

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Kone
Konetekniikan koulutusohjelma

Reima Kokko

Laserhitsattavan tuotteen suunnittelu

Diplomityö

2014

100 sivua, 48 kuvaa ja 3 taulukkoa

Työn tarkastajat Professori Antti Salminen
 Professori Veli Kujanpää

Hakusanat: tuotteen suunnittelu, tuotekehitys, laserhitsaus, DFMA, modulointi, liitosmuodot, hitsauskustannukset

Tässä työssä tarkastellaan laserhitsattavan tuotteen suunnittelua ja sen tuotekehitykseen liittyviä tekijöitä. Tuotteen suunnittelua käsitellään valmistuksellisesta näkökulmasta, eli siitä, kuinka tuotteen suunnittelussa voidaan ottaa huomioon tuotteen valmistus- ja kokoonpanoystävällisyys. Laserhitsattavan tuotteen suunnittelua käsitellään myös tuotteen ominaisuuksien kannalta, eli kuinka lopullisesta tuotteesta saadaan mahdollisimman laadukas ja kilpailukykyinen.

Suomen kaarihitsausosaaminen on kansainvälisesti korkealuokkaista, mutta laserhitsaus eroaa perinteisistä kaarihitsausprosesseista paljon. Kun laserilla hitsattavaa tuotetta suunnitellaan, ovat menetelmäkohtaiset suunnittelusäännöt erilaiset kuin kaarihitsauksessa. Laserhitsaus vaatii teknisesti pajalta enemmän, mutta se myös avaa uusia ovia tuotesuunnittelulle ja mahdollistaa tuotteita, jotka olisivat perinteisillä menetelmillä hankalia tai mahdottomia valmistaa.

Oikein käyttöön otettuna laserhitsauksella voidaan päästä matalampiin valmistuskustannuksiin. Kustannustehokkaaseen tuotantoon päästäkseen täytyy kuitenkin ymmärtää tuotteen kustannusrakenne. Työn lopussa tarkastellaan ja vertaillaan perinteisen ja laserhitsatun tuotteen kustannuksia ja kustannusrakennetta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Technology
LUT Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering

Reima Kokko

Designing of a laser welded product

Master's Thesis

2014

100 pages, 48 figures and 3 tables

Examiners: Professori Antti Salminen
Professori Veli Kujanpää

Keywords: product design, product development, laser welding, DFMA, modular product structures, welding joint types, welding costs

This master's thesis investigates the design of a laser welded product. Product development is examined from a manufacturing perspective, that is, on how the manufacturing and assembly friendliness of the product can be taken into account in the designing process. The design process of the laser welded product is also discussed in terms of its features, how the final product will have the highest quality and best ability to compete.

Finnish arc welding expertise is internationally high standard, but laser welding is very different from conventional arc welding as a process. The methodological design rules for laser welding are different from those for arc welding. Laser welding requires technologically more from the shop, but it also opens new doors for product design and enables products that are difficult or impossible to manufacture using conventional methods.

Lower production costs can be achieved with laser welding when properly deployed. In order to cost effectively deploy laser welding, an understanding of the product cost structure is required. At the end of the work the costs and cost structures of conventionally welded and laser welded product are examined and compared.

ALKUSANAT

Kiitos Antti Salmiselle ja Veli Kujanpäälle hyvästä ohjauksesta, ja kaikille Laserforumin jäsenille rakentavasta palautteesta sekä valaisevista keskusteluista.

Lappeenrannassa, 31.10.2014

Reima Kokko

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	8
2	LASER.....	10
	2.1 Laserhitsaukseen soveltuvat laserit	13
	2.1.1 Hiilidioksidilaser.....	14
	2.1.2 Kuitulaser.....	16
	2.1.3 Kiekkolaser	18
	2.1.4 Diodilaser.....	19
	2.2 Laserhitsausjärjestelmät	20
	2.3 Laserhitsausprosessit	22
	2.3.1 Avaimenreikähitsaus.....	23
	2.3.2 Sulattava hitsaus	25
	2.3.3 Lisäaineellinen hitsaus.....	26
	2.4 Hybridihitsaus	27
	2.5 Laserhitsauksen parametrit.....	29
	2.5.1 Aallonpituus.....	30
	2.5.2 Hitsausnopeus	30
	2.5.3 Teho	31
	2.5.4 Heijastuvuus ja absorptio.....	31
	2.5.5 Tehotiheys.....	32
3	STANDARDIT	33
	3.1 Laserturvallisuus	33
	3.2 Laatuvaatimukset.....	34
	3.3 Hitsausluokat	35
	3.4 Hitsausohjeet	36
	3.5 Menetelmäkokeet	37
	3.6 Aikaisempi kokemus	37
	3.7 Standardihitsausohje.....	38
	3.8 Esituotannollinen hitsauskoe	38
4	TUOTTEEN SUUNNITTELU.....	39
	4.1 DFMA	39
	4.2 DFMA:n tavoitteet ja toteuttaminen.....	41
	4.3 Rinnakkaissuunnittelu	42
	4.4 Modulaarinen tuotearkkitehtuuri	43
5	LASERHITSATTAVAN TUOTTEEN SUUNNITTELU	46
	5.1 Laserhitsaukselle sopivat tuotteet.....	47
	5.2 Kaarihitsauksen ja laserhitsauksen erot.....	50
	5.3 Mekanisointitaso	52

5.4	Laserhitsauksen liitosmuodot.....	54
5.4.1	Avaimenreikähitsauksen liitosmuodot.....	54
5.4.2	Päittäis- ja limiliitokset.....	56
5.4.3	Laippaliitokset.....	58
5.4.4	T-liitos.....	61
5.4.5	Sulattavan hitsauksen liitosmuodot.....	67
5.5	Hitsauskokoontalon toleranssit.....	68
5.6	Materiaalit.....	72
5.6.1	Hiiliteräs.....	73
5.6.2	Ruostumaton teräs.....	73
5.6.3	Alumiiniseokset.....	74
5.6.4	Sekaliitokset.....	75
5.7	Kiinnittimet.....	75
5.8	Hitsattavan tuotteen suunnittelun malli.....	76
6	LASERHITSAUKSEN EDUT JA HAASTEET.....	79
7	KUSTANNUS- JA INVESTOINTILASKELMAT.....	80
7.1	Laser- ja kaarihitsauksen kustannuserot.....	81
7.2	Hitsauksen osa-ajat.....	82
7.3	Esimerkkilaskenta.....	84
7.4	Vaikutukset kokonaiskustannuksiin.....	89
7.5	Investointi.....	90
8	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	92
	LÄHTEET.....	94

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

BPP	Sädeparametritulo (Beam Parameter Product)
CO ₂ -laser	Hiilidioksidilaser
DFMA	Valmistus ja kokoonpanoystävällinen suunnittelu (Design for Manufacturing and Assembly)
DFW	Hitsattavan kappaleen suunnittelumalli (Design for Welding)
HAZ	Muutosvyöhyke (Heat Affected Zone)
MIG/MAG	Kaasukaarihitsausprosessi (Metal inert gas/ Metal active gas)
SS-laser	Kiinteän olomuodon laser (Solid State Laser)
TEM	TEM-moodi (Transverse Electromagnetic)
TIG	TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas Arc Welding)
pWPS	Alustava hitsausohje (Preliminary Welding Procedure Specification)
WPS	Hitsausohje (Welding Procedure Specification)
WPQR	Hyväksymispöytäkirja (Welding Procedure Qualification Record)

1 JOHDANTO

Laserhitsauksella on paljon potentiaalia, ja oikein valjastettuna se tarjoaisi suurta kilpailukykyä monille suomalaisille metalliteollisuuden yrityksille. Laserhitsaus ei ole kuitenkaan Suomessa kokenut vielä ennustuksien mukaista vallankumousta, vaikka onkin jo vallannut jalansijaa.

Suomessa moni pitää laserhitsausta hankalana, ongelmallisena sekä kalliina. Tällainen asenteellisuus, sekä laserhitsausjärjestelmien suuret investointikustannukset jarruttavat kehitystä. Suomalaisen metalliteollisuudelle tyypillinen ulkoistettu suunnittelu sekä pitkät alihankintaketjut vaikeuttavat myös kehitysaskelien ottamista. Alihankintateollisuudessa eräkokoja pidetään liian pieninä, eikä samankaltaisten kappaleiden yhteneväisyyksiä havaita. Laserhitsauksen käyttöönotto kuitenkin johtaa helposti koko pajan tekniseen kehitykseen, tuotannon laadun kokonaisvaltaiseen kasvuun, kilpailukyvyn ja imagon paranemiseen, sekä tilauskannan kasvattamiseen. Tekninen kehitys onkin yksi Suomalaisen konepajateollisuuden tärkeimmistä kilpailukeinoista. (Vatsia, 2014)

Tämän diplomityön tavoitteena on perehtyä suomalaisen konepajateollisuuden näkökulmasta laserhitsauksen tuomiin mahdollisuuksiin ja mahdollisiin haasteisiin tuotesuunnittelussa. Tarkoitus on syventyä laserhitsattavan kappaleen suunnitteluun, ei niinkään yksittäisien laserhitsausliitoksien suunnitteluun. Tuotteen suunnittelua ja piirteitä pohditaan sekä valmistuksellisesta että tuotteen näkökulmasta. Työ pyrkii vastaamaan kysymyksiin, kuinka

- laserhitsauksen mahdollistamat muutokset voivat tuoda kustannussäästöjä lyhentyneiden työaikojen ja poistuneiden arvoa lisäämättömien työvaiheiden kautta
- laserhitsauksen mahdollistama kokonaan erilainen tuote voi olla toiminnoiltaan kustannustehokkaampi kuin entinen
- laserhitsaus antaisi enemmän lisäarvoa loppukäyttäjälle edullisempänä, kevyempänä, toimivampana.

Tämän diplomityön toissijainen tavoite on, että se sisältäisi tarpeelliset perustiedot perinteisestä kaarihitsauksesta laserhitsaukseen siirtymiseen. Työ pyrkii kertomaan, mitä

laserhitsaus on, ja kuinka se eroaa kaarihitsauksesta. Työssä tulee selville, minkälaisia päivityksiä laserhitsauksen menestyksekkäis käyttöön otto tuotteessa edellyttää, tai minkälaisen kokonaan uuden tuotteen se mahdollistaa. Työssä selvitetään myös mitä laserhitsaus tuotteen aiemmilta työvaiheilta tarvitsee ja kuinka kustannuslaskennalla tälle siirtymiselle voidaan laskea taloudelliset perustelut.

Asioita käsitellään vertailemalla laserhitsausta kaarihitsaukseen ja vastushitsaukseen, jolloin teksti on helpompaa perinteiset hitsausmenetelmät tuntevalle. Tekstin tueksi työhön on upotettu tekstin sekaan havainnollistavia tuote-esimerkkejä sekä kuvia. Tuote-esimerkkeinä käytetään todellisia tuotteita teollisuudesta sekä työtä varten suunniteltua tuotetta.

