



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONA SOINILA
JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN JA MUODONMUUTOSTEN HALLINTA
TUOTANTOMENETELMIEN MODERNISOINNILLA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Ellman
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
9. elokuuta 2017

TIIVISTELMÄ

JOONA SOINILA: Jäännösjännitysten ja muodonmuutosten hallinta tuotantomenetelmien modernisoinnilla

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 71 sivua, 7 liitesivua

Elokuu 2017

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Koneensuunnittelu ja tuotekehitys

Tarkastaja: professori Asko Ellman

Avainsanat: jäännösjännitykset, hitsausmuodonmuutokset, Lean, tuotannon modernisointi, laser-hybridihitsaus, tandem MAG-hitsaus

Laivanrakennuksessa trendinä on rakentaa entistä kevyempiä ja teknisempiä aluksia, mikä aiheuttaa omat haasteensa tuotannolle. Perinteiset tuotantomenetelmät soveltuvat huonosti ohuille materiaaleille aiheuttaen rakenteisiin suuria jäännösjännityksiä ja tätä kautta suunnittele mattomia muodonmuutoksia. Suuren lämmöntuonin takia pitkät levy-lakanoiden ja jäykisteiden päittäis- ja pienahitsit aiheuttavat rakenteeseen sisäisiä voimia, jotka aiheuttavat sisäisiä jännityksiä. Nämä jännitykset esiintyvät rakenteessa ilman ulkoisia kuormituksia. Sisäisistä jännityksistä aiheutuneet muodonmuutokset aiheuttavat kuudenlaisia muodonmuutoksia riippuen jännitykset suunnasta. Muodonmuutosten vähentämiseksi pyritään minimoimaan hitsausprosessissa tuotua lämpöenergiaa sekä optimoimaan hitsin geometriaa. Lämpövyöhyke jää kapeaksi ja termisen työstön aiheuttamasta epätasaisesta lämpenemisestä ja jäähtymisestä syntyvien voimien aiheuttamat muodonmuutokset ovat hyväksyttävällä tasolla.

Tässä diplomityössä tarkoituksena on toimintatutkimuksella kehittää konsepti tuotantolinjasta, jotta jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia voidaan minimoida. Kirjallisuustutkimuksessa on tutkittu menetelmiä, jotka tutkimusten mukaan vähentävät jäännösjännitysten laajuutta ja muodonmuutosten suuruutta. Ohuilla materiaaleilla erityisesti hitsin pituussuuntaisten jäännösjännitysten aiheuttama lommahdus on kriittinen rakenteen suorituskyvyn kannalta ja tätä pyritäänkin vähentämään modernisoidun tuotantolinjan myötä.

Uuden tuotantolinjan konseptissa on pyritty vähentämään termisen työstön aiheuttamia jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia sekä pyritty nostamaan tuotantolinjan tuottavuutta ja pienentämään tuotannon kustannuksia. Uuden tuotantolinjan konseptissa levy-lakanoiden päittäishitsauksessa jauhekaarihitsaus on korvattu laser-hybridihitsauksella, jossa lämmöntuonti on huomattavasti alhaisempaa ja prosessinopeus monikertainen. Jäykisteiden pienahitsauksessa tullaan käyttämään tandem MAG-hitsausta. Uuden tuotantolinjan konseptissa manuaalisen hitsauksen määrä vähenee hitsausrobottien myötä. Hitsausprosessista tulee näin kontrolloidumpi, jolloin muodonmuutokset ja niiden aiheuttama korjaustarve pienenevät. Tällöin voidaan saavuttaa huomattavia kustannussäästöjä myös sekundaarisesti. Keskenkärsiisiin lohkoihin kohdistuvia kuormituksia voidaan minimoida hydraulinostureilla varustetuilla kuljetusvaunuilla, jotta rakenteita siirretään nosturilla ainoastaan pystysuunnassa.

ABSTRACT

JOONA SOINILA: Management of residual stress and distortion by modernizing production methods

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 71 pages, 7 Appendix pages

August 2017

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

Major: Machine Design and Product Development

Examiner: Professor Asko Ellman

Keywords: residual stress, distortion, Lean, modernizing production, laser-hybrid welding, tandem MAG welding

There is a trend in shipbuilding to build lighter and more technical vessels. That causes challenges to the production. Traditional production methods apply poorly for thin materials causing large residual stresses to structures. Because of high heat input high amount of internal stresses are emerging due long fillet and butt welds in large sheet steels. These stresses appear in structure without external forces. Depending on direction of residual stress, they cause six modes of distortion. To minimize distortion it is aim to decrease heat input and optimize geometry of weld. Heat affected zone is narrow and displacements caused by forces of uneven warming and cooling of thermal processing are at acceptable level.

Purpose of this master's thesis is to develop concept of production line to minimize residual stresses and distortion by action research. In literary research there is investigated production methods that decreases amplitude of residual stress and distortion. Especially with thin material buckling of structure caused by longitudinal stresses of welding is critical for performance of structure. Longitudinal stress is one main reason to modernize production line.

In concept of new production line there is aim to decrease residual stresses and distortion of thermal processing, production costs and increase productivity. Butt welding of sheet steels is replaced with laser-hybrid welding in concept of new production line. In laser-hybrid welding heat input is much lower and process speed much higher than submerged arc welding. Fillet welding of stiffeners there is used tandem MAG welding. Amount of manual welding is also decreased by robot welding. Welding process will be more controlled by robot welding which means that there is far less distortion and rework. High cost savings can be achieved secondarily. Forces targeted to unfinished blocks can be minimized with transport vehicle equipped with hydraulic cylinders in which case cranes move parts only in vertical direction.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön tarkoituksena on pohjustaa Rauma Marine Constructions Oy:n tulevaa kehityshanketta tuotannon kehittämisen osalta. Muuttuvassa maailmassa tarvitaan uusia menetelmiä toteuttamaan entistä teknisempiä rakenteita menestyksekkäästi.

Haluan kiittää tämän työn mahdollistamisesta RMC:n suunnittelupäällikkö Jukka Vasamaa sekä hallintojohtajaa Eino-Pekka Vuorentoa. Työn ohjauksesta ja hyvien näkökulmien antamisesta työn edetessä kiitän diplomityöni ohjaajaa Veikko Opasta. Veikon ohjauksen ansiosta tekstistä tuli sulavaa ja loogisesti etenevää. Kiitän työn tarkastajaa Asko Ellmania, jonka antama ohjaus ohjasi työtä oikeaan suuntaan.

Haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni, joiden tuki on ollut opintojeni aikana korvaamattonta. Perheeni on tukenut minua kaikissa valinnoissani elämäni varrella. Opiskeluni sujuivat menestyksekkäästi hyvässä seurassa. Erityisesti Rickin ja Nikon kanssa on ollut antoisaa tehdä töitä ja vastapainoksi viettää vapaa-aikaa.

Suurimmat kiitokset rakkaalle vaimolleni Miialle. Hän on tuellaan ja kannustuksellaan mahdollistanut unelmien tavoittelun. Miian ansiosta olen tilanteessa, jossa viimeistelen diplomityötäni ja olen valmistumassa diplomi-insinööriksi. Kiitos ymmärryksestä, kun olen tehnyt pitkiä päiviä töiden ja opiskelun yhdistämisestä.

Raumalla, 17.8.2017

Joona Soinila

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimusongelma ja kehitystyön rajausta.....	1
1.2	Kehitystyön tavoite	1
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	2
1.4	Työn rakenne.....	3
2.	RAUMA MARINE CONSTRUCTIONS OY	5
2.1	Rauma Marine Constructions Oy:n historia.....	5
2.1.1	Laivanrakennuksen historiaa Raumalla	5
2.2	Liiketoimintamalli.....	6
2.3	Taloudelliset tunnusluvut.....	7
2.4	Tuotteet ja palvelut.....	9
2.5	Asiakkaat.....	11
3.	MUODONMUUTOSANALYYSI	12
3.1	Hitsauksen jäännösjännitykset	13
3.2	Hitsausmuodonmuutokset.....	15
3.2.1	Hitsausmuodonmuutosten syntyminen	16
3.2.2	Hitsausmuodonmuutosten vähentäminen	18
3.3	Lommahtaminen.....	20
3.4	Jäännösjännitysten ja levyn lommahtamisen yhteys.....	23
3.5	Muodonmuutosten korjaaminen.....	26
4.	TERÄSTUOTANNON NYKYTILA	28
4.1	Terästuotannon tuottavuus	30
4.2	Terästuotannon kustannukset.....	31
5.	TUOTANTOLAITTEIDEN MODERNISOINTI.....	33
5.1	Lean-ajattelu tuotannossa.....	33
5.2	Tuotantovaihtoehtojen kartoittaminen	34
5.2.1	Laserhitsaus.....	35
5.2.2	Laser-hybridihitsaus.....	40
5.2.3	Tandem MAG	42
5.2.4	DC-LSND-jäähdytetty hitsaus	44
5.3	Muodonmuutosten minimointi.....	45
5.4	Tuottavuuden kasvattaminen.....	47
5.5	Tuotantovaihtoehtojen kustannuslaskenta.....	51
6.	TUOTANTOVAIHTOEHTOJEN VERTAILU	53
6.1	Tuottavuuden vertailu	55
6.2	Kustannusten vertailu.....	56
6.3	Hitsausmenetelmien vertailu painoarvotaulukoin.....	57
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA.....	60
8.	YHTEENVETO	63
	LÄHTEET.....	65

LIITE A: SEASIDE INDUSTRY PARK:IN KARTTA

LIITE B: TUOTANTOMENETELMIEN KUSTANNUSLASKENTA

LIITE C: KRIITTINEN LOMMAHDUSJÄNNITYS SEKÄ RAKENTEESSA VAL-
LITSEVA HITSISAUMAN AIHEUTTAMA PURISTUSJÄNNITYS 4 MM:N, 6
MM:N, 8 MM:N JA 10 MM:N VAHVUISILLA LEVYILLÄ

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Diplomityön rakenne</i>	4
<i>Kuva 2. Länsi-Suomen Made in Rauma-juttusarja (facebook.com/lansisuomi, 2017)</i>	6
<i>Kuva 3. Verkoston mukautuminen projektien luonteen mukaan (Ahola, 2016)</i>	7
<i>Kuva 4. Rauma Marine Constructions Oy:n liikevaihto vuosina 2014-2016 (Asiakastieto.fi, 2017; Yritystele.fi, 2017)</i>	8
<i>Kuva 5. Rauma Marine Constructions Oy liiketoiminnan tulos vuosina 2014-2016 (Asiakastieto.fi, 2017; Yritystele.fi, 2017)</i>	8
<i>Kuva 6. Rauma Marine Constructions Oy:n henkilöstö 2014-2016 (Asiakastieto.fi, 2017; Yritystele.fi, 2017)</i>	9
<i>Kuva 7. Mols-Linien:in matkustaja-autolautta (rmcfinland.fi, 2017)</i>	9
<i>Kuva 8. Silja Symphony vuosihuollossa Rauma Marine Construction Oy:n kuivatelakalla (rmcfinland.fi, 2017)</i>	10
<i>Kuva 9. Burj Al Arab –hotellin kelluva virkistyskeskus (ls24.fi, 2016)</i>	10
<i>Kuva 10. Hitsausprosessissa tapahtuvat muutokset materiaalissa (Niemi et al. 1993)</i>	13
<i>Kuva 11. Hitsatun rakenteen pituussuuntaisen jäännösjännityksen syntyminen (Niemi et al. 1993)</i>	14
<i>Kuva 12. Rakenneteräksen tyypillinen pitkittäisen jäännösjännityksen jakauma (Radaj, 1992)</i>	15
<i>Kuva 13. Hitsausmuodonmuutosten muotoja (Michaleris, 2011)</i>	16
<i>Kuva 14. Tutkimuksessa käytetty levyrakenne sekä tutkittujen siirtymien sijainnit sekä hitsattavat saumat (Deng et al. 2007)</i>	17
<i>Kuva 15. Kuvassa 14 esitettyjen Viiva 1:den (vasen) ja Viiva 2:den (oikea) siirtymät (Deng et al. 2007)</i>	17
<i>Kuva 16. Kulmakiertymän aiheuttama muodonmuutos levyllä (Radaj, 1992)</i>	18
<i>Kuva 17. Ideaalisen levyn lommahtaminen puristusjännityksessä (Niemi, 2003)</i>	21
<i>Kuva 18. Lomahdusmuotoja pitkissä levykentissä (Niemi, 2003)</i>	21
<i>Kuva 19. Leikkauskuormituksen aiheuttama lomahdus (Niemi, 2003)</i>	22
<i>Kuva 20. Vahvistettujen levykenttien lomahdus (Niemi, 2003)</i>	23
<i>Kuva 21. Vapaan reunan lomahdus (Niemi, 2003)</i>	24
<i>Kuva 22. Kriittinen lomahdusjännitys ja puristusjännitykset neljällä eri a- mitalla 6 mm levyllä. Vaaka-asteikolla levykentän leveys (jäykisteiden väli)</i>	26
<i>Kuva 23. Esikäsitellyn pesulaitteiston</i>	28
<i>Kuva 24. Polttoleikkasema Messer OmniMat</i>	29
<i>Kuva 25. Levyllä olevien päittäishitsausasema LT19</i>	30
<i>Kuva 26. Poikkileikkaukset sulattavan hitsin (vasen) ja avaimenreikähitsauksen (oikea) toimintaperiaatteesta (Lappalainen, 2015)</i>	36

<i>Kuva 27. CO₂-laserin toimintaperiaate (daenotes.com, 2017)</i>	37
<i>Kuva 28. Kahdeksan diodipakan muodostaman lasersäteen syntyminen (Laserline, 2017)</i>	38
<i>Kuva 29. Kuitulaserin toimintaperiaate (Hecht, 2012)</i>	39
<i>Kuva 30. Kiekkolaserin toimintaperiaate (Giesen et al. 2007)</i>	39
<i>Kuva 31. Lasersäteen johtava ja valokaaren johtava laser-hybridihitsausprosessit (Denney, 2011)</i>	41
<i>Kuva 32. Pienahitsin poikkileikkaus kaarihitsauksessa (vasen) ja laser- hybridihitsauksessa (oikea) (Hansen, 2013)</i>	42
<i>Kuva 33. Tandem MAG-hitsauksen ohjausperiaate (Chen et al. 2015)</i>	43
<i>Kuva 34. Perinteisen valokaarihitsauksen ja DC-LSND-tekniikalla suoritettun hitsauksen lämpötilajakaumat (Guan. 2005)</i>	45
<i>Kuva 35. Jäykisteiden suositeltu hitsausjärjestys (Hitsauksen teoriaopetus, 2017)</i>	47
<i>Kuva 36. Eri hitsausmenetelmien lisäaineentuotto suhteutettuna hitsausnopeuteen (Kah, 2011)</i>	49
<i>Kuva 37. Jauhekaarhitsausta ja laser-hybridihitsausta varten tehdyt railot (Hansen, 2013)</i>	50
<i>Kuva 38. Jauhekaarhitsauksen hitsisauman profiili (vasen) verrattuna laser- hybridihitsauksen hitsisauman profiiliin (oikea) (Michaleris, 2011)</i>	51
<i>Kuva 39. Yhdeltä puolen hitsauksen kustannukset per metri</i>	52
<i>Kuva 40. Muodonmuutosten suuruuden riippuvuus lämmöntuontiin (Michaleris, 2011)</i>	53
<i>Kuva 41. Levylakanoiden päittäishitsausmenetelmien muuttuvat kustannukset metriä kohden</i>	56
<i>Kuva 42. Jäykisteprofiliin hitsauksen muuttuvat kustannukset metriä kohden</i>	57

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1. Eri hitsausmenetelmien keskimääräinen lämmöntuonti (Michaleris, 2011; Chen, 2013).....</i>	<i>46</i>
<i>Taulukko 2. Lisäaineentuotto eri hitsausmenetelmissä (ESAB:in osaamiskeskus, 2017; Kah, 2011; DebRoy et al. 2012).....</i>	<i>49</i>
<i>Taulukko 3. Levylakanoiden päittäishitsauksen hitsausmenetelmien painoarvotaulukko.....</i>	<i>58</i>
<i>Taulukko 4. Jäykisteproföölien pienahitsauksen hitsausmenetelmien painoarvotaulukko.....</i>	<i>59</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO ₂ -laser	Hiilidioksidilaser	
DC-LSND	Dynamically Controlled Low Stress No Distortion	
GMAW	Gas Metal Arc Welding, MIG/MAG-Hitsaus	
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding, TIG-hitsaus	
HAZ	Heat Affected Zone, Lämpövyöhyke	
HLAW	Hybrid Laser-Arc Welding, Laser-hybridihitsaus	
LBW	Laser Beam Welding, Laserhitsaus	
LSND	Low Stress No Distortion	
MAG	Metal Active Gas, kaasukaarihitsausmenetelmä	
MIG	Metal Inert Gas, kaasukaarihitsausmenetelmä	
RMC	Rauma Marine Constructions Oy	
SAW	Submerged Arc Welding, Jauhekaarihitsaus	
T-GMAW	Tandem Gas Metal Arc Welding, Tandem MAG-hitsaus	
TIG	Tungsten Inert Gas, kaasukaarihitsausmenetelmä	
A	Rakenteen poikkipinta-ala	mm ²
b	Levyn leveys / Jäykisteiden väli	mm
E	Materiaalin kimmomoduuli	MPa (N/mm ²)
F	Voima	N
I	Virta	A
k _σ	Lommahduskerroin	-
P	Teho	W
t	Levyn paksuus	mm
U	Jännite	V
v	Hitsausnopeus	m/s
η	Hitsausmetodin hyötysuhde	-
σ _{cr,p}	Kriittinen lommahdusjännitys	MPa (N/mm ²)
σ _E	Eulerjännitys	MPa (N/mm ²)
σ _p	Hitsin aiheuttama puristusjännitys	MPa (N/mm ²)
ν	Materiaalin poisson-luku	-

1. JOHDANTO

Johdantokappaleessa esitellään tutkimuksen kannalta olennaiset elementit. Näihin kuuluvat tutkimusongelman esittely, sen rajaus, tutkimuksen tavoitteiden esittely sekä käytettävien tutkimusmetodien esittely. Lisäksi esitellään työn rakenne, mikä helpottaa lukijaa hahmottamaan käsitelty kokonaisuus.

1.1 Tutkimusongelma ja kehitystyön rajaus

Tämän diplomityön tutkimusongelmana on Rauma Marine Constructions Oy:n (RMC) terästuotannon kehittäminen paremmin tuotannon kannalta haastavien modernien alusten valmistukseen. Erikoisalusten vaatimustenmukaisuusstandardit ovat tiukemmat kuin muille aluksille, minkä johdosta tuotantoa on kehitettävä entistä suorituskykyisemmäksi. RMC tulee tulevaisuudessa rakentamaan entistä haastavampia rakenteita, jotka sisältävät esimerkiksi entistä ohuempia materiaaleja ja erikoislujia teräksiä. Näiden rakenteiden tekeminen työstö ja liittäminen vaativat niille erityisesti soveltuvia työtapoja. Esimerkiksi hitsausmuodonmuutokset on minimoitava paremman laadun takaamiseksi. Hitsausmuodonmuutoksia on hyvä minimoida myös sen takia, etteivät ne kertaudu myöhemmissä työvaiheissa.

Tässä kehitystyössä keskitytään terästuotannon nykyisen suorituskyvyn parantamiseen. Kehitystyön pohjalle suoritetaan selvitys aiempien projektien levykenttien muutoksesta ja voidaanko ne ottaa huomioon uusien laitteiden hankinnassa. Kehitystyön kannalta olennainen työvaihe on myös terästuotannon nykytilan analysointi.

Levykenttien muodonmuutosten analysoinnin ja terästuotantolinjan nykytilan analysoinnin pohjalta tehdään toimenpide-ehdotukset tuotantolinjan uudistamiseksi. Uusi tuotantolinja tulee suorituskyvyltään täyttää tulevien projektien vaatimukset ohuempien ja lujempien terästen työstämiseen. Terästuotannon kehittämisen toimenpide-ehdotukset tarkastellaan lopuksi taloudellisesti kustannusarvioin.

1.2 Kehitystyön tavoite

Kehitystyön tavoitteen on tuottaa kattava selvitys terästuotannon kyvykkyydestä ja sen laitekannan soveltuvuudesta tulevaisuuden projekteihin. Erityisesti ohutlevytyöstön ja rakentamisen mahdollisuudet ovat ensisijaisen tärkeitä tulevassa tuotantolaitteistossa. Ohutlevyillä tässä tapauksessa tarkoitetaan ohuimmillaan 4 mm vahvuudeltaan olevia levyjä. Työn lopputuotteena on tarkoitus saavuttaa terästuotantolinjasta konsepti, joka on

kykenevä suoriutumaan menestyksekkäästi tulevista haasteista ja on taloudellisesti kannattava toteuttaa. Terästuotantolinjan arvioinnissa otetaan myös muita kriteereitä huomioon suorituskyvyn ja taloudellisten tunnuslukujen lisäksi. Nämä kriteerit ovat mm. tuotavuuden ja joustavuuden ylläpito ja kehitys.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa suoritetaan toimintatutkimuksena ja siihen liittyvänä kirjallisuustutkimuksena, mistä ei-tarkoituksenmukaiset muodonmuutokset voivat johtua ja pyritään tällä tavalla saamaan tarvittava teoreettinen tietämys terästuotannon kehittämiseksi. Muodonmuutosten analysoinnissa otetaan selvää, minkälaisin voimin rakennetta kuormitetaan missäkin työvaiheessa ja miten nämä voimat vaikuttavat rakenteen käyttäytymiseen. Toisin sanoen pyritään selvittämään ilmiöiden välisiä yhteyksiä.

”Toimintatutkimuksen ... ideana on kehittää ja muuttaa käytäntöä tutkimustiedon avulla ja samalla tuottaa tutkimukseen tietoa käytännön elämästä.” (Tiainen et al. 2015)

Kuten edellä olevassa lainauksessa Tiainen ym. mainitsee, toimintatutkimuksen tarkoituksena on tukijan ja organisaation yhteistyön avulla tutkia, kehittää ja muuttaa jonkin organisaation osa-alueen toimintaa. Toimintatutkimuksen lähtökohtana on usein organisaation tarve kehitykselle. Tutkimusprosessin eteneminen tapahtuu sykleissä, joiden vaiheet ovat suunnittelu, toiminta, havainnointi ja reflektointi. Reflektoinnin jälkeen alkupeäinen suunnitelma tarkastetaan ja päivitetään ja sykli alkaa taas uudestaan. (Tiainen et al. 2015)

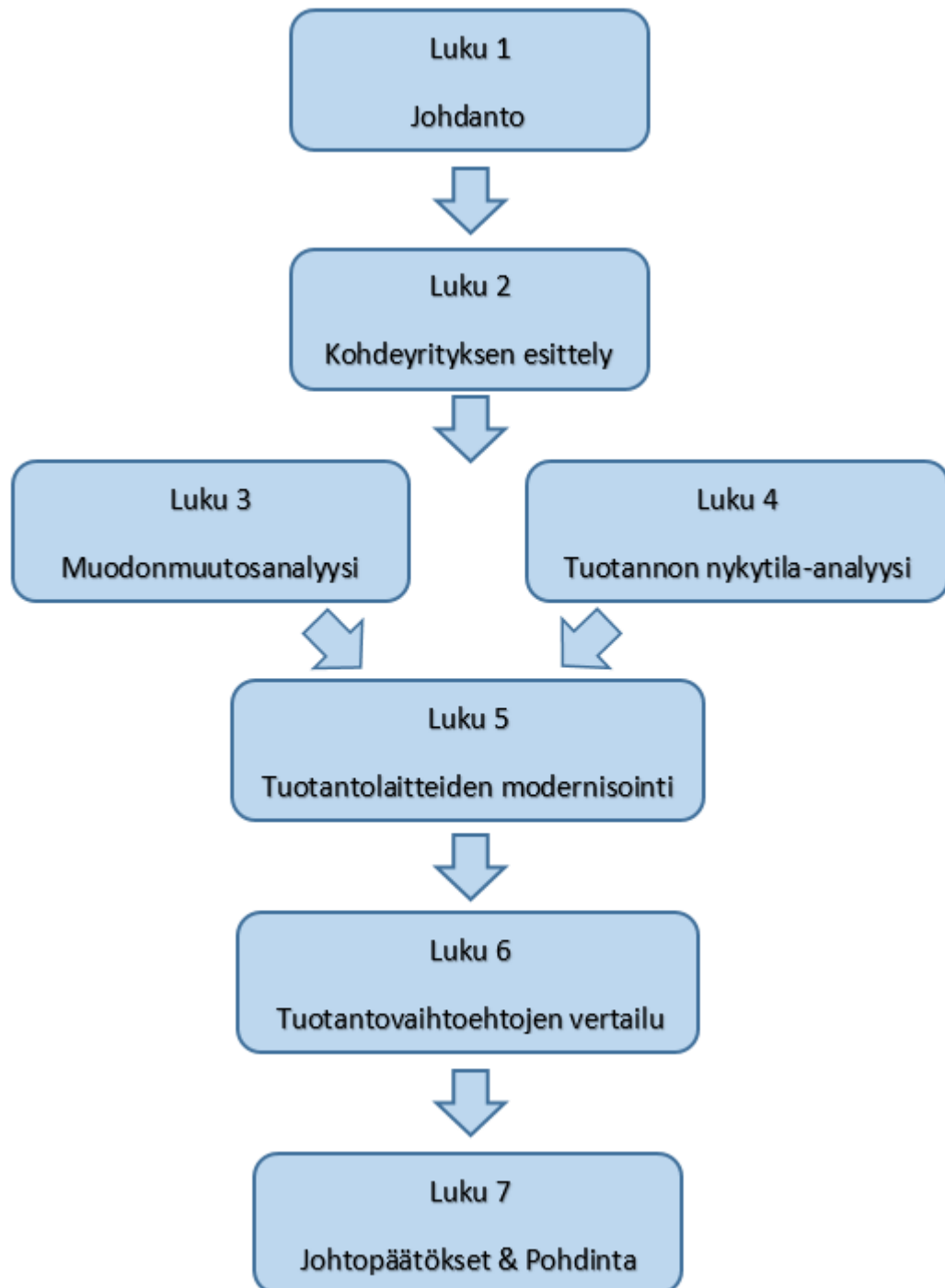
Muodonmuutosten analysoinnin pohjalta arvioidaan, miten terästuotantolinja kuormittaa rakennetta ja miten näitä muodonmuutoksia aiheuttavia kuormituksia voidaan pienentää. Terästuotantolinjan nykytila-analyysi suoritetaan laitekannan spesifikaatiota tarkastelemalla. Spesifikaatiota apuna käyttäen arvioidaan suorituskyvyn raja-arvot, joista tuotantolinja suoriutuu menestyksekkäästi.

Terästuotantolinjan muutosvaihtoehtoja tullaan suunnittelemaan muodonmuutosanalyysin, terästuotannon nykytila-analyysin sekä Lean-ajattelun pohjalta. Pääpaino tuotantolinjan muutoksessa on tulevaisuuden haasteet. Nykytilaa peilatessa tulevaisuuden haasteisiin verrataan nykytilan poikkeamia tulevaisuuden vaatimuksiin. Esimerkiksi mahdollisuuksia levyn paksuuden osalta pyritään laajentamaan ja tuotannon tuottavuutta pyritään kasvattamaan.

1.4 Työn rakenne

Tämä tutkimus- ja kehitystyö koostuu kahdesta empiirisestä tutkimuksesta, joiden tuloksia peilataan kirjallisuuteen. Kappaleessa 2 on esitelty toimeksiantoyritys sekä hieman yrityksen edustaman toimialan historiaa alueellisesti. Kappaleessa 3 on teoriaa levykenttien lommahduksesta ja hitsausmuodonmuutoksista sekä niiden aiheuttavista voimista. Lisäksi kappaleessa 3 on esitetty näiden voimien esiintyminen tuotannossa. Kappaleessa 4 on analysoitu terästuotannon nykytila ja sen suorituskyky tulevaisuuden projekteja ajatellen.

Kappaleessa 5 esitellään Lean-ajattelua tuotannon tuottavuuden kehittämiseksi ja pohditaan vaihtoehtoja terästuotantolinjan kehittämiseksi. Vaihtoehtoissa on esitelty uusia työstömenetelmiä, jotka soveltuvat nykyisiä menetelmiä paremmin ehkäisemään muodonmuutosten syntymistä, entistä ohuempien tuotteiden käsittelyyn ja työstöön sekä parantavat tuottavuutta ja joustavuutta. Kappaleessa 6 näitä vaihtoehtoja on vertailtu toisiinsa sekä nykyiseen tuotantolinjaan suorituskyvyn kannalta sekä taloudellisesta näkökulmasta. Kehitystyön seitsemännessä kappaleessa esitetään pohdintaa tulevan terästuotantolinjan konseptista sekä vaihtoehtojen soveltuvuudesta jäännösjännitysten ja muodonmuutosten minimointiin. Kuvassa 1 on visualisoitu diplomityön rakenne.



Kuva 1. Diplomityön rakenne

2. RAUMA MARINE CONSTRUCTIONS OY

Työn toinen kappale sisältää toimeksiantajayrityksen esittelyn. Esittelyn tarkoituksena on saada lukijalle käsitys RMC:n historiasta, verkostoihin pohjautuvasta liiketoimintamallista, taloudellisista tunnusluvuista yrityksen lyhyen elinkaaren ajalta, sen tuotteista ja palveluista sekä asiakaskunnasta. Kappaleessa 2.1.1 perehdytään hieman raumalaisen laivanrakennuksen historiaan. Tämä auttaa lukijaa ymmärtämään, minkä osaamisen pohjalta RMC on rakennettu.

