

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

KONTTINOSTURIN NOSTOVAIHTTEEN HITSATUN KOTELON
VALMISTUSPROSESSIN KEHITTÄMINEN

DEVELOPING THE MANUFACTURING PROCESS OF A WELDED GEAR
HOUSING IN A RUBBER-TIRE GANTRY CRANE

Lappeenrannassa 24.4.2014

Simo Knuuttila

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 1.1 | Tutkimuksen taustaa | 8 |
| 1.2 | Tutkimusongelma | 8 |
| 1.3 | Tavoitteet | 8 |
| 1.4 | Tutkimuskysymykset | 8 |
| 1.5 | Rajaukset..... | 8 |
| 2 | TUTKIMUSMENETELMÄT | 9 |
| 2.1 | Valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu | 9 |
| 2.2 | Ongelman määrittäminen ja tehtävänasettelun selvittely | 11 |
| 2.3 | Eri työvaiheiden kustannusten määrittäminen | 12 |
| 2.3.1 | Polttoleikkaustyövaihe ja sen kustannukset..... | 12 |
| 2.3.2 | Särmästyövaihe ja sen kustannukset | 13 |
| 2.3.3 | Hitsaustyövaihe ja sen kustannukset..... | 14 |
| 2.3.4 | Jännityksenpoistohehkutustyövaihe ja sen kustannukset | 16 |
| 2.3.5 | Läpimenoaika ja kokonaisvalmistuskustannukset | 17 |
| 2.4 | Kustannusarvioiden tarkkuus..... | 18 |
| 3 | VAIHTEEN KOTELON VALMISTUSYSTÄVÄLLISYYDEN PARANTAMINEN DFMA -PERIAATTEITA HYVÄKSIKÄYTTÄEN | 19 |
| 3.1 | Ongelman määrittäminen ja ideointi..... | 19 |
| 3.2 | Polttoleikkaus..... | 19 |
| 3.3 | Särmäys ja hitsaus..... | 21 |
| 3.4 | Jännityksenpoistohehkututus | 24 |
| 4 | TULOKSET | 25 |
| 4.1 | Polttoleikkaustyövaiheen kehitysratkaisu | 25 |
| 4.2 | Särmäys- ja hitsaustyövaiheiden kehitysratkaisu | 25 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.3 | Eri työvaiheiden kustannukset ja läpimenoajat | 26 |
| 4.4 | Kokonaisvalmistuskustannukset ja läpimenoaika | 27 |
| 5 | TULOSTEN TULKINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 29 |
| | LÄHTEET | 32 |

LIITTEET

Liite I. Vaatimuslista

Liite II. Polttoleikattavat geometriat nimellismittoineen

Liite III. Polttoleikkausta varten tehty matlab - koodi

Liite IV. Palkka- ja yleiskustannusten arvioinnin apuna käytetyt arvot ja valitut kustannusmuuttujat

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

| | |
|----------------------|--|
| a | Hitsin a-mitta [mm] |
| DFA | Design For Assembly, asennusystävällinen suunnittelu. |
| DFM | Design For Manufacturing, valmistusystävällinen suunnittelu. |
| DFMA | Design For Manufacturing and Assembly, valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu. |
| $C_{hehkkutus}$ | Hehkutustyövaiheen kustannukset [€] |
| $C_{hitsaus}$ | Hitsaustyövaiheen kustannukset [€] |
| C_{kk} | Polttoleikkauksen kuumennuskaasun aiheuttamat kustannukset [€] |
| C_{lk} | Polttoleikkauksen leikkauskaasun aiheuttamat kustannukset [€] |
| C_{MfC} | Tuotteen kokonaisvalmistuskustannukset [€] |
| C_o | Polttoleikkauslaitteiston aiheuttamat kustannukset [€/h] |
| $C_{polttoleikkaus}$ | Polttoleikkaukuskustannukset [€] |
| C_{sa} | Uuden suuttimen sisäänajoaika [h] |
| C_{sk} | Polttoleikkauslaitteiston sähkökulutuksesta aiheutuvat kustannukset [€/h] |
| $C_{särmäys}$ | Särmäystyövaiheen kustannukset [€] |
| CPL | Cost Per Length, hitsauskustannukset pituusyksikköä kohden |
| e_m | Hitsauslangan massa pituusyksikköä kohden [kg/m] |
| e_{ϵ} | Hitsauslangan kustannukset pituusyksikköä kohden [€/m] |
| FM_{length} | Filler Material, hitsauksen lisäaineen kustannukset pituusyksikköä kohden, [€/m] |
| G_f | Suojakaasun virtausnopeus [m^3/s] |
| G_{ϵ} | Suojakaasun kustannukset tilavuusyksikköä kohden [ϵ / m^3] |
| K | Leikattava pituus [mm] |
| L | Length, särmättävän geometrian nimellispituus [cm] |
| ΣL_{ai} | Hitsien pituudet a-mitoittain [m] |
| L&O | Labour and Overhead, hitsauksen palkka- ja yleiskustannukset aikayksikköä kohden [€/h] |

| | |
|-----------------|--|
| $L\&O_{length}$ | Labour and Overhead, hitsauksen palkka- ja yleiskustannukset pituusyksikköä kohden [€/m] |
| $M_{hehkutus}$ | Hehkutuslaitteiston ja sen operoinnin aiheuttamat kustannukset aikayksikköä kohden [€/h] |
| M_j | Hehkutettavan kappaleen jäähtymisestä aiheutuvat kustannukset aikayksikköä kohden [€/h] |
| M_{pl} | Polttoleikkuslaitteiston ja sen operoinnin aiheuttamat kustannukset aikayksikköä kohden, [€/h] |
| $M_{särmäys}$ | Särmäyslaitteiston ja sen operoinnin aiheuttamat kustannukset aikayksikköä kohden, [€/h] |
| N_b | Särmäysten lukumäärä särmättävässä kappaleessa |
| OF | Operating Factor, hitsauksen toimintakerroin |
| RTG | Rubber-Tire Gantry Crane, kumirenkainen pukkinosturi |
| t_{dt} | Downtime eli aika, joka kuluu työvaiheessa, vaikka varsinaista tehtävää ei edistetä lainkaan [h] |
| s | Tuotteessa käytettävä suurin levynvahvuus [mm] |
| SG_{length} | Shielding Gas, hitsauksen suoja kaasun aiheuttamat kustannukset pituusyksikköä kohden [€/m] |
| $T_{leikkaus}$ | Polttoleikkaukseen kuluva aika [h] |
| T_{pito} | Jännityksenpoistohehkutusprosessin pito- lämpötila [C°] |
| $T_{särmäys}$ | Särmäystyövaiheeseen kuluva aika [s] |
| T_{tot} | Tuotteen läpimenoaika [h] |
| t_{av} | Polttoleikkattavan aihion vaihtoon kuluva aika [s] |
| t_{ek} | Polttoleikkattavan aihion esikuumennukseen kuluva aika [s] |
| t_j | Jännityksenpoistohehkutuksen jäähtymisaika [h] |
| t_k | Jännityksenpoistohehkutuksessa käytetty kuumennusaika [h] |
| $t_{kestoikä}$ | Yhden leikkaussuuttimen kestoikä [h] |
| t_l | Leikkausaika [s] |
| t_p | Jännityksenpoistohehkutuksen pitoaika pito- lämpötilassa [min] |
| t_{sv} | Leikkaussuuttimen vaihtoon kuluva aika, [h] |
| v_{la} | Langansyöttönopeus [mm/min] |
| v_w | Hitsausnopeus [mm/min] |

W

Width, Särmättävän geometrian nimellisleveys [cm]

1 JOHDANTO

Yksi tuotesuunnittelun suurimpia haasteita on valmistuskustannusten minimointi tuotteen laadun kärsimättä. Mahdollisimman alhaisten valmistuskustannusten saavuttamiseksi on ensiarvoisen tärkeää osata ottaa huomioon valmistukseen liittyvät seikat jo suunnitteluvaiheessa eikä vasta tuotteen valmistusprosessin aikana esimerkiksi valmistajalta saadun palautteen perusteella. Valmistuksen kannalta huomioitavia seikkoja ovat esimerkiksi käytetty materiaali, käytetyt valmistusmenetelmät ja valmistukseen kuluva aika. Optimaaliseen valmistettavuuteen pyrkivää suunnittelijan näkökulmaa kutsutaan valmistus- ja kokoonpanoystävälliseksi suunnitteluksi DFMA (Design For Manufacturing and Assembly). (Kekki, 2013a; Ulrich & Eppinger, 2008, s.229.)

Tässä kandidaatintyössä keskitytään kuvassa 1 esitetyn konttinosturin nostovaihteen kotelon valmistusprosessin kustannustehokkuuden parantamiseen päätyövaiheina polttoleikkaus, särmäys, hitsaus ja jännityksenpoistohehkutus. Työn toimeksiantaja on Konecranes Finland Oy.



Kuva 1. RTG - nosturi, johon tutkittava nostovaihte sijoitetaan (Kekki, 2013c).

1.1 Tutkimuksen taustaa

Konecranes Finland Oy on osa Konecranes-konsernia, joka on yksi maailman johtavista nostolaiteratkaisujen toimittajista ja -valmistajista. Tutkimuksessa käsiteltäviä nostovaihteita käytetään voimansiirtoketjussa, jonka tarkoituksena on yhdistää köysitela ja sähköinen nostomoottori. Tuotteesta saatavan katteen maksimoimiseksi laitteen hitsatun kotelon valmistuksen kustannustehokkuus on ensiarvoisen tärkeää. (Kekki, 2013b.)

1.2 Tutkimusongelma

Tämän kandidaatintyön tutkimusongelma syntyy valmistettavan kappaleen laadun ja valmistuskustannusten välisestä ristiriidasta: Halutaan selvittää, miten käytettäviä työvaiheita voidaan muuttaa valmistusprosessin kustannustehokkuuden parantamiseksi niin, että tuotteeseen liittyvät laatuvaatimukset täyttyvät.

1.3 Tavoitteet

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on pienentää tutkittavan kotelon arvioituja valmistuskustannuksia ja läpimenoaikaa viidellä prosentilla.

1.4 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksen pääkysymys on miten konttinosturin nostovaihteen kotelon päätyövaiheita voidaan muuttaa paremman kustannustehokkuuden saavuttamiseksi tuotteen laatuvaatimukset huomioiden. Muita, tarkentavia kysymyksiä ovat:

- Voidaanko polttoleikkausprosessia lyhentää ajallisesti?
- Voidaanko tuotteessa valmistettavien hitsien lukumäärää ja pituutta pienentää ?
- Voidaanko tuotteen jännityksenpoistohehkutukseen käytettyä aikaa lyhentää?
- Voidaanko tuotteen kokonaisläpimenoaikaa lyhentää?
- Kuinka suuri kustannushyöty voidaan aikaansaada seuraamalla DFMA-periaatteita?