Tämän työn teettäjänä toimii Suomen hitsausteknillisen yhdistyksen alainen Laserfoorumi. Foorumin jäseninä on useita suomalaisia lasertyöstöalan yrityksiä ja koulutuslaitoksia.

2 LASER

Sana laser on lyhennesana englanninkielisistä sanoista ”light amplification by stimulated emission of radiation”. Suomeksi käännettynä laser on säteilyn stimuloitulla emissiolla vahvistettua valoa. Stimuloitussa emissiossa stimuloiva valo eli fotonit saavat korkeampaan tilaan virittyneet atomit tai molekyylit vapauttamaan fotonin stimuloivan fotonin kanssa samaan suuntaan, samassa vaiheessa ja samalla aallonpituudella. Fotoni on peräisin laseroivan aineen atomien tai molekyyliden vapautumisesta virittyneestä tilasta matalampaan tilaan. Stimuloitu emissio voidaan toteuttaa monilla materiaaleilla, mutta vain muutamilla materiaaleilla on suuri energiapotentiaali, sillä ehtona tälle on että materiaalilla on virittyneessä tilassa useampia atomeita tai molekyylejä kuin alemmassa tilassa, jotta valo vahvistuu absorboitumisen sijaan. (Steen & Mazumder, 2010, ss. 11-12) (Ion, 2005, ss. 46-47)

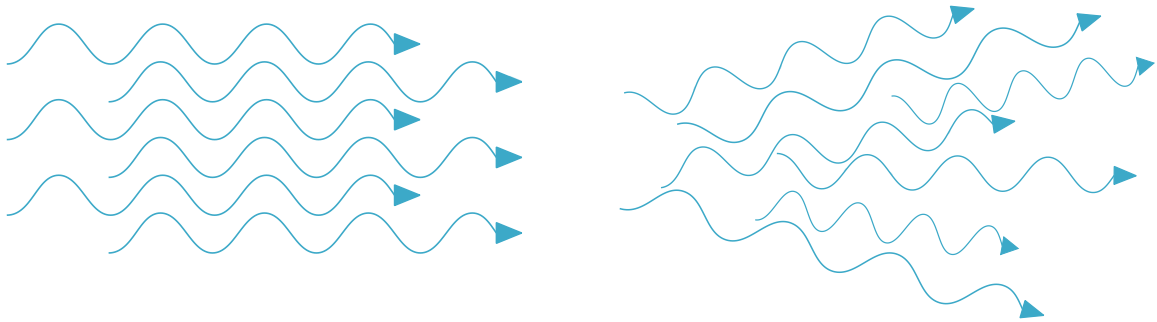
Aktiivinen laseroiva väliaine voi olla kaasu, kiinteä aine, puolijohde tai neste. Yleisimmät konepajoissa käytetyt suuritehoiset laseroivat aineet ovat hiilidioksidikaasu (CO₂), sekä kiinteät väliaineet, joita käyttävät Solid State- eli SS-laserit. Kiinteitä väliaineita ovat neodyymiseostettu yttrium alumiini-granaatti (YAG, Nd:YAG), ytterbiumseostettu alumiini-granaatti (Yb:YAG). Laseroivia puolijohdeita eli diodeja ovat (GaAs, GaAlAs, InGaAs, GaN sekä muita kehityksessä olevia). (Ion, 2005, s. 48) (Steen & Mazumder, 2010, s. 12)

Perusideana on kerryttää valoa kahden vastakkaisen ja yhdensuuntaisen peilin välillä. Peilit toimivat optisena oskillaattorina. Peilien välissä edestakaisin liikehtivä valo vahvistuu, kun viritetyssä tilassa olevat laseroivan väliaineen atomit tai molekyylit vapauttavat fotoneja samaan suuntaan ja vaiheeseen kuin oskilloivan valon fotonit. Toinen peileistä on osittain valoa läpi päästävä, jotta oskilloiva valo pääsee resonaattorista raakasäteenä ulos. (Steen & Mazumder, 2010, s. 22) (Ion, 2005, s. 47)

Laserista tuleva energia on säteen muodossa olevaa elektromagneettista säteilyä. Tavallinen, luonnollinen valkoinen valo koostuu sähkömagneettisesta säteilystä sisältäen näkyvän valon spektrin eli eri aallonpituudet väliltä 390 - 780 nm. Näkyvän valonpituusalueen alapuolelta

löytyy ultraviolettisäteilyn alue ja yläpuolelta infrapuna-alue. SS-lasereiden aallonpituus on tuhannen nanometrin luokkaa, eli ne ovat huomattavasti lähempänä näkyvän valon spektriä kuin 10600 nanometrin luokkaa olevat hiilidioksidilaserit. (Ion, 2005, s. 41) (Kujanpää, et al., 2005, ss. 40-41)

Tavallinen valkoinen valo säteilee valonlähdettä ympäröiviin suuntiin sisältäen spektrin eri aallonpituudet. Laservalo taas on monokromaattista, mikä tarkoittaa sitä, että se koostuu saman aallonpituuden säteilystä. Laservalo on myös koherenttia, eli sen kaikki valoallot ovat samassa vaiheessa. Laservalon kaikki säteily on myös lähes samansuuntaista (Kuva 1), jonka vuoksi lasersäde voidaan kohdistaa ja valjastaa työstävään käyttöön. Laservalon samansuuntaisuuden kuvaamiseen voidaan käyttää termiä divergenssi, joka tarkoittaa lasersäteen laajenemiskulman puolikasta. (Buchfink, 2007, s. 29) (Steen & Mazumder, 2010, s. 98) (Kujanpää, et al., 2005, s. 33)



Kuva 1. Lasersäteen (vasen) ja valkoisen valon (oikea) eroja.

Laserhitsauksen kannalta oleellisia lasersäteen ominaisuuksia ovat teho, tehotiheys sekä säteenlaatu. Laserin tehosta puhuttaessa voidaan tarkoittaa ulostulotehoa sekä kappaleen pinnalle ohjattua tehoa. Optiikan tehohäviö voi joissain tapauksissa olla suurtakin, joten on tärkeää erottaa nämä kaksi toisistaan. Tehotiheys kuvaa lasersäteen tehoa pinta-alayksikköä kohden, ja sen yksikkö on W/cm^2 . Säteenlaadun kuvaamiseen on erilaisia yksiköitä, joita ovat sädeparametritulo, K-luku sekä M^2 -luku. (Kujanpää, et al., 2005, ss. 72, 164-165) (Ion, 2005, s. 67)

Kun kyseessä on säde, jota kuljetetaan optisessa kuidussa, on käytetty termi yleensä sädeparametritulo, eli BPP (Beam parameter product), joka määräytyy säteen halkaisijan sekä divergenssin mukaan kaavalla;

$$BPP = \frac{D\theta}{4} \quad (1)$$

Jossa θ kuvaa säteen divergenssiä ja D säteen halkaisijaa. Sädeparametritulon yksikkö on mm*mrad, ja mitä pienempi sädeparametritulo on, sitä parempi on säteenlaatu. (Kujanpää, et al., 2005, s. 72) (Ion, 2005, s. 67)

CO₂-laserilla säteenlaadun kuvaamiseen käytetään tyypillisesti K-lukua tai M²-lukua. K-luku määritetään kaavalla;

$$K = \frac{4\lambda}{\pi\theta D} \quad (2)$$

Jossa K on K-luku, λ on säteen aallonpituus, θ säteen avautumiskulma ja D raakasäteen halkaisija. Teollisilla kaasulasereilla säteenlaatu vaihtelee 0,2 - 0,7 välillä. Mitä lähempänä K-luku on arvoa 1, sen parempi säteenlaatu on. (Kujanpää, et al., 2005, s. 72) (Ion, 2005, s. 67). Verrattaessa eri aallonpituuksisia lasereita toisiinsa, on käytettävä sädeparametrituloa, koska vain se ottaa huomioon aallonpituuden vaikutuksen.

K-luvulla, M²-luvulla sekä sädeparametritulolla on yhteys;

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi * BPP} \quad (3)$$

Jossa M² tarkoittaa M² -lukua, ja λ on säteen aallonpituus. Mitä pienempi M²-luku on, sen parempi säteenlaatu. M²-luku on erityisesti amerikkalaisten suosima säteenlaadun

merkintätapa. Paras teoreettinen säteenlaatu on myös M^2 -luvulla 1. (Kujanpää, et al., 2005, s. 72) (Ion, 2005, s. 67)

2.1 Laserhitsaukseen soveltuvat laserit

Laserhitsaukseen soveltuvia lasereita ovat kaukoinfrapuna-alueella olevat hiilidioksidikaasulaserit, sekä lyhytaaltoisen infrapuna-alueen kiinteät laserit, eli SS-laserit (Solid State Laser), joita ovat kuitulaserit, kiekkolaserit, diodilaserit, sekä Nd-YAG-laserit. Vielä vuosituhaten alussa laserhitsaukseen soveltuvat laserit olivat CO₂- ja Nd-YAG-lasereita. Hiilidioksidilaser oli taloudellisin vaihtoehto lineaarisiin sekä pyörähdysymmetrisiin hitsausliitoksiin sen peileillä liikuteltavan säteen vuoksi, kun taas monimutkaisempiin kolmiulotteisiin hitsaussovelluksiin paremmin sopi kuidulla kuljetettava Nd-YAG laserin säde. (Ion, 2005, s. 395) (Katayma, 2013, s. 4)

Nyt sekä lamppu- että diodipumpattujen Nd-YAG lasereiden kehittäminen on lopetettu niiden teknisien haasteiden sekä heikon tehohyötysuhteen vuoksi, kun taas uudemmilta kiekko- ja kuitulasereilta saadaan parempi säteenlaatu, enemmän tehoa sekä parempi hyötysuhde. Sekä kuitu- että kiekkolasereissa käytetään laseroivan väliaineen pumppaamiseen diodilaservaloa. (Katayma, 2013, s. 4)

Diodilasereilla onkin näitä paljon parempi hyötysuhde, joka on noin 30 – 60 %. Diodilasereiden suurin ongelma on niiden heikko säteenlaatu, jonka vuoksi kuitu- ja kiekkolaserit ovat tämän päivän teknologioita. Tämän vuosisadan suuritehoisten ja hyvän säteenlaadun lasereiden tekniikan kehitys onkin keskittynyt laserdiodeihin, sekä diodilasereilla pumpattaviin kiekko- ja kuitulasereihin. Laserteknologioiden väliset erot vaihtelevat (*Taulukko 1*). (Katayma, 2013, s. 4) Taulukon arvot ovat suuntaa antavia, ja eri valmistajien välisien lasereiden arvoissa on eroja, ja lasereiden kehitys on jatkuvaa.

Taulukko 1. Hitsaukseen soveltuvat laserit. (Katayma, 2013, s. 5) (Ready, 2005, s. 365) (Trumpf, 2014b) (Quintino, et al., 2007, s. 1233) (Havrilla, et al., 2010) (Poprawe & Schultz, 2003, ss. 4,5).