2.1 Rauma Marine Constructions Oy:n historia

RMC on Raumalla Seaside Industry Park:issa sijaitseva laivanrakennukseen erikoistunut yritys. RMC aloitti toimintansa kesällä 2014 kun aiemmin keväällä etelä-korealainen STX oli lopettanut toimintansa Raumalla. RMC Oy:n ei tarvinnut aloittaa siis tyhjästä toimintaansa vaan Rauman ympäristössä oli jo valmiina osaamista telakkateollisuudesta. Tätä osaamista RMC hyödyntää omassa toiminnassaan ja verkostoihin keskittyvässä liiketoiminnassaan. (rmcfinland.fi, 2017)

2.1.1 Laivanrakennuksen historiaa Raumalla

Raumalla on rakennettu laivoja jo yli 500 vuotta (Rauman merimuseo, 2015). Kuitenkin laivanrakennus kasvoi Raumalla vasta sotien jälkeen 1940-luvulla, kun Suomi joutui maksamaan sotakorvauksia Neuvostoliitolle. Sotakorvausten kokonaissumma kahdeksan vuoden aikana oli 300 miljoonaa dollaria, josta 175 miljoonaa oli määrä maksaa koneina ja laitteina. Tästäkin summasta laivatoimitusten osuus oli 60 miljoonaa dollaria eli 20 % kokonaissummasta. Verraten silloista rahan arvoa Suomen kauppalaivaston 120 aluksen arvo oli 14 miljoonaa dollaria. (Rauman merimuseo/Raumalaisen laivanrakennuksen perinne Oy 2011, s. 23-27)

Raumalle allastelakkaa alettiin rakentaa 1943 Rauma-Raahe Oy:n toimesta jo aiempien vuosien suunnitelmien mukaan. Rauman telakasta piti tulla maantieteellisen sijaintinsa vuoksi kauppalaivoja palveleva korjaustelakka, mutta sotakorvausten takia 1945 siellä alettiin ensimmäisenä valmistaa proomuja jo ennen kuivatelakan valmistumista. Telakka kokonaisuudessaan valmistui vasta vuonna 1951 jolloin Rauma-Raahe Oy:n telakalla oli jo kuusi vuotta valmistettu sotakorvauksia varten aluksia. (Rauman merimuseo/Raumalaisen laivanrakennuksen perinne Oy 2011, s. 28-43) Raumalle perustettiin myös toinenkin telakka 1940-luvulla rakentamaan puualuksia sotakorvauksia varten: Holming Oy (Palonen, 2017)

Raumalla on vuoden 1945 jälkeenkin kun sotakorvaukset saatiin maksettua rakennettu satoja laivoja useiden eri yritysten toimesta. Rauma-Raahe Oy sulautui vuonna 1952 Repola-Viipuri Oy:n ja Lahti Oy:n kanssa ja yritykset muodostivat näin Rauma-Repola Oy:n. (lahdenmuseot.fi, 2017; metso.fi, 2017) Holming Oy, Rauma Repola Oy ja valtio perustivat vuonna 1991 Finnyards Oy:n (hollming.fi, 2017). Seuraava fuusio syntyi 2005 kun norjalaisomistuksessa olleet Kværner Masa-Yards ja Aker Finnyards yhdistyivät. Kuitenkin jo vuonna 2008 Aker Yards Oy-nimellä operoinut yritys ostettiin etelä-korealaisen STX:n toimesta muodostaen näin STX Finland:in. (Id, 2013)

Raumalainen laivanrakennus tunnetaan maailmalla ja tästä syystä Rauma Marine Constructions Oy on luonut brändinimen Made in Rauma. Samaa nimeä kantaa myös raumalaisen Länsi-Suomi-sanomalehden juttusarja, jossa käydään läpi Raumalla rakennettujen laivojen matkaa (kuva 2). (facebook.com/lansisuomi, 2017)

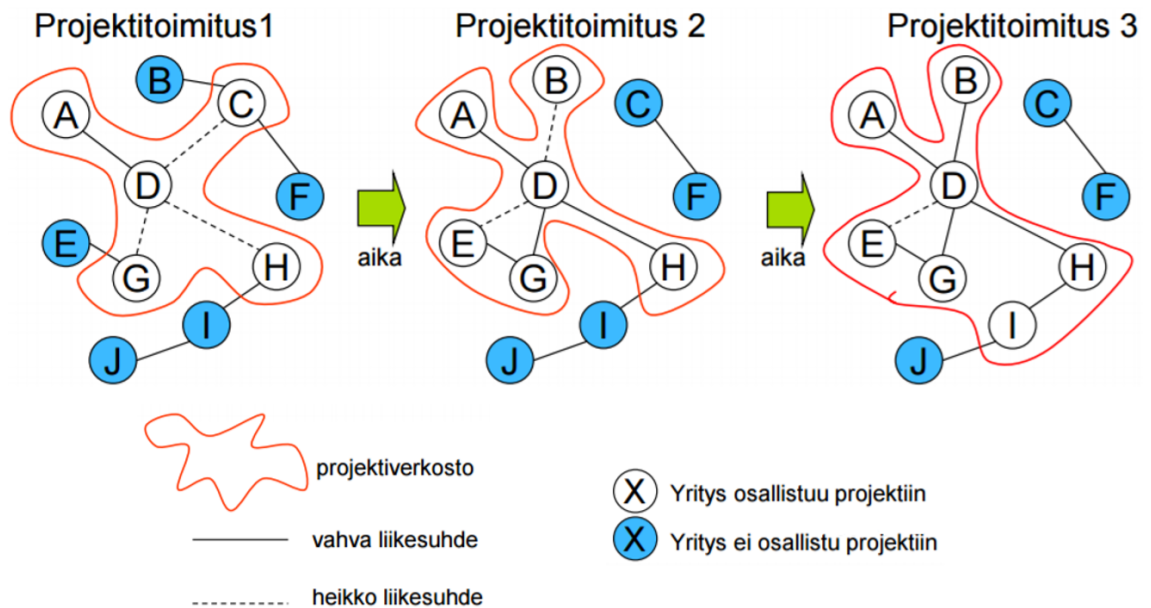


Kuva 2. Länsi-Suomen Made in Rauma-juttusarja (facebook.com/lansisuomi, 2017)

2.2 Liiketoimintamalli

RMC:n liiketoimintamalli on projektiliiketoiminnan harjoittamista yhteistyöverkoston avulla. RMC:n rooli verkostossa on toimia systeemi-integraattorina ja kokonaistoimittajana laivanrakennusprojekteissa. Se vastaa myös projektien rahoituksesta, hallinnasta ja laadunvarmistuksesta. Verkostoihin perustuvassa liiketoimintamallissa arvoa tuottamat osa-alueet voidaan jättää projektin ulkopuolelle ja näin karsia kustannuksia. (rmcfinland.fi, 2017)

Verkostoihin perustuva liiketoimintamalli mahdollistaa organisaation skaalautuvuuden eri projektien välillä. Projekteihin sisällytetään ainoastaan ne yhteistyökumppanit, joiden liittyminen työlle mahdollistaa projektin mahdollisimman menestyksekkään suorittamisen. Verkosto mukautuu näin suoritettavaan projektiin. Verkostoihin perustuva liiketoimintamalli myös tehostaa projektin toimintaa, kun jokainen projektiin osallistuva yritys keskittyy omaan avainosaamiseensa. Kuva 3 esittää verkoston mukautuvuutta projektien luonteen mukaan. Yhteistyökumppaniyritykset sisällytetään projektiin niiden ydinosaamisen mukaan. (Ahola, 2016)

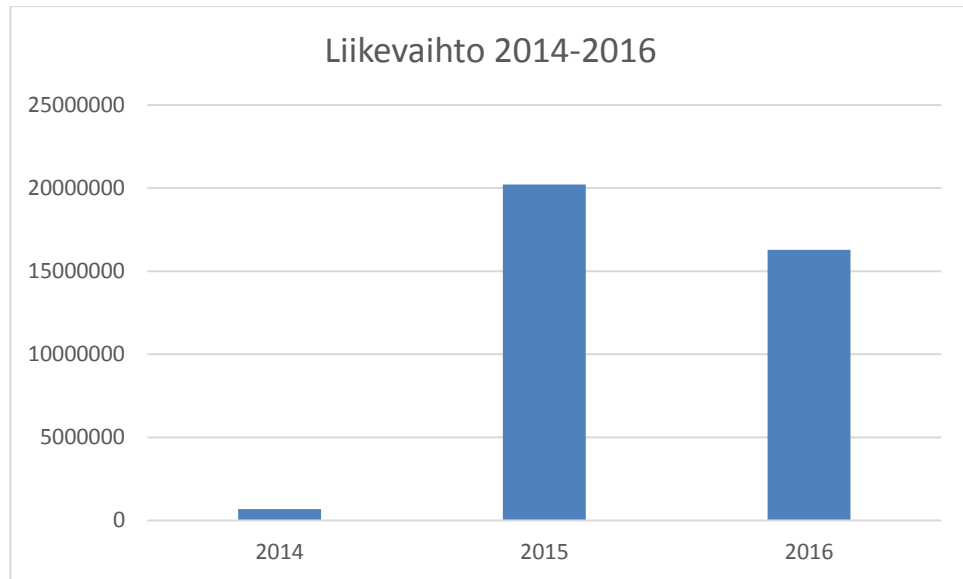


Kuva 3. Verkoston mukautuminen projektien luonteen mukaan (Ahola, 2016)

2.3 Taloudelliset tunnusluvut

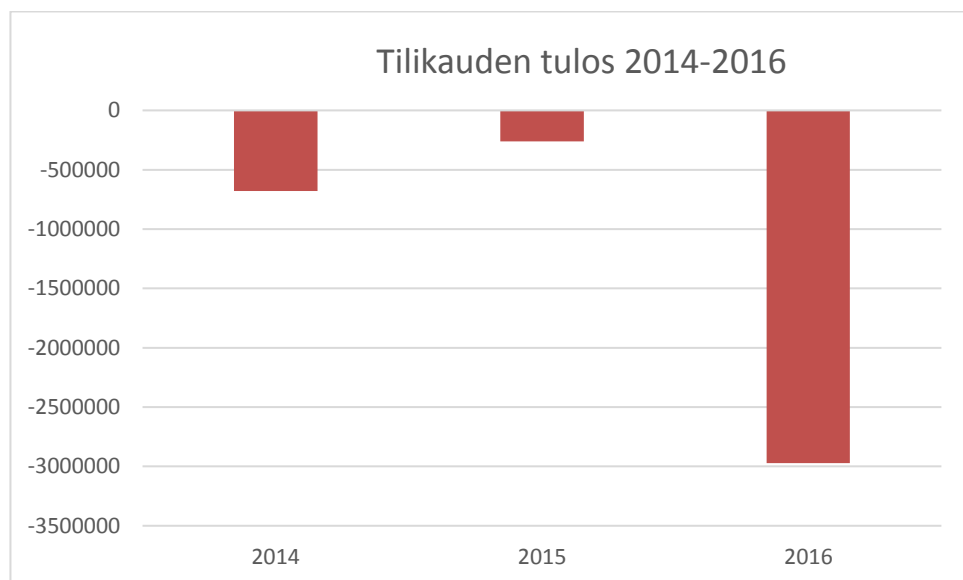
RMC on perustettu vasta vuonna 2014, joten yrityksen taloudellisia tunnuslukuja on ainoastaan kolmelta vuodelta. Näistäkin ensimmäisen vuoden luvut alkavat vasta kesäkuulta, jolloin yritys perustettiin.

RMC:n liikevaihto on yrityksen lyhyen elinkaaren aikana kasvanut ja laskenut. Vuonna 2014 yrityksen liikevaihto oli ainoastaan 675 105 € ja vuonna 2015 se oli noussut jo 20 223 000 € (kuva 4). Vuoden 2016 liikevaihto oli 16 298 000 €. (Asiakastieto.fi, 2017; Yritystele.fi, 2017)

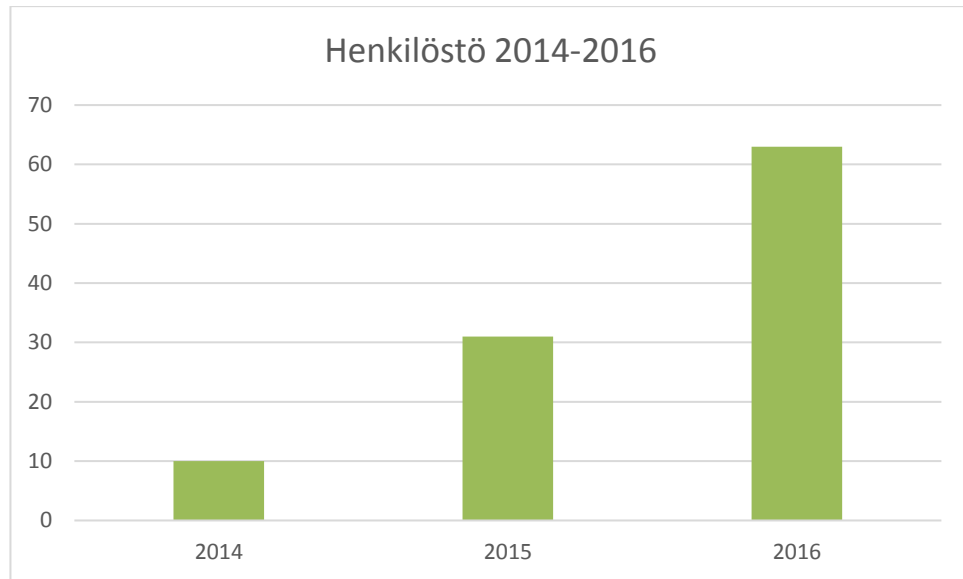


Kuva 4. Rauma Marine Constructions Oy:n liikevaihto vuosina 2014-2016 (Asiakastieto.fi, 2017; Yritystele.fi, 2017)

Yrityksen taloudellinen tulos on kehittynyt ylös ja alas sen elinkaaren aikana. Vuonna 2014 RMC:n tilikauden tulos oli -647 177 €. Vuonna 2015 tilikauden tulos oli jo parempi kuin edellisenä vuonna ollen negatiivinen enää 260 000 € (kuva 5). Vuosi 2016 oli RMC:lle kuitenkin merkittävästi negatiivinen. Kyseisenä vuonna RMC investoi yritykseen merkittävästi ja henkilöstön määrä tuplaantui. Vuonna 2014 RMC:n henkilöstön määrä ilmoitetaan olevan 10 henkilöä. Henkilöstön määrä on kasvanut jyrkästi koko sen lyhyen elinkaaren aikana. Vuonna 2015 henkilöstömäärä oli 31 henkeä ja vuonna 2016 63 henkeä (kuva 6). (Asiakastieto.fi, 2017; Yritystele.fi, 2017)



Kuva 5. Rauma Marine Constructions Oy liiketoiminnan tulos vuosina 2014-2016 (Asiakastieto.fi, 2017; Yritystele.fi, 2017)



Kuva 6. Rauma Marine Constructions Oy:n henkilöstö 2014-2016 (Asiakastieto.fi, 2017; Yritystele.fi, 2017)

2.4 Tuotteet ja palvelut

RMC on nimensä mukaisesti keskittynyt laivanrakennukseen. Sen erikoisosaamiseen kuuluu jäisissä olosuhteissa kulkevat alukset, kuten jäänmurtajat, rannikkovartiolaivat ja sotalaivat. Näiden lisäksi RMC valmistaa autolauttoja, matkustaja-aluksia, tutkimusaluksia ja huoltoaluksia. Kuvassa 7 on esitetty havainnekuvaa RMC:n nykyisestä suuresta projektista: Mols-Linien:in 158-metrisestä matkustaja-autolautasta.



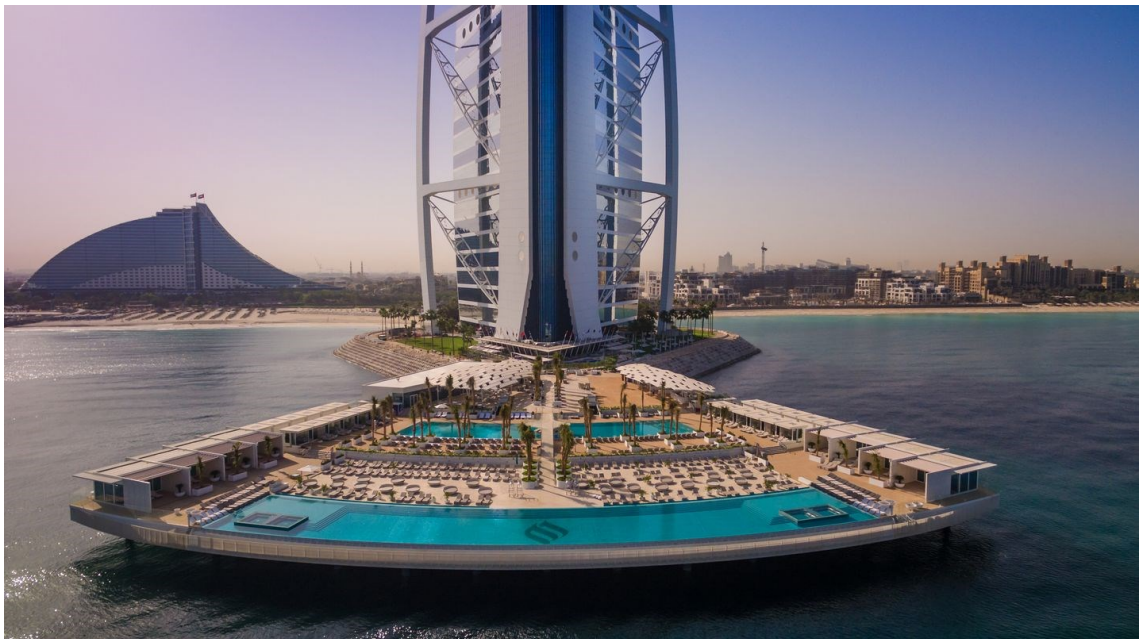
Kuva 7. Mols-Linien:in matkustaja-autolautta (rmcfinland.fi, 2017)

Laivojenrakennuksen lisäksi RMC on keskittynyt laivanrakennuspalveluiden tarjoamiseen. Nämä laivanrakennuspalvelut pitävät sisällään kuivatelakoinnin, laivojen päivitys- ja parannuspalvelun, korjauspalvelun sekä muuntorakennuksen. Kuvassa 8 Silja Symphony on RMC:n kuivatelakalla vuosihuollossa tammikuussa 2016.



Kuva 8. *Silja Symphony vuosihuollossa Rauma Marine Construction Oy:n kuivatelakalla (rmcfinland.fi, 2017)*

Perinteisten laivojen ja laivapalveluiden lisäksi RMC valmistaa yhteistyössä kumppaniensa kanssa myös innovatiivisempia tuotteita. Esimerkkinä tästä on kelluvien asutus- ja virkistyskeskusten valmistus. Eräs näistä virkistyskeskuksista on toimitettu Dubaihin Burj Al Arab –hotellin yhteyteen (kuva 9). Kelluva tekosaari on rakennettu jo Raumalla ja ainoastaan koottu paikan päällä, jotta hotellin ympäristöstä ei syntyisi suurta rakennustyömaata. (Koskinen, 2015)



Kuva 9. *Burj Al Arab –hotellin kelluva virkistyskeskus (ls24.fi, 2016)*

Innovatiivisten ja perinteisestä laivanrakennuksesta poikkeavien tuotteiden osalta voidaan mainita vuoden 2016 SuomiAreena-tapahtuman tapahtumalavan rakentamisen. RMC valmisti taiteilija Jarkko Niemelän suunnitteleman tapahtumalava Brykän. (rmcfinland.fi, 2016) Tuotteiden variaatio paljastaa RMC:n kilpailuvaltteja olevan joustavuus ja ennakkoluulottomuus uusia ideoita ja toimintatapoja kohtaan.

2.5 Asiakkaat

RMC:n asiakaskunta koostuu pääasiassa kansainvälisistä varustamoista sekä julkisen sektorin osalta Suomen puolustusvoimista. Yrityksen lyhyen elinkaaren aikana RMC on tehnyt projekteja mm. Silja Line:lle ja Suomen valtiolle (rannikkovartiosto). Valtaosa projekteista on ollut muunto- tai korjausrakentamista. Suunta on kuitenkin laivanrakennuksen osalta uudisrakentamiseen Mols-Linien:in autolautan ja Suomen puolustusvoimien Laivue 2020 suunnittelusopimuksen myötä. Perinteisestä laivanrakennuksesta poikkeavat tuotteet osoittavat, että RMC ei kuitenkaan poissulje mitään asiakasryhmää ja on avoin innovatiivisille projekteille.

3. MUODONMUUTOSANALYYSI

Muodonmuutosanalyysissä keskitytään selvittämään laajojen levykenttien muodonmuutoksen, tässä tapauksessa lommahtamisen ilmiötä ja tarkastellaan, missä työvaiheissa levykenttien lommahtaminen syntyy. Lisäksi analysoidaan, miten rakenteen suunnittelussa tai työvaiheiden suunnittelussa voidaan ehkäistä levykenttien lommahtaminen ja minimoitua hitsauksen jäännösjännityksiä ja niiden aiheuttamia muodonmuutoksia.

Hitsauksessa ja lohkojen asennuksessa aiheutuneista muodonmuutoksista syntyy tuottamattoman työn tarvetta oikaisun ja lohkojen sovittamisen takia. Tuottamattoman työn osuus voi runkotuotannosta olla jopa 30 %. (Roland et al. 2004) Paremmen työn laadun avulla voidaan karsia siis iso osa tuotannon kustannuksista. Tämä kuitenkin vaatii investointeja tuotantolinjaan, jotta termisen työstön aiheuttamia vikoja voidaan vähentää.

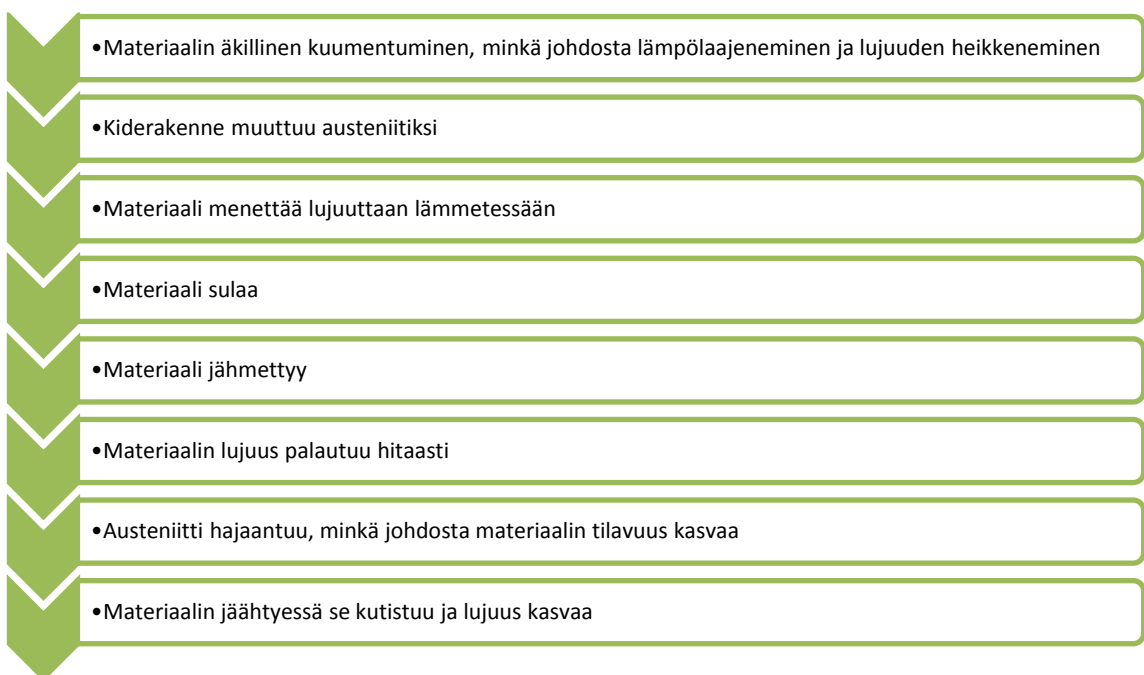
Laivanrakennuksen trendin ollessa entistä ohuemmista materiaaleista valmistettuja aluksia kohti, syntyy näihin aluksiin ei-toivottuja muodonmuutoksia rakenteen stabiliteetin pettämisen myötä (Michaleris et al. 1999). Aiemmin hyväksi havaitut tuotantomenetelmät eivät välttämättä sovellukaan uuteen toimintaympäristöön. Ohuempien materiaalien myötä aiempaan tuotannossa tapahtuvat muutokset rakenteessa kertaantuvat entistä pienempien voimien vaikutuksesta myöhemmissä työvaiheissa. Tästä syystä onkin kiinnitettävä huomiota rakenteen sisäisten jännitysten pienentämiseen. (Mandal, 2004)

On myös syytä analysoida, mitkä muodonmuutokset syntyvät missäkin vaiheessa. Näin voidaan suorittaa oikeita toimia jäännösjännitysten ja muodonmuutosten korjaamiseksi. Esimerkiksi rakenteen käsittelyssä syntyviä muodonmuutoksia voidaan vähentää kontrolloidumman käsittelyn avulla ja ymmärtämällä rakenteen sisäisiä jännityksiä. Termisen työstön aiheuttamia jäännösjännityksiä voidaan taas minimoida monin eri keinoin, joita esitellään kappaleessa 3.2.2.

3.1 Hitsauksen jäännösjännitykset

Terästen hitsauksessa syntyy sekundaarisia jännityksiä, jotka esiintyvät ilman ulkoista kuormitusta. Hitsauksessa hitsattavat kappaleet ja hitsausaine lämpenevät ja jäähtyvät epätasaisesti, mikä aiheuttaa rakenteen sisäisiä jännityksiä. Kuvassa 10 on esitetty hitsausprosessin lämmöntuonnista johtuva muodonmuutosyksi. (Niemi et al. 1993)

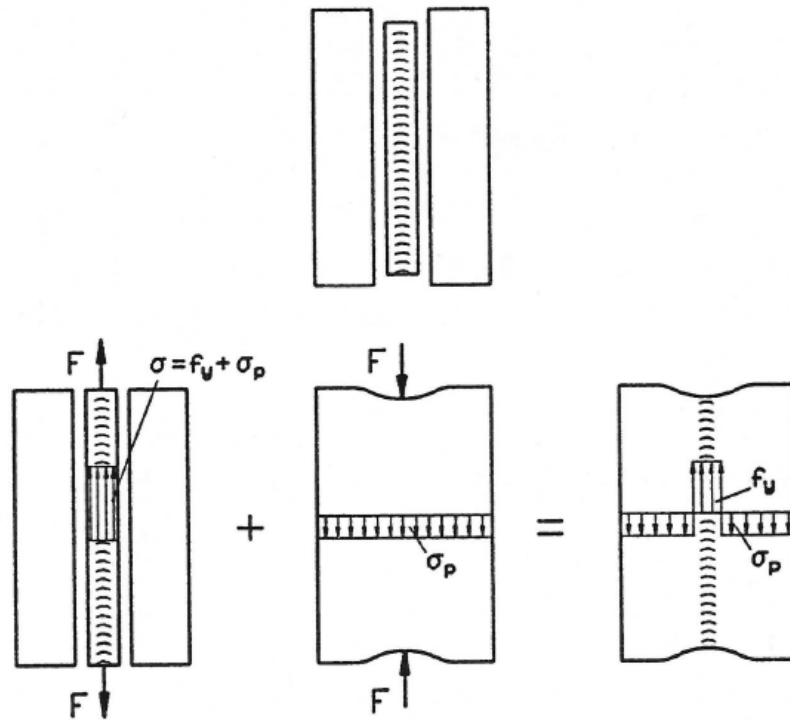
Hitsatessa kuuma aines pyrkii laajenemaan ja kylmät alueet estävät tämän laajenemisen. Tällöin kuuma aines alentuneen myötölujuuden takia tyssäntyy. Jäähtyessään tyssäntynyt aines pyrkii kutistumaan, kun taas kylmät kohdat pyrkivät pitämään tilavuutensa estäen osittain kutistumaa syntymistä. Tyssäntyneen, jäähtyneen aineksen ja muun aineksen välille syntyy jännityksiä, joita kutsutaan jäännösjännityksiksi. (Niemi et al. 1993)



Kuva 10. Hitsausprosessissa tapahtuvat muutokset materiaalissa (Niemi et al. 1993)

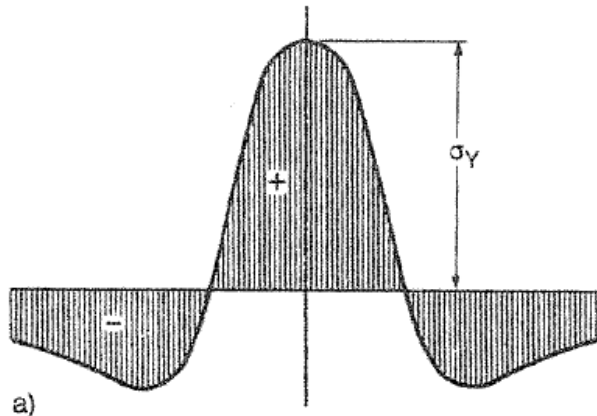
Merkittävimmät jäännösjännitykset hitsissä ovat hitsin pituussuuntainen jännitys ja hitsiin nähden poikittainen jännitys. Paksuussuuntaiset jännitykset tulevat kyseeseen aineenpaksuuden kasvaessa. Ohuilla aineenpaksuuksilla paksuussuuntainen jännitys ei ole määrävä tekijä. Kuvassa 11 on esitetty hitsin pituussuuntaisen jännityksen syntyminen. Mikäli hitsisauma irrotettaisiin kokonaisuudesta, kutistuisi se jäähtyessään saumaa lyhyemmäksi. Kokonaisuuteen liitettynä hitsisauma pyrkii lyhentämään kappaleiden reunaa ja kappaleen reunat pyrkivät estämään hitsin kutistumaa. Tästä syntyy venymäjännitys hitsiin ja puristusjännitys kappaleisiin. (Niemi et al. 1993)

Yleisesti jäännösjännityksen suurin arvo saavuttaa materiaalin myötörajan hitsin kohdalla. Myötörajan ylitykset ovat myös mahdollisia muokkauslujittumisen sekä moniaksaalisen jännitystilän myötä. Jäännösjännityksen suuruus riippuu suuresti myös mitattavan kohteen sijainnista. Lämpövyöhykkeen (HAZ) alueella jännitys vaihtelee suuresti lähekkäinkin olevien pisteiden välillä. Pitkittäisen jäännösjännityksen jakauma on esitetty kuvassa 12. Suurin jäännösjännitys on hitsisaumassa ja lämpövyöhykkeellä sijaitseva vetojännitys.



Kuva 11. Hitsatun rakenteen pituussuuntaisen jäännösjännityksen syntyminen (Niemi et al. 1993)

Hitsin poikkipinnan jännitysjaakauma on esitetty kuvassa 12. Pystysuuntainen akseli kuvaa hitsin pystysuuntaista symmetriatasoa. Huomataan, että hitsin ja lämpövyöhykkeellä vallitsee vetojännitys hitsin pitkittäissuuntaan. Hitsin molemmin puolin olevat puristusjännitykset tasapainottavat kokonaisjännitysjaakaumaa. Hitsattavat levyt ovat näin puristusjännityksen alaisia ja pienentävät levykentän kriittistä lommahdusjännitystä merkittävästi. Ideaalilevyssä olevan kriittisen lommahdusjännityksen ollessa σ_{cr} , on hitsatun levyn todellinen lommahdusjännityksen raja-arvo $\sigma_{cr} - \sigma_p$. σ_p on tässä tapauksessa levyssä vallitseva puristusjäännösjännitys. Tämä kriittisen lommahdusjännityksen alenema on otettava huomioon rakennetta suunniteltaessa.

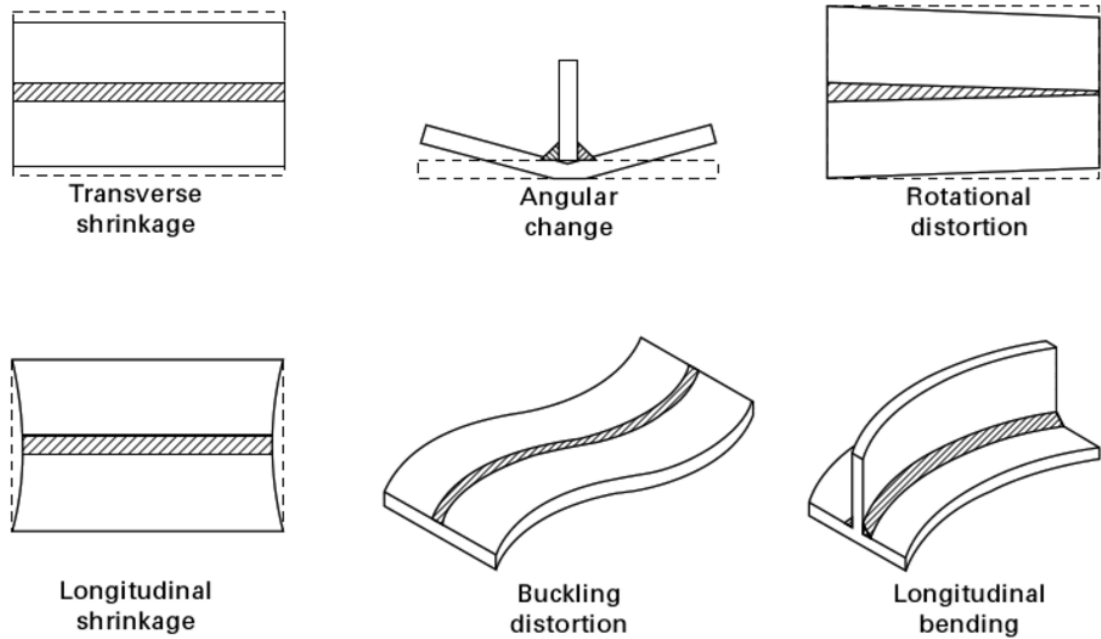


Kuva 12. Rakenneteräksen tyypillinen pitkittäisen jäännösjännityksen jakauma (Radaj, 1992)

Gannon, Liu, Pegg & Smith (2012) ovat tutkimuksessaan tutkineet laivan rungon jäykisteiden hitsauksen vaikutusta jäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin. Tutkittavana kohteena on T-palkki ja levylakana, johon palkki hitsataan. Materiaalin myötöraja on 294 MPa. Jäännösjännitykset hitsisauman kohdalla ja lämpövyöhykkeellä ovat myötörajalla. Levylahanassa on tämän vetojännityksen tasapainottava noin 100 MPa puristusjännitys.