1.5 Rajaukset

Tämän työn sisältö rajataan koskemaan tutkittavan kotelon päätyövaiheita polttoleikkaus, särmäys, hitsaus ja jännityksenpoistohehkutus. Työn sisällöstä rajataan tietoisesti pois käytettävän hitsausprosessin valinta, materiaalinvalintaprosessi ja lujuustarkastelut.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

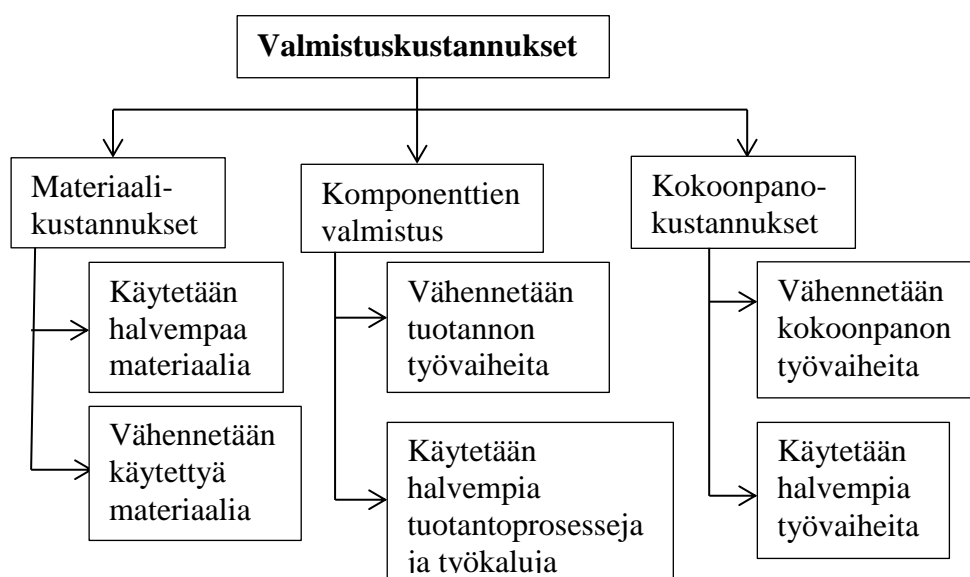
Tässä luvussa esitetään tutkimusmenetelmät, joita sovellettiin johdantoluvussa esitetyn nostovaihteen koteloon sen valmistusystävällisyyden parantamiseksi.

2.1 Valmistus- ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu

Valmistus- ja kokoonpanoystävällisessä suunnittelussa pyritään valmistuskustannusten ja kokoonpanoajan pienentämiseen siten, että kehitettävän tuotteen laatu paranee (Ulrich & Eppinger, 2008, s.229). DFMA yhdistää valmistusystävällisen suunnittelun DFM (Design For Manufacturing) ja kokoonpanoystävällisen suunnittelun DFA (Design For Assembly) (Kalinowski, 2007, s. 14). Kokoonpanoystävällisessä suunnittelussa kyseenalaistetaan jokaisen osan tarpeellisuus konstruktiossa ja siten poistetaan konstruktiosta komponentit, jotka eivät ole tuotteen kokonaistoimintojen kannalta välttämättömiä (Kalinowski, 2007, s. 14; Eskelinen & Karsikas, 2013, s.26).

Kehitettävän tuotteen yksinkertaistaminen on mahdollista esimerkiksi sulauttamalla konstruktion toimivuuden kannalta neutraaleja osia toisiinsa, jolloin erilliset osat eivät tarvitse kokoonpanoa lainkaan (Ulrich & Eppinger, 2008, s.224). Lisäksi eri osien kokoonpantavuutta voidaan yksinkertaistaa käyttämällä itseohjautuvaa tuoterakennetta: tällöin suoritettavan kokoonpanotyön vaatima tarkkuus ja aika pienenevät. Yleisin kokoonpanon itseohjautuvuutta lisäävä komponentin ominaisuus on viiste, joka ohjaa esimerkiksi ylhäältäpäin asennettavaa komponenttia kohti tavoiteltavaa asemaa kokoonpanossa. Painovoimaa hyväksikäyttävää, ylhäältä alaspäin suuntautuvaa kokoonpanoliikettä tulisi suosia myös siksi, että se edesauttaa asentajan kykyä nähdä sijainti, johon komponentti tulee liikkeellä saattaa. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s.88,91; Ulrich & Eppinger, 2008, s.225 - 226.) Lisäksi kokoonpanoprosessin vaativuustason alentamiseksi voidaan linearisoida komponentin kokoonpanoon käytettäviä liikkeitä esimerkiksi korvaamalla hitaat, kiertoliikkeellä kokoonpantavat ruuvit sokalla tai tapilla. Komponentin koolla on myös merkitystä kokoonpanon helpottamisessa: liian suuret komponentit vaativat pahimmillaan erillisiä työkaluja, kuten esimerkiksi nostureita, kokoonpanoprosessiinsa. (Ulrich & Eppinger, 2008, s.226; Eskelinen & Karsikas, 2013, s.88.)

Valmistusystävällisessä suunnittelussa puolestaan pyritään tunnistamaan kustannuksia aiheuttavat seikat eri valmistusprosesseissa ja laskemaan kustannusvaikutuksen suuruus. Eri prosessien kustannusvaihtoehtoja vertaamalla voidaan valita kustannustehokkaimmat vaihtoehdot tuotteen yksittäisten komponenttien valmistuskustannusten minimoimiseksi. (Huang, 1996, s.22.) Kokonaisvalmistuskustannuksiin voidaan vaikuttaa myös suoraan vähentämällä yhden komponentin valmistamiseen käytettyjen työvaiheiden määrää (Ehrlenspiel & Kiewert & Lindemann, 2007, s.144). Valmistuskustannuksiin vaikuttamisen keinoja havainnollistaa kuva 2.



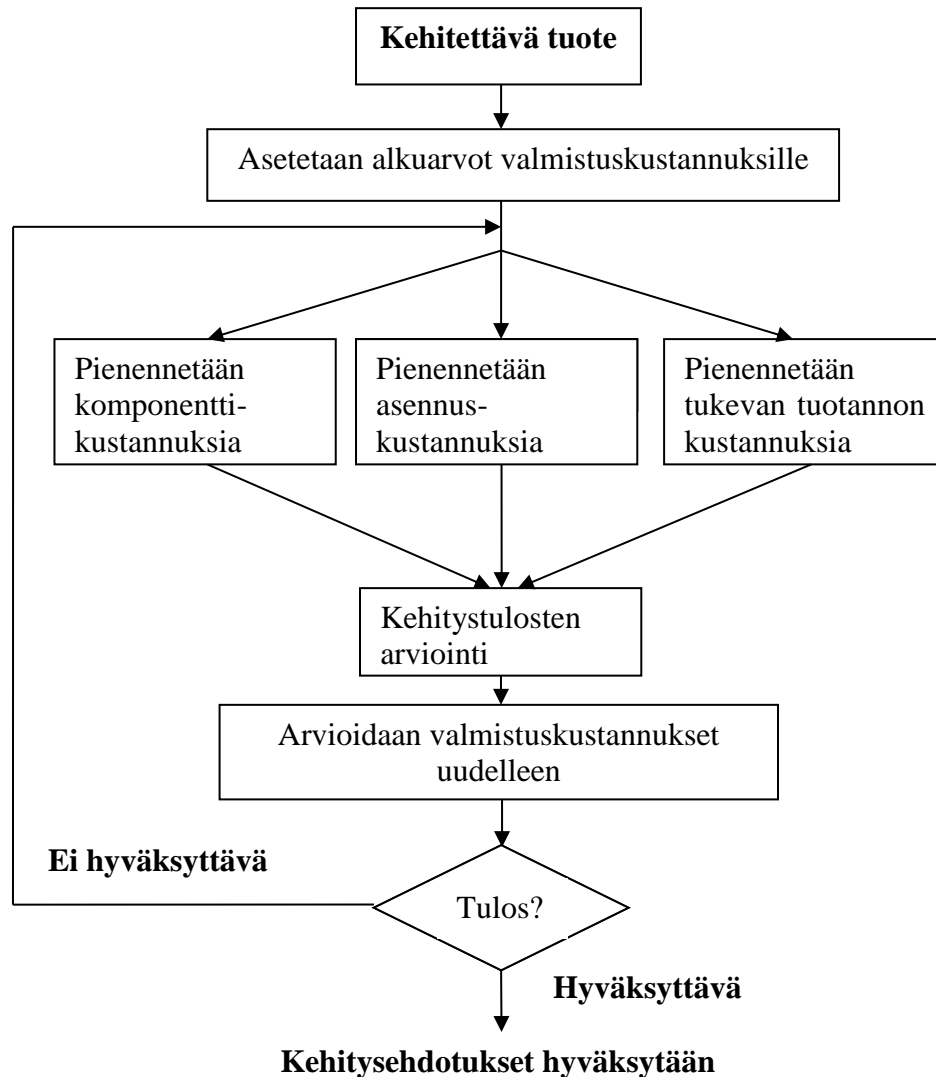
Kuva 2. Keinoja tuotteen valmistuskustannusten pienentämiseksi. (Mukaiillen: Ehrlenspiel et al., 2007, s.144.)

DFMA- periaatteita käytetään pääasiassa kolmeen tarkoitukseen, jotka ovat (Boothroyd & Dewhurst & Knight, 2011, s.1.):

- kilpailevien tuotteiden arvioiminen
- tuoterakenteen yksinkertaistaminen ja sitä kautta valmistus- ja kokoonpanokustannusten alentaminen sekä
- kustannusten arvioiminen esimerkiksi alihankkijan palveluita vertailtaessa.

Valmistuksen huomioonottava suunnitteluprosessi alkaa eriteltyjen kustannusalkuarvojen määrittämisellä, jotta voidaan tunnistaa eniten kustannuksia aiheuttavat piirteet ja keskittää

käytettävissä oleva tuotekehityskapasiteetti oikeaan osaan tutkittavaa tuotetta. Itse suunnitteluprosessissa DFMA –metodit sijoittuvat vaiheeseen, jossa määritetään tutkittavan tuotteen perustoiminnot ja niitä koskevat vaatimukset. (Ulrich & Eppinger, 2008, s.211 – 212.) DFMA -prosessin peruseriaate on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Valmistus- ja kokoonpanoystävällisen suunnittelun peruseriaate. (Mukaiillen: Ulrich & Eppinger, 2008, s.213.)

