avuksi. Aliohjelmien avulla pääohjelmat saadaan lyhyemmiksi, kun ne koostuvat vain väliliikkeistä ja aliohjelmissa. Parametritaulukoista voidaan helposti katsoa robottihitsausohjelmaan käytettävät hitsausparametrit halutun a-mitan mukaan. Opettamalla ohjelmoinnissa joudutaan robottihitsaustuotanto keskeyttämään ohjelmoinnin ajaksi. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 35; Kah et al. 2015, s. 3-4; Noruk et al. 2001, s. 471-472.)

2.2.2 Etäohjelmointi

Etäohjelmoinnilla tuotanto toimii normaalisti, sillä ohjelmointi tehdään erillisellä tietokoneohjelmalla. Etäohjelmoinnin apuna käytetään 3D-malleja, joiden mukaan robottiohjelmat tehdään. Etäohjelmointiin käytettävään tietokoneohjelmaan täytyy

määrittää tarkasti robottihitsaussolun, käytettävien hitsauskiinnittimien ja hitsattavan kappaleen 3D-mallit. Hitsattavan kappaleen mallin pohjalta ohjelmalla luodaan robotille liikeradat. Etäohjelmointiohjelman avulla voidaan simuloida robottihitsaustapahtumaa ja tehdä muun muassa törmäys- ja ulottuvuustarkastelu. Robottiohjelmaan saadaan etäohjelmoinnilla määrättyä tarkasti railokohtaisesti hitsauspolttimen kulma, vapaalangan pituus, sivuttaisliikkeen amplitudi ja käytettävät hitsausparametrit. Valmis robottiohjelma saadaan tallennettua ja ladattua robottiohjaimelle esimerkiksi Ethernet-paikkalisverkon välityksellä. Ennen hitsausta valmis robottiohjelma joudutaan kuitenkin ajamaan robotilla hitsattavan kappaleen kanssa ja tekemään mahdolliset muutokset ratoihin, koska todellinen kappale ei koskaan ole täysin samanlainen 3D-mallin kanssa. Etäohjelmoinnin avulla pienten sarjojen valmistus on mahdollista saada kannattavaksi, kun ohjelmointi voidaan tehdä tuotannon ohella. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 35; Kah et al. 2015, s. 3-4; Noruk et al. 2001, s. 472.)

2.2.3 Kädestä pitäen ohjelmointi

Kädestä pitäen ohjelmointi on hyvin samantyylinen kuin opettamalla ohjelmointi, mutta robotin kuljettaminen ohjelmointivaiheessa tapahtuu eri tavalla. Hitsausoperaattori suorittaa robotin liikkeet käsivoimin liikuttamalla robotin käsivarteen kiinnitettyä hitsauspolttinta. Liikuteltava akseli tai liiketyyppi (lineaarinen liike, hitsauspolttimen kallistus) vapautetaan, minkä jälkeen hitsausoperaattori johdattaa hitsauspolttinta haluttuihin pisteisiin ja pisteet tallennetaan robottiohjaimen massamuistiin. Pisteiden mukaan muodostetaan tarvittavat väli- ja hitsausliikkeet. Kädestä pitäen ohjelmointi vaatii erillisen voima-anturin robotin käsivarren ja hitsauspolttimen väliin. Voima-anturi tunnistaa hitsauspolttimeen kohdistuvat ulkoiset voimat, jolloin robotti osaa seurata voiman suuntaan. Kuten opettamalla ohjelmoinnissa, myös kädestä pitäen ohjelmoinnissa käytetään apuna parametritaulukoita ohjelmoinnin nopeuttamiseksi. (Kah et al. 2015, s. 3; Tuunainen 2015, s. 24-25.)

2.3 Robottihitsattava tuote ja laatu

Hitsausrobotti suorittaa sille ohjelmoidut liikekäskyt kerta toisensa jälkeen, milloin vältetään inhimillisistä tekijöistä aiheutuvat hitsausvirheet. Robottihitsauksella jo saavutettu hitsilaatu pysyy yleensä kappalekohtaisesti hyvin samana. Yleisesti voidaan olettaa, että hitseistä saadaan robotilla laadukkaita, kun hitsattavien kappaleiden rakenne

sen sallii. Kun robottihitsauksessa parasta mahdollista laatua lähdetään selvittämään, on keskityttävä ensin muihin seikkoihin kuin itse hitsaustapahtumaan:

- Robotilla hitsattavat kappaleet tulee olla suunniteltu hitsattavaksi robotilla eli kappaleen rakenteisiin ja railomuotoihin on kiinnitettävä huomiota.
- Hitsattavien kappaleiden osien riittävä valmistustarkkuus ja valmistuksessa aiheutuvat virheet on selvitettävä.
- Ennen robottihitsausta suoritettavan silloitushitsauksen tarkkuus, ohjeistus ja mahdolliset silloitusvirheet.
- Edellä mainittujen seikkojen jälkeen voidaan tarkkailla hitsausrobotin ohjelmoinnista tai parametreista aiheutuvia virheitä.

(Hiltunen & Purhonen 2008, s. 33.)

2.3.1 Osavalmistuksen tarkkuus

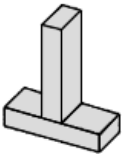
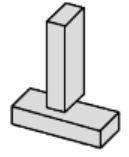
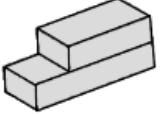
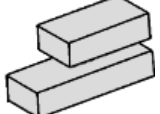
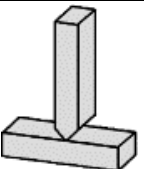
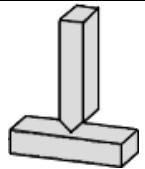
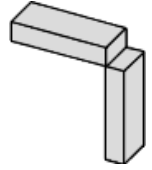
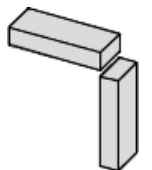
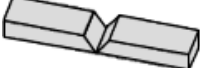

Robotilla hitsattavien osien railonvalmistuksessa on oltava erityisen tarkka railokulman ja juuripinnan suhteen. Robottiohjelmaan ennalta määritellyt hitsausparametrit on asetettu tietyn railogeometrian hitsaamista varten eikä robotti railon seurannasta huolimatta välttämättä osaa huomioida äkillisiä muutoksia railogeometriassa. Jos railogeometria vaihtelee kesken hitsauksen, voi seurauksena olla joko vajaa juuripalon hitsautuminen tai ylisuuri palko. Juuripalon hitsautuessa vajaan on mahdollista, että seuraava hitsi palaa juuresta läpi tai valmis hitsi jää alimittaiseksi. Ylisuuri juuripalko kasvattaa hitsin korkeutta, jolloin robotin railon seuranta saattaa liian täyden hitsausrailon seurauksena ohjata robottia väärään suuntaan. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 34.)

2.3.2 Liitos- ja railomuodot

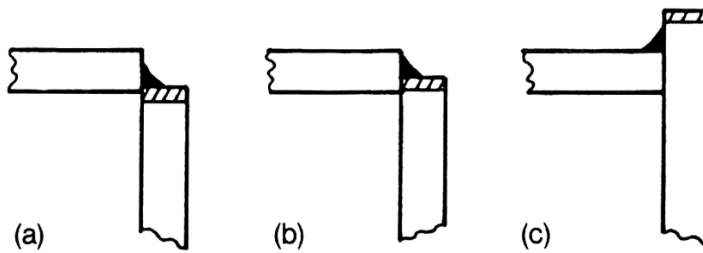
Suunnittelijan päätökset ovat merkittäviä tekijöitä niin tuotteiden valmistuskustannuksissa kuin niiden valmistettavuudessa. Kappaleen onnistunut robotisoitu hitsaus on riippuvainen suunnittelijan valitsemista liitostyypeistä ja railomuodoista. Taulukossa 1 on esitetty eri liitosmuotojen soveltuvuutta robotisoituun MIG/MAG-hitsaukseen. Taulukon liitosmuodot on arvosteltu asteikolla yhdestä viiteen, joista viisi (5) on paras soveltuvuus robotisoituun hitsaukseen. Robottihitsattavissa kappaleissa tulee ensisijaisesti suosia pienaliitoksia, ellei kappaleen rakenne tai korroosionkestävyys vaadi toisin. Pienaliitoksia käytettäessä kappaleiden osat on helppo sovittaa keskenään paikalleen eikä pienet sovitusrvirheet tuota laadullisesti ongelmia. Toinen robottihitsaukselle suosiollinen liitosmuoto on

päällekkäisliitos, joka erityisesti paksuja ainevahvuuksia hitsattaessa muistuttaa pienaliitosta. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 34.)

Taulukko 1. Liitosmuotojen soveltuvuus robotisoituun MIG/MAG-hitsaukseen (mukaillen: Hiltunen 2008, s. 33).

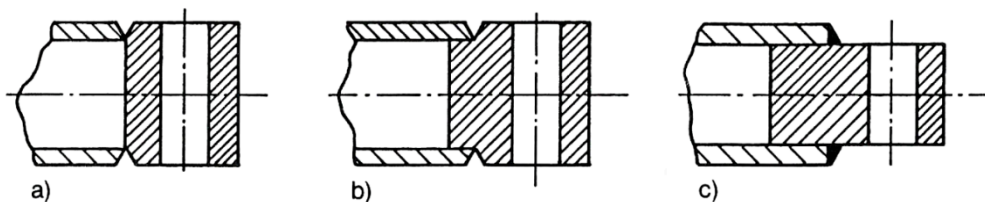
| Liitosmuoto | Periaatekuva | Soveltuvuus robotisoituun MIG/MAG-hitsaukseen | Virheellinen sovitus ja sen vaikutus robottihitsaukseen | |
|-------------------|---|---|---|---------------------|
| Pienaliitos |  | 5 |  | Vähäinen |
| Päällekkäisliitos |  | 4 |  | Vähäinen |
| T-liitos |  | 3 |  | Merkittävä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

Jos hitsattavat kappaleet ovat olleet tuotannossa jo pidemmän aikaa eikä niitä ole suunniteltu automatisoidulle hitsaukselle, on kappaleisiin todennäköisesti tehtävä muutoksia automatisoidun hitsauksen helpottamiseksi. Nurkkaliitoksen hitsaaminen robotilla on hankalaa läpipalamisvaaran takia ja se vaatii tarkan sovituksen hitsattavilta osilta. Vanhoilla kappaleilla nurkkaliitokset tulisi pyrkiä muuttamaan T-liitoksiksi (kuva 5). T-liitoksella sovitustarkkuusvaatimus on huomattavasti pienempi ja läpipalaminen saadaan estettyä, kun hitsattavat osat päästään hitsaamaan pienahitsein. (Ahola 1988, s. 13.)



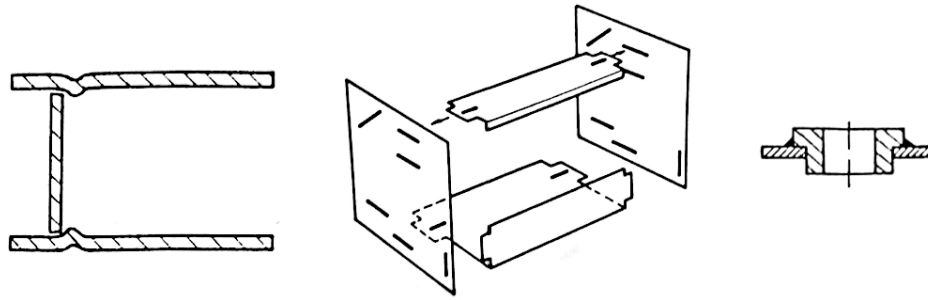
Kuva 5. T-liitoksen edut verrattuna nurkkaliitokseen: a) nurkkaliitos on läpipalamisaltis ja vaatii tarkan sovituksen, b) pienempi sovitustarkkuusvaatimus, c) T-liitos, joka estää läpipalamisen (mukaillen Ahola 1988, s. 13).

Kuvassa 6 on esitetty, kuinka kappale voidaan muotoilla uudelleen päittäisliitoksen hitsauksen helpottamiseksi. Ilman juuritukea hitsattava päittäishitsi on sovitettava tarkasti ja kuten nurkkaliitoksessa, on päittäisliitoksessa vaarana läpipalaminen. Läpipalamisen riski saadaan poistettua, kun hitsattavista osista pystytään muodostamaan juurituki. Paras vaihtoehto päittäisliitoksen korvaamiseksi on kappaleen rakenteen muuttaminen siten, että liitos muutetaan pienaliitokseksi. Nurkka- tai päittäisliitoksen muuttaminen pienaliitokseksi ei aina kuitenkaan ole mahdollista tai suositeltavaa johtuen kappaleen käyttökohteesta. Pienaliitoksen käyttäminen liitoksiin, joihin kohdistuu väsyttävä kuormitus, ei ole suositeltavaa. (Ahola 1988, s. 13-14.)



Kuva 6. Esimerkki kappaleen rakenteen muutoksesta: a) päittäisliitos, joka vaatii tarkan toleranssin, b) rakenne muotoiltu juuritueksi, c) rakenne muutettu pienaliitokseksi (mukaillen: Ahola 1988, s. 14).

Hitsattavien osien kunnollinen sopivuus toisiinsa voidaan varmistaa valmistamalla osista itsepaikoittavia. Kuvassa 7 on esitelty esimerkkejä osien rakenteista, jotka ovat itsepaikoittavia. Itsepaikoittavia osia käytettäessä ei kappaleen hitsaamiseen tarvita niin monimutkaisia hitsauskiinnittimiä. Parhaimmassa tapauksessa hitsauskiinnittimistä voidaan luopua kokonaan, kun hitsattavien osien rakenteet ovat toisiinsa lukittuvia. (Ahola 1988, s. 32.)



Kuva 7. Kappaleisiin valmistettuja itsepaikoittavia rakenteita (mukaillen: Ahola 1988, s. 34).

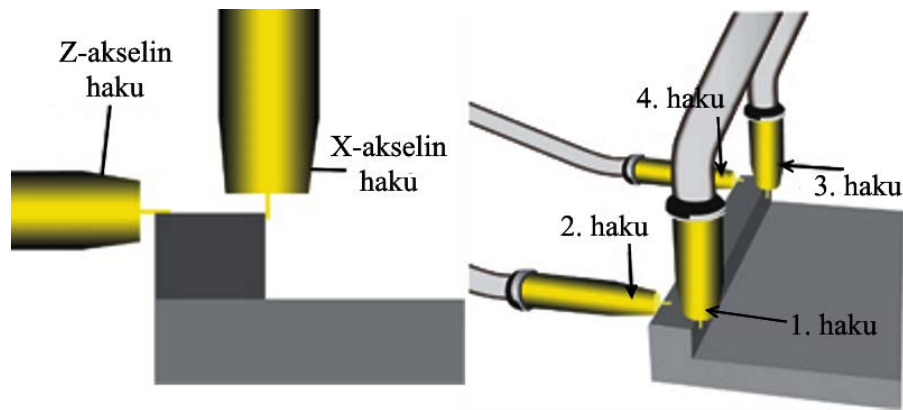
Robottihitsausta edeltäviä siltahitsejä varten on tärkeä laatia laadukkaiden hitsien takaamiseksi tarkat hitsausohjeet. Ohjeistuksen puuttuessa hitsaaja saattaa siirtyä omaan helpoksi todettuun tapaan tehdä siltahitsit, mikä ei välttämättä ole riittävän laadukas menettelytapa robottihitsaukseen. Hitsaajia on hyvä opastaa myös muista robottihitsauksen tarkkuusvaatimuksista valmisteluun liittyen, kuten hitsausrailojen puhtaudesta. Robottihitsattavat kappaleet voidaan rakenteellisista syistä johtuen joutua hitsaamaan osittain jo siltahitsien yhteydessä. Kappaleessa voi olla esimerkiksi robotille vaikeita hitsejä, piiloon jääviä hitsejä tai paikkoja hitseillä, johon robotin hitsauspolttimen luoksepäästävyys ei riitä. (Hiltunen & Purhonen 2008, s. 34.)

3 RAILONHAKU, -SEURANTA JA ANTUROINTI

Hitsattavissa työkappaleissa voi olla paljon eroavaisuuksia eri kappaleiden kesken. Eroavaisuudet aiheutuvat riippuen käytettävästä materiaalista, valmistusmenetelmistä, osavalmistuksen toleransseista, hitsausrailon esivalmistuksesta ja hitsattavien osien sovituksista. Hitsauksen aikana tuotava lämpö aiheuttaa myös muodonmuutoksia työkappaleeseen. Näistä syistä johtuen hitsausrailon sijainti, suunta tai tilavuus ei ole samanlainen eri työkappaleilla. Siksi robottihitsauksessa on tärkeää suorittaa railonhaku eli paikantaa hitsattavan railon sijainti ja suunta sekä railonseuranta eli hitsauksen aikainen robotin liikeradan korjaus onnistuneen hitsauksen aikaansaamiseksi. (Lincoln Electric 2017; Madigan et al. 2001, s. 433.)

3.1 Railonhaku

Railonhaku voidaan robotisoidussa MIG/MAG-hitsauksessa yksinkertaisimmillaan suorittaa koskettamalla työkappaletta esimerkiksi käyttäen jännitteellä varustettua lisäainelankaa. Menetelmässä hitsausrobotti vie hitsauspolttimen lähelle hitsattavaa railoa ja tekee niin kutsutun etsintäliikkeen. Etsintäliikkeessä anturina toimivan lisäainelangan kärjellä lähestytään työkappaleen hitsausrailon seinämiä, kunnes lisäainelanka koskettaa kappaletta ja muodostaa virtapiirin. Robottihitsausjärjestelmä tallentaa kosketuspisteen koordinaatit. Järjestelmä tekee etsintäliikkeen muutamaan eri kohtaan hitsausrailossa (kuva 8), minkä jälkeen havaittujen pisteiden perusteella järjestelmä muodostaa hitsattavan railon sijainnin ja suunnan. Robottihitsausjärjestelmä tekee hitsausohjelmaan ratamuutoksen mitatun railon perusteella ja aloittaa hitsaamisen. (Lincoln Electric 2017; Madigan et al. 2001, s. 433.)



Kuva 8. Lisäainelangalla railonhaun periaatekuva (mukailten: Lincoln Electric 2017).

Hitsauslisäainelanka voi taipua koskettaessa railonseinämää, jolloin pisteiden sijainti ei vastaa todellista koordinaattia. Railonhaun koskettamalla voi tehdä käyttämällä hitsauspistoolin kaasusuutinta tai erillistä tuntopäätä. Kaasusuutin ei ole joustava ja sen koskettaessa hitsauskappaletta on mahdollista, että hitsauspistoolin asento muuttuu robotin käsivarren suhteen. Hitsausroiskeet voivat tarttua kaasusuuttimeen ja täten häiritsee railohakua antamalla virheellisen pisteen kosketuksessa. Erillisestä tuntopäädästä on mahdollista tehdä joustava, mutta se rajoittaa hitsauspään ulottuvuutta ja voi olla tiellä väli- ja hitsausliikkeissä. Jos railonhakuun käytetään kaasusuutinta tai erillistä tuntopäätä, on pisteen paikoituksessa otettava huomioon poikkeama kosketuspisteen ja todellisen koordinaatin välillä. Poikkeamasta johtuva epätarkkuus voi aiheuttaa vääristymän hitsausrataan. (Madigan et al. 2001, s. 433.) Railonhaku kosketuksella lisää hieman hitsausaikaa (3-5 sekuntia per hakupiste) ja vaatii selkeät railopinnat toimiakseen. Railonhaku kosketuksella on kuitenkin halpa railonhakumenetelmä ja ohjelmistopohjaisena se ei vaadi lisälaitteistoja. (Lincoln Electric 2017.)

Vaihtoehtona kosketukseen perustuvalla railonhauella ovat optiset railonhakumenetelmät. Optisen railonhaun toimintaperiaate on samanlainen, kuin luvussa 3.2.2 esiteltävän aktiivisen optisen anturoinnin. Samalla tavalla kuin kosketukseen perustuvassa railonhaussa, laitteisto hakee ennalta määrättyistä kohdista railomuodon ja tunnistaa hitsattavan railon muodon, sijainnin sekä suunnan. Optinen railonhaku on kosketukseen perustuvaa railonhakua huomattavasti nopeampi, sillä haun aikana robotin ei tarvitse lähestyä kappaletta vaan railonhaku suoritetaan laser-kamera-anturilla irti kappaleesta. Optinen railonhaku ei rajoitu vain railotilavuuksiltaan suuriin railoihin vaan sillä pystytään

löytämään myös kapeat I-railot toisin kuin kosketukseen perustuvilla hakumenetelmillä. Optiset railonhakumenetelmät ovat kosketukseen perustuvaa hakua huomattavasti kalliimpia, sillä se vaatii erillisen robotin rannelaippaan tai hitsauspolttimeen kiinnitettävän laitteiston. (Hiltunen 2009, s. 31; Servo-Robot 2009.)

3.2 Anturointi ja railonseuranta

Materiaalitoimittajat kehittelevät markkinoille jatkuvasti uusia kehittyneempiä ja lujempia materiaaleja. Käytettäessä lujempia materiaaleja voidaan materiaalipaksuutta pienentää, jolloin kevyemmällä rakenteilla saadaan esimerkiksi materiaalikustannuksia ja lopputuotteen polttoaineenkulutus alemmaksi. Ohuemmat materiaalit vaativat tarkempaa osavalmistusta ja hitsauksen suoritusta. Lujemmilla materiaaleilla lämmöntuonnin on oltava sallituissa rajoissa, jotta hitsattava perusaine ei menetä saavutettua lujuutta ja hitsit kestävät kappaleeseen kohdistuvat kuormitukset. (Garašić et al. 2015, s. 1069.)

Hitsausrobotteja on teollisuudessa käytössä paljon ja niiden käyttöä lisätään jatkuvasti. Suurin osa robottijärjestelmistä on kuitenkin yksinkertaisia; hitsausrobotille määritellään etukäteen hitsausparametrit ja hitsauspolttimen liikerata, jotka hitsausrobotti suorittaa. Robotit eivät osaa ottaa automaattisesti huomioon virheellistä työkappaleen asentoa, huonosta osavalmistuksesta aiheutuneita railogeometrian muutoksia tai hitsauksen aikana tapahtuvia muodonmuutoksia. (Chen et al. 2007, s. 218; Xu et al. 2017, s. 18; Ye et al. 2013, s. 1987.)

Edellä mainittujen ongelmien ratkaisuksi robottihitsaukseen tarvitaan anturointia. Anturijärjestelmät tutkivat ja lähettävät hitsaustapahtumaa edeltäviä tai sen aikaisia tietoja robottihitsausjärjestelmälle, minkä avulla järjestelmä tekee muutoksia hitsausvirtalähteen parametreihin ja/tai hitsausrobotin liikkeisiin. Robottihitsauksen anturoinnin avulla hitseistä saadaan laadukkaita ja virheettömiä. (Chen et al. 2007, s. 218; Xu et al. 2017, s. 18; Ye et al. 2013, s. 1987.)

Hitsaustapahtuman anturointi voidaan luokitella kahdella eri tavalla: parametriseen ja geometriseen anturointiin. Geometrisella anturoinnilla voidaan suorittaa esimerkiksi railonhaku, railonseuranta tai molemmat. Tällöin railonseurannassa hitsausrobotti saa anturilta tiedon poikkeamasta hitsausrailon geometriassa, milloin robotin rata mukautuu

muuttuvan railogeometrian perusteella oikeaan suuntaan. Parametrisessa anturoinnissa tarkkaillaan ja säädetään hitsauksen aikaisia parametreja (hitsausjännite, langansyöttönopeus ja hitsausvirta) hitsauksen onnistumisen kannalta. (Pires et al. 2006, s. 73-74.)

3.2.1 Parametrien anturointi

MIG/MAG -hitsauksessa sähkövirta johdetaan lisäainelankaan hitsauspolttimen kosketussuuttimen kautta. Hitsausjännite tulisi mitata mahdollisimman läheltä valokaarta ja kosketussuuttimen pää on yksi vaihtoehto, mistä hitsausjännitteen pystyy mittaamaan. Valokaaren ja kosketussuuttimen väliin jää sulamatonta lisäainelankaa, milloin kosketussuuttimesta mitattu jännite ei ole oikea hitsausjännite, johtuen langan aiheuttamasta jännitteen alenemisesta (noin 0.3 V). Kosketussuuttimen pää on kuitenkin käytännön sovelluksissa mahdoton mittauspiste ja siksi hitsausjännite suositellaan mittaamaan langansyöttölaitteesta. Koska kosketussuuttimen ja langansyöttölaitteen välillä lisäainelangassa ei kulje sähkövirta, on lisäainelangan jännite molemmissa päissä sama. (Pires et al. 2006, s. 75-76.)

Hitsausvirran mittaaminen tapahtuu joko Hall-ilmiöön perustuvalla anturilla tai sarjavastuksen läpi kulkevan sähkövirran jännitehäviöön perustuvalla mittauksella. Sarjavastukseen perustuvassa mittauksessa ennalta määrätyn arvoisen vastuksen lävitse johdetaan käytettävä sähkövirta ja mitataan vastuksessa tapahtuva jännitehäviö. Vastuksen resistanssiarvon ja jännitehäviön perusteella voidaan määrittellä virtapiirissä kulkevan virran suuruus. Yksinkertainen virran mittausräjäline ampeerimittari toimii samalla periaatteella. Sarjavastusmenetelmä on huono, koska se on altis häiriöille ja aiheuttaa pienen tehohäviön. Hall-anturilla mittaus perustuu johtimessa kulkevan sähkövirran aiheuttamaan magneettikenttään. Sähköjohdin kulkee rengasmaisen rautakappaleen lävitse, minkä välissä on varsinainen Hall-anturi. Sähköjohtimessa kulkeva virta muodostaa magneettikentän, joka indusoituu rautakappaleeseen ja Hall-anturin avulla saadaan sähköjohtimessa kulkevan virran suuruus selville. Hall-anturiin perustuva mittaus on kosketukseton eikä se vaikuta hitsausvirtaan. (Pires et al. 2006, s. 76.)

Hitsauksessa hitsausjännite ja -virta haluttaisiin pitää asetettuina vakioina. MIG/MAG-hitsauksessa virta kuitenkin vaihtelee langansyöttönopeuden mukaan; mitä nopeampi

langansyöttönopeus, sitä suurempi virta. Vakaan hitsaustapahtuman saavuttamiseksi langansyöttönopeus on tärkeä hallittava parametri. Robottihitsauksessa pyritään siihen, että langansyöttölaite on asennettu robottiin kiinni ja sen tulisi olla mahdollisimman lähellä hitsauspoltinta. Joissain tapauksissa langansyöttölaite joutuu olemaan kauempana robotista. Johtuen langansyöttölaitteen etäisyydestä ja langanjohtimen tarkkuudesta, voi lisäainelanka takerrella langanjohtimen taipuessa sen seinämiin, milloin langansyöttönopeus vaihtelee robotin liikuttaessa hitsauspoltinta. Robotin liikkeiden lisäksi langansyöttönopeuteen vaikuttaa hitsausrailon geometriset muutokset ja hitsauspolttimen etäisyys työkappaleesta vapaalangan pituuden muuttuessa. Langansyöttönopeuden mittausta tehdään yleensä langansyöttölaitteen langansyöttörullista. (Pires et al. 2006, s. 76-77.)

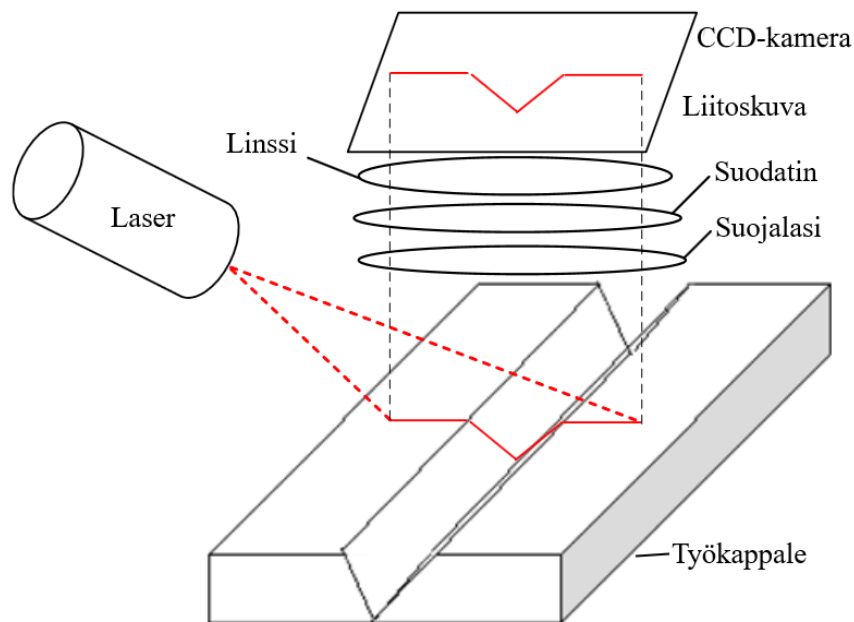
3.2.2 Geometrinen anturointi

Geometrisella anturoinnilla saadaan hitsausliitoksesta joko reaaliaikaista tai ennen hitsausta tapahtuvaa geometrista informaatiota, kuten hitsausliitoksen sijainti sekä hitsaussuunnan ja ilmaraon muutokset. Informaatiota voidaan käyttää esimerkiksi railonhaussa ennen hitsausta tai railon seurannassa hitsaustapahtuman aikana. Tavanomaisimmat geometriset anturityypit ovat optiset anturit ja valokaaren muutoksiin perustuvat anturit. (Pires et al. 2006, s. 77-78.)

Optiset anturit voidaan jakaa vielä kahteen eri luokkaan riippuen, onko anturissa valonlähde. Nämä luokat ovat passiiviset ja aktiiviset optiset anturit. Aktiivisessa anturoinnissa käytetään hitsausliitoksen geometrisen informaation keräämiseen valonlähdettä ja valoa kuvaavaa kameraa. Pääkomponenttien lisäksi kameran avuksi tarvitaan optisia linsskejä ja suodattimia. Yksinkertaistettuna aktiivinen optinen anturi toimii siten, että valonlähteellä heijastetaan valokuvio hitsausliitokseen ja valonlähteen suhteen viistoon aseteltu kamera kuvaa liitokseen heijastettua kuviota. Kameran kuvasta saadaan kuvankäsittelyprosessin avulla informaatiota hitsausliitoksesta. Aktiivisen anturoinnin periaate on esitetty kuvassa 9, missä valonlähteenä on laser ja kamerana CCD (Charge-Coupled Device) -kennoon perustuva kamera. Toinen kameratyyppi, jota aktiivisessa anturoinnissa perustuu CMOS-kennoon. CCD- ja CMOS-kennot ovat kameroissa käytettyjä valoherkkiä kennoja, joiden avulla valonlähde saadaan muutettua digitaaliseksi signaaliksi. Lasersäteen ei tarvitse olla viivan muotoinen, vaan se voi olla esimerkiksi ympyrä, kolmio, risti tai useampi peräkkäinen viiva. Teollisuudessa tällainen

kolmiomittaukseen perustuva laser-kamera-anturi on käytetyin sovellutus optisesta anturoinnista. Adaptiiviseen parametrien säätöön ja reaaliaikaiseen railonseurantaan sillä saadaan tarkka informaatio hitsausliitoksen sijainnista ja muodosta. (Chen et al. 2007, s. 218; Muhammad, Altun & Abo-Serie 2017, s. 128-130; Pires et al. 2006, s. 110.) Chen et al. (2007, s. 219) mukaan optisella laser-anturoinnilla saavutetaan:

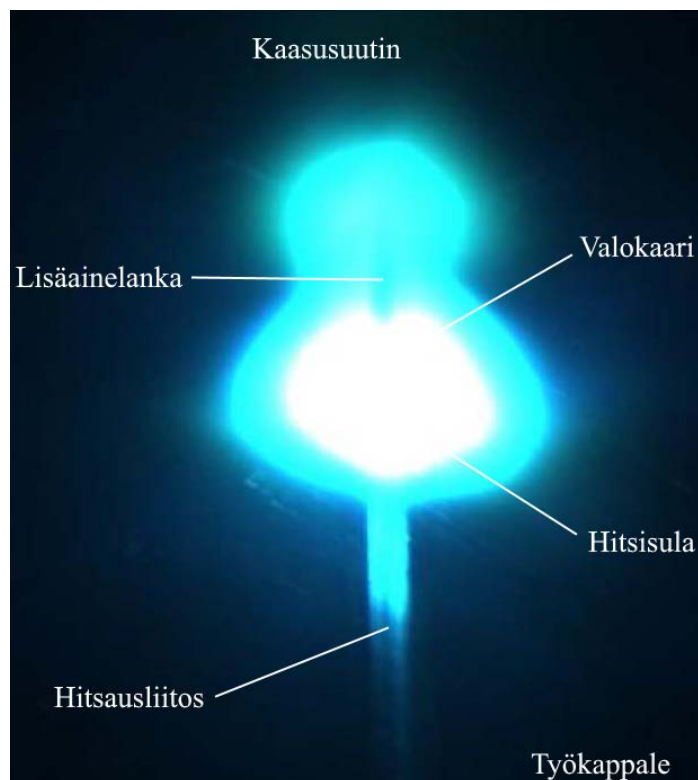
- 1) tarkat mitat hitsausrailon geometriasta
- 2) hitsiä edeltävän kokoonpanon tarkkuudesta
- 3) railonseuranta automaattisella hitsauspolttimen sivuttais- ja korkeussäädöllä
- 4) reaaliaikainen adaptiivinen hitsausparametrien säätö.