Laser	Ominaispiirteet
Kuitulaser (multi-mode)	Aallonpituus: 1 070 nm Saavutettava teho: 100 kW (sarjakytkentämaksimi) Hyötysuhde: 30% BPP: 2 - 7
Kiekkolaser	Aallonpituus: 1 030 nm Saavutettava teho: 15 kW (sarjakytkentämaksimi) Hyötysuhde: 25 % BPP: 2 - 25
Hiilidioksidilaser	Aallonpituus: 10 600 nm Normaali tehoalue: 1 – 15 kW (maks. jopa 50 kW) Hyötysuhde: 8 – 15 % K-arvo: 0,26 - 0,55
Diodilaser	Aallonpituus: 800 - 1 100 nm Saavutettava teho: 10 – 15 kW (maksimi) Hyötysuhde: 40% BPP: 100
Nd-YAG-laser, Lamppupumpattu	Aallonpituus: 1 064 nm Normaali tehoalue: 0,5 – 7 kW (maksimi) Hyötysuhde: 3 – 5 % BBP: 25
Nd-YAG-laser, Diodipumpattu	Aallonpituus: 1 064 nm Normaali tehoalue: 0,5 – 6 kW (maksimi) Hyötysuhde: 16% BBP: 12

2.1.1 Hiilidioksidilaser

Hiilidioksidilaser on hitsaukseen soveltuvista lasereista vanhin teknologia. Se on Suomessa vielä yleisin työstölaser konepajasovelluksissa. Ensimmäinen kaupallinen hiilidioksidilasersovellus tuli markkinoille jo vuonna 1966. CO₂-laserit ovat käyneet siitä lähtien läpi jatkuvaa kehitystä ja vuosituhaten vaihteessa tehokkaimmat materiaalin työstössä käytetyt laserit olivat teholtaan jopa 50 kW. Hiilidioksidilaserin laseroiva kaasu on sekoitus hiilidioksidia, typpeä ja heliumia. Sitä pumpataan vaihto- tai tasavirralla, jolla saadaan aikaan 10.6 µm aallonpituuden lasersäde. Hiilidioksidilaserit jaotellaan pääosin

jäähdytystavan ja kaasun virtaussuunnan mukaan. Suurin osa konepajojen hiilidioksidilasereista on nopean pitkittäisvirtauksen lasereita tai diffuusiojäähdytettyjä lasereita. (Katayma, 2013, s. 17) (Kujanpää, et al., 2005, s. 55)

Sähköinen höytysuhde CO₂-laserilla on 8 – 15 %, joka ei yllä kiekko- ja kuitulasereiden tasolle. Teoreettinen höytysuhdemaksimi CO₂-laserilla on noin 21 %. Hiilidioksidilasereiden suurimmat edut ovat helposti saatava korkea teho, korkea säteenlaatu, suhteellisen matala investointikustannus sekä suhteellisen vakaa hitsaus. Hiilidioksidilaserin suurimmat ongelmat johtuvat sen aallonpituudesta. Näitä ovat kalliit optiikan materiaalit, säteen sopimattomuus kuitukuljetukseen, huonompi absorptio 10.6 µm aallonpituudella sekä laserenergian absorptio avaimenreikähitsauksessa syntyvään plasmaan. (Katayma, 2013, s. 21) (Kujanpää, et al., 2005, s. 55)

Hiilidioksidilaser soveltuu hieman lyhemmän aallonpituuden lasereita paremmin roiskeherkkiin sovelluksiin. Suuremmissa levynpaksuuksissa hiilidioksidilaserilla on verrattain vähän vakaampi hitsausprosessi verrattuna kiekko- sekä kuitulasereihin. Paksuissa materiaaleissa avaimenreikähitsauksessa hiilidioksidilaserilla voidaan päästä vähemmällä palon valumalla. Hiilidioksidilaserilla voidaan päästä samalla säteenlaadulla ja teholla SS-lasereita syvempään läpäisyyn avaimenreikähitsauksessa kun hitsataan huomattavan paksuja, kuten esimerkiksi yli 8mm paksuja, materiaaleja. Hiilidioksidilaserin turvallisuusjärjestelyt ovat edullisemmat kuin SS-lasereilla, koska se ei tarvitse erikoisikkunoita eikä -seiniä. (Locke & Havrilla, 2013) (Katayma, 2013, s. 22)

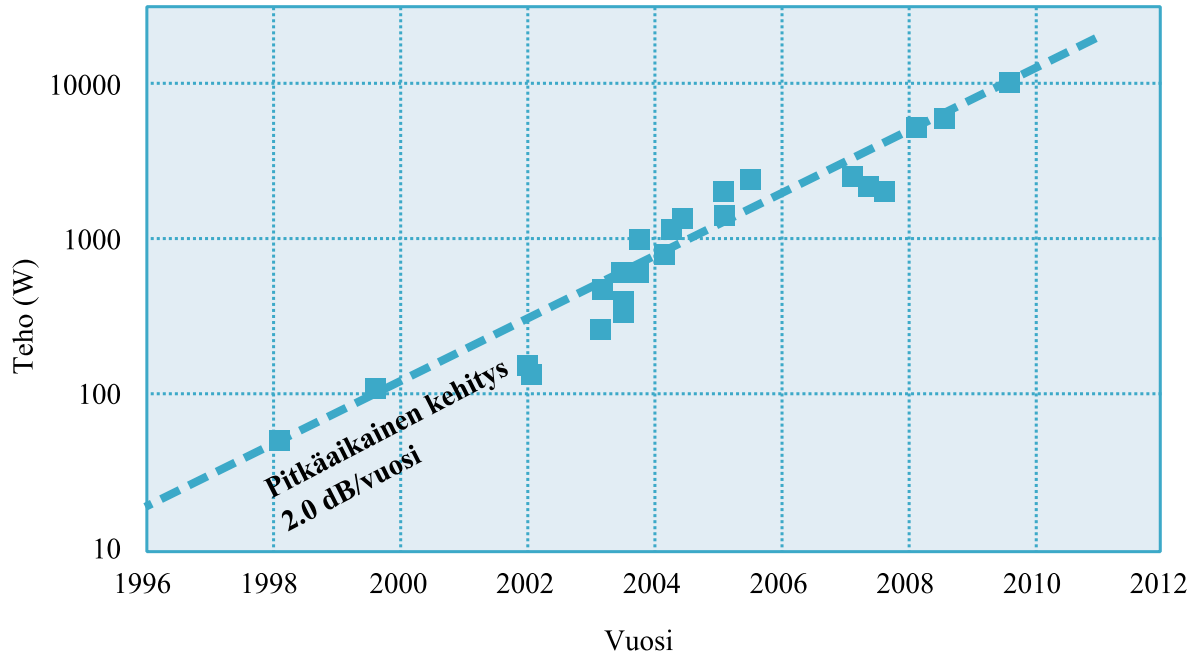
Hiilidioksidilaserin suurin heikkous on sen sopimattomuus kuitukuljetukseen, koska tyypilliset läpinäkyvät materiaalit kuten lasi ja kvartsi eivät ole läpinäkyviä 10,6 µm aallonpituudella. Tästä syystä säde täytyy kuljettaa työstöpäälle heijastamalla se peilien avulla. Tämä vaatii tarkkaa peilien kohdistamista, ja hitsauksen joustavuus käytännön hitsaussovelluksissa on rajallinen. Peilijärjestelmä ei myöskään sovellu järkevästi nivelvarsirobotille. Optiikkaan, kuten linseihin ja ikkunoihin, täytyy käyttää kalliita materiaaleja, kuten sinkkiselenidiä (ZnSe). (Katayma, 2013, s. 22)

Avaimenreikähitsauksen aikana korkean tehotiheyden säde aiheuttaa materiaalin intensiivistä höyrystymistä. Hiilidioksidilaserilla säde vuorovaikuttaa avaimenreiässä höyrystyneen materiaalin sekä lasersäteen aikaansaaman plasman kanssa. Säteen energiaa absorboituu plasmaan, mikä laskee kappaleeseen kohdistuvaa energiaa. Lasersäteilyn ja plasman välinen absorptiokerroin on karkeasti suoraan verrannollinen säteilyn aallonpituuteen, jonka vuoksi plasmaan absorboituminen on huomattavasti paljon suurempi ongelma hiilidioksidilasereiden kanssa kuin lyhemmän aallonpituuden SS-lasereilla. Heliumilla on inerteistä kaasuista suurin ionisaatiopotentiaali, jonka vuoksi se ei ionisoidu merkittävästi edes korkean tehon hiilidioksidilasereilla. Tämän vuoksi helium on ideaalinen korkeatehoisten hiilidioksidilaserosovellusten prosessikaasuna. Argonilla ionisaatiopotentiaali on noin kaksinkertainen metalleihin nähden. (Katayma, 2013, s. 24)

Matalamman tehon hitsausprosesseilla vain metalli ionisoituu, mutta korkeamman tehon prosesseissa myös suojakaasu voi ionisoitua. Plasman muodostuminen vaikuttaa merkittävästi hitsin geometriaan. Hitsin syvyys jää matalammaksi, kun suojakaasuna käytetään argonia, sillä argonplasmaan absorboituu laserin tehoa, mikä levittää sädettä ja leventää ja mataloittaa hitsiä. Heliumilla hitsi on syvempi, koska heliumista ei juurikaan muodostu plasmaa. (Katayma, 2013, s. 24)

2.1.2 Kuitulaser

Kuitulaser on suhteellisen uusi teknologia, sillä se ilmestyi markkinoille suuritehoisena vasta 2000-luvulla. Sen kehitys viimeisen vuosikymmenen aikana on ollut dramaattista (Kuva 2), joka on johtanut kuitulasereiden erinomaiseen suorituskykyyn tehon, säteenlaadun, tehokkuuden ja säteen ominaisuuksien suhteen. Menestys suuritehoisten lasereiden joukossa on pitkälti kuidun geometrian ansiota, jonka vuoksi ydin sietää hyvin lämmön tuomia vaikutuksia, ja suhteellisen pienen kirkkauden pumppausdiodista saadaan erittäin kirkas laserulostulo. (Richardson, et al., 2010, s. B63)



Kuva 2. Ytterbium-kuitulasereiden tehon kehitys vuosina 1996-2010. (Richardson, et al., 2010, s. B64)

Korkean tehon kuitulasarit sopivat laajan materiaalikirjon suuren tunkeuman avaimenreikähitsaukseen niiden matalan aallonpituuden ansiosta, jonka vuoksi sen säde absorboituu lähes kaikkiin metalleihin ja metalliseoksiin, ja säteen kuitukuljetusmahdollisuus tarjoaa tarvittavan joustavuuden työstöpään liikuttamiseen. (Quintino, et al., 2007, s. 1232)