2.2 Ongelman määrittäminen ja tehtävänasettelun selvittely

Tuotekehitysprosessin ensimmäinen vaihe on tehtävänasettelun selvittely. Vaiheen tarkoituksena on selvittää ratkaistava tai minimoitava ongelma keräämällä informaatiota tuotteesta esimerkiksi haastatteluin tai seuraamalla tuotetta käytännössä. Ongelmanmäärittämisprosessin tuloksena saatavasta vaatimuslistasta voidaan tulkita

kehittävälle tuotteelle sellaiset reunaehdot, jotka sen on ehdottomasti (vaatimus) tai mahdollisuuksien mukaan (toivomus) täytettävä. (Pahl & Beitz, 2007, s.145 - 147.)

2.3 Eri työvaiheiden kustannusten määrittäminen

Valmistuskustannuksia määritettäessä määritetään jokaiselle työvaiheelle oma alkuarvonsa niissä tutkittavan parametrin suhteen. Eri työvaiheille tyypilliset kustannukset on esitetty seuraavissa, työvaihekohtaisesti eritellyissä osaluvuissa. Palkka- ja yleiskustannusten arvioinnissa hyödynnetyt apuarvot on esitetty liitteessä IV (Yrittäjät, 2014; Metalliliitto, 2013, s.53,94 – 95; Lukkari, 2008, s.13; Winchell, 1989, s.111).

2.3.1 Polttoleikkaustyövaihe ja sen kustannukset

Polttoleikkaus on leikkausprosessi, jossa palamisreaktion tuottaman lämmön avulla leikattavasta kappaleesta poistetaan haluttu osa. Prosessissa kuumennuskaasun avulla esikuumennetun kappaleen leikkaaminen tapahtuu pääasiassa leikattavan materiaalin palamisreaktiolla. Aihion esikuumennuttua leikkauskohtaa suihkutetaan hapella, jolloin aihion materiaalin palamisreaktio aiheuttaa aihioon leikkausjäljen. Yleisin käytetty kuumennuskaasu on asetyleeni. (Singh, 2008, s.237 - 238; McQuade, 2011.) Polttoleikkauksen kustannuksia arvioitiin käyttäen seuraavanlaista kustannusmallia (Boothroyd et al., 2011, s.282 - 283.):

$$C_{\text{polttoleikkaus}} = M_{pl} * t_{dt} + M_{pl} * t_l + (M_{pl} * t_{sv} + C_{sa}) * \frac{t_l}{t_{kestoikä}}, \quad (1)$$

missä M_{pl} ilmaisee polttoleikkauksilaitteiston ja sen operoinnin aiheuttamat kustannukset aikayksikköä kohden, t_{dt} ajan, joka kuluu esimerkiksi leikattavan aihion vaihtamiseen, laitteiston esikuumennukseen, t_l aktiivisen leikkausajan, t_{sv} uuden leikkaussuuttimen vaihtoon kuluvan ajan, C_{sa} uuden suuttimen sisäänajokustannuksen ja $t_{kestoikä}$ yhden suuttimen kestoian. Käytännössä yhden suuttimen kestoikä on yksittäisen geometrian leikkausaikaan verrattuna todella suuri, joten voidaan olettaa $\frac{t_l}{t_{kestoikä}} \approx 0$ (Kekki, 2013d).

Tällöin yhtälö 1 supistuu muotoon

$$C_{\text{polttoleikkaus}} = M_{pl} * \Sigma t_{dt} + M_{pl} * \Sigma t_l. \quad (2)$$

Yhtälön 2 muuttujista määritellään lisäksi leikkausajalle (Boothroyd et al., 2011, s.283.):

$$t_l = \Sigma \frac{K}{v_l}, \quad (3)$$

missä K on leikkaustapahtumakohtainen vakio leikkauspituudelle ja v_l laitteiston leikkauksessa käyttämä leikkausnopeus. Lisäksi määritellään kone- ja operointikustannustekijä M_{pl} seuraavasti:

$$M_{pl} = C_o + C_{lk} + C_{kk} + C_{sk}, \quad (4)$$

missä C_o ilmaisee operointikustannukset aikayksikköä kohden, C_{lk} leikkauskaasun (happi) kustannukset aikayksikköä kohden, C_{kk} kuumennuskaasun kustannukset aikayksikköä kohden ja C_{sk} laitteen sähkönkulutuksesta aiheutuvat kustannukset aikayksikköä kohden. Esimerkiksi työkappaleen esikuumennukseen, leikattavan aihion vaihtoon tai laitteiston käynnistämiseen kuluva aika t_{dt} määritellään

$$t_{dt} = \Sigma t_{av} + \Sigma t_{ek}, \quad (5)$$

missä t_{av} ilmaisee leikattavan aihion vaihtoon kuluvan ajan ja t_{ek} työkappaleen esikuumennukseen kuluvan ajan.

2.3.2 Särmäystyövaihe ja sen kustannukset

Särmäyksessä särmättävään kappaleeseen aiheutetaan plastinen muodonmuutos, jonka jälkeen työkappaleessa esiintyy vastakkaisilla pinnoilla veto- ja puristusjännitystä. Muutos aiheutetaan kappaleen neutraaliakselin suhteen. (Singh, 2008, s.418.) Tutkimuskohteessa käytettyä särmäyspuristinlaitteistoa havainnollistaa kuva 4.



Kuva 4. Särmäyspuristin (Aliko, 2013)

Särmäysoperaatioon kuluvaa aikaa mallinnettiin seuraavalla yhtälöllä (Boothroyd et al., 2011, s.411 - 412.):

$$T_s = 2(1 + N_b) + 0.05(2 + N_b)(L + W) + 2 + 0,15(L + W). \quad (6)$$

Yhtälössä N_b ilmaisee särmättävään kappaleeseen tuotettavien särmäysoperaatioiden lukumäärän, L särmättävän kappaleen pituuden ja W kappaleen leveyden. Yhtälön 6 perusteella voidaan laskea särmäysoperaation kustannus työstettävälle kappaleelle konetuntihinnan M_s avulla seuraavasti:

$$C_{\text{särmäys}} = M_{\text{särmäys}} T_{\text{särmäys}} \quad (7)$$

2.3.3 Hitsaustyövaihe ja sen kustannukset

Kahden kappaleen liittämisen katsotaan tapahtuneen hitsaamalla, kun kappaleet muodostavat pysyvän yhteyden lämmön ja/tai paineen vaikutuksesta (Singh, 2008, s. 187). Tässä työssä hitsaustapahtuman vertailuprosessina käytettiin umpilanka-MAG hitsausprosessia (Metal-arc Active Gas Welding), jonka avulla mallinnettiin hitsauskustannukset edellä kuvatulla tavalla.

Hitsauskustannuksiin vaikuttavia tekijöitä on useita ja valtaosa niistä tekijöistä sisältää jossain muodossa aikayksikön. Hitsauskustannuksia voidaan tulkita ainakin kolmella eri tavalla, jotka ovat kustannukset hitsattavaa kappaletta kohden, kustannukset hitsausseaman

pituuden funktiona ja kustannukset painoa kohden. (Miller, 2004.) Tässä työssä käytettiin hitsaustyön kustannusmalleina pituuden funktiona mitattuja hitsauskustannuksia. Hitsin pituuden mukaan mitatuille kustannuksille pätee (Miller, 2004):

$$CPL = \Sigma L\&O_{length} + \Sigma FM_{length} + \Sigma SG_{length}, \quad (8)$$

missä CPL (Cost Per Length) ilmaisee hitsin pituuden mukaan laskettuja kokonaiskustannuksia, $L\&O$ (Labor and Overhead) palkka- ja yleiskustannuksia pituusyksikköä kohden, FM (Filler Material) lisäaineen kustannuksia ja SG (Shielding Gas) suojakaasun aiheuttamia kustannuksia. Lisäainekustannusten edessä oleva summan symboli (sigma) ilmaisee lisäainekustannuksien laskemista jokaiselle a-mitaltaan toisistaan poikkeaville hitsille erikseen. Osakustannusten alaindeksi ”length” ilmaisee arvon laskemista hitsin pituuden suhteen. Osakustannuksille määritellään edelleen (Miller, 2004):

$$L\&O_{length} = \frac{L\&O}{v_w * OF}, \quad (9)$$

missä, v_w ilmaisee käytetyn hitsausnopeuden. Muuttuja OF (Operating factor) ilmaisee hitsausprosessin paloaikasuhteen eli prosenttiosuuden ajasta, joka hitsaustapahtumassa kuluu itse hitsaukseen, eikä niinkään esimerkiksi kappaleiden kääntämiseen tai laitteiston valmisteluun (Miller, 2004; Lukkari, 2008, s.12). Lisäaineen kustannuksille määritetään (Miller, 2004):

$$FM_{length} = \frac{v_{la} * e_m * e_{\epsilon}}{v_w}, \quad (10)$$

missä v_{la} ilmaisee hitsausprosessissa käytetyn langansyöttönopeuden, e_m hitsauksessa käytetyn hitsauslangan massan pituusyksikköä kohden ja e_{ϵ} hitsauslangan ostohinnan pituusyksikköä kohden. Eri a-mittoja sisältäville hitseille määritetään lisäaineen kustannukset erikseen ja niiden vaatimat parametrien muutokset tehdään niin ikään jokaiselle hitsille erikseen. Lisäksi suojakaasun kustannuksille määritellään (Miller, 2004):

$$SG_{length} = \frac{G_f * G_{\epsilon}}{v_w}, \quad (11)$$

missä G_f ilmaisee kaasun virtausnopeuden ja G_ϵ suojaakaasun kustannukset tilavuusyksikköä kohden. Hitsausnopeus määriteltiin seuraavasti (Lukkari, 2008, s.13):

$$v_w = \frac{1}{3600} * \frac{\text{Hitsiaineentuotto}}{\text{Hitsiainemäärä}}, \quad (12)$$

missä hitsausnopeuden yksiköksi muodostuu $\frac{m}{s}$. Lisäksi hitsiainemäärälle pätee (Lukkari, 2008, s.13.):

$$\text{Hitsiainemäärä} = 0,008 * a^2, \quad (13)$$

missä a ilmaisee hitsissä käytetyn a -mitan. Hitsiainemäärän yksikkönä on $\frac{kg}{m}$. Hitsauksen kokonaiskustannukset määritetään kertomalla saatu tulos (CPL) hitsien metripituudella a -mitoittein, eli

$$C_{\text{hitsaus}} = CPL * \Sigma L_{ai}, \quad (14)$$

missä alaindeksi ai ilmaisee hitsien pituuden laskemista käytettäville a -mitoille kullekin erikseen.