Kuva 9. Optisen anturoinnin periaate käyttäen laser-anturointia (mukailten: Gu et al. 2013, s. 452).

Passiivisessa optisessa anturoinnissa käytetään pelkästään optisilla suodattimilla varustettua kameraa, jolla tarkkaillaan hitsaustapahtumassa valokaarta tai hitsisulan muotoa. Passiivisessa anturoinnissa käytettävät kamerat ovat samoja kuin aktiivisessa anturoinnissa. Anturointi toimii siten, että hitsaustapahtumaa kuvataan kameralla, jonka kuva käsitellään ja tulkitaan tietokoneohjelmalla. Kuvista saatujen tietojen perusteella ohjelma ohjaa hitsausrobotia. Passiivisessa anturoinnissa ylimääräistä valonlähdettä ei tarvita, koska hitsausvalokaari tuottaa riittävän valon kuvankäsittelyprosessiin. Kuvassa 10 on esitetty, millaista kuvaa kamera näkee himmentimen ja suodattimen jälkeen.

Kuvankäsittelyprosessin jälkeen tietokone osaa kuvien perusteella määrittää hitsausliitoksen mahdollisen poikkeaman hitsaussuunnasta ja antaa hitsausrobotille käskyn ohjautua radalla poikkeaman verran. Passiivisella optisella anturoinnilla saadaan hitsauksen aikainen railonseuranta halvemmilla laitteistokustannuksilla ja ilman ylimääräistä valonlähdettä. (Chen et al. 2007, s. 218; Muhammad et al. 2017, s. 128; Xu et al. 2017, s. 18-20; Ye et al. 2013, s. 1988.)



Kuva 10. Passiivisen optisen anturoinnin kuva himmentimen ja suodattimen jälkeen (mukaillen: Xu et al. 2017, s. 22).

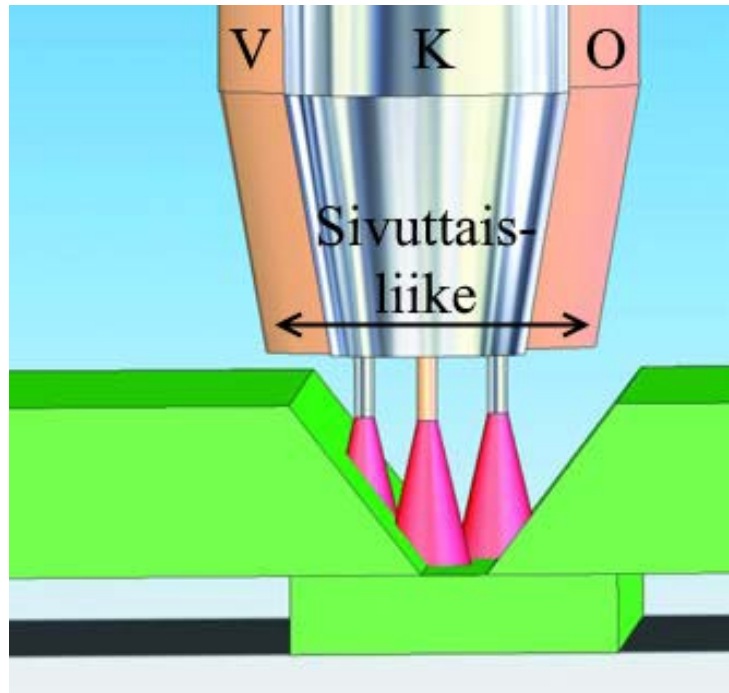
Optiset anturit ovat yleensä kiinnitettynä hitsauspolttimeen. Aktiivisen optisen anturin valonlähde kulkee hitsauksen aikana liitoksessa jonkun matkaa hitsauspolttimen edellä. Tällöin hitsausrobotin hitsauspolttimen orientaation on oltava sama hitsaussuuntaan nähden eli yksi robotin vapausasteista täytyy olla lukittuna hitsauksen aikana. Optiset anturit vievät myös kohtalaisen paljon tilaa hitsauspolttimen läheisyydestä, jolloin hitsauspoltin ei mahdu ahtaisiin paikkoihin. Optiset anturointilaitteet ovat hintavia verrattuna valokaarella anturointiin, mutta niiden hinnat ovat viime vuosien aikana tulleet alaspäin. Jos alumiinin hitsaukseen halutaan käyttää railonseurantaa, on aktiivinen optinen anturointi ainoa vaihtoehto. Valokaarella anturointi ei toimi alumiinin hitsaukseen, koska

alumiinia hitsattaessa hitsausvirta vaihtelee liikaa riittävän tarkan suutinetäisyyden määrittämiseksi virran perusteella. Valokaarella anturointiin verrattuna optiset anturit eivät kadota hitsausrailoa yhtä helposti ja soveltuu käytettäväksi kaikille railomuodoille. (Hiltunen 2009, s. 31; Pires et al. 2006, s. 82; 84; Ye et al. 2013, s. 1990.)

Robottihitsauksessa railonseuranta voidaan suorittaa käyttäen pelkästään hitsausvalokaarta. Valokaarella anturointi perustuu hitsauspolttimen sivuttaisliikkeellä aikaansaatuun virranvaihteluun, joka aiheutuu kosketussuuttimen ja työkappaleen välisestä vaihtuvasta etäisyydestä vapaalangan pidentyessä. MIG/MAG-hitsauksessa hitsausjännitteen ollessa vakio hitsausvirta kasvaa kosketussuuttimen lähestyessä työkappaletta ja päinvastoin. Valokaarella anturointi on yleisin ja halvin railonseurantamenetelmä MIG/MAG-robottihitsauksessa, koska se ei vaadi robottihitsauslaitteiston lisäksi muita investointeja. (Lincoln Electric, 2017; Pires et al. 2006, s. 84.)

Hitsausvirran mittaaminen tapahtuu luvussa 3.2.1 esitetyillä menetelmillä. Railonseurannan sivuttaisliikkeessä hitsausvirtaa mitataan joko jatkuvasti tai vain liikkeen ääriasennoissa. Jos railonseurannan lisäksi käytössä on myös automaattinen korkeussäätö, täytyy hitsausvirta mitata myös sivuttaisliikkeen keskikohdassa. (Pires et al. 2006, s. 84.)

Kuvassa 11 on esitetty valokaarella anturoinnin periaate juurituettuun V-railoon hitsattaessa. Kuvassa sivuttaisliikkeen asennot on merkitty pisteillä vasen (V), keskikohta (K) ja oikea (O). Hitsausvirrat näissä pisteissä ovat V: 220 A, K: 180 A ja O: 160 A (FANUC Robotics 2005, s. 2). Kun hitsausjärjestelmä havaitsee, että asennossa O hitsausvirta on pienempi kuin asennossa V, järjestelmä ohjaa hitsausrobotin rataa oikealle. Vaikka menetelmällä pystytään havaitsemaan hyvinkin pieniä eroja kosketussuuttimen ja työkappaleen välisessä korkeudessa ($\pm 0,25$ mm) sivuttaisliikkeen amplitudin ollessa pieni, on sivuttaisliikkeen parempi olla riittävä, että robotti ei kadota hitsattavaa railoa. Jos hitsattava railo katoaa kesken hitsauksen, ei laitteisto löydä sitä uudelleen. (Pires et al. 2006, s. 85.) Valokaarella anturointiin perustuvalla railonseurannalla voidaan hitsata vain pienahitsejä, päittäisliitoksia U- tai V-railoon ja riittävällä materiaalivahvuudella päällekkäisliitoksia (Kah et al. 2015, s. 5).



Kuva 11. Valokaareen perustuvan railonseurannan periaate hitsattaessa juurituelliseen V-railoon (mukaillen: FANUC Robotics 2005, s. 2).

4 JOUSTAVA ROBOTTIHITSAUSSOLU

Asiakasohjautuvan tuotannon, kysynnän vaihtelevuuden ja pienten valmistuseräisten tuotteiden valmistuksen avuksi tarvitaan tuotantojärjestelmän joustavuutta kilpailukyvyyn säilyttämiseksi ja edistämiseksi. Tuotantojärjestelmän joustavuuden määritelmäksi ei ole olemassa tarkkaa yksiselitteistä määritelmää. Määritelmä vaihtelee yritys- ja tapauskohtaisesti riippuen siitä, mitä joustavuudella pyritään yrityksessä saavuttamaan.

Tuotantojärjestelmän joustavuutta voidaan käyttää yrityksen toiminnassa apuna joko mukautuvasti tai ennakoivasti. Mukautuvuudella pyritään reagoimaan yritykseen kohdistuviin niin sisäisiin kuin ulkoisiin epävarmuuksiin. Tällöin joustavuus merkitsee yrityksessä yleistä kykyä mukautua/muuntautua markkinatilanteen tai yrityksen sisäisten tilanteiden suhteen. Ennakoivalla joustavuudella voidaan edistää yrityksen kilpailukykyä markkinoilla. Ennakoinnilla on tarkoitus herättää asiakkaiden mielenkiintoa yrityksen tuotteisiin ja kasvattaa kilpailevien tuotteiden valmistajien epävarmuutta markkinoilla. Yleisenä tuotantojärjestelmän joustavuuden määritelmänä voidaan pitää moniulotteista käsitettä, joka kuvaa tuotannon tarpeellista mukautumiskykyä ympäristömuuttujiin vaikuttamatta merkittävästi yrityksen toimintatehokkuuteen. (D'Souza & Williams 2000, s. 578; Jain et al. 2013, s. 5947-5948.)

D'Souza & Williams luokittelevat artikkelissa ”Toward taxonomy of manufacturing flexibility dimensions” aiempiin tutkimuksiin perustuen yhtenäisen ja suppean määritelmän tuotantojärjestelmän joustavuudelle. Tuotantojärjestelmän joustavuus voidaan D'Souzan & Williamsin (2000, s. 579) mukaan jakaa kahteen pääkategoriaan: ulkoisesti ohjautuviin joustavuustekijöihin ja sisäisesti ohjautuviin joustavuustekijöihin. (D'Souza & Williams 2000, s. 579-580, 582-583.)

Ulkoisesti ohjautuvia joustavuustekijöitä ovat tuotantomäärien joustavuus ja tuotteiston ja tuotemuutosten joustavuus. Tuotantomäärien joustavuudella tarkoitetaan tuotantojärjestelmän kykyä mukautua muuttuviin tuotantomääriin. Tällöin yritys pystyy mukautumaan vaihtelevaan kysyntään ja pysymään kannattavana sekä nostamaan tuotantomääriä tarvittaessa nopeasti. Tuotteiston ja tuotemuutosten joustavuudella

tarkoitetaan tuotantojärjestelmän kykyä valmistaa erilaisia ja uusia tuotteita. Tuotantojärjestelmä pystyy siis valmistamaan monia erilaisia ja uusia kappaleita ilman suurempia investointeja. (D'Souza & Williams 2000, s. 579-580, 582-583.)

Sisäisesti ohjautuvia joustavuustekijöitä ovat prosessimuutosten joustavuus ja materiaalinkäsittelyn joustavuus. Prosessimuutosten joustavuudella tarkoitetaan tuotantojärjestelmän kykyä sopeutua tuotantohäiriöihin tai muutoksiin tuotantoaikataulussa ja työjärjestyksessä. Tuotantolaitteet siis pystyvät erilaisiin vaadittaviin toimintoihin ilman tuotantoseisokkia. Materiaalinkäsittelyn joustavuudella tarkoitetaan tuotantojärjestelmän materiaalien liikkumista tuotannon oikeisiin paikkoihin aiheuttamatta häiriöitä tuotantoon. Kappaleet ja materiaalit pystytään kuljettamaan jokaiselta tuotantolaitteelta toiselle estotta ja oikeisiin paikkoihin. (D'Souza & Williams 2000, s. 579-580, 582-583.)

Tässä työssä keskitytään ulkoisesti ohjautuvien joustavuustekijöiden parantamiseen. Tuotantomäärien joustavuutta voidaan hitsauksessa kehittää pyrkimällä miehittämättömään hitsaukseen. Tällöin hitsausta voidaan tarvittaessa suorittaa yhdessä tai jopa kolmessa työvuorossa. Tuotteiston ja tuotemuutosten joustavuuden edistämiseksi hitsauksen joustavuutta pyritään parantamaan robottihitsaussolulla, jossa kappaleenkäsittelystä huolehtii nivelvarsirobotti. Kappaleenkäsittelyrobotin tulee kyetä tarraamaan erilaisiin hitsattaviin kappaleisiin, joiden eräkkö alkaa yhdestä kappaleesta.

4.1 Joustava valmistusjärjestelmä

Tuotannon joustavuutta voidaan parantaa ottamalla käyttöön tuotannon automatisointia. Flexible Manufacturing System (FMS) eli joustava valmistusjärjestelmä on eräs keino tuotannon automatisointiin. FM-järjestelmät koostuvat tietokoneohjatuista laitteista, kuten työstökoneista, joita palvelee automatisoitu kappaleenkäsittelyjärjestelmä ja automaattivarasto. Joustavan tästä järjestelmämallista tekee sen kyky valmistaa automaattisesti useita erilaisia kappaleita eri järjestyksessä. Valmistettavien kappaleiden sarjakoot voivat vaihdella tarvittaessa yhdestä jopa satoihin. (Shivanand, Benal & Koti 2006, s. 1-2.) Tyypillisesti FM-järjestelmiä käytetään lastuavaan työstöön ja levynleikkausjärjestelmiin, mutta ei ole mitään syytä miksi samaa periaatetta ei voitaisi soveltaa hitsaavaan tuotantoon.

FM-järjestelmän peruslaitteistoon kuuluu valmistuslaitteisto, automaattiset kappaleenkäsittely- ja varastointilaitteistot sekä ohjausjärjestelmä. Valmistuslaitteistot ovat tyypillisesti erittäin monipuolisia tietokoneistetulla numeerisella ohjauksella (Computerized Numerical Control, CNC) varustettuja sorveja tai työstökeskuksia. Järjestelmässä voidaan käyttää myös muita tietokoneohjattuja valmistuslaitteistoja, kuten hitsaus-, särmäys- ja kokoonpanorobotteja sekä levytyökeskuksia. Kappaleenkäsittelylaitteiston tehtävä on siirtää automaattivarastolta tulevia kappaleita valmistuslaitteille ja takaisin. Kappaleenkäsittelyn tulee olla joustava eli se kykenee käsittelemään erimuotoisia ja kokoisia kappaleita. Tietokoneohjausjärjestelmän tehtävänä on ohjata koko joustavaa valmistusjärjestelmää. Se ohjaa kappaleiden kulkua järjestelmässä, valmistusta ja pitää huolen järjestelmän toimivuudesta ja turvallisuudesta. (Shivanand et al. 2006, s. 2-3.)

4.1.1 Joustava valmistussolu

Joustava valmistusjärjestelmä voidaan jakaa yksinkertaisempiin ja kompakteihin joustaviin valmistussoluihin. Flexible Manufacturing Cell (FMC) eli joustava valmistussolu on yhden tai useamman valmistuslaitteiston käsittävä yksikkö. Valmistussolussa käytetään tyypillisesti tiettyä valmistusmenetelmää ja solussa voidaan valmistaa kokonaisia tuotteita tai tuotteen komponentteja. (Shivanand et al. 2006, s. 18.) Shivanandin et al. (2006, s. 19) mukaan joustava valmistussolu voidaan jaotella neljään eri luokkaan, joita on tässä työssä sovellettu joustaviin robottihitsaussoluihin:

1) Robottihitsaussolu – Hitsausrobotti kappaleenkäsittelypöydällä

- Kappaleenkäsittelypöydällä varustettu hitsausrobotti on yksinkertainen hitsausrobottisolu/valmistussolu. Tällöin valmistussolusta huolehtii yksi hitsausrobottioperaattori. Solussa on automaattinen työkalunvaihtojärjestelmä, mutta kappaleen vaihdon hoitaa operaattori. Kappaleenkäsittelypöytä voi olla yksi- tai kaksiasemainen. Käytettäessä kaksiasemaista kappaleenkäsittelypöytää operaattori voi irrottaa valmiiksi hitsatun kappaleen pöydästä ja asentaa uuden kappaleen tilalle samalla, kun robotti hitsaa toisen aseman kappaletta.

2) Automatisoitu robottihitsaussolu – Hitsausrobotti automaattisella kappaleenvaihtajalla

- Hitsaussolu saadaan automatisoitua lisäämällä siihen automaattisen kappaleenvaihtajan. Kappaleenvaihtaja osaa hakea hitsattavat kappaleet paikoitusalueelta ja palauttaa ne takaisin. Kappaleenvaihtaja ja kappaleenkäsittelylaite voidaan korvata kappaleenkäsittelyrobotilla, joka toimii kappaleenvaihtajana- ja käsittelijänä. Tällöin solua on mahdollista ajaa miehittämättömänä useita tunteja niin kauan kuin paikoitusalueella on hitsattavia kappaleita.

3) Automaattinen hitsauslinjasto

- Automaattisessa hitsauslinjastossa kappaleet liikkuvat hitsausrobotilta toiselle niin sanotusti liukuhihnalla. Kappaleet voivat olla esimerkiksi kiinnitettynä paletille. Tyypillinen esimerkki automaattisesta hitsauslinjastosta on autoteollisuudessa korin hitsauslinjasto, jossa runko liikkuu liukuhihnatyypillisesti ja vaihe kerrallaan robotit hitsaavat korin paneeleja runkoon kiinni.

4) Joustava valmistusjärjestelmä

- Joustavassa valmistusjärjestelmässä on useita eri valmistuslaitteistoja ja -prosesseja. Työstettävät kappaleet liikkuvat järjestelmässä paletteilla laitteelta toiselle ja niiden kuljetus, käsittely ja valmistus on automatisoitu. Valmistusjärjestelmässä voi olla esimerkiksi peräkkäisinä valmistusprosesseina automatisoitu hitsaus ja koneistus.

(Shivanand et al. 2006, s. 19-20.)

4.2 Miehittämätön robottihitsaus

Miehittämättömällä valmistuksella tarkoitetaan valmistuksessa ajankohtaa, jolloin ei vaadita operaattorin huomiota. Miehittämätöntä valmistusta pyritään tekemään yhtäjaksoisesti vähintään yhden työvuoron ajan. Robottihitsauksessa miehittämättömyydellä tarkoitetaan, että roboteilla on kaikki tarvittavat työkalut solussa saatavilla ja kappalekohtaiset robottiohjelmat ovat tallennettuna robottiohjaimeen. Hitsattavat kappaleet tuodaan solulle tai kuljetetaan liukuhihnalla. Järjestelmälle kerrotaan hitsattavaksi tulevat kappaleet ja missä ne sijaitsevat tai järjestelmä tunnistaa kappaleet automaattisesti. Miehittämättömässä valmistuksessa tulee varmistaa, että valmistus tapahtuu häiriöttömästi ja virheettömästi. Robottien ohjelmoinnissa ja ohjelmien

tarkastuksessa tulee huomioida, että törmäyksiä ei pääse syntymään. (Shivanand et al. 2006, s. 20.)

Miehittämättömällä robottihitsauksella pyritään kasvattamaan robottihitsauksen käyttöastetta, parantamaan hitsauksen toistettavuutta ja tasalaatuisuutta ja vähentämään keskeneräisiä kappaleita sekä työkustannuksia. Kappaleessa 4.1.1 mainituista robottihitsaussoluluokista miehittämättömyyttä voidaan soveltaa automatisoituun robottihitsaussoluun tai automaattiseen hitsauslinjastoon. Joustavat valmistusjärjestelmät ovat lähtökohtaisesti aina miehittämättömiä. (Shivanand et al. 2006, s. 20.)

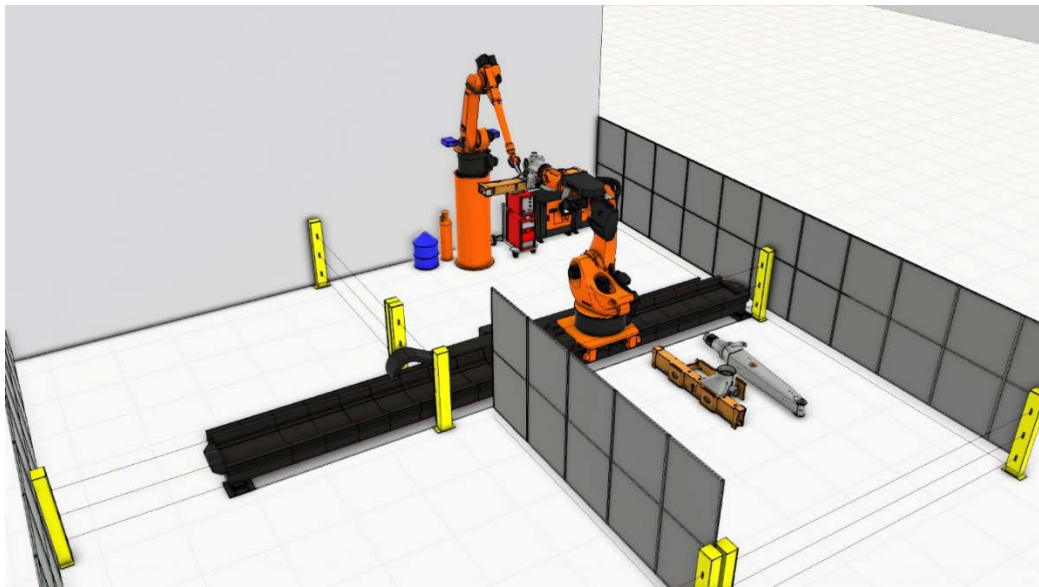
Miehittämätön valmistus asettaa robottihitsaussolulle tiettyjä vaatimuksia. Hitsausrobotti tulee olla varustettuna ainakin railonhakuominaisuudella. Hitsausrobotin palvelijana tulee olla automaattinen kappaleenkäsittelylaitteisto. Kappaleenkäsittelylaitteiston pitää pystyä lastaamaan ja purkamaan hitsattavat kappaleet automaattisesti. Kappaleiden siirto voidaan tehdä esimerkiksi palettikuljettimella kappaleenkäsittelylaitteelle tai vaihtoehtoisesti koko kappaleenkäsittely hoitaa nivelvarsirobotilla. Jos kappaleenkäsittely tapahtuu robotilla, se on varusteltava joustavalla robottitarraimella. Hitsausrobottia varten on oltava hitsauspolttimen vaihtoasema ja puhdistusjärjestelmä. Hitsauspolttimen vaihtoasema on erittäin tärkeä, kun hitsataan useita tunteja. MIG/MAG-hitsauksessa kosketussuutin tulee vaihtaa tietyin väliajoin, sillä ne kuluvat hitsauksesta aiheutuvasta lämmöstä. Seisokkeja voidaan välttää, kun hitsausrobotti vaihtaa poltinta ajoitetusti. Hitsauspolttimen vaihtoasemissa on yleensä integroituna myös työkalupisteen paikoitus ja hitsauslangan katkaisu. Puhdistusjärjestelmän tehtävä on irrottaa kaasusuuttimeen kertyneet hitsausroiskeet, jotka haittaavat hitsaustapahtumaa. Hitsauksen onnistumisen ja tasaisen laadun varmistamiseen robottihitsausjärjestelmä voidaan varustaa edellisten lisäksi railonseurantajärjestelmällä ja erillisellä hitsauspolttimen törmäystunnistimella.

4.3 Keslalle suunniteltu joustava robottihitsaussolu

Hitsauksen automaatioasteen nostamiseksi ja kilpailukyvyyn edistämiseksi Kesla Oyj:n Joensuun tehtaalle on suunniteltu investoitavaksi luvussa 4.1.1 esiteltyjen joustavien valmistussolujen kohdan kaksi (2) mukainen automatisoitu robottihitsaussolu. Kuvassa 12 on esitetty esimerkki suunnitellusta robottihitsaussolusta. Robottihitsaussolua halutaan ajaa miehittämättömänä ja sillä halutaan hitsata mahdollisimman montaa erilaista kappaletta

ilman keskeytyksiä. Jotta miehittämätön hitsaus Keslalla olisi mahdollista, robottihitsaussolun laitteiston tulisi koostua ainakin seuraavista laitteista, komponenteista ja ominaisuuksista:

- robottiohjain
- hitsausrobotti
- kappaleenkäsittelyrobotti
- lineaarirata
- hitsauslaitteisto vesijäähdytyksellä
- poltinkaulan vaihto-, oikaisu- ja puhdistusasema
- solunohjauksen käyttöliittymä
- railonhaku- ja seurantajärjestelmä
- vaadittavat turvalaitteet
- kappaletelineet
- joustava robottitarrain.



Kuva 12. Layout esimerkki Keslan joustavasta robottisolusta (Avertas Robotics Oy 2017).

Suunnittelussa robottihitsaussolussa ei kappaleenkäsittelyrobotin lisäksi tarvita erillistä kappaleenkäsittelylaitetta. Kappaleenkäsittelyrobotin tehtävänä on noutaa hitsattavat kappaleet, palvella hitsausrobottia ja viedä hitsatut kappaleet takaisin paikoitusalueelle. Kappaleenkäsittelyrobotilla tulee olla riittävä hyötykuorma, jotta se pystyy käsittelemään raskaimpia KESLA-tuotteiden hitsattavia kappaleita. Lineaariradan tehtävänä on liikuttaa

kappaleenkäsittelyrobotteja. Lineaarirata mahdollistaa hitsattavien kappaleiden sijoittelun suuremmalle alueelle kiinteään kappaleenkäsittelyrobottiin verrattuna. Hitsattavat kappaleet on tarkoitus sijoittaa lineaariradan viereen, josta kappaleenkäsittelyrobotti noutaa kappaleet. Paikoitusalueelle voidaan tuoda kappaleita miehittämätöntä hitsausta varten puskuriin esimerkiksi ilta- tai yövuoroon.

Hitsaus- ja kappaleenkäsittelyrobottien liikkeen tulee toimia synkronoidusti. Robottien synkronoiduilla liikkeillä saavutetaan pitkät yhtäjaksoiset hitsit ympäri kappaletta. Kun hitsit ovat yhtäjaksoisia, vältetään turhilta hitsien aloitus- ja lopetuskohdilta sekä rakennetta heikentäviltä epäjatkuvuuskohdilta.

Solunohjauksen käyttöliittymällä luodaan hitsaukselle työjono. Robottihitsaussolulla hitsattavista kappaleista tehdään etäohjelmoimalla robottiohjelmat, jotka tallennetaan robottiohjaimeen. Kun soluun tuodaan kappaleita, määritetään solunohjaukselle mikä kappale, kuinka monta ja mille kohdalle paikoitusalueella kappaleet on tuotu. Näiden tietojen perusteella solunohjaus luo jonoon uuden työn ja hakee automaattisesti robottiohjaimelta kappalekohtaisen robottiohjelman. Kun kappaleiden tuoja tekee solunohjauksen käyttöliittymällä työjonon, hitsausoperaattoria tarvitaan vain solun häiriötilanteissa ja uusien robottiohjelmien luonnissa, tarkastuksissa sekä säädössä.

Hitsattavien kappaleiden riittävän tarkkaa paikoitusta varten on valmistettava telineet, joista kappaleenkäsittelyrobotti noutaa kappaleet. Telineet helpottavat kappaleenkäsittelyrobotin kappaleiden noutoa ja palautusta. Niiden avulla saadaan varmistettua, että kappaleet on asemoitu samalla tavalla kuin hitsausohjelmassa. Telineiden tulee olla mahdollisimman modulaarisia, jotta niitä ei tarvitse valmistaa omaa jokaiselle kappaleelle.

5 ROBOTITARRAIMET

Automatisoidussa hitsaussolussa ja kappaleenkäsittelyrobotin käytössä ongelmaksi muodostuu käytettävän robottitarraimen joustavuus erilaisten hitsattavien kappaleiden suhteen. Kuivasen (1999, s. 184) mukaan tarrain on ”työkalu, joka on suunniteltu tarttumaan kappaleisiin niiden liikuttamiseksi.” Tarraimia käytetään nivelvarsiroboteissa rannelaippaan kiinnitettynä työkaluna. Tarrain -nimitystä käytetään myös järjestelmistä, joissa ei varsinaisesti ole ihmiskäden kaltaista tartuntaa. Tarraimen tehtävänä on pitää liikuteltavan kappaleen sijainti ja asento samana kappaleenkäsittelyjärjestelmän suhteen sekä kestää prosessissa syntyvät staattiset ja dynaamiset voimat. (Monkman et al. 2007, s. 1-2.)

Robottitarraimet voi jaotella karkeasti puristaviin, sitoviin, vetäviin ja pintatartunta tarraimiin. Puristaviin tarraimiin kuuluvat mekaaniset tarraimet, joilla liikuteltavaan kappaleeseen kohdistetaan yhdestä tai useammasta suunnasta kiinnipitävä voima. Mekaanisiin tarraimiin lukeutuvat erilaiset pihtimalliset tarraimet, kuten kulma- ja lineaaritarraimet. Mekaanisia tarraimia käytetään jäykkien kappaleiden liikuttamiseen. (Monkman et al. 2007, s. 61-62.)

Sitovat tarraimet lävistävät liikutettavan kappaleen tartunnan saavuttamiseksi. Sitovia tarraimia ovat neula- ja tarranauhatarraimet. Neulatarraimet lävistävät liikuteltavan kappaleen kokonaan, kun taas tarranauhatarraimet lävistävät kappaleen pinnalla olevia kuituja. Sitovat tarraimet soveltuvat joustavien materiaalien, kuten tekstiilien, hiili- ja lasikuidun liikuttamiseen. (Monkman et al. 2007, s. 61-62.)

Vetävien tarraimien voimat liikuteltavaan kappaleeseen kohdistuvat yhdestä suunnasta. Vetäviin tarraimiin kuuluvat alipaine- ja magneettitarraimet sekä sähköstaattiseen vetovoimaan perustuvat tarraimet. Sähköstaattiset tarraimet soveltuvat lähes kaikkien materiaalien käsittelyyn. Materiaalit voivat olla niin sähköä johtavia tai johtamattomia, mutta niiden tulee olla keveitä. Alipainetarraimet vaativat liikuteltavalta kappaleelta erittäin sileän pinnan, eikä kappaleen materiaali saa olla huokoista. Magneettitarraimet

vaativat liikuteltavalta kappaleelta ferromagneettisia metalleja sisältäviä materiaaleja. Kappaleiden tulisi sisältää rautaa, nikkeliä tai kobolttia. (Monkman 2007, s. 61-62.)

Pintatartunta tarraimet vaativat suoran kosketuksen liikuteltavaan kappaleeseen tartunnan saavuttamiseksi. Pintatartunta tarraimiin kuuluu muun muassa liimanauhaan, veden jäätymiseen ja pintajännitykseen perustuvat tarraimet. Tarraimilla voidaan liikuttaa keveitä ja joustavia materiaaleja, kuten tekstiilejä, hiili- ja lasikuituja. (Monkman et al. 2007, s. 61-62.)