Suuren tehon kuitulasarit soveltuvat hyvin syvän tunkeuman laserhitsaukseen. Kuitulasarilla on monia etuja, kuten korkea tehokkuus, kompakti rakenne ja koko, erinomainen säteenlaatu, soveltuvuus kuitukuljetukseen sekä alhaiset huoltokustannukset. Kahdeksan kilowatin kuitulasarin lattiapinta-ala on vain hieman reilun neliömetrin luokkaa. Kuitulasarin huollontarve on hyvin vähäistä, sen resonattorirakenne ei vaadi lainkaan vapaan tilan komponenttien kohdistamista. (Quintino, et al., 2007, s. 1231) (Richardson, et al., 2010, s. B63)

Kuitulaserin aktiivinen laseroiva väliaine on kuidun ydin, joka on seostettu maametallilla, joka on yleensä ytterbiumia. Markkinoilla olevat suuritehoiset kuitulaserit perustuvat patentoituun pumppaustekniikkaan, jossa laseroivaa ainetta pumpataan multimode-diodilasereilla. Diodipumpattu energia toimitetaan kuidun ytimeen kuiduilla, jotka ovat liitetty kuitukelaan. Kuidun ydin itsessään muodostaa laserin kaviteetin, sillä sen päissä on Braggs grating – menetelmällä tehdyt peilit, jotka heijastavat ennalta määritettyä aallonpituusaluetta. Tämän päivän tehokkaimmat single-mode kuitulaserit ovat saavuttaneet jo kymmenen kilowatin tehon. (Richardson, et al., 2010, s. B64) (Quintino, et al., 2007, s. 1232)

2.1.3 Kiekkolaser

Kuten kuitulaseritkin, kiekkolaserit ovat uutta teknologiaa. Ensimmäinen suuritehoinen kaupallinen kiekkolaser tuli markkinoille vuonna 2003. Aiemmin kehitetyissä Nd:YAG-lasereissa, käytetään laseroivana väliaineena tankoa, jonka säteenlaatua ja tehoa rajoittavat sen epätasainen lämpöprofiili ja hankala jäähdyttäminen. Kiekkolasereissa tangon sijaan käytetään ohutta kiekkoa, joka on yleensä ytterbiumseostettua alumiini-granaattia (Yb:YAG). Kiekon paksuus on vain noin 0,2mm, ja se on kiinnitetty heijastavaan jäähdytyslevyyn, joka hajaannuttaa lämmön tasaisesti ja jäähdyttää levyä tehokkaasti. Jäähdyttävä levy toimii samalla peilinä lasersäteelle. Koska kiekko on niin ohut, täytyy pumppaava valo heijastaa sen läpi useaan kertaan. Tämä toteutetaan levyä ympäröivällä peilirakenteella. (Löffler, 2013, s. 73)

Yhdestä kiekkolaseryksiköstä voidaan saada useiden kilowattien laserteho, ja yksiköitä voidaan kytkeä rinnan taittopeilien avulla aina neljään yksikköön saakka vielä suuremman tehon aikaansaamiseksi. Kiekkolaserin rakenteen etuina ovat erittäin pieni lämpövaikutus sekä tehotiheys laseroivassa väliaineessa, pieni kirkkausvaatimus pumppaavalle diodilaserille sekä mahdollisuus säteen poikkileikkauksen skaalaukseen. (Löffler, 2013, ss. 74-75)

Kiekkolaser on aallonpituudeltaan sekä säteenlaadultaan hyvin lähellä kuitulasereita. Tämän vuoksi ne soveltuvat hyvin samoihin prosesseihin, ja voivat korvata toisiaan useimmissa laserjärjestelmissä.

2.1.4 Diodilaser

Matalatehoisia diodilasereita on käytetty jo pitkään. Niiden käyttö on ollut laajaa tietotekniikan sovelluksissa, kuten tietokoneiden optisissa kovalevyissä. Diodilasereissa yhdistyy hyvä energian hyötysuhde, pitkä huoltovapaa elinikä, pieni koko sekä lyhyt aallonpituus. Suuritehoisella diodilaserilla on selkeästi erilainen rakenne kuin muilla työstölasereilla, sillä ne koostuvat monista pienistä diodilaserista. Yhdestä tyypillisestä diodilaseremitteristä saadaan maksimissaan muutama watti tehoa, mutta emittoreita voidaan valmistaa yhdelle monoliittiselle puolijohdelevylle jopa 100 W yhteisteholla. Näitä levyjä voidaan taas kasata päällekkäin, ja tällaisesta pakasta voidaan saada useamman kilowatin laserteho. (Coherent, 2009) (Kujanpää, et al., 2005)

Markkinoilla on suuritehoisia diodilasereita, joilla voidaan parhaimmillaan hitsata avaimenreikähitsauksella, mutta laatu ei ole kuitenkaan kuitu- tai kiekkolasereiden luokkaa. Hitsaaminen diodilaserilla on yleensä ohutlevyjen sulattavaa hitsausta. Diodilasereilla on paljon pinnoitus- ja karkaisusovelluksia, joihin diodilaserin suurempi polttopiste soveltuu hyvin. Diodilaser soveltuu erinomaisesti ohuiden levyjen päittäis-, reuna- ja pienaliitosten sulattavaan hitsaukseen. (Kujanpää, et al., 2005, s. 67).

Perinteisen kuitutoimitetun diodilaserin säteenlaatu on noin $100 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, jolla voidaan saavuttaa jopa 40 % hyötysuhde. Jos säteenlaatua parannetaan $40 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, jää hyötysuhteeksi noin 32 % (Havrilla, et al., 2010).

Yksittäisten emittorien yhdistämiselle on useita erilaisia tekniikoita. Kuitenkin korkean tehon tavoittelussa tämä yhdistäminen ja yksittäisten diodien säteenlaatu ovat rajoittavia tekijöitä. Tutkijoiden tavoitteena onkin saada aikaan parempilaatuista sädettä suuritehoisille diodilasereille. (Bachmann, et al., 2007, s. 215)

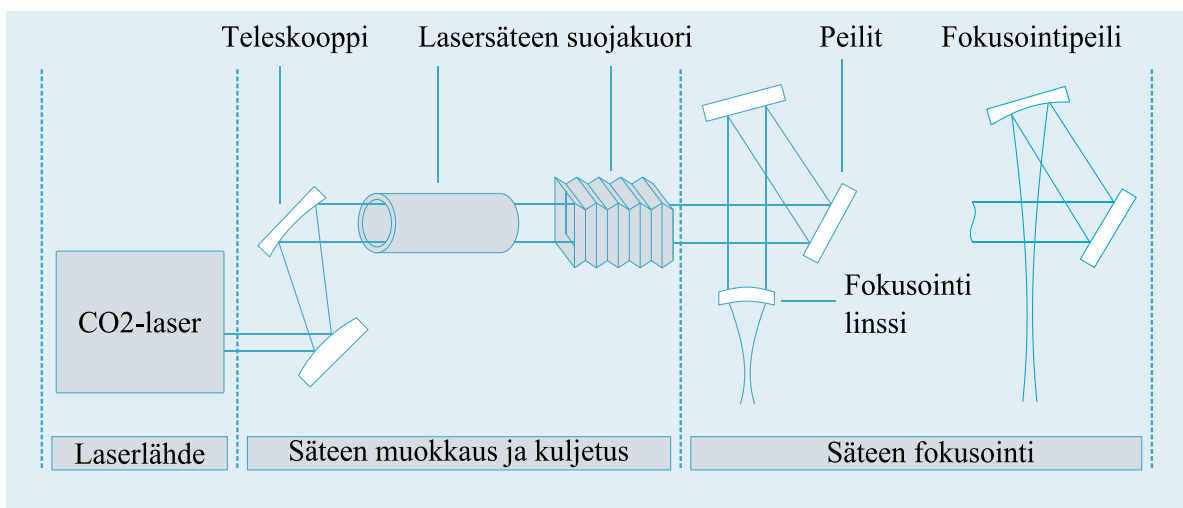
2.2 Laserhitsausjärjestelmät

Laserhitsauskoneeseen tai -soluun tarvitaan laserlähteen lisäksi työstöpää, keino kuljettaa raakasäde työstöpäälle sekä keino liikuttaa työstöpäätä tarkasti ja nopeasti. Laserhitsausprosessit vaativat työasemalta paljon liitoksien tarkkojen toleranssien sekä prosessinopeuksien vuoksi. (Kujanpää, et al., 2005, ss. 75, 92) Työkappale kiinnikkeineen tarvitsee oman kappaleenkäsittelylaitteensa, ja koko työasema tarvitsee sädesuojauksen työturvallisuuden vuoksi, sekä kaasujen kohdepoiston. Laserjärjestelmät tarvitsevat omat jäädyttimensä, virtalähteensä sekä prosessikaasut, sekä kohdepoiston. Lisäksi laitteisto tarvitsee ohjauksen sekä tietojärjestelmän, sekä ammattitaitoisen henkilökunnan.

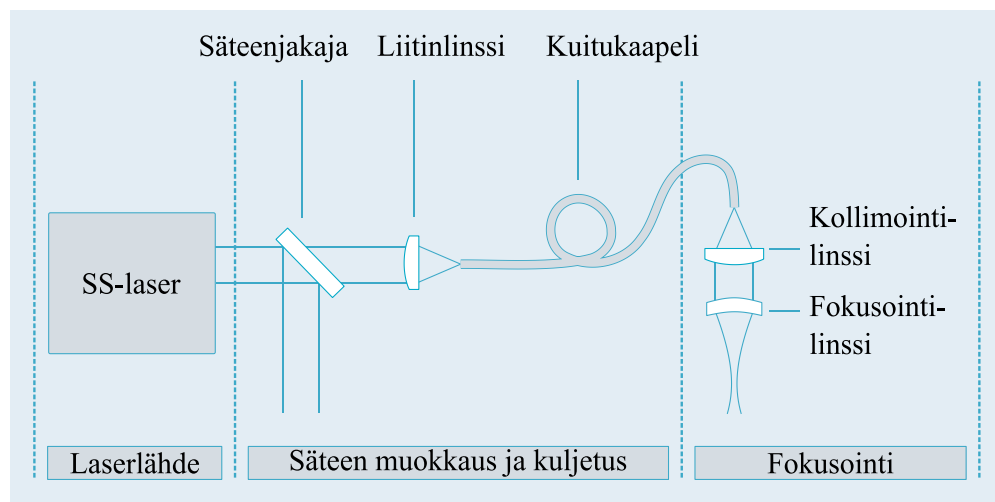
Laserlähteen teknologiaan vaikuttaa käytettävä sovellus. SS- ja CO₂-laserit ovat molemmat varteenotettavia, niin käytettävyyden kuin kustannuksienkin kannalta. Molemmissa on omat hyvät ja huonot puolensa. SSL tarjoaa suuremman sovellusalueen, ja sen aallonpituus soveltuu kuitukuljetukseen, joka mahdollistaa SS- laserin käytön robottivarressa. Hiilidioksidilaserissa on pienempi sovellusalue, sekä sen säteensiirto soveltuu vain peilisiirtoon, joka on sovellettavissa karteesisen kolmiulotteiseen koneeseen.