3.2 Hitsausmuodonmuutokset

Hitsausmuodonmuutokset ovat yksi merkittävin syy hitsausolosuhteiden epästabilisuuden ohella hitsauksen huonoon hitsauslaatuun. Hitsauslaatua voidaan merkittävästi parantaa kontrolloimalla hitsauksen jälkeistä kutistumaa sekä hitsauksen kulmakiertymää. Kuvassa 13 on esitetty hitsien sisäisten voimien aiheuttamat kuusi muodonmuutosmuotoa. Poikittainen kutistuma, pitkittäinen kutistuma ja kiertymismuodonmuutos ovat tassa tapahtuvia muodonmuutoksia. Kulmakiertyminen, lommahdus ja pitkittäistaipuma ovat kolmiulotteisia muodonmuutoksia. (Michaleris, 2011) Hitsausmuodonmuutoksilla tarkoitetaan nimenomaan ei-toivottuja muodonmuutoksia, joissa hitsatut kappaleet muuttavat muotoaan hitsauksen lämpökäsittelyn johdosta.

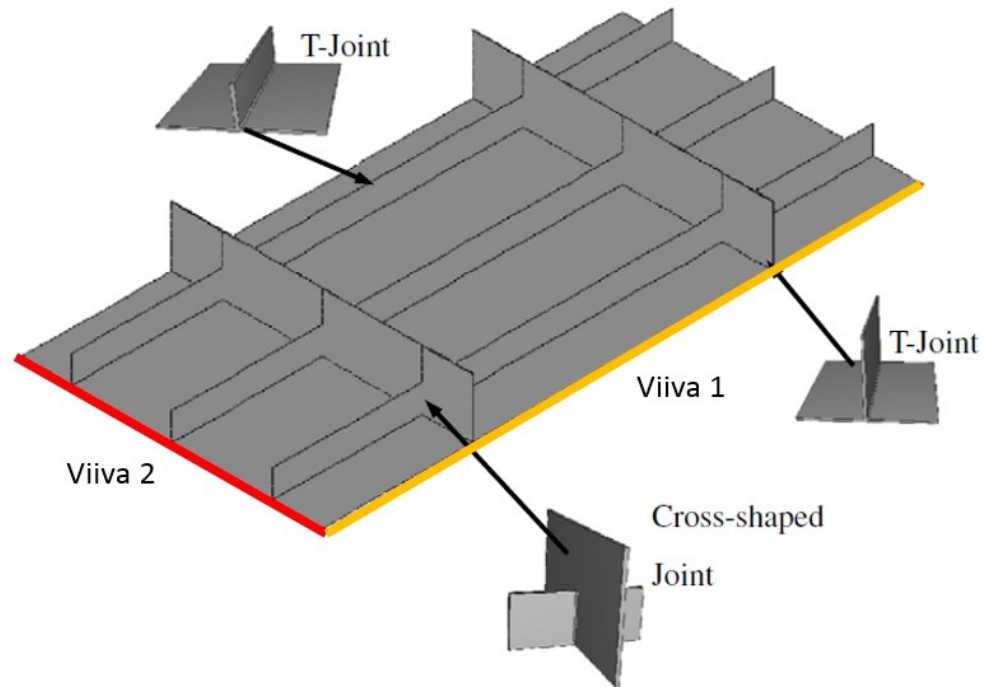


Kuva 13. Hitsausmuodonmuutosten muotoja (Michaleris, 2011)

3.2.1 Hitsausmuodonmuutosten syntyminen

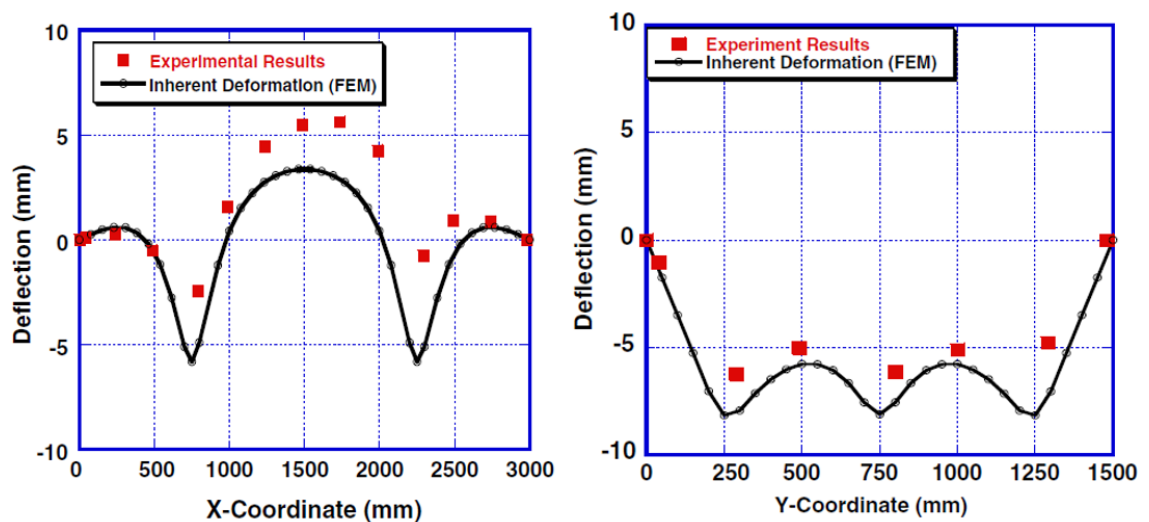
Hitsauksen aiheuttamat muodonmuutokset syntyvät jäännösjännitysten vaikutuksesta. Kuvassa 13 ylärivissä on hitsauksen poikittaisen kutistuman aiheuttamat muodonmuutokset ja alarivissä hitsisauman pitkittäisen kutistuman aiheuttamat muodonmuutokset. Hitsin jäähtyessä se kutistuu lämpenemättömän perusaineen pitäessään muotonsa, kuten kappaleessa 3.1 on kerrottu. Näistä syntyy jännityksiä, jotka aiheuttavat suuruudesta riippuen muodonmuutoksia.

Hitsausmuodonmuutoksia on tarkasteltu paljon kirjallisuudessa. Esimerkiksi Long, Gery, Carlier & Maropoulos (2009) osoittavat tutkimuksessaan hitsisauman pitkittäisen ja poikittaisen kutistuman olevan riippuvainen lämmöntuontiin. Deng, Murakawa & Liang (2007) ovat tutkineet muodonmuutoksia laajoissa vahvistetuissa levykentissä. Kyseisessä tutkimuksessa erityisesti pienahitsien kulmakiertymää on tutkittu rakenteessa, jossa on poikittaisia ja pitkittäisiä jäykisteitä. Rakennetta tutkittiin FEM:in avulla ja empiirisesti. Kuvassa 14 on esitetty Deng:in ym. tutkimuksen vahvistettu rakenne. Rakenteessa on kolme pitkittäistä ja kaksi poikittaista jäykistettä. Jäykisteet on ennen tutkimuksen suorittamista valmisteltu hitsaamalla ne pistehitseillä kiinni levyyn.



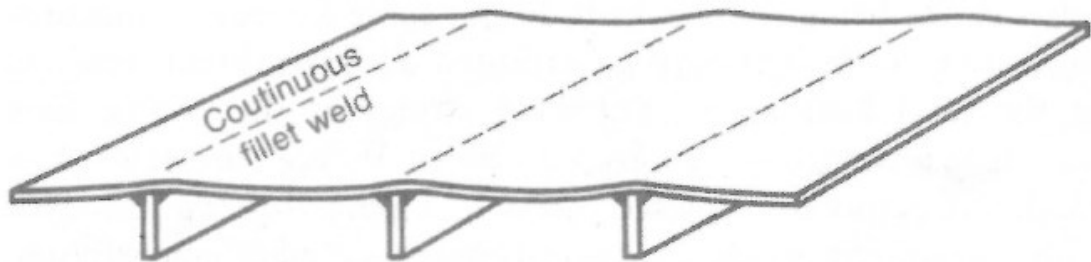
Kuva 14. Tutkimuksessa käytetty levyrakenne sekä tutkittujen siirtymien sijainnit sekä hitsattavat saumat (Deng et al. 2007)

Kuvassa 15 vasemmalla puolella on esitetty siirtymät kuvassa 14 esitettyä viivaa 1 pitkin. Oikeanpuoleinen diagrammi kuvaa siirtymiä viivaa 2 pitkin. Kuvissa mustalla viivalla on kuvattu FEM-analyysillä saadut tulokset ja punaisiin neliöihin on kuvattu ennalta määrättyjen pisteiden siirtymät hitsaustestauksessa. Kuvista voidaan huomata hitsauksen aiheuttama kulmakiertymä. Pystysuuntainen siirtymä on suurimmillaan pitkällä sivulla ollen suuruudeltaan noin 9 mm.



Kuva 15. Kuvassa 14 esitettyjen Viiva 1:den (vasen) ja Viiva 2:den (oikea) siirtymät (Deng et al. 2007)

Deng ym. tutkimus osoittaa hyvin, miten Niemen (2003) mainitsema luurankokuvio ("hungry horse") syntyy hitsauksen yhteydessä. Luurankokuviossa jäykisteiden paikat tulevat näkyviin levyn toisella puolen kohokuviona (Niemi et al. 1993). Kuvassa 16 on esitetty kärjistetyksi kulmakiertymän aiheuttaman muodonmuutoksen jäykistein tuetussa paneelissa (luurankokuvio). Jäykisteen molemmin puolin olevat pienahitsit aiheuttavat hitsin kulmakiertymän, joka tekee paneelista aaltomaisen. Nämä kulmakiertymät eivät ole kovin suuria terästuotantolinjalla, mutta ne aiheuttavat virheitä, jotka kertaantuvat myöhemmissä työvaiheissa lohkon asennuksessa vaikuttavien voimien vallitessa. Täytyy myös huomata, että kyseessä ei ole lommahdusmuoto vaan pienahitsin poikittaisen kutistuman aiheuttama kulman kiertymä.



Kuva 16. Kulmakiertymän aiheuttama muodonmuutos levyllakanassa (Radaj, 1992)

3.2.2 Hitsausmuodonmuutosten vähentäminen

Hitsausmuodonmuutoksia on mahdotonta estää kokonaan, mutta niitä voidaan vähentää oikeilla tekniikoilla. Lee & Beardsley (2009) mainitsevat muutamia tekniikoita, joilla jäännösjännityksiä ja hitausmuodonmuutoksia voidaan minimoida. Nämä yksitoista tekniikkaa ovat:

1. Vältä ylihitsausta – Mitä suurempi hitsi, sitä suurempi kutistuma. Hitsausmuodonmuutosten minimoimisen lisäksi ylihitsauksen välttäminen säästää aikaa ja materiaalia.
2. Katkohitsien käyttö – Katkohitseissä hitsien kokonaispituus vähenee, jolloin myös muodonmuutokset vähenevät
3. Vähennä hitsattujen palkojen määrää – Hitsaa ennemmin vähän suuria palkoja kuin paljon pieniä palkoja. Jokainen hitsipalko aiheuttaa muodonmuutoksia. Hitsausmuodonmuutokset kumuloituvat jokaisella hitsauskerralla.
4. Sijoita hitsisauma lähelle neutraaliakselia tai kokoonpanon keskelle – Muodonmuutokset vähenevät, kun niillä on vähemmän vipuvartta.
5. Tasapainota hitsit neutraaliakselin ympärille – Molemmin puolin akselia olevat hitsisaumat aiheuttavat optimaalisesti peilikuvamuodonmuutokset, jotka parhaimmillaan kumoavat toisensa.

6. Käytä taka-askelhitsausta – Mikäli perinteisellä hitsaustekniikalla hitsattaisiin oikealta vasemmalle, taka-askelhitsauksessa hitsataan lyhyitä palkoja peräkkäin vasemmalta oikealle.
7. Esiasettele hitsattavat kappaleet – Esiasettelemalla kappaleet muodonmuutossuuntaa vastaan, voidaan saada haluttu lopputulos ilman ei-toivottuja muodonmuutoksia.
8. Vaihtoehtoinen hitsausjärjestys – Hitsausjärjestyksellä on iso vaikutus muodonmuutoksiin. Optimaalisella hitsausjärjestyksellä voidaan minimoida muodonmuutoksia.
9. Kiinnittämällä kappaleet – Lukitsemalla kappaleet haluttuun asentoon, voidaan estää liialliset muodonmuutokset. Vaikkakin muodonmuutoksia esiintyy poistettaessa kappaleet kiinnityksestä, ne ovat pienempiä kuin vapaasti hitsatuissa kappaleissa.
10. Hitsin kylmämuokkaus – Iskemällä hitsipalosta kylmämuokkaamalla jännityksiä pois, voidaan myös vähentää hitsausmuodonmuutoksia. Kuitenkin kylmämuokkaus kovettaa hitsiä, mikä ei ole haluttua. Ensimmäisen ja viimeisen palon kylmämuokkaus ei ole sallittua haurasmurtumien mahdollisuuden kasvaessa.
11. Terminen jännitystenpoistohehku – Hitsien kontrolloitu lämpökäsittely, jonka jälkeen kappale jäähdytetään hallitusti.

Kohdassa 3 kehoitetaan vähentämään hitsattujen palkojen määrää ja hitsaamalla mahdollisimman suuria palkoja kerralla. Kuitenkin Niemi ym. (1993) mainitsee, että hitsauksessa syntyvät voimat ja muodonmuutokset ovat verrannollisia tuodun lämmön määrään per pituusyksikkö. Suuremmalla määrällä palkoja tuodaan pienempi määrä energiaa kerralla, mikä on useimmiten edullista. Kulmakiertymä-muodonmuutos on kuitenkin poikkeus. (Niemi et al. 1993)

Näiden yhdentoista kohdan lisäksi Tsai, Park ja Cheng (1999) mainitsevat muodonmuutosten vähennystekniikaksi hallittua esilämmitystä. Esilämmityksessä kappale lämmitetään ennen hitsausta, jotta jäähtyessä kutistumaero ei olisi niin suuri. Kaikki hitsausmuodonmuutosten lievennystekniikat tasapainottavat hitsauksen aiheuttamaa kutistumavoimaa.

Kaikkia tekniikoita ei ole kaikissa olosuhteissa mahdollista hyödyntää. Osa tekniikoista nostavat valmistuksen kustannuksia lisääntyneen energiantarpeen, lisääntyneen työvoimantarpeen tai kalliiden tuotantolaitteiden takia. Osa tekniikoista taas ei sovellu tiettyyn tuotantoympäristöön. Esimerkiksi jotkin tekniikat eivät sovellu korkeasti automatisoituun tuotantolinjaan, kun taas osa tekniikoista on tehokkaasti käytettävissä ainoastaan korkeasti automatisoidussa tuotantolinjassa. Jotkin tekniikat taas on otettava huomioon jo suunnittelupöydällä. Tällaisia seikkoja ovat esimerkiksi hitsisaumojen asettelu, hitsien koon suunnittelu ja hitsausjärjestyksen suunnittelu. Osa tekniikoista ovat taas mahdottomia toteuttaa kaikille tuotteille tuotannon pidentyvän läpimenoajan takia. (Tsai et al. 1999)

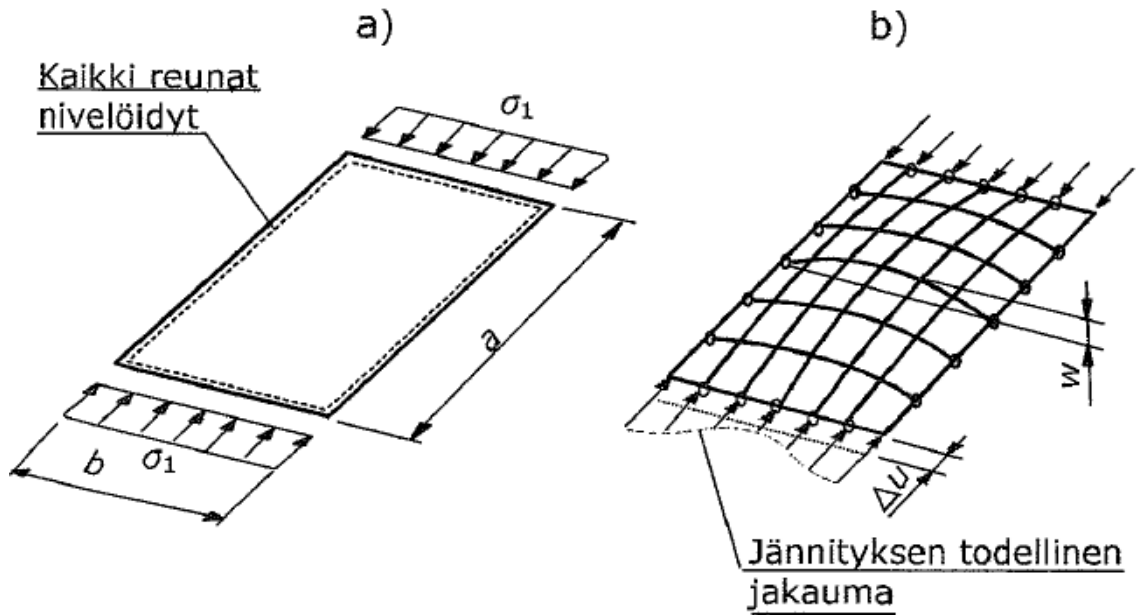
Hitsausmuodonmuutosten minimointitekniikat eivät ole universaaleja eli kaikki tekniikat eivät sovi kaikkiin tilanteisiin. Kaikilla näillä tekniikoilla on mahdollisuutensa ja rajoitteensa, jotka tulisi tuntea minimointitekniikkaa valittaessa ja käyttäessä. (Tsai et al. 1999) Jotkut jäännösjännitysten ja hitsausmuodonmuutosten minimointitekniikat saattavat jopa lisätä toisen tyyppistä muodonmuutosta, kun se pienentää halutun tyyppistä. Esimerkiksi pienentämällä lämmöntuontia voidaan pienentää lommahdusmuodonmuutosta, mutta lisätä hitsin kulmakiertymää. (Michaleris, 2011) Toisaalta taas kiinnittimien käytöllä voidaan pienentää kulman kiertymistä (Niemi et al. 1993).

Leen ym. ja Tsai:n ym. tekniikat ovat pääasiassa ennen ja jälkeen hitsauksen suoritettavia toimenpiteitä eivätkä ne ota kantaa hitsausmenetelmään. Hitsausmenetelmällä on suuri vaikutus jäännösjännityksiin ja sitä kautta myös hitsausmuodonmuutoksiin. Hitsauksessa tapahtuvalla lämmöntuonnilla voidaan vaikuttaa lämpövyöhykkeen laajuuteen. Suuremman tehotiheyden omaavalla hitsaustekniikalla voidaan tuoda hitsaukseen tarvittava energia tehokkaammin pienelle alueelle. Niemi (2003) mainitsee, että jäännösjännitykset ja sitä kautta muodonmuutokset ovat verrannollisia tuotuun lämpömäärään. Hitsin poikkipinnan onkin päittäishitseissä oltava mahdollisimman pieni. Hitsausmenetelmä vaikuttaa tähän merkittävästi eri menetelmien hitsisauman geometrian kautta.

3.3 Lommahtaminen

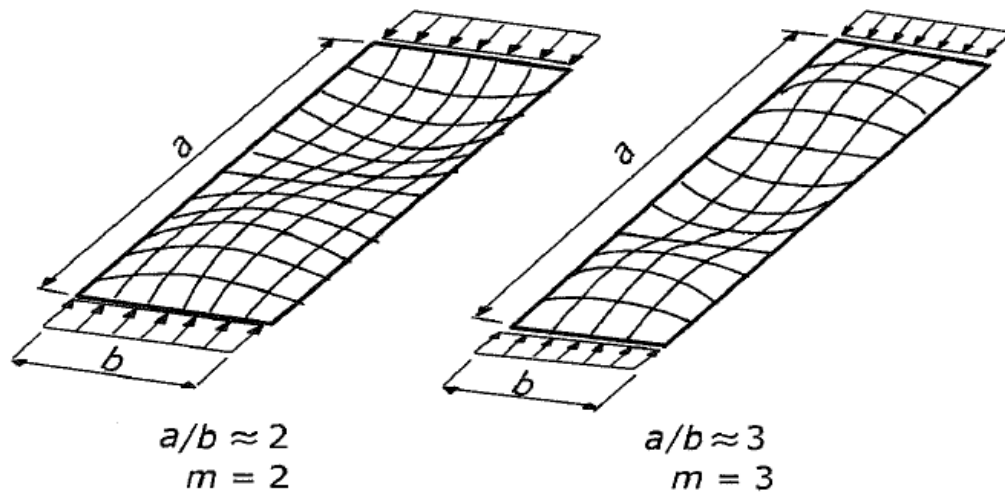
Ideaalisen levykentän lommahtamisella tarkoitetaan levykentän stabiiliuden menetystä levyn ollessa puristus- tai/ja leikkausvoiman vaikutuksesta. Ideaalisella levyllä tarkoitetaan täysin kimmoisesta materiaalista valmistettua levyä. Ideaalinen levy on suorakaiteen muotoinen ja siinä ei ole valmistuksesta tms. johtuvia jäännösjännityksiä. Tätä ideaalista levyä kuormitetaan kuvan 17.a) tavoin vastakkaisilta sivuilta kalvojännityksellä. Kuvassa 17 on esitetty ideaalisen levyn tuennat sekä sen kuormitukset (kuva 17.a) ja lommahtaneen levyn muoto (kuva 17.b). (Niemi, 2003)

Levyn lommahdusta havainnollistamiseksi voidaan mieltää levyrakenne kuvan 17.b) mukaiseksi arinarakenteeksi, jossa sauvat rakenteen keskellä nurjahtavat ja poikittaiset sauvat pyrkivät estämään nurjahdusta. Nurjahtaneet sauvat ovat pidemmät kuin reunimmaisset, joten jännitys niissä on suurempi. Tällöin myös jännitys jakauma poikkeaa nimellisestä jännitys jakaumasta.



Kuva 17. Ideaalisen levyn lommahtaminen puristusjännityksessä (Niemi, 2003)

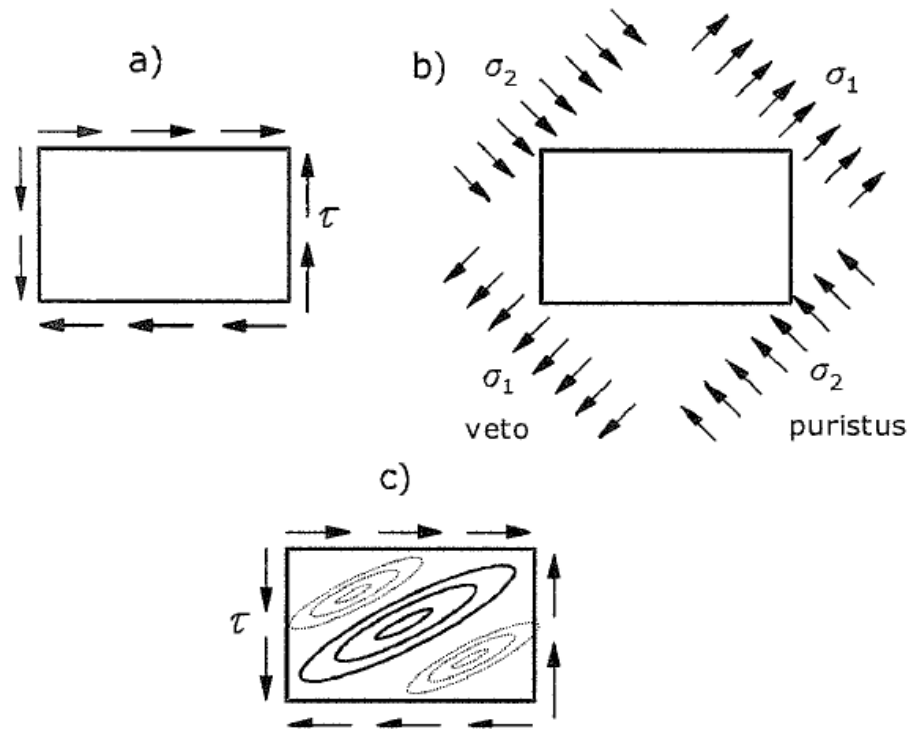
Idealilevyn kuormituksessa levy puristuu kimmoteorian mukaisesti kasaan levyn tasossa. Kuitenkin kriittisen jännityksen ylityksessä, levyn tasapainotila on indifferentti ja pienikin poikkeama saa levyn taipumaan ja muodostamaan puolikkaan siniaallon muodon. Mikäli levykenttä on pitkä verrattuna sen leveyteen, syntyy yhden puolikkaan siniaallon sijasta monta siniaalloa, jotka ovat taipuneina ylös ja alas (kuva 18). Näiden siniaallon muotoisten lommojen määrä määräytyy levyn pituus/leveys-suhteella. (Niemi, 2003)



Kuva 18. Lommuksimuotoja pitkissä levykentissä (Niemi, 2003)

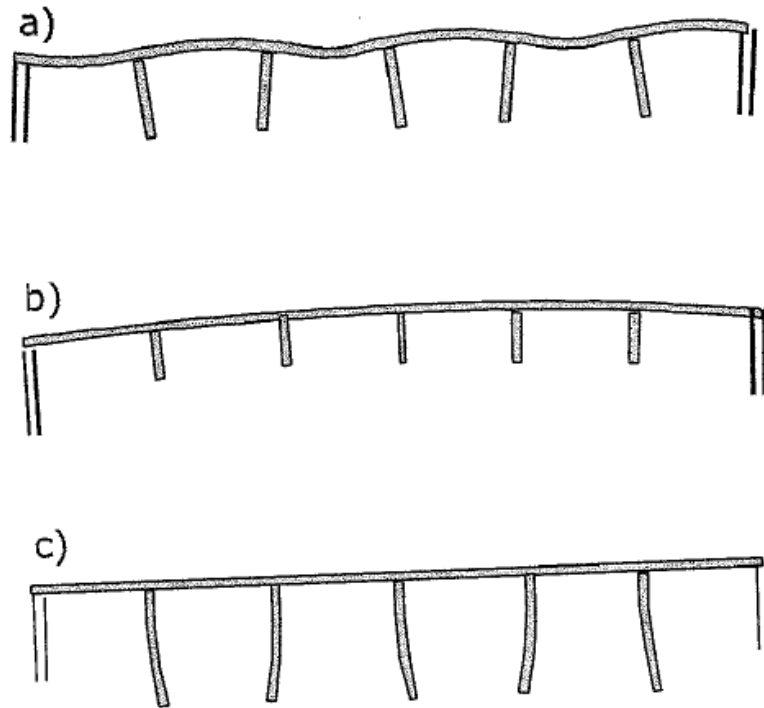
Levy voi lommahtaa myös leikkauskuormituksen vaikutuksesta. Kuvien 19.a) ja 19.b) mukaiset jännitystilanteet ovat samanarvoiset puhtaasti leikkausjännityksen muodostuessa

kahdesta erimerkkisestä ortogonaalisesta pääjännityksestä. Pääjännityksistä σ_1 pyrkii pitämään levyn kireänä, kun taas σ_2 lommauttaa levyn. Kuvassa 19.c) on esitetty leikkausjännityksen aiheuttama lommahdusmuoto. (Niemi, 2003) Leikkausjännityksen aiheuttaman lommahduksen ilmenemismuoto on erilainen kuin puhtaasti puristuksen aiheuttaman lommahduksen. Leikkauslommahduksessa syntyy antimetrisen esiintymismuoto, jossa ”lommon” suunta on ristikkäisiin kulmiin kohdistuva.



Kuva 19. Leikkauskuormituksen aiheuttama lommahdus (Niemi, 2003)

Ongelmia ei aiheuta ainoastaan tuettomat levykentät vaan myös jäykistein tuettu levykenttä voi lommahtaa, mikäli jäykisteet eivät ole tarpeeksi kestäviä nurjahdusta vastaan. Kuvassa 20.a) jäykistetyn levyn osakentät lommahtavat. Osakenttien lommahdus tekee rakenteesta aaltomaisen osan kentistä lommahtaessa ulos rakenteesta ja osan rakenteen sisään. Yleensä lommahdus on kuvan 20.a) mukainen joka toisen lommahtaessa ulos ja joka toisen sisään sisältäen useampaa kuin yhtä lommahdusmuotoa. Levykentän kokonaisjäykkyyden ollessa liian alhainen voi myös kokonainen levykenttä lommahtaa kuvan 20.b) mukaisesti. Kolmas lommahdustilanne on kuvan 20.c) mukainen, jossa jäykisteiden reunat lommahtavat vapaalta sivulta. (Niemi, 2003)



Kuva 20. Vahvistettujen levykenttien lommahdus (Niemi, 2003)

3.4 Jännösjännitysten ja levyn lommahtamisen yhteys

Mikäli rakenne oletetaan sitkeäksi ja vioista vapaaksi, jännösjännitykset eivät vaikuta vetokestävyyteen. Kuitenkin hitsauksen aiheuttamat jännösjännitykset laskevat hitsatun rakenteen puristuskestävyyttä. Puristuskestävyys liittyy suoraan rakenteen lommahduskestävyyteen. Hitsisaumassa olevat pitkittäiset vetojännitykset ovat edullisia sauman kohdalla nurjahdusta/lommahdusta vastaan, mutta levykenttien kohdalla hitsauksen aiheuttama tasapainottava puristusjäännösjännitys saattaa aiheuttaa rakenteen stabiiliuden pettämisen ennen laskennallisesti sallitun kuormituksen saavuttamista. (Niemi et al. 1993; Mandal, 2004) Useissa tapauksissa jännösjännitykset ovat esituotantovaiheessa jääneet kokonaan huomiotta niiden luonteen takia. Rakenteen jännösjännityksiä ei voida aistinvaraisesti havaita, toisin kuin työstön aiheuttamia muodonmuutoksia. Nämä jännösjännitykset tulevat kuitenkin esille myöhemmissä työvaiheissa, joissa rakenteeseen kohdistuu suuria ulkopuolisia kuormituksia.

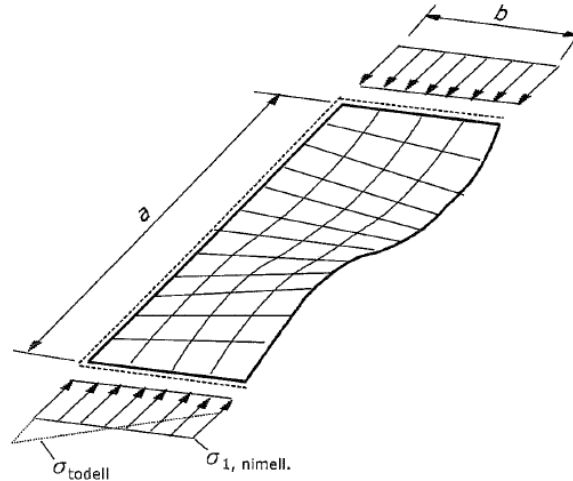
Kappaleessa 3.3 on esitetty ideaalisen levyn lommahdus. Ideaalisessa lommahduksessa levyssä ei esiinny vikoja tai jännösjännityksiä ja on täysin kimmoisesta materiaalista valmistettu. Eri työvaiheiden seurauksena levyssä on kuitenkin säröjä ja muodonmuutoksia. Esimerkiksi pienahitsin tai päittäishitsin aiheuttamat kulmakiertymät edesauttavat levykentän lommahdusta taivuttamalla levyä.

Jäännösjännitykset aiheuttavat monenlaisia muodonmuutoksia. Nämä muodonmuutokset on tutkittava, jotta niitä ei toistettaisi tulevissa projekteissa. Jäännösjännitysten aiheuttama lommahdus on osattava erottaa kulmakiertymän aiheuttamasta muodonmuutoksesta. Kulmakiertymä eroaa lommahduksesta kahdella tavalla (Mandal, 2004):

- Lommahduksessa on useampi kuin yksi muodonmuutosmuoto
- Lommahduksen aiheuttamat muodonmuutokset ovat huomattavasti suurempia kuin kulmakiertymän aiheuttamat muutokset

Aiemmin mainittu luurankokuvio syntyy kulmakiertymän johdosta. Pitkittäisjännitys sen sijaan aiheuttaa aaltoilevaa ulos ja sisään vuorotellen lommahtelevaa muotoa. Jäykistämättömän levyn leveyden ja hoikkuuden suhde laskee kriittistä lommahdusjännitystä. Tällöin leveillä, harvaan pitkittäisjäykistetyillä levykentillä hitsauksessa syntyvät levyn puristusjännitykset nousevat merkittävään asemaan suunnittelussa.