Tässä työssä käsitellään tarkemmin mekaanisia, alipaine- ja magneettitarraimia. Nämä puristavat ja vetävät tarraimet soveltuvat raskaiden ja jäykkien kappaleiden käsittelyyn. Mekaaniset, alipaine- ja magneettitarraimet ovat teollisuudessa käytetyimpiä tarraintyyppisiä. Edellä mainittujen tarraintyyppien lisäksi työssä käsitellään nollapistekiinnittimiä. Nollapistekiinnittimiä käytetään tyypillisesti koneistuspalettien ja koneistettavien kappaleiden kiinnittämiseen työstöpöytään, mutta niitä on tietävästi käytetty myös robottitarraimina. (Monkman et al. 2007, s. 61; AMF 2017, s. 74.)

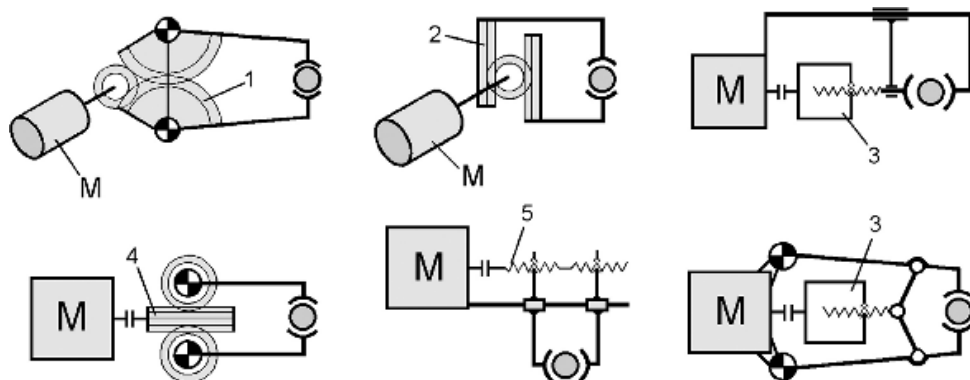
5.1 Mekaaniset tarraimet

Mekaaniset tarraimet nimensä mukaisesti perustuvat klassiseen mekaniikkaan ja erilaisiin mekanismeihin. Tarrainpintana mekaanisissa tarraimissa ovat niin sanotut sormet tai leuat, joita on tyypillisesti kaksi tai useampi. Tartunta perustuu joko leukojen ja liikuteltavan kappaleen väliseen kitkaan tai muotosulkeiseen tartuntaan. Muotosulkeisessa tartunnassa liikuteltavan kappaleen muotoja käytetään hyväksi kappaleen kiinnittämiseksi, jolloin tarraimen puristusvoimaa on mahdollista pienentää. Muotosulkeista tartuntaa käytettäessä on tarraimen puristusvoiman oltava kuitenkin riittävä, että kappale pysyy paikallaan. Mekaanisilla tarraimilla tartunta voidaan tehdä kappaleen ulko- tai sisäpuolelta. Leuat voivat liikkua samanaikaisesti tai esimerkiksi kahden leuan tarraimessa toinen leuka voi olla kiinteä. Kaikkien leukojen liikkua tarraimien mekanismit ovat yleensä keskittäviä. Mekaaniset tarraimet ovat teollisuudessa käytetyin tarraintyyppi, sillä ne ovat monipuolisia, luotettavia ja käytettävää puristusvoimaa voidaan säätää. (Kuivanen 1999, s. 67; Monkman et al. 2007, s. 75.)

5.1.1 Käyttövoimat

Mekaanisissa tarraimissa toimilaitteen käyttöenergia muutetaan mekaaniseksi energiaksi erilaisten vipujen ja vaihteistojen avulla. Tarraimien käyttövoimat ovat elektronisia, pneumaattisia tai hydraulisia. Käyttövoimien liikkeet, jotka ovat tyypillisesti pyöriviä tai lineaarisia, muutetaan tarraimen lineaari- tai kiertoliikkeeksi. (Kuivanen 1999, s. 60-63; Monkman et al. 2007, 75-; Wolf, Steinmann & Schunk 2005, s. 113.)

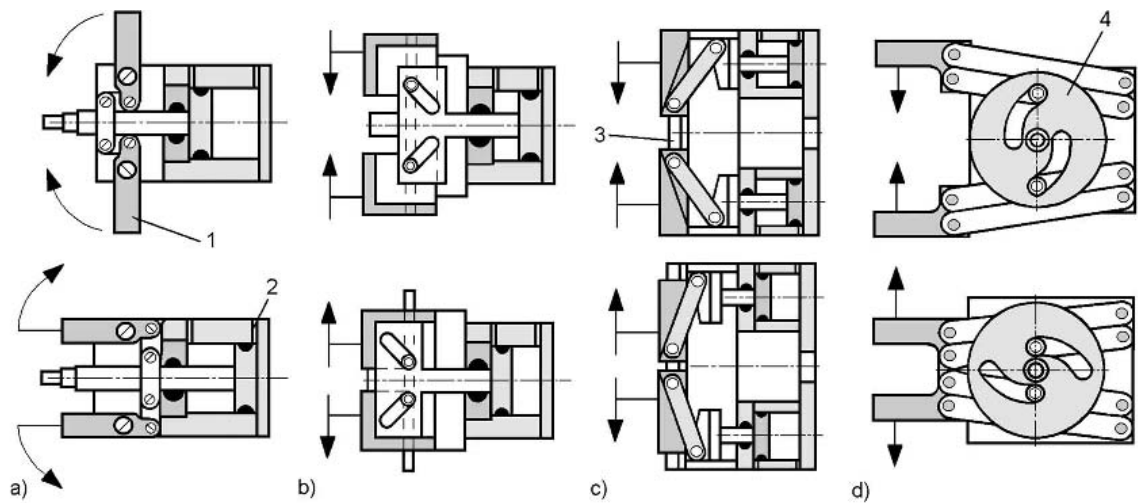
Elektronisia voimanlähteitä ovat pietsosähköiset, askel-, servo- tai lineaarimoottorit. Pyörivien sähkömoottoreiden liikkeet muutetaan hammastankojen, -pyörien ja kuularuuvien avulla tarraimen leukojen liikkeeksi. Kuvassa 13 on esitelty erilaisia mekanismeja, joiden käyttövoimana ovat pyörivät sähkömoottorit. Kuvassa M -kirjaimella tarkoitetaan sähkömoottoria ja numerot eri ovat mekanismityyppejä. Pyörivillä moottoreilla saavutetaan mekaanisista tarraimista suurin liikepituus. (Monkman et al. 2007, 77-79.)



Kuva 13. Pyörivällä sähkömoottorilla toimivien mekaanisten tarraimien mekanismeja: 1) hammaspyörä ja -segmentit 2) hammaspyörä ja -tangot 3) kuularuuvi 4) hammastanko ja -pyörät 5) kuularuuvi erikätisillä kierteillä (Monkman et al. 2007, s. 79).

Pneumaattisissa ja hydraulisissa mekaanisissa tarraimissa käytetään tyypillisesti yksi- tai kaksitoimisia sylintereitä, jotka sijaitsevat joko tarraimen koteloinnissa tai sen ulkopuolella. Yksitoimiset sylinterit palautuvat jousivoiman avulla. Pneumatiikka käyttövoimana on helppo ja yleinen valinta, sillä lähes jokaisessa tuotantolaitoksessa on valmiina paineilmajärjestelmä. Mekaanisista tarraimista pneumatiikalla saadaan tarrainleuoille nopeat avaus- ja sulkuliikkeet. Hydraulisella käyttövoimalla saadaan aikaan suuremmat pitovoimat, jolloin voidaan käsitellä suurempia kuormia. Hydraulisista

tarraimista saadaan kompaktin kokoisia, mutta tarraimen liikkeet ovat hitaita. Myös pneumaattisia tai hydraulisia lihaksia ja moottoreita voidaan käyttää mekaanisten tarraimien voimanlähteenä. (Monkman et al. 2007, s. 84-85; Wolf et al. 2005, s. 125-127.) Kuvassa 14 on esitelty esimerkkejä pneumaattisista tai hydraulisista tarrainmekanismeista. Kuvassa numerot tarkoittavat: 1) tarrainleuka, 2) sylinteri, 3) johde ja 4) nokkalevy (Monkman et al. 2007, s. 7).



Kuva 14. Esimerkkejä pneumaattisista tai hydraulisista tarrainmekanismeista: a) kulmatarrain, b), c) ja d) lineaaritarraimia (Monkman et al. 2007, s. 7).

5.1.2 Vakiotarraimet

Mekaanisia tarraimia voidaan suunnitella ja valmistaa itse. Vaihtoehtona ovat niin sanotut vakiotarraimet, joita on saatavilla useilta eri valmistajilta. Tarraimen käyttäjä voi valita valmistajilta saatavista vakiotarraimista valmiin tai muokata tarrainta komponenteilla käyttökohteeseen sopivaksi. Vakiotarraimiin on saatavilla valmiita tarrainleukoja (kuva 15), joita voidaan käyttää erilaisten kappaleiden liikuttamiseen. Useimmiten valmiit tarrainleuat ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, jolloin leuat täytyy suunnitella ja valmistaa liikuteltävien kappaleiden muotojen mukaisiksi. (Kuivanen 1999, s. 64; Monkman et al. 2007, s. 2.)



Kuva 15. Schunkin lineaari- ja kulmavakiotarraimia valmiilla tarrainleuoilla (Schunk 2015, s. 49, 985, 1143).

5.2 Alipainetarraimet

Alipainetarraimissa pitovoima perustuu elastomeerisen imukupin tai -tyynyn (kuva 16) ja liikutettavan kappaleen pinnan välissä vallitsevan alipaineen ja atmosfäärin paine-eroon. Riittävän alipaineen saavuttamiseksi kappaleen pinnan tulee olla riittävän tasainen, sileä ja puhdas. Kappaleen materiaali ei saa olla huokoista, jotta imukupit painautuvat kappaleeseen tiiviisti ja alipaine saadaan muodostettua. Alipainetarraimet soveltuvat niin pienille kuin suurille ja raskaille kappaleille. Liikuteltavan kappaleen paikoitusta tai keskitystä alipainetarraimilla ei pystytä tekemään, vaan kappale tulee paikoittaa tarraimen suhteen erillisellä laitteistolla. Alipainetarraimilla ei pystytä tarttumaan kappaleiden sisäpuolelta. Niitä käytetään kappaleille, joiden käsittelyyn mekaaniset tarraimet ei sovellu tai kappaleet eivät ole ferromagneettisia. (Kuivanen 1999, s. 63; Monkman et al. 2007, s. 169-170, 176; Schmalz 2016, s. 19.)



Kuva 16. Alipainetarraimissa käytettyjä imutyynyjä ja -kuppeja (Schmalz 2016, s. 377).

Saavutettava nostovoima on verrannollinen käytettävien imukuppien pinta-alaan sekä ilmanpaineen ja imukupin välisen paine-eron suuruuteen; liikuteltavan kappaleen massan kasvaessa tarvitaan suurempi imukuppien pinta-ala ja pienempi imukupissa vallitseva paine. Alipainetarraimet kestävät pääasiassa vain imukuppeja kohtisuoraan vaikuttavia voimia, sillä tartunta tapahtuu kappaleeseen vain yhdeltä sivulta. Sivusuunnassa olevat voimat eivät saa olla suuria, sillä imukuppeja pitää paikallaan imukuppien ja liikuteltavan kappaleen välinen kitka. (Kuivanen 1999, s. 63; Monkman et al. 2007, s. 178; Schmalz 2016, s. 19.)

Alipainetarrainjärjestelmän pääkomponentteihin kuuluvat imukupit tai -tyyny, alipaineen tuottojärjestelmä ja tuottojärjestelmää mittaavat sekä ohjaavat komponentit. Imukuppeja on saatavilla erimuotoisia ja -mallisia. Ne voivat olla esimerkiksi pyöreitä tai soikeita ja matalia tai palkeen muotoisia. Imukupeissa käytettävä materiaali määrää niiden lämmönkeston. Nitriilikumilla saavutetaan noin 130 °C, silikonilla 280 °C ja fluorikumilla jopa 300 °C lämmönkesto. Tarvittava alipaine voidaan tuottaa joko sähkölaitteilla tai paineilman avulla. Sähköllä toimivia alipaineen tuottajia ovat alipainepumput ja -puhaltimet. Pumppuja ja puhaltimia käytetään, kun tarvitaan suuri imutuotto tai paineilmaa ei ole saatavilla. Paineilmalla toimiva alipaineentuotto perustuu venturi-ilmiöön. Venturipumput ovat kompakteja ja ne voidaan sijoittaa suoraan alipainetarraimen yhteyteen. (Monkman et al. 2007, s. 170-171, 176; Schmalz 2016, s. 21-23.)

5.3 Magneetitarraimet

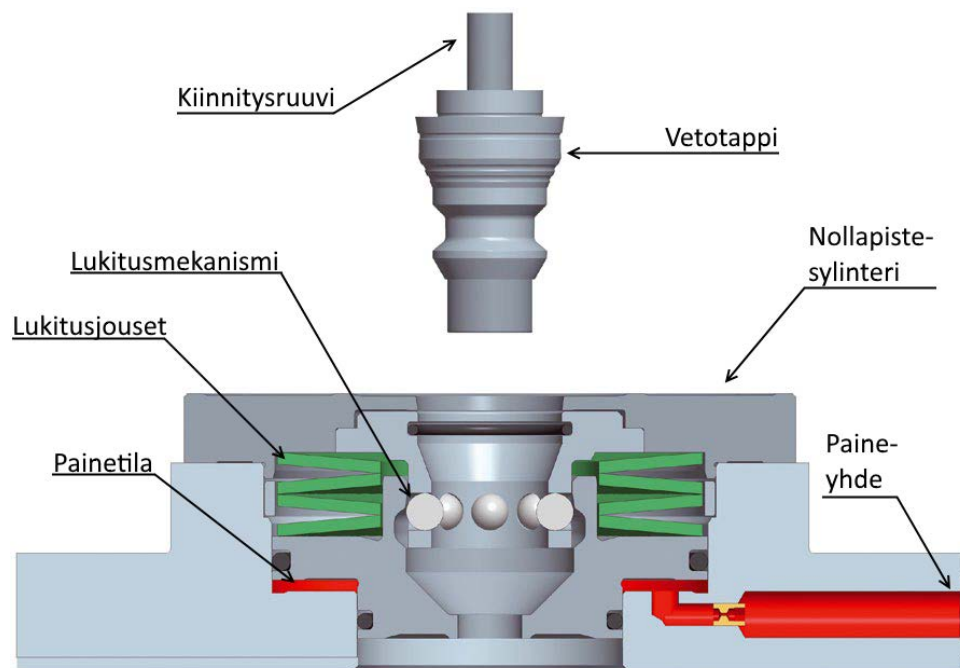
Magneetitarraimien tartunta perustuu magnetismiin. Tartunnan onnistumiseksi liikuteltavan kappaleen ja magneetin välinen ilmarako on pidettävä mahdollisimman pienenä. Kappaleen pinnan tulee olla riittävän tasainen ja suuri. Ilmarako vaikuttaa magneetin pitovoimaan heikentävästi. Tarraimissa käytettävät magneetit ovat kestromagneetteja, sähkömagneetteja tai niiden yhdistelmiä. Kestomagneetteja käytettäessä tarraimen irrotus kappaleesta tehdään mekaanisesti. Irrotus voidaan tehdä kääntämällä magneettia 90° eri asentoon, jolloin magneetikentän asento muuttuu ja kappale irtoaa. Toinen käytetty menetelmä irrotukselle on kampeamalla tai työntämällä kappale irti magneetista. Kestomagneettien kiinnityksessä ja irrotuksessa on mahdollista, että kappale pääsee liikahtamaan tarraimen suhteen ja asemoituu väärään paikkaan. Sähkömagneeteilla tätä ongelmaa ei ole. Sähkömagneeteilla magneetti koskettaa ensin kappaletta, minkä

jälkeen magneettikenttä muodostetaan. Kestomagneettien magneettisuus on lähes ikuinen, ellei magneetin lämpötila ylitä sen materiaalin Curie-pistettä. Lämpötilan ylittäessä Curie-pisteen magneettisen materiaalin magneettikenttä heikkenee. (Kuivanen 1999, s. 64; Monkman et al. 2007, s. 204-206.)

Sähkömagneeteilla liikutettavan kappaleen irrotukseen ei tarvita erillistä mekanismia, kun magneettikenttä saadaan aikaan sähkövirran avulla. Käytettävä virta voi olla tasa- tai vaihtovirtaa. Tasavirralla magneettikentän napaisuutta voidaan vaihtaa, milloin kappaleen irrottaminen nopeutuu. Irrotuksen jälkeen tasavirtakäyttöisellä sähkömagneetilla kappaleeseen voi jäädä jäännösmagneettisuutta. Vaihtovirralla magneetin napaisuus vaihtuu virran taajuuden mukaan. Vaihtovirran taajuus on riittävän suuri, jolloin se ei vaikuta sähkömagneetin pitovoimaan. Sähkömagneetit ovat yksinkertaisia, eikä niissä ole liikkuvia osia. Huonona puolena sähkömagneeteissa on pitovoiman häviäminen ja liikuteltavan kappaleen putoaminen sähkövirran katketessa. Sähkömagneetit myös lämpenevät magneettikentän ollessa aktivoituna, joten niitä ei voida käyttää yhtäjaksoisesti pitkiä aikoja. (Kuivanen 1999, s. 64; Monkman et al. 2007, s. 207, 211-212.)

5.4 Nollapistekiinnittimet

Nollapistekiinnittimet ovat konepajatekniikassa käytettäviä modulaarisia ja tarkkoja kappaleenkiinnittimiä. Niillä voidaan kiinnittää paletteja, erillisiä kiinnittimiä tai työstettäviä kappaleita suoraan esimerkiksi työstökoneen pöytään tai kappaleenkäsittelylaitteeseen. Nollapistekiinnittimiä käytetään niin manuaalisessa kuin automaattisessa kappaleenkäsittelyssä. Tyypillisiä käyttökohteita ovat kappaleet lastuavassa työstössä, kipinätyöstössä, mittauskoneissa ja hitsauksessa. (Big Kaiser 2016, s. 1, 6; ZeroClamp 2017, s. 15.) Kuvassa 17 on esitetty nollapistekiinnittimen osat. Nollapistekiinnitysjärjestelmä koostuu kahdesta pääkomponentista: nollapistesylinteristä ja vetotapista. Nollapistesylinterit ja vetotapit ovat valmistettu karkaistusta ruostumattomasta teräksestä (AMF 2017, s. 8; System 3R 2015, s. 13).



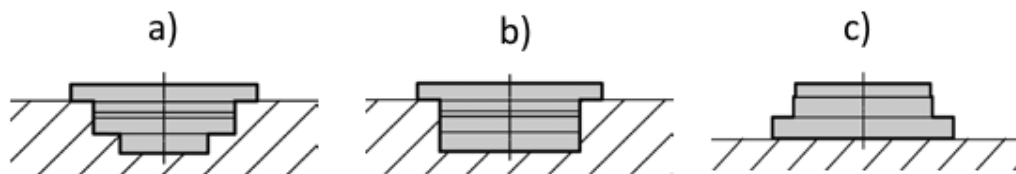
Kuva 17. Poikkileikkauskuva hydraulisesta nollapistesylinteristä (mukaillen: System 3R 2015, s. 17).

Nollapistekiinnittimillä työkappaleiden kiinnitys voidaan tehdä keskeyttämättä työstökoneita. Työkappaleet voidaan kiinnittää työstökoneen ulkopuolella valmiiksi paletille joko perinteisillä kiinnittimillä tai nollapistekiinnittimillä. Nollapistekiinnittimillä paletti tai työkappale saadaan vaihdettua työstökoneen pöytään huomattavasti nopeammin kuin perinteisillä kiinnittimillä. Valmistajien mukaan asetusajoja saadaan pienennettyä jopa 90 %. Työkappaleet voidaan myös asettaa vetotapeilla varusteltuun koneruuvipuristimeen, joka saadaan helposti nollapistekiinnittimillä suoraan työstökoneen pöytään kiinni. Samoilla kiinnittimillä voidaan työkappaleita työstää tarvittaessa eri koneilla. Kun vetotapit kiinnitetään suoraan työkappaleeseen, voidaan kappaletta työstää viideltä eri sivulta. Perinteiset kiinnittimet ovat usein tiellä ainakin kahdella työkappaleen sivulla. Nollapistekiinnittimien avulla samanlaiset kappaleet saadaan kiinnitettyä työstökoneelle hakematta uutta nollakohtaa. Tyypillisesti nollapistekiinnittimien toistotarkkuus on alle 5 µm. (System 3R 2015, s. 4-5; Big Kaiser 2016, s. 64; AMF 2017, s. 8, 14; Vischer & Bolli 2014, s. 42.)

5.4.1 Nollapistesyylinteri

Nollapistesyylinteri on nollapistekiinnitysjärjestelmän tärkein osa. Se pitää työstettävää kappaletta paikallaan ja määrittää millaisia kuormia nollapistekiinnitys kestää. Nollapistesyylinterien suurin lämmönkesto on tyypillisesti 80 °C, johtuen sylinterin männässä käytettyjen tiivisteiden materiaalista. Näin alhainen lämmönkesto voi olla ongelma käytettäessä nollapistekiinnittimiä hitsaussovelluksiin. Lämmönkesto on kuitenkin mahdollista korottaa käyttämällä Viton eli fluorikumi tiivisteitä. Tällöin sylinterin lämmönkesto saadaan korotettua jopa 300 °C. (AMF 2017, s. 13; Linker 2017; Sariola 2017.)

Nollapistekiinnittimissä suurin eroavaisuus on nollapistesyylinterien rakenteen välillä. Eri valmistajilla on sylintereissä omat lukitusmekanismit ja sylinterien asennustapa vaihtelee mallien mukaan. Nollapistesyylintereissä on kolme erilaista mallia riippuen asennustavasta: upotettavat, kasettimalliset ja pinta-asennettavat sylinterit (kuva 18). Upotettavia sylintereitä voidaan asentaa suoraan työstökoneen pöytään tai erilliselle pöytään asennettavalle pohjalevyille. Upotettavaa sylinteriä varten on pöytään tai levyyn tehtävä aukko. Sylinteri kiinnitetään ruuveilla sylinterin laipasta, joka jää kiinnitettävän pinnan yläpuolelle. Laippa on myös mahdollista upottaa kiinnitettävän pöydän tai levyn tasalle. Upotettavassa mallissa sylinterin mäntä on avoinna ja yhdessä aukon kanssa se muodostaa painetilan. Painetila varten on käyttövoimalle ja mahdolliselle paineilmapuhdistukselle koneistettava asennettavaan levyyn kanavat. Nollapistejärjestelmien valmistajilta on saatavilla valmiita kiinnityslevyjä ja -torneja, joihin on valmiiksi asennettu upotettavia sylintereitä kaksi tai useampi. (System 3R 2015, s. 7; Vischer & Bolli 2014, s. 46-48.)



Kuva 18. Nollapistesyylinterimallit: a) upotettava, b) kasettimalli c) pinta-asennettava (System 3R 2015, s. 7).

Kasettimallinen sylinteri on hyvin samantyyppinen kuin upotettava, mutta kasettimallit ovat nimen mukaisesti suljettuja ja painetila on sylinterin kotelon sisällä. Kasettimallinen

sylinteri kiinnitetään pöytään tai asennuslevyyn koneistettuun aukkoon tai reikään. Aukkoon asennettaessa on levyyn koneistettava käyttövoimalle ja paineilmapuhdistukselle kanavat. Jos kasettimallin sylinteri asennetaan reikään, voidaan käyttövoima ja paineilma liittää suoraan kasetin pohjassa oleviin yhteisiin. Kasettimallin sylinteri kiinnitetään samalla tavalla kuin upotettava ja myös kasettimallin laippa voidaan asentaa pöydän tai levyn pinnan tasalle. (System 3R 2015, s. 7; Vischer & Bolli 2014, s. 46-48.) Upotettavia ja kasettimallisia nollapistesylintereitä on saatavilla pyöreän- ja neliönmuotoisena. (AMF 2014, s. 25-26.)

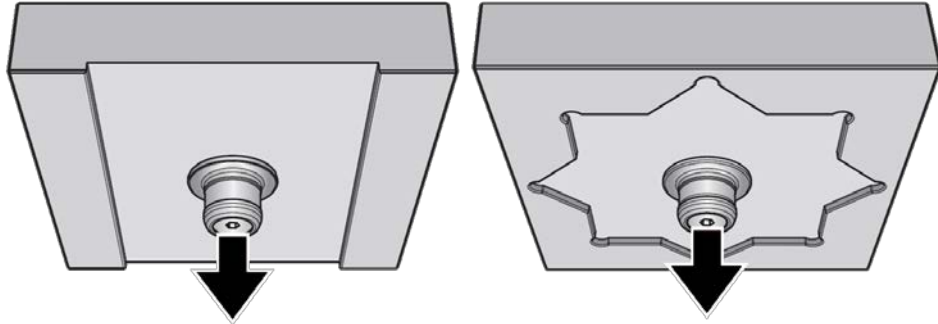
Pinta-asennettavat sylinterit nimen mukaisesti asennetaan työstökoneen pöydän pinnalle. Sylinterit kiinnitetään ruuveilla erillisillä kiinnityslaipoilla tai -kynsillä sylinterin sivussa olevasta urasta (kuva 19). Pinta-asennettavat sylinterit tuovat edun vanhoja työstölaitteita ajatellen, sillä ne on helppo asentaa esimerkiksi T-urapöytään. (System 3R 2015, s. 7; Vischer & Bolli 2014, s. 46-48.)



Kuva 19. Pinta-asennettavien nollapistesylintereiden kiinnityslaipat- ja kynsi (AMF 2017, s. 38; Vischer & Bolli 2014, s. 60).

Kappaleiden kiinnittämiseen voidaan käyttää yhtä tai useampaa nollapistekiinnitintä. Yhdellä nollapistekiinnittimellä on varmistettava, että kiinnitettävä kappale ja vetotappi eivät pääse pyörimään nollapistesylinterissä. Pyöriminen voidaan estää käyttämällä joko indeksointitappeja tai neliskulmaisella laipalla varustettua sylinteriä. Indeksointitappi tulee sijaita samassa kappaleessa kuin vetotappi. Kappaleen kiinnityksessä indeksointitappi kohdistetaan nollapistesylinterissä olevaan uraan tai koloon. Indeksointitapilla kiinnitettävän kappaleen orientaatiokulmaa voidaan siirtää 90° välein. Neliskulmaisella laipalla indeksointiin on vastakappaleeseen koneistettava aukko. Aukko voi olla

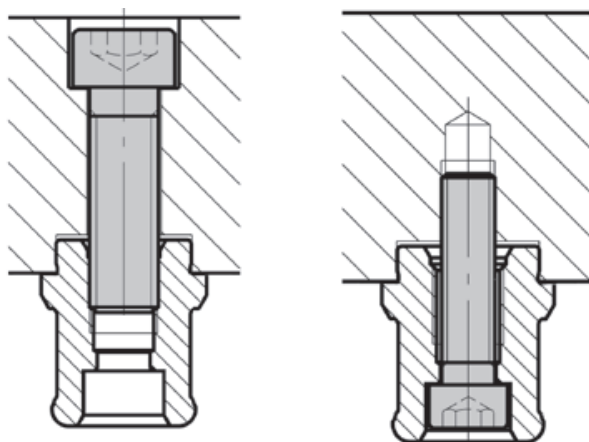
suorakaiteen muotoinen tai tähtikuvio (kuva 20). Suorakaiteen muotoisella aukolla kappale voidaan asemoida 90° välein ja tähtikuvioilla 45° välein. (Big Kaiser 2016, s. 4; Roemheld 2017, s. 15.)



Kuva 20. Indeksointi neliskulmaisella nollapistesylinterillä (Roemheld 2017, s. 15).

5.4.2 Vetotappi

Vetotapit kiinnitetään erillisillä tai kiinteillä ruuveilla työkappaleeseen tai palettiin. Erilliset ruuvit voidaan kiinnittää joko kappaleen puolelta tai vetotapin puolelta (kuva 21). Tällöin valmistajien suosittelema vaihtoehto on kiinnittää vetotappi ruuvaamalla se kappaleen lävitse. Joillakin valmistajilla vetotappiin on valmistettu kiinteä ruuvi, jonka avulla se voidaan ruuvata suoraan kappaleeseen. Jotta vetotapin kiinnitys olisi tarkka, on kiinnitettävään kappaleeseen koneistettava valmistajan toleranssien mukainen aukko vetotapin olakkeelle. (Vischer & Bolli 2014, s. 25; Big Kaiser 2016, s. 64; System 3R 2015, s. 6; ZeroClamp 2017, s. 16.)



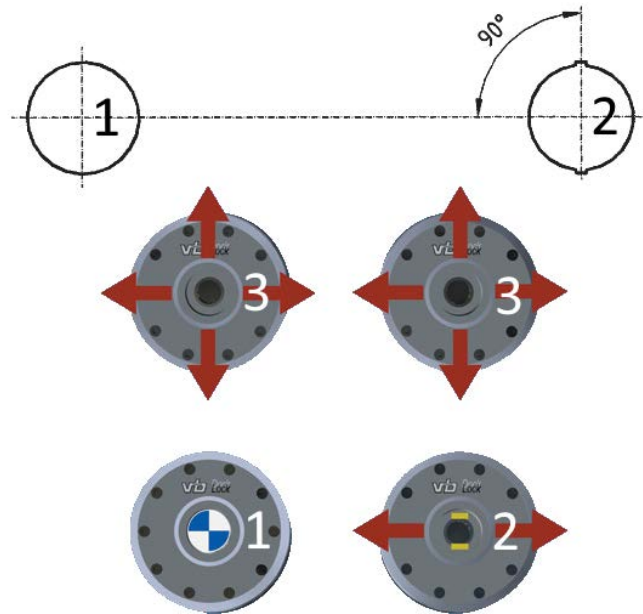
Kuva 21. Vetotappien kiinnitystavat (mukaillen: Vischer & Bolli 2014, s. 25).

Nollapistekiinnittimien vetotappeja on yleensä kolme erilaista mallia: keskittäviä, linjaavia ja kiinnittäviä (kuva 22). Keskittävät tapit on hiottu ympäri tarkkaan toleranssiin. Niiden tehtävä on määrittää yhden nollapistekiinnittimen nollakohta X-Y-tasossa. Linjaavissa tapeissa on vastakkaisilla puolilla kaksi kohotettua nokkaa, jotka on hiottu samaan toleranssiin keskittävän tapin halkaisijan kanssa. Linjaavan tapin tarkoitus on määrittää yhdessä keskittävän tapin kanssa kappaleen nollapistekiinnityksen X- tai Y-akselin suunta. Kiinnittävät tapit ovat keskittäviin ja linjaaviin tappeihin nähden alimitoitettuja ja niitä käytetään vain kappaleiden kiinnittämisen apuna. (AMF 2017, s. 12, 131; Vischer & Bolli 2014, s. 24; System 3R 2015, s. 6.)



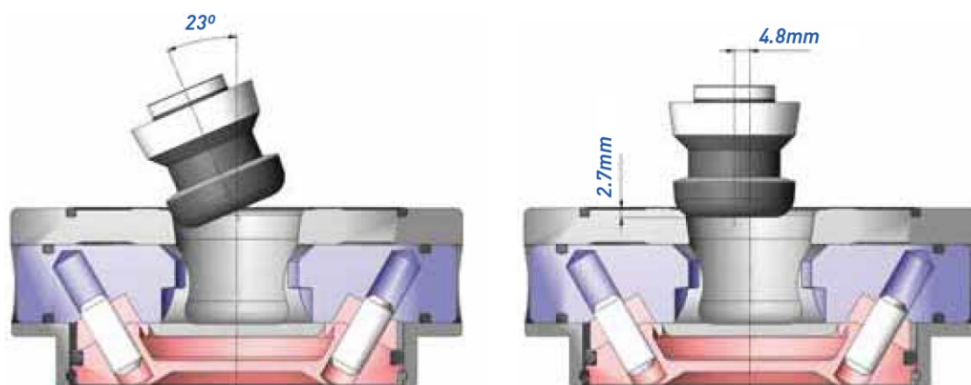
Kuva 22. Vischer & Bollin vetotappien tyypit ja halkaisijoiden toleranssit (mukaan: Vischer & Bolli 2014, s. 24).