SS-lasereissa säteen kuljetukseen käytetään optista kuitua, jolla säde ohjataan työstöpäälle. Hiilidioksidilasereissa kuljetukseen käytetään peilioptiikkaa, jolla säde heijastetaan työstöpäälle. Optisen kuidun säteenkuljetus perustuu kokonaisheijastukseen; lasersäde heijastuu kuidun ytimen sisäseinämistä ja säde etenee kuitua pitkin lähes ilman tehohäviötä. Optista kuitua käytettäessä raakasäde fokusoidaan kuidun päässä kvartsilasiyttimeen ja kollimoidaan takaisin raakasäteeksi kuidun toisessa päässä (Kuva 4). Lasertyöstöjärjestelmässä, jossa sädetä ohjataan peileillä, on yleensä yhdestä kuuteen peiliä. Jokainen peili voi lisätä yhden vapausasteen työaseman liikkeisiin, mutta nostaa samalla tehohäviötä. Peilioptiikkaan perustuva säteen kuljetus ja sen fokusointimenetelmä, (Kuva 3).

Optisen kuidun etuja peilioptiikkaan nähden ovat helppo integroitavuus muun muassa nivelrobotteihin, helppo sovellettavuus kolmiulotteiseen työstöön, laserin ei tarvitse olla lähellä työstöasemaa, ja kuitu vakioi polttopisteen koon ja energiajakauman. Kuitujärjestelmien heikkouksia ovat hienoinen säteenlaadun laskeminen, ja pieni energiahävikki kuidun molemmissa päissä. Tämä tosin ei eroa merkittävästi peilioptiikan tehohäviöistä. (Kujanpää, et al., 2005, s. 76)



Kuva 3. Hiilidioksidilaserin säteenkuljetus. (Buchfink, 2007, s. 75)



Kuva 4. SS-laserin säteenkuljetus optisessa kuidussa. (Buchfink, 2007, s. 75)

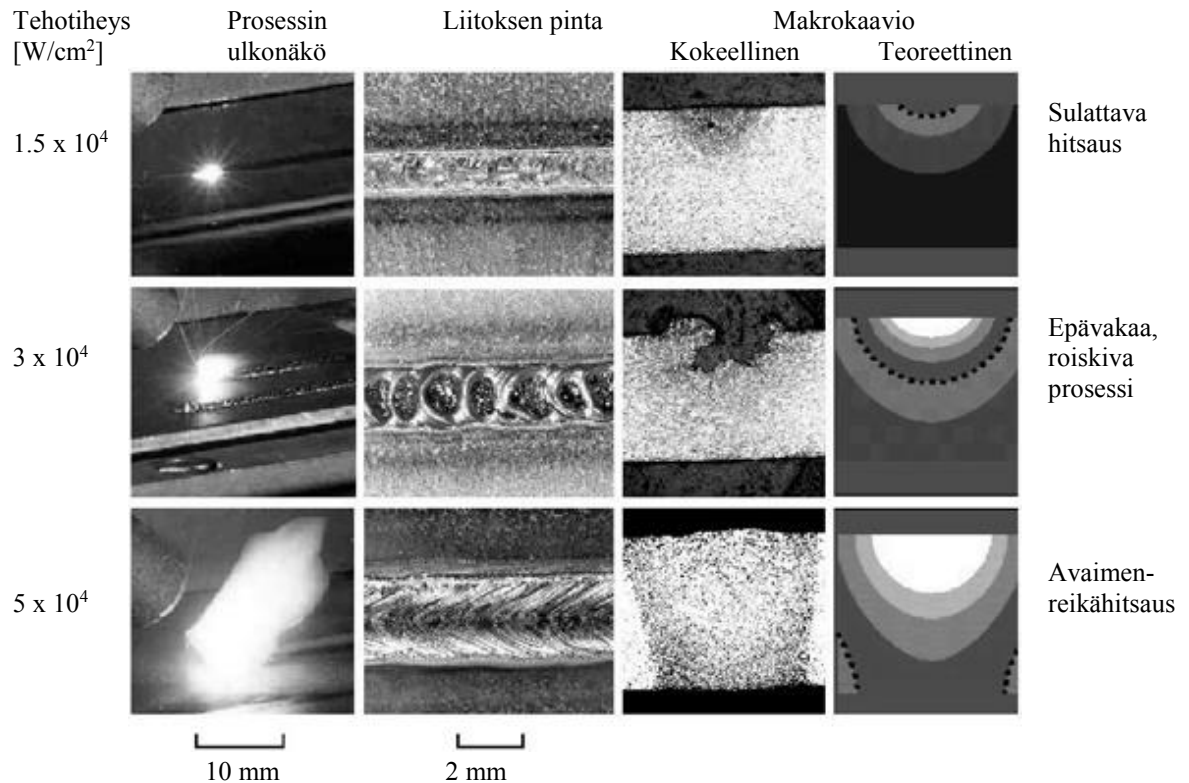
Hitsauspään liike voidaan toteuttaa nivelvarsirobotilla tai portaalirakenteella. Robotin eduksi voidaan laskea, että se on nopea, edullinen, joustava, varma sekä hyvin integroitavissa. Sen haasteiksi voivat osoittautua työalue, suuret tarkkuudet sekä nopeudet sekä robotin kantokyky. (Kujanpää, et al., 2005, s. 101)

2.3 Laserhitsausprosessit

Laserhitsaus tarjoaa suuremman energiatiheyden kuin mikään muu hitsausprosessi, lukuun ottamatta elektronisuihkuhitausta. Lasersäteen polttopisteeseen voidaan saada aikaiseksi niin suuri energiatiheys, että kaikki sädetä absorboivat materiaalit höyrystyvät. Höyrystämällä voidaan synnyttää reikä, jonka taakse sula jähmettyy kun sitä kuljetetaan kappaletta pitkin. Näin syntynyt avaimenreikähitsi on varsin syvä verrattuna hitsin leveyteen. Sen johdosta prosessissa käytetään suhteessa enemmän energiaa liitoksen pintojen sulattamiseen ja vähemmän energiaa kappaleen kuumentamiseen, eli HAZ:n ja muodonmuutosten synnyttämiseen verratessa kaarihitsaukseen. (Steen & Mazumder, 2010, ss. 199-201)

Laserhitausta voidaan tehdä syvätunkeumaisen avaimenreikähitsauksen lisäksi sulattavana hitsauksena, jossa laserihitsauksen työstöparametrit ovat sellaiset, että sulan pinta ei höyrysty lainkaan, ja lämpöenergiaa siirtyy kappaleeseen vain johtumalla ja sekoittumalla. Tällainen laserhitsaus saadaan aikaan pienemmällä laserin tehon intensiteetillä tai riittävän nopealla säteen kuljetusnopeudella. (Dahotre & Harimkar, 2008). Sulattava hitsaus toimii huonosti CO₂-laserhitsauksessa huonon luonnollisen absorption takia.

Laserhitsausprosesseja on siis kaksi, sulattava hitsaus, sekä avaimenreikähitsaus. Kun sulattavan hitsauksen tehosiheyttä nostetaan riittävästi, joudutaan tehosiheysalueelle, jossa prosessi muuttuu epävakaaksi ja roiskivaksi. Kun tehosiheyttä kasvatetaan edelleen, päästään avaimenreikähitsauksen tehosiheysalueelle. (Kuva 5)



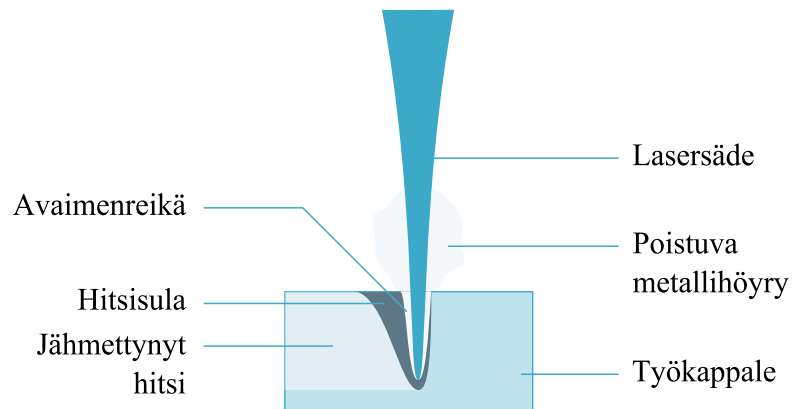
Kuva 5. Tehotiheyden vaikutus hitsausprosessiin, siirtyminen sulattavasta hitsauksesta avaimenreikähitsaukseen. Teräksen hitsausta diodilaserilla. (Petring, et al., 2001)

2.3.1 Avaimenreikähitsaus

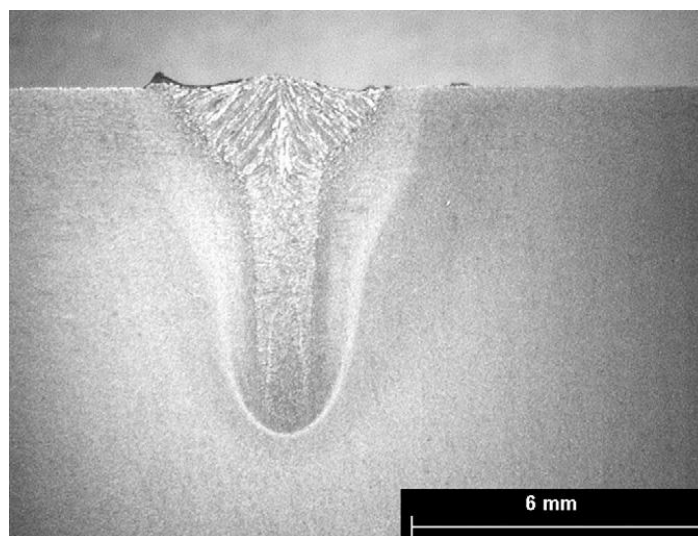
Konepajasovelluksissa hitsaus on yleensä syvätunkeuma- eli avaimenreikähitsausta (Kuva 6, Kuva 7) Polttopiste kohdistetaan pintaan tai noin 25% pinnan alapuolelle. Kun säteen tehtiheys on tarpeeksi suuri, yli 10⁶ W/cm², materiaali höyrystyy kuumaksi höyryksi ja plasmaksi, jotka muodostavat kapean sylinterimäisen reiän, niin kutsutun avaimenreiän. Koska tehtiheys riippuu polttopisteen koosta, tiukkenee polttopisteen koon toleranssi tehon pienentyessä. Kun sädettä kuljetetaan liitosta pitkin, metalli sulaa säteen edestä ja sula virtaa avaimenreiän takaosaan, jähmettyen välittömästi ja muodostaen hitsin. Koska lasersäde toistuvasti heijastuu onkalon seinämistä, on avaimenreikähitsaus hyvin tehokas liittämismenetelmä, ja sen kokonaisabsorptio on suuri. Säteen useaan kertaan heijastuminen avaimenreiässä myös vähentää käytetyn säteen ja materiaalin välisen absorptiokertoimen

merkitystä. Kun avaimenreikä on saavutettu, ei käytettävän laserin aallonpituudella juuri ole merkitystä. (Kujanpää, et al., 2005, s. 159) (Katayma, 2013, ss. 9, 23)

Varsinkin suuritehoisilla, yli 5 kW, hiilidioksidilasereilla hitsattaessa syntyy avaimenreiässä höyrystyvistä kaasusta plasmää. Tämä plasmapilvi voi häiritä hitsausprosessia ja leventää hitsiä. Prosessikaasuilla voidaan puhalttaa plasmapilveä pois säteen tieltä. Lyhemmän aallonpituuden lasereissa plasmanmuodostus on vähäisempää, eikä siitä muodostu samanlaista ongelmaa kuin CO₂-laserilla. Höyrystynyt metalli voi virrata avaimenreiästä niin vahvasti, että sulaa metallia voi roiskua pieninä pisaroina ulos avaimenreiästä. (Kujanpää, et al., 2005, s. 159)



Kuva 6. Avaimenreikähitsauksen periaatekuva.