2.3.4 Jännityksenpoistohehkutustyövaihe ja sen kustannukset

Jännityksenpoistohehkutuksessa työkappale kuumennetaan pitolämpötilaan ja pidetään kyseisessä lämpötilassa määrätyn ajan. Pitoajan täytyessä työkappale jäähdytetään verrattain hitaasti. Jännityksenpoisto- eli myöstöhehkutusta käytetään hitsauksesta aiheutuvan korkean paikallisen lämmöntonin aiheuttamien jäännösjännitysten poistoon. Työkappaleen jäännösjännitysten poistaminen on keskeistä työkappaleen jännityskorroosion- ja väsymiskestävyyden kannalta. (Kalpakjian & Schmid, 2006, s.140; Ruukki, 2013, s.12 -13.) Sekä kuumennus-, pito- ja jäähdytysaika riippuvat suurimmasta lopullisessa tuotteessa käytetystä levynvahvuudesta (Ruukki, 2013, s.12). Mainittujen aikamuuttujien määrittämiseen käytetyt matemaattiset mallit on esitetty yhtälöissä 15...19. Kuumennusaika tunteina (Ruukki, 2013, s.12):

$$t_k = \frac{T_{pito} - 20}{\frac{5000}{s}}, \quad (15)$$

missä osoittaja ilmaisee kuumennettavan lämpötilaeron huoneenlämmöstä pitolämpötilaan Celsiusasteina ja nimittäjä ilmaisee käytettävän kuumennusnopeuden tuntia kohden. Nimittäjän muuttuja s ilmaisee suurimman kappaleessa käytetyn levynvahvuuden ja 5000 on vakio, jonka yksikkö on $\frac{mm \cdot ^\circ C}{h}$. Lisäksi määritetään pitoajaksi (minuutteina) pitolämpötilassa (Ruukki, 2013, s. 12):

$$t_p = 2s. \quad (16)$$

Jäähdytysaika arvioitiin seuraavalla yhtälöllä (Ruukki, 2013, s.12.):

$$t_j = \frac{T_{pito} - 20}{\frac{6875}{s}}, \quad (17)$$

missä osoittajassa oleva lämpötila on se lämpötilaero, jonka verran työkappaletta on jäähdytettävä huoneenlämpötilan saavuttamiseksi. Nimittäjä ilmaisee käytettävän jäähdytysnopeuden Celsiusasteina tuntia kohden. Työvaiheen kustannukset lasketaan suoraan tulona käytetystä ajasta ja hehkutusprosessin konetuntihinnasta:

$$C_{hehkutus} = (t_k + t_p)M_{hehkutus} + t_j M_j, \quad (18)$$

missä $M_{hehkutus}$ ilmaisee käytetyn hehkutuslaitteiston konetuntihinnan ja M_j ilmaisee jäähdytyksen tuntihinnan.

2.3.5 Läpimenoaika ja kokonaisvalmistuskustannukset

Tuotteen läpimenoaika mallinnettiin laskemalla jokaiseen työvaiheeseen kuluva aika yhteen. Matemaattisesti läpimenoaika on siis:

$$T_{tot} = T_{leikkaus} + T_{särmäys} + T_{hitsaus} + T_{hehkutus}. \quad (19)$$

Kokonaisvalmistuskustannukset määritettiin laskemalla jokaisen työvaiheen kustannukset yhteen:

$$C_{MfC} = C_{polttoleikkaus} + C_{särmäys} + C_{hitsaus} + C_{hehkutus}. \quad (20)$$

2.4 Kustannusarvioiden tarkkuus

Kokonaisvalmistuskustannusten arviointitarkkuuden kasvattamiseksi on syytä jakaa tuote, jonka kustannuksia arvioidaan, niin pieniin arvioitaviin osiin kuin mahdollista: yksittäisten komponenttien tai työvaiheiden kustannusarviot ovat yleisesti huomattavasti yksityiskohtaisempia ja tarkempia kuin suurien kokonaisuuksien vastaavat arvot (Ehrlenspiel et al., 2007, s.429).

Arviointitarkkuutta voidaan lisätä myös vertailemalla tutkittavaa tuotetta jo olemassa oleviin tuoteratkaisuihin. Samankaltaisesta, jo valmiiksi arvioidusta tuotteesta voidaan muokata sopiva kustannusarvio nykyiselle tuotteelle vertailemalla esimerkiksi tuotteisiin käytettyjen osien tai työvaiheiden laatua ja määrää. (Ehrlenspiel et al., 2007, s.430 - 431.)

Kustannusarvioiden tarkkuuden kasvattamiseksi voidaan lisäksi käyttää useampia, toisistaan riippumattomia arvioijia (Ehrlenspiel et al., 2007, s.429). Useampia asiantuntijoita käytettäessä on kuitenkin varmistuttava siitä, että eri arvioissa on samat reunaehdot. Yleisiä reunaehtoihin liittyviä kysymyksiä aiheuttavat esimerkiksi elinkaarikustannusten (esimerkiksi huoltojen) ja tuotantokoneiden poistokustannusten huomioiminen arvioissa. (Ulrich & Eppinger, 2008, s.213.)

3 VAIHTEEN KOTELON VALMISTUSYSTÄVÄLLISYYDEN PARANTAMINEN DFMA -PERIAATTEITA HYVÄKSIKÄYTTÄEN

Tässä luvussa esitetään, miten ja mitä DFMA- periaatteita sovellettiin tutkimuskohteena olevan vaihteen kotelon työvaiheisiin.

3.1 Ongelman määrittäminen ja ideointi

Ongelman määrittämissä vaiheissa hyödynnettiin erilaisia haastatteluita, joiden pohjalta koottiin vaatimus- ja toivomuslista kuvaamaan niitä asioita, jotka haluttiin erityisesti otettavan huomioon tässä kandidaatintyössä. Vaiheen tuloksena saatu vaatimuslista on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä I (Kekki, 2013e; Kekki, 2013d).

3.2 Polttoleikkaus

Tuotteen valmistuskustannusten alentamiseksi voidaan käyttää tuotteen sisäistä standardisointia, jossa minimoidaan tuotteessa esiintyvien erilaisten komponenttien ja siten valmistusprosessien määrä. Käyttämällä hyväksi mahdollisimman suurta määrää samanlaisia komponentteja yksittäisen standardikomponentin yksikkökustannus alenee. (Ulrich & Eppinger, 2008, s.222 - 223).

Näin menetellen säästetään aikaa yhtälön 5 mukaisista turhista, aikaa vievistä levynvaihto-operaatioista ja leikkaustapahtuma voidaan yhä useamman komponentin osalta suorittaa vakioparametrein. Polttoleikkausvaiheessa leikattavat geometriat on esitetty osakohtaisesti liitteessä II (Kekki, 2013d). Nykyisessä tuotteessa esiintyvät levyvahvuudet on esitetty taulukossa 1.

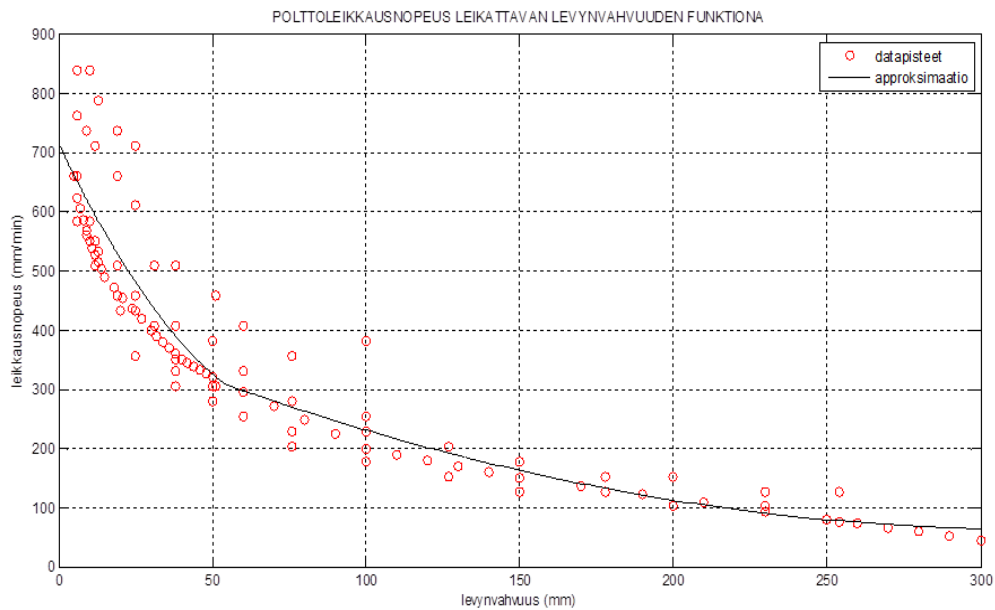
Taulukko 1. Levynvahvuudet osanumeroittain ennen tuotteen sisäistä standardisointia.

| Levynvahvuus [mm] | Geometrian numero (Alapuolisko) | Geometrian numero (Yläpuolisko) |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 3 | 14, 15 | - |
| 8 | 2, 3 | 2,3,4 |
| 12 | 5,8,12,16 | - |
| 15 | 13 | - |
| 40 | 9, 10 | 5,6, 8-12 |
| 55 | 6, 11 | - |
| 60 | 4 | - |
| 70 | 1 | 1 |

Taulukosta 1 nähdään, että erilaisia levynvahvuuksia on lähtökohtaisesti kahdeksan (8) kappaletta. Kuitenkin esimerkiksi levynvahvuuksista 15, 55 ja 60 on tehty vain yksittäisiä osia, joille kohdistuvat rasiukset ovat toiminnan kannalta toissijaisia. Näin ollen päädyttiin ehdottamaan 55 ja 60 mm levynvahvuuksien vaihtamista 40 mm paksuun levymateriaaliin ja 15 mm paksuista 12 mm paksuun levymateriaaliin. Näin menetellen pienennetään polttoleikkausaikaa sekä kokonaisläpimenoaika, koska saadaan eliminoitua kolme käytettävää levynvahvuutta ja säästytään vaihto-operaatioilta koskien ko. levynvahvuuksia. Lisäksi toimenpide pienentää tutkittavan kappaleen massaa ja suurentaa käytettävää leikkausnopeutta kuvan 5 mukaisesti, koska vaihdettavat levynvahvuudet pienenevät alkuperäisestä. Standardisoinnin jälkeen tuotteeseen jäljellejäävät levynvahvuudet on esitetty luvussa 4.