Linjaava tappi tulee sijoittaa keskittävän tapin suhteen siten, että linjaavan tapin nokat ja tappien lävistäjät ovat suorassa kulmassa toisiinsa nähden (kuva 23). Nollapistekiinnitysjärjestelmissä tarvitaan aina vähintään yksi keskittävä tappi. Jos nollapistekiinnittimiä on kaksi tai enemmän, kiinnitykseen tarvitaan keskittävän tapin lisäksi yksi linjaava tappi ja loput tapit ovat kiinnittäviä. Erikokoisten vetotappien ansiosta nollapistekiinnitys kykenee kompensoimaan työstöstä aiheutuvia lämpömuodonmuutoksia ja nollakohta säilyy keskittävässä tapissa. Käytettäessä neljän nollapistekiinnittimen järjestelmää suorakulmion muodossa voi kaikki vetotappi olla linjaavia. Neljän linjaavaan tapin nokat tulee sijoittaa kohtisuoraan suorakulmion lävistäjiin nähden. Kiinnityksen nollapiste sijaitsee tällöin lävistäjien leikkauspisteessä. (AMF 2017, s. 12, 131; Vischer & Bolli 2014, s. 24; System 3R 2015, s. 6.)



Kuva 23. Linjaavan tapin kulma keskittävään tappiin ja esimerkki vetotappien sijoittelusta: 1) keskittävä tappi, 2) linjaava tappi ja 3) kiinnittävä tappi (mukaiillen: Vischer & Bolli 2014, s. 24).

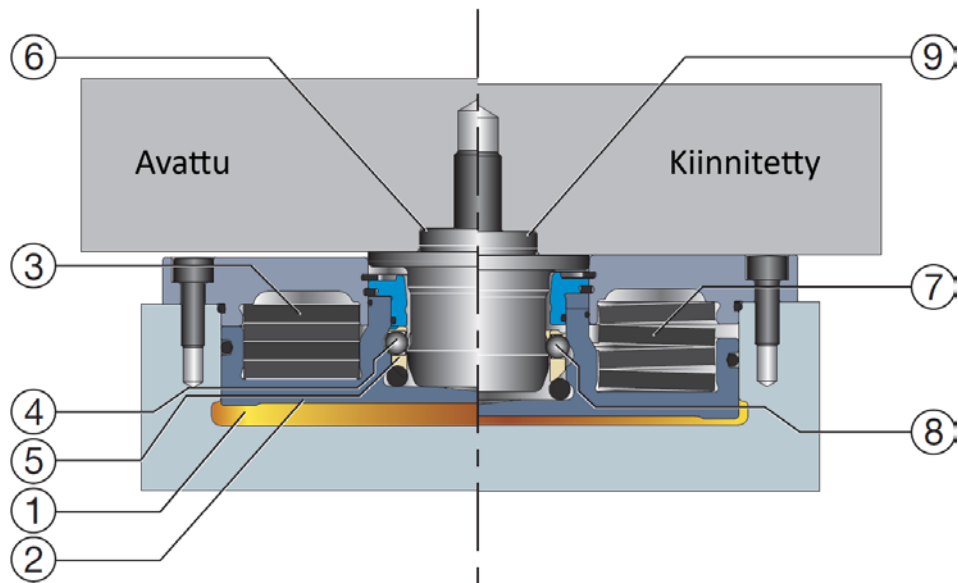
Sijoittaessa vetotappia sylinteriin sitä ei tarvitse laittaa täysin kohtisuorassa tai keskelle sylinteriä (kuva 24). Vetotappien päät ovat viistettyjä tai pyöristettyjä, jolloin ne voidaan asettaa paikalleen useamman millimetrin sivussa sylinterin keskipisteestä. Kuten kuvasta 24 nähdään, vetotappien muotoilu mahdollistaa niiden asettamisen myös kulmassa. Muotoilun ansiosta vetotappi pyrkii suoristumaan nollapistesylinteriin työnnettäessä. Näistä ominaisuuksista on erityisesti hyötyä työstettäessä isoja kappaleita, joihin kohdistuu lämmöstä aiheutuvia muodonmuutoksia. (Big Kaiser 2016, s. 5.)



Kuva 24. Vetotapin sijoittamistarkkuus sylinteriin (Big Kaiser 2016, s. 5).

5.4.3 Toiminta

Nollapistekiinnittimissä vetotapin lukitus nollapistesynteriin tapahtuu mekaanisesti lukitusjousilla ja lukituksen avaaminen hydraulisen tai pneumaattisen käyttövoiman avulla. Kuvassa 25 on esitetty toimintaperiaate nollapistekiinnittimen toiminnasta. Kuvaan on numeroitu nollapistekiinnittimen avaamiseen ja lukitukseen liittyvät vaiheet. Nollapistekiinnittimen avaamista varten nollapistesynteriin syötetään paineistettua ilmaa tai öljyä (1). Paine nostaa lukitusmännän (2) ylös ja samanaikaisesti mäntä puristaa lukitusjouset (3) kasaan sekä avaa nollapistekiinnityksen lukitusmekanismin (4) vetämällä kiinnityskuulat (5) pois vetotapin olakkeesta (6). Nollapistekiinnittimen ollessa paineistettuna voidaan vetotappi nostaa pois sylinteristä. Vetotapin lukitus nollapistesynteriin aloitetaan laittamalla vetotappi paikalleen ja laskemalla sylinteristä paineet pois. Paineettomana lukitusjouset työntävät mäntää alaspäin (7) ja lukitusmekanismi liikuttaa kiinnityskuulat vetotappiin (8). Kynnet vetävät vetotappia nollapistesynteriin kiinni ja pitävät sen lukittuna (9).



Kuva 25. Pneumaattisen nollapistekiinnittimen toimintaperiaate vasemmalla avattuna ja oikealla kiinnitetynä: 1. sylinteri paineistetaan, 2. lukitusmäntä nousee, 3. lukitusjouset puristuvat kasaan, 4.-6. lukitusmekanismi avautuu irrottaen vetotapin, 7. paineettomana lukitusjouset työntävät lukitusmäntää, 8.-9. lukitusmekanismi lukitsee vetotapin (mukaiillen: Roemheld 2017, s. 6).

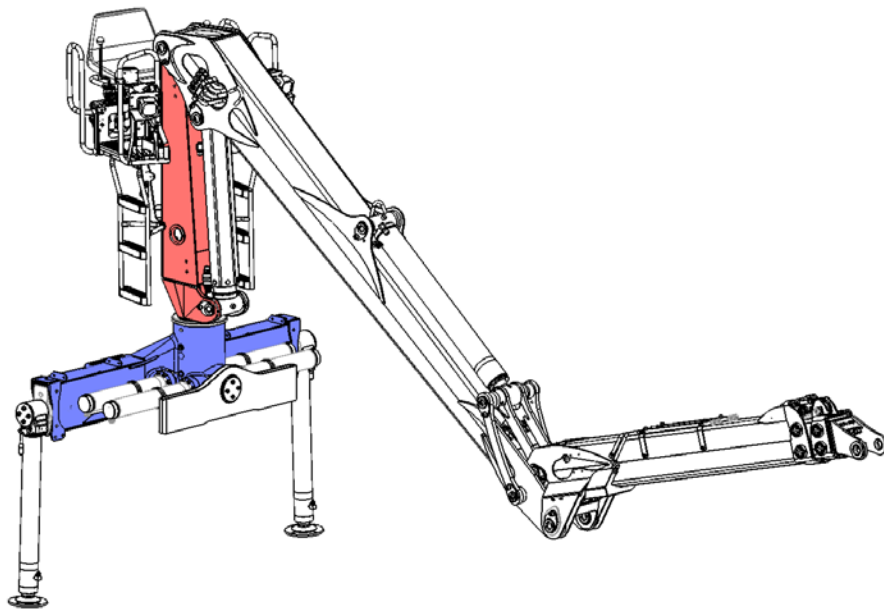
Joissakin malleissa nollapistesylinteriin lukitusta voidaan vahvistaa käyttövoiman avulla. Tällöin lukitusmäntää puristetaan käyttövoimalla samaan suuntaan lukitusjousien kanssa. (AMF 2014, s. 22; Big Kaiser 2016, s. 4; Roemheld 2017, s. 6.) Kaikki nollapistekiinnittimet toimivat samalla periaatteella, niin hydrauliset kuin pneumaattiset. Erona ovat eri valmistajien nollapistesylinteriin ja vetotappien rakenteet sekä käytettävät lukitusmekanismit.

Kiinnityksen onnistumiseksi nollapistesylinteri on pidettävä puhtaana. Manuaalisesti nollapistesylinteri voidaan puhdistaa puhaltamalla paineilmapistoolilla sylinteri puhtaaksi. Automaatiosovelluksiin tarkoitetuissa nollapistesylintereissä on mahdollisuus automaattiselle paineilmatoimiselle puhdistukselle. Paineilmaa puhalletaan sylinterin pohjalta ja otsapinnalle sylinterin sisällä olevia kanavia pitkin. Tarkoituksena on poistaa vetotappin kiinnitystä haittaavia epäpuhtauksia kuten lastuja tai lastuamisnestettä. (AMF 2014, s. 10, 13; Big Kaiser 2016, s. 5; Vischer & Bolli 2014, s. 16.)

Hitsaussovelluksissa hitsausmaadoituksen tuominen nollapistekiinnittimien lävitse ei koidu ongelmaksi. Nollapistesylinteriin rakenteen takia maadoitus välittyy kiinnitettävän kappaleen ja nollapistesylinteriin otsapinnan kautta. Tällöin mahdolliset virran läpilyönnit eivät kohdistu itse lukitusmekanismiin eikä täten vaikuta nollapistesylinteriin toimintaan. (Sariola 2017.)

6 NOSTURIN KÄÄNTÖLAITE

KESLA 2109 auto- ja teollisuusnosturi kuuluu Kesla Oyj:n valmistamaan uuteen 21-sarjaan. Nosturi soveltuu käytettäväksi tavaralajimenetelmä- tai kierrätyskäyttöön. KESLA 2109 nostokyky on 9-tonnimetriä eli se pystyy nostamaan tuhat kilogrammaa yhdeksän metrin päältä. Nosturin kääntölaite koostuu kokonaisuudessaan kääntölaitteen rungosta ja kääntöpylvästä. Ne ovat nosturin kriittisimmät osat, sillä niihin kohdistuu suurin ja jatkuva kuormitus. Kumpikaan, runko tai pylväs, ei saa pettää kesken käytön henkilövahinkojen välttämiseksi. Kuvassa 26 on esitelty KESLA 2109 nosturin kääntöpylväs punaisella ja kääntölaitteen runko sinisellä. (Kesla 2015a.)



Kuva 26. KESLA 2109 suorapuuminen auto- ja teollisuusnosturi (mukaillen: Kesla Oyj 2015b, s. 1).

6.1 Kääntöpylväs

KESLA 2109 nosturin kääntöpylväs koostuu kymmenestä erilaisesta hitsattavasta osasta. Kaiken kaikkiaan hitsattavia osia on 12. Pylvään rakenteessa on erikoislujasta rakenneteräksestä (SSAB Strenx 700 MC Plus) hienosädeplasmaleikattuja levyosia, valuteräksestä (20MnCrMo5) valettu ja koneistettu hammasakseli sekä koneistettuna osina akseliholkki ja läpiviennin vahvike. Pylvään kokonaisuudessa hitsauksen jälkeen ja ennen

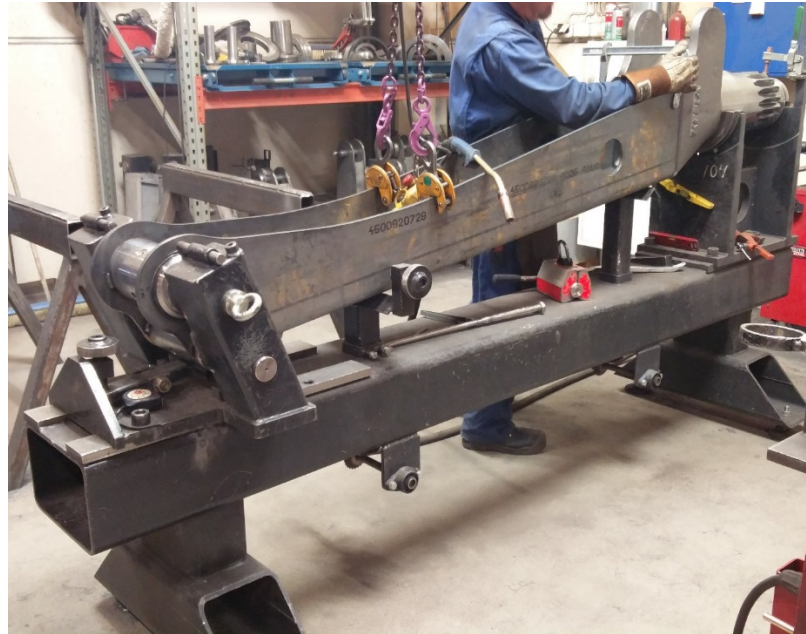
koneistusta on noin 250 kg. Liitteessä I on esitetty kääntöpylvään hitsauspiirustus ja osaluettelo. Pylvään hitsit ovat piena-, V- ja puoli-V-hitsejä.

6.1.1 Pylvään hitsaus

Kääntölaitteen pylväs käsinhitsataan tyypillisesti kahdessa vaiheessa eri hitsaajien toimesta. Hitsausprosessina käytetään MAG-täytelankahitsausta. Ensimmäisessä niin sanotussa silloitushitsausvaiheessa kaikki pylvään kotelorakenteen sisälle jäävät osat silloitetaan kiinni. Toisessa eli kokoonpanohitsausvaiheessa hitsaaja liittää ensin kotelon sisäpuoliset osat, silloittaa etulevyn paikalleen ja liittää etulevyn, akseliholkin sekä hammasakselin koteloon. Tarvittaessa hitsaaja viimeistelee hitsit hiomalla ne juoheviksi. Seuraavassa on avattu tarkemmin molempia hitsausvaiheita:

Silloitushitsauksen työvaiheet:

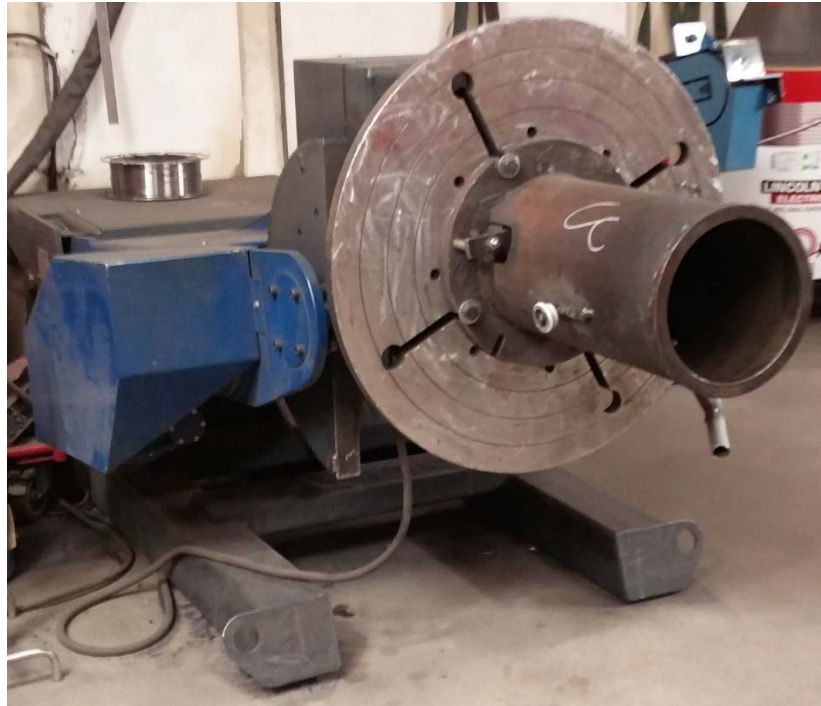
1. Hitsaajalle tuodaan kuormalavalla kääntölaitteen pylvään osaluettelon (liite I) mukaiset osat.
2. Hammasakseli, pylvään kotelo ja akseliholkki nostetaan kääntöpuominosturia apuna käyttäen hitsauskiinnittimeen (kuva 27).
3. Hitsaaja tarkastaa osien sopivuuden keskenään ja tekee tarvittavat muutokset hiomalla sekä käyttämällä puristimia oikean ilmaraon saavuttamiseksi. Kotelon yläpää saattaa vaatia hiomista, että akseliholkki menee paikalleen.
4. Kun osat ovat paikallaan, voidaan silloitushitsaus aloittaa. Silloitushitsausvaiheessa hitsaaja silloittaa pylvään koteloon hammasakselin, akseliholkin ja kotelon sisälle selkäpuolelle hammasakselin viereen tulevan tukilevyn.
5. Pylväsaiho irrotetaan hitsauskiinnittimestä ja nostetaan samalla kuormalavalle hitsaamattomien osien kanssa.
6. Kuormalava siirretään seuraavalle työpisteelle kokoonpanohitsaukseen.



Kuva 27. Hitsauskiinnitin, jonka vieressä hitsaaja puristaa runkoa kiinni hammasakselin koneistettuun olakkeeseen.

Kokoonpanohitsauksen työvaiheet:

1. Kääntölaitteen pylvään aihio kiinnitetään hammasakselista 3-akseliseen kappaleenkäsittelylaitteeseen, jonka laipassa on kiinni asetusholkki (kuva 28).
2. Hitsaaja asettaa ja silloittaa kotelon seinämiin kaksi läpiviennin vahviketta sekä kaksi akseliholkin tukipalaa.
3. Aiemmin silloitetut tukipalat, läpiviennin vahvikkeet ja kotelon tukilevy sekä hammasakseli ja akseliholkki hitsataan koteloon sisäpuolelta.
4. Kun kotelon sisäpuoliset hitsit ovat valmiita, voidaan pylvään etulevy asetella paikalleen. Etulevyn asettelussa hitsaaja voi joutua käyttämään levittämiä tai puristimia, sillä kotelon sisämitta ei särmäyksen jälkeen ole tarkka. Etulevy silloitetaan ensin pylvään päädyistä, jolloin voidaan tarvittaessa nostaa etulevyä nostomagneetilla ennen keskikohdan silloittamista.
5. Lopullinen kokoonpanohitsaus voidaan aloittaa. Kokoonpanohitsauksessa liitetään läpiviennin vahvikkeet ulkopuolelta, hammasakseli koteloon ja akseliholkki korvakkeineen kotelon ulkopuolelta. Viimeisenä liitetään etulevy hammasakseliin ja koteloon. Hammasakselin teräsvalu esilämmitetään kaasupolttimella noin 130 °C lämpötilaan kylmähalkeilun välttämiseksi. Hitsaaja viimeistelee hitsit tarvittaessa hiomalla ne jouheviksi.



Kuva 28. Kappaleenkäsittelylaite NewFiro 2500 HHT ja hammasakselin asetusholkki.

Kokonaisuudessaan kääntöpylvääseen kertyy yhteensä 10678 mm hitsejä, joista 3394 mm hitsataan ennen lopullista kokoonpanohitsausta. Robottihitsausta varten silloitushitsausvaihe on tehtävä, jotta pylvään kotelon sisäpuoliset hitsit saadaan hitsattua. Valmiiksi silloitettu kappale mahdollistaa myös robottihitsauksen suorittamisen ilman hitsauskiinnittimiä. Kun kokoonpanohitsaus tehdään hitsausrobotilla, robotille jää hitsattavaa 7284 mm eli noin 68 % koko pylvään hitseistä.

6.2 Kääntölaitteen runko

Kääntölaitteen runko koostuu hitsatusta tukijalkapalkista ja valurungosta. Kokonaisuudessaan kääntölaitteen rungossa on 30 hitsattavaa osaa, joista 16 ovat erilaisia. Tukijalkapalkki on kokonaisuudessaan erikoislujuista rakenneteräksestä (SSAB Strenx 700 MC Plus) hitsattu levyrakente. Kääntölaitteen valurunko on valuteräksestä (20MnCrMo5) valettu ja koneistettu osa. Koko kääntölaitteen rungon massa on noin 260 kg hitsauksen jälkeen.

Liitteissä II ja III on esitetty tukijalkapalkin sekä kääntölaitteen hitsauspiirustukset ja osaluettelot. Suurin osa tukijalkapalkin ja kääntölaitteen hitseistä on pienahitsejä, koska

kääntölaitteen runko on suunniteltu robotilla hitsattavaksi. Tukijalkapalkin hitseissä on myös puoli-V- ja I-hitsejä. Kääntölaitteen valu liitetään tukijalkapalkkiin puoli-V-hitsillä.

6.2.1 Rungon hitsaus

Kääntölaitteen rungon käsinhitsausta ei tässä työssä käsitellä yhtä tarkasti kuin pylvään käsinhitsausta. Rungon hitsaukseen ei tarvita kappalekohtaisia hitsauskiinnittimiä tai kappaleenkäsittelylaitteita. Tukijalkapalkin etu-, taka-, pohja-, ja kansilevyt on suunniteltu itsepaikoittaviksi osiksi. Etu- ja takalevyihin on leikattu paikoitusnastat, jotka sopivat pohja- ja kansilevyihin leikattuihin paikoitusreikiin. Paikoitusnastat on jätetty 3 mm lyhyemmiksi, kuin pohja- ja kansilevyjen materiaalivahvuus. Täten levyt saadaan silloitettua tulppahitseihin toisiinsa hitsauspöydällä 12 eri kohdasta ilman erillisiä hitsauskiinnittimiä. Levyt muodostavat tukijalkapalkin kotelon, johon kaikki muut osat hitsataan kiinni. Tällä hetkellä pelkkää tukijalkapalkkia hitsataan Keslan vanhalla robotihitsaussolulla, kun solu ei muuten ole käytössä.

Kääntölaitteen rungossa on hitsejä yhteensä 32378 mm. Tukijalkapalkin hahlojen taakse jää piiloon vahvikkeen, pohja-, kansi- ja takalevyt liittävät neljä hitsiä. Edellä mainittujen hitsien yhteispituus on 1388 mm. Paikoitusnastojen tulppahitseistä kertyy yhteensä 288 mm hitsejä ja tukijalkapalkin päissä olevat pannat silloitetaan yhteensä 720 mm pienahitsillä. Kaikki muut kääntölaitteen rungon hitsit voidaan hitsata robotilla. Tällöin hitsausrobotille jää hitsattavaa 29982 mm eli noin 92 % kääntölaitteen rungon kaikista hitseistä. Tukijalkapalkki tulee hitsata myös palkin sisäpuolelta väsymiskestävyyden parantamiseksi. Tämä voi aiheuttaa ongelmia hitsausrobotin luoksepäästävyyteen. Riittävän pitkällä kaulalla varustettua hitsauspoltinta käytettäessä kotelon sisäpuoliset hitsit on kuitenkin mahdollista hitsata robotilla.

6.3 Osavalmistuksen tarkkuuden haasteet

Kääntöpylvään kotelon levy särmätään siten, että sivusta katsottuna kotelo kapenee pylvään yläpäästä kohti. Särmäys ei aina onnistu halutulla tavalla, jolloin kotelon seinämien välinen mitta vaihtelee. Tällöin kotelon ja hammasakselin väliin voi jäädä liian suuri ilmarako, jota ei aina saa edes puristimilla tarpeeksi pieneksi. Särmäykset vaikuttaa myös pylvään etulevyn sovitukseen

Perinteisiin rakenneteräksiin verrattuna erikoislujat teräkset vaativat korkeamman lujuuden myötä suuremman taivutusvoiman ja taivutussäteen. Lujuuden kasvun myötä taivutusten takaisinjousto on myös suurempi, mikä tulee ottaa huomioon. Lujat teräksen suositellaan taivutettavaksi poikittain levyn valssaussuuntaan nähden. (Väyrynen 2015, s. 15-16.)

Hammasakselin valuaihioon koneistetaan itse hammasakseli sekä hitsausrailo ja yhdistetty juurituki. Satunnaisesti valukappaleissa ilmenee vaihtelua, jolloin valun koneistuksen jälkeen yhdistetty railo/juurituki ei ole symmetrinen kotelon seinämien kohdilta (kuva 29). Tällöin juurituen seinämävahvuus voi jäädä toiselta puolen valua hyvin ohueksi, mikä heikentää pylvään juuren rakennetta. Hammasakselin toispuoleinen olake aiheuttaa ongelmia myös hitsaukseen kotelon ulkopuolella. Kotelon ja hammasakselin hitsausrailojen geometria ei ole symmetrinen ja railotilavuudet ovat erikokoiset, mikä vaikeuttaa robottihitsausta.



Kuva 29. Hammasakselin koneistetun hitsausrailon/olakkeen paksuuserot valussa kotelon sisäpuolelta kuvattuna.

6.4 Rakenteiden muutosehdotukset robottihitsaukseen

Jotta kääntölaitteen rungon ja pylvään robotisoitu hitsaus helpottuisi, voisi kappaleisiin tehdä rakenteellisia muutoksia. Pylvään päähän tuleva akseliholkki ja sen tuenta koostuu viidestä eri osasta. Osat voitaisiin korvata yhdellä valuosalla, mitä on Keslalla aiemmin jo suunniteltu. Viisi eri hitsattavaa osaa saataisiin muutettua yhdeksi hitsattavaksi osaksi. Eri hitsien määrä vähenisi merkittävästi ja robotille hitsattavaksi jäisi korkeintaan kaksi hitsiä. Valuosan liitos pylvään päähän voitaisiin suorittaa samalla tavalla kuin luvussa 2.3.2 esitellyssä kuvassa 6 kohta b) tai c). Tällöin valuosaa itsessään toimii juuritukena tai hitsattaisiin pienahitseillä.

Pylvään etulevy joudutaan silloittamaan koteloon hitsaamalla puoli-V-railoihin, jonka muodostavat etulevy ja kotelon seinämät. Jotta robottihitsauksessa silloitushitsien osittaiselta sulamiselta vältyttäisiin, voitaisiin koteloon seinämiin tehdä etulevyn kohdalle silloittamista varten aukkoja. Aukoista etulevy saataisiin silloitettua tulppahitseillä. Tällöin silloitus voitaisiin suorittaa samalla prosessilla kuin pylvään sisäpuoliset hitsit, eikä silloitusta varten tarvita erikseen esimerkiksi TIG-hitsausta.

Tukijalkapalkin hahlo ja vahvike voitaisiin valmistaa yhdestä levyaihiosta. Tällöin ei varsinaisesti saada vähennettyä hitsejä, mutta tukijalkapalkin rakennetta saadaan yksinkertaistettua. Hitsit eivät vähene, sillä etulevy tulee joka tapauksessa hitsata pohja- ja kansilevyihin hahlojen kohdalta. Lisäksi tukijalkapalkin etu- ja takalevyt voitaisiin muuttaa keskenään modulaariseksi, jos muutoksella ei ole vaikutusta käyttökohteen kannalta tai rakenteellista merkitystä. Kääntölaitteen rungon valun liitoskohtaan koneistetaan viiste ja se liitetään tukijalkapalkkiin hitsaamalla puoli-V-railoon. Robottihitsauksen helpottamiseksi liitos voitaisiin muuttaa pienaliitokseksi koneistamalla valun liitoskohta eri muotoon.

7 KAPPALEENKÄSITTELYN KIINNITYSKOHDAT

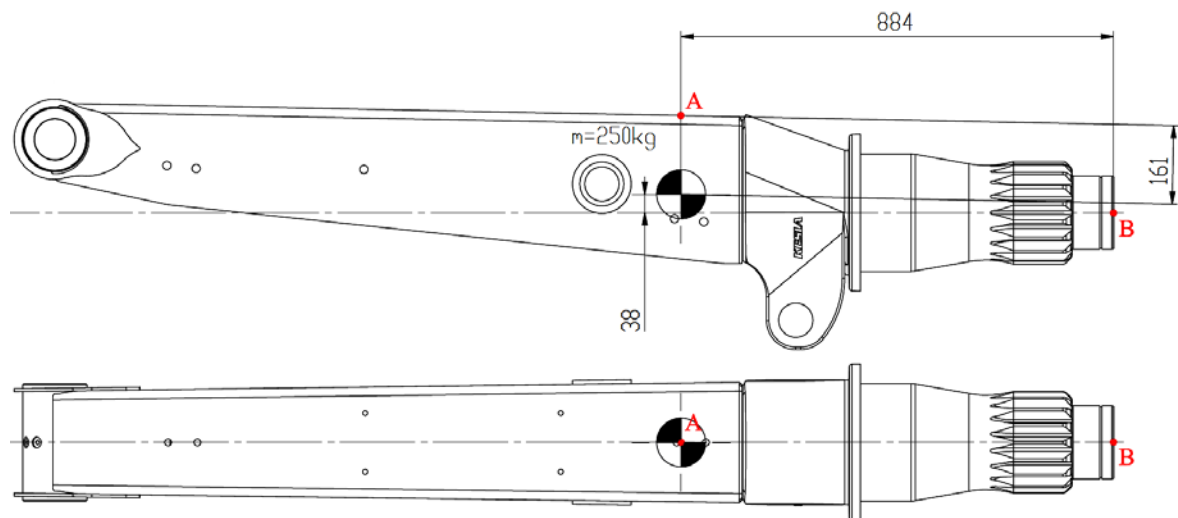
Hitsattavat kappaleet silloitetaan ennen robottihitsausta. Kun kappaleiden käsittely suoritetaan robotilla ja kappaleet ovat silloitettuja, ei kappaleenkäsittelyssä enää tarvita erillisiä kiinnittimiä. Tällöin voidaan puhua kiinnittimettömästä hitsauksesta. Kiinnittimettömän hitsauksen etuna on, että kiinnittimiä ei tarvitse valmistaa jokaiselle erilaiselle hitsattavalle kappaleelle. Kiinnittimettömällä hitsauksella säästetään hitsauskiinnittimien suunnittelusta, materiaaleista ja valmistuksesta aiheutuvat kustannukset. Hitsauskiinnittimet alentaisivat käytettävän robotin hyötykuormaa ja eri kappaleille valmistetut hitsauskiinnittimet vievät paljon varastotilaa.

Hitsauksen kappaleenkäsittelyä varten kappaleen kiinnityskohtaa valittaessa tulee huomioida muutamia seikkoja. Kiinnityskohdan tulee sijaita sellaisessa kohtaa kappaletta, että kappale voidaan hitsata yhdellä kiinnityksellä valmiiksi. Tällöin kiinnityksen tulee sijaita kohdassa, jonka taakse ei jää hitsattavia railoja piiloon eikä robotti tai tarrain ole hitsauspolttimen liikeradan tiellä. Kiinnityskohdan tulee sijaita myös riittävän lähellä kappaleen painopistettä, jotta robotin ranne ja käytettävä tarrain kestävät kappaleen massasta aiheutuvan painovoiman ja vääntömomentin.

Kääntöpylvään ja kääntölaitteen rungon painopisteet määriteltiin kappaleiden 3D-malleista ja painopisteiden etäisyydet kiinnityskohtavaihtoehtoihin SolidWorks 3D-suunnitteluohjelmiston avulla. Kuvassa 30 on esitetty pylvään mahdolliset kiinnityskohdat kappaleenkäsittelyä varten ja kiinnityskohtien etäisyydet pylvään painopisteestä. Piste A sijaitsee pylvään selässä. Sen läheisyydessä ei ole muita hitsejä kuin kotelon ja hammasakselin liittävä juurituettu päittäishitsi sekä läpivientien vahvikkeiden pienahitsit. Piste A on erittäin lähellä pylvään painopistettä (161 mm), joten siitä aiheutuva vääntömomentti robotin ranteeseen jää oletettavasti hyvin pieneksi.