Jäännösjännitykset voivat aiheuttaa ongelmia myös jälkeinpäin työstettävissä kappaleissa. Hitsisaumassa ja lämpövyöhykkeellä olevat vetojännitykset tasapainottuvat rakenteen levykentissä olevilla puristusjännityksillä. Mikäli levykenttiä muokataan esimerkiksi leikkaamalla, puristusjännitys jakauma muuttuu. (Niemi et al. 1993) Tällöin levyssä oleva puristusjännitys voi kasvaa kriittistä lommahdusjännitystä suuremmaksi, mikä synnyttää aaltomaisen muodon levyn reunaan (kuva 21) (Niemi, 2003).



Kuva 21. Vapaan reunan lommahdus (Niemi, 2003)

Suunnittelussa on kaksi keinoa ehkäistä levykenttien lommahdusta. Joko pienennetään lommahduksen aiheuttamaa voimaa tai kasvatetaan rakenteen lommahduksenkestävyyttä tai toteutetaan näistä kumpikin. (Yang et al. 2010) Niemen (1993) mukaan hitsin aiheuttamaa pitkittäistä voimaa (F) voidaan arvioida kaavalla (1), jossa esijännitysvoimaa arvioidaan hitsauksen lämmöntuonnin kautta tai kaavalla (2), joka perustuu hitsauksessa sulana olevan materiaalin poikkipinta-alaan:

$$F = 0,2 * \eta * \frac{UI}{v} \quad (1)$$

$$F = c * A_w \quad (2)$$

, jossa

$c = 10 \pm 2,5 \text{ kN/mm}^2$ ja

A_w = hitsauksessa sulana olleen materiaalin poikkipinta-ala (mm^2).

Kaavassa (1) vaihtoehtoisesti laserhitsauksessa voidaan käyttää jännitteen (U) ja virran (I) tilalla laserin tehoa (P) ($U*I=P$). Kaavan perusteella voimaa voidaan pienentää laske-
malla tehoa tai nostamalla hitsausnopeutta (v). Monipalkohitsauksen esijännitysvoimaa ei voida suoraan arvioida kyseisillä kaavoilla (Niemi, 1993). Kaavassa (2) hitsin aikana sulana olleen materiaalin poikkipinta ei ole sama kuin hitsin poikkipinta-ala, vaan tähän alaan on huomioitava myös sulana olleen perusaineen poikkipinta-ala. Hitsin aiheuttaman esijännitysvoiman avulla voidaan arvioida rakenteessa vallitsevaa puristusjännitystä kaavalla (3)

$$\sigma_p = \frac{F}{A} \quad (3)$$

, jossa A on rakenteen poikkipinta-ala (levy ja jäykisteet) (Niemi et al. 1993)

Vaihtoehtoisesti voidaan kasvattaa rakenteen kriittistä lommahdusjännitystä, joka voidaan laskea kaavasta (4) (Niemi, 2003):

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma * \sigma_E \quad (4)$$

, jossa σ_E on eulerjännitys, joka lasketaan kaavalla (5):

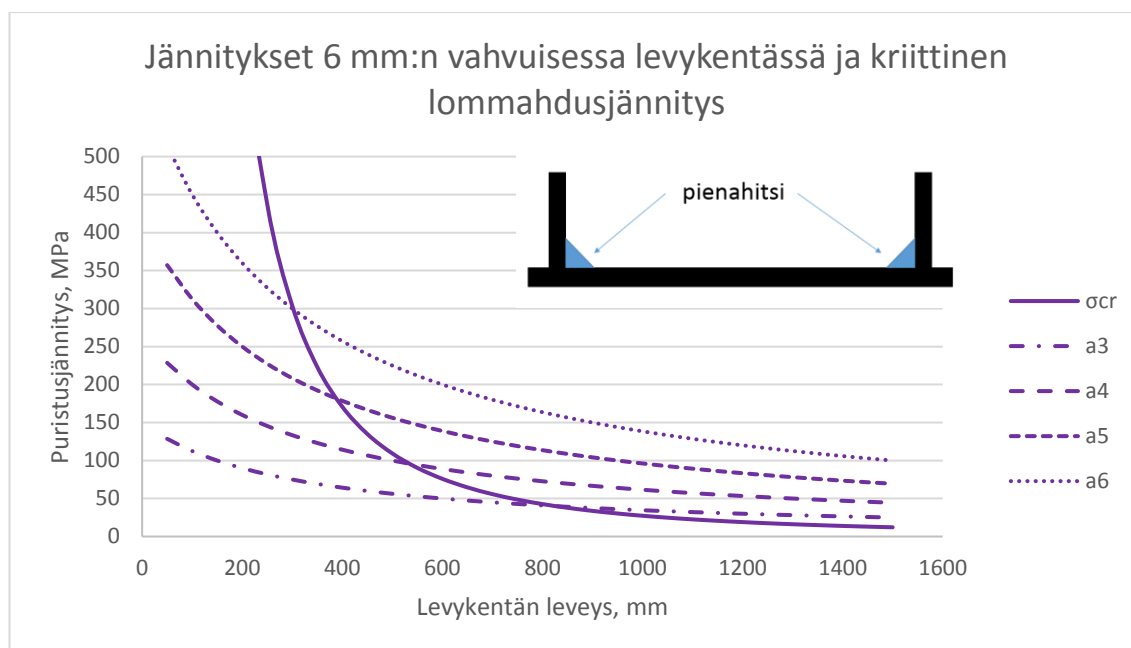
$$\sigma_E = \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \nu^2)} * \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (5)$$

Kaavoista (4) ja (5) nähdään, että kriittinen lommahdusjännitys ($\sigma_{cr,p}$) kasvaa nelinkertaiseksi levynpaksuuden (t) kasvaessa kaksinkertaiseksi ja kasvavan suoraan suhteessa lommahduskertoimen (k_σ) ja kimmomoduulin (E) arvoihin nähden. Myös materiaalin poisson-luvun (ν) kasvu kasvattaa kriittistä lommahdusjännitystä. Jäykisteiden välin (b) kasvaessa kriittinen lommahdusjännitys laskee eksponentiaalisesti. (Niemi, 2003) Kriittisen lommahdusjännityksen on oltava suurempi kuin rakenteessa vallitseva puristusjännitys, jotta lommahdusta ei tapahdu. Toisin sanoen, ehdon (6) tulee täyttyä:

$$\sigma_{cr,p} > \sigma_p \quad (6)$$

Kuvassa 22 on esimerkkinä esitetty 6 mm materiaalivahvuudelta olevan levyn kriittinen lommahdusjännitys (jatkuva viiva) tasaisen puristuksen alaisena sekä neljän eri a-mitan

aiheuttamat puristusjännitykset (katkoviivat) rakenteessa, jossa levyyn on hitsattu kaksi lattatankoa jäykisteeksi pienahitsein kuvan osoittamalla tavalla. Kuvasta huomataan lommahdusjännityksen laskevan jyrkästi levyn leveyden kasvaessa. Kuvassa on esitetty jännitykset melko suurillakin a -mitoilla, mutta voidaan huomata puristusjännityksen olevan rakenteessa liian suuri jo kapeillakin levykentillä ja pienillä a -mitoilla ohuilla materiaaleilla. Puristusjännitykset on määritetty MAG-hitsauksen hitsausparametreja käyttäen. Kontrolloidummalla lämmötuonnilla puristava voima on pienempi. Liitteessä C on esitetty kriittisen lommahdusjännityksen ja rakenteessa vallitsevan jännityksen suhteen jäykisteiden leveyteen 4 mm:n, 6 mm:n, 8 mm:n ja 10 mm:n levynvahvuuksilla. Kaavioista huomataan ohuilla levynvahvuuksilla lommahduksen tapahtuvan huomattavasti kapeammilla levykentillä.



Kuva 22. Kriittinen lommahdusjännitys ja puristusjännitykset neljällä eri a -mitalla 6 mm levyllä. Vaaka-asteikolla levykentän leveys (jäykisteiden väli)

3.5 Muodonmuutosten korjaaminen

Muodonmuutoksia voidaan korjata muutamilla keinoilla. Laivanrakennusteollisuudessa käytetään yleisesti rihtausta eli kuumilla oikaisua. Rihtausta käytetään oikaisemaan lommahdaneita ja kulmakiertyneitä kohtia hitsatuissa rakenteissa. Siinä terästä lämmitetään noin 450 °C:een, jolloin teräksen myötölujuudesta on jäljellä enää puolet. Rihtauksessa pintakuumennuksessa levyn paksuudesta noin kolmannes kuumennetaan, jolloin se laajenee ja kylmä aines pyrkii estämään tätä laajentumaa. Tällöin kuumeneva kohta tyssäntyy ja on jäähtyessä lyhempi. Pintakuumennuksessa levy taipuu oikomisen kohdalta. Lämpikuumennuksessa levy kuumennetaan nimensä mukaisesti koko levyn paksuudelta. Jäähtyessä levy on rihtauksen kohdalta tyssäntymisen ansiosta lyhempi. Kylmäoikominen tapahtuu mekaanisesti ylittämällä materiaalin myötölujuuden käyttämällä iskua tai

staattista voimaa tunkeilla yms. (Hitsauksen teoriaopetus, 2012) Kylmäoikominen tulee kyseeseen pienemmissä kohteissa yleensä ohutlevyjen oikomisessa. Mekaanista kylmäoiontaa voidaan käyttää yhdessä kuumaionnan kanssa halutun lopputuloksen varmistamiseksi. Esimerkiksi levy voidaan pakottaa suoraksi tunkilla, minkä jälkeen levy rihtaataan ja annetaan jäähtyä oikeassa asennossa. Tunkin voiman poistuessa levy jää suoraksi. (Hitsauksen teoriaopetus, 2012)

Muodonmuutosten korjaaminen rihtaamalla on laivanrakennuksessa tuottamatonta työtä, jonka tarkoitus on korjata aiemmissä työvaiheissa syntyneitä virheitä. Laivan runkotuotannossa kustannukset voivat koostua jopa 30 %:sti rihtauksesta. Täten tuotannon tarkkuudesta ja kustannustehokkuudesta on tullutkin merkittävä tekijä telakan kilpailukyvyyn varmistamisessa. (Roland et al. 2004) Hitsauksessa ja asennuksessa kertaantuneet virheet on oiottava, jotta saavutetaan luokituslaitosten asettamat pinnansuoruuksivaatimukset sekä toiminnalliset ominaisuudet. Uuden tuotantolinjan investoinneissa on otettava huomioon suorien kustannusten lisäksi myös muuttuneen laadun aiheuttamat säästöt ja/tai kustannukset myöhemmissä työvaiheissa.

4. TERÄSTUOTANNON NYKYTILA

Rauma Marine Constructions Oy:n terästuotantolinja koostuu levyjen esikäsitteilylinjasta, kolmesta levyosien plasmaleikkauskoneesta, muotoprofiili-linjasta ja kahdesta tasolohkolinjasta. Näiden lisäksi RMC:n tuotantotiloissa on muita koneita, kuten taivutuskoneita ja prässejä. Tasolohkolinjalta lohkot nostetaan hallin lattialle, jossa suoritetaan rakenteiden manuaalinen hitsaus.

Muotoprofiililinjalla muotoprofiileihin polttoleikataan muiden rakenteiden vaatimat aukot ja lovet. Profiilit myös pätkitään haluttuun mittaan ja asetellaan profiilivaunuun, jossa profiilit kuljetetaan järjestyksessä kokoonpanolinjalle. Muotoprofiililinja sijaitsee rakennuksessa 15 (Liite A).

Esikäsitteilylinjalla teräslevyt valmistellaan polttoa varten. RMC:n esikäsitteilylinja sijaitsee Seaside Industry Park:issa rakennuksessa 17. Levyt nostetaan varastokentältä magneettinosturein käsittelylinjalle, jossa ne kuljetetaan ensin pesuun ja kuivaukseen (kuva 23). Pesussa ja kuivauksessa epäpuhtaudet ja jää/lumi poistetaan levyn pinnalta. Sinkopuhalluksessa levyt puhalletaan, jotta niiden päällä oleva pinnoite ei haittaa hitsausta. Esikäsitteilylinjalla on myös automaattimaalauslaitteisto, joka pinnoittaa levyt suoja-aineella korroosion estämiseksi. Usein levyt on kuitenkin pinnoitettu korroosion varalta jo RMC:lle saapuessa. Esikäsitteilylinjalta levyt kuljetetaan alikulkutunnelia pitkin rakennukseen 18 (M-, L- ja T-hallit)



Kuva 23. Esikäsitteilylinjan pesulaitteisto

Esikäsitteilyn jälkeen levyjen reunat viistetään hitsausta varten, mikäli niistä tehdään tasolohkojen levylakanoita tai niistä leikataan haluttuja kappaleita, mikäli levyistä tehdään pienempiä kappaleita. Polttoleikkausta suoritetaan kolmella plasmapolttoleikkauskoneella. Plasmaleikkausasemat ovat Telerex TXB, Suprarex SXE P-6000 ja Messer OmniMat (kuva 24). Kaikki RMC:n polttoleikkauskoneet ovat CNC-ohjattuja.



Kuva 24. Polttoleikkausasema Messer OmniMat

RMC:llä on kaksi tasolohkojen tuotantolinjaa, jotka koostuvat työstölaitteista ja kuljetusalustasta/hitsauspedistä. Molemmat tuotantolinjat ovat 150 metriä pitkiä ja 12,5 metriä leveitä tehokkaalta alaltaan (Rauman satama, Käsikirja 2015). Tuotantolinja 1 eli ns. jumbolinja valmistaa suuria tasolohkoja automatisoiduilla hitsausasemilla sekä manuaalisella hitsauksella. Jumbolinjan ensimmäisenä laitteena on hitsausasema LT19 (kuva 25), joka on varustettu Lincoln Electric:in jauhekaarihitsauslaitteistolla NA-4. LT19 hitsausasemalla hitsataan levyjä päittäishitseillä pitkiksi levylakanoiksi. Useasta levystä yhdeltä puolen päittäishitsein valmistetut lakanat leikataan oikeaan mittaan. Polttoleikkausyksikkö on ESAB Telerex TXB 14700. Oikeaan mittaan leikatut lakanat siirretään muoto-
profiilien hitsausasemalle, jonka on valmistanut FRO Saldatura. Profiilien hitsausasema on varustettu Kempin MAG-hitsauslaitteilla, joilla profiilit hitsataan molemmin puolin pienahitseillä lakanaan. Profiilit hitsataan neljällä hitsauspäällä kahdelta puolelta.



Kuva 25. Levylakanoiden päittäishitsausasema LT19

Tuotantolinja 2 on varustettu PEMA SWP-12000/4 hitsausasemalla, jolla hitsataan profiileja kahdelta puolen pienahitsein. Tuotantolinjan 2 hitsausaseman hitsauslaitteet ovat ESAB:in valmistamia. Osa kummankin tuotantolinjan hitsauksista suoritetaan manuaalisesti. Tällaisia ovat erityisesti lyhyet jäykisteet aukkojen ympärille. Lohkojen rakennuksen viimeistely suoritetaan H-, R- ja S-hallien lattialla. Lohkojen siirto suoritetaan hallien siltanosturien avulla.

Nykyisessä tuotantolinjassa merkittäviä kuormituksia rakenteeseen kohdistuu erityisesti hitsauksen suuresta lämmöntuonnista johtuen sekä lohkon käsittelyssä sen eri tuotantovaiheissa. Nämä kuormitukset aiheuttavat jännityksiä ja muodonmuutoksia rakenteeseen sekä vapauttavat aiemmissa työvaiheissa syntyneitä jäännösjännityksiä materiaalin plastisoitumisesta johtuen. Tuotantolinjalla käsitellään keskeneräisiä kappaleita, jotka on suunniteltu käytön aikaisia kuormituksia varten. Nämä kuormitukset voivat poiketa suuristikin käsittelyssä aiheutuvista kuormituksista.

Jumbolinjassa olevan jauhekaarhitsauslaitteiston kyvykkyys levynpaksuuden osalta alkaa 5,5 mm:stä lähtien. (ESAB:in osaamiskeskus, 2017) Tämä tuottaa suuria ongelmia tulevaisuutta ajatellen, kun levynpaksuuden osalta ollaan siirtymässä entistä ohuempiin materiaaleihin. Laitteiston skaala on tulevaisuudessa alettava ohuemmasta levynpaksuudesta. 4 mm on minimi, jonka laitteisto on hitsattava hyvällä lopputuloksella.

4.1 Terästuotannon tuottavuus

Tuotantolinjan hitsauksen tuottavuus voidaan mitata yksiköllä kg/h. Tämä ei kuitenkaan ole vertailukelpoinen kaikkien tuotantomenetelmien kesken. Hitsisauman geometria ja lisääineenkäyttö vaikuttavat suuresti tuotettuun hitsisaumaan. Mielekkäämpää on mitata hitsisauman pituutta per aikayksikkö. Tällöin voidaan paremmin vertailla eri menetelmiä

keskenään. Liitteessä B on esitetty rivillä 15 eri menetelmillä käytetyt hitsausnopeudet 8 mm materiaalivahvuuden levyillä. Tämän hetken menetelmillä jauhekaarihitsauksen hitsausnopeus levyalkanoiden päittäishitsauksessa on noin 0,45 m/min ja profiilien pienahitsauksen hitsausnopeus on noin 0,57 m/min.

Tuottavuus ei kuitenkaan ole sama asia kuin prosessin nopeus. Tuottavuuden määrittelyä voidaan mieltää tuotannon sisään tuotujen tuotannontekijöiden ja ulos menevien tuotosten suhteena (Jääskeläinen, 2010, s.4). Työntekijöiden määrä, materiaalien määrä, käytettävät työkalut ym., joita tarvitaan tuotteiden tai palvelujen tuottamiseen, vaikuttavat tuottavuuteen. Tuottavuuden mittarit ovat näin ollen hyvin monisyiset.

Tuottavuuteen vaikuttaa suuresti myös tuotosten laatu (Jääskeläinen, 2010, s.4). Huono laatu tuottaa lisätyötä, joka vaikuttaa alentavasti tuottavuuteen. Huonoa laatua joudutaan korjaamaan, jolloin tarvitaan lisää tuotannontekijöitä tuottamaan vaadittu lopputulos, joka olisi voitu tuottaa aiempien työvaiheiden hyvällä laadulla. Tällöin laivojen lohko-tuotannossa on otettava huomioon kokonaistuottavuutta mitatessa myös korjaavat työt hitsauksen ja asennuksen lisäksi. Työn tuottavuutta mitatessa on otettava huomioon myös muut epäsuorat tekijät. Esimerkiksi huoltokustannukset ja huollon takia menetetty tuotantoaika alkavat näytellä suurta roolia, mikäli laitteiston korjaustarve on suurta.

Terästuotannon tuottavuus on erittäin riippuvainen tuotannon automaatioasteesta. Hitsauksessa manuaalinen työstö on aikaa vievää ja laatu vaihtelevaa. Tuotosten lopputulos on myös riippuvainen kulloinkin työtä tekevän työntekijän ammattitaidosta. Nykyisessä tuotantolinjassa jumbolinjalla hitsaus tapahtuu lakanoiden päittäishitsaus ja jäykiste-profiilien pienahitsaus pois lukien manuaalisesti. Tuotantolinjalla 2 automatisoidusti hitsataan ainoastaan tasopaneelien jäykisteet.

4.2 Terästuotannon kustannukset

Terästuotannon kustannuksia on käsitelty liitteessä B. Kustannuksia on käsitelty erikseen levyalkanoiden päittäishitsien jauhekaarihitsauksen ja jäykisteiden pienahitsauksen osalta. Kustannuslaskelmissa on otettu huomioon alkuinvestoinnin lisäksi kunnossapidosta, työvoimasta, lisäaineesta, energiasta, suojakaasusta ym. prosessin kulutustarvikkeista syntyvät kustannukset.

Levyalkanoiden päittäishitsauksen muuttuvat kustannukset ovat laskemien mukaan 101,21 €/h. Tähän summaan on laskettu mukaan myös levyjen reunan esikäsitteilykustannukset. Pienahitsauksen osalta muuttuvat kustannukset ovat 82,27 €/h. Tuntikustannusten lisäksi kannattaa pitää mielessä kunkin prosessin vievä aika. Tällä hetkellä hitsaus tapahtuu verrattain hitaalla hitsausmenetelmällä, joka nostaa kustannuksia per metriltä korkeaksi. Päittäishitsauksen kustannus metriltä on 4,45 € ja pienahitsauksen kustannus metriltä on 2,98 €.

Kustannuksista suurimman osan vie työvoima. Operaattorien määräksi on laskettu sekä hitsaava työntekijä sekä esityöstöön tarvittava työntekijä. Suuren osan tuotannon kustannuksista koostuu hitsauksen lisäaineista eli lisäainelangasta ja jauhekaarihitsausjauheesta. Nämä tekijät vievät jauhekaarihitsauksella toteutettavan päittäishitsauksen hitsisauman tuotannon muuttuvista kustannuksista noin 96 %. Pienahitsauksessakin kyseiset tekijät koostavat 95 % muuttuvista kustannuksista. Suurimpien kustannusten aiheuttajien luonne on erilainen. Työntekijän kustannukset ovat riippuvaisia kulutetusta ajasta, kun taas lisäaineet riippuvat hitsatusta matkasta. Prosessinopeutta kasvattamalla ja/tai operaattorien lukumäärää vähentämällä voidaan laskea kustannuksia.

5. TUOTANTOLAITTEIDEN MODERNISOINTI

Rauma Marine Construction Oy:n terästuotantolinja on viimeksi uusittu kokonaan 1990-luvun alkupuolella (1993-1994). Tämän jälkeen linjaa on modernisoitu useaan otteeseen. Laivanrakennuksen trendin suunnatessa entistä enemmän ohuiden ja erikoislujien terästen suuntaan, on myös tuotantotapojen kehityttävä. Jännösjännitysten ja muodonmuutosten minimoimiseksi on löydettävä uusia tuotantotapoja, joissa lämmöntuonti on mahdollisimman alhaista ja tehokasta (Michaleris, 2011). Kilpailukyvyn parantamiseksi on tuotannon tuottavuutta ja kustannustehokkuutta kasvatettava. Lean-ajattelu pyrkii seitsemää hukkaa poistamalla ja jatkuvalla kehityksellä lisäämään asiakasarvoa tuotteissa ja palveluissa (Hines & Rich, 1997).

5.1 Lean-ajattelu tuotannossa

Toyotan tuotantostrategiaa mukaileva Lean-ajattelu pyrkii vähentämään tuotannossa seitsemää toiminnallista hukkaa sekä kahdeksatta ihmisten osaamiseen liittyvää hukkaa, jotta pystytään tuottamaan enemmän asiakasarvoa. Lean:issa pyritään vähentämään kaikki toiminta, joka ei tuota lisäarvoa asiakkaalle. Lean-ajattelun perusteella määritetään 7+1 hukkaa, jotka ovat (Logistiikan maailma, 2017):

- Ylituotanto
- Varastot
- Odottaminen ja etsiminen
- Siirtymiset
- Siirrot ja käsittelyt
- Korjaustyöt
- Turha työ
- (Ihmisen aivokapasiteetin ja osaamisen käyttämättä jättäminen)

Ensimmäinen hukka, ylituotanto, on yksi merkittävimmistä hukan muodoista. Ylituotanto johtaa välivaraston kasvamiseen. Varastointi onkin toinen hukan muoto. Varastointi syö resursseja ja varastointi tuo lisäarvoa ainoastaan harvaan tuotteeseen. Odottaminen ja etsiminen voidaan luokitella saman tyyppiseksi varastoinnin kannalta. Varastoinnissa tuote tai raaka-aine odottaa seuraavaa vaihetta, odottelussa taas ihminen tekee ”työn”. Tuotteiden ja ihmisten siirtymiset ja siirrot eivät näy lopputuotteessa, joten ne ovat myös hukkaa. Korjaustyö on toiminto, jonka jälki näkyy lopputuotteessa, mutta olisi voitu välttää aiempien työvaiheiden laadukkaammalla suorittamisella. Työvaiheiden jatkuvalla laaduntarkkailulla ja prosessinkorjauksella voidaan välttää toistuva korjaamisen tarve. Turhalla työllä tai yliprosessoinnilla tarkoitetaan työtä, joka tehdään jo vaatimukset täyttävään

tuotteeseen. Lisätoiminnot eivät tuota asiakkaalle lisäarvoa, joten ei hän ole valmis niistä maksamaan. (LeanProduction, 2017)

Tuotannon kaikki toiminnot voidaan jakaa kolmeen eri kategoriaan, jotka ovat arvoa tuottavat aktiviteetit, tukitoiminnot ja hukka. Arvoa tuottavalla toimilla tarkoitetaan kaikkea sitä toimintaa, joka muokkaa tuotetta tai palvelua kohti haluttua lopputulosta. Tukitoiminnot eivät muokkaa tuotetta tai palvelua suoraan, mutta ovat välttämättömiä arvontuoton mahdollistamisen ja eri instituutioiden kannalta. Hukka on toimintaa, joka ei tuota lisäarvoa tuotteeseen tai palveluun eikä ole välttämätön lisäarvon tuottamisen kannalta. Tämä tarkoittaa jatkuvaa analysointia toimintojen laadusta ja niiden parantamisesta. Jatkuva parantaminen on myös yksi Lean:in peruseräiteistä. (Logistiikan maailma, 2017) Jatkuva analysointi on tarpeen, sillä LeanProduction:in mukaan jopa 60 % toiminnoista on hukkaa. Jatkuva parantamista pyritään Lean:in mukaan toteuttamaan Deming:in ympyrän avulla. Deming:in ympyrä sisältää neljä kohtaa, jotka ovat suunnittelu, tekeminen, tarkastaminen ja toimiminen (Plan-Do-Check-Act) (logistiikan maailma, 2017; Larikka et al. 2007). Toimimisella tarkoitetaan toimia, jotka tehdään alkuperäisen suunnitelman muuttamiseksi.

Seitsemästä hukasta erityisesti korjaustyö on hukka, joka telakkateollisuudessa on suuressa roolissa. Terästen terminen oikaisutyö eli rihtaus on korjaustyötä, jonka määrää voidaan minimoida tuotantotapoja muuttamalla. Tuotantomenetelmät, joiden lämmöntuonti on keskitetympää ja pienempää, tulevat kyseeseen, kun halutaan vähentää korjaustyön tarvetta. Rihtaus on nimenomaan työvaihe, joka syntyy edellisten työvaiheiden virheellisen lopputuloksen eli hitsausmuodonmuutosten myötä. Teoriassa nämä muodonmuutokset pyritään nollaamaan, mutta käytännössä se ei ole mahdollista. Levykenttien tasomaisuudelle onkin toleranssit, jotka tulee täyttää.

Terästuotannossa valmistetaan lohkoja, joista kootaan laivoja. Nämä laivat suunnitellaan kestävämpään rakenteen käytönaikaiset kuormitukset. Lohkoihin kohdistuu kuitenkin suuria voimia niiden käsittelyissä ja nostoissa. Tämän takia turhat nostot ja siirrot tulisi minimoida. Siirrot ja käsittely ovatkin mainittu Lean-ajattelussa eräänä hukkana. Tuotantolinjan rakenteen tulisi palvella Lean-ajattelua tuotteiden suoraviivaisella etenemisellä ilman turhia nostoja. Jokainen lohkojen turha nosto aiheuttaa turhien kustannusten lisäksi riskin rakenteen stabiiliuden menettämiseksi.

5.2 Tuotantovaihtoehtojen kartoittaminen

Hitsausmenetelmällä on suuri merkitys hitsauksen lopputulokseen. Suuri lämmöntuonti aiheuttaa suuria jäännösjännityksiä ja suuria muodonmuutoksia laajan lämpövyöhykkeen takia. Laaja lämpövyöhyke aiheuttaa suuremman kutistuman perusmateriaalissa, jolloin jäännösjännitykset kasvavat. Jäännösjännitysten kasvaessa taas muodonmuutokset kas-

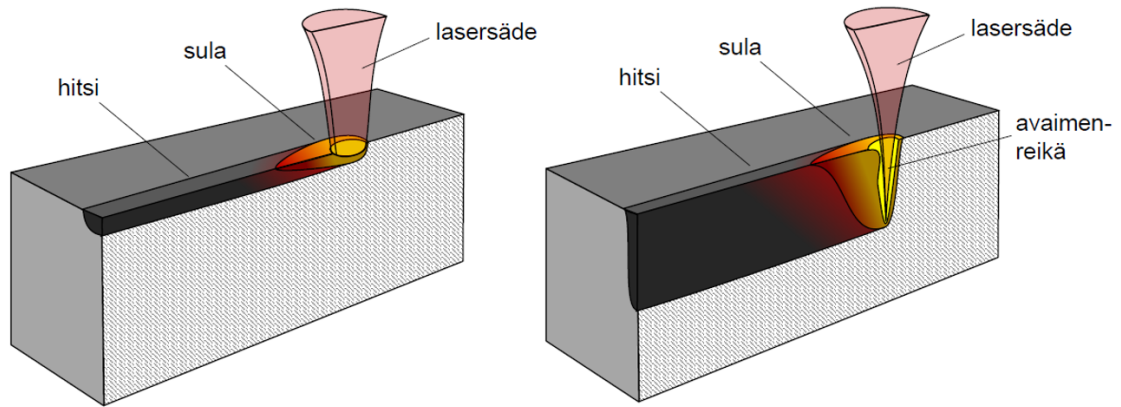
vavat ja kriittinen lommahdusjännitys on alhaisempi. Tämän takia onkin pyrittävä sellaisiin tuotantotapoihin, joissa lämmöntuonti olisi mahdollisimman keskitettyä, jolloin lämpövyöhyke jää kapeammaksi ja jäännösjännitykset näin pienemmiksi.

Laivanrakennuksen luonteen olleessa yksittäisten ja hyvin erilaisten tuotteiden valmistuksessa on tuotantolaitteiden oltava joustavia. Rakennettavat laivat ovat kaikki uniikkeja tuotteita, joten joustavuus on yksi tuotantolinjan tärkeimmistä ominaisuuksista hyvän laadun, tuottavuuden ja kustannustehokkuuden ohella. (Roland et al. 2004) Rauma Marine Constructions Oy:n kilpailuvaltteja on korkean osaamisen lisäksi joustavuus laivanrakennuksessa. Uusien tuotantolaitteiden on ylläpidettävä tai parannettava tätä ominaisuutta.

RMC:n nykyisen terästuotantolinjan rakentamisen jälkeen tuotantomenetelmät ovat muuttuneet ja uusia sovelluksia hitsaukseen on kehitetty. Uusia hitsaustapoja ovat esimerkiksi laserhitsaus, laser-hybridihitsaus ja tandem MAG-hitsaus. Juuri nämä hitsausmenetelmät ovat onnistuneimmat kehitykset hitsauksen tehokkuuden parantamiseksi (Goecke et al. 2015). Uudet kehitettävät tuotantomenetelmät keskittyvät erityisesti hitsauksen lämmöntuonnin vähentämiseen ja keskittämiseen. Toisin sanoen hitsauksen energiatehokkuutta ja prosessinopeutta on pyritty parantamaan sekä prosessissa syntyviä jännityksiä ja muodonmuutoksia on pyritty minimoimaan (Goecke et al, 2015).