Leikkausnopeuden riippuvuutta erilaisista leikattavista levynpaksuuksista mallinnettiin tässä työssä keräämällä ensin neljältä eri leikkauslaitevalmistajalta dataa polttoleikkausnopeuksille eri aineenvahvuuksilla ja sen jälkeen piirtämällä kerätyt datapisteet samaan kuvaajaan (Hypertherm, 2012; Koike, 2013; Gas Innovations, 2010; Retro Systems, 2008). Datapisteisiin sovitettiin käyrä käyttäen hyväksi matlabin ”polyfit”-funktioita. Polyfit -funktio approksimoi määrätynasteisen polynomin kertoimet datapisteisiin sopivaksi käyttäen pienimmän neliösumman menetelmää (Mathworks, 2013). Approksimaation tarkentamiseksi myös ääripään levyvahvuuksia silmälläpitäen määriteltiin leikkausnopeutta kuvaava käyrä paloittain, ensin levynvahvuuksille 0.5...100 mm ja sen jälkeen vahvuuksille 100...300 mm. Mainittua 300 mm suurempia

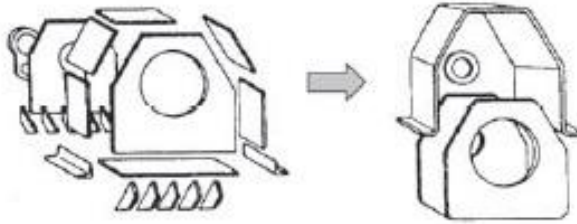
levynvahvuksia ei koettu tarpeelliseksi mallintaa työn luonteen vuoksi: lähtökohtaisesti tutkittavassa kappaleessa suurin käytetty levynvahvuus on 70 mm ja suurinta levynvahvuutta on tarkoituksenmukaista pienentää, mikäli mahdollista. Funktiota varten tehty Matlab -koodi on esitetty liitteessä III. Kerätystä datasta saatu käyrä datoineen on esitetty kuvassa 5. Sovitus on suoritettu vain tässä tuotteessa käytetylle materiaalille, joka oli rakenneteräs S355J2.



Kuva 5. Leikkausnopeuksien riippuvuus käytetystä levynvahvuudesta pienimmän neliösumman menetelmää ja kerättyä leikkausdataa hyväksikäyttäen.

3.3 Särmäys ja hitsaus

Kehitettävässä tuotteessa esiintyvien komponenttien lukumäärän pienentämiseksi voidaan sulauttaa erillisiä komponentteja toisiinsa, jolloin komponentit eivät vaadi erillistä kokoonpano-operaatiota (Ulrich & Eppinger, 2008, s.224). Komponenttien lukumäärän pienentämiseksi käytettyjä keinoja hitsattavissa kokoonpanoissa ovat esimerkiksi kanttaus, viistäminen ja särmääminen (Ehrlenspiel et al., 2007, s.486). Kuvassa 6 on esitetty tuote, jossa alun perin hitsattavia liitoksia on korvattu särmäämällä.



Kuva 6. Tuote, jossa hitsattavia liitoksia on korvattu särmäämällä (Ehrlenspiel et al., 2007, s.242.)

Tutkittavan nostovaihteen kotelon hitsaustyövaihetta optimoitiin integroimalla kolme osaa yhdeksi osaksi ja saattamalla integroidut osat särmäämällä lopulliseen muotoon. Näin menetellen tuotteessa tarvittavan hitsisauman määrä, tuotteen sisältämien komponenttien lukumäärä ja siten myös valmistuskustannukset pienenevät. Nykyistä särmättävää tuotetta havainnollistaa kuva 7.



Kuva 7. Nykyinen, päistään särmätty vaihdelaatikon yläosan kansi. (Kekki, 2013c)

Hitsien määrän minimoimiseksi luotiin päägeometrialtaan kuvissa 8 ja 9 havainnollistettu ratkaisuehdotus. Ratkaisussa särmäystyövaihe suoritetaan nykyisestä tuotteesta poiketen pidemmille yläsärmille, jolloin hitsattava kokonaispituus pienenee pitkän ja lyhyen yläsärmän pituuserotuksen verran. (Kekki, 2013e.)

Hitsaustyövaiheelle määritettiin alkuarvot yhtälöiden 8...13 mukaisesti ja ne on esitetty eri a-mitoittain taulukossa 3 ja hitsaustapahtumalle keskeiset vakiot on esitetty taulukossa 4. Taulukon 4 referenssiarvoina on käytetty 1,2 mm MAG-umpilanka hitsausprosessiin liittyviä alkuarvoja.

Taulukko 3. Hitsauksen kustannusalkuarvot yhtälöiden 8...13 mukaan laskettuna.

Taulukossa L & O = palkka- ja yleiskustannukset, FM = lisäaineen kustannukset ja SG = Suojakaasun kustannukset.

| | | |
|-----------------|---------------|-----|
| | a = 2 | |
| L&O | 0,91 | €/m |
| FM | 0,05 | €/m |
| SG | 0,01 | €/m |
| YHTEENSÄ | 0,97 | €/m |
| | a = 4 | |
| L&O | 3,62 | €/m |
| FM | 0,19 | €/m |
| SG | 0,06 | €/m |
| YHTEENSÄ | 3,87 | €/m |
| | a = 10 | |
| L&O | 22,04 | €/m |
| FM | 1,18 | €/m |
| SG | 0,35 | €/m |
| YHTEENSÄ | 23,57 | €/m |

Taulukko 4. Referenssiprosessina käytetylle hitsaustavalle ominaiset vakiot. (Lukkari, 2008, s.12 -13.) Taulukossa OF on hitsaustyövaiheen paloaikasuhte eli prosenttiosuus ajasta, joka työvaiheeseen kuluva ajasta kuluu itse hitsaukseen.

| | | |
|--|--------|------------------------|
| Hitsausnopeus, kun a - mitta = 4 | 0,012 | m/s |
| Hitsausnopeus, kun a - mitta = 2 | 0,046 | m/s |
| Hitsausnopeus, kun a - mitta = 10 | 0,002 | m/s |
| Hitsauksen palkka- ja yleiskustannukset | 0,006 | €/s |
| Hitsauslangan hinta massayksikköä kohden | 1,500 | €/kg |
| Hitsauslangan massa pituusyksikköä kohden | 0,009 | kg/m |
| Hitsauksen paloaikasuhte (OF) | 0,200 | - |
| Langansyöttönopeus | 0,167 | m/s |
| Suojakaasun hinta tilavuusyksikköä kohden | 2,000 | €/m³ |
| Suojakaasun virtausnopeus | 0,0003 | m³/s |

3.4 Jännityksenpoistohehcutus

Jännityksenpoistohehcutuksessa keskeisin tekijä on hehcutettavassa kappaleessa suurin käytetty ainevahvuus. Kyseistä ainevahvuutta pienentämällä voidaan, kuten yhtälöistä 15...17 nähdään, pienentää niin kuumennus-, pito- kuin jäähdytysaikaakin. Suurinta ainevahvuutta pienennettäessä jouduttiin kuitenkin ottamaan huomioon pienentämisen aiheuttamat muutokset muissa tutkimuskohteen osissa, eritoten laakereissa: pienentämällä laakeripesiin kohdistuvaa suurinta ainevahvuutta rakenteessa jouduttaisiin myös vaihtamaan myös akseleiden laakerit. Tästä syystä päädyttiin ratkaisuun, jossa hehcutusprosessi säilyy muuttumattomana.

4 TULOKSET

Tässä luvussa esitetään työssä saadut tutkimustulokset. Työvaihekohtaiset konkreettiset tuoteratkaisut on esitetty alaluvuissa 4.1 ja 4.2. Lisäksi eri työvaiheiden kustannukset, kokonaisvalmistuskustannukset ja kustannusten vertailu eri työvaiheiden sekä ratkaisuvaihtoehtojen kesken on esitetty niille osoitetuissa alaluvuissa.

4.1 Polttoleikkaustyövaiheen kehitysratkaisu

Polttoleikkaustyövaiheessa hyödynnetyn tuotteen sisäisen standardisoinnin tuloksena saadut komponenttien levynvahvuudet on esitetty taulukossa 5.

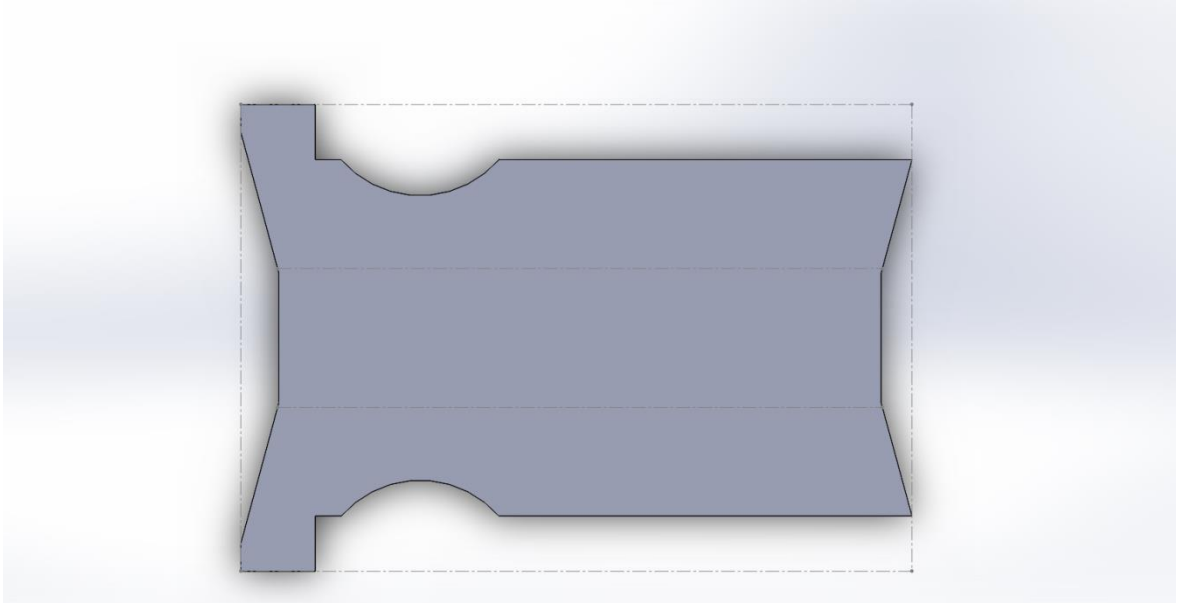
Taulukko 5. Levynvahvuudet osanumeroin tuotteen sisäisen standardisoinnin jälkeen.

| Levynvahvuus [mm] | Geometrian numero (Alapuolisko) | Geometrian numero (Yläpuolisko) |
|--------------------------|--|--|
| 3 | 14, 15 | - |
| 8 | 2, 3 | 2,3,4 |
| 12 | 5,8,12,13,16 | - |
| 40 | 4,6,9, 10,11 | 5,6, 8-12 |
| 70 | 1 | 1 |

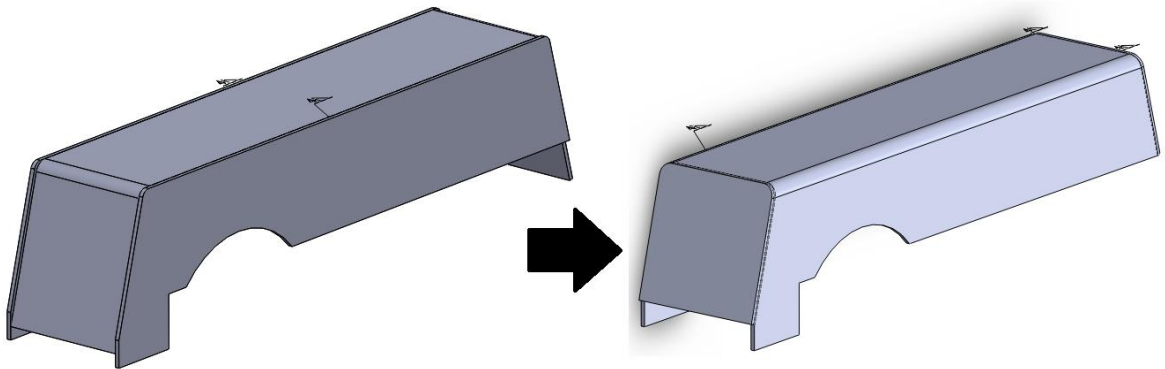
Taulukon 5 mukaisesti DFMA -periaatteiden avulla vähennettiin tuotteessa esiintyvien levynvahvuuksien määrää kahdeksasta viiteen.