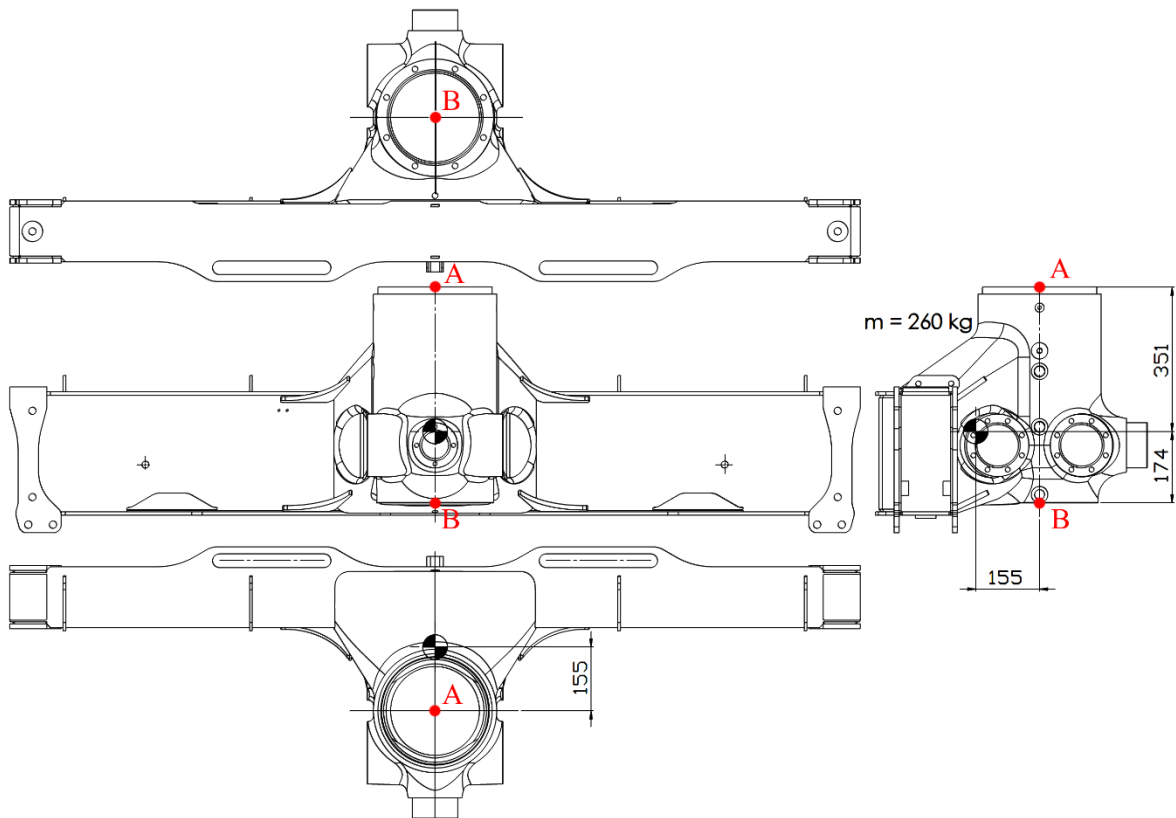
Pylvään toinen kiinnityskohtavaihtoehto on hammasakselin päässä sijaitseva piste B. Hammasakselin pää on koneistettu mittatarkka kohta, josta kappale saataisiin tarkasti asemoitua robotilla hammasakselin suhteen. Piste B olisi hitsauksen kannalta erittäin suotuisa kiinnityskohta, sillä pylväs pystyttäisiin hitsaamaan lähes kokonaan vain robotin

rannelaippaa pyörittämällä. Tällä hetkellä ainoa vaikeasti hitsattava kohta olisi pylvään päässä sijaitsevan holkin ja korvakkeiden hitsaus. Niiden muuttaminen yhdeksi valukappaleeksi helpottaisi pylvään hitsausta huomattavasti. Ongelmaksi kiinnityskohta B:ssä voi muodostua sen etäisyys painopisteestä (884 mm), sillä robotin ranteen vääntömomentinkesto on rajallinen.



Kuva 30. Pylvään kiinnityskohtavaihtoehdot A ja B sekä niiden etäisyydet painopisteestä.

Kuvassa 31 on esitetty kääntölaitteen kiinnityskohtavaihtoehdot A ja B sekä niiden etäisyydet kääntölaitteen painopisteestä. Kääntölaitteessa ainoaksi mahdolliseksi kiinnityskohdaksi osoittautui kääntölaitteen rungon valukappale. Jos kiinnitys tapahtuisi tukijalkapalkin levyosista, olisi kiinnitys aina hitsauksen edessä ja kappale jouduttaisiin kiinnittämään kahdesta eri kohdasta. Kiinnityskohtavaihtoehdoiksi valikoitui valukappaleen ylä- ja alapuolella olevat aukot.

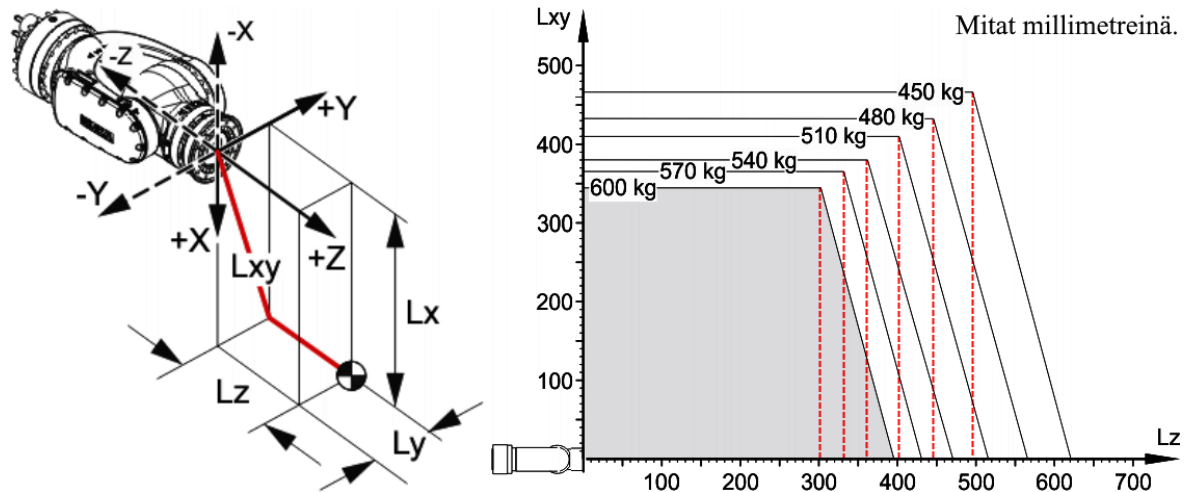


Kuva 31. Kääntölaitteen rungon kiinnityskohtavaihtoehdot A ja B sekä niiden etäisyydet painopisteestä.

Nivelvarsiroboteissa heikoin kohta on sen käsivarren kaksi viimeistä vapausastetta eli robotin ranne. Teollisuusrobotin kilogrammoina ilmoitettu hyötykuorma on suuntaa antava luku sen todellisesta kappaleenkäsittelykyvystä. Tärkeämpää on kuitenkin huomioida millaista vääntömomenttia robotin rannetta liikuttavat sähkömoottorit kestävät, että ne kykenevät vaivattomasti liikuttamaan ranteeseen kiinnitettyä kuormaa. Kappaleen kiinnityskohtaa suunniteltaessa on erittäin tärkeää selvittää kappaleenkäsittelyrobotin ranteen suurin sallittu vääntömomentti.

Tässä työssä vertailuarvona käytetään KUKA AG:n valmistaman KR 600 nivelvarsirobotin ranteen suurinta sallittua vääntömomenttia. Kyseisen robotin suurin sallittu vääntömomentti valittiin vertailuarvoksi, koska se on yhden Keslalle tehdyn järjestelmätarjouksen kappaleenkäsittelyrobotti. KR 600 nivelvarsirobotti on kuusi vapausastetta omaava teollisuusrobotti, joka on tarkoitettu kappaleiden ja työkalujen käsittelyyn. Sen suurin ulottuvuus on 2826 mm ja ilmoitettu teoreettinen maksimihyötykuorma on 600 kg. (KUKA 2016, s. 9, 16.) KR 600 robotin rannelaippaan

kohdistuva suurin sallittu vääntömomenti määriteltiin käyttämällä robotin tuoteselosteesta löytyvää ranteen kuormituskuvaajaa (kuva 32).



Kuva 32. KUKA KR 600 nivelvarsirobotin ranteen kuormitusakselit ja -kuvaaja (mukaillen: KUKA 2016, s. 20).

Kuormituskuvaajasta saatujen arvojen perusteella määritettiin KR 600 nivelvarsirobotin suurin sallittu rannelaippaan kohdistuva vääntömomenti. Kuvaajassa esiintyvät massat ja massojen etäisyydet rannelaipasta taulukoitiin. Taulukoitujen arvojen perusteella laskettiin robotin rannelaipan XY- ja Z-akselien suuntaiset vääntömomentin maksimi-arvot. L_z ja L_{xy} mitat, massat ja lasketut vääntömomentit on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. KUKA KR 600 nivelvarsirobotin ranteen XY- ja Z-akselien suurimmat sallitut taivutusmomentit eri massoilla (KUKA 2016, s. 20).

| L_z [mm] | L_{xy} [mm] | m [kg] | M_z [Nm] | M_{xy} [Nm] |
|------------|---------------|----------|-------------|---------------|
| 300 | 345 | 600 | 1766 | 2031 |
| 330 | 365 | 570 | 1845 | 2041 |
| 360 | 380 | 540 | 1907 | 2013 |
| 400 | 410 | 510 | 2001 | 2051 |
| 445 | 430 | 480 | 2095 | 2025 |
| 495 | 465 | 450 | 2185 | 2053 |

Taulukkoon 2 laskettujen vääntömomenttiarvojen perusteella voidaan KUKA KR 600 nivelvarsirobotin rannelaippaan suurimmaksi sallituksi vääntömomentiksi määritellä 1766 Nm. Taulukon vääntömomenttiarvoista valittiin pienin varmistamaan, että robotin ranne

kestää sille asetetut kuormitukset jokaiseen XYZ-koordinaatiston suuntaan millä tahansa painopisteen etäisyydellä. Kappaleiden kiinnityskohdat ja robottitarrain tulee valita siis siten, että liikuteltavasta kappaleesta ja valittavasta tarrainjärjestelmästä aiheutuvat rannelaippaan kohdistuvat vääntömomentit ovat alle 1766 Nm.

Kappaleenkäsittelyrobotilla liikuteltavaan kappaleeseen ei aiheudu hitsauksesta merkittäviä ulkoisia voimia. Ainoa voima, joka kappaleeseen kohdistuu, on kappaleen massasta aiheutuva painovoima. Liikuteltavaan kappaleeseen vaikuttavan painovoiman F suuruus saadaan laskettua yhtälöllä:

$$F = mg \quad (1)$$

Yhtälössä 1 m on kappaleen massa ja g on kappaleeseen vaikuttava putoamiskiihtyvyys. Kappaleisiin vaikuttava painovoima aiheuttaa liikuteltavan kappaleen kiinnityskohtaan vääntömomentin. Kappaleiden kiinnityskohtaan vaikuttavan momentin vektori \mathbf{M} saadaan selville yhtälöstä:

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} \quad (2)$$

Yhtälössä 2 \mathbf{r} on kappaleen kiinnityskohdan ja voiman vaikutuspisteen välinen vektori ja \mathbf{F} voiman vektori. Kappaleenkäsittelyrobotin rannelaippaan vaikuttava momentti on suurimmillaan rannelaipan ollessa kohtisuoraan maan pintaan nähden, jolloin putoamiskiihtyvyydestä liikuteltavaan kappaleeseen vaikuttava painovoiman etäisyys rannelaippaan on suurin. Painovoiman suunta on aina kohtisuorassa maan pintaan nähden. Tällöin kappaleen kiinnityskohdan ja voiman vaikutuspisteen välinen vektori \mathbf{r} ja voiman vektori \mathbf{F} ovat kohtisuorassa toisiinsa, jolloin kiinnityskohdan momentin yhtälö M voidaan esittää skalaarimuodossa:

$$M = Fr \quad (3)$$

Yhtälössä 3 F on kappaleeseen vaikuttava voima ja r voiman etäisyys kappaleen kiinnityskohdasta.

Kiinnityspistekohtaiset laskut on suoritettu liitteessä IV. Laskuista saadut tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kappaleiden kiinnityskohtiin vaikuttavat vääntömomentit.

| Kääntölaite | | Pylväs | |
|----------------------------|--------|-----------|---------|
| Vääntömomentit pisteessä A | | | |
| M_{Axy} | 395 Nm | M_{Axy} | 0 Nm |
| M_{Az} | 898 Nm | M_{Az} | 395 Nm |
| Vääntömomentit pisteessä B | | | |
| M_{Bxy} | 395 Nm | M_{Bxy} | 93 Nm |
| M_{Bz} | 444 Nm | M_{Bz} | 2168 Nm |

Pylvään kiinnitys kappaleenkäsittelyä varten haluttiin alun perin tehdä pylvään hammasakselin päästä. Hammasakseli on koneistettuna osana mittatarkka ja hammasakselin sekä akseliholkin mukaan paikoitetaan silloittaessa muut pylvään osat. Vääntömomenttilaskujen perusteella kappaleen painopiste jää liian kauas robotin rannelaipasta ja tästä aiheutuvaa momenttia robotin ranne ei kestäisi edes ilman tarrainta.

Toinen vaihtoehto pylvään kappaleenkäsittelyn kiinnityskohdaksi oli pylvään selässä sijaitseva piste A. Pylvään selkäpuolelta kiinnitettynä kappale pystytään hitsaamaan helposti siten, että robottitarrain ei ole hitsauspolttimen tiellä. Kiinnityskohta on myös lähellä painopistettä, jolloin painovoimasta aiheutuvat vääntömomentit robotin ranteeseen ovat alhaisia. Pylvään kappaleenkäsittelyn kiinnityskohdaksi valitaan piste A.

Kääntölaitteen kiinnityksessä kiinnityskohtavaihtoehdot olivat kääntölaitteen rungon valuosassa. Tukijalkapalkin rakenteesta johtuen tarrain olisi tukijalkapalkin levyosista kiinnitettynä hitsauksen edessä tai painopiste jäisi kauas. Kääntölaitteen kiinnitys valusta voidaan suorittaa joko yläosasta tai alaosasta. Molemmista kohdista aiheutuva vääntömomentit jäävät niin alhaisiksi, että kiinnitys olisi mahdollista kummasta tahansa. Kiinnityskohdaksi päätettiin valita kuitenkin piste B, koska se on noin 180 mm lähempänä rungon painopistettä.

Taulukossa 3 esitellyt arvot eivät kuitenkaan määritä lopullista robotin ranteeseen kohdistuvaa vääntömomenttia. Kappaleen ja rannelaipan väliin tuleva tarrain siirtää

kappaleen painopistettä kauemmaksi rannelaipasta aiheuttaen suuremman vääntömomentin. Etäisyyden kasvun lisäksi valitun tarrainjärjestelmän massa pienentää robotin hyötykuormaa. Robotin rannelaippaan kohdistuva vääntömomentti on määriteltävä uudelleen tarraimen valitsemisen jälkeen. Voidaan kuitenkin todeta, että kääntölaite aiheuttaa robotin ranteelle suuremman rasituksen. Tulevissa laskuissa tullaan siis käyttämään kääntölaitteen rungon massaa ja sen valitun kiinnityskohdan arvoja.

8 TARRAIMEN VALINTA

Tarraimen valinnan lähtökohtana oli, että kappaleenkäsittelyrobotin tarrainta ei suunnitella itse ja että se tullaan valitsemaan kaupallisista tarraimista tai komponenteista. Kuivasen (1999, s. 65) mukaan yleisiä toivomuksia robottitarraimelle ovat ”yksinkertainen rakenne, pieni koko ja paino, luotettava tartunta, tartuttavien kappaleiden keskitys ja perustilassa kiinni oleva tarrain.” Kun valitaan käyttökohteeseen sopivaa robottitarrainta, on otettava huomioon koko tuotantojärjestelmän automatisointitehtävät. Vaikka tarrain on pieni osa koko järjestelmää, sillä on suuri merkitys kappaleenkäsittelyn toimivuuden kannalta. (Kuivanen 1999, s. 64.)

Joustava hitsausyksikkö ja miehittämätön hitsaustuotanto asettavat käytettävälle kappaleenkäsittelyrobotin tarraimelle tiettyjä vaatimuksia:

- Luotettavuus/turvallisuus
 - Tartunta ja irrotus on voitava varmistaa järjestelmälle (kappale on kiinnitetty/irrotettu)
 - Tartunta oltava turvallinen kaikissa tilanteissa (kappale ei saa irrota energiakatkoksesta)
- Mekaaniset ominaisuudet
 - Tarraimen oltava riittävän vahva (kestää voimia/vääntöä joka suuntaan)
 - Kestettävä riittävän suurta lämpötilaa (hitsauksesta aiheutuva lämpö)
- Tarkkuus
 - Tarraimen oltava riittävän tarkka (tartunnan onnistuttava samasta kohtaa kappaletta)
- Modulaarisuus/joustavuus
 - Tarraimen oltava riittävän joustava (tarraa moneen eri kappaleeseen)
 - Sallittava pieniä heittoja kappaleen paikoituksessa
- Soveltuvuus hitsaukseen
 - Ei saa olla kappaleessa hitsien tiellä/mahdollisuus hitsata viideltä sivulta
 - Hitsaus ilman hitsauskiinnittimiä (valmiiksi silloitushitsattu kappale)
 - Mahdollistaa hitsausmaadoituksen tarraimen lävitse (ilman erillistä maadoitusta)

- Pieni vääntömomentti
 - Tarraimen oltava mahdollisimman lähellä robotin laippaa
 - Tarraimen oltava mahdollisimman kevyt (robotin hyötykuorma säilyy).

8.1 Arvoanalyysi

Tässä työssä joustavan robottihitsausyksikön kappaleenkäsittelyrobotin tarraimen valinnan työkaluna käytetään arvoanalyysiä. Arvoanalyysi on systemaattisen tuotesuunnittelun työkalu, jota käytetään tuotteiden tai palveluiden parantamiseen. Työkalun alkuperäinen tarkoitus on vähentää olemassa olevan tuotteen kustannuksia tai parantaa sen ominaisuuksia. Näin tuotteelle tai palvelulle saadaan asiakkaan kannalta luotua lisäarvoa ja parannettua sen kilpailukykyä. Arvoanalyysillä lisäarvoa tuotetaan valitsemalla optimaalisia valmistusmenetelmiä ja materiaaleja sekä kehittämällä tuotteen rakenteita. Käyttökohteet arvoanalyysille ovat erittäin monipuoliset ja sitä voidaan käyttää työkaluna esimerkiksi uusien tuotteiden suunnittelussa tai uuden tuotteen materiaalin valinnassa. (Meskanen 2009, s. 5; Rich & Holweg 2000, s. 2-3.) Arvoanalyysi koostuu useasta eri vaiheesta, joissa käytetään analyyttistä eli erittelevää ja synteettistä eli luovaa ajattelua. Arvoanalyysin vaiheita Rich & Holwegin (2000, s. 12) mukaan ovat:

1. tuotteen tai palvelun valitseminen
2. tuotteen toimintojen määrittely
3. vaihtoehtojen ideointi
4. vaihtoehtojen analysointi ja arviointi
5. toteutus.

Meskanen (2009, s. 6) mukaan arvoanalyysin peruskäsite on arvo, joka voidaan matemaattisella yhtälöllä määritellä seuraavasti:

$$Arvo = Toiminto / Kustannus \quad (4)$$

Yhtälössä 4 *Toiminto* tarkoittaa tuotteen tai palvelun jotakin ominaisuutta ja *Kustannus* toiminnon saavuttamisesta aiheutuvia kuluja. Kustannukset voivat koostua hankinta-, valmistus- ja varastointikustannuksista. Yhtälön mukaan tuotteen arvo paranee mikäli toimintoa eli tuotteen ominaisuutta parannetaan tai tuotteen kustannuksia saadaan vähennettyä. (Meskanen 2009, s. 6; Rich & Holweg 2000, s. 3-4.)

Arvoanalyysia varten valittavat toiminnot saadaan selville analysoimalla tuotetta ja keräämällä tuotteesta informaatiota. Samanaikaisesti tulee selvittää pyritäänkö arvoanalyysillä kustannusten vähentämiseen, toimintojen kehittämiseen vai molempiin. Toiminnolla arvoanalyysissä tarkoitetaan tuotteen ominaisuutta, joka tekee tuotteesta tarkoituksenmukaisen käytettävään kohteeseen. Kysymyksellä ”Mitä se tekee?” aloitetaan tuotteen toimintojen selvittäminen. Kaikkien toimintojen selvittämiseksi kysymykseen tulee vastata vain kahdella sanalla: verbillä ja substantiivilla. Tällöin tuotteen toiminnot saadaan esitettyä mahdollisimman selkeästi. Toiminnot jaetaan perustoimintoihin ja sivutoimintoihin. Perustoiminto on tuotteelle oleellinen toiminto, jota varten tuotetta käytetään. Kaikki muut toiminnot ovat sivutoimintoja, jotka parantavat tuotteen ominaisuuksia, mutta eivät ole perustoiminnon ohella täysin välttämättömiä. Uuden tuotteen suunnittelussa tai materiaalin valinnassa toiminnot voidaan määritellä esimerkiksi asiakkaan toiveiden tai käyttökohteen vaatimusten perusteella. (Meskanen 2009, s. 7; Rich & Holweg 2000, s. 19.)

Kun tuotteen toiminnot ovat selvillä, niitä tulee verrata keskenään. Jokaista toimintoa vertaillaan keskenään ja päätetään, kumpi toiminnoista on tuotteelle tärkeämpi. Toiminnot eivät koskaan ole tasavertaisia eli aina toinen vertailtavista toiminnoista on tärkeämpi. Näin toiminnot pisteytetään vertailuvoittojen perusteella ja tulokseksi saadaan arvio toimintojen tärkeydestä. Toimintojen tärkeyttä kuvaa niille pisteytyksestä muodostetut painoluku. Toimintoja voidaan vertailla esimerkiksi taulukoinnin avulla. Vertailussa tyypillisesti ilmenee yksi tai kaksi toimintoa, jotka ovat selkeästi muita tärkeämpiä. (Rich & Holweg 2000, s. 20.)

Tuotteen perustoiminnon perusteella arvoanalyysin ideointivaiheessa pyritään määrittelemään kaikki mahdolliset vaihtoehdot toiminnon suorittamiseen. Tällöin pyritään vastaamaan kysymykseen: ”Millä eri tavoilla tämä toiminto voidaan toteuttaa?” Ideointivaiheessa pyritään tuomaan esille kaikki mahdolliset ajatukset ja vaihtoehdot, jotka voisivat toimia perustoiminnon mukaan. Ideointivaiheesta saatuja vaihtoehtoja arvioidaan sillä perusteella, miten hyvin ne toteuttavat tuotteelta vaadittuja toimintoja. Tässä vaiheessa otetaan huomioon vain sivutoiminnot, koska kaikkien vaihtoehtojen täytyy lähtökohtaisesti pystyä toteuttamaan päätoiminto. (Meskanen 2009, s. 7; Rich & Holweg 2000, s. 21-22.)

Jokaiselle toiminnolle voidaan tehdä toiminto-kustannus-analyysi, jossa määritellään toimintojen kustannus ja arvokkuus. Valmiin tuotteen valmistuskustannukset voidaan jakaa jokaista toimintoa kohden olettamalla niiden osuus kokonaiskustannuksesta. Toiminnon arvokkuus määritellään arvioimalla pienin mahdollinen kustannus sen saavuttamiseksi. Toiminnon oletetun kustannuksen ja arvokkuuden lukuarvojen erotuksesta voidaan päätellä kyseisen toiminnon arvopotentiaali. (Rich & Holweg 2000, s. 22.)

Toimintojen arvopotentiaalien määrittelyjen perusteella arvioidaan, mitä toiminnon tuottavalla rakenteella tai osalla tehdään. Rakenne tai osa voidaan eliminoida kokonaan tuotteesta pois, jos se ei lisää arvoa tai se ei ole olennainen tuotteen toiminnan kannalta. Vaihtoehtoisesti rakenne voidaan korvata tai sitä voidaan parannella. Tällöin rakennetta parantelemalla saadaan alennettua tuotteen kustannuksia. (Rich & Holweg 2000, s. 22-23.)

Arvoanalyysin perusteella tyypillisesti valitaan ratkaisuvaihtoehdot, jotka saavuttavat suurimmat arvot yhtälön 4 mukaisesti. Kustannusanalyysi voidaan tietyissä tapauksissa jättää pois, jolloin keskitytään pelkkään toimintoanalyysiin. Toimintoanalyysiin perustuen valinta tehdään ratkaisuvaihtoehdoille, jotka toteuttavat parhaiten tuotteelta vaaditut ominaisuudet. Tätä menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi suunnitteluvaihtoehtojen arvioinnissa.

8.2 Tarraimen valinta

Tarraimen valintaan liittyvää arvoanalyysiä varten täytyy määrittää tarraimen toiminnot. Kappaleenkäsittelyrobotin tarraimen päätoiminto on tarrata liikuteltaviin kappaleisiin. Tarraimelta halutut sivutoiminnot on määritelty luvussa 8 esitelyjen joustavan hitsaussolun ja miehittämättömän tuotannon asettamien vaatimusten perusteella. Tarraimen päätoiminto ja halutut sivutoiminnot lyhenteineen on lueteltu seuraavassa:

- päätoiminto
 - o tarraa kappaleisiin
- sivutoiminnot
 - o tarraa monipuolisesti TM
 - o johtaa maadoituksen JM
 - o kestää kuormituksen KK
 - o kestää lämpörasituksen KL

- säilyttää hyötykuorman SH
- asemoi kappaleen AK
- vikaantuu turvallisesti VT
- varmistaa kiinnityksen VK

Tarraimen sivutoiminnoille on määritelty lyhenteet niiden taulukoinnin helpottamiseksi. Kaikkia sivutoimintoja verrataan keskenään toisiinsa ja toiminnoille määritetään painoluvut sen mukaan, kumpi toiminnoista on kappaleenkäsittelyn kannalta tärkeämpi. Lopullinen sivutoiminnon painoluku määritellään laskemalla kunkin toiminnon taulukossa esiintyvä lukumäärä. Taulukossa 4 on määritelty sivutoimintojen painoluvut.

Taulukko 4. Tarraimen sivutoimintojen painottaminen.

| - | TM | JM | KK | KL | SH | AK | VT | VK | Painoluku |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|
| TM | TM | TM | KK | TM | TM | TM | VT | TM | 11 |
| JM | TM | JM | KK | KL | SH | AK | VT | VK | 1 |
| KK | KK | KK | KK | KK | KK | KK | VT | KK | 13 |
| KL | TM | KL | KK | KL | SH | AK | VT | VK | 3 |
| SH | TM | SH | KK | SH | SH | SH | VT | VK | 7 |
| AK | TM | AK | KK | AK | SH | AK | VT | VK | 5 |
| VT | VT | VT | VT | VT | VT | VT | VT | VT | 15 |
| VK | TM | VK | KK | VK | VK | VK | VT | VK | 9 |
| Yhteensä | | | | | | | | | 64 |

Luvussa 5 esitellyt tarrainvaihtoehdot arvostellaan arvosanoin 0–5 sivutoimintojen osalta. Päätoimintoa ei arvostella erikseen, sillä se on olennainen toiminto jokaiselle tarrainvaihtoehdolle. Arvosteltavat tarraintyypit on listattu seuraavaan:

- a. Mekaaniset tarraimet
- b. Alipainetarraimet
- c. Kestomagneettitarraimet
- d. Sähkömagneettitarraimet
- e. Nollapistekiinnittimet

Jokainen tarraintyyppi arvostellaan sivutoiminto kerrallaan. Tarraimille annetaan arvosana sen mukaan, kuinka hyvin kyseessä oleva tarrain soveltuu eri sivutoimintoihin. Sivutoiminnot ja tarraimien arvosanat on listattu seuraavaan:

- a) Tarraa monipuolisesti (TM), määritellään miten montaa erilaista kappaletta tarrain voi käsitellä
 - a. Rajallisesti → arvosana: 3
 - b. Tasomaiset kappaleet → arvosana: 1
 - c. Tasot ja akselit → arvosana: 2
 - d. Tasot ja akselit → arvosana: 2
 - e. Kappaleet, joihin vetotapin saa kiinni → arvosana: 4
- b) Johtaa maadoituksen (JM), pystyykö tarrain johtamaan hitsausmaadoituksen suoraan tarrattavaan kappaleeseen
 - a. Tarrainleukojen välityksellä → arvosana: 5
 - b. Erillinen maadoitus → arvosana: 0
 - c. Kestomagneetin rungon välityksellä → arvosana: 5
 - d. Sähkömagneetin rungon välityksellä → arvosana: 5
 - e. Nollapistesylinterin rungon välityksellä → arvosana: 5
- c) Kestää kuormitukset (KK), tarrain kestää eri asennoissa kappaleista aiheutuvat voimat ja momentit rikkoutumatta tai irrottamatta kappaletta
 - a. Kestää hyvin voimia muotosulkeisena, tarrainleukojen momentinkesto rajallinen ($< 600 \text{ Nm}$) → arvosana: 3
 - b. Kestää kohtisuoria voimia, ei momenttia → arvosana: 1
 - c. Kestää kohtisuoria voimia, ei momenttia → arvosana: 1
 - d. Kestää kohtisuoria voimia, ei momenttia → arvosana: 1
 - e. Kestää voimia joka suuntaan, momentti verrannollinen kiinnipitovoimaan → arvosana: 4
- d) Kestää lämpörasitukset (KL), kestää hitsauksesta aiheutuvan kappaleen lämpötilan kohoamisen
 - a. riippuen tiivisteistä jopa 150 °C saakka → arvosana: 2
 - b. riippuen imukuppien/-tyynyjen materiaalista jopa 300 °C → arvosana: 3
 - c. riippuen kestopimanttien materiaalista jopa 450 °C → arvosana: 4
 - d. käyttölämpötila korkeintaan 80 °C → arvosana: 1 (zimmer catalog)
 - e. riippuen nollapistesylinterin tiivisteistä jopa 300 °C → arvosana: 3

- e) Säilyttää hyötykuorman (SH), tarrain ei heikennä robotin hyötykuormaa
- Massa 30-40 kg → arvosana: 2
 - Massa 25-30 kg → arvosana: 3
 - Massa ~20-30 kg → arvosana: 3
 - Massa ~20-30 kg → arvosana: 3
 - Massa < 15 kg → arvosana: 4
- f) Asemoi kappaleen (AK), asemoi liikuteltavan kappaleen robotin rannelaipan suhteen
- Keskittää leukojen väliin → arvosana: 3
 - Vain etäisyys laipasta → arvosana: 1
 - Vain etäisyys laipasta → arvosana: 1
 - Vain etäisyys laipasta → arvosana: 1
 - Tarkka nollapiste → arvosana: 5
- g) Vikaantuu turvallisesti (VT), ei irrota kappaletta energiakatkoksesta tai muussa tilanteessa
- Voidaan varmistaa esimerkiksi paineakulla → arvosana: 4
 - Voidaan varmistaa esimerkiksi alipainesäiliöllä ja takaiskuventtiilillä → arvosana: 4
 - Kestomagneetti pitää → arvosana: 5
 - Virtaa voidaan ylläpitää akuilla → arvosana: 4
 - Jousilukitteinen, ei irtoa ilman käyttövoimaa → arvosana: 5
- h) Varmistaa kiinnityksen (VK), kiinnityksen onnistuminen voidaan varmistaa
- Tunnistaa tarrainleukojen asento esimerkiksi lähestymisantureilla → arvosana: 3
 - Varmistetaan paineanturilla tyhjiön onnistuminen → arvosana: 4
 - Ei voida varmistaa → arvosana: 0
 - Ei voida varmistaa → arvosana: 0
 - Paineilma- tai hydraulitoiminen vetotapin lukituksen tunnistus → arvosana: 4

(AMF 2015, s. 52-53, 76; Destaco 2016, s. 2; Kuivanen 1999, s. 71; Monkman et al. 2007, s. 170, 176, 206, 215; Sariola 2017; Schmalz 2016, s. 393, 587, 636, 654; Schunk 2015, s. 281, 406-407, 1570; Zimmer Group 2017, s. 130, 513.)

Tarraimille annettujen arvosanojen ja sivutoimintojen painolukujen perusteella voidaan arvioida tarrainvaihtoehtojen soveltuvuutta joustavan hitsaussolun miehittämättömään kappaleenkäsittelyyn. Taulukkoon 5 on määritelty tarrainkohtaisesti jokaisen sivutoiminnon määrittämä vertailuluku. Vertailuluku määrittää sivutoiminnon painolukujen ja tarraimelle annetun arvosanan tulona.