Kuva 7. Makrovalokuva kuitulaserilla hitsatusta syvätunkeumaisesta avaimenreikähitsistä teräslevylle, teho 8kW, nopeus 1m/min. (Quintino, et al., 2007, s. 1235)

2.3.2 Sulattava hitsaus

Kun tehotiheys on avaimenreikähitsauksen vaatiman 10^6 W/cm^2 alapuolella, onnistuu hitsaus edelleen sulattavana prosessina. (Kuva 8.) Sulattavassa hitsauksessa säteen energia siirtyy kappaleeseen johtumalla TIG-hitsauksen tapaan, jolloin sulasta tulee matala ja leveä. Lasersäde lämmittää kappaletta sen sulamispisteen yläpuolelle, mutta vain sellaiseen pisteeseen saakka, jossa näkyvää kaasun muodostumista ei tapahdu. Sulattava hitsaus soveltuu hyvin pienille seinämäpaksuuksille, sekä osille jotka eivät täytä avaimenreikähitsauksen toleranssivaatimuksia. (Kujanpää, et al., 2005, s. 159) (Bachmann, et al., 2007, s. 286)

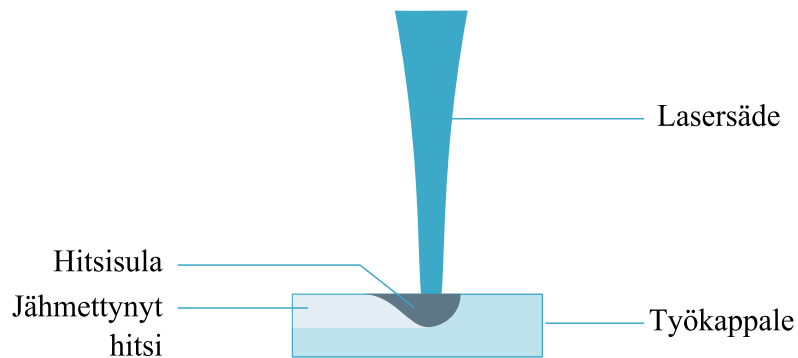
Sulattava laserhitsaus on erityisen rauhallinen ja vakaa prosessi. Hyvä jälki on lähes sääntö, ja varsinkin austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin voidaan saada visuaalisesti erinomainen hitsi. Perinteisiin hitsausprosesseihin verrattuna parempi jälki saadaan pienemmän energiantuonnin ansiosta, joka rajoittaa sulan ja muodonmuutosten määrää, ja myös kontaktittoman prosessin ansiosta, joka johtaa erinomaiseen toistettavuuteen. (Bachmann, et al., 2007, s. 287)

Hitsin syvyys pelkällä sulattavalla laserhitsauksella on pienempi kuin hitsin leveys, sillä lämpö johtuu tasaisesti kaikkiin suuntiin työstettävän kappaleen pinnassa olevasta polttopisteestä. Tämä säteen polttopiste on noin muutamasta viiteentoista millimetriä. Tyypilliset pienimmät tehotiheydet teräksen sulattavalle hitsaukselle ovat muutama 10^4 W/cm^2 . (Bachmann, et al., 2007, s. 287)

Sulattavaa laserhitsausta tehdään hyvin vähän verrattuna avaimenreikähitsaukseen. Yksi sulattavan hitsauksen yleisimpiä sovelluksia on alumiiniseoksien hitsaus, sillä sulattava hitsaus välttää alumiinin avaimenreikähitsauksen ongelmia, kuten huokosia sekä halkeilua. Alumiiniseosten hitsauksesta tekee myös hankalaa sen heikko säteen absorptio sekä korkea lämmönjohtavuus. Sen vuoksi alumiini tarvitsee suurempia tehoja sekä tehotiheyksiä. Toinen mahdollinen sovellus sulattavalle hitsaukselle on eripariliitoksien hitsaaminen, kuten alumiinin ja teräksen välinen hitsi. (Bachmann, et al., 2007, s. 287) (Katayma, 2013, s. 153)

Uusien tehokkaiden diodilasereiden ilmaantuminen tulee nostamaan sulattavan hitsauksen käyttöä, koska nämä ratkaisevat sulattavan hitsauksen yhden suurimmista ongelmista, joka on säteen heikko absorptio. Tämä tulee lisäämään sovelluksia kuten esteettiset hitsit, pinnoittaminen ja juottaminen. (Katayma, 2013, s. 156)

Hiilidioksidilaserit eivät sovellu sulattavaan hitsaukseen yhtä hyvin kuin lyhemmän aallonpituuden työstölaserit, sillä kehnon absorption vuoksi hiilidioksidin sulattavan hitsauksen tehontarve on niin suuri, että prosessi kääntyy helposti höyrystäväksi prosessiksi. Diodilaserit soveltuvat tehtävään oivasti, sillä niillä on kehnomman säteenlaadun vuoksi jo valmiiksi isompi polttopiste, sekä lyhemmän aallonpituuden vuoksi parempi absorptio. Myös muut SS-laser-teknologiat soveltuvat sulattavaan hitsaukseen hyvin.



Kuva 8. Sulattavan hitsauksen periaatekuva.

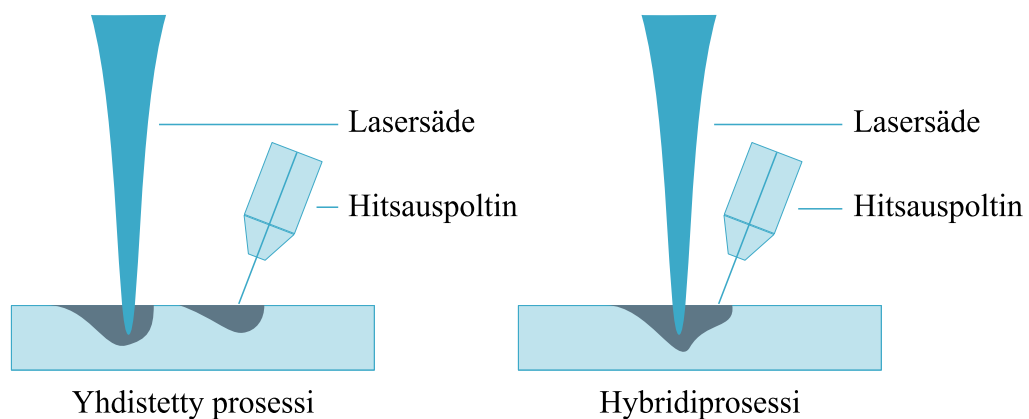
2.3.3 Lisäaineellinen hitsaus

Sekä avaimenreikähitsauksessa että sulattavassa laserhitsauksessa voidaan käyttää lisäainetta. Se monimutkaistaa prosessia, sillä siihen liittyy useita hallittavia lisäparametreja, kuten lisäainelangan kohdistus, kohdistuskulma sekä langansyöttönopeus. Lisäaineen mukaan tuonnilla voidaan lieventää liitoksien toleransseja. Lisäaineella voidaan täyttää ilmarakoja, eikä liitoksen onnistunut laserhitsaus ole lisäaineen kanssa yhtä herkkä liitoksen asetusvirheelle tai ilmaraon vaihtelulle. Haittapuolena lisäaineen käytössä on suurempi lämmöntuonti. (Kujanpää, et al., 2005, s. 161)

Lisäainelangan kanssa suoritettu laserhitsaus on lupaava liittämisteknologia, sillä se säilyttää laserhitsauksen etuja, mutta se tuo helpotusta laserhitsauksen ankariin liitostoleransseihin. Lisäaineellisen laserhitsauksen teollisia sovelluksia ei kuitenkaan ole raportoitu kovinkaan monia. Lisäaineellisen hitsauksen suurimmat haasteet ovat prosessin monimutkaisuus sekä vakaus. Lisäaineen parametrit ovat kriittisen tärkeitä liitoksen laadun ja prosessin vakauden kannalta. (Salminen, 2010a, s. 67) (Yu, et al., 2013)

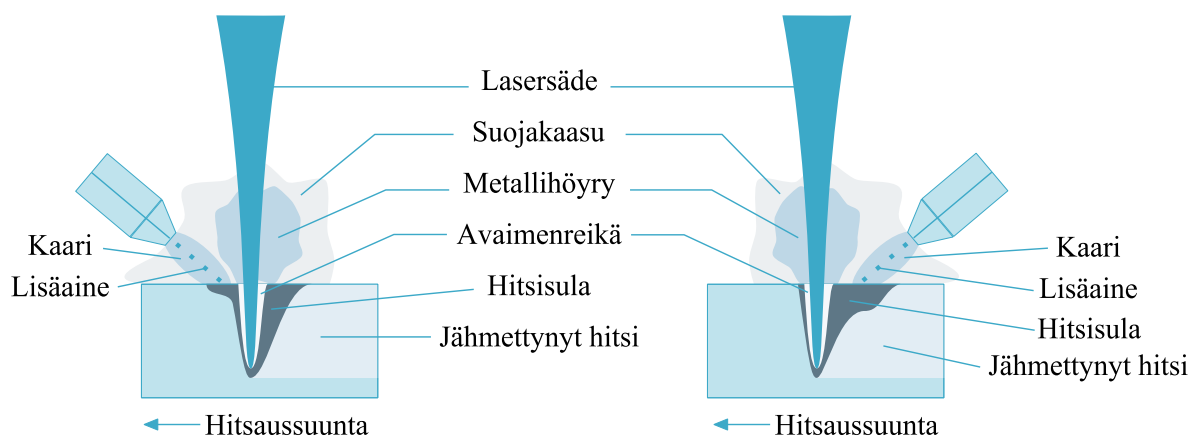
2.4 Hybridihitsaus

Hybridihitsaus kuvaa prosesseja, joissa säteen lisäksi käytetään toista hitsausprosessia, jolla tuodaan samaan sulaan lämpöä sekä yleensä myös lisäainetta. Huomion arvoinen seikka on, että hybridihitsaus on eri asia kuin yhdistetyt prosessit, joissa on kaksi tai useampia hitsisulua. (SFS-EN ISO 15609-6, 2013, s. 2)(Kuva 9). Vakiintunein hybridiprosessi on laserkaarihybridihitsaus. Se tunnetaan vankkana, tehokkaana sekä joustavana menetelmänä. Erityisesti syvätunkeumaisen avaimenreikähitsauksen sekä MIG/MAG- hitsauksen yhdistelmä on toimivaksi todistettu menetelmä. Se laajentaa huomattavasti lasereiden sovellusalueita. (Poprawe, 2010, s. 278)