4.2 Särmäys- ja hitsaustyövaiheiden kehitysratkaisu

Tuotteen pitkittäissuunnassa suoritettua särmäysratkaisua havainnollistavat kuvat 8 ja 9. Kuvassa 8 on esitetty kehitysratkaisun 2D -levityskuva ja kuvassa 9 nykyisen tuotteen ja kehitysratkaisun särmäysratkaisujen eroja havainnollistavat 3D -mallit. Kuvassa 9 vasemmalla on esitetty nykyinen särmäysratkaisu ja oikealla kehitystyössä aikaansaatu särmäysratkaisu.



Kuva 8. Särmäysratkaisun 2D - levityskuva SolidWorks -ohjelmalla mallinnettuna.



Kuva 9. Särmäysratkaisua havainnollistava 3D -malli SolidWorks -ohjelmalla mallinnettuna. Kehitysratkaisussa erikseen leikattavat päätylevyt on hitsattu kiinni särmättävään osaan.

4.3 Eri työvaiheiden kustannukset ja läpimenoajat

Eri työvaiheittain lasketut kustannukset ja läpimenoajat on esitetty taulukossa 6. Eri tutkimustulosten vertailu nykyiseen tuoteratkaisuun on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 6. Eri työvaiheittain lasketut kustannukset ja läpimenoajat.

| KUSTANNUKSET | | | | | |
|--|--|---|---|--|---|
| Parametri / Tarkasteltava tuoteratkaisu | Polttoleikkaus- kustannukset [€] | Särmäys- kustannukset [€] | Hitsaus- kustannukset [€] | Hehkutus- kustannukset [€] | Materiaali- kustannukset [€] |
| Nykyinen tuote | 114,3 | 0,4 | 199,9 | 1045,8 | 560 |
| Ratkaisuehdotus | 91,7 | 0,5 | 180,2 | 1045,8 | 560 |
| LÄPIMENOAIKA | | | | | |
| Parametri / Tarkasteltava tuoteratkaisu | Polttoleikkaus- työvaiheeseen kuluva aika [h] | Särmäys- työvaiheeseen kuluva aika [s] | Hitsaus- työvaiheeseen kuluva aika [h] | Hehkutus- työvaiheeseen kuluva aika [h] | |
| Nykyinen tuote | 4,6 | 74,3 | 7,5 | 16,4 | |
| Ratkaisuehdotus | 3,7 | 80,7 | 6,6 | 16,4 | |

Taulukko 7. Ehdotetun kokonaisratkaisun työvaihekohtaisten kustannusten vertailu nykyiseen tuoteratkaisuun.

| KUSTANNUKSET | | | | |
|--|--|---|---|--|
| Parametri / Tarkasteltava tuoteratkaisu | Polttoleikkaus- kustannukset | Särmäys- kustannukset | Hitsaus- kustannukset | Hehkutus- kustannukset |
| Ratkaisuehdotus / Nykyinen tuote | 0,80 | 1,25 | 0,90 | 1,00 |
| LÄPIMENOAIKA | | | | |
| Parametri / Tarkasteltava tuoteratkaisu | Polttoleikkaus- työvaiheeseen kuluva aika | Särmäys- työvaiheeseen kuluva aika | Hitsaus- työvaiheeseen kuluva aika | Hehkutus- työvaiheeseen kuluva aika |
| Ratkaisuehdotus / Nykyinen tuote | 0,80 | 1,09 | 0,89 | 1,00 |

4.4 Kokonaisvalmistuskustannukset ja läpimenoaika

Kokonaisvalmistuskustannukset, -läpimenoajat ja niiden vertailu nykyiseen tuoteratkaisuun on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Kokonaisvalmistuskustannukset ja – läpimenoajat ja niiden vertailu nykyiseen tuoteratkaisuun.

| Parametri / Tuoteratkaisu | Kokonais- valmistus- kustannukset [€] | Läpimeno- aika [h] |
|---|--|-------------------------------|
| Nykyinen tuote | 1920,4 | 28,4 |
| Ratkaisuehdotus | 1878,2 | 26,7 |
| VERTAILU | | |
| Ratkaisuehdotus / Nykyinen tuote | 0,98 | 0,94 |

Taulukosta 8 nähdään, että DFMA -periaatteiden avulla tuotteen läpimenoaika pieneni 2 prosenttia ja läpimenoaika 6 prosenttia.

5 TULOSTEN TULKINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Valmistus- ja kokoonpanoystävällistä suunnittelua on tutkittu menetelmänä jo vuosien ajan. Tässä kandidaatintyössä sovellettiin menetelmätutkimusten tuloksena saatuja yhtälöitä, määritelmiä ja suunnitteluohjeita. Myös Lappeenrannan teknillisen yliopiston tutkimusportaalista (LUT Research portal) hakusanalla ”DFMA” löydettiin yhteensä 23 tieteellistä julkaisua 4.4.2014. Itse tutkittavan kappaleen osalta valmistusprosessin optimointia on tutkittu niin Konecranes Finlandin edustajien kuin nykyisen tuotteen valmistavan alihankkijankin toimesta. Tässä kandidaatintyössä hyödynnettiin molempien mainittujen osapuolien antamaa ja tuottamaa informaatiota aiemmasta tutkimuksesta kehitettävää tuotetta koskien.

Tässä kandidaatintyössä luotiin polttoleikkausnopeutta varten malli, jonka avulla voidaan arvioida polttoleikkausnopeutta eri levynvahvuuksilla. Malli muodostettiin käyttäen hyväksi neljän laitevalmistajan saatavilla olevaa dataa. Datapisteiden joukkoon sovitettiin paloittain määritelty toisen asteen käyrä, joka pienimmän neliösumman menetelmän mukaan sopii parhaiten datapisteisiin. Mallin yleistettävyyttä huonontaa se, että kyseinen mallinnus on suoritettu vain rakenneteräkselle S355 ja siten sen käyttäminen muuta materiaalia polttoleikattaessa on epämielekkästä.

Tämä kandidaatintyö sidottiin koskemaan tutkittavan tuotteen neljää päätyövaihetta, jotka ovat polttoleikkaus, särmäys, hitsaus ja jännityksenpoistohehku. Tuotteen valmistusprosessin edelleenkehittämiseksi DFMA -analyysiä voidaan laajentaa käsittelemällä päätyövaiheiden lisäksi tuotteen työvarat poistavaa viimeistelytyöstöä. Lisäksi muita jatkotutkimusaiheita ovat:

- muutoksien kelvollisuuden varmistaminen lujusanalyysillä, esimerkiksi FEM-laskentaa hyödyntäen,
- hitsaustyövaiheessa käytettävän hitsausprosessin vaihtoehtojen ja robotisointimahdollisuuksien kartoittaminen,
- tuotteessa käytettävän materiaalin kyseenalaistaminen ja vaihtoehtojen tutkinta, sekä

- Kotelossa käytetyn suurimman levynvahvuuden pienentäminen ja siten hehkutustyövaiheen ajallinen lyhentäminen.

Lisäksi kaikki ehdotetut toiminnalliset ratkaisut on testattava käytännössä ennen käyttöönottoa.

Kustannusten laskennallisia tuloksia tulkitessa tulee ottaa huomioon laskennassa epätarkkuutta aiheuttavat tekijät. Epävarmuustekijöitä synnyttävät tässä työssä erityisesti useat arviot laskennan alkuarvoissa. Epätarkkuutta aiheuttavat tekijät ovat

- Yhtälössä 5 huomioitava aihionvaihto-operaatioon kuluva aika
- Yhtälössä 9 Hitsauksen paloaikasuhte eli lyhennettynä OF
- Yhtälöissä 19 ja 20 laskettavista kokonaisvalmistuskustannuksista ja läpimenoajasta puuttuvat ajat ja kustannukset, jotka kuluvat työkappaleen siirtämiseen työpisteeltä toiselle.
- Palkka- ja yleiskustannusarviot

Laskennassa esiintyviä, arvioituja lukuja tulkitessa tulee lisäksi huomioida, että absoluuttisen arviointitarkkuuden saavuttaminen on todella hankalaa, ellei jopa mahdotonta. Palkka- ja yleiskustannuksilla voi esiintyä huomattavaa vaihtelua esimerkiksi yrityksestä tai sijainnista riippuen. Laskennassa eri suorituskertojen vertailukelpoisuuden katsottiin olevan tutkimuksen päämäärän kannalta tärkeämpi tekijä kuin absoluuttinen arviointitarkkuus. Arviointitarkkuuden ja siten tutkimuksen reliabiliteetin kasvattamiseksi voidaan käyttää useampien, toisistaan riippumattomien henkilöiden arvioita tutkitusta tuotteesta. Tutkimuksen validiteettia voidaan pitää hyvänä, sillä saadut tutkimustulokset vastaavat kaikkiin ennalta -asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

Luvussa 4 esitettyjen tulosten perusteella havaitaan, että DFMA -periaatteita hyödyntämällä voidaan pienentää tutkitavan tuotteen läpimenoaikaa ja valmistuskustannuksia. Taulukon 8 mukaisesti voidaan todeta valmistuskustannusten pienentyneen 2 prosentilla alkuperäisestä ja läpimenoajan 6 prosenttia alkuperäisestä. Asetettu viiden prosentin tavoite ei täytynyt. Voidaan todeta, että materiaali- ja lämpökäsittelykustannukset edustavat niin suurta osaa lopullisista kustannuksista, että viiden prosentin kustannushyödyn saavuttaminen vain neljää päätyövaihetta optimoimalla on todella hankalaa, ellei jopa mahdotonta.