*Taulukko 5. Tarraimien vertailu painoarvojen perusteella (toiminnon painoluku*tarraimen arvosana).*

| - | a. | b. | c. | d. | e. |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| TM | 22 | 33 | 33 | 33 | 44 |
| JM | 5 | 0 | 5 | 5 | 5 |
| KK | 39 | 13 | 13 | 13 | 52 |
| KL | 6 | 9 | 12 | 3 | 9 |
| SH | 14 | 21 | 21 | 21 | 28 |
| AK | 15 | 5 | 5 | 5 | 25 |
| VT | 60 | 60 | 75 | 60 | 75 |
| VK | 27 | 36 | 0 | 0 | 36 |
| Yht. | 188 | 177 | 164 | 140 | 274 |

Kuten taulukosta 5 nähdään, nollapistekiinnitin osoittautui ylivoimaisesti parhaimmaksi tarrainvaihtoehdoksi joustavaan miehittämättömään robottihitsaussoluun. Tarraimen valinnassa ei otettu huomioon tarraimista aiheutuvia kustannuksia, sillä niiden ei koettu olevan olennainen osa kappaleenkäsittelyn onnistumisen kannalta. Tarraimelle halutut ominaisuudet ja sen suoriutuminen eri toiminnoista koettiin tärkeämmiksi arvoa tuovaksi asioiksi.

8.3 Nollapistekiinnitin tarraimena

Nollapistekiinnittimiä on tietävästi käytetty robottitarraimena koneistuspalettien käsittelyyn (kuva 33). Koneistuspaletteihin on kiinnitetty vähintään yksi vetotappi ja yksi indeksointitappi. Robotti lähestyy hyllyillä olevia tarkasti paikoitettuja paletteja nollapistesyylinteri paineistettuna. Kun nollapistesyylinteri on oikeassa kohdassa, päästetään nollapistesyylinteristä paineet pois ja vetotappi lukittuu sylinteriin. Robotti kuljettaa paletin nollapistekiinnittimillä varustellun työstökoneen pöydälle ja paineistaa nollapistesyylinterin

irrotaakseen paletin. Robotin ohjausyksikkö ohjaa nollapistesylinlerin käyttövoimaa. (AMF 2017, 73; Big Kaiser 2016, s. 137; System 3R 2015, s. 9.)



Kuva 33. Nollapistekiinnitin robotin tarraimena työstökoneen paletinvaihtajana (AMF 2017, s. 74).

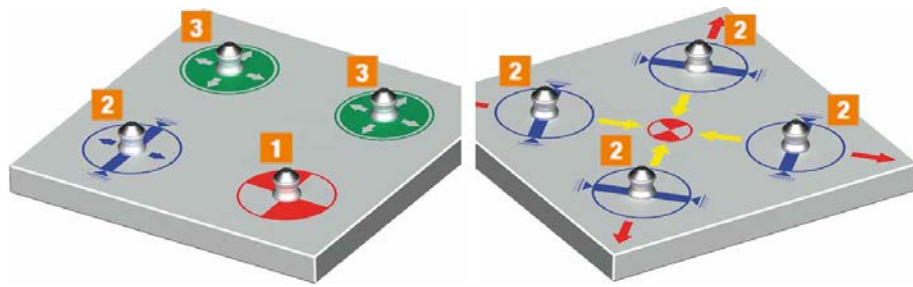
Käsi­käyt­toisten ja automaatio­sovelluksiin tarkoitettujen nollapistekiinnittimien erona on automaattijärjestelmissä tarvittavat lisäominaisuudet, kuten lukituksen tai vetotapin sijainnin anturointi ja sylinterin paineilmapuhdistus. Anturointi ja automaattinen puhdistusjärjestelmä mahdollistavat nollapistekiinnittimien käytön miehittämättömässä tuotannossa. Sylinterin lukituksen anturointi toimii joko pneumaattikan, hydraulikan tai elektronisen anturin avulla. Pneumaattista anturointia varten sylinterissä on paineilman­kanavat puhdistukselle ja anturoinnille. Kun lukitus on auki, paineilma pääsee virtaamaan vapaasti sylinteristä ulos. Lukittaessa kiinnitettävä paletti tai kappale ja vetotappi sulkevat ilman­kanavat muodostaen paineilmalinjaan vastapaineen. Paineilmalinjassa oleva anturi havaitsee vastapaineen ja ilmoittaa järjestelmälle lukituksen onnistumisesta. Hydraulisessa lukituksen anturoinnissa nollapistesylinlerin sisällä on kanava vapaasti virtaavalle hydraulioöljylle ja lukitusmäntään integroitu sulkuventtiili. Kun sylinterin lukitus avataan, lukitusmäntän sulkuventtiili katkaisee hydraulioöljyn virtauksen. Hydraulikkalinjassa oleva virtausmittari havaitsee keskeytyneen virtauksen, jolloin järjestelmä tietää lukituksen olevan auki. (AMF 2014, s. 52-53, 62-64; Linker 2017; Vischer & Bolli 2014, s. 18; ZeroClamp 2017, s. 21.)

Sähkömagneettiseen induktioon perustuvassa anturoinnissa sylinterin sisään on asennettu induktiivinen anturi. Anturi tunnistaa lukitusmännän asennon ja järjestelmä saa tiedon onko nollapistesylinteri lukittu vai avoin. (AMF 2014, s. 53; Linker 2017.) Esimerkiksi ZeroClamp:n valmistaman nollapistesylinterin pohjassa on kaksi reikää anturointia varten. Kiinnittimen käyttäjä voi esimerkiksi asentaa sylinterin pohjaan elektronisen painokytkimen, jonka avulla järjestelmälle saadaan tieto nollapistesylinterin lukituksen asennosta. (ZeroClamp 2017, s. 22.) Elektronisia antureita ei suositella käytettäväksi hitsaussovelluksissa varsinkaan, jos hitsausmaadoitus johdetaan hitsattavaan kappaleeseen nollapistesylinterin lävitse (Sariola 2017).

Vetotapin sijainnin anturointi voidaan tehdä pneumaattisesti tai hydraulisesti. Pneumaattinen ja hydraulinen vetotapin anturointi perustuu samantyylliseen järjestelmään kuin lukituksen anturointi. Tällöin sylinterin pohjalla on vetotappia sisään ohjaava ohjaustappi. Ohjaustappiin on integroitu sulkuventtiili, joka estää pneumaattisen tai hydraulisen virtauksen vetotapin ollessa sylinterin pohjassa. Virtausmittarin tai paine-erokytkimen avulla järjestelmä saa tiedon, että vetotappi on pohjassa ja nollapistesylinteri on valmis lukittavaksi. (AMF 2014, s. 52-53, 62-64; Linker 2017; Vischer & Bolli 2014, s. 18.)

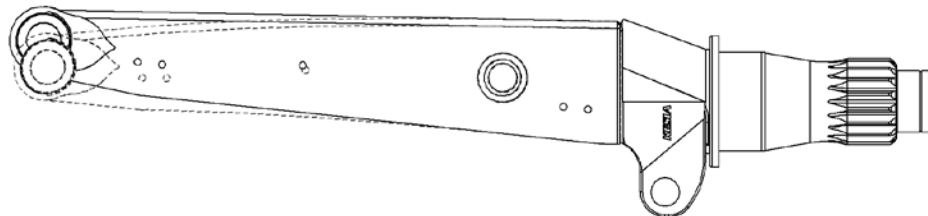
8.4 Hitsausmuodonmuutosten vaikutus nollapistetarraimen toimintaan

Tyypillisesti nollapistekiinnittimiä käytetään kappaleen kiinnityksessä useampaa kuin yhtä, johtuen suurista lastuamisvoimista. Tällöin keskittävän vetotapin lisäksi on oltava vähintään yksi linjaava tappi. Kun esimerkiksi neljän kiinnittimen systeemiin tuodaan lämpöä, keskittävää vetotappia käytettäessä kiinnityksen nollakohta pysyy aina keskittävän tapin kohdalla ja muut tapit antavat myöden. Kappaleen keskikohta pääsee siis tuodun lämmön myötä elämään ja esimerkiksi koneistettaessa pyöreistä muodoista voikin kärjistetyksi tulla soikeita. Kappaleen keskikohdan elämistä voidaan kompensoida käyttämällä kiinnityksessä vain linjaavia vetotappeja. Tällöin kiinnityksen nollakohta saadaan keskelle kappaletta. Kun kaikki vetotapit antavat periksi, nollakohta pysyy kappaleen keskellä lämmöntuonnista huolimatta. Kuvassa 34 on havainnollistettu molempia tilanteita. (AMF 2014, s. 131.)



Kuva 34. Lämmöntonniin vaikutus nollapistekiinnityksen nollakohtaan (1. keskittävä vetotappi, 2. linjaava vetotappi ja 3. kiinnittävä vetotappi) (mukaillen: AMF 2014, s. 131).

Kun robotilla liikuteltavaan kappaleeseen ei kohdistu ulkoisia voimia, voidaan kappaleenkäsittelyyn käyttää vain yhtä nollapistekiinnitintä ja yhtä keskittävää vetotappia. Yhtä keskittävää tappia käytettäessä kappaleeseen tai kiinnittimeen tuotu lämpö ei vaikuta merkittävästi nollapistekiinnityksen tarkkuuteen. Hitsauksen lämmöntonni vaikuttaa enemmän hitsausmuodonmuutosten syntymiseen. Kääntölaitteen pylvään kansi hitsataan koteloon yhdeltä puolelta, mikä aiheuttaa pylvään koteloon kaareutumista. Kuvassa 35 on katkoviivoin havainnollistettu pylvään kaareutuminen.



Kuva 35. Kääntöpylvään hitsauksesta aiheutuva kaareutuminen.

Pylvään selkä siis kaareutuu hitsausmuodonmuutoksen takia kuperaksi. Tämä voi vaikeuttaa nollapistekiinnittimen toimintaa tarraimena, jos kappaleen pinta kiinnittimen kohdalta ei ole tasainen. Kaareutuminen pienentää kiinnittimen kosketuspinnan pinta-alaa. Pieni kosketuspinnan ala voi heikentää hitsauksen maadoitusta merkittävästi ja kasvattaa nollapistekiinnittimeltä vaadittua lukitusvoimaa. Vaikka nollapistekiinnitin vetää vetotappia suurella voimalla, on vaikeaa arvioida pystyykö kiinnitin vetämään kaareutuneen kappaleen kosketuspintaan kiinni.

Kääntölaitteen rungon kanssa samaa ongelmaa ei ole. Kappaleen kiinnitys tapahtuu rungon valuosan sellaisesta kohdasta, jonka läheisyyteen ei tule hitsejä. Täten hitsausmuodonmuutokset eivät vaikuta tarraimen toimintaan runkoa hitsatessa.

8.5 Nollapistekiinnittimen valinta

Sopivan nollapistekiinnittimen valinta robottitarraimeksi aloitettiin selvittämällä nollapistekiinnittimien valmistajien tuoteluetteloista, onko heidän valikoimassaan automatisoituun tuotantoon suunnattuja malleja. Tiedonhaulla selvisi viisi eri nollapistekiinnitinvalmistajaa: Andreas Maier GmbH & Co (AMF), BIG KAISER Precision Tooling Inc., Roemheld GmbH, System 3R, Vischer & Bolli AG (VB Tools) ja ZeroClamp.

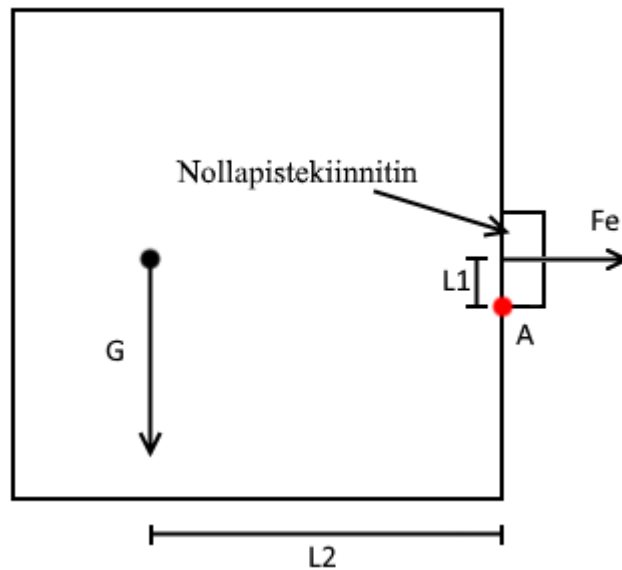
Nollapistekiinnittimien valmistajiin ja maahantuojiin oltiin yhteydessä sähköpostitse. Sähköpostitiedustelun tarkoituksena oli selvittää, voidaanko kunkin valmistajan nollapistekiinnittimiä käyttää hitsaussovelluksissa, onnistuuko hitsattavien kappaleiden maadoitus kiinnittimen kautta ja millaista lämpötilaa kiinnittimet kestävät korkeimmillaan. Myös automaatiosovelluksiin tarkoitettujen nollapistekiinnittimien anturointimenetelmiä selvitettiin. Tiedustelujen perusteella selvisi, että AMF, System 3R ja VB Tools nollapistekiinnittimiä voidaan käyttää hitsaussovelluksiin. System 3R valmistamien nollapistekiinnittimien lämmönkesto ylettyy kuitenkin vain 120 °C, joka ei ole riittävä hitsaussovelluksiin. AMF nollapistekiinnittimien lämmönkesto voidaan korottaa 200 °C ja VB Tools kiinnittimien lämmönkesto jopa 300 °C käyttämällä nollapistesyntereissä Viton-tiivisteitä. (Lars 2017; Linker 2017; Netzer 2017; Olanterä 2017a; Rissanen 2017; Sariola 2017.) Keslan Joensuun tehtaalla on ennestään ollut käytössä VB Tools nollapistekiinnittimiä koneistuskeskuksen kappaleiden kiinnityksessä. Kokemus VB Toolsin nollapistekiinnittimistä on, että vetotappi tulee asettaa nollapistesynteriin tarkasti kohtisuoraan. VB Toolsin vetotappien muoto on sylinterimäinen ja ne eivät salli suurta asetuskulmaa. Pienestä asetuskulmasta johtuen vetotappeja on rikkoutunut, kun kiinnitettäviä kappaleita on nostettu. Täten ainoaksi vaihtoehdoksi jää AMF:n nollapistekiinnittimet.

8.6 Nollapistekiinnittimeltä vaadittava pitovoima

Nollapistekiinnittimien teknisissä tiedoissa ilmoitetaan kiinnittimien voimat: lukitusvoima ja kiinnipitovoima. Lukitusvoimalla tarkoitetaan voimaa, jolla nollapistesylinteri vetää vetotappia sylinterin otsapintaan kiinni. Lukitusvoimaa ei tule ylittää lukituksen jälkeen tai kiinnitysjärjestelmän nollapiste voi muuttaa paikkaa. Lukitusvoiman suuruus on riippuvainen nollapistesylinterin lukitusjousien jäykkyydestä. Nollapistesylinterin käyttövoima vaikuttaa lukitusjousien jäykkyyteen. Yleisesti voidaan sanoa, että hydraulisilla järjestelmillä on suuremmat lukitusvoimat kuin pneumaattisilla. (AMF 2017, s. 12.)

Kiinnipitovoimalla tarkoitetaan suurinta mahdollista voimaa, jolla nollapistekiinnitintä voidaan vetää kohtisuoraan sen kiinnitystasoon nähden. Kiinnipitovoiman suuruuteen vaikuttaa nollapistesylinterin, vetotapin ja sen kiinnitysruuvien rakenteiden lujuudet. Kiinnipitovoimaa ei tule ylittää missään vaiheessa. Jos kiinnipitovoima ylittyy kappaletta käsitellessä, nollapistekiinnitys pettää ja kappale irtoaa. (AMF 2017, s. 12.)

Nollapistekiinnittimeltä kappaleenkäsittelyyn vaadittava lukitusvoima voidaan laskea, kun tiedetään kappaleiden kiinnityskohdat ja niiden etäisyydet kappaleen painopisteestä. Robotin akseleiden kiihtyvyyttä ei oteta laskuissa huomioon, sillä kappaleenkäsittelyn nopeudet tulevat olemaan hitaita johtuen kappaleiden suurista massoista. Robottien valmistajat eivät myöskään yleensä ilmoita robottien kiihtyvyyksiä. Kappaleenkäsittelyssä suurin nollapistekiinnittimeen kohdistuva voima on robotin käsivarren ollessa vaakatasossa. Kuvassa 36 on esitetty vapaakappalekuva kyseisestä tilanteesta.

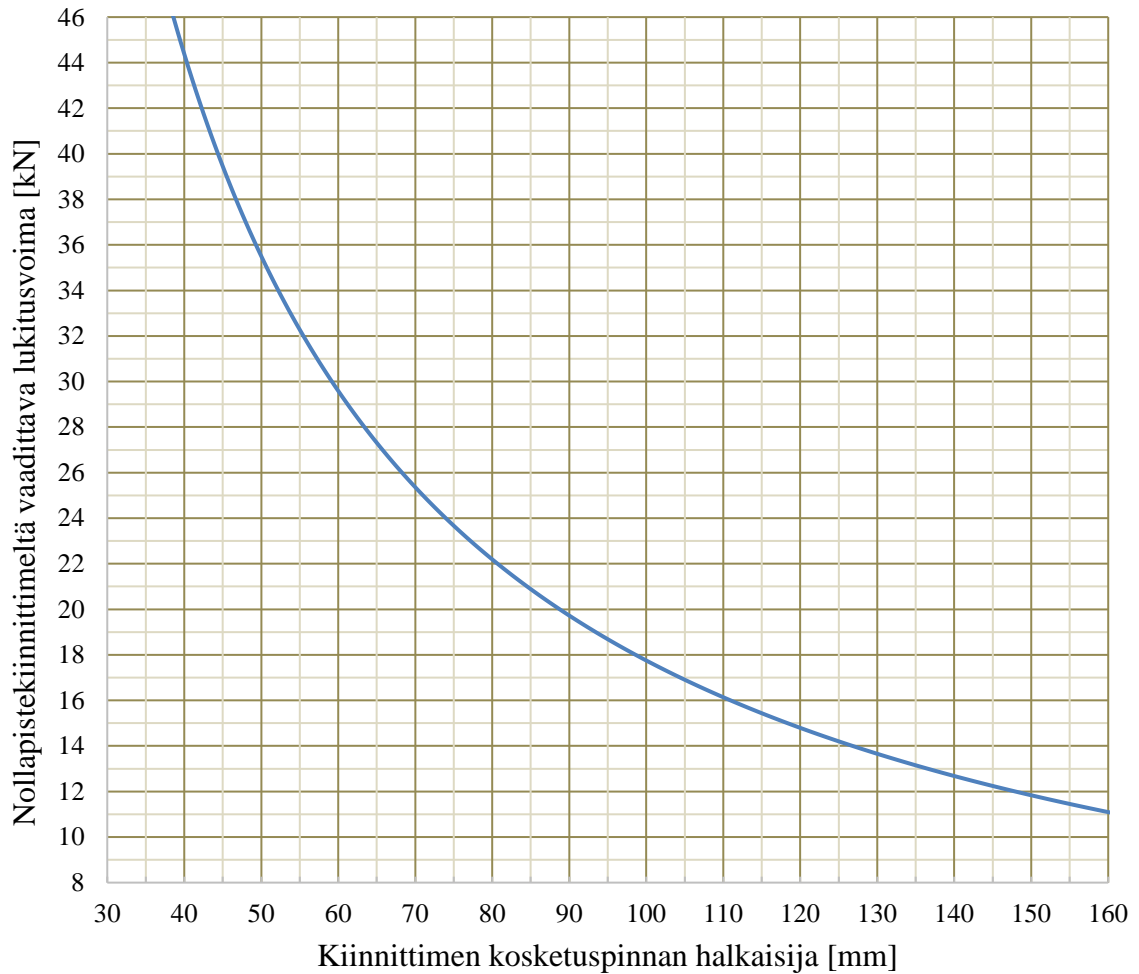


Kuva 36. Vapaakappalekuva nollapistekiinnittimen kiinnityksestä.

Yhtälö yhdeltä nollapistekiinnittimeltä vaadittavaan lukitusvoimaan on johdettu liitteessä IV. Yhdeltä nollapistekiinnittimeltä kappaleenkäsittelyyn vaadittava lukitusvoima F_E voidaan laskea yhtälöllä:

$$F_E > G \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot n \quad (5)$$

Yhtälössä 5 G on kappaleen massasta aiheutuva painovoima, L_1 on nollapistekiinnittimen keskikohdan etäisyys pisteestä A (kiinnittimen kosketuspinnan säde), L_2 painovoiman etäisyys kiinnitettävästä kohdasta suurimmillaan ja n on varmuusluku. Yhtälöstä voidaan päätellä, että vaadittava lukitusvoima on kääntäen verrannollinen nollapistekiinnittimen kosketuspinnan halkaisijaan. Kappaleen massa ja painovoiman etäisyys ovat vakioita. Kuvassa 37 on esitetty nollapistekiinnittimeltä vaadittu lukitusvoima nollapistekiinnittimen kosketuspinnan halkaisijan suhteen varmuusluvulla $n = 2$. Kuvaajan laskennassa käytettiin kääntölaitteelle valitun kiinnityskohdan arvoja.



Kuva 37. Kiinnittimeltä vaadittu lukitusvoima kosketuspinnan halkaisijan suhteen.

AMF:n valmistamista nollapistekiinnittimistä selvitettiin, mitkä nollapistekiinnitinmallit soveltuvat tarraimeksi. Tarraimeksi haluttiin paineilmatoiminen nollapistesyylinteri, koska tehtaalta löytyy valmiiksi paineilmajärjestelmä ja nivelvarsirobotit vaativat paineilmaa toimiakseen. Lisäksi paineilmatoimiset nollapistesyylinterit eivät rikkoutuessaan levitä öljyä ympäriinsä. Taulukkoon 6 on koottu AMF valmistamien paineilmatoimisten nollapistekiinnittimien mallit ja lukitusvoimat sekä kosketuspinnan halkaisijan perusteella kiinnittimeltä vaadittu lukitusvoima.

Taulukko 6. AMF paineilmatoimisten nollapistekiinnittimien mallit ja lukitusvoimat (AMF 2015, s. 15, 17).

| Malli | Halkaisija [mm] | Mallin lukitusvoima [kN] | Vaadittu lukitusvoima, kun n = 2 [kN] |
|-------|-----------------|--------------------------|---------------------------------------|
| K02 | Ø 22 | 0,23 | 80,7 |
| K5 | Ø 45 | 1,5 | 39,5 |
| K5.3 | Ø 78 | 1,5 | 22,8 |
| K10 | Ø 78 | 8,5 | 22,8 |
| K10.3 | Ø 112 | 10,0 | 15,9 |
| K20 | Ø 112 | 17,0 | 15,9 |
| K20.3 | Ø 138 | 17,0 | 12,9 |
| K40 | Ø 148 | 30,0 | 12,0 |

Taulukon 6 lukuarvojen perusteella K20, K20.3 ja K40 nollapistekiinnittimet omaavat riittävän lukitusvoiman pylvään ja kääntölaitteen kappaleenkäsittelyyn. Suomessa AMF:n edustajana ja maahantuojana toimii Oy Interfii Ltd, joka myy ja markkinoi AMF:n nollapistekiinnittimiä, hydraulikiinnittimiä, alipainekiinnittimiä sekä magneettipöytiä. Selvitettyjen tietojen perusteella Interfiistä kysyttiin tarjousta nollapistetarraimeksi sopivasta nollapistekiinnittimestä. Interfiille annettiin lisätietoja tarraimen käyttökohteesta ja käsiteltävistä kappaleista. Yhdessä AMF:n asiantuntijoiden kanssa Interfii päätyi tarjoukseen, jossa nollapistesynterinä on AMF K20.3. Kuvassa 38 on esitetty 3D-malli Interfii:n tarjoamasta nollapistetarraimesta.



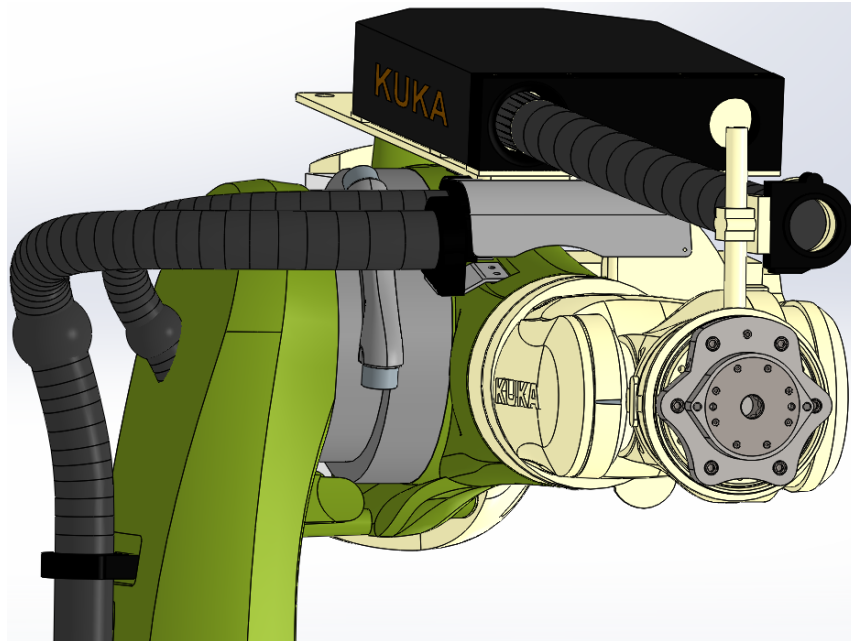
Kuva 38. Interfii Oy:n tarjouksen nollapistetarraimen 3D-malli (Olanterä 2017b).

AMF K20.3 on upotettava nollapistesylinteri, joka nollapistetarraimena toimiakseen vaatii erillisen robotin rannelaippaan kiinnitettävän tarrainlaipan. Tarjouksen nollapistetarrain on konseptimalli eli tarrainlaippa tulee muuttumaan investoitavan kappaleenkäsittelyrobotin rannelaippaan sopivaksi. Tarrainlaipassa on molemmin puolin kaksi reikää, joiden avulla liikuteltava kappale saadaan asemoitua oikeaan kulmaan tarraimen suhteen. Nämä niin kutsutut kohdistusreiät myös estävät kappaleen pyörimisen vetotapin ympäri.

K20.3 kiinnittimen massa on 2,6 kg, kosketuspinnan halkaisija on 138 mm ja lukitusvoima 17,0 kN, jolloin yhtälön 5 mukaan laskettuna nollapistetarraimen varmuusluku n olisi noin 2,6. Varmuusluvun on hyvä olla riittävän suuri, koska laskuissa ei ole otettu huomioon kappaleenkäsittelyrobotin akseleiden kiihtyvyyksiä. Miehittämätöntä tuotantoa varten nollapistesylinteri on varustettu pneumaattisella anturoinnilla. Tarrainlaipassa on oltava kaksi paineilmayhdettä. Ensimmäiseen yhteeseen syötetään nollapistesylinterin avaamiseen tarvittavaa paineilmaa ja toiseen vetotapin lukituksen anturointiin käytettävää paineilmaa.

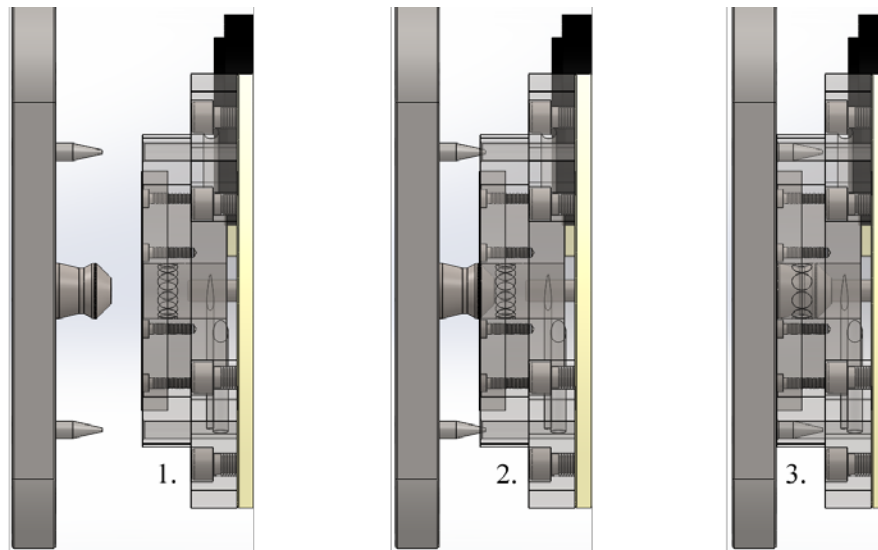
8.7 Tarrain- ja kiinnityslaipat

Työtä varten suunniteltiin SolidWorks 3D-suunnitteluohjelmistolla nollapistetarraimelle tarrainlaippa ja kappaleiden kiinnityslaipat. Tarrain- ja kiinnityslaipat suunniteltiin, jotta saataisiin suuntaa antava arvio koko systeemin massoista ja painopisteiden etäisyyksistä lopullisen rannelaippaan kohdistuvan vääntömomentin määrittämiseksi. Tarrainlaipan avulla nollapistekiinnitin saadaan kiinnitettyä robottiin ja sen suunnittelun pohjalla käytettiin KUKA KR 600 nivelvarsirobotin rannelaippaa. Kuvassa 39 on esitetty 3D-mallikuva nollapistetarraimesta kiinnitettynä robottiin. Nollapistetarraimen kokonaismassa on noin 12 kg ja sen painopisteen etäisyys robotin rannelaipasta 22 mm.



Kuva 39. 3D-mallikuva KUKA KR 600 nivelvarsirobotista, jonka rannelaippaan on kiinnitetty nollapistekiinnittimellä varustettu tarrainlaippa.

Nollapistekiinnittimen vetotapit voitaisiin kiinnittää suoraan liikuteltaviin kappaleisiin. Kappaleiden asemointi yhdellä vetotapilla on kuitenkin mahdotonta ilman kohdistusta. Yhtä vetotappia käytettäessä on mahdollista, että nollapistetarraimen kosketuspinnan ja kappaleen välinen kitka ei riitä, jolloin kappale pääsee pyörimään. Kääntölaitteen rungon ja pylvään liikuttamista varten kappaleisiin suunniteltiin niin kutsutut kiinnityslaipat. Kiinnityslaippa kiinnitetään liikuteltavaan kappaleeseen ja laippaan kiinnitetään keskittävä vetotappi. Kiinnityslaipassa on kohdistustapit, joiden avulla liikuteltava kappale saadaan asemoitua tarrainlaipan kohdistusreikiin ja ne estävät kappaleen pyörimisen vetotapin suhteen (kuva 40). Kohdistuksen lisäksi kääntöpylvään kiinnityslaippa pyrkii estämään pylvään kotelon kaareutumista ja mahdollistaa nollapistetarraimelle tasaisen kosketuksen.

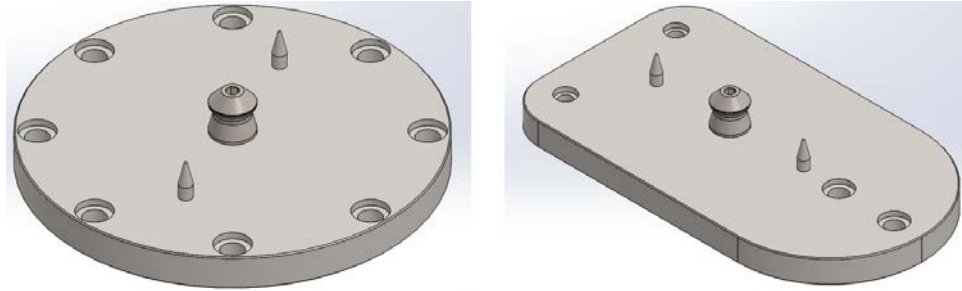


Kuva 40. Periaatekuva nollapistetarraimen kiinnityksen kohdistamisesta: 1. robotti lähestyy kappaletta 2. vetotappi keskittää kiinnityslaipan ja kappaleen 3. kohdistustapit asettaa kappaletta oikeaan kulmaan ja vetotappi lukitaan.

Kääntölaitteen rungon kiinnityslaippa voidaan kiinnittää valitussa kiinnityskohdassa suoraan valun alapuolella oleviin kierteitettyihin reikiin. Valun alaosassa on kahdeksan M16-kierteellä olevaa reikää, joihin laippa saadaan kiinnitettyä ruuviliitoksien. Kääntölaitteen rungon kiinnityslaipan massa kiinnitysruuvien, keskitystappien sekä vetotappin kanssa on noin 13 kg ja painopisteen etäisyys nollapistetarraimen kosketuspinnasta 12 mm.