5.2.1 Laserhitsaus

Laserhitsauksessa (LBW) keskitetty lasersäde tuottaa suuren intensiteetin omaavan polttopisteen, joka sulattaa hitsattavan aineksen. Lasersäde muodostetaan laseroivan väliaineella resonaattorissa. Laseroiva väliaine voi olla kaasu tai kiinteä aine. (Kujanpää et al. 2005) Energiatiheys lasersäteessä on $10^5 - 10^7 \text{ W/cm}^2$ (Michaleris, 2011). Laserhitsauksessa ei tarvita lainkaan lisäainetta vaan liittävä aineksena toimii lasersäteen sulattama aine. Laserilla voidaan suorittaa sulattavaa hitsausta tai syvätunkeumahitsausta (avaimenreikähitsaus). Sulattavassa hitsauksessa hitsaus ulottuu ainoastaan materiaalin pintaan. Tämä menetelmä sopii hyvin ohuiden levyjen hitsaamiseen. Syvätunkeumalaserhitsauksessa laserin intensiteetti on suurempi ja lasersäde muodostaa materiaaliin syvän ”avaimenreiän”, joka muodostaa syvän ja kapean hitsisauman. Sulattavassa hitsissä hitsausjäljen leveys-syvyys-suhde on suuri, kun taas avaimenreikähitsauksessa suhde on pieni. Sulattavan hitsin ja avaimenreikähitsin hitsausjälkeä on havainnollistettu kuvassa 26. (Lappalainen, 2015)

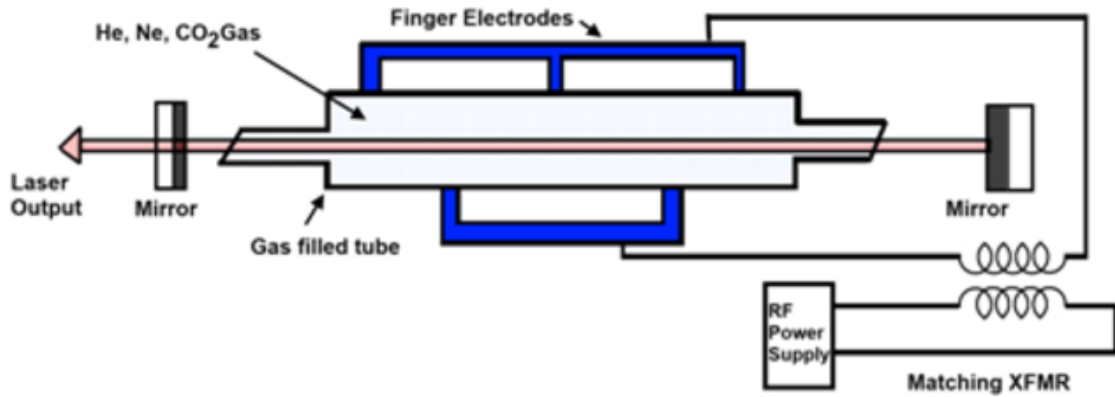


Kuva 26. Poikkileikkaukset sulattavan hitsin (vasen) ja avaimenreikähitsauksen (oikea) toimintaperiaatteesta (Lappalainen, 2015)

Yleisimmät laserhitsausmenetelmät ovat (Steen et al. 2010):

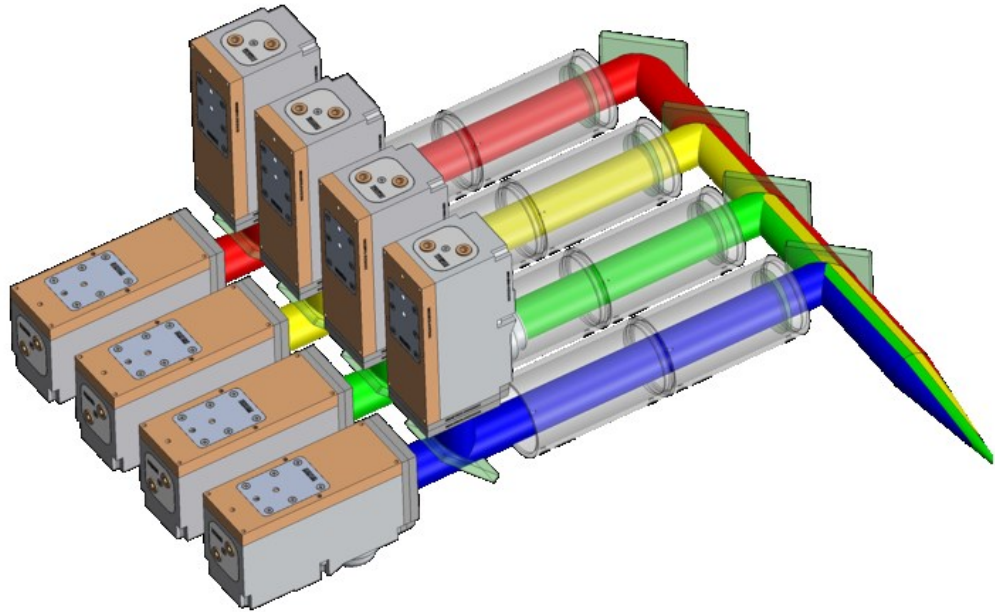
- CO₂-laser
- Nd:YAG-laser
- diodilaser
- kuitulaser
- kiekkolaser

CO₂-laser (hiilidioksidilaser) on laser, jossa hiilidioksidi toimii laseroivana väliaineena. Hiilidioksidin lisäksi resonattorikaasu sisältää typpeä ja heliumia. Typpi toimii resonattorikaasussa lasersäteiden herättäjänä ja helium puolestaan toimii prosessissa jäähdyttäjänä. Hiilidioksidin virittäminen tapahtuu typen ja sähkövirran avulla. (Kujanpää et al. 2005) Resonattorikaasun koostumus on noin 78 % heliumia, 12-13 % typpeä ja hiilidioksidia loput noin 10 %. Hyötysuhde CO₂-laserissa on kuitenkin alhainen, vain noin 15 %. (Steen et al. 2010) CO₂-laserin aallonpituus on 10,6 μm ja siinä lasersäde välitetään hitsattaviin kappaleisiin peilien ja linssien välityksellä (Michaleris, 2011). CO₂-laserin toimilaitteistoja on kuvattu kuvassa 27. Toisin kuin CO₂-laserissa, neodyymikidelaserissa (Nd:YAG) laseroivana väliaineena toimii kiinteä neodyymikide. Nd:YAG-laser ja CO₂-laser ovat lasertyöstön uranuurtajia, joita on kehitetty jo useita kymmeniä vuosia. (Kujanpää et al. 2005) Sitten Nd:YAG-laserin pohjalta on kehitetty tehokkaampia ja käyttökelpoisempia sovelluksia, kuten diodi-, kuitu- ja kiekkolaser (Steen et al. 2010).



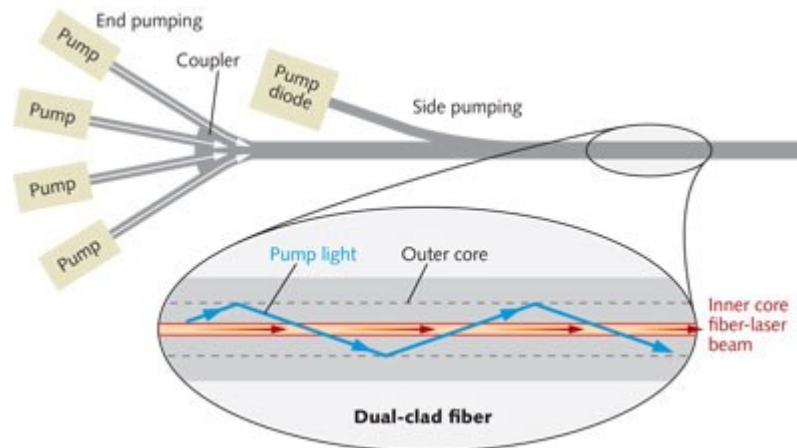
Kuva 27. *CO₂-laserin toimintaperiaate (daenotes.com, 2017)*

Diodilaserissa laserin muodostus tapahtuu puolijohteiden pintojen välissä. Yhden diodin tuottama teho on ainoastaan noin 2 W, joten diodeja kootaan isompiin nippuihin suuremman tehon saavuttamiseksi. Diodilaser on hyvin skaalautuva laserin tuotantotapa, sillä sen tehoa voidaan nostaa ja laskea diodipakkojen määrää muuttamalla. Kuvassa 28 on havainnollistettu kahdeksan diodipakan muodostaman lasersäteen syntyminen. (Laserline, 2017) Diodilaserissa diodin molemmat päädyt on käsitelty ja pinnoitettu, jotta laser voidaan synnyttää näiden pintojen väliin. Tämän takia diodeja kootaan isompiin nippuihin, joissa lasersäde syntyy. Normaalisti diodeja kootaan noin 20 kappaleen nippuihin, jotta lämmöntuotto ei olisi liian suurta. Nämä niput juotetaan kiinni kupariseen lämmönvaihtimeen, johon kiinnitetään useampi nippu tehon kasvattamiseksi. Näitä useamman nipun muodostamia kokonaisuuksia kutsutaan diodipakoiksi. Diodilaserin synnyttämä säde hajaantuu nopeasti diodista lähdetessä, jonka takia pakkoihin kiinnitetään optinen linssi muokkaamaan säde yhdensuuntaiseksi. Monen pakan tuottama teho kootaan yhdensuuntaiseksi korkean tehon omaavaksi säteeksi linssien ja peilien avulla. Diodilaserissa kokonaishyötysuhde on hyvä, jopa 30 %. Näin korkea hyötysuhde perustuu diodin korkean laseroinnin hyötysuhteeseen, joka on noin 60 %. Diodilaserissa lisäksi hyötysuhteeseen vaikuttaa laserin välittämistapa. Peilit, linssit ja optiset kuidut syövät myös tehoa. (Kujanpää et al. 2005)



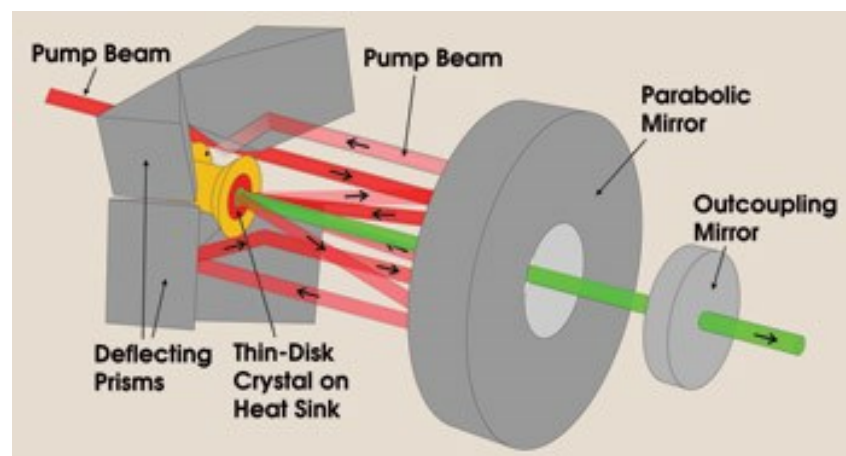
Kuva 28. Kahdeksan diodipakan muodostaman lasersäteen syntyminen (Laserline, 2017)

Kuitulaser on lasertyöstötavoista eniten kasvava ja omaa lasertyöstömetodeista suurimman markkinaosuuden. Vuonna 2015 kuitulaserin markkinaosuus maailmanlaajuisesti oli 39,3 % kaikista lasertyöstötavoista. Seuraavaksi yleisin on CO₂-laser 31,8 % osuudella. (Dong & Samson, 2016) Kuitulaserissa toimintaperiaatteena on synnyttää valo suoraan optiseen kuituun, jonka ydin toimii resonaattorina. Valo saadaan kuituun pumppaamalla se diodilaserilla (kuva 29). (Kujanpää et al. 2005) Kuitulaserin etuja on erityisesti lasersäteen laatu, joka voi olla 10 kertaa parempi kuin Nd:YAG-laserissa. Kuitulaserin tuottaman säteen halkaisija on noin 50 µm, jolloin sen tehotiheys on korkea. (Steen et al. 2010) Kuitulaser keskitetään polttopisteeseen työstöpäässä olevien peilien ja/tai linssien avulla (Lappalainen, 2015). Kuitulaserin kokonaisenergiantarve on muihin lasertekniikoihin verrattuna pieni, koska kuitulaserin jäähdyttäminen tapahtuu pääasiassa pitkän kuidun kautta. Kuitulaserissa ei ole suuria laitteita synnyttämään lasersädettä, koska säde syntyy sädettä siirtävässä kuidussa. (Dong et al. 2016) Diodipakkojen viemä tila on kuitenkin otettava huomioon. Kuitulaserin kokonaisyötysuhde on 25 – 35 %. Kuitulaserissa kokonaisyötysuhde koostuu kahdesta erillisestä hyötysuhteesta: pumppaavien diodien hyötysuhteesta ja kuidun hyötysuhteesta. (Hecht, 2012) Kuitulaser on diodilaserin tavoin hyvin skaalattavissa, sillä laseriin voidaan liittää tai poistaa valoa pumppaavia diodipakkoja tarpeen mukaan. (IPG Photonics, 2017)



Kuva 29. Kuitulaserin toimintaperiaate (Hecht, 2012)

Eräs laserhitsauksen sovellus on kiekkolaser, jossa diodilaseria pumpataan linssien läpi ytterbiumkiekkoon. Kiekko on asetettu jäähdytysyksikköön, jonka tarkoitus on pitää prosessi vakaana. Koska kiekkolaserissa ainoastaan pieni osa lasersäteestä absorboituu kiteeseen ja heijastuu siitä paraboliseen peiliin, on säde ohjattava useita kertoja peilien avulla takaisin kiekkoon. Pumpattu säde voidaan ohjata ytterbiumkiekkoon jopa 32 kertaa. Näin saadaan ulos tulevan lasersäteen tehoa nostettua huomattavasti. Ilman jäähdytysyksikköä kiteen lämpötila nousisi usean lasersäteen johdosta, jolloin lämpölaajenemisesta johtuen säteen heijastuma ei olisi enää tarkka. (Giesen et al. 2007) Kiekko on ainoastaan muutama millin kymmenystä paksu, mutta useita millimetrejä leveä. Pienen kiekon jäähdytys on mahdollista ulkoisen jäähdytysyksikön avulla. Kiekon ulkopinta-alan suhde sen tilavuuteen on suuri, mikä mahdollistaa tehokkaan jäähdytyksen. Yhden kiekkolaserin teho voi olla jopa 1 kW. Kuitenkin säteen laatu kärsii näin suuresta tehomäärästä. Kiekkolaserin kokonaistehoa voidaan kasvattaa useilla yksittäisillä kiekkoyksiköillä. (The Welding Institute (1), 2017) Kuvassa 30 on esitetty kiekkolaserin muodostaminen peilien ja ytterbiumkiekon avulla.



Kuva 30. Kiekkolaserin toimintaperiaate (Giesen et al. 2007)

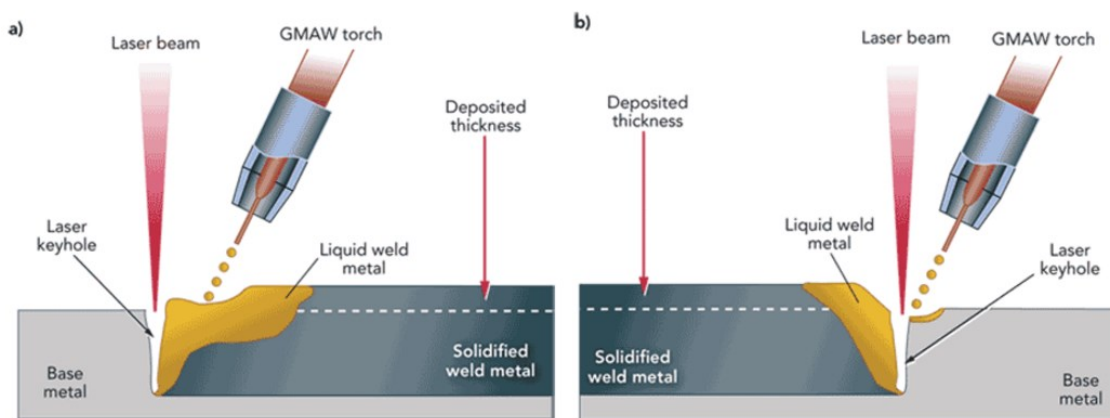
Laserhitsauksen etuja ovat erityisesti suuri tehotiheys. Laserin tuottama teho vaikuttaa pienelle alueelle, jolloin hitsin lämpövyöhyke jää kapeaksi. Kapea lämpövyöhyke synnyttää vain pieniä jäännösjännityksiä rakenteeseen. Tehotiheyden suuruuden ansiosta hitsattava materiaali sulaa nopeasti ja hitsausvyvyys on suuri. Näin saadaan hitsattua paksuja materiaaleja suurella nopeudella. Laserhitsauksen tuottavuus perinteiseen valokaarihitsaukseen nähden on noin 2,5-kertainen (Michaleris, 2011).

Laserhitsauksen heikkoudet perinteisiin hitsausmenetelmiin on laserhitsauksen vaativuus ja kallis investointikustannus. Vaativuudella tässä yhteydessä tarkoitetaan prosessin vaatimuksia. Lisäaineettomassa hitsissä ilmarako ei saa olla yli 0,2 mm. Tämän takia levyn reuna on koneistettava ennen hitsaamista. Kapean lasersäteen takia myös lasersäde on paikoitettava muita menetelmiä tarkemmin sauman kohdalle. Avaimenreikähitsauksessa osa materiaalista höyrystyy, mikä aiheuttaa sauman vajaatäyttöö ilman lisäainetta. (Lappalainen, 2015) Laserhitsauksessa suhteellisen pieni lämmöntuonti ja siitä johtuva nopea jäähtyminen voivat aiheuttaa martensiitin syntymistä hitsisaumassa. Tätä epäkohtaa voidaan korjata esimerkiksi alentamalla hitsausnopeutta tai laser-hybridihitsauksella. (Kujanpää et al. 2005)

5.2.2 Laser-hybridihitsaus

Laser-hybridihitsauksessa (HLAW) yhdistetään laserhitsaus ja kaarihitsaus. Laserin kanssa voidaan yhdistää MIG/MAG-, TIG- tai plasmakaarihitsaus. Yleisin laserin kanssa yhdistettävä kaarihitsausmenetelmä on MIG/MAG-hitsaus. Laserin kanssa yhdistettävän hitsausmenetelmän tarkoituksena on poistaa laserhitsauksen heikkouksia. Hitsisauman ilmaraon toleranssi kasvaa lisäaineen syötön myötä. Myös laserhitsauksen sauman vajaatäyttöongelma poistuu kaarihitsauksen lisäaineen syötöllä. (Michaleris, 2011; ESAB hybrío, 2017)

Laser-hybridihitsaus voidaan suorittaa lasersäteen johtaessa prosessia tai vaihtoehtoisesti valokaaren johtaessa. Johtava hitsausmenetelmä tarkoittaa menetelmää, joka toimii hitsaussuuntaan edellä. Pienahitsit suoritetaan johtavalla lasersäteellä valokaaren ollessa seuraava lämmönlähde. Päittäishitsit suoritetaan valokaaren johtaessa tuoden lisäaineen edeltä hitsisaumaan. (ESAB hybrío, 2017; Denney, 2011) Kuvassa 31 on kuvattu sekä lasersäteen johtava laser-hybridihitsaus että valokaaren johtava laser-hybridihitsaus.

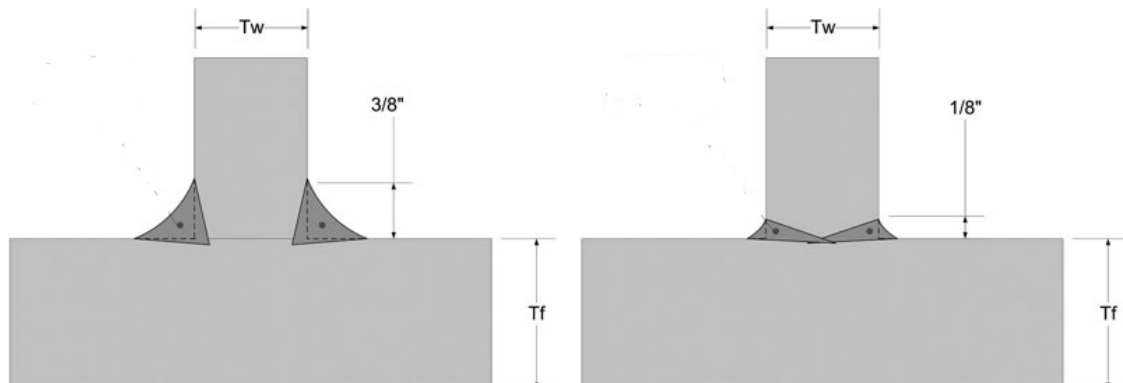


Kuva 31. Lasersäteen johtava ja valokaaren johtava laser-hybridihitsausprosessit (Denney, 2011)

Laser- ja kaarihitsaus stabiloivat toinen toistaan laser-hybridihitsausprosessissa. Lasersäteen tuoden hitsaukseen tuottavuutta prosessin nopeudella ja syvällä hitsausjäljellä, valokaari tuo lisää joustavuutta lisäaineen tuonnilla. Laser-hybridihitsauksessa lämmöntuonti on huomattavasti alhaisempi kuin perinteisessä kaarihitsauksessa. Pennsylvania State University:ssä tehdyssä tutkimuksessa laser-hybridihitsauksessa lämmöntuonti on 44 % alhaisempi kuin MIG/MAG-hitsauksessa. Laser-hybridihitsauksessa lämmöntuonti on 0,48 kJ/mm kun MIG/MAG-hitsauksessa lämmöntuonti on 0,85 kJ/mm. Alhaisen lämmöntuonnin takaa laser-hybridihitsauksen nopea hitsausnopeus, joka on 16,9 mm/s. MIG/MAG-hitsauksessa nopeus on 5,29 mm/s. (Michaleris, 2011) Alhaisen lämmöntuonnin ansiosta pitkittäiset ja poikittaiset jäännösjännitykset jäävät alhaisemmiksi ja muodonmuutokset ovat pienempiä. Hitsausnopeuden perusteella laser-hybridihitsauksen ansiosta hitsausprosessin tuottavuus kasvaa 219 %. Tämän lisäksi on syytä kiinnittää huomiota jälkikäsittelyn määrään. Laser-hybridihitsauksen ansiosta rungonvalmistus laivanrakennuksessa on lyhentynyt ajallisesti jopa 40 % (Kah, 2011).

Laser-hybridihitsauksen edut verrattuna perinteiseen kaarihitsaukseen verrattuna ovat myös muita tekijöitä kuin ainoastaan tuottavuudelliset tekijät prosessin nopeutuessa ja muodonmuutosten pienentyessä. Laser-hybridihitsauksella voidaan parantaa hitsisauman väsymiskestävyyttä 30 % verrattuna kaarihitsaukseen. (Remes, 2003) Laser-hybridihitsauksessa valokaaren lämmöntuonti pidentää hitsin jäähtymisaikaa, minkä ansiosta hitsin kovuus on matalampi ja halkeamat vähenevät (Hansen, 2013). Laser-hybridihitsaus myös väljentää pelkän laserhitsauksen tiukkoja vaatimuksia kappaleiden muodon osalta. Ilmarako kappaleiden välillä voi näin ollen olla suurempi kuin laserhitsauksessa. (Michaleris, 2011; Kah, 2011; Allen et al. 2012) Laser-hybridihitsauksessa lämmöntuonti on suurempaa kuin laserhitsauksessa, mikä on sekä etu että haitta. Etuna suuresta lämmöntuonnista on terästä hitsatessa teräksen mikrorakenteen parempi rakenne, kun martensiitin syntyminen pidemmän ja tasaisemman jäähtymisajan takia on vähäisempää. Laser-hybridihitsaus, kuten myös laserhitsauskin, vaatii suunnittelulta uudelleenjärjestelyjä. Hitsisauman

erilainen luonne lasersäteen tuottaman avaimenreiän takia muuttaa hitsin efektiivistä mitaa. Tällöin esimerkiksi pienahitsissä palon koko ei määrää sauman kokoa (kuva 32). Hitsausmenetelmän muuttaminen voikin pakottaa valmistussuunnittelun sopeutumaan uuteen tilanteeseen. Laser-hybridihitsauksessa on otettava huomioon hitsipalon geometrian lisäksi myös pääsy saumaan ja kappaleiden toleranssit. Maksimaaliset hyödyt laser-hybridihitsaus saadaan, kun tuotteen koko elinkaareissa on otettu huomioon tuotantomenetelmä. (Kah, 2011, s.21-22)



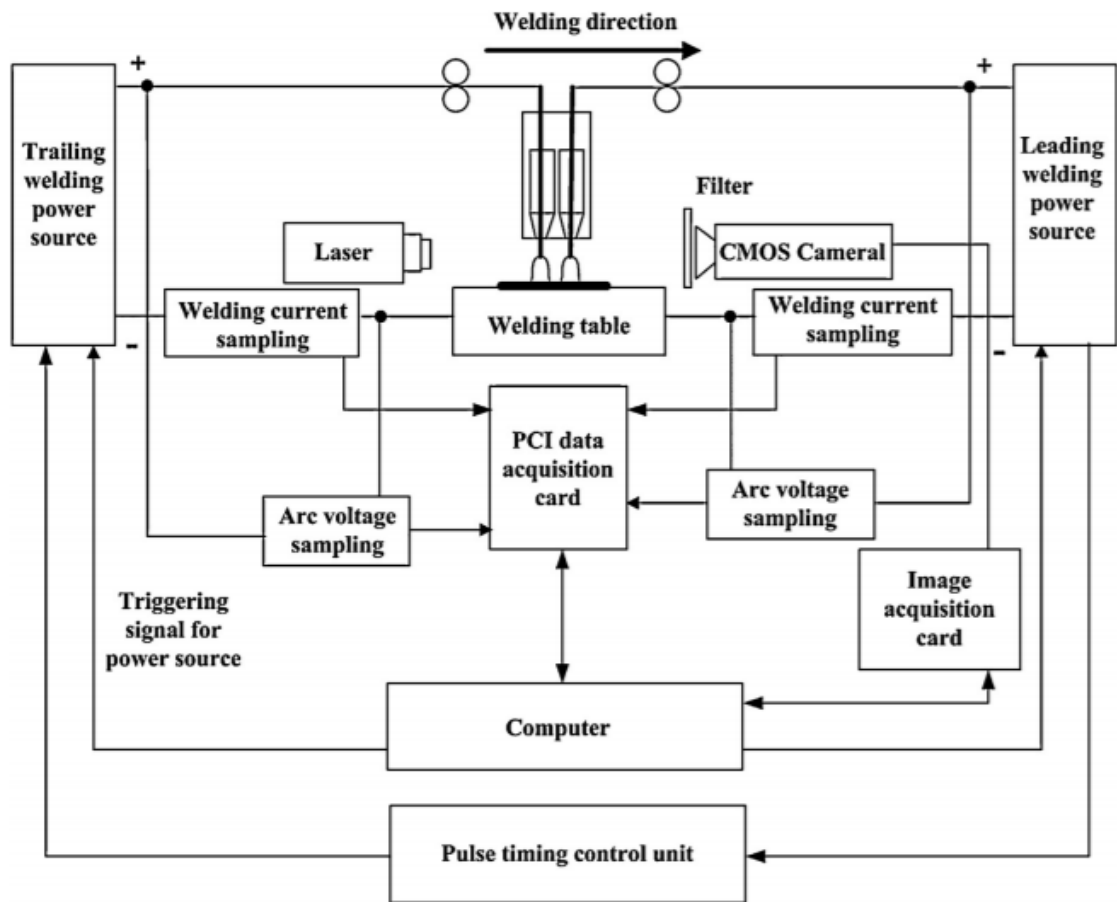
Kuva 32. Pienahitsin poikkileikkaus kaarihitsauksessa (vasen) ja laser-hybridihitsauksessa (oikea) (Hansen, 2013)

5.2.3 Tandem MAG

Perinteisen valokaarihitsauksen rinnalle on kehitetty kontrolloidumpi prosessi, jossa lisäaineensyöttöä ja lämmöntuontia tarkkaillaan jatkuvasti. Tämä prosessi on tandem gas metal arc welding (T-GMAW/Tandem MAG). T-GMAW:issa hitsausprosessi näyttää ulkoisesti perinteiseltä valokaarihitsaukselta. Kuitenkin tässä prosessissa yhden hitsauslangan sijasta syötetään kaksi hitsauslangaa samaan hitsisaumaan yhdellä hitsauspistoolilla. Tandem MAG-hitsauksella voidaan saavuttaa korkeamman hitsausmäärän kahden hitsauslangan myötä. Näin voidaan nostaa hitsausnopeutta noin kaksinkertaiseksi perinteiseen yhdellä langalla hitsaukseen verrattuna. Hitsausnopeuden kasvaessa lämmöntuonti vähenee hitsauksessa, jolloin jäännösjännitykset muodostuvat pienemmiksi. (The Welding Institute (2), 2017; Chen, 2013) Tandem MAG-hitsauksessa ensimmäisen hitsauslangan tehtävänä on kiinnittää kappaleet toisiinsa ja tuoda lämpö valokaareen. Perässä tulevan hitsauslangan tehtävänä on täyttää hitsauslovi ja tasoittaa hitsisauma (Goecke et al. 2015).

Tandem MAG-hitsauksessa periaatteena on syöttää samasta hitsauspistoolista kahta hitsauslangaa, joilla molemmilla on oma virranlähde ja syöttölaite. Laitteet on kuitenkin liitetty yhteiseen ohjausyksikköön, joka ohjaa hitsausprosessia. Ohjausyksikön tehtävä on kontrolloida virtalähteitä ja langansyöttöä muodostaen syöttöön pulsseja. Hitsauslisäaine syötetään pulssien avulla pisara kerrallaan, minkä ansiosta hitsausjälki on tasaisempi,

lämmöntuonti alhaisempi ja hitsausroiskeita on vähemmän. Kuvassa 33 on esitetty tandem MAG-hitsauksen toiminta sekä siihen tarvittavat laitteet. (Chen et al. 2015; Purslow, 2012)



Kuva 33. Tandem MAG-hitsauksen ohjausperiaate (Chen et al. 2015)

Chen (2013) on tutkimuksissaan perehtynyt tandem MAG-hitsauksen aiheuttamiin jäännösjännityksiin, mikrorakennemuutoksiin, hitsin kovuuteen sekä hitsin iskutkeyteen. Tutkimuksissaan hän on käyttänyt noin 5 mm paksua DH 36-terästä, jota käytetään laivanrakennuksessa yleisesti. Jäännösjännitysten tutkimuksissa tuloksia verrattiin jauhekaarihitsaukseen, jossa jäännösjännitykset ylittävät hitsin kohdalla myötörajan (355 MPa) reilusti. Tandem MAG-hitsauksella jäännösjännitykset saavuttavat 95 %:sti myötörajan hitsin kohdalla. 10 mm:n etäisyydellä hitsisaumasta jäännösjännitys tandem MAG-hitsauksessa on enää 200 MPa kun se jauhekaarihitsauksessa on vielä myötörajan tasolla. (Chen, 2013)

Mikrorakenne, kovuus ja iskutkeys olivat parhaimmillaan tapauksessa, jossa perässä tulevan hitsauslangan syöttö sekä lämmöntuonti olivat suurempaa. Mikrorakenne koostui tässä tapauksessa ferriitistä, joka on suhteellisen pehmeää, mutta sitkeää. Näin ollen kovuus oli alhainen. Iskutkeys oli myös huomattavasti parempi tapauksessa, jossa tasaisen lämmöntuonnin sijasta perässä tulevan palon lämmöntuonti on suurempi. (Chen et al.