Yksityiskohtaisista tuloksista voidaan yleisesti todeta, että särmäämällä voidaan kustannustehokkaasti korvata hitsaamalla tehtyjä liitoksia, mikäli liitettävien osien ainevahvuus ja tavoiteltava muoto sallii särmäysprosessin.

Tämän kandidaatintyön tuloksilla voidaan katsoa olevan uutuusarvoa, sillä alkuperäiseen tuoteratkaisuun löydettiin tuotteen toiminnalliset vaatimukset täyttäviä parannusehdotuksia. Lisäksi DFMA :n avulla onnistuttiin saamaan kvantitatiivisia arvioita muutosehdotusten vaikutuksesta kustannuksiin ja läpimenoaikaan.

LÄHTEET

Aliko Oy, 2013. Product solutions -Press brakes. [Aliko www-sivuilla]. Päivitetty 12.7.2013. [Viitattu 13.7.2013]. Saatavissa: <http://www.aliko.fi/en/product-solutions/press-brakes>.

Boothroyd, G. & Dewhurst, P. & Knight, W. 2011. Product design for manufacture and assembly. Third edition. Yhdysvallat, Boca Raton: CRC Press. 670 s.

Eskelinen, H. & Karsikas, S. 2013. DFMA – opas – valmistus- ja kokoonpanoystävällisen tuotteen suunnittelu. Suomi, Lappeenranta: LUT scientific and expertise publications. 115 s.

Ehrlenspiel, K. & Kiewert, K. & Lindemann, U. 2007. Cost-efficient design. Saksa, Berliini: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 544 s.

Gas Innovations. 2010. [Gas Innovations www-sivuilla]. Päivitetty 10.1.2010. [viitattu 4.12.2013]. Saatavissa pdf -tiedostona: <http://www.gasinnovations.com/literature/OXY-PROPYLENE-CUT-CHART.pdf>.

Huang, C.Q. 1996. Design for X- Concurrent engineering imperatives. First edition. UK, Lontoo: Chapman & Hall. 489s.

Hypertherm. 2012. [Hypertherm www -sivuilla]. Päivitetty 17.7.2012. [viitattu 4.12.2013]. Saatavissa pdf -tiedostona:
<https://www.hypertherm.com/en/media/FullCutSpeedCharts.pdf>.

Kalinoski, J. 2007. Designing the future with DFMA. R&D Magazine , Vol.49, Iss 7.s. 14 - 15.

Kalpakjian, S. & Schmid, S. 2006. Manufacturing engineering and technology: Fifth edition. 5. painos. Yhdysvallat, Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall. 1295 s.

Kekki, J. 2013a. Kandidaattityö – Hitsattu kotelo. [Yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Simo Knuuttila, Mika Mattila (cc), Ilkka Ylänen (cc), Olli Vastaranta (cc), Antti Korhonen (cc), Jussi Puhakka (cc), Kimmo Roine (cc), Veijo Salmi (cc). Lähetetty 10.6.2013 klo 22:06 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”130610 Kandidaattityö – Hitsattu kotelo.pdf”.

Kekki, J. 2013b. Päänostovaihe LNS3355 [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Simo Knuuttila. Lähetetty 12.7.2013 klo 15:21 (GMT +0200).

Kekki, J.2013c. RTG_VS20616W_A.ppt [yksityinen sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Simo Knuuttila. Lähetetty 20.6.2013 klo 14:28 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”RTG_VS20616W_A.ppt”.

Kekki, J. 2013d. Diplomi-insinööri; Vaihdeteknologiajohtaja, Konecranes Finland Oy. Hyvinkää, Konecranes Finland Oy:n vaihdetehtas: haastattelu 19.7.2013. Haastattelijana Simo Knuuttila. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Kekki, J. 2013e. 130704 Matkaraportti [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Simo Knuuttila, Kimmo Roine, Veijo Salmi, Antti Korhonen, Mika Mattila (cc).Lähetetty 8.7.2013 klo 15:07 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”130704 Matkaraportti.pdf”.

Koike Aronson, Inc. 2013.[Secmachines www-sivuilla]. Päivitetty 19.9.2013. [viitattu 4.12.2013]. Saatavissa pdf -tiedostona: <http://www.secmachines.com/downloads/autocut-1500/4.%20High%20Speed%20NM%20Nozzles.pdf>.

Lukkari, J. 2008. Hitsiaineentuotto ja sen käyttö. Hitsausuutiset 1/2008. s.10...13.

Mathworks Inc.,2013. Polynomial Curve fitting – Matlab polyfit. [Mathworks www-sivuilla] Päivitetty 7.12.2013 [Viitattu 9.12.2013] Saatavissa: <http://www.mathworks.se/help/matlab/ref/polyfit.html>.

McQuade, K. 2011. Which cutting method is right for you?. [Verkkodokumentti] Julkaistu 20.7.2011, päivitetty 11.3.2012, [Viitattu 22.7.2013] Saatavissa : http://www.hypermaxonline.com/Which-Cutting-Method-Is-Right-For-You-_b_14.html.

Metalliliitto. Työehtosopimus 1.11.2013 – 31.10.2016. [Verkkodokumentti]. Julkaistu 1.11.2013. Päivitetty 12.11.2013. [Viitattu 3.3.2013]. Saatavissa: <http://www.metalliliitto.fi/documents/10137/13003/Teknologiateollisuus+tes+2013-2016/2d5a421d-0305-4c47-83ff-b3c5c87c6d72>.

Miller, D.K. 2004. Determining the cost of welding. [Verkkodokumentti]. Julkaistu 1.3.2004, päivitetty 6.12.2011. [Viitattu 6.8.2013] Saatavissa: http://weldingdesign.com/processes/news/wdf_10760.

Pahl, G. & Beitz, W. & Fekdhusen, J. & Grote, K.H. 2007. Engineering design -A systematic approach. Translated from German and edited by Ken Wallace & Luciënne Blessing. Third Edition. UK, Lontoo: Springer. 617 s.

Retro Systems. 2008. [Retro Systems www –sivuilla]. Päivitetty 22.7.2008. [viitattu 4.12.2013] Saatavissa pdf –tiedostona: http://retroplasma.com/documents/Oxy-fuel%20cutting%20chart-VEC-MTHP_metric.pdf.

Ruukki Metals oy, 2014. Hitsaus.Yleistietoa. [Verkkodokumentti] Päivitetty 6.2.2014. [Viitattu 10.1.2013.] Saatavissa pdf –tiedostona : <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20-%20kasittelyohjeet/Ruukki-Kuumavalssatut-terakset-Hitsaus-Yleistietoa.pdf>.

Singh, D.K. 2008. Fundamentals of manufacturing engineering. Yhdysvallat, Boca Raton: CRC Press. 527 s.

Ulrich, K.T. & Eppinger, S.D. 2008. Product design and development. Fourth edition. Yhdysvallat, New York: McGraw-Hill / Irwin. 368 s.

Winchell, W. 1989. Realistic cost estimating for manufacturing: Second edition. 2. painos. Yhdysvallat, Dearborn: Society of manufacturing engineers. 180 s.

Yrittäjät. 2014. Työnantajamaksut – Tärkeitä lukuja. [Yrittäjät www –sivuilla]. Päivitetty 3.2.2014. [viitattu 1.3.2014]. Saatavissa: <http://www.yrittajat.fi/fi-fi/tyonantajanabc/tyonantajamaksut/tarkeitalukuja/>.

LIITTEET

Liite I, 1

V/T Vaatimukset**Yleiset**

- V Kotelon on oltava ehdottoman öljytiivis
- T Valmistuskustannukset pienenevät 5%:lla alkuperäisestä
- V Prosessi on suoritettava valmistajan konekannalla
- V Tuotteen laadun on säilyttävä samana tai parannuttava
- T Käytettyjen levynvahvuuksien tulee pienentyä
Käytetyn työvaran pienentäminen ja sitä kautta käytetyn
- T materiaalmäärän pienentäminen
- T Kotelossa käytettyjen päätylevyjen huomattava pienentäminen
- T Päätylevyjen paikoitus nykyistä sisäisemmäksi
Nostosilmukoille paikat kotelonpuolikkaiden kääntämistä ja
- V käsittelyä varten
- Laakeripalkkien ylätasoa oltava kohtisuorassa pulttireikiin
- V nähden
- T Laakerikansien koon ja kiinnityksen standardisointi

Polttoleikkaus

- T Leikattavien muotojen standardisointi ja yksinkertaistaminen
- V Levynvahvuuksien lukumäärän minimointi ja standardisointi
- T Hukkaan menevä materiaalmäärä on minimoitava

Särmäys

- V Särmäys on suoritettava siten, että kappaleen hitsisaumojen määrä ja pituus pienenee
Laakeripesien kohdalla olevien vinotukien särmäysprosessin
- T yksinkertaistaminen ja kehittäminen