Kuva 9. Hybridihitsauksessa kaksi prosessia tuo lämpöä samaan sulaan. (SFS-EN ISO 15609-6, 2013, s. 2)

Laser-kaarihybridihitsaus määrittyy fokusoidun lasersäteen ja kaaren yhtäaikaisista prosesseista (Kuva 10), jotka luovat yhteisen sulan, jota kuljetetaan liitosta pitkin. Lasersäde saa aikaan syvätunkeuman ja toinen hitsausprosessi, yleensä kaarihitsausprosessi, leventää ja syventää tunkeumaa sekä nostaa hitsausnopeutta. Kombinaatio tarjoaa huomattavan määrän säätöarvoja, jotka mahdollistavat hitsausprosessin joustavan hallinnan, jolla voidaan sopeutua erilaisiin materiaalien, muodon sekä tuotanto-olosuhteiden vaatimuksiin. (Poprawe, 2010, s. 279) (Väisänen, 2008, s. 13)



Kuva 10. Hybridihitsausprosessi vetävällä ja työntävällä poltinkulmalla.

Hybridihitsauksen hyödyt laserhitsaukseen nähden liittyvät suurimmaksi osaksi löysempiin railotoleransseihin tuodun lisäaineen ansiosta. Lämmöntuonnista tulee hallittava ja se säilyy vähäisenä. Prosessilla voidaan hitsata hieman suurempaan ilmarakoon pienemmällä laserteholla, ja levyjen korkeuserot tasoittuvat sulavammin. Vaatimukset liitospinnoille ja reunoille eivät ole yhtä tiukat, eikä kappaleen kiinnitys ole aivan yhtä tarkkaa. Kaarihitsausmenetelmän lisäaineen tuonnilla voidaan hallita liitoksen mikrorakennetta, kovuutta ja sitkeyttä. (Poprawe, 2010, s. 280) (Väisänen, 2008, ss. 13-14)

Edut pelkkään kaarihitsaukseen ovat huomattavat. Hitsausnopeus on paljon nopeampi, ilma-aton hitsaus tulee mahdolliseksi, ja syviäkin liitoksia voidaan hitsata yhdellä palolla. Lämmöntuonti on matalampi, joka vähentää myös muodonmuutoksia, ja T-liitoksissa ja kulmissa on pienempi A-mitta, joka tuo enemmän tilaa. Tuloksena on joustavampi ja

tehokkaampi prosessi, jolla päästään korkeampaan tuottavuuteen sekä parempaan laatuun. (Poprawe, 2010, s. 280)

Tuotesuunnittelussa tulisi huomioida, että laserhybridihitsaus soveltuu erityisen hyvin pitkille kappaleille, joissa laserhitsauksen vaatiman ilmaraottoman liitoksen toteuttaminen voi osoittautua haasteelliseksi. Tunnetuimmat prosessin käyttäjät lienevät telakka- ja autoteollisuus, joissa hybridihitsausta on käytetty jo monia vuosia. (Fellman, 2008, s. 36)

2.5 Laserhitsauksen parametrit

Laserhitsauksen parametrit voidaan jakaa kolmeen kategoriaan, joita ovat säteen parametrit, prosessin parametrit sekä perusaineen parametrit. Sädeparametrit riippuvat käytettävästä laitteistosta, eikä niitä yleensä muuteta lainkaan. Prosessiparametrejä on helppo muuttaa sopiviksi eri hitsaustapahtumille. Perusaineen parametrit, eli käytettävä materiaali, materiaalin ainepaksuus sekä muoto vaikuttavat hitsauksen lopputulokseen. (Kujanpää, et al., 2005, s. 164)

Sädeparametrejä ovat lasersäteen polarisaatio, moodi, säteen halkaisija, divergenssi sekä säteenlaatu. Polarisaatio määräytyy työaseman optiikan mukaan ja moodiin voidaan vaikuttaa vain resonaattorin sisäisellä optiikalla. Säteenlaatu on lasertekniikkakohtainen ominaisuus. Tasopolarisoidulla säteellä hitsattaessa polarisaatiotason suuntaan saavutetaan syvempi tunkeuma kuin hitsattaessa polarisaatiotasoa kohtisuoraan. Ympäripolarisoidulla säteellä hitsattaessa tunkeuma on näiden tunkeumien välissä, mutta tunkeuma on sama kaikkiin hitsausuuntiin. Lasersäteen intensiteetin jakaumaan säteen poikkileikkauksessa kutsutaan moodiksi. Moodien kuvaamiseen käytetään TEM (transverse electromagnetic) moodeja. TEM₀₀ -tyyppisellä moodilla teho on keskittynyt säteen keskelle, ja se on TEM-moodeista parhaiten fokuoitivissa. Suuritehoisten työstölasereiden epästabiilien resonaattoreiden moodit ovat yleensä mallia TEM₀₁, joka tunnetaan myös nimellä multimoodi. Jos sädettä muokataan, esimerkiksi kuljettamalla sädettä siirtokuitua pitkin, tulee siitä satunnaispolarisoitua ja sen TEM-moodi katoaa, ja säteen poikkileikkauksen tehojakaumasta tulee hyvin tasainen. (Kujanpää, et al., 2005, s. 164). Moodilla on merkitystä

lähinnä CO₂-lasereilla. Kuitua käyttävillä lasereilla kuitu ”tasaa” moodin ja kuidun ulostulossa moodi on aina niin sanottu top-hat-moodi. Sen leveys riippuu kuidun paksuudesta.

Laserhitsauksen parametreja ovat säteen, säteen kuljetuksen, suojakaasun sekä materiaalin ominaisuudet. Säteen kuljetuksen parametrejä ovat kuljetusnopeus, polttopisteen sijainti, liitosmuoto ja railon toleranssit. Mahdollisen suojakaasun parametreja ovat koostumus, suojan muoto sekä paine. Materiaalin ominaisuuksina ovat koostumus sekä pinnan kunto. (Steen & Mazumder, 2010, s. 209)

2.5.1 Aallonpituus

Hiilidioksidilasereiden 10,6 mikronin aallonpituudella ja SS-lasereiden noin mikronin aallonpituudella on joitain eroavaisuuksia. SS-laserit ovat erityisen toimivia sulattavassa hitsauksessa sekä hitsattaessa hankalasti heijastavia materiaaleja, kun hiilidioksidilaserit ovat parempi valinta paksujen materiaalien hitsauksessa, ja silloin kun roiskeilla on merkitystä (**Taulukko 2**). (Locke & Havrilla, 2013)

Taulukko 2. Yleiset suuntaviivat aallonpituuden kannalta. (Locke & Havrilla, 2013)

	SSL ~ 1 μm	CO ₂ laser ~ 10 μm
Matala tunkeuma (<~6 mm)	Hyvä suorituskyky	Hyvä suorituskyky
Syvä tunkeuma (>~6 mm)	Hyvä suorituskyky	Hyvä suorituskyky
Sulattava hitsaus	Hyvä suorituskyky	Heikko soveltuvuus
Heijastavat materiaalit	Hyvä suorituskyky	Keskimääräinen soveltuvuus
Oksidi-vapaat saumat	Hyvä suorituskyky	Keskimääräinen soveltuvuus
Roiskeet	Heikko (kun >6 m/min)	Hyvä suorituskyky

2.5.2 Hitsausnopeus

Laserhitsin tunkeuman syvyys laskee, jos hitsausnopeutta lasketaan tehoa muuttamatta. Jos sekä hitsausnopeutta että laserin tehoa nostetaan siten, että energiantuonti säilyy samana, kapenee hitsi verrattuna hitaampaan hitsausnopeuteen samalla energiantuonnilla. Eri materiaali- ja ainepaksuusyhdistelmille löytyy erilaisia sopivia kombinaatioita

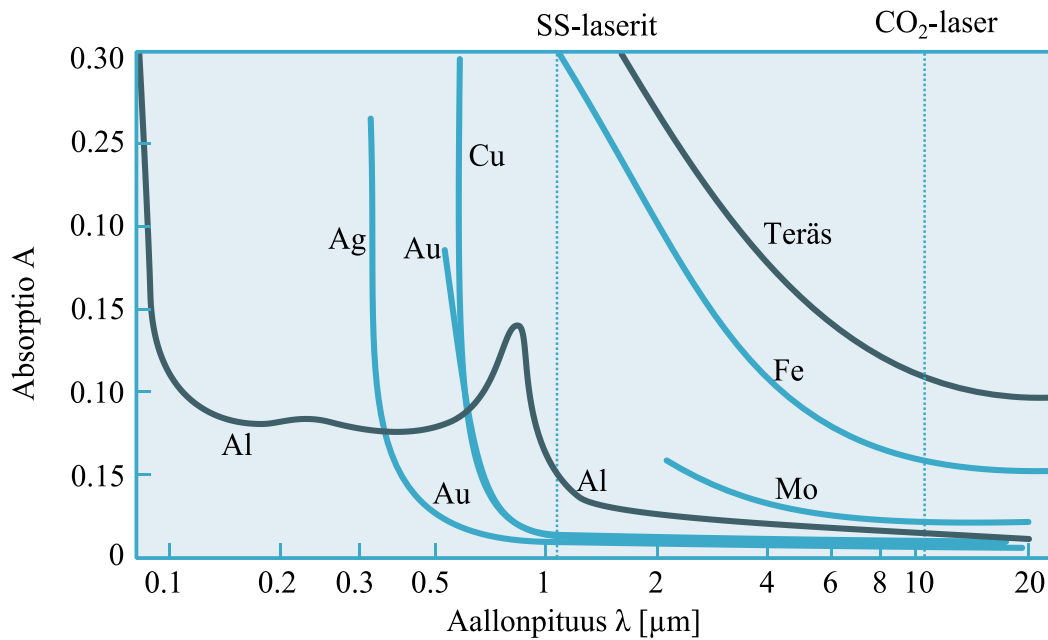
hitsausnopeuden ja muiden parametrien välille, joilla voidaan hitsata läpätunkeuma-avaimenreikähitsausta. Hitsausnopeuden alarajan määrittää nopeus, jossa sulan määrä kasvaa niin suureksi että se luhistuu painovoiman vaikutuksesta. Hitsausnopeuden ylärajaa määrittää tunkeuman saavuttaminen. Käytännön hitsausnopeudelle voidaan määrittää rajat näiden karkeiden ääriarvojen sisälle, esimerkiksi hitsausvirheiden ja hitsin ominaisuuksien mukaan. Usein liitoksen toleranssien vuoksi hitsiltä vaaditaan jokin minimileveys, jonka vuoksi suurinta mahdollista hitsausnopeutta ei aina voida käyttää. Tavallisesti sopivat työstöparametrit löydetään käytännön kokeiden perusteella. (Kujanpää, et al., 2005, ss. 166, 158)