Lähellä kääntöpylvään valittua kappaleenkäsittelykohtaa sijaitsee osa nosturin hytin kiinnitysrei'istä. Kyseessä olevista neljästä reiästä kaksi on kierteitetty M12-kierteellä ja toiset kaksi M16-kierteellä. Tällä hetkellä kyseessä olevat reiät valmistetaan vasta pylvään koneistusvaiheessa, joten valmistukseen joudutaan tekemään pieni muutos. Jotta pylvään kiinnityslaippa voidaan kiinnittää pylvääseen kappaleenkäsittelyä varten, on hytin kiinnitysreiät ja kierteet valmistettava ennen silloitushitsausta. Pylvään kiinnityslaipassa vetotappi sijaitsee laipan kiinnitysreikien välissä, jolloin vetotappi ei kohdistu keskelle kappaleen painopistettä. Painopiste sijaitsee 128 mm sivussa vetotappista. Painopisteen siirtymästä aiheutuu rannelaippaan 319 Nm vääntömomentti XY-suunnassa. Kääntölaitteen pylvään kiinnityslaipan massa kiinnitysruuvien, keskitystappien sekä vetotappin kanssa on noin 13,2 kg ja painopisteen etäisyys nollapistetarraimen kosketuspinnasta 12,1 mm. Kuvassa 41 on esitetty kääntölaitteen rungon ja pylvään kiinnityslaipat. Molemmat

kiinnityslaipat ovat 25 mm paksuisia. Rungon valun ja pylvään hytin kiinnitysreiät ovat standardisoituja eli kiinnityslaipat sopivat muiden kääntölaitemallien kappaleenkäsittelyn kiinnitykseen.



Kuva 41. Vasemmalla on kääntölaitteen rungon kiinnityslaippa ja oikealla pylvään kiinnityslaippa.

Nollapistetarrain laippoineen siirtää liikuteltavaa kappaletta 55 mm robotin rannelaipasta edemmäs. Yhdessä kiinnityslaipan kanssa nollapistetarrain lisää kappaleen vääntömomentin vartta 80 mm. Kun tarrain- ja kiinnityslaippojen massat sekä kappaleiden ja laippojen painopisteiden etäisyydet ovat tiedossa, voidaan laskea lopullinen robotin rannelaippaan kohdistuvat vääntömomentit. Lopulliset robotin rannelaippaan kohdistuvat vääntömomentit ovat esitelty taulukossa 7.

Taulukko 7. Lopulliset robotin rannelaippaan kohdistuvat vääntömomentit.

| Kääntölaite | | Pylväs | |
|-------------|--------|----------|--------|
| M_{xy} | 395 Nm | M_{xy} | 319 Nm |
| M_z | 659 Nm | M_z | 602 Nm |

Nollapistekiinnittimeltä vaadittavan lukitusvoiman laskemiseen käytettävässä yhtälössä ei otettu huomioon robotin kiihdytyksestä aiheutuvia voimia. Suurin sallittu robotin kiihtyvyys voidaan kuitenkin määrittellä laskemalla, kun tiedossa on kaikki nollapistetarraimen komponentit, niiden massat ja painopisteiden etäisyydet. Kiihtyvyydet on laskettava erikseen nollapistetarraimen lukitusvoiman perusteella ja robotin rannelaipan suurimman sallitun vääntömomentin perusteella siten, että tilanne pysyy staattisena. Kiihtyvyyksien laskemiseen käytettävät yhtälöt on johdettu liitteessä VII.

Nollapistetarraimen lukitusvoiman perusteella määritelty robotin suurin sallittu kiihtyvyys a_1 saadaan laskettua yhtälöllä:

$$a_1 = \frac{F_E L_3}{m_1 L_1 + m_2 L_2} - g \quad (6)$$

Yhtälössä 6 F_E on nollapistetarraimen lukitusvoima, L_3 lukitusvoiman etäisyys tukipisteestä A, m_1 on liikuteltavan kappaleen massa, L_1 on kappaleen painopisteen etäisyys tukipisteestä A, m_2 on kiinnityslaipan massa, L_2 on kiinnityslaipan painopisteen etäisyys tukipisteestä A ja g on putoamiskiihtyvyys. Robotin rannelaipan suurimman vääntömomentin perusteella määritelty suurin sallittu kiihtyvyys a_2 voidaan laskea yhtälöllä:

$$a_2 = \frac{M}{m_1 L_1 + m_2 L_2 + m_3 L_3} - g \quad (7)$$

Yhtälössä 7 M on suurin sallittu robotin rannelaippaan kohdistuva vääntömomentti, m_1 on liikuteltavan kappaleen massa, L_1 on kappaleen painopisteen etäisyys rannelaipasta, m_2 on kiinnityslaipan massa, L_2 on kiinnityslaipan painopisteen etäisyys rannelaipasta, m_3 on nollapistetarraimen massa, L_3 on nollapistetarraimen painopisteen etäisyys rannelaipasta ja g on putoamiskiihtyvyys. Kiihtyvyyksien laskemiseen käytettiin kääntölaitteen rungon arvoja. Sallittujen kiihtyvyyksien arvoiksi laskettiin nollapistetarraimen kestävyuden perusteella $a_1 = 12,8 \text{ m/s}^2$ ja robotin rannelaipan suurimman sallitun vääntömomentin perusteella $a_2 = 16,5 \text{ m/s}^2$.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä oli miten robotisoidusta hitsauksesta saadaan mahdollisimman joustava. Robotisoidusta hitsauksesta saadaan joustavaa, kun tuotannossa pyritään tavoittelemaan kykyä mukautua muuttuviin tuotantomääriin ja kykyä valmistaa erilaisia sekä uusia tuotteita. Nämä voidaan saavuttaa panostamalla tuotannon miehittämättömyyteen. Miehittämättömällä tuotannolla tarkoitetaan vähintään yhden työvuoron kestävää tuotannon ajanjaksoa, jonka aikana valmistus ei tarvitse operaattorin huomiota. Tällöin robottihitsaussolussa on käytössä kaikki sen tarvittavat työkalut, kuten hitsauspolttimen puhdistus- ja vaihtoasema sekä työkalupisteen tarkastus. Robottiohjaimeen on tallennettu kaikkien hitsattavien kappaleiden hitsausohjelmat ja hitsattavien kappaleiden käsittely on automatisoitu. Hitsattavat kappaleet tuodaan solulle ja solunohjaukselle kerrotaan, mitä kappaleita hitsaukseen tuodaan. Vaihtoehtoisesti solu tunnistaa hitsattavat kappaleet automaattisesti.

Kappaleenkäsittely saadaan joustavaksi käyttämällä kappaleenkäsittelyrobotia. Tällöin kappaleenkäsittelyn työkaluksi tarvitaan tarrain, joka kykenee käsittelemään kaikkia mahdollisia hitsattavia kappaleita. Kappaleenkäsittelyrobotin liikerataa saadaan laajennettua helposti lineaariradalla. Lineaarirata mahdollistaa suurien kappaleiden käsittelyn ja laajentaa liikuteltavien kappaleiden paikoitukseen suunnattua aluetta. Robottien ohjelmointitavaksi suositellaan etäohjelmointia. Etäohjelmointi mahdollistaa hitsausohjelmien valmistuksen erillisellä tietokoneella keskeyttämättä hitsaavaa tuotantoa. Näin robottihitsaukseen pystytään tuomaan uusia kappaleita aiheuttamatta tuotantoseisokkia.

Hitsausrobotilta vaaditaan railonhaku ja -seuranta ominaisuudet. Railonhaun avulla haetaan hitsattavien raiilojen sijainti ja paikannetaan hitsattavan kappaleen asento robotin koordinaatistoon. Railonseurannalla kompensoidaan mahdolliset hitsausmuodonmuutoksista aiheutuvat kappaleen mittamuutokset. Lisäksi railonseurannalla pystytään ottamaan huomioon pienet osien paikoituksessa tapahtuneet virheet ilman suurempia hitsausvirheitä.

Miehittämätön tuotanto vaatii robottihitsaussolulta tarkkoja turvajärjestelmiä. Solunohjausjärjestelmän tulee tunnistaa, jos ihminen liikkuu hitsaussolussa vaarallisilla alueilla. Tällöin robottien liikkeet joko hidastuvat tai solun toiminta seisahtuu kokonaan. Kappaleenkäsittelyrobotin käytettävältä tarraimelta on saatava tieto solunohjausjärjestelmälle tarraamisen onnistumisesta, että liikuteltavat kappaleet eivät pääse putoamaan. Robottien on myös tunnistettava mahdolliset törmäykset toisiinsa tai hitsattavaan kappaleeseen. Turvajärjestelmien on oltava kunnossa, jotta vältetään mahdolliset henkilö- ja materiaalivahingot.

Toinen tutkimuskysymys käsitteli hitsattavien kappaleiden kappaleenkäsittelyn kiinnityskohtien määrittämistä. Hitsattavat kappaleet tulee pystyä hitsaamaan vain yhdellä kiinnityksellä ja kappaleenkäsittelyrobotin tulee kestää kappaleista aiheutuvat rasitukset. Kun kappaleet halutaan hitsata yhdellä kiinnityskerralla, ei käytettävä tarrain saa olla hitsien tai hitsausrobotin tiellä. Kappaleiden kiinnityskohdat haluttiin mahdollisimman lähelle niiden painopistettä, jotta kappaleenkäsittelyrobotin hyötykuorma säilyisi mahdollisimman suurena.

Kääntöpylvään ja kääntölaitteen rungon kiinnityskohdat valittiin kappaleiden kohdista, joiden lähellä ei ole hitsejä. Tällöin tarrain tai kappaleenkäsittelyrobotti ei ole hitsausrobotin tai -polttimen tiellä hitsauksen aikana. Pylvään kiinnityskohdaksi valittiin kotelon selkäpuolelta läheltä hammasakselivalua. Kiinnityskohta on valittu mahdollisimman läheltä pylvään painopistettä robotin ranteen rasituksen minimoimiseksi. Lopullinen tarraimen kiinnityskohta pylväässä ei ole aivan samassa linjassa painopisteen kanssa, vaan sijaitsee kiinnityslaipasta johtuen sivummalla. Tämä ei kuitenkaan haittaa, sillä siirtymästä aiheutuu riittävän pieni vääntömomentti robotin rannelaippaan. Kääntöpylvään kotelon selkä kaareutuu kuperaksi hitsauksen lämpömuodonmuutoksista johtuen, mikä voi aiheuttaa ongelmia kappaleenkäsittelylle.

Kääntölaitteen rungon kiinnityskohdaksi valittiin rungon valun alaosassa sijaitseva aukko, johon kiinnitetään peitelevy. Tukijalkapalkki osoittautui kiinnityksen kannalta mahdottomaksi, sillä robotin tarrain olisi aina jonkin hitsin tiellä ja kiinnityskohtaa jouduttaisiin vaihtamaan kesken hitsauksen. Kääntölaitteen runko on hyvä kiinnittää valusta, sillä kyseisen kiinnityskohdan lähellä ei ole hitsejä eikä hitsausrobotti pääse

törmäämään tarraimen tai kappaleenkäsittelyrobottiin. Rungon kiinnityskohtaan ei pääse kohdistumaan suuria lämmöstä aiheutuvia muodonmuutoksia, jotka haittaisivat kiinnitystä.

Kolmantena tutkimuskysymyksenä oli millainen tarrain robottihitsaussoluun vaaditaan kappaleiden hitsauksen onnistumiseksi. Miehittämätön robottihitsaussolu asettaa käytettävällä kappaleenkäsittelyrobotin tarraimelle useita vaatimuksia. Vaihtoehtoisina robottitarraimina oli mekaaniset tarraimet, alipainetarraimet, magneettitarraimet ja tyypillisesti konepajatekniikan kiinnityksissä käytettävät nollapistekiinnittimet. Robottihitsaussoluun valittavan tarraimen valinnan työkaluna käytettiin arvoanalyysiä. Käytettävän tarraimen vaatimusten perusteella määriteltiin tarraimelta vaadittavat toiminnot. Eri tarrainvaihtoehtoja vertailtiin arvoanalyysin avulla näiden toimintojen perusteella. Arvoanalyysistä jätettiin huomioimatta tarraimista aiheutuvat kustannukset, sillä niiden todettiin olevan toissijaisia tarraimen toimintojen rinnalla. Arvoanalyysin tuloksena nollapistekiinnitin osoittautui selvästi toiminnoiltaan parhaimmaksi miehittämättömän robottihitsauksen kappaleenkäsittelyn tarraimeksi. Nollapistekiinnittimiä on tietävästi käytetty kappaleenkäsittelyrobotin tarraimena. Käyttökohteena on ollut koneistuskeskuksen palettien liikuttelu hyllystä koneistukseen ja takaisin. Tietoutta siitä, onko nollapistekiinnittimiä käytetty aiemmin robottitarraimena hitsaussovelluksissa, ei saatu selville.

Viimeisenä tutkimuskysymyksenä oli miten kappaleenkäsittelyrobotti saa otettua kappaleista kiinni aina samasta kohdasta. Hitsattaville kappaleille on valmistettava telineet, jotka paikoittavat kappaleet riittävän tarkasti kappaleenkäsittelyrobotin suhteen. Tällöin kappaleenkäsittelyrobotti voidaan ohjelmoida kappaletelineiden mukaan ja robotti osaa hakea kappaleet oikeasta sijainnista.

Nollapistekiinnitin tarraimena keskittää ja kiinnittää liikuteltavan kappaleen kiinnittimen otsapintaa vasten. Nollapisteen saavuttamiseksi kappaleenkäsittelyssä tulee käyttää vain keskittäviä vetotappeja. Muita vetotappeja käytettäessä kappaleen kiinnitys nollapistekiinnittimellä ei ole yhtä tarkkaa. Robottihitsaukseen nollapistekiinnittimen 5 µm toistotarkkuus voi vaikuttaa jopa tarpeettoman tarkalta. Kappaleenkäsittelyn kiinnityksen tarkkuutta ei kuitenkaan kannata väheksyä, sillä mittapätarkkuudet kertautuvat hitsausrobotin ja kappaleenkäsittelyrobotin välillä.

Nollapistetarrain soveltuu hyvin erilaisten kappaleiden käsittelyyn. Ehtona on, että vetotappi saadaan kiinnitettyä liikuteltavaan kappaleeseen. Tässä työssä esiteltiin esimerkkinä kiinnityslaippojen käyttö vetotappien kiinnittämiseen. Vetotapin lisäksi kiinnityslaipoissa on kohdistustapit, jotka asemoituvat nollapistetarraimen laipan kohdistusreikiin. Kohdistustappien avulla kappale saadaan oikeaan orientaatioon tarraimen suhteen ja ne estävät liikuteltavan kappaleen pyörimisen vetotapin ympäri. Kiinnityslaippa tarjoaa myös nollapistekiinnittimelle tasaisen ja tarkan kiinnityspinnan sekä se estää kappaleen kiinnityskohdan lämmöstä aiheutuvia muodonmuutoksia.

KUKA KR 600 kappaleenkäsittelyrobotin suurimmaksi sallituksi rannelaippaan kohdistuvaksi vääntömomentiksi määriteltiin 1766 Nm. Hitsattavista kappaleista aiheutuvat robotin rannelaippaan kohdistuvat vääntömomentit laskettiin uudestaan tarraimen valinnan ja kiinnityslaippojen suunnittelun jälkeen. Lasketut vääntömomentit taulukoitiin ja suurimman vääntömomentin aiheuttajaksi selvisi kääntölaitteen runko. Kääntölaitteen runko aiheuttaa suurimmillaan robotin rannelaippaan 659 Nm vääntömomentin. Rungon aiheuttama vääntömomentti on vain 37,3 % suurimmasta sallitusta vääntömomentista. Täten kappaleenkäsittelyn tulisi onnistua helposti KUKA KR 600 nivelvarsirobotilla.

Tarraimeksi käytettävän nollapistekiinnittimen lukitusvoiman laskemiseen ei otettu huomioon robotin liikkeiden kiihtyvyyksiä, koska lukuarvoja robottien kiihtyvyyksistä ei ollut saatavilla. Suurin sallittu robotin kiihtyvyys pystyttiin kuitenkin määrittelemään laskemalla. Robotin ranne kestää suuremman kiihdytyksestä aiheutuvan voiman kuin nollapistetarraimen lukitusvoima. Täten robotin liikkeiden suurin kiihtyvyys on rajoitettava nollapistetarraimen kestävyden mukaan, ettei tarraimen kiinnitys petä robotin liikuttaessa kappaleita.

9.1 Jatkotutkimusaiheet

Ennen kuin lopullista robottihitsaussoluinvestointia kannattaa tehdä, täytyy robottihitsaussolusta tehdä simulaatiomalli esimerkiksi käyttämällä etäohjelmointisovellusta. Simulaation avulla voidaan määrittää robottihitsaussolun lopullinen Joensuun tehtaan tiloihin sopiva layout ja solun eri komponenttien sijainnit sekä

etäisyydet toistensa suhteen. Etäohjelmointisovelluksella pystytään suorittamaan hitsaus- ja kappaleenkäsittelyrobotin ulottuvuustarkastelu sekä tarkastamaan kappaleille valittujen kappaleenkäsittelykohtien soveltuvuus hitsaukseen.

Kappaleenkäsittelyä varten on hitsattaville kappaleille suunniteltava ja valmistettava telineet, joista kappaleenkäsittelyrobotti noutaa kappaleet ja vie hitsattuna takaisin samalle telineelle. Telineistä tulisi suunnitella mahdollisimman modulaarisia, jotta niitä ei tarvitse valmistaa jokaiselle hitsattavalla kappaleelle omaa. Telineiden ja kappaleiden paikoitus niihin tulee olla riittävän tarkkoja, että robotti pystyy tarraamaan ja palauttamaan kappaleet ilman ongelmia.

Tällä hetkellä on hyvin vaikea määritellä, miten suurelle lämpörasitukselle nollapistetarrain joutuu hitsauksen aikana. Jos nollapistetarrainta käytettäessä ilmenee ongelmia liian suurten lämpötilojen kanssa, on nollapistetarrainta mahdollista jäähdyttää. Tarrainta voidaan jäähdyttää esimerkiksi vesijäähdytteisesti valmistamalla tarrainlaippaan jäähdytyskanavat.

Kääntöpylväs ja kääntölaitteen runko ovat yhdet vaikeimmista Keslan hitsattavista kappaleista. Investoitavaa robottihitsaussolua ei kuitenkaan kannata käyttää vain näiden kahden kappaletyypin hitsaamiseen, vaan hitsattavaksi kannattaa miettiä kaikkia mahdollisia hitsattavia kappaleita. Näin robottihitsauksen käyttöasteesta saadaan mahdollisimman suuri ja miehittämättömänä solua on mahdollista käyttää jopa ympäri vuorokauden. KESLA-tuotteiden hitsattavista kappaleista on siis tehtävä kartoitus, mitkä kappaleet soveltuvat robotilla hitsattaviksi ja mitä kappaleista kannattaa hitsata robotilla. Samalla voidaan miettiä pystytäänkö kappaleisiin tekemään rakennemuutoksia robottihitsauksen helpottamiseksi. Robottihitsaukseen valittujen kappaleiden kohdalla tulee selvittää miten vetotappi saadaan kiinnitettyä kappaleisiin, että kappaleita voidaan käsitellä samalla tarraimella. Hitsattavien kappaleiden kohdalla voidaan myös tutkia onko kohdistustappien käyttö tarpeellista vai riittääkö tartunnan tarkkuus ja kappaleen sekä tarraimen välinen kitka pitämään kappaleen paikallaan.

Kääntöpylvään alapäässä sijaitseva hammasakselivalu tulee esilämmittää ennen sen hitsaamista koteloon ja etulevyyn. Esilämmitys vaaditaan, koska massiivinen valukappale

sitoo hitsauksen lämmöntonnon itseensä ja lämpövaikutusalue pääsee jäähtymään liian nopeasti. Liian nopeasta jäähtymisestä johtuen lämpövaikutusalue karkenee ja kylmähalkeilun riski kasvaa merkittävästi. Teräsvalu on esilämmitettävä karkenemisen estämiseksi ja teräksen myötörajan pienentämiseksi, jolloin saadaan alennettua hitsauksesta aiheutuvia jäännösjännityksiä. Pylvään hitsauksessa robottihitsaussolulla ongelmaksi muodostuu hammasakselivalun automatisoitu esilämmitys ja sen toteutus. Automatisoitu esilämmitys on toteuttava siten, että sillä ei lämmitetä liikaa pylvään muita rakenteita niiden materiaalin saavutettujen mekaanisten ominaisuuksien säilymiseksi. Hammasakselivalun liittävät hitsit ovat koko pylvään tärkeimmät hitsit niiden onnistumisen kannalta, koska pylvään juuri on sen kriittisin kohta eikä se saa pettää nosturia käytettäessä.

Kääntöpylvään ja kääntölaitteen rungon silloitushitsausta tulee tutkia tarkemmin robottihitsattavuuden kannalta. Robottihitsausta varten olisi hyvä tehdä tarkat työohjeet siltahitseille, että kappaleista tulisi aina lähes samanlaisia silloituksen jälkeen. Siltahitsit eivät saa olla liian isoja, jotta ne sulavat hitsausrobotin hitsien alle. Siltahitsien hitsausprosessi voitaisiin vaihtaa TIG-hitsaukseen nykyisen MAG-umpilankahitsauksen sijaan, jos siltahitsien sulamisessa ilmenee ongelmia.

10 YHTEENVETO

Tänä päivänä Suomessa on panostettava yhä enemmän tuotannon automatisointiin työpaikkojen säilyttämiseksi ja Suomen teollisuuden nostamiseksi. Tuotannon automatisoinnilla pyritään parantamaan kilpailukykyä, tuottavuutta, tuotteiden tasalaatuisuutta ja työntekijöiden terveyttä sekä mielekkyyttä työtehtäviin. Lisäksi tuotannon automatisoinnilla pyritään vastaamaan tuotantolaitosten työntekijäpulaan, jotta tuotanto jatkuisi ja pysyisi kannattavana. Hitsaavassa tuotannossa eräs automatisoinnin keino on hitsauksen robotisointi. Robotisoinnin avulla tuotannosta pystytään tekemään joustavaa eli voidaan taloudellisesti kannattavasti valmistaa asiakkaille räätälöityjä tuotteita ja laajasti vaihtelevia sarjakokoja. Hitsausautomaatioon investoidessa kannattaa lähtökohtaisesti pyrkiä miehittämättömään hitsaukseen investoinnin kannattavuuden parantamiseksi. Miehittämättömällä hitsauksella pyritään saamaan hitsauksen tuottavuus ja kaariaikasuhte mahdollisimman suureksi.

Kesla Oyj:llä hitsaavan tuotannon automatisointia varten on suunnitteilla joustava robottihitsaussolu. Miehittämättömästi ajettavassa robottihitsaussolussa kappaleenkäsittelystä vastaa nivelvarsiroboti, joka liikkuu lineaariradalla. Työn tavoitteena oli selvittää kuinka halutusta robottihitsaussolusta saataisiin mahdollisimman joustava ja millainen robottitarrain kappaleenkäsittelyrobotille vaaditaan, että hitsaus onnistuu.

Työn käsittelyosuudessa tutustutaan pääpiirteittäin robottihitsaukseen, robottihitsauksen anturointimenetelmiin, joustavan robottihitsaussolun määritelmään ja erilaisiin käyttökohteeseen soveltuviin robottitarraimiin. Lisäksi käsittelyosuudessa esitellään KESLA 2109 auto- ja teollisuusnosturin kääntölaite sekä sen hitsausta, hitsauksen ongelmakohtia ja rakenteellisia muutosehdotuksia robottihitsauksen helpottamiseksi. Käytännön osuudessa valittiin kääntölaitteen pylvään ja rungon kappaleenkäsittelyn kiinnityskohdat sekä kappaleenkäsittelyrobotin tarrain käyttäen apuna arvoanalyysiä.

Kappaleenkäsittelyn kiinnityskohdaksi kääntöpylvästä valittiin kotelon selkäpuoli. Pylvään selkäpuolelta kiinnitettuna robotti saadaan mahdollisimman lähelle painopistettä,

jolloin kappaleesta aiheutuvat rasitukset jäävät pieneksi. Kääntölaitteen rungon kiinnityskohdaksi valikoitui rungon valukappaleen alaosa. Rungon tukijalkapalkista ei saada järkevästi kiinni ilman, että kiinnitys ei olisi hitsauspolttimen tiellä.

Käsittelyosuudessa esiteltyjä tarraimia verrattiin keskenään arvoanalyysin avulla. Miehitämätön robottihitsaus asettaa käytettävälle tarraimelle tiettyjä vaatimuksia, jotka määriteltiin. Vaatimuksien perusteella määriteltiin tarraimelta vaaditut toiminnot, joita vertailtiin eri tarrainvaihtoehtojen kesken arvoanalyysin avulla. Tuloksena käyttökohteeseen parhaimmaksi tarrainvaihtoehdoksi osoittautui nollapistekiinnitin. Eri valmistajien nollapistekiinnittimiä selvitettiin valmistajien tuoteluetteloista ja sähköpostitse niin valmistajilta kuin maahantuojilta. Lopulta sopivimmaksi tarraimena toimivaksi nollapistekiinnittimeksi valittiin AMF:n valmistama K20.3. Nollapistekiinnittimen käyttäminen robottitarraimena vaati tarrainlaipan, joka suunniteltiin työtä varten. Nollapistetarrainlaipan lisäksi suunniteltiin kappalekohtaiset kiinnityslaipat, joihin nollapistetapit saadaan kiinnitettyä ja laippojen avulla kappaleet saadaan kohdistettua oikeaan asentoon robotin suhteen.

Robotisoidusta hitsauksesta saadaan mahdollisimman joustavaa kun pyritään miehitämättömään hitsaukseen ja tavoittelemaan hitsaussolun kykyä mukautua asiakkaalle räätälöityihin tuotteisiin sekä solun kykyä mukautua muuttuviin tuotantomääriin. Robotisoidusta hitsauksesta on mahdollista saada miehitämätön käyttämällä kappaleenkäsittelyrobottia, joustavaa robottitarrainta, railonhakua ja -seurantaa, etäohjelmointia sekä tarkkaa turvallisuusjärjestelmää.

Valitut kiinnityskohdat kappaleiden hitsaamiseen osoittautui oivallisiksi hitsauksen ja kappaleenkäsittelyn kannalta. Valituista kohdista kiinnitettynä hitsauspoltin ei pääse törmäämään kappaleenkäsittelyrobottiin tai käytettävään tarraimen ja kappaleenkäsittely pystytään tekemään yhdellä kiinnityksellä. Lisäksi kiinnityskohdat ovat riittävän lähellä kappaleiden painopisteitä, jolloin robotti kestää kappaleiden massoista aiheutuvat rasitukset ja robotin hyötykuorma säilyy suurena.

Miehitämättömän hitsaus asettaa robottitarraimelle useita eri vaatimuksia ja nollapistekiinnitin täytti lähes kaikki vaatimuksiin perustuvat toiminnot erinomaisesti.

Arvoanalyysin perusteella nollapistekiinnitin oli muihin tarrainvaihtoehtoinen nähden selkeästi käyttötarkoitukseen soveltuvin. Tiettävästi nollapistekiinnittimiä on käytetty aiemmin robottitarraimena koneistuskeskuksen palettien liikuttamiseen, mutta tutkimuksen aikana ei ilmennyt onko niitä käytetty aiemmin tarraimina myös robottihitsaussovelluksiin.

Kappaleenkäsittelyrobotin apuna tarvitaan hitsattavia kappaleita varten telineet, joiden avulla kappaleet saadaan paikoitettua riittävän tarkasti. Nollapistetarrain itsessään keskittää kappaleen vetotapin avulla ja kappaleisiin asennetut kiinnityslaipat asettavat hitsattavat kappaleet oikeaan kulmaan robotin rannelaipan suhteen.

LÄHTEET

Aaltonen, K. & Torvinen, S. 1997. Konepaja-automaatio. 1. painos. Porvoo: WSOY – Kirjapainoyksikkö. 309 s.

Ahola, H. 1988. Automatisoidun kaarihitsauksen huomioonottaminen tuotteen suunnittelussa. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto. 45 s. Tekninen tiedotus 16/88.

AMF. 2017. Zero-Point-Systems – Catalogue 2017/2018 [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2017]. 172 s. Saatavissa: <http://www.amf.de/en/downloads/current-catalogues/Catalogue-AMF-Zero-Point-Systems.pdf>

Anteroinen, S. J. 2013. Hitsausroboteilla kilpailukykyä. Kuva: Pemamek Oy. Prometalli, 2013: Nro 1. S. 26–30.

Anteroinen, S. J. 2014. Koulun penkille tungosta? Kuva: Timo Mikkola. Prometalli, 2014: Nro 2. S. 38–40.

Avertas Robotics Oy. 2017. Kesla Oyj – Budjettitarjous. [Avertas Robotics Oy:n omistama PDF-tiedosto] [viitattu 23.8.2017].

Big Kaiser. 2016. Unilock Modular Workholding System Vol. 2 [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2017]. 152 s. Saatavissa: <https://us.bigkaiser.com/pdfs/Unilock%20Modular%20Workholding%20System%20Vol.%202.pdf>

Brumson, B. 2012. Robotic Material Handling [verkkodokumentti]. Julkaistu 6.11.2012. [viitattu 31.5.2017]. Saatavissa: https://www.robotics.org/content-detail.cfm/Industrial-Robotics-Featured-Article/Robotic-Material-Handling/content_id/3767

Chen, Z., Song, Y., Zhang, J., Zhang, W., Jiang, L. & Xia, X. 2007. Laser vision sensing based on adaptive welding for aluminum alloy. *Front. Mech. Eng. China*, 2007: Nro 2. S. 218–223.

D'Souza, D. E. & Williams, F. P. 2000 Toward a taxonomy of manufacturing flexibility dimensions. *Journal of Operations Management*, Vol. 18: Nro 5. S. 577–593.

Destaco. 2016. RDH Series [verkkodokumentti]. [viitattu 19.10.2017]. 10 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <https://www.destaco.com/assets/docs/ds/RDH.pdf>

FANUC Robotics. 2005. Through Arc Seam Tracking (TAST) [verkkodokumentti]. [viitattu 22.5.2017]. Tuote-esite. FANUC Robotics America, Inc. 2 s. Saatavissa PDF-tiedostona:

[http://www.fanurobotics.com.mx/inst_educativas/tecnologia/data_sheets/FANUC%20Through%20Arc%20Seam%20Tracking%20\(TAST\).pdf](http://www.fanurobotics.com.mx/inst_educativas/tecnologia/data_sheets/FANUC%20Through%20Arc%20Seam%20Tracking%20(TAST).pdf)

Garašić, I., Kožuh, Z. & Remenar, M. 2015. Sensors and their classification in the fusion welding technology. *Technical Gazette*, Vol. 22: Nro 4. S. 1069–1074.

Gu, W., Xiong, Z. & Wan, W. 2013, Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 69: Nro 1-4. S. 451–460.

Hernesniemi, H. 2007. Menestyvä alihankkija 2015 – Visio ja toimenpiteet. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy. 159 s.

Hiltunen, E. & Purhonen, T. 2008. Robottihitsauksen laatu – monen tekijän summa. *Hitsaustekniikka*, 2008: Nro 4. S. 33–36.

Hiltunen, E. 2009. Robottihitsaus Essenissä. *Hitsaustekniikka*, 2009: Nro 6. S. 29–31.

Hyvönen, J. 2013. Automatisaatio ei ole vaihtoehto, vaan elinehto. Kuva: Fastems Oy Ab. *Prometalli*, 2013: Nro 1. S. 24–25.

Hägele, M., Nilsson, K. & Pires, J. N. 2008. Industrial Robotics. Teoksessa: Siciliano, B. & Khatib, O. Springer Handbook of Robotics. Würzburg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008. S. 963–986.

Jain, A., Jain, P. K., Chan, F. T. S. & Singh, S. 2013. A review on manufacturing flexibility. International Journal of Production Research, Vol. 51: Nro 19. S. 5946–5970.

Kah, P., Shrestha, M., Hiltunen, E. & Martikainen, J. 2015. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, Vol. 10: Nro 13. S. 1–16.