Hitsaus

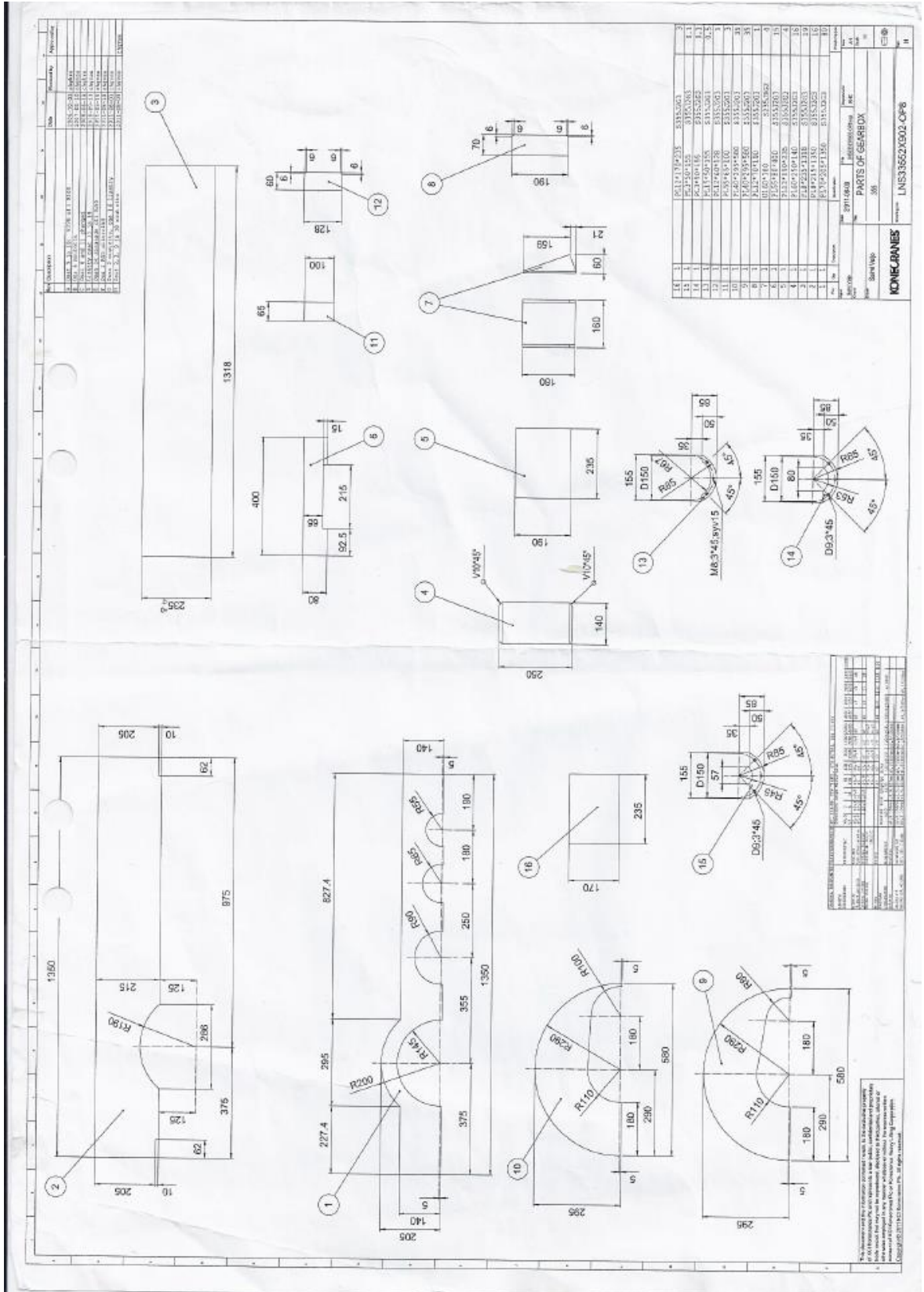
- V Hitsejä on lopullisessa tuotteessa mahdollisimman vähän
- Hitsausprosessi on suoritettavissa valmistajan konekannalla ja
- V mahdollisimman vähäisillä kappaleen siirroilla
- Lopullisen tuotteen hitsien on oltava pituudeltaan
- V mahdollisimman lyhyitä

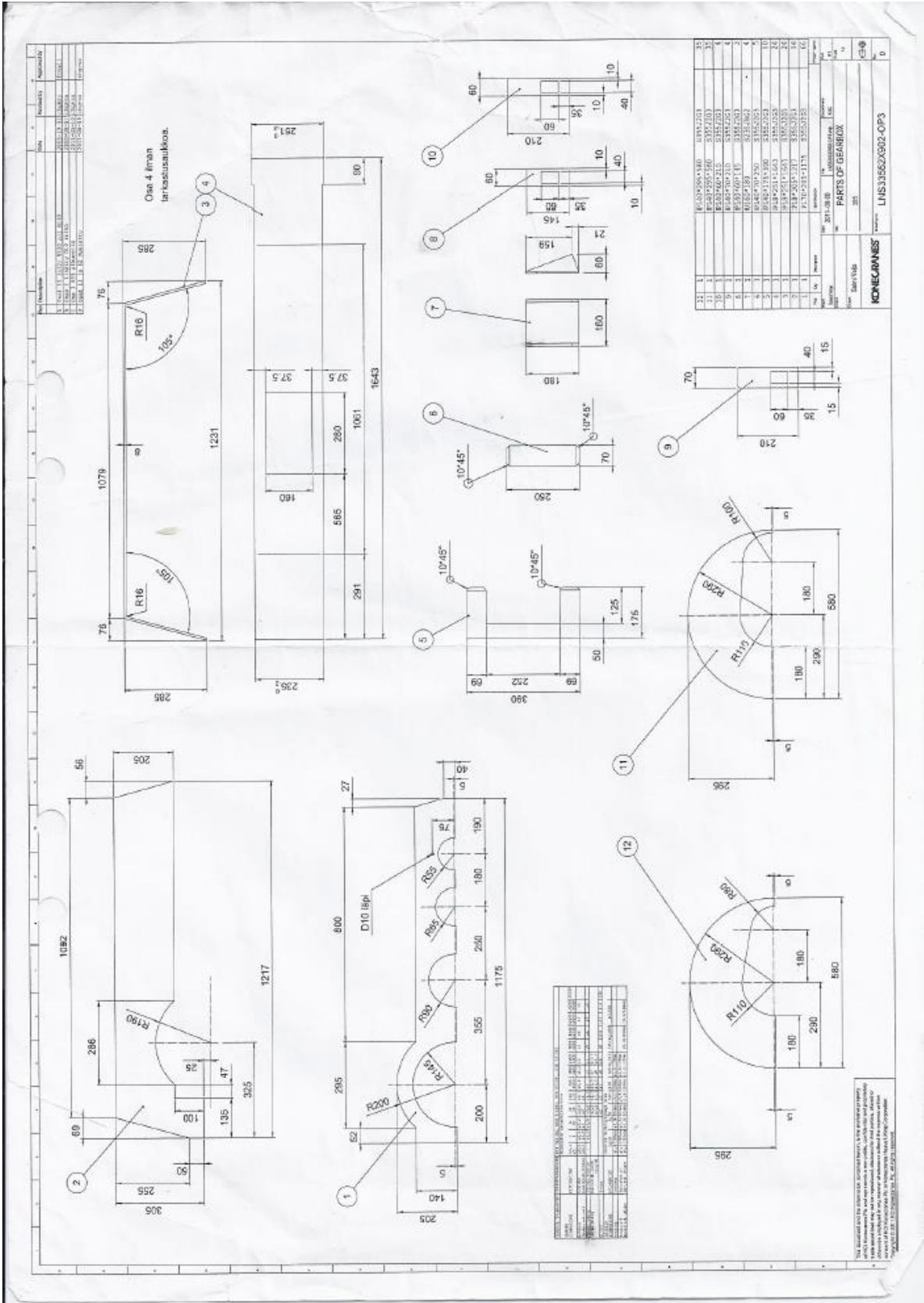
Jännityksenpoistohehkus

- T Hehkutusajan on oltava niin pieni kuin mahdollista
- V Hehkutuslämpötilan on oltava optimaalinen

Asennus

- V Asennusajan on pienennyttävä
- V Asennuksen vaatimustason on alennuttava tai pysyttävä samana
- V Osien ja levynvahvuuksien standardisointi





```
clc
```

```
% Tallennetaan datapisteet vektoreiksi
```

```
data = load('datasovitus.txt');
```

```
x = data(:,1);
```

```
y = data(:,2);
```

```
plot(x,y,'ro')
```

```
grid on
```

```
hold on
```

```
polyfit(x,y,2) ;
```

```
% ENSIMMÄISET 100 VAHVUUTTA
```

```
%g = @(x) 0.0639.*x1.^2 - 10.9642.*x1 + 714.9567;
```

```
%x1 = 0.5:.1:70;
```

```
%plot(x1,g(x1),'k')
```

```
%hold on
```

```
%ISOMMAT VAHVUUDET sovitettuna polyfit:llä vahvuuksiin 100-300
```

```
%f = @(xx) 0.0035.*xx.^2 -2.2342.*xx + 419.2685;
```

```
%xx = 50:.1:300;
```

```
%plot(xx,f(xx),'k')
```

```
% ERIKSEEN KÄYRIEN g ja f LEIKKAUSPISTEELLE x = 54.1797
```



```
%MÄÄRITELLÄÄN LEIKKAUSNOPEUDEN FUNKTIO PALOITTAIN
VAHVUUKSILLE 0.5-300:
```

```
p = @(xx) (0.0639.*xx.^2 - 10.9642.*xx+ 714.9567).*(xx<=54.1797)+(0.0035.*xx.^2 -
2.2342.*xx + 419.2685).*(xx>54.1797);
```

```
xx = 0.5:1:300;
```

```
plot(xx,p(xx),'k')
```

```
%KUVAAJAAN INFORMAATIO LASKETUISTA ASIOISTA
```

```
xlabel('levynvahvuus (mm)')
```

```
ylabel('leikkausnopeus (mm/min)')
```

```
legend('datapisteet','approksimaatio')
```

```
title('POLTTOLEIKKAUSNOPEUS LEIKATTAVAN LEVYNVAHVUUDEN
FUNKTIONA')
```

| Työntekijän kustannusten arvioinnissa käytetyt apuarvot | | | |
|---|-------|-----|------------------------------|
| Leikkauksen, särmäyksen ja hitsauksen yleinen, työntekijästä aiheutuva kustannus | | | |
| Metalliliiton TES:n mukainen tuntipalkka, TVR 9 | 12,84 | €/h | |
| Sotu- maksu prosentteina 2013 | 2,04 | % | |
| Sairausvakuutusmaksu prosentteina 2013 | 2,04 | % | |
| Työttömyysvakuutusmaksu prosentteina 2013 | 1,40 | % | |
| Tapaturmavakuutusmaksu prosentteina 2013 | 8,00 | % | |
| Työeläkevakuutusmaksu prosentteina 2013 | 23,40 | % | |
| PROSENTTILISÄYS YHTEENSÄ | 36,88 | % | |
| Tuntikustannus yhteensä | 17,58 | €/h | |
| | | | |
| Vuosilomasta aiheutuvat kustannukset (25 päivää) | 1,89 | €/h | |
| YHTEENSÄ | 19,47 | €/h | |
| | | | |
| TYÖVAIHEKOHTAISET ALKUARVOT | | | |
| | | | |
| POLTTOLEIKKAUS | | | |
| Leikkaus- ja kuumennuskaasut | 4,46 | €/h | McQuade, 2011, avulla |
| Sähkönkulutus | 0,04 | €/h | |
| Mpl (työntekijäkustannusarvion avulla) | 25 | €/h | |
| | | | |
| SÄRMÄYS | | | |
| Msärmäys (työntekijäkustannusarvion avulla) | 21 | €/h | |
| | | | |
| HITSAUS | | | |
| L&O (työntekijäkustannusarvion avulla) | 30 | €/h | |
| Paloaikasuhde OF | 20 | % | Lukkari, 2008, s.13 avulla |
| HEHKUTUS | | | |
| Mj, jäähdytyksen tuntihinta | 0,08 | €/h | Winchell, 1989, s.111 avulla |
| Mh, hehkutuksen tuntihinta | 100 | €/h | |