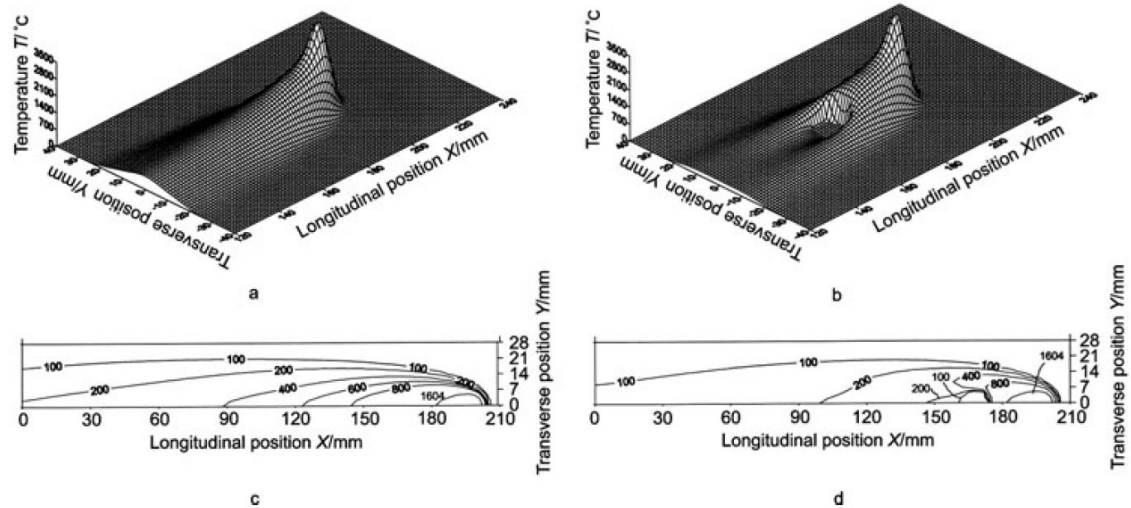
2015) Kovuuden ja iskusitkeyden osalta hitsin ja perusaineen välinen alue on ongelmallinen (Moore et al. 2013).

Sen lisäksi, että tandem MAG-hitsauksessa hitsausnopeus kasvaa kahden hitsauslangan myötä tuplaksi, on tandem MAG-hitsauksen saavuttama tunkeuma huomattavasti suurempi kuin yhdellä langalla suoritettussa hitsauksessa. Kuitenkin hitsausparametrien tarkka säätö ja tarkkailu ovat tarpeen tandem MAG-hitsauksessa, koska kaksi hitsauslangaa vaikuttaa valokaareen, jolloin ne voivat myös haitata toistensa prosesseja. (Goecke et al. 2015)

5.2.4 DC-LSND-jäähdytetty hitsaus

Guan on vuoden 2005 artikkelissaan esittänyt LSND (Low Stress No Distortion) hitsaus-tekniikkaa, jonka tarkoituksena on minimoida hitsauksessa syntyvät muodonmuutokset. Guan:in tutkimuksessa on tutkittu ohutlevyjen ($t < 4$ mm) muodonmuutoksia perinteisessä MAG-hitsauksessa sekä vastaavaa LSND-tekniikalla toteutetussa hitsauksessa. Myös Holder ym. (2011) ovat tutkimuksissaan tutkineet LSND-tekniikalla hitsattuja levyjä. Tarkemmin Holder ym. tutkimuksessa on käytetty DC-LSND-tekniikkaa (Dynamically Controlled – Low Stress No Distortion). Holder:in ym. tutkimuksessa hitsattu palko jäähdytetään hitsauspistoolin perässä kulkevalla CO₂-lumisuihkulla. Tässä tutkimuksessa hitsattava kohde oli 4,5 mm paksu DH 36-teräs.

Molemmissa edellä mainituissa tutkimuksissa hitsaustilanteessa suoritettu jäähdytys sai aikaan suuren lämpögradientin valokaaren ja jäähdytyssuihkun välillä (kuva 34). Lopputuloksena pituussuuntainen hitsauskutistuma jää vähäiseksi ja tällöin myös muodonmuutokset jäävät vähäisiksi. Kuvissa 34.b) ja 34.d) valokaaren aiheuttaman korkean lämpötilapiikin jälkeen tulee jäähdytyksen aiheuttama matalan lämpötilan lämpölaakso. Lämpölaakson jälkeen tulee tasaisempi tasanne, jossa lämpötila on noin 200 °C. Perinteisessä valokaarihitsauksessa lämpötilajakauma on epätasaisempi, mikä aiheuttaa epätasaisen jäähtymisen.



Kuva 34. Perinteisen valokaarihitsauksen ja DC-LSND-tekniikalla suoritetun hitsauksen lämpötilajakaumat (Guan, 2005)

DC-LSND-tekniikka ei kuitenkaan tule kyseeseen terästen hitsaamisessa. Nopean jäädytyksen tekniikka soveltuu hyvin alumiini- ja titaanilevyjen hitsaukseen. Nopea jäähtyminen aiheuttaa teräkselle epäedullisen mikrorakenteen. Suuren lämpögradientin takia rakenteeseen muodostuu martensiittinen mikrorakenne. (Michaleris, 2011) Hitsisauman lämpövyöhykkeessä alhaisimman sitkeyden omaa karkearakeinen vyöhyke varsinkin, jos siihen on muodostunut martensiittia (Li et al. 2013). Hiilipitoisuuden kasvaessa martensiitti on erittäin kovaa, mutta haurasta. Martensiitti on myös tilavuudeltaan suurempi kuin muut teräksen mikrorakennemuodot, joten se aiheuttaa suurempia jäännösjännityksiä. (Koivisto et al. 2004)

5.3 Muodonmuutosten minimointi

Muodonmuutosten syntymisen ilmiötä on käsitelty kappaleessa 3. Hitsausmuodonmuutosten minimoinnissa tässä yhteydessä keskitytään kolmiulotteisten muodonmuutosten minimoimiseen. Tämä tarkoittaa kulmakiertymän, lommahtamisen ja taipumisen vähentämistä. Tasomaiset kutistumat voidaan ottaa huomioon kutistumakertoimilla mitoituksessa. Tuotantolinjan muutosten tulisi keskittyä hitsauksessa syntyvien jäännösjännitysten, muodonmuutosten sekä turhien käsittelyjen ja siirtojen minimoimiseksi. Hitsauksessa lämmöntuonnin määrä lisää jäännösjännityksiä ja sitä kautta muodonmuutoksia. Varsinkin kulmakiertymä on verrannollinen hitsauksen lämmöntuntiin. (Niemi et al. 1993)

Hitsauksen lämmöntuontia voidaan vähentää oikeilla hitsausmenetelmillä. Michaleris (2011) mainitsee hitsauksessa tarvittavan energiamäärän olevan $10^5 - 10^7$ kW/cm². Mikäli hitsauksessa välitetty energiamäärä pystytään keskittämään kapeammalle alueelle, voidaan hitsin kutistavaa voimaa pienentää. Toisin sanoen tehotiheydeltään tehokkaam-

massa hitsausmenetelmässä samalle pituusyksikölle tuotu lämpöenergia voi olla huomattavasti pienempi, kuitenkin mahdollistaen hitsin syntymisen oikealla tehomäärällä per neliösenttimetri. Edellisessä kappaleessa on esitelty menetelmiä, joilla hitsauksen lämmöntuontia ja nopeutta voidaan kasvattaa. Pennsylvania State University:n ja University of Wollongong:in tekemissä tutkimuksissa hitsattiin kummassakin päittäishitsillä 5 mm paksua DH 36-terästä. Koehitsausten keskimääräiset lämmöntuonnit on listattu taulukkoon 1. Tandem MAG-hitsauksen tulokset ovat suuntaa antavia eikä niitä voida täysin verrata muihin tuloksiin, koska ne ovat eri tutkimuksesta kuin muut tulokset.

Taulukko 1. Eri hitsausmenetelmien keskimääräinen lämmöntuonti (Michaleris, 2011; Chen, 2013)

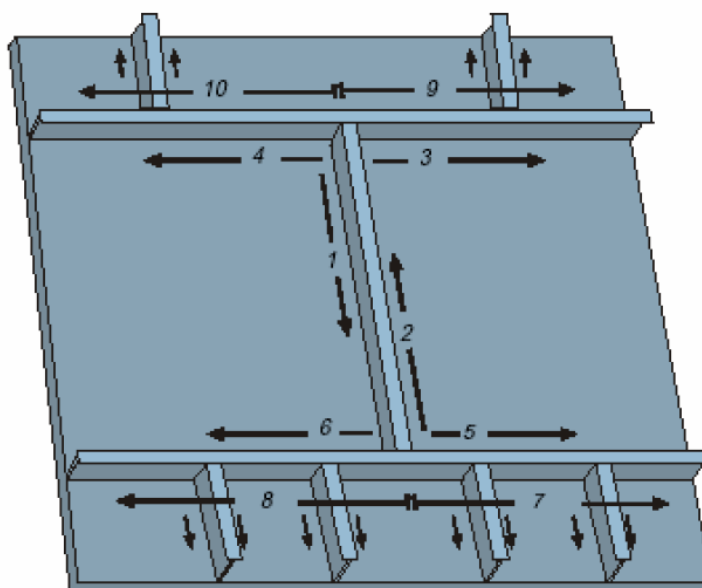
Hitsausmenetelmä	Lämmöntuonti (kJ/mm)	Siirtymä (mm)*
SAW	1,85*	-
GMAW	0,84*	10,0
T-GMAW	0,84**	-
HLAW	0,47*	3,33
LBW	0,22*	1,23

(*Pennsylvania State University, 2011; **University of Wollongong, 2013)

Taulukossa 1 on esitelty lämmöntuonnin lisäksi siirtymäarvot Pennsylvania State University:n tutkimuksessa. Voidaan huomata siirtymän olevan riippuvainen tämän tutkimuksen mukaan lämmöntuonnista. Lämmöntuonnin tuplaaminen aiheuttaa tutkimustulosten mukaan siirtymän kolminkertaistumisen. Kyseessä on lommahduksen ja kulmakiertymän aiheuttama siirtymä. Kuvassa 40 on esitetty kyseisen tutkimuksen tulosten perusteella siirtymä lämmöntuonnin funktiona. Kuvassa on eroteltu siirtymä kulmakiertymään ja lommahdukseen. Lämmöntuonnin minimoiminen edesauttaa siirtymien minimoinnissa, mikä taas vähentää rihtaamisen määrää. Rihtauksen määrän vähentäminen on erityisen tärkeää turhien työvaiheiden välttämiseksi. Tällöin myös rakenteeseen kohdistuvien lämpösyklien määrä vähenee. Jokaisella lämpösyklillä sisäisten jännitysten jakauma muuttuu, mikä on niiden analysoinnin ja ennakoinnin kannalta epäedullista.

Kulmakiertymän minimoimiseksi on ohuempien levyjen hitsauksessa käytetty levyjen esiasettelua ja kiinnitystä. Pienahitsauksessa esiasettelu tarkoittaa levyn esitaivutusta, jossa levy taivutetaan kulmakiertymää vastaan. Näin hitsin jäädyttyä se oikaisee levyn hitsatun jäykisteen kohdalta tuottaen suoremman lopputuloksen. Tätä tekniikkaa voidaan käyttää erityisesti ohuilla materiaaleilla, kun taivutukseen ei tarvitse kohtuuttoman suurta voimaa. Leen & Beardsleyn (2009) muodonmuutosten minimointitekniikoista jäykisteen hitsauksessa on lisäksi kannattavaa hyödyntää määrättyä hitsausjärjestystä. Kuvassa

35 on esitetty esimerkkirakenteen jäykisteiden hitsausjärjestys, jossa pyritään hitsaamaan rakenteen keskeltä reunoja kohti. Näin hitsauksen epätasainen jäähtyminen aiheuttaa mahdollisimman pieniä jäännösjännityksiä.



Kuva 35. Jäykisteiden suositeltu hitsausjärjestys (Hitsauksen teoriaopetus, 2017)

Termisen työstön lisäksi muodonmuutoksia aiheuttaa kappaleiden käsittely, jossa rakenteeseen vaikuttaa omasta massasta johtuen suuriakin voimia. Varsinkin kesken lohkon rakennuksen tapahtuvat nostot ovat riskialttiita muodonmuutosten osalta. Keskeneräisten tuotteiden jäykkyys ja painopiste ovat usein arvoitus eikä näin ollen voida suorittaa varmuudella tasapainotettua nostoa. (Parnell, 2014) Lohkon stabiliteetin kannalta parasta on valmistaa lohko tietyssä asennossa mahdollisimman pitkälle alhaisen lämmöntuonnin omaavalla hitsaustekniikalla, jolloin lohkoa ei kuormiteta liiallisilla sisäisillä ja ulkoisilla kuormituksilla.

5.4 Tuottavuuden kasvattaminen

Jiang, Feng ja Zhu (2015) mainitsevat tuottavuuden kasvattamisessa olevan kaksi tietä kuljettavaksi. Ensimmäinen vaihtoehto keskittyy tuotannon läpimenoajan kiihdyttämiseen laitteiston kehittämisellä ja työvoiman kouluttamisella. Uudet laitteet nopeuttavat yksittäisiä prosesseja itse toteuttamisen kannalta ja työvoiman lisääntynyt osaaminen nopeuttaa manuaalista työtä, kuten koneen suorittaman työn parametrien asettamista. Toinen vaihtoehto tuotannon kasvattamiseen on optimoimalla tuotantocykliä poistamalla siitä arvoa tuottamattomat työvaiheet. (Jiang et al. 2015) Tuotantolinjan kehittäminen ja tuotantomenetelmien uudistaminen keskittyvät ensisijaisesti ensimmäiseen vaihtoehtoon. Uusien tuotantolaitteiden tehtävänä on kasvattaa prosessin läpimenoaika. Uusien laitteiden toimivuuden peruseriaatteena on onnistunut työvoiman koulutus, joka on toinen puolikas ensimmäistä vaihtoehtoa. Myös Pohjola (2009) mainitsee nämä kaksi tekijää

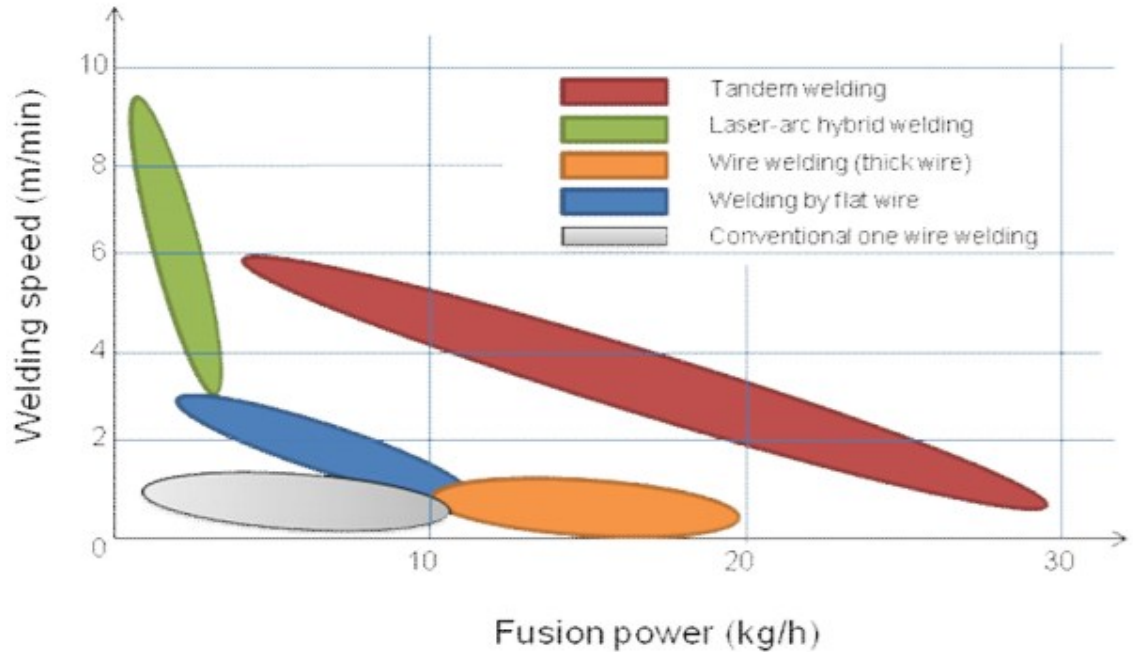
(koulutus ja laiteinvestoinnit) omassa luennossaan. Kolmantena tekijänä Pohjolan luennossa on teknologian kehitys. Teknologian kehitys painottuu uusiin tuotteisiin ja uusiin toimintatapoihin, jotka kumpikin muokkaavat kokonaisprosessia.

Tuottavuuden kasvattamisen kannalta on tärkeää analysoida, mitkä työvaiheet tuottavat Lean:in periaatteen mukaan arvoa lopputuotteeseen, mitkä toiminnot mahdollistavat arvontuoton eli ovat ns. tukitoimintoja ja mitkä toiminnot ovat lopputuotteen kannalta arvoa tuottamattomia eli hukkaa. Toimintoja voidaan analysoida Lean:in mukaisella arvontuotoketjun mallinnuksella sekä juurisyyanalyysillä. Tässä työssä tuottavuuden kasvattamisessa keskitytään terästuotannon prosessien tuottavuuteen ja erityisesti hitsauksen tuottavuuteen.

Arvontuotoketjun mallinnuksessa kaikki toiminnot eritellään ja analysoidaan niiden merkitys lopputuotteen määrittelyn täyttymisen kannalta. Visualisoidun arvontuotoketjun avulla havaitaan kaikki toiminnot, jotka tehdään lopputuotteen valmistumiseksi. Toimintojen merkityksen analysoinnissa voidaan käyttää juurisyyanalyysiä. Juurisyyanalyysin avulla analysoidaan työvaiheita ja miksi kyseinen työvaihe toteutetaan. Mikäli toiminnon syynä on asiakasarvon luominen, on toiminto arvokas tuotannossa. Mikäli kyseinen toiminto on seurausta jostain muusta toiminnosta, analysoidaan, onko se tarpeen arvontuotannon kannalta ja voidaanko edellistä työvaihetta muuttamalla vähentää seuraavan työvaiheen määrää. Syynä voi olla edellisen työvaiheen lopputuloksesta johtuva korjaava työ. Tällöin keskitytään parantamaan alkuperäisen työvaiheen laatua, jotta haluttu lopputulos saataisiin ilman korjaavia toimintoja. (LeanProduction, 2017) Telakkateollisuudessa rungon teräsrakenteiden oikaisutarve on tällainen korjaava työvaihe, joka on seurausta edellisissä työvaiheissa syntyvistä laatueroista. Parantamalla hitsauksen, käsittelyn ja asennuksen laatua voidaan minimoida oikaisun tarve. Hitsausmenetelmän valinnalla voidaan vaikuttaa hitsauksen lämmöntuotannon määrään ja sen laajuuteen. Pienemmällä ja keskitetyimmällä hitsausmenetelmällä tuotetaan pienemmät jäännösjännitykset ja muodonmuutokset. Korjaavan työn tarve näin vähenee tai parhaimmillaan jopa poistuu kokonaan. (Kujanpää et al. 2005) Korjaava työ on usein manuaalista työtä, joka on aikaa vievää ja lopputulokseltaan vaihtelevaa. Tällöin sekundäärisesti saavutetut edut voivat olla merkittävämpiä tuottavuuden kannalta kuin pelkästään hitsausprosessin tuoma tuottavuuden kasvu (Kujanpää et al. 2005).

Hitsausprosessin tuottavuuteen vaikuttaa monia tekijöitä. Hitsauksen tuottavuutta laskeetaan yleisesti hitsatun lisäaineen massa per tunti. Tällainen mittari ei välttämättä ole mielekäs, jos vertaillaan toisistaan merkittävästi poikkeavia hitsausmetodeita. Esimerkiksi Penttilä (2013) mainitsee luennossaan jauhekaarhitsauksen lisäaineen sulamisnopeuden olevan parhaimmillaan 100 kg/h. Tällöin lämmöntuonti on suurta ja hitsauksen lämpövyöhyke on laaja. Laserhitsaus päinvastoin aiheuttaa kapean lämpövyöhykkeen hallitulla lämmöntuonnilla jopa kokonaan ilman lisäainetta. Kuvassa 36 on esitetty viiden hitsausmenetelmän tuottavuuden arvoja kyseisen metodin ominaisen hitsausnopeuden funktiona (Kah, 2011). Hitsausnopeudesta voidaan havaita laser-hybridihitsauksen ja tandem

MAG-hitsauksen olevan läpimenoaikojen kannalta parhaat vaihtoehdot hitsauksen tuottavuuden kasvattamiseen. Kuvan 36 tuloksissa ei oteta kuitenkaan suoraan huomioon hitsauksen muita tekijöitä ja se rajoittuu ainoastaan hitsausprosessiin. Myös hitsausolosuhteet oletetaan kyseiselle menetelmälle optimaaliseksi, joten esikäsittelyprosessi on voinut viedä suuren osan kokonaisajasta. Taulukkoon 2 on koottu skaalaa tyypillisestä lisäaineen kulutuksesta muutamilla hitsaustekniikoilla.



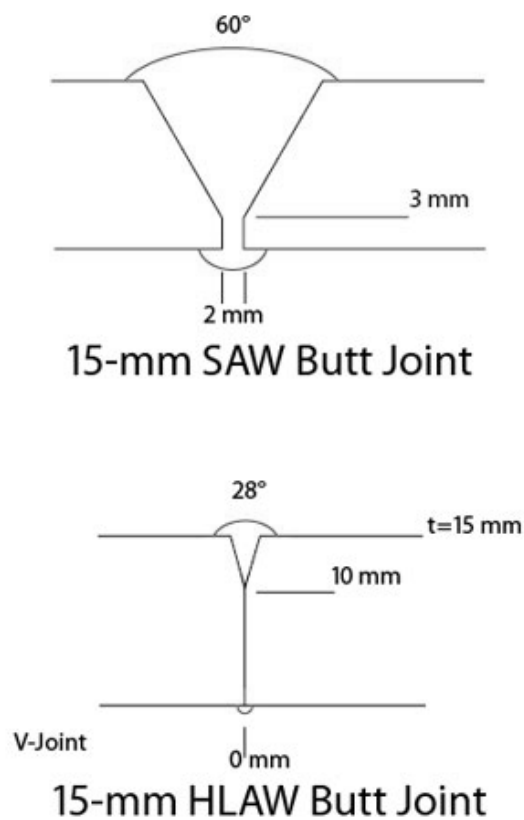
Kuva 36. Eri hitsausmenetelmien lisäaineentuotto suhteutettuna hitsausnopeuteen (Kah, 2011)

Taulukko 2. Lisäaineentuotto eri hitsausmenetelmissä (ESAB:in osaamiskeskus, 2017; Kah, 2011; DebRoy et al. 2012)

Hitsausmenetelmä	Lisäaineentuotto (kg/h)
SAW	6-12
MAG/MIG	3-9
T-GMAW	12-18
HLAW	2-4

Mikäli laskentatapana on laskea pelkästään hitsauksen tuottavuus, laser-hybridihitsauksen suora tuottavuus verrattuna muihin hitsausmetodeihin on verrattain matala johtuen

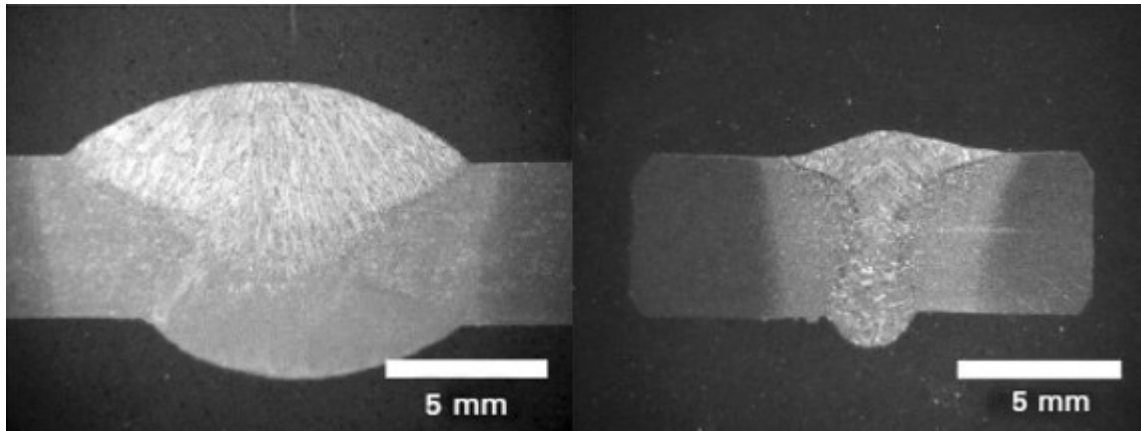
hitsisauman poikkipinnan pienestä alasta. Laser-hybridihitsauksen tuottama hitsipalko on kapea verrattuna kaarihitsauksen hitsipalkoon (kuvat 37 & 38). Hansen (2013) on artikkelissaan esittänyt 15 mm paksun päittäishitsin railon poikkileikkaukset jauhekaarihitsauksessa ja laser-hybridihitsauksessa. Jauhekaarihitsauksen levyjen välinen poikkileikkauksala on 113 mm^2 . Vastaavasti laser-hybridihitsausta varten valmistetun railon poikkileikkauksala on 6.25 mm^2 . Railontilavuuden perusteella laskettu lisäaineen määrä vähenee laser-hybridihitsaukseen siirryttäessä noin 95 %. Tuottavuutta voidaan laskea monella tavalla, joten lisäaineen kulutus hitsausmetriä kohden on ylivoimainen laser-hybridihitsauksessa verrattuna jauhekaarihitsaukseen. Myös hitsausnopeudella mitattuna laser-hybridihitsaus on monikertaisesti tuottavampaa jauhekaarihitsaukseen ja moniin muihin hitsausmenetelmiin verrattuna.



Kuva 37. Jauhekaarihitsausta ja laser-hybridihitsausta varten tehdyt railot (Hansen, 2013)

Kuvassa 38 on esitetty poikkileikkaukset jauhekaarihitsauksella ja laser-hybridihitsauksella hitsatusta hitsipalosta. Hitsauslisäaineen määrä on huomattavasti suurempi jauhekaarihitsauksessa kuin laser-hybridihitsauksessa. Suuri hitsisauma tarkoittaa suurta lämmöntuontia ja laajaa lämpövyöhykettä. Nämä ovat juurisyitä suurille jäännösjännityksille ja muodonmuutoksille. Tällöin syntyy tarve resursseja vievälle oikaisulle. Hitsauksen

lopputuloksen laatua parantamalla voidaan vaikuttaa merkittävästi koko tuotannon läpimenoaikaan ja tuottavuuteen, koska oikaisuun käytetty aika ei tuo lisäarvoa tuotteeseen. (Kujanpää et al. 2005)



Kuva 38. Jauhekaarihitsauksen hitsisauman profiili (vasen) verrattuna laser-hybridihitsauksen hitsisauman profiiliin (oikea) (Michaleris, 2011)

Tuottavuuden kasvattaminen ei tapahdu suoraviivaisesti pelkästään yksittäisen prosessin nopeutta kasvattamalla. Kokonaistuotannossa on otettava huomioon kaikki tekijät, jotka vaikuttavat tuotannon läpimenoaikaan. Esimerkiksi esityöstö, asetusajat ja jälkityöstö on otettava huomioon kokonaistuottavuutta kasvattaessa. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli saavutetaan prosessinopeudeltaan nopeampi hitsausmenetelmä, jossa korjaamisen ja esityöstön tarve on entistä vähäisempää, voidaan kasvattaa tuottavuutta huomattavasti. Toisaalta ylivoimaisen nopekaan prosessi ei tuo tuottavuuden kasvua, mikäli muun työstön määrä kasvaa.

5.5 Tuotantovaihtoehtojen kustannuslaskenta

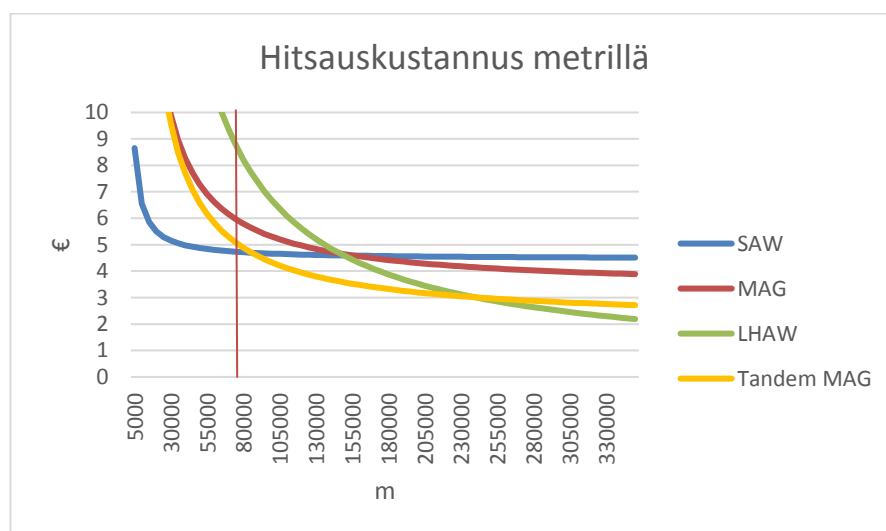
Liitteessä B on esitetty jauhekaarihitsauksen, MIG/MAG-hitsauksen, tandem MAG-hitsauksen, laserhitsauksen ja laser-hybridihitsauksen kustannuslaskennat. Jauhekaarihitsauksen osalta on laskettu ainoastaan päittäishitsin kustannukset. Muista menetelmistä on arvioitu myös jäykisteiden pienahitsin aiheuttamat kustannukset. Uusista tuotantolaitteista on saatu hankintakustannukset sekä asennuskustannukset tarjouksista, valmistajien tekemistä kustannusarvioista sekä kirjallisuudesta. Tuotantomenetelmien kustannuksissa on otettu huomioon vain tulevat kustannukset eli nykyistä tuotantomenetelmistä päittäishitsauksen jauhekaarihitsaus- ja profiilien MAG-hitsauslaitteistojen muuttuvat kustannukset ovat merkitseviä.

Kustannuksissa on otettu huomioon alkuinvestoinnin lisäksi työvoiman, lisäaineen, energian, suojakaasun ja kulutusosien kustannukset. Alkuinvestoinnit sisältävät kyseisen laitteen kokonaisuuden lisäksi esityöstön laitteiston. Tällöin saadaan vertailukelpoisiksi eri tuotantomenetelmät, joissa osassa esityöstö on integroitu uusiin laitteisiin. Lasertyöstölaitteissa levyn reunat viistetään integroidulla jyrsimellä.

Laitteiden investointikustannukset on listattu liitteeseen B. Selkeästi suurin investointikustannus on laser-hybridihitsauslaitteistoilla ja toiseksi suurin lähes samaa hintaluokkaa on laserhitsauslaitteistot. MAG- ja tandem MAG-hitsauslaitteiden investointikustannukset ovat 1 – 2 miljoonan euron välillä. Matalat muuttuvat kustannukset tekevät kalliistakin investoinnista houkuttelevan. Muuttuvien kustannusten erotuksen avulla on helppo laskea uuden tuotantomenetelmän tuomat säästöt, kun tuotantomäärä pysyy samana. Liitteessä B onkin laskettu jokaisen uuden tuotantovaihtoehdon tuomat säästöt tai lisäkustannukset vuodessa niin poistoajalla kuin poistoajan jälkeenkin. Poistoajaksi on määritetty 10 vuotta. Laskelmissa ei ole huomioitu tietyn työvaiheen vaikutusta muihin kustannuksiin. Yksittäisen työvaiheen muutoksen tuomien säästöjen lisäksi tulee huomioida sekundaariset säästöt muissa työvaiheissa sekä kapasiteetin kasvun tuomat lisätulot.

Laskelmista voidaan huomata, että profiilien tandemhitsausasemaa lukuun ottamatta kaikki tuotantomenetelmät ovat tappiollisia poistoajalla, kun tarkastellaan ainoastaan tietyn prosessin aiheuttamat kustannukset nykyisellä tuotantomäärällä. Laskelmissa on laskettu myös kapasiteetin muutoksen vaikutukset säästöjen kautta. Täytyy kuitenkin huomioida, että säästöjen kautta laskeminen on suuntaa antava, koska nykyisellä tuotantomenetelmällä ei päästä kyseiseen kapasiteettiin. Todellisuudessa takaisinmaksuaika voi olla lyhyempi, kun alhaisilla muuttuvilla kustannuksilla voidaan ansaita enemmän voittoa.