Kesla Oyj. 2015a. 2109. [Kesla Oyj:n www-sivuilla]. [viitattu 4.10.2017]. Saatavissa: <http://www.kesla.com/fi/tuotteet/tuotekategoria/tuote/tavaralajimenetelman-nosturit/2109/>

Kesla Oyj. 2015b. Tekniset tiedot – 2109-81/2109-97 [verkkodokumentti]. [viitattu 5.9.2017]. 4 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.kesla.com/fileadmin/user_upload/kesla/Autonosturit/Datasheetit/Datasheet_KSL_2109.pdf

Kesla Oyj. 2016. Autonosturit [verkkodokumentti]. [viitattu 5.10.2017]. 24 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.kesla.com/fileadmin/user_upload/kesla/Brochures/KESLA_Truck_Cranes_FIN_SWE_ENG.pdf

Kesla Oyj. 2017. Kesla - metsäteknologian moniosaaja. [Kesla Oyj:n www-sivuilla]. [viitattu 4.10.2017]. Saatavissa: <http://www.kesla.fi/fi/yritys/>

Kuivanen, R. 1999. Robotiikka. Vantaa: Talentum Oyj/MetalliTekniikka. 188 s.

KUKA. 2014a. KUKA Robots for Medium Payloads [verkkodokumentti]. [viitattu 29.5.2017]. 36 s. Saatavissa PDF-tiedostona: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_pb_mittlere_tl_en.pdf

KUKA. 2014b. KUKA Robots for Heavy Payloads [verkkodokumentti]. [viitattu 29.5.2017]. 28 s. Saatavissa PDF-tiedostona: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/9cb8e311bfd744b4b0eab25ca883f6d3/kuka_pb_schwere_tl_en.pdf

KUKA. 2016. Robots – KR 600 FORTEC [verkkodokumentti]. [viitattu 10.8.2017]. 117 s. Saatavissa PDF-tiedostona: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/48ec812b1b2947898ac2598aff70abc0/spez_kr_600_fortec_en.pdf

KUKA. 2017. KUKA Positioners. [KUKA AG:n www-sivuilla]. [viitattu 31.5.2017]. Saatavissa: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-periphery/positioners>

Lin, W. & Luo, H. 2015. Robotic Welding. Teoksessa: Nee, Y. C. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. Yang, G. Lontoo: Springer London Heidelberg New Youk Dordrecht. 2015. S. 2403–2444.

Lincoln Electric. 2017. Robotics: Joint Sensing Technologies. [Lincoln Electricin www-sivuilla]. [viitattu 30.5.2017]. Saatavissa: <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/intelligent-robotic-detail.aspx>

Linker, A. 2017. Information for Master's Thesis about AMF Zero-Point-Systems [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Hugo Lappalainen, Petri Aro (cc). Lähetetty 16.8.2017 klo 12:06 (GMT +0300). Liitetiedosto: "Catalogue-AMF-Zero-Point-Systems2.bmp".

Madigan, R. B., Barborak, D. M., Ananthanarayanan, V., Castner, H. R., Heckendorn, L. C., Ludewig, H. W. & Powers, D. E. 2001. Monitoring and Control of Welding and Joining Processes. Teoksessa: Jenney, C. L. & O'Brien A. Welding Handbook. 9. painos. Miami: American Welding Society. 2001. S. 421–449. Volume 1.

Miller Electric. 2012. New Robotic G3 Material Handling Robots from Miller Welding Automation Introduces Harmony in the Robotic Welding Cell. [Miller Electricin www-sivuilla]. [viitattu 1.6.2017]. Saatavissa: <https://www.millerwelds.com/about/news-releases/new-robotic-g3-material-handling-robots-from-miller-welding-automation-introduces-harmony-in-the-robotic-welding-cell>

Monkman, G. J., Hesse, S., Steinmann, R. & Schunk, H. 2007. Robot Grippers. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 463 s.

Muhammad, J., Altun, H. & Abo-Serie, E. 2017. Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88: Nro 1. S. 127–145.

Netzer, M. 2017. Information for Master's Thesis about STARK SPEEDY [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Hugo Lappalainen. Lähetetty 16.8.2017 klo 17:31 (GMT +0300). Liitetiedosto: "WM-020-371-02-en_Innovationen_Flyer_web.pdf".

Noruk, J. S., Broman, R. E., Gross, L. K., Hansen, T. B., Mangold, V. L., Morris, T. B., Nelson, S. D., Noch, R. F., Phillips, J. S., Weir, M. M. & Woodman, C. L. 2001. Mechanized, Automated and Robotic Welding. Teoksessa: Jenney, C. L. & O'Brien A. *Welding Handbook*. 9. painos. Miami: American Welding Society. 2001. S. 451–482. Volume 1.

Olanterä, J-K. 2017a. VS: Kysymyksiä AMF nollapistekiinnittimistä [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Hugo Lappalainen. Lähetetty 31.8.2017 klo 13.24 (GMT +0300).

Olanterä, J-K. 2017b. AMF nollapiste tarjous. [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Hugo Lappalainen. Lähetetty 25.10.2015 klo 08.42 (GMT +0300). Liitetiedostot: "AMF clamping station tarjous.pdf", "K20.3 sylinteri.pdf", "Robotermodul.jpg", "6206S1-20LA-005.step".

Panasonic. 2017. Panasonic Handling Robots. [Panasonicin www-sivuilla]. [viitattu 1.6.2017]. Saatavissa: <https://www.panasonicfa.com/content/panasonic-handling-robots>

Pashkevich, A. 2009. Welding Automation. Teoksessa: Nof, S. Y. Springer Handbook of Automation. Würzburg: Springer Dordrecht Heidelberg London New York. 2009. S. 1027–1040.

Pires, J. N, Loureiro, A. & Bölmsjo, G. 2006. Welding Robots – Technology, System Issues and Applications. Lontoo: Springer-Verlag London Limited. 180 s.

Rissanen, J. 2017. VL: Kysymyksiä ZeroClamp nollapistekiinnittimistä [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Hugo Lappalainen. Lähetetty 31.8.2017 klo 15.38 (GMT +0300). Liitetiedosto: ”Zero_monitoring.pdf”.

Roemheld. 2017. Zero point clamping system SPEEDY airtec 1 [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2017]. 28 s. Saatavissa: http://www.stark-inc.com/pdf/pdf_2017/en/WM-020-288-02-en.pdf

Sariola, H. 2017. VS: Kysymyksiä DockLock nollapistekiinnittimistä [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Hugo Lappalainen. Lähetetty 1.9.2017 klo 10.18 (GMT +0300). Liitetiedostot: ”VB-Dock-Lock-Sonderloesungen-und-Druckaggreate.pdf”, ”VB-Dock-Lock-manuelle-Fertigung.pdf”, ”DockLock 2017.pdf”.

Servo-Robot. 2009. SERVO-ROBOT Develops Smart Seam Finding Solutions for Robotic Arc Welding Applications. [Servo-Robotin www-sivuilla]. Päivitetty 1.3.2009. [Viitattu 29.11.2017]. Saatavissa: <https://servo-robot.com/servo-robot-develops-smart-seam-finding-solutions-for-robotic-arc-welding-applications/>

SFS-EN ISO 10218-1. 2011. Robotit ja robotiikkalaitteet. Turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Teollisuusrobotit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 89 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

Shivanand, H. K., Benal, M. M. & Koti, V. 2006. Flexible Manufacturing System. New Delhi: New Age International Ltd. 165 s.

Schunk. 2015. SCHUNK Grippers [verkkodokumentti]. [viitattu 13.9.2017]. 1790 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://flippingbooks.schunk.com/flippingbook/Schunk_Greifmodule_EN/files/assets/comm on/downloads/schunk-greifmodule-katalog-en-2015.pdf

Schmalz. 2016. Vacuum Components. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.9.2017]. 762 s. Saatavissa PDF-tiedostona: https://cdn.schmalz.com/media/05_services/catalog/vt/components-catalog.pdf

System 3R. 2015. Delphin – modular Clamping System [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2017]. 76 s. Saatavissa: [http://www.gfms.com/content/dam/gfac/3R/Tooling/PDF-Catalogues/T-2482-E_\(GFMS\)_1508_72dpi.pdf](http://www.gfms.com/content/dam/gfac/3R/Tooling/PDF-Catalogues/T-2482-E_(GFMS)_1508_72dpi.pdf)

Tuunainen, A. 2015. PathMate – Käyttäjätystävällinen hitsausrobotti. Hitsaustekniikka: 2015: Nro 2-3B. S. 24–25.

Vischer & Bolli. 2014. Machining and workholding [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2017]. 396 s. Saatavissa: http://www.vb-tools.com/Flipviewer/Spannbuch_GmbH-2015_oP_output/web/flipviewerxpress.html

Väyrynen, J. 2015. Uudet lujat Strenx-rakenneteräkset. Hitsaustekniikka, 2015: Nro 5. S. 10-16.

Wolf, A., Steinmann, R. & Schunk, H. 2005. Grippers in Motion – The Fascination of Automated Handling Tasks. Italia: Springer-Verlag Berling Heidelber. 248 s.

Xu, Y., Lv, N., Fang, G., Du, S., Zhao, W., Ye, Z. & Chen, S. 2017. Welding seam tracking in robotic gas metal arc welding. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 248. S. 18–30.

Ye, Z., Fang, G., Chen, S. & Zou, J. J. 2013. Passive vision based seam tracking system for pulse-MAG-welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 67, Nro 9. S. 1987–1996.

ZeroClamp. 2017. General Catalogue [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2017]. 64 s. Saatavissa: https://adobeindd.com/view/publications/1dfb96fd-fc18-4288-92ee-55e46c791fe4/1/publication-web-resources/pdf/Katalog_A4_neu.pdf

Zimmer Group. 2017. Handling technology 1 [verkkodokumentti]. [viitattu 19.10.2017]. 882 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.zimmer-group.de/downloads/hht/mkt000002-02-b_kt-hht1_-sen_-ain_-v3.pdf

Pylvään hitsauspiirustus ja osaluettelo.

LIITE SAATAVISSA TOIMEKSIANTAJALTA

Tukijalkapalkin hitsauspiirustus ja osaluettelo.

LIITE SAATAVISSA TOIMEKSIANTAJALTA

Kääntölaitteen rungon hitsauspiirustus ja osaluettelo.

LIITE SAATAVISSA TOIMEKSIANTAJALTA

Vääntömomentit ja lukitusvoiman kaava.

Vääntömomenttien laskukaava:

$$M = Fr = mgr$$

Kääntölaite:

Vääntömomentti pisteessä A xy-suunnassa:

$$M_{Axy} = 260 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,155 \text{ m} \approx 395 \text{ Nm}$$

Vääntömomentti pisteessä A z-suunnassa:

$$M_{Az} = 260 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,352 \text{ m} \approx 898 \text{ Nm}$$

Vääntömomentti pisteessä B xy-suunnassa:

$$M_{Bxy} = 260 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,155 \text{ m} \approx 395 \text{ Nm}$$

Vääntömomentti pisteessä B z-suunnassa:

$$M_{Bz} = 260 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,174 \text{ m} \approx 444 \text{ Nm}$$

Pylväs:

Vääntömomentti pisteessä A xy-suunnassa:

$$M_{Axy} = 250 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0 \text{ m} \approx 0 \text{ Nm}$$

Vääntömomentti pisteessä A z-suunnassa:

$$M_{Az} = 250 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,161 \text{ m} \approx 395 \text{ Nm}$$

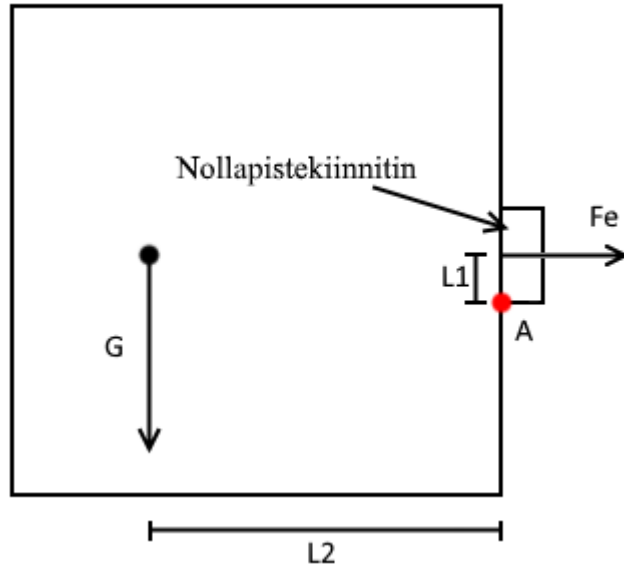
Vääntömomentti pisteessä B xy-suunnassa:

$$M_{Bz} = 250 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,038 \text{ m} \approx 93 \text{ Nm}$$

Vääntömomentti pisteessä B z-suunnassa:

$$M_{Bxy} = 250 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,884 \text{ m} \approx 2168 \text{ Nm}$$

Yhdeltä nollapistekiinnittimeltä vaadittavan lukitusvoiman lasku yhtälö:



$$\sum M_A = 0$$

$$M_E = M_G$$

$$F_E L_1 = G L_2$$

$$F_E = G \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot n$$

Robotin rannelaippaan kohdistuvat vääntömomentit nollapistetarraimen ja kiinnityslaipan kanssa.

Kääntölaite:

Vääntömomentti robotin ranteessa xy-suunnassa:

$$M_{xy} = 260 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,155 \text{ m} \approx 395 \text{ Nm}$$

Vääntömomentti robotin ranteessa z-suunnassa:

$$M_z = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 260 \text{ kg} \cdot (0,174 \text{ m} + 0,055 \text{ m} + 0,025 \text{ m}) + 13 \text{ kg} \cdot (0,012 \text{ m} + 0,055 \text{ m}) + 12 \text{ kg} \cdot 0,022 \text{ m} \approx 659 \text{ Nm}$$

Pylväs:

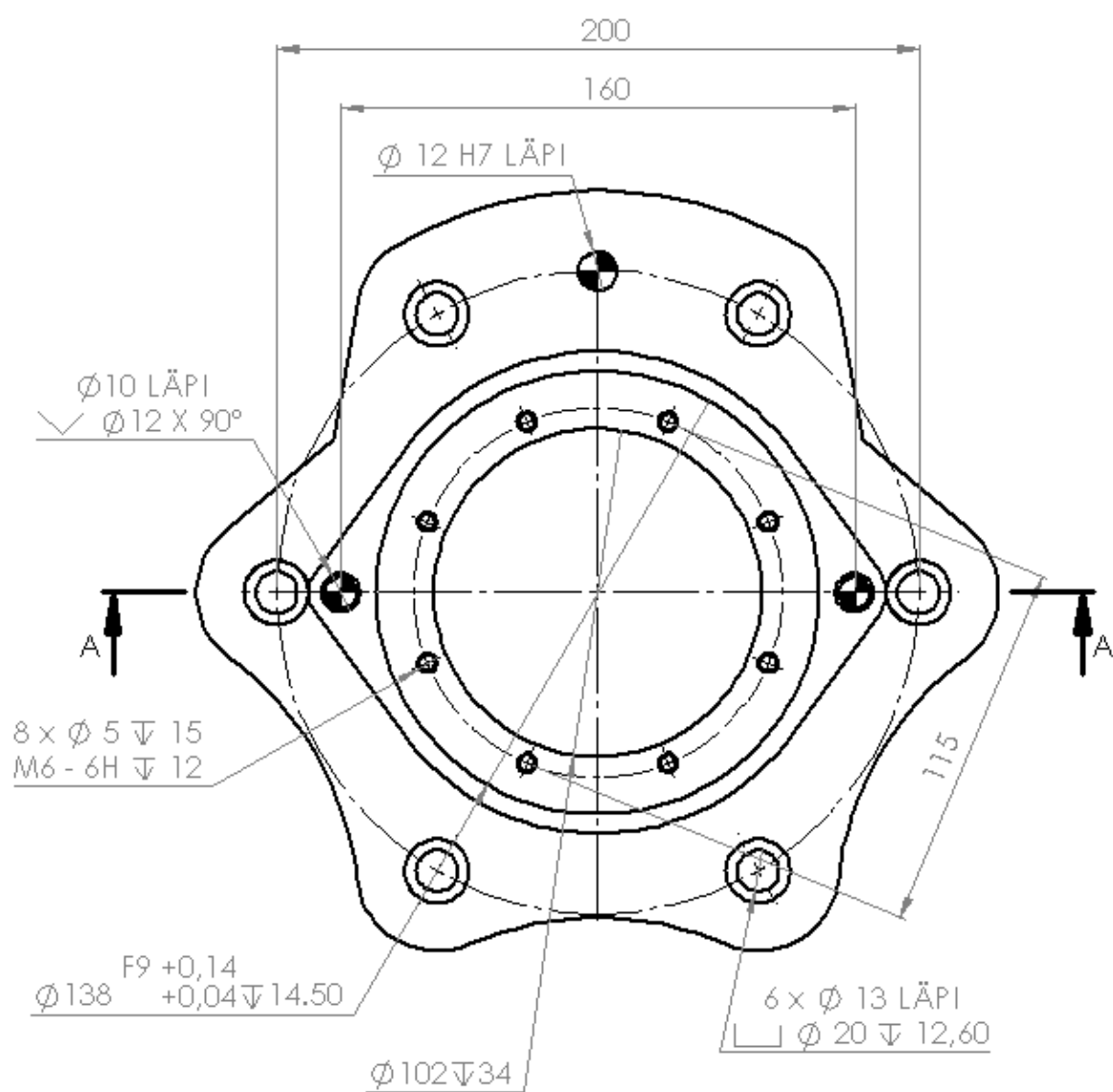
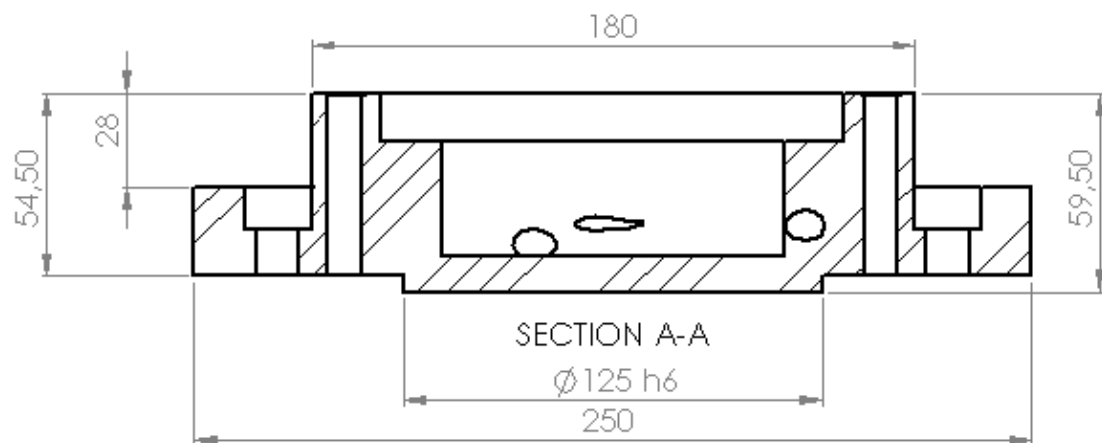
Vääntömomentti robotin ranteessa xy-suunnassa:

$$M_{xy} = 250 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,128 \text{ m} \approx 319 \text{ Nm}$$

Vääntömomentti robotin ranteessa z-suunnassa:

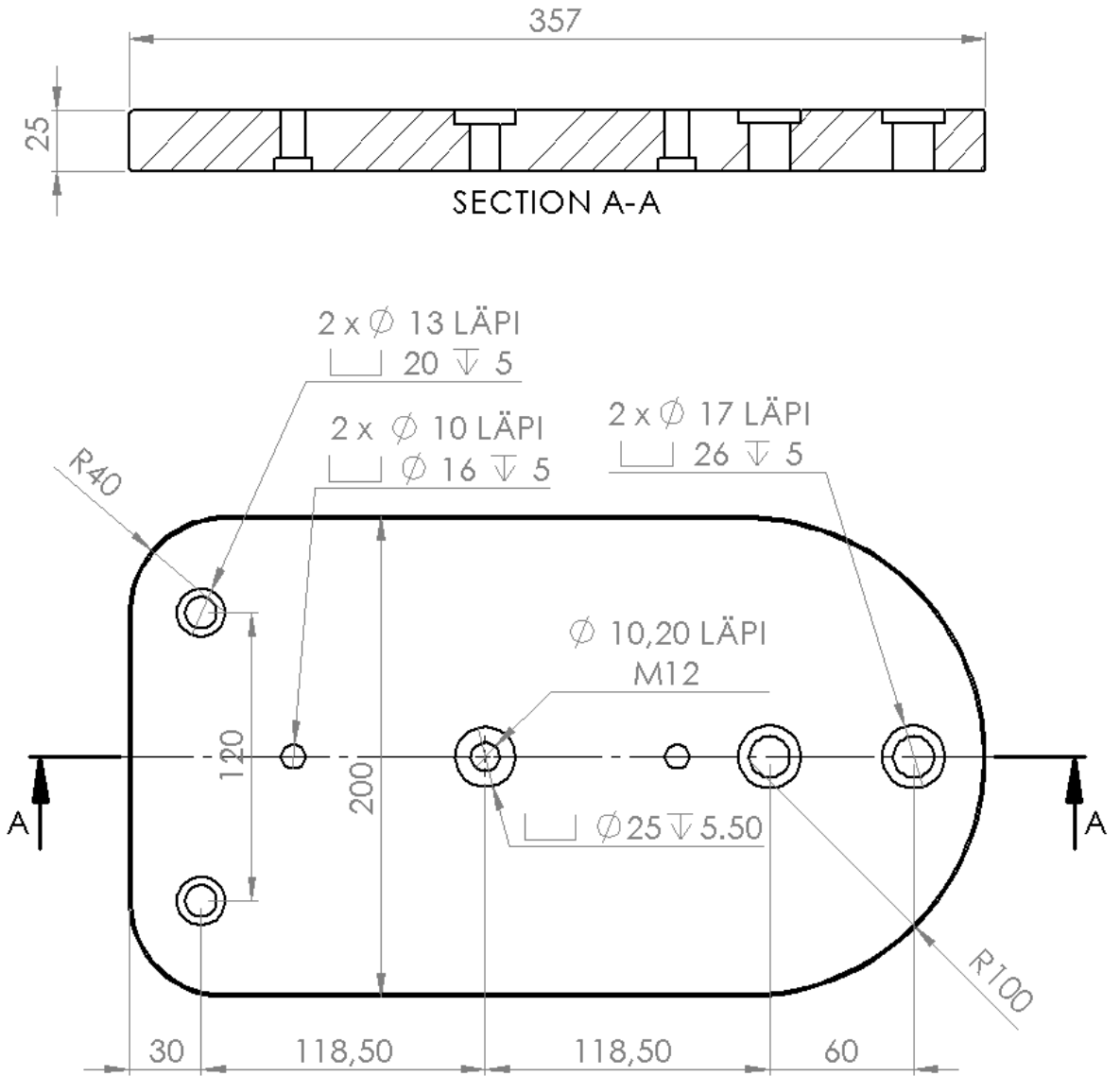
$$M_z = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 250 \text{ kg} \cdot (0,161 \text{ m} + 0,055 \text{ m} + 0,025 \text{ m}) + 13,2 \text{ kg} \cdot (0,0121 \text{ m} + 0,055 \text{ m}) + 12 \text{ kg} \cdot 0,022 \text{ m} \approx 602 \text{ Nm}$$

Nollapistetarrainlaippa.

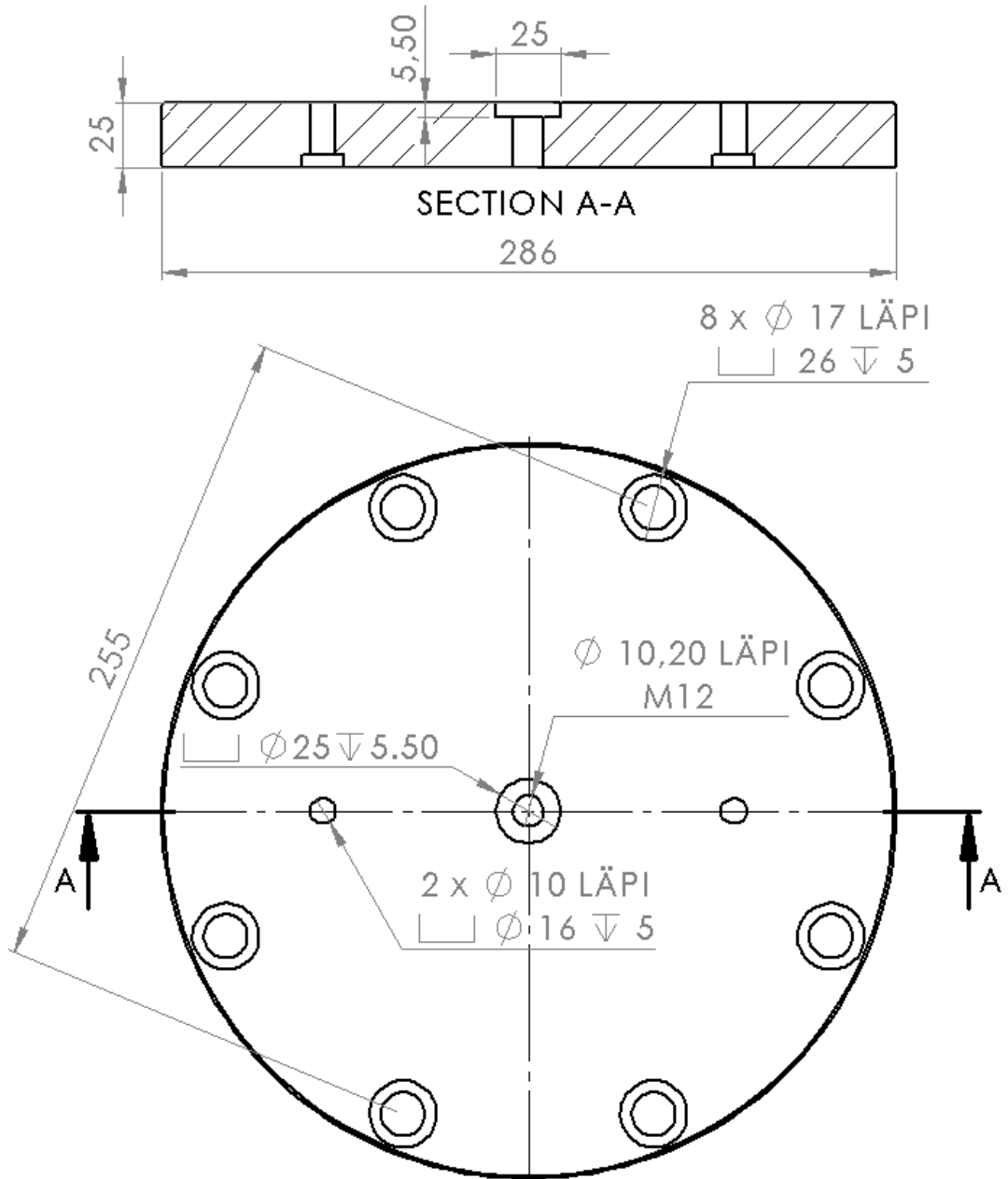


Vetotappien kiinnityslaipat.

Pylvään kiinnityslaippa:

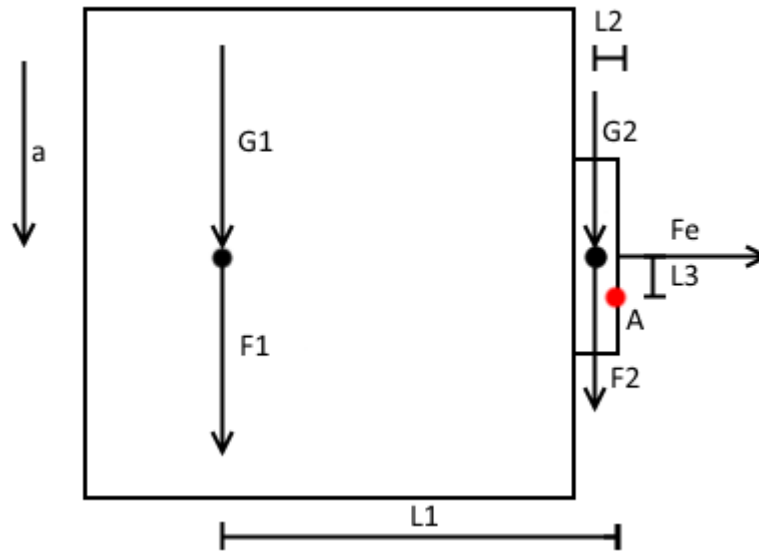


Kääntölaitteen rungon kiinnityslaippa:



Robotin suurimmat sallitut kiihtyvyydet.

Kun tarkkaillaan nollapistekiinnittimen lukitusvoimaa:



$$\sum M_A = 0$$

$$F_1 L_1 + F_2 L_2 + G_1 L_1 + G_2 L_2 - F_E L_3 = 0$$

$$F_1 L_1 + F_2 L_2 = F_E L_3 - G_1 L_1 - G_2 L_2$$

$$m_1 a L_1 + m_2 a L_2 = F_E L_3 - m_1 g L_1 - m_2 g L_2$$

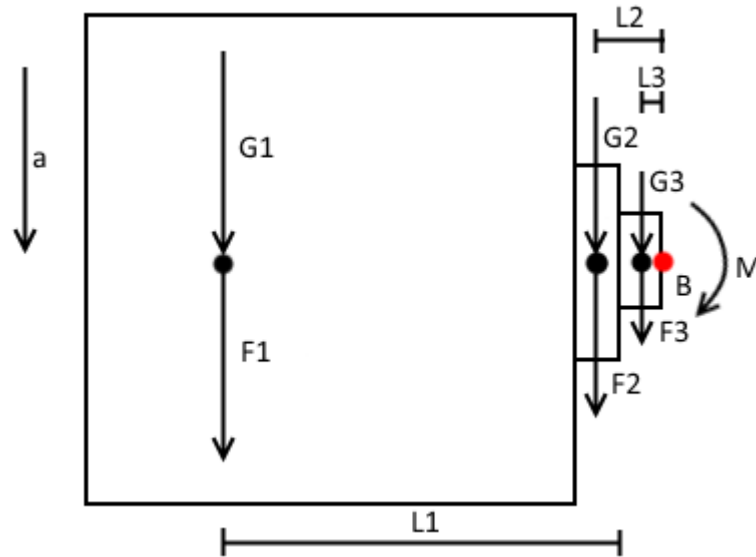
$$a(m_1 L_1 + m_2 L_2) = F_E L_3 - g(m_1 L_1 - m_2 L_2)$$

$$a = \frac{F_E L_3 - g(m_1 L_1 - m_2 L_2)}{m_1 L_1 + m_2 L_2}$$

$$a = \frac{F_E L_3}{m_1 L_1 + m_2 L_2} - g$$

$$a_1 = \frac{17000 \text{ N} \cdot 0,069 \text{ m}}{260 \text{ kg} \cdot (0,174 \text{ m} + 0,025 \text{ m}) + 13 \text{ kg} \cdot 0,012 \text{ m}} - 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 12,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Kun tarkkaillaan rannelaipan vääntömomentin kestoa:



$$\sum M_B = 0$$

$$M - G_1 L_1 - G_2 L_2 - G_3 L_3 - F_1 L_1 - F_2 L_2 - F_3 L_3 = 0$$

$$F_1 L_1 + F_2 L_2 + F_3 L_3 = M - G_1 L_1 - G_2 L_2 - G_3 L_3$$

$$m_1 a L_1 + m_2 a L_2 + m_3 a L_3 = M - m_1 g L_1 - m_2 g L_2 - m_3 g L_3$$

$$a(m_1 L_1 + m_2 L_2 + m_3 L_3) = M - g(m_1 L_1 - m_2 L_2 - m_3 L_3)$$

$$a = \frac{M - g(m_1 L_1 - m_2 L_2 - m_3 L_3)}{m_1 L_1 + m_2 L_2 + m_3 L_3}$$

$$a = \frac{M}{m_1 L_1 + m_2 L_2 + m_3 L_3} - g$$

a_2

$$= \frac{1766 \text{ Nm}}{260 \text{ kg} \cdot (0,174 \text{ m} + 0,055 \text{ m} + 0,025 \text{ m}) + 13 \text{ kg} \cdot (0,055 \text{ m} + 0,012 \text{ m}) + 12 \text{ kg} \cdot 0,022 \text{ m}} - 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 16,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$