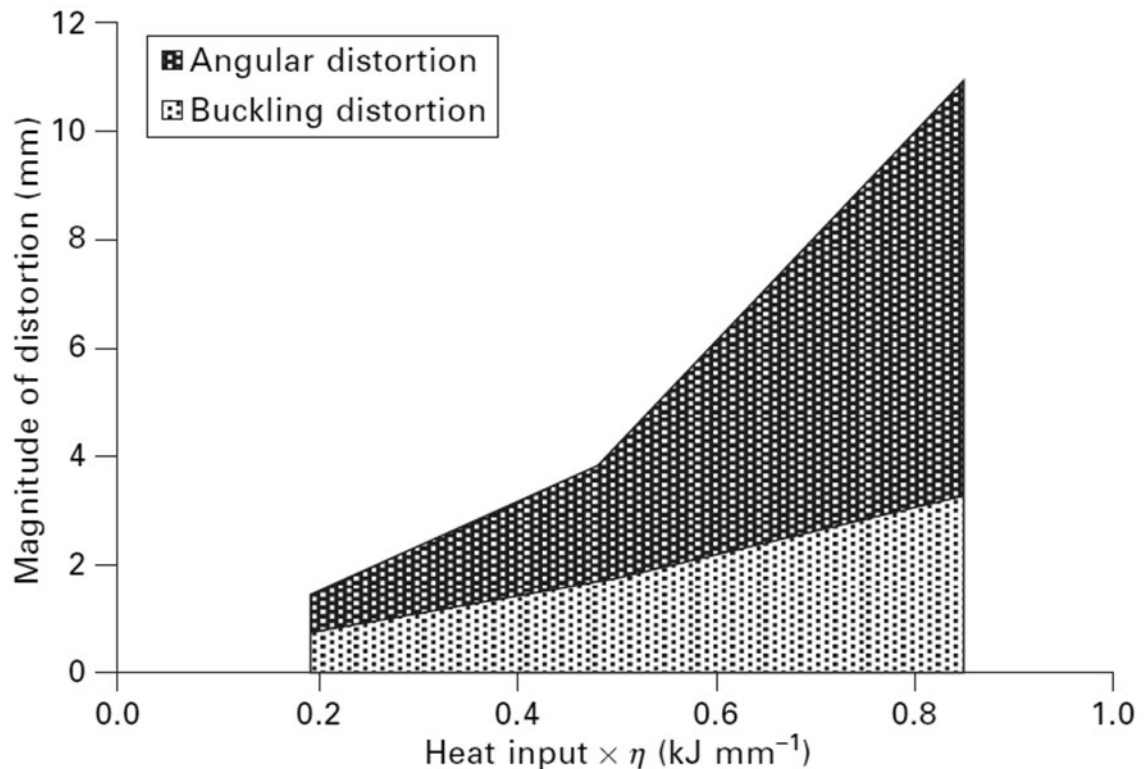
Kuvassa 39 on esitetty yhdeltä puolen hitsauksen kustannukset metriltä. Kustannuksissa on huomioitu kiinteät kustannukset ja muuttuvat kustannukset. Säästöjen kautta laskettuna kapasiteetin kaksinkertaistaminen tekee kaikista uusista tuotantomenetelmistä edullisemman kuin nykyinen jauhekaarihitsaus. Mikäli kapasiteetti pystytään kolminkertaistamaan, on laser-hybridihitsaus kaikkein edullisin vaihtoehto. Laserhitsausta ei ole huomioitu kyseisissä laskelmissa sen vaatiman korkean esityöstöasteen takia. Pystyviivalla kuvassa on merkattu laskennallinen nykyinen kapasiteetti.



Kuva 39. Yhdeltä puolen hitsauksen kustannukset per metri

6. TUOTANTOVAIHTOEHTOJEN VERTAILU

Tämän diplomityön pääpainon ollessa tuotantolinjalla tapahtuvassa hitsauksessa, keskitytään tuotantomenetelmien vertailussa pääasiassa hitsauslaatuun ja tarkemmin jäännösjännitysten ja muodonmuutosten laajuuteen ja muotoon. Aiemmin työssä on esitetty menetelmiä jäännösjännitysten ja muodonmuutosten vähentämiseksi. Erityisesti lämmöntonni määrä vaikuttaa jännitysten ja muodonmuutosten suuruuteen. Kuvassa 40 on esitetty Pennsylvania State University:n tekemän tutkimuksen tulokset. Kuvasta voidaan huomata sekä kulmakiertymän että lommahdusmuodonmuutoksen suuruuden kasvavan lämmöntonni kasvaessa (Michaleris, 2011). Tutkimuksessa on kuitenkin testattu eri hitsausmenetelmiä, joten tämän tutkimuksen perusteella ei voida tehdä suoraa johtopäätöstä lämmöntonni ja muodonmuutosten välille. Osasy muodonmuutosten suuruuteen voi olla myös hitsisauman poikkipinnan poikkeava geometria. Niemi (1993) esittelee kaavoissa (1) / (2) ja (3) eteenkin pituussuuntaisen jäännösjännityksen olevan suoraan riippuvainen hitsausprosessissa tuodusta lämmöstä ja poikkileikkausalasta. Kappaleessa 5.3 viitattiin Michaleris:in (2011) tekstiin, jossa mainittiin hitsauksen vaativan energiaa $10^5 - 10^7 \text{ kW/cm}^2$. Kun hitsausmenetelmän tehoitehyys on pieni, voidaan kyseinen lämpöenergia tuoda keskitetympin ja muodostaan näin kapeampi lämpövyöhyke, jolloin jäähtymisen aiheuttama kutistava voima on pienempi.



Kuva 40. Muodonmuutosten suuruuden riippuvuus lämmöntonniin (Michaleris, 2011)

Kappaleessa 5 esitellyistä tuotantomenetelmistä alhaisimman lämmöntuonin ja pienimmän hitsisauman poikkipinnan tuottaa laserhitsaus. Toiseksi kummassakin kategoriassa tulee laser-hybridihitsaus. Perinteisistä kaarihitsausmenetelmistä tandem MAG-hitsaus suurentuneen hitsausnopeuden ansiosta tuo hitsauksessa MIG/MAG-hitsausta vähemmän lämpöenergiaa. Jauhekaarihitsauksessa tuodaan huomattavasti enemmän lämpöenergiaa kuin muissa hitsausmenetelmissä ja tästä syystä aiheuttaa suurimmat jäännösjännitykset ja muodonmuutokset.

Saman sauman hitsaaminen eri menetelmillä aiheuttaa rakenteeseen eri suuruisia sisäisiä jännityksiä. Kaavalla (1) voidaan laskea lämmöntuonin perusteella hitsin pitkittäinen voima. Taulukossa 1 on esitelty eräissä tutkimuksissa mitatut lämmöntuonnit eri hitsausmenetelmillä. Tuloksista voidaan huomata, että jauhekaarihitsauksen hitsisauman jäähtyminen aiheuttaa 370 kN suuruisen puristusvoiman laser-hybridihitsauksen hitsisauman aiheuttaessa ainoastaan 94 kN puristusvoiman jäähtyessään. Hitsausmenetelmän muuttaminen ei muuta hitsisauman efektiivistä mitta, mutta sen aiheuttama puristusvoima pienenee jopa 75 %.

Tuotantomenetelmiin vaikuttaa moni muukin tekijä kuin vain mahdollisimman alhainen lämmöntuonti. Esimerkiksi laserhitsauksen vaatima esityöstö voi raskaassa teollisuudessa tuottaa enemmän työtä ja kustannuksia kuin perinteiset kaarihitsausmenetelmät tiukkojen ilmarakotoleranssien takia. Laserhitsauksen pieni lämmöntuonti voi olla myös heikkous, kun tarkastellaan rakenteen mikrorakennetta. Alhaisen lämmöntuonin johdosta hitsisauma jäähtyy nopeammin, jolloin martensiitin syntyminen lämpövyöhykkeelle on todennäköisempää. Kaarihitsausmenetelmissä lämmöntuonti taas on korkea, mikä aiheuttaa suuria jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia. Sen sijaan laser-hybridihitsauksen lämmöntuonti on alhainen, mutta prosessiin kuuluvan MAG-hitsauksen ansiosta sauman jäähtyminen optimaalista suosiollisen ferriittisen mikrorakenteen muodostumiselle. Kaarihitsauksella suoritettussa päittäishitsauksessa levyjen reunat on viistettävä tarkoin, jotta saavutetaan tasalaatuinen hitsisauma ilman huokoisuutta. Laser-hybridihitsauksessa päittäishitsi vaatii vain pienen railon laserin syvätunkeuman johdosta ja toleranssi ilmaraoille on kaarihitsauksen tasolla.

Hitsauksen jälkityöstön kannalta alhainen lämmöntuonti ja tasainen hitsisauma ovat tärkeimpiä tekijöitä uuden hitsausmenetelmän valinnassa. Alhaisella lämmöntuonnilla rakenteen sisäiset jäännösjännitykset jäävät pieniksi, jolloin vaara jännitysten laukeamiselle jälkityöstössä on pienempi. Jäännösjännitysten aiheuttamat muodonmuutokset ovat myös pienempiä alhaisella lämmöntuonnilla. Tällöin aikaa ja resursseja vievän rihtauksen osuus kokonaistuotannosta on pienempi. Roland ym. (2004), Kah (2011) ja Remes (2003) ovat tutkineet laser-hybridihitsauksen vaikutusta runkotuotantoon. Kah mainitsee runkotuotannon läpimenoajan pienenevän jopa 40 % laser-hybridihitsauksen siirtymisen myötä. Roland ym. mukaan jopa 30 % runkotuotannon kustannuksista koostuu rihtaamisesta, mikä voidaan korjata tuotannon laatuun ja muodonmuutoksiin vaikuttamalla. Entistä ohuemmista materiaaleista valmistettujen rakenteiden osalta väsymiskestävyys tulee

entistä suurempaan rooliin, kun voimien energiaa sitovaa rakennetta on vähemmän. Remksen tutkimusten mukaan laser-hybridihitsauksen hitsisauman väsymiskestävyys on 30 % suurempi kuin kaarihitsauksen tuottaman hitsisauman.

Jäykisteiden pienahitsauksessa on lämmöntuonnin lisäksi huomioitava myös hitsausjärjestys. Keskeltä reunoille kohdistuva hitsausjärjestys päästää rakenteiden vapaat päät lämpölaajenemaan vapaasti, jolloin niissä ei tapahdu pakkosiirtymää toisen rakenteen laajetessa enemmän kuin toisen. MAG-hitsauksella nykytilanteessa hitsataan pitkiä hitsejä neljällä hitsauspäällä. Markkinoilla olevalla tandem MAG-hitsauslaitteistolla hitsataan myös neljällä hitsauspäällä kahdelta puolelta. Näillä voidaan aloittaa hitsaus keskeltä ja hitsata reunoja kohden. Tandem MAG-hitsauslaitteiden etuna on nopean prosessinopeuden ja hitsauslisäaineen pulssimaisen syötön ansiosta saavutettu alhainen lämmöntuonti.

6.1 Tuottavuuden vertailu

Laskelmien mukaan (Liite B) nykyiset tuotantomenetelmät ovat huomattavasti hitaampia kuin vertailuun valitut tuotantomenetelmät. Tuottavuuden laskennassa on otettu prosessinopeuden lisäksi huomioon asetusaika, joka on määritetty olevan viisi minuuttia jokaisella tuotantomenetelmällä. Laskennoissa ei oteta huomioon jälkityöstön vaikutusta tuottavuuteen, mutta edellisen kappaleen perusteella voidaan arvioida korjaustarpeen olevan sitä pienempi mitä alhaisempi lämmöntuonti menetelmällä on.

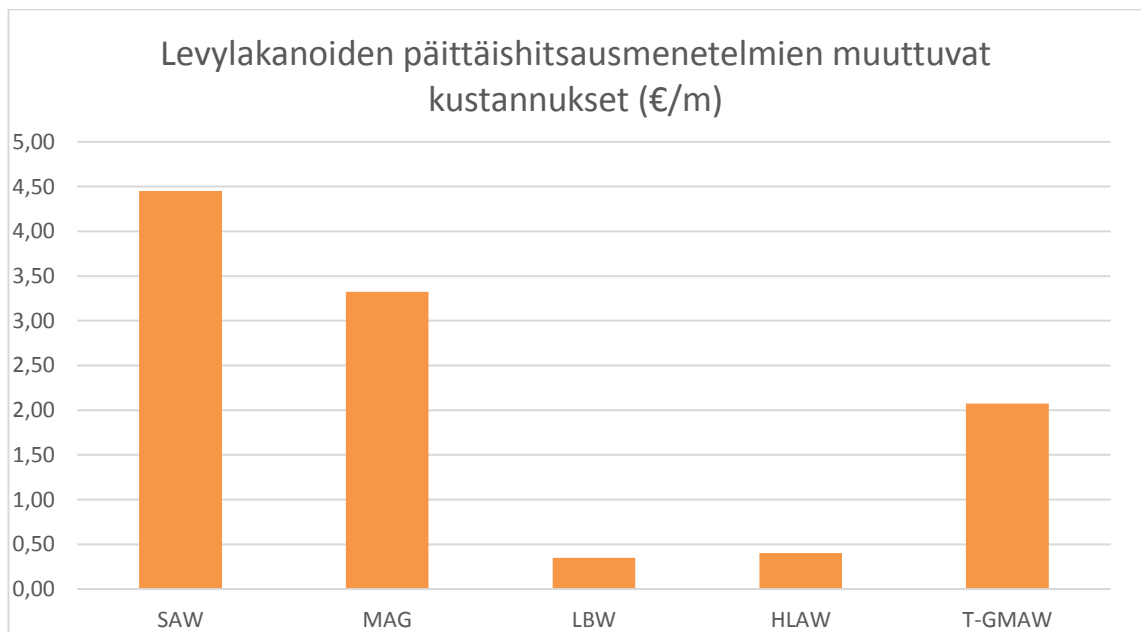
Tahtiajan perusteella jauhekaarihitsauksella suoritettu päittäishitsaus on huomattavasti tuottamattomampaa kuin muilla tuotantomenetelmillä. 12 metrin sauman valmistamiseen menee aikaa 31 minuuttia 40 sekuntia. MAG-hitsauksen arvioitu aika samalle saumalle on noin 26 minuuttia. Lasermenetelmällä hitsaaminen vie 7 minuuttia 24 sekuntia ja tandem MAG-hitsauksella 13 minuuttia. Tuotannon käytettävyys on mielletty 90 %:ksi ja vuosituotannon jauhekaarihitsauksen 100 % tasolla. Laser- ja laser-hybridihitsauksen käyttösuhte on samalla vuosituotantomäärällä vain 23 %. Tandem MAG:illa käyttösuhte on 41 % ja MAG:illa 83 %. Lasertyöstömenetelmiin siirtyminen tarkoittaisi hitsausasemien kapasiteetin huomattavaa kasvua. Vuosituotanto voitaisiin nostaa nelinkertaiseksi, kunhan vain muu organisaatio pystyy vastaamaan runkotuotannon tuottavuuden kehitykseen.

Juuri tuottavuuden kasvun ansiosta saavutettu kapasiteetin kasvu on muodonmuutosten minimoinnin lisäksi yksi tärkeimmistä tekijöistä, joita saavutetaan tuotantomenetelmän modernisoinnilla. Kun kapasiteettia voidaan kasvattaa ja jälkityöstöä vähentää, voidaan tuottamattoman työn suorittamisesta irtaannuttaa resursseja tuottavan työn suorittamiseen. Tällöin samalla henkilökustannuksella voidaan saavuttaa enemmän voittoa. Tuottavuuden maksimointiin tarvitaan siis useita eri tekijöitä, jotka liittyvät toisiinsa.

6.2 Kustannusten vertailu

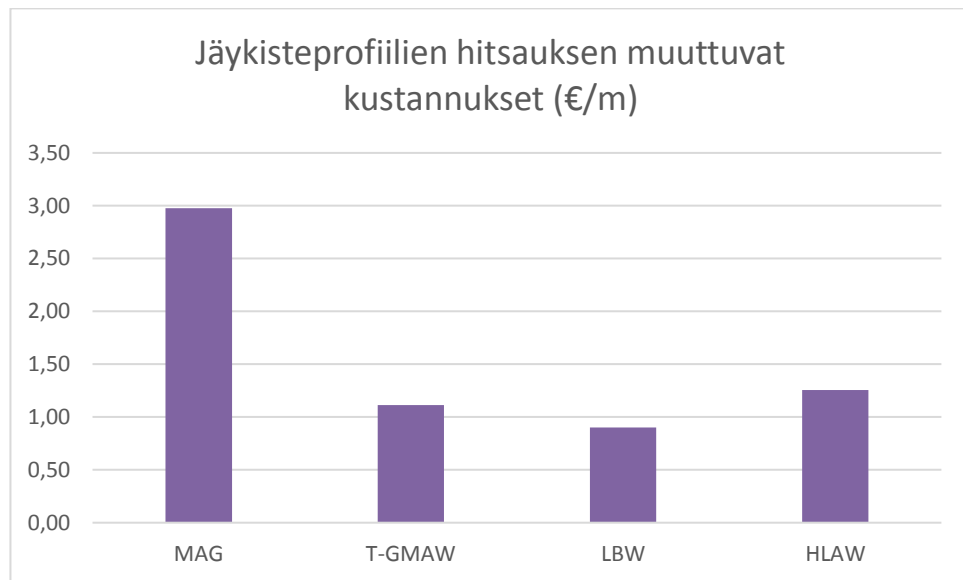
Laserhitsauslaitteisto sekä siihen liittyvät oheislaitteet yhteensä muodostavat suuren menoerän, joka näkyy liitteessä B kohdassa ”kiinteät kustannukset”. Myös muut uudet tuotantomenetelmät aiheuttavat suuria investointeja. Kuitenkin nämä kustannukset jäävät huomattavasti pienemmiksi kuin laserhitsauksen investoinnista aiheutuneet kustannukset. Tuotantomenetelmien kustannuksia ei olekaan mielekästä vertailla ainoastaan investointikustannusten näkökulmasta vaan on otettava huomioon myös muuttuvat kustannukset, jotka muodostavat tulevaisuuden kustannukset. Muuttuvat kustannukset koostuvat työvoimasta, lisäaineen kulutuksesta, suojakaasun kulutuksesta, sähköenergiasta, kulutusosista jne. Myös esikäsitteilyn tarve ja jälkityöstö ovat syytä ottaa huomioon tarkastellessa tuotantomenetelmien kustannuksia. Jälkityöstön tarve on käsitelty aiemmin tässä työssä.

Muuttuvien kustannusten osalta laserprosessit ovat ylivoimaisella tasolla. Laserhitsauksen tuntikustannus on 34,08 € ja laser-hybridihitsauksen tuntikustannus on 38,99 €. MAG-yksilankahitsauksen kustannus on 91,79 €/h ja tandem MAG:in kustannus on 101,21 €/h. Kuitenkaan ei ole mielekästä mitata kustannuksia per tunti, koska prosessinopeus poikkeaa suurestikin hitsausmenetelmien välillä. Prosessinopeudet huomioon ottaen saadaan kustannukset per hitsattu metri. Eri hitsausmenetelmien kustannukset päittäishitsien osalta on koottu kuvaan 41. Kaarihitsauksen kustannukset ovat moninkertaiset verrattuna laserprosessien kustannuksiin. Laserhitsauksen ja laser-hybridihitsauksen kustannukset eivät eroa suuresti toisistaan. Laserhitsauksen kustannus metriä kohden on 0,35 € ja laser-hybridihitsauksen kustannus on 0,40 €/m. Laserhitsauslaitteiden henkilökustannukset ovat alhaiset mm. integroidun levynreunan jyräintälaitteen ansiosta.



Kuva 41. Levylakanoiden päittäishitsausmenetelmien muuttuvat kustannukset metriä kohden

Jäykisteprofiilien pienahitsauksen metrikustannukset on esitetty kuvassa 42. Nykyisen prosessin kustannukset ovat kalliit lähinnä hitaan hitsausnopeuden johdosta. Uusien hitsausmenetelmien kokonaishitsausnopeus on huomattavasti suurempi prosessin nopeuden tai hitsauspäiden lukumäärän ansiosta. MAG-hitsauksessa käytetään neljää hitsauspäätä hitsatessa molemmin puolin jäykistettä samaan aikaan. Laskennoissa on laskettu tandem MAG-hitsauksen osalta neljällä hitsauspäällä ja laserprosessien osalta yhdellä hitsauspäällä.



Kuva 42. Jäykisteprofiilien hitsauksen muuttuvat kustannukset metriä kohden

6.3 Hitsausmenetelmien vertailu painoarvotaulukoin

Eri hitsausmenetelmiä vertaillaan painoarvotaulukoiden avulla, jotta voidaan vertailla eri menetelmiä ottaen huomioon eri kriteerit, jotka vaikuttavat investointiin ja tuotosten laatuun. Kriteereiksi on valittu rakenteellisista tekijöistä hitsauksen aiheuttamat muodonmuutokset, hitsauksen aiheuttama jälkityöstön ja esityöstön tarve sekä hitsin ja lämpövyöhykkeen mikrorakenne. Jäykisteprofiilien pienahitsauksessa on otettu huomioon myös hitsin poikkeava geometria, joka vaikuttaa hitsauksen suunnitteluun. Muista tekijöistä on otettu huomioon tuotantovaihtoehtojen tuottavuus, joustavuus, investoinnin kustannukset ja tuotantovaihtoehdon muuttuvat kustannukset, jotka on arvioitu liitteessä B.

Taulukoissa 3 ja 4 hitsausvaihtoehdot on pisteytetty paremmuusjärjestykseen vaihtoehtojen lukumäärän mukaan. Taulukossa 3 päittäishitsin osalta pisteet ovat 1-5 viiden vaihtoehdon mukaan ja taulukossa 4 pienahitsauksen pisteet ovat 1-4 neljän vaihtoehdon mukaan. Suurin numero on paras ja pienin on huonoin. Taulukosta 3 voidaan huomata, että parhaiten levyalkanoiden päittäishitsaukseen soveltuva hitsausmenetelmä on laser-hybridihitsaus, joka yhdistää alhaiset muodonmuutokset, korkean tuottavuuden, alhaiset toimintakustannukset ja on vaihtoehdoista joustavin hitsausmenetelmä. Laser-hybridihitsauksen ainoa heikko kriteeri on investointikustannus, joka on tuotantovaihtoehdoista

korkein. Laser-hybridihitsauksen pisteytys on tasaisesti kahden parhaan vaihtoehdon joukossa kaikissa kategorioissa paitsi investointikustannusten osalta. Tämä osoittaa prosessin olevan muodonmuutosten, muun työn määrän, muuttuvien kustannusten ja tuottavuuden perusteella erinomainen vaihtoehto. Jauhekaarihitsaus sen sijaan osoittautui mm. tuottavuuden, kannattavuuden ja muodonmuutosten osalta huonoimmaksi vaihtoehdoksi. Jauhekaarihitsauksen hitaasta prosessinopeudesta, suuresta lämmöntuonnista ja siitä johtuvasta laajasta lämpövyöhykkeestä johtuen on se suositeltava korvata tehokkaammalla menetelmällä.

Taulukko 3. *Levyjakanoiden päittäishitsauksen hitsausmenetelmien painoarvotaulukko*

	SAW*	MAG	LBW	HLAW	T-GMAW
Muodonmuutokset	1	2	5	4	3
Tuottavuus	1	2	5	4	3
Joustavuus	1	3	2	5	4
Jälkityöstö	1	2	5	4	3
Esityöstö	2	3	1	5	4
Investointikustannukset	5	4	2	1	3
Muuttuvat kustannukset	1	2	5	4	3
Hitsin mikrorakenne	2	3	1	5	4
Yhteensä	14	21	26	32	27

*Nykyinen hitsausmenetelmä

Taulukossa 4 on vertailtu jäykisteprofilien pienahitsauksen hitsausmenetelmiä. Nykyinen menetelmä (MAG-hitsaus) valituista menetelmistä osoittautuu painoarvotaulukon mukaan huonoimmaksi vaihtoehdoksi. Parhaaksi hitsausvaihtoehdoksi osoittautuu tandem MAG-hitsaus. Tandem MAG-hitsauksen investointikustannukset ovat uusista hitsausmenetelmistä alhaisimmat. Myös muuttuvat kustannukset hitsausmetriä kohden ovat suuren tuottavuuden ansiosta alhaiset. Tandem MAG-hitsauksen korkeimman tuottavuuden ansiosta sopii myös yhteen päittäishitsauksen laser-hybridihitsauksen kanssa. Jotta korkeammasta tuottavuudesta saataisiin mahdollisimman suuri hyöty irti, on koko tuotantolinjan tuottavuus oltava mahdollisimman korkea.

Taulukko 4. Jäykisteprofilien pienahitsauksen hitsausmenetelmien painoarvotaulukko

	MAG*	T-GMAW	LBW	HLAW
Muodonmuutokset	1	2	4	3
Tuottavuus	1	4	2	3
Joustavuus	2	3	1	4
Jälkityöstö	1	2	4	3
Esityöstö	4	4	4	4
Investointikustannukset	4	3	2	1
Muuttuvat kustannukset	1	3	4	2
Hitsin mikrorakenne	2	3	1	4
Vaikutus suunnitteluun	4	4	2	2
Yhteensä	20	28	24	26

*Nykyinen hitsausmenetelmä

Painoarvotaulukoissa pisteytys on suoritettu tutkimuksen tekijän toimesta. Pisteytyksessä on otettu huomioon kustannuslaskelmat, jossa on laskettu myös tuottavuutta, prosessien vaatimat toleranssit, prosessin lämmöntuonti, joka vaikuttaa muodonmuutoksiin ja jälkityöstöön sekä menetelmän monikäyttöisyys ja kyky hitsata eri materiaaleja ja eri materiaalivahvuuksia.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA

Uuden tuotantolinjan konsepti sisältää painoarvotaulukoiden avulla valitut levytakanoiden yhdeltä puolen päittäishitsaukseen laser-hybridihitsausaseman sekä jäykisteprofiilien pienahitsaukseen tandem MAG-hitsausaseman. Loimaalainen hitsausasemia valmistava Pemamek on vuosien 2013-2016 aikana toimittanut laser-hybridihitsausasemat Fincantierin Monfalconen telakalle, STX Ranskan telakalle ja Irving:in Halifax:in telakalle. Irving:iin toimitettu tuotantolinja sisältää myös jäykisteprofiilien tandem MAG-hitsausaseman sekä hitsausrobotteja. STX Ranskan telakalla uuden terästuotantolinjan hankintaa perustellaan parantuneella hitsauslaadulla ja tätä kautta vähentyneellä uudelleentyöstöllä. Tuottavuuden kasvu on myös mahdollistanut kapasiteetin merkittävän kasvun. Irving:in perustelut uuden tuotantolinjan hankinnalle ovat tehokas ja turvallinen toteutus Kanadan kuninkaallisen laivaston tuleville Harry DeWolf-luokan aluksille. (Pema Welding Automation, 2017) Ensimmäinen tämän luokan alus on arvioitu toimitettavan vuonna 2018 (Royal Canadian Navy, 2017). Irving:in uutta tuotantolinjaa mainostetaan Pohjois-Amerikan kehittyneimpänä ja innovatiivisimpana tasopaneelilinjana.

Kaikkien edellä mainittujen telakoiden (Fincantieri Monfalcone, Halifax Irving ja STX Ranska) tuoteportfoliot vastaavat suurelta osin Rauma Marine Constructions Oy:n tuoteportfoliota. Irving tekee sota-aluksia, rannikkovartioaluksia ja jääkelpoisia aluksia. Fincantieri rakentaa mm. autolauttoja, matkustajalauttoja, risteilijöitä ja sota-aluksia. STX Ranskan tuoteportfolion vastaa suurelta osin Fincantieri:n tuoteportfoliota. STX Ranska rakentaa lisäksi tutkimusaluksia. Tuoteportfolioiden samankaltaisuudet puolesta puhuvat laser-hybridihitsauksen toteuttamista Rauma Marine Constructions Oy:n terästuotannossa.

Uuden tuotantolinjan konseptin merkittävin parannus on levytakanoiden yhdeltä puolen hitsauksessa syntyvien jäännösjännitysten minimointi. Jauhekaarihitsauksella toteutetun hitsisauman aiheuttaessa 370 kN suuruisen puristavan voiman per hitsisauma, aiheuttaa laser-hybridihitsauksella hitsattu hitsisauma ainoastaan 94 kN suuruisen puristusvoiman kutistuessaan. Puristava voima laskee 75 % hitsausmenetelmän vaihduttua keskitetympään ja tehokkaampaan lämmöntuontiin. Jäännösjännitysten minimointi minimoi myös muodonmuutokset. Juuri jäännösjännitysten ja muodonmuutosten minimointi on tämän työn tarkoitus. Laser-hybridihitsaus on parasta toteuttaa kuitulaserilla, joka tarpeen mukaan on yksinkertaista skaalata suhteellisen pienin investoinnein. Diodipakkojen määrällä voidaan muuttaa laserin tehoa. Kuitulaserin käyttö mahdollistaa tulevaisuudessa option laserin käytön myös muissa sovelluksissa kuitulaserin jakamismahdollisuudesta johtuen. Kuitulaserissa polttopisteen koko on muihin laserimenetelmiin verrattuna pieni johtuen kuidun kapeasta poikkileikkauksesta. Pienen polttopisteen ansiosta lämmöntuonti on en-

tistä keskitetympää ja alhaisempaa. Laser-hybridihitsauksen suorituskyky vastaa vaadittua suorituskykyä levyn paksuuden osalta. Laser-hybridihitsauksella kyetään yhdellä palolla hitsaamaan 4 – 25 mm paksuja levyjä päittäishitsauksella. Paksumpien levyjen päittäishitsejä voidaan hitsata useammalla hitsipalolla.

Tandem MAG-hitsauksen edut terästuotantoon ovat nousevan prosessinopeuden johdosta kokonaisläpimenoajan pieneneminen sekä pulsseina tapahtuvan lisääaineensyötön kautta alentunut lämmöntuonti. Tandem MAG-hitsauslaitteiston avulla voidaan myös toteuttaa Leen & Beardsleyn (2009) mainitsevat kappaleiden esitaivutus sekä hitsausjärjestys, joka suoritetaan kappaleen keskeltä reunoja kohden. Tandem MAG-hitsauslaitteisiin voidaan siis yhdistää laitteita ja tekniikoita, joilla minimoidaan muodonmuutoksia.

Jotta muu osa tuotantolinjasta pystyy vastaamaan laser-hybrid- ja tandem MAG-hitsauksen tuomaan tuottavuuden kasvuun sekä ylläpitämään jäännösjännitysten ja muodonmuutosten alhaista tasoa, on suositeltavaa siirtyä tuotantolinjassa robottihitsaukseen suuremmassa mittakaavassa. Avointen rakenteiden (laipiot ja väliseinät) robottihitsausyksikkö tuo tuotantolinjaan tuottavuutta ja korkeaa laatua säilyttäen edelleen joustavuuden. Pemamek, joka valmistaa laser-hybrid- ja tandem MAG-hitsauslaitteistoja, tuottaa myös robottihitsauslaitteistoja yhteistyökumppaninsa Yaskawa:n kanssa. Hitsausrobotti pystyy hitsaamaan tasaista saumaa 3,5 metrin korkeuteen. Keskenräisten lohkojen käsittelyjen minimoinniksi robottihitsaus tulisi optimaaliseen väliin jäykisteprofiilien hitsauksen jälkeen. Tuotantolinjalla lohkonvalmistus toteutuisi pitemmälle valmiusasteelle, jolloin käsiteltävät rakenteet olisivat jäykempiä ja kestäisivät käsittelyn paremmin.

Sama valmistaja, Pemamek, valmistaa rakenteiden käsittelyyn myös ratkaisuja, jotka vähentävät keskenräisiin lohkoihin kohdistuvia kuormituksia. Hydraulinostimilla varustettujen kuljetusvaunujen avulla lohkoja voidaan siirtää ilman nosturilla tapahtuvaa sivuttaisliikettä, mikä mahdollistaa kontrolloidumman käsittelyn. Pemamek laitetoimittajana olisi perusteltu valinta kotimaisena toimijana. Sotilasalusten kotimainen huoltovarmuus on merkittävä tekijä. Myös tuotantolaitteiden kotimaisuus palvelisi tätä seikkaa tuotannon toimivuuden osalta myös konfliktitilanteissa.

Muodonmuutosten minimointi vähentää korjaavan työn määrää. Korjaava työ on manuaalista työtä, joka vie paljon resursseja ja on aikaa vievää. Tutkimukset osoittavat, että ajallisesti runkotuotannon läpimenoaika pienenee enimmillään 40 % ja kustannukset 30 % siirryttäessä laser-hybridihitsaukseen, joka omaa pienemmän ja keskitetympään lämmöntuonnin. Jotta investoinnista saadaan mahdollisimman suuri hyöty irti, on koko organisaation sopeuduttava uuteen tilanteeseen. Uudella tilanteella tarkoitetaan nousseen tuottavuuden johdosta suurentunut kapasiteetti ja sen hyödyntämistä. Toiminnan laajuus on erityisesti varustelutuotannon, myynnin ja suunnittelun osalta vastattava tuotannon tulevaan suorituskykyyn.

Tässä työssä vertailtiin prosessien aiheuttamien jäännösjännitysten ja muodonmuutosten lisäksi prosessien tuottavuutta ja kustannuksia. Tuottavuuden laskemisessa mittariksi on valittu hitsausmetri per aikayksikkö, joka soveltuu hyvin eri menetelmien vertailuun. Tehdyistä laskelmista huomataan laser-hybridihitsauksen ja tandem MAG-hitsauksen olevan päittäishitsaukselle ja pienahitsaukselle parhaat vaihtoehdot tuottavuuden kehittämisen näkökulmasta. Kustannusten näkökulmasta muuttuvien kustannusten osalta valitut hitsausmenetelmät ovat kannattavimmasta päästä häviten ainoastaan laserhitsaukselle. Kuitenkin laserhitsauksen vaatima esityöstö laskee sen kannattavuutta merkittävästi.

Tuotantolinjan konseptin kehittämisen lisäksi diplomityön tuloksena syntyi Excel-laskentapohja kriittisen lommahdusjännityksen ja rakenteessa vallitsevan puristusjännityksen laskentaan. Laskennoissa puristusjännitys määritetään hitsin poikkileikkauksen ja hitsauksen aikana sulana olleen aineksen poikkileikkauksen avulla. Laskentapohjan jatkokehitystä tullaan jatkamaan, jotta uusien hitsausmenetelmien vaikutukset rakenteessa vallitseviin voimiin ja jännityksiin voidaan arvioida entistä tarkemmin.

Tämän työn synnyttämiä jatkotutkimusten aiheita ovat uusien tuotantolaitteiden parametrien vakiointi, tuottavuuden ja muodonmuutosten seurannan kehittäminen sekä muodonmuutosten ansiosta vähentyneen korjaavan työn määrää verrattuna aiempaan tasoon.

8. YHTEENVETO

Diplomityön lähtökohtana oli Rauma Marine Constructions Oy:n terästuotannon hitsausmenetelmien uudistamisen tarve tulevaisuuden projekteja ajatellen. Hitsaamisprosessissa materiaali sulaa ja jähmettyy uudelleen. Materiaali käy läpi lämpösyklin, jonka aikana materiaalissa tapahtuu mm. kimmomoduulin aleneminen. Hitsin jäähtyessä se kutistuu ja pyrkii vetämään kappaleiden reunoja kasaan. Kutistuvaan hitsisaumaan syntyy vetojännitys ja kiinteisiin kappaleisiin syntyy vetojännityksen kompensoiva puristusjännitys. Ohuilla materiaalivahvuuksilla puristusjännitys aiheuttaa ongelmia rakenteen kriittisen puristusjännityksen ylittyessä jo kohtuullisen pienillä voimilla. Hitsin aiheuttama sisäinen puristava voima on suoraan verrannollinen hitsauksessa tuotuun lämpömäärään. Tämän vuoksi ohuiden materiaalien hitsauksessa on löydettävä hitsausmenetelmiä, joissa lämmöntuonti on mahdollisimman alhaista ja keskitettyä.

Työssä tutkittiin menetelmiä, joita on käytetty jäännösjännitysten ja muodonmuutosten minimoinnissa. Laserhitsaus, laser-hybridihitsaus ja tandem MAG-hitsaus olivat menetelmiä, joita tutkimusten perusteelle voidaan pitää vaihtoehtoina uusille hitsausmenetelmille. Hitsausmenetelmiä vertailtiin lopulta painoarvotaulukoin, joissa otettiin huomioon muodonmuutosten lisäksi tuottavuudellisia ja taloudellisia tekijöitä. Lopulta tultiin tulokseen, jossa tuotantolinjan runkona toimii laser-hybridihitsaus levyjakanoiden päittäishitsauksessa sekä tandem MAG-hitsaus jäykisteiden pienahitsauksessa. Robottihitsausasemien hankinta jäykisteiden hitsauksen jälkeen suositellaan. Näin hitsauksen tuottavuus paranee hitsausnopeuden kasvaessa ja laadun tasoittuessa. Robottihitsauksen tapahtuessa kuljetuslinjalla, voidaan rakenteiden jäykkyyttä kasvattaa ennen niiden käsittelyä nosturein.

Laserhitsauksessa erittäin pieni lämmöntuonti on eduksi jäännösjännitysten ja muodonmuutosten minimoinnissa. Kuitenkin alhainen lämmöntuonti tuottaa myös ongelmia materiaalin mikrorakenteen tasolla synnyttäen entistä kovemman rakenteen. Laserhitsauksessa myös toleranssit ovat erittäin tiukat ilmaraon osalta, mikä vaatii kappaleiden tarkan esikäsittelyn. Tandem MAG-hitsauksessa kahden valokaaren kaarihitsausprosessia ohjataan yhteisen ohjausyksikön kautta. Tandem MAG-hitsauksen etuna on kasvava prosessinopeus ja kontrolloitu lämmöntuonti pulssitetun lisäaineentuonnin avulla. Tandem MAG-hitsaus ei kuitenkaan tuo tarpeeksi tehokasta muodonmuutosten minimointia levyjakanoiden päittäishitsaukseen. Laser-hybridihitsaus sen sijaan osoittautui ainoaksi tehokkaaksi keinoksi vähentää jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia päittäishitsauksessa. Laser-hybridihitsauksessa kappaleiden toleranssit ei vaadi liian tarkkaa esityöstöä ja jälkityöstön määrä pienenee parantuneen työn laadun myötä. Myös hitsin lämpövyöhykkeen mikrorakenne on pääasiassa suotuisaa ferriittiä, joka on suhteellisen pehmeää, mutta sitkeää.

Jäykisteiden pienahitsaukseen valittiin tandem MAG-hitsausasema. Tandem MAG-hitsauksen osalta jäännösjännityksiä ja muodonmuutoksia minimoivia tekniikoita voidaan tuoda prosessiin vaivatta. Esitaivutusta, kappaleiden lukitsemista ja optimaalista hitsausjärjestystä voidaan käyttää yhdessä tandem MAG-hitsauksen kanssa. Tandem MAG-hitsaus osoittautui hitsausvaihtoehdoista tuottavimmaksi ja kustannustehokkaimmaksi.

Työn lopputuloksena löydettiin konsepti, joka mahdollistaa jäännösjännitysten ja muodonmuutosten merkittävän vähentämisen. Osa hitsausmenetelmistä osoittautui huonosti soveltuviksi raskaaseen teollisuuteen lisäämällä esityöstön määrää tai investointi tuo liian pieniä korjauksia jäännösjännityksiin ja muodonmuutoksiin. Uuden tuotantolinjan konseptissa ainoana negatiivisena puolena nähdään linjan korkea investointikustannus. Kuitenkin kapasiteetin merkittävä kasvupotentiaali on hyöty, joka hyödynnettynä kompensoi suuren investoinnin tuomat kustannukset.

Laser-hybridihitsausaseman takaisinmaksuaika on nykyisellä kapasiteetilla pitkä ja poistoajalla menetelmä on tappiollinen. Kuitenkin kapasiteetin tuplaaminen uusien laivakauppojen myötä laskee takaisinmaksuaikaa puolella ja nostaa menetelmän kannattavuuden ohi jauhekaarhitsauksen. Tällöin hitsausaseman takaisinmaksuaika olisi noin 10 vuotta säästöjen kautta laskettuna. Todellinen takaisinmaksuaika olisi varmasti lyhyempi jälkityöstön määrän vähentyessä paremman laadun myötä. Lohkojen lyhentyneen läpimenoajan ansiosta voidaan rakentaa enemmän tuotteita, minkä ansiosta voidaan saada lisää voittoa ja lyhentää takaisinmaksuaikaa edelleen. Takaisinmaksuajan jälkeen laser-hitsausmenetelmä toisi jo pelkästään hitsausprosessia tarkastelemalla merkittäviä säästöjä. Tandem MAG-hitsausasema jäykistepalkkien hitsaukseen olisi sen sijaan nykyiselläkin kapasiteetilla kannattavampi kuin nykyinen MAG-hitsausasema. Kapasiteetin kasvu lyhentäisi tandem MAG-hitsausaseman takaisinmaksuaikaa, mikä edesauttaisi koko tuotantolinjan takaisinmaksuajan lyhentämistä. Uuden tuotantolinjan vaikutusta RMC:n valmistuksen houkuttelevuuteen on vaikea arvioida, mutta voidaan uskoa modernin tuotantolinjan ansiosta parantuneen laadun edesauttavan uusien laivanrakennussopimusten syntymisessä.

LÄHTEET

Ahola, T., (2016), Tehdäkö itse vai ostaa muilta: Toimittajaverkoston kasvava merkitys, Tampereen Teknillinen Yliopisto, TTA-75010 Tuotantostrategia, luento 6.9.2016

Allen, C. M., Hilton, P. A. & Blackburn, J., (2012), Increasing the tolerance to fit-up gap using hybrid laser-arc welding and adaptive control of welding parameters, Saatavissa: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/increasing-the-tolerance-to-fit-up-gap-using-hybrid-laser-arc-welding-and-adaptive-control-of-welding-parameters/> [Viitattu 28.6.2017]

Asiakastieto.fi, Rauma Marine Constructions Oy, Taloustiedot, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/rauma-marine-constructions-oy/26136563/taloustiedot> [Viitattu 27.4.2017]

Chen, D., Chen, M. & Wu, C., (2015), Effects of phase difference on the behavior of arc weld pool in tandem P-GMAW, Elsevier

Chen, S., (2013), Low distortion welding for shipbuilding industry, University of Wollongong, Research Online

DAEnotes, CO2 Laser (The Molecular gas laser), verkkosivu, Saatavissa: <http://www.daenotes.com/electronics/microwave-radar/co2-gas-laser> [Viitattu 4.5.2017]

DebRoy, T., David, S.A., DuPont, J., Koseki, T. & Bhadeshia, H.K., (2013), Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference, ASM International

Denney, P., (2011), Hybrid laser arc welding: Has its time arrived?, Industrial Laser Solutions for Manufacturing, Saatavissa: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-26/issue-1/features/hybrid-laser-arc-welding-has-its-time-arrived.html> [Viitattu 15.5.2017]

Deng, D., Murakawa, H. & Liang, W., (2007), Numerical simulation of welding distortion in large structures, Elsevier

Dong, L. & Samson, B., (2016), Fiber Laser: Basics, Technology and Applications, CRC Press

Esab Hybrio, Lighting the Way – Hybrid Laser Welding, Saatavissa: <http://assets.esab.com/asset-bank/assetfile/9933.pdf> [Viitattu 9.5.2017]

Esab:in osaamiskeskus, Jauhekaarihitsaus, Saatavissa: <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/jauhekaarihitsaus.cfm> [Viitattu 13.6.2017]

Facebook, Länsi-Suomi, uutinen 16.3.2017, Made in Rauma-juttusarja, facebook.com/lansisuomi

Gannon, L., Liu, Y., Pegg, N. & Smith, M., (2012), Effect of welding-induced residual stress and distortion on ship hull girder ultimate strength, Elsevier, s. 25-49

Giesen, A., Speiser, J., Peters, R., Kränkel, C. & Petermann, K., (2007), Thin-Disk Lasers Come of Age, Photonics Spectra 5/2007, Saatavissa: <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=29420> [Viitattu 15.5.2017]

Goecke, S., Hedegård, J., Lundin, M. & Kaufmann, H., (2015), Tandem MIG/MAG Welding, ResearcGate

Guan, Q., (2005), Distortion-free welding of thin-walled elements based on thermal tensioning effects

Hansen, E., (2013), Hybrid Laser-arc Welding Takes on Heavy Transportation, Canadian Industrial Machinery, Saatavissa: <http://www.canadianmetalworking.com/article/welding/hybrid-laser-arc-welding-takes-on-heavy-transportation-> [Viitattu 15.5.2017]

Hecht, J., (2012), FIBER LASERS: Fiber lasers: The state of the art, LaserFocusWorld, Saatavissa: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-04/features/the-state-of-the-art.html> [Viitattu 15.5.2017]

Hines, P. & Rich, N., (1997), The seven value mapping tools, International Journal of Operations & Production management, vol. 17 Issue: 1, s.46-64

Hitsauksen teoriaopetus, mandata.fi, B4 Kutistuminen, jäännösjännitykset ja muodonmuutokset, verkkosivu, Saatavissa: <http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/B4.pdf> [Viitattu 28.4.2017]

Holder, R., Larkin, N., Li, H., Kuzmikova, L. & Pan, Z., (2011), Development of a DC-LSND welding process for GMAW on DH-36 Steel, University of Wollongong, Research Online

Holming, Holming-historia, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.hollming.fi/fin/yri-tys/historia/15> [Viitattu 11.7.2017]

Id, K., (2013), STX Finland Closes Down The Rauma Yard, Maritime Matters, Saatavissa: <http://maritimematters.com/2013/09/stx-finland-closes-down-the-rauma-yard/> [Viitattu 27.4.2017]

IPG Photonics, High Power CW Fiber Lasers, verkkosivu, Saatavissa:

[http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers#\[Overview\]](http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers#[Overview]) [Viitattu 13.7.2017]

Jiang, G., Feng, D. & Zhu, W., (2015), Lean Shipbuilding for Project-based Manufacturing, Department of Science and Technology, Zhejiang Province

Jääskeläinen, A., (2010), Productivity Measurement and Management in Large Public Service Organizations, dissertation, Tampere University of Technology

Kah, P., (2011), Usability of laser-hybrid welding processes in industrial applications, väitöskirja, Lappeenranta University of Technology

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J., (2004), Konetekniikan materiaalioppi, Edita Prima Oy

Koskinen, P., (2015) Turkulainen Admares toimittaa luksussaaren Arabiemiratteihin, Kauppalehti, Saatavissa: <http://www.kauppalehti.fi/uutiset/turkulainen-admares-toimittaa-luksussaaren-arabiemiratteihin/cQsVMDqu> [Viitattu 27.4.2017]

Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J., (2005), Lasertyöstö, Teknologiainfo Teknova

Lahden museot, Lahden puunjalostusteollisuus sotien jälkeen, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.lahdenmuseot.fi/kuka-mita-lahti/lahden-historia/teollisuuskaupunki/lahden-puunjalostusteollisuus-sotien-jaelkeen/> [Viitattu 27.4.2017]

Lappalainen, I., (2015), Laser- ja hybridihitsauksen käyttökohteet, TAKEOFF! -seminaari, Savonia-ammattikorkeakoulu, Ionix Oy, luento 21.5.2015

Larikka, M., Heinilä, P., Selin, K. & Tuominen, J., (2007), Tuottavuuden jatkuva parantaminen, Teknologiainfo Teknova Oy

Laserline, Diode lasers – light from electricity without the indirect route, verkkosivu, Saatavissa: <https://www.laserline.de/en/diodelasers.html> [Viitattu 12.7.2017]

LeanProduction, What is Lean?, Saatavissa: <http://www.leanproduction.com/> [Viitattu 1.6.2017]

Lee, K. & Beardsley, K., (2009), Avoiding Weld Distortion on Thin Sheet, Welding design & fabrication, Saatavissa: <http://weldingdesign.com/welding-qa/tips-avoiding-weld-distortion-thin-sheet-0709> [Viitattu 4.5.2017]

Li, Y. & Baker, T. N., (2013), Effect of morphology of martensite-austenite phase fracture of weld affected zone in vanadium and niobium microalloyed steels, Taylor & Francis

Logistiikan maailma, Lean-ajattelu, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.logistiikanmaailma.fi/logistiikka/tuotanto/lean-ajattelu/> [Viitattu 7.6.2017]

Long, H., Gery, D., Carlier, A. & Maropoulos, P.G., (2009), Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates, Elsevier

Mandal, N.R., (2004), Welding and distortion control, ASM International

Metso Oy, Metson historia, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.metso.com/fi/yri-tys/metso-yrityksena/historia/#/d4b6ac72-b4f5-449f-943c-3f0a698e7447> [Viitattu 27.4.2017]

Michaleris, P., (2011), Minimizing of welding distortion and buckling, Woodhead publishing

Michaleris, P., Dantzig, J & Tortorelli, D., (1999), Minimization of Welding Residual Stress and Distortion in Large Structures, Welding research

Moore, P. & Nicholas, J., (2013), The effect of inclusions on the fracture toughness of local brittle zones in the HAZ of girth welded line pipe, Saatavissa: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/effect-of-inclusions-on-the-fracture-toughness-girth-welded-line-pipe/> [Viitattu 28.6.2017]

Niemi, E., (2003), Levyrakenteiden suunnittelu, Teknologiateollisuus

Niemi, E. & Kemppe, J., (1993), Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. Opetushallitus

Palonen, M., (2017), Merenkulkijain kaupungista laivojen rakentajaksi, Länsi-Suomi, Saatavissa: <https://ls24.fi/artikkelit/merenkulkijain-kaupungista-laivojen-rakentajaksi> [Viitattu 27.4.2017]

Parnell, Z., (2014), Stability & Equilibrium in Rigging Engineering & Lift Planning, Industrial Training International, Saatavissa: <http://www.iti.com/Crane-and-Rigging-Success/bid/105869/Stability-Equilibrium-in-Rigging-Engineering-Lifting-Planning> [Viitattu 5.6.2017]

Pema Welding Automation, References, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.pemamek.com/reference-archive> [Viitattu 17.7.2017]

Penttilä, E., (2013), Miten parannan hitsauksen tuottavuutta, SHY Turun paikallisosasto 60 vuotta, ESAB Oy, luento 7.11.2013, Saatavissa: <http://www.shy-hitsaus.net/LinkClick.aspx?fileticket=4bsw%2Ft7uJJM%3D&tabid=4772> [Viitattu 5.6.2017]

- Pohjola, M., (2009), Työn tuottavuus talouskasvun lähteenä, Helsingin kauppakorkeakoulu, Saatavissa: https://www.stat.fi/ajk/tapahtumia/2009-09-30_pohjola.pdf [Viitattu 29.6.2017]
- Purslow, M., (2012), The Versatility of Tandem GMAW Provides Higher Productivity and Higher Performance, Saatavissa: <https://ewi.org/the-versatility-of-tandem-gmaw-provides-higher-productivity-and-higher-performance/> [Viitattu 20.5.2017]
- Radaj, D., (1992), Heat Effects of Welding, Springer-Verlag
- Raumalla rakennettu luksussaari otettiin käyttöön Dubaissa, ls24.fi, (2016) Saatavissa: <http://ls24.fi/uutiset/raumalla-rakennettu-luksussaari-otettiin-kayttoon-dubaissa> [Viitattu 27.4.2017]
- Rauman merimuseo, Projektit, Tiedote 19.3.2015, Saatavissa: <https://www.rmm.fi/suomi/laehde-museoon/projektit> [Viitattu 27.4.2017]
- Rauman merimuseo/Raumalaisen laivanrakennuksen perinne Oy, (2011), Merenkulkijain kaupungista laivojen rakentajaksi, Laine Direct Oy
- Rauma Marine Constructions Oy-verkkosivut, rmcfinland.fi, Saatavilla <http://rmcfinland.fi/>
- Rauman satama, Käsikirja 2015, (2015), Jabadabadoo, Saatavissa: https://issuu.com/jabadabadoo/docs/raumansatama_kasikirja2015/40 [Viitattu 2.6.2017]
- Remes, H., (2003), Fatigue test of CO₂-laser, CO₂-laser hybrid and submerged arc welded butt joint of RAEX S275 LASER and NVA, vols. 1 and 2, Helsinki University of Technology, Ship Laboratory, Research Report, M-278
- Roland, F., Manzon, L., Kujala, P., Brede, M. & Weitzenböck, J., (2004), Advanced Joining Techniques in European Shipbuilding, Journal of Ship Production, Vol. 20, No. 3, s.200-210
- Royal Canadian Navy, Arctic and Offshore Patrol Ship Project, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.navy-marine.forces.gc.ca/en/fleet-units/aops-home.page> [Viitattu 17.7.2017]
- Steen, W. & Mazumder, J., (2010), Laser Material Processing, Springer, 4. painos
- Tiainen, T., Aittoniemi, J., Haukijärvi, I. & Yli-Karhu, T., (2015), Toimintatutkimus tietojenkäsittelytieteen tutkimuksessa, Informaatiotekniikan laitos, Tampereen Yliopisto, Tampere, Saatavissa: http://www.uta.fi/sis/reports/index/R38_2015.pdf [Viitattu 28.6.2017]

The Welding Institute (1), What is disk laser?, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-a-disk-laser/> [Viitattu 9.5.2017]

The Welding Institute (2), What is tandem MIG/MAG (GMA) welding?, Saatavissa: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-tandem-mig-mag-gma-welding/> [Viitattu 9.5.2017]

Tsai, C.L., Park, S.C. & Cheng, W.T., (1999), Welding Distortion of a Thin-Plate Panel Structure: The effect of welding sequence on panel distortion is evaluated, Welding research supplement

Yang, Y.P. & Dong, P., (2010), Buckling Distortions and Mitigation Techniques for Thin-Section structures, ASM International, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 21, s.153-160

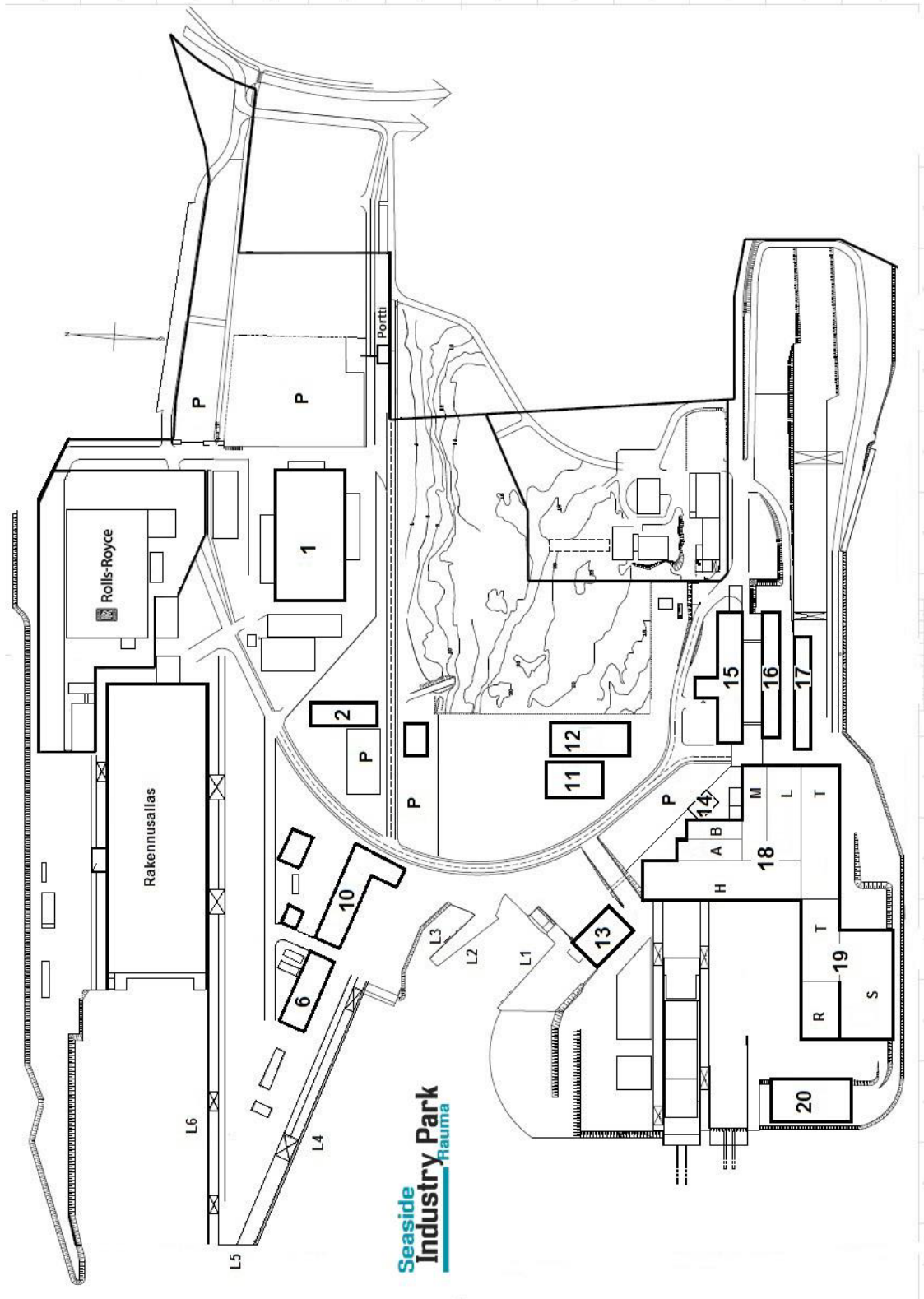
Yritystele.fi, Rauma Marine Constructions Oy, Taloustiedot, verkkosivu, Saatavissa: <http://www.yritystele.fi/yrityksen-tiedot/rauma-marine-constructions-oy/taloustiedot/1004478> [Viitattu 10.7.2017]

LIITE A: SEASIDE INDUSRTY PARK:IN KARTTA

LIITE B: TUOTANTOMENETELMIEN KUSTANNUSLASKENTA

LIITE C: KRIITTINEN LOMMAHDUSJÄNNITYS SEKÄ RAKENTEESSA VALLITSEVA HITSISAUMAN AIHEUTTAMA PURISTUSJÄNNITYS 4 MM:N, 6 MM:N, 8 MM:N JA 10 MM:N VAHVUISILLA LEVYILLÄ

LIITE A: SEASIDE INDUSTRY PARK:IN KARTTA



Tuotantomäärä tunnissa	kpl/h	1,89	2,30	8,11	8,11	4,62	2,30	6,67	6,12	6,12
Tuotantomäärä tunnissa	m/h	22,74	27,64	97,30	97,30	55,38	27,64	80,00	73,47	73,47
Vuosituotantoon menevä aika	h	3325	2735,53	777	777	1365	2735,53	945	1029	1029
Käyttösuhde	%	100 %	83 %	23 %	23 %	41 %	83 %	29 %	31 %	31 %

Kiinteät kustannukset

Hankintahinta	€	0	1655000	4500000	5560000	1905000	0	1300000	4500000	4955000
Jäännösarvo	€	0	413750	1125000	1390000	476250	0	325000	1125000	1238750
Poistoaika	vuotta	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Laskentakorko	%	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %	5 %
Annuiteetti	€	0	181435	493328	609534	208842	0	142517	493328	543209
Koneen viemä lattiapinta-ala	m ²	110	110	110	110	110	110	110	110	110
Vuotuinen laskennallinen neliövuokra	€/m ²	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Vuotuinen laskennallinen vuokra	€	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000	11000
Vuotuinen kunnossapitokustannus	€	10000	5000	5000	5000	5000	10000	5000	5000	5000
Kiinteät kustannukset vuodessa	€	21000	197435	509328	625534	224842	21000	158517	509328	559209
Kiinteät kustannukset tunnissa	€/h	6,31579	72,1744	655,506	805,063	164,72	7,67677	167,743	494,974	543,449

Kustannukset sähköstä

Sähkönkulutus tuotannon aikana	kW	40,59	31,62	22,5	33,8805	49,125	21,08	98,25	22,5	33,8805
Sähköenergian hinta	€/kWh	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Sähköenergia	€/h	1,70905	1,27758	0,36486	0,54941	1,51154	0,85172	2,18333	0,55102	0,82973

Kustannukset suojakaasusta

Suojakaasun kulutus tuotannon aikana	l/h	0	1080	0	123,12	820,8	1080	820,8	0	123,12
Suojakaasun hinta	€/l	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Suojakaasu	€/h	0	2,61818	0	0,11979	1,51532	2,61818	1,0944	0	0,18091

Kustannukset hitsausjauheesta

Hitsausjauheen kulutus tuotannossa	kg/h	13,2335	0	0	0	0	0	0	0	0
Hitsausjauheen hinta	€/kg	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Hitsausjauhe	€/h	14,5569	0	0	0	0	0	0	0	0
Kustannukset lisäaineesta										
Lisäaineen kulutus	kg/h	9,45252	11,4894	0	2,3	23,0254	6,94225	10,048	0	12,8035
Lisäaineen hinta	€/kg	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Lisäaine	€/h	18,905	22,9789	0	4,6	46,0508	13,8845	20,096	0	25,607
Kustannukset kulutusosista		7500	3380	6320	6320	6500	3380	6500	6320	6320
Kulutusosat	€/h	2,03804	0,91848	1,71739	1,71739	1,7663	0,91848	1,7663	1,71739	1,71739
Kustannukset työstä										
Työn hinta	€/h	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Operaattorien lukumäärä	hlö	2	2	1	1	2	2	2	2	2
Työ	€/h	64	64	32	32	64	64	64	64	64
Muuttuvat kulut yhteensä	€/h	101,21	91,79	34,08	38,99	114,84	82,27	89,14	66,27	92,34
Muuttuvat kulut yhteensä	€/m	4,45	3,32	0,35	0,40	2,07	2,98	1,11	0,90	1,26
Kustannukset yhteensä										
Tuotantokustannukset tunnissa	€/h	107,52	163,97	689,59	844,05	279,56	89,95	256,88	561,24	635,78
Tuotantokustannukset vuodessa	€/vuosi	357520	448537	535810	655827	381604	246060	242754	577518	654222
Hitsauskustannus poistoajalla	€/m	4,7291	5,93304	7,08743	8,67496	5,04767	3,25476	3,21104	7,63913	8,65373
Hitsauskustannus poistoajan jälkeen	€/m	4,58360	3,38760	0,41643	0,46683	2,13971	3,10925	1,18039	0,96812	1,32292
Säästö vuodessa poistoajalla	€	-	-91017,5	-178290	-298307	-24084,1	-	3305,35	-331458	-408162
Säästö vuodessa poistoajan jälkeen	€	-	85417,6	310038	306227	179758	-	140822	156869	130047
Säästöä vuodessa poistoajalla 100% teholla	€	-	-73016,9	833224	700775	232318	-	356032	16581,3	-119632

Säästöä vuodessa postojen jälkeen 100% teholla	€	-	103418	1321552	1305309	436160	-	493549	504909	418577
--	---	---	--------	---------	---------	--------	---	--------	--------	--------

Takaisinmaksuaika

Muuttuvat kulut tunnissa	€/h	101,21	91,79	34,08	38,99	114,84	82,27	89,14	66,27	92,34
Kustannukset vuodessa	€	336520	251102	26482	30293	156762	225060	84237	68190	95013
Säästöt vuodessa muuttuvista kuluista	€	-	85417,6	310038	306227	179758	-	140822	156869	130047
Takaisinmaksuaika ilman kapasiteetin kasvua	vuotta	-	21,2409	15,9118	19,9046	11,618	-	10,1203	31,4483	41,7702
Takaisinmaksuaika 85% käyttöasteella	vuotta	-	20,6398	4,3917	5,49371	5,63317	-	3,39717	11,4949	15,2677

LIITE C: KRIITTINEN LOMMAHDUSJÄNNITYS SEKÄ RAKENTEESTA VALLITSEVA HITSISAUMAN AIHEUTTAMA PURISTUSJÄNNITYS 4 MM:N, 6 MM:N, 8 MM:N JA 10 MM:N VAHVUISILLA LEVYILLÄ