2.5.3 Teho

Lasereiden tehoa mitataan kilowateissa. Tehosta puhuttaessa on tärkeää erottaa laserin ulostuloteho sekä kappaleen pinnalle päätyvä teho. Kappaleen pinnalle päätyy vähemmän tehoa säteen kuljetukseen häviävän tehon vuoksi. Ero voi olla jopa kilowatteja, eli hyvin merkittävä. Kappaleen työstön kannalta oleellinen arvo on kappaleen pinnalle päätyvä teho. Suurempi teho kasvattaa hitsauksen tunkeumaa avaimenreikähitsauksessa, mutta tunkeuman syvyys ei kuitenkaan ole suoraan verrannollinen tehoon, sillä hyvälaatuinen säde voi saada aikaan jopa kaksi kertaa suuremman tunkeuman kuin huonompilaatuinen. (Kujanpää, et al., 2005, s. 165)

2.5.4 Heijastuvuus ja absorptio

Absorptio on tärkeä laserin ja materiaalin vuorovaikutukseen vaikuttava tekijä. Materiaalin absorptiokerroin riippuu sekä lasersäteen aallonpituudesta että materiaalin heijastuvuudesta (Kuva 11), joka riippuu materiaalista sekä sen lämpötilasta. Hiilidioksidilaserin noin 10 mikrometrin aallonpituudella on huomattavasti heikompi absorptio eri materiaaleille kuin noin yhden mikrometrin SS-lasereilla, ja varsinkin heijastavammilla materiaaleilla hiilidioksidilaserin aallonpituuden korkea heijastuvuus voi muodostua ongelmaksi. Lämpötilalla voi olla suurikin merkitys kappaleen lasersäteen absorptioon; kylmällä materiaalilla voi olla merkittävästi heikompi absorptio kuin vastaavalla kuumalla kappaleella. Muita absorptioon vaikuttavia tekijöitä ovat säteen tulokulma sekä kappaleen pinnanlaatu. (Dahotre & Harimkar, 2008, s. 36)



Kuva 11. Eri materiaalien absorptiojakaumia eri aallonpituuksilla. (Schubert, et al., 1998)

2.5.5 Tehotiheys

Tehotiheys kappaleen pinnalla riippuu muutamasta tekijästä. Siihen vaikuttaa käytettävän laserin aallonpituus sekä polarisaatio absorptioon vuoksi, laserin teho, joka polttopisteen kanssa vaikuttaa suoraan tehotiheyteen, sekä säteenlaatu, joka määrittää kuinka pieneksi polttopisteeksi raakasäde on mahdollista fokusoida. (Salminen, et al., 2010b, s. 47)

Tehotiheydellä sekä säteen kuljetusnopeudella on suuri vaikutus vuorovaikutukseen kappaleen ja lasersäteen välillä. Muuttamalla näitä parametreja kappaletta voidaan joko kuumentaa, sulattaa, sulattaa ja höyrystää, höyrystää, höyrystää ja ionisoida tai jopa suoraan sublimoida, eli muuttaa ainetta suoraan kiinteästä olotilasta höyryksi. (Buchfink, 2007, s. 110)

3 STANDARDIT

Laserturvallisuudelle on useita standardeja. Näistä maailmanlaajuisesti keskeisin on kansainvälinen IEC 60825-1. Se sisältää laitteistoluokittelun, vaatimukset sekä altistumisrajat.

Laserhitsausta ja laser-kaari-hybridihitsausta koskevia standardeja ovat (en-päätteiset ovat englanninkielisiä):

- SFS-EN ISO 15609-4:en Hitsausohjeet laserhitsaukselle
- SFS-EN ISO 15609-6:en Hitsausohjeet laser-kaari-hybridihitsaukselle
- SFS-EN ISO 15614-11:en Menetelmäkokeet elektronisuihku- ja laserhitsaukselle
- SFS-EN ISO 15614-14:en Menetelmäkokeet laser-kaari-hybridihitsaukselle
- SFS-EN ISO 15613 Hyväksyntä esituotannolliselle hitsauskokeelle
- SFS-EN ISO 15607 Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä, yleisohjeet, sekä
- SFS-EN ISO 3834-1...5 Sulahitsauksen laatuvaatimukset
- SFS-EN ISO 13919-1...2:en Laserhitsauksen hitsiluokat teräkselle ja alumiinille.

3.1 Laserturvallisuus

Eurooppalainen sähköalan standardisoimisjärjestö GENELEC on ottanut käyttöön kansainvälisen standardin IEC 60825-1 käyttöön antamalla sille EN-tunnuksen, joka on edelleen vahvistettu Suomessa luetteloimalla sille SFS-EN tunnus. Standardien noudattaminen ei ole pakollista EU:n alueella, mutta ne ovat hyvin käytännöllisiä sekä usein ainoa tapa osoittaa, että laite täyttää pienjännitedirektiivin 73/23/EEC turvallisuusvaatimukset. Työntekijöiden suojelun vuoksi on julkaistu myös Euroopan parlamentin ja neuvoston optista säteilyä koskeva direktiivi 2006/25/EY, jossa on muun muassa altistumisrajat säteilylle. Onneksi laserturvallisuudesta vallitsee maailmanlaajuisesti yksimielisyys, ja eroavaisuudet standardien ja direktiivien välillä ovat pieniä.

Kansainvälisen standardin IEC 60825-1 mukaan laserit on luokiteltu niiden vaarallisuuspotentiaalin mukaan. Laserit jaetaan intensiteettikynnyksien mukaan MPE-luokkiin (MPE eli maximum permissible exposure, suom. sallittu enimmäisaltistusmäärä). Koska työstölasereilta vaaditaan suuria tehoja, ne asettuvat automaattisesti korkeimpaan eli neljänteen luokkaan. Suojaamalla säteenkuljetus ja prosessointialue, riski täytyy pudottaa turvalliselle alueelle, eli koko järjestelmän turvallisuusluokitus täytyy saada luokkaan yksi. Suojatun alueen sisäpuolella oleva MPE saa ylittyä, mutta suojatun alueen ulkopuolella säteilytaso täytyy valvoa tiukasti. Laserprosessointilaitteen suojauksen sisäpuolella saa työskennellä vain koulutetut työntekijät. (Bachmann, et al., 2007, s. 209)

Näkyvän valon sekä osittain infrapunavalon aallonpituuksilla ihmisiho kestää laservaloa paljon paremmin kuin silmät. Tämä johtuu lähinnä silmän sarveiskalvon ja mykiön fokuointikyvystä, joka fokusoii myös laservaloa tällä aallonpituudella ja voi nostaa säteen tehotiheyttä verkkokalvolla jopa 300 000-kertaiseksi. Tämä pätee vain näkyvän ja lähellä olevan infrapunavalon aallonpituuksille, kun pidemmän aallonpituuden infrapunasäteet absorboituvat sarveiskalvon ulompaan kerrokseen. Ihmissilmässä hiilidioksidilaserin säde absorboituu sarveiskalvolle eikä etene syvemmälle. Lyhemmän aallonpituuden laserien, kuten kuitu-, kiekko- ja diodilaserien säde etenee mykiöön ja verkkokalvolle asti, mikä tekee niistä silmälle hyvin vaarallisia. Näiden kanssa työskennellessä on erittäin tärkeää käyttää suojalaseja, jotka ovat kyseiselle aallonpituudelle tarkoitettuja, vaikkakin myös CO₂-lasereilla tulee käyttää asianmukaisia suojalaseja. (Bachmann, et al., 2007, s. 209)

3.2 Laatuvaatimukset

Standardissa SFS-EN ISO 3834 Sulahitsauksen laatuvaatimukset esitetään laatuvaatimukset metallien sulahitsausprosesseille. Tällä standardilla valmistaja voi osoittaa kykynsä valmistaa tuotteisiinsa määritettyä laatua vastaavia hitsausliitoksia. Standardi on jaettu viiteen osaan:

- Osa 1: Laatuvaatimusten valintaperusteet
- Osa 2: Kattavat laatuvaatimukset
- Osa 3: Vakiolaatuvaatimukset

- Osa 4: Peruslaatuvaatimukset
- Osa 5: Tarvittavat asiakirjat standardin ISO 3834-2, ISO 3834-3 ja ISO 3834-4 mukaisten vaatimusten osoittamiseksi (SFS-EN ISO 3834-1, 2006)

3.3 Hitsausluokat

Standardi SFS-EN ISO 13919 antaa ohjeet hitsausvirheiden luokitteluun teräksen elektronisekä laserhitsatuille liitoksille. Standardi tarjoaa liitoksille kolme tasoa. Luokat liittyvät tuotannossa valmistettavaan laatuun, eivät tuotteen tarkoitukseen sopivuuteen. Standardi on jaettu kahteen osaan. Ensimmäinen osa määrittelee hitsausluokat teräслиitoksille, ja toinen osa alumiiniliitoksille. (SFS-EN ISO 13919-1:en, 1996)

Standardin SFS-EN ISO 13919-1 hitsausluokat soveltuvat kaiken tyyppisille laserilla hitsatuille seostamattomille ja seostetuille teräслиitoksille, jotka on hitsattu joko lisäainelangan kanssa tai ilman, kun aineenpaksuus on vähintään 0,5 mm. Hitsausluokat ovat D-, C- sekä B- luokka, joista B-luokka on kaikista tiukin. Näiden kolmen luokan on tarkoitettu kattavan suurimman osan käytännön sovelluksista. (SFS-EN ISO 13919-1:en, 1996)

Standardin SFS-EN ISO 13919-2 hitsausluokat soveltuvat kaiken tyyppisille laserilla hitsatuille seostamattomille ja seostetuille alumiiniliitoksille, jotka ovat hitsattu joko lisäainelangan kanssa tai ilman, kun aineenpaksuus on vähintään 1 mm. Hitsausluokat ovat D-, C-, sekä B-luokka, joista B-luokka on tiukin. (SFS-EN ISO 13919-2:en, 2001)

Standardissa määritellään luokittain liitoksille sallitut virherajoja. Standardissa käsitellään rajat kahdeksalletoista eri teräслиitosten virheelle sekä kahdellekymmenelle eri alumiiniliitosten virheelle, joihin kuuluvat muun muassa halkeamat, huokoisuuden eri tyyppisiä, kutistumat, huono sulautuminen, vajaa- ja ylitunkeuma, juuren ja kuvun virheet, roiskeet sekä liitettävien pintojen kohdistusvirheet. (SFS-EN ISO 13919-1:en, 1996)

3.4 Hitsausohjeet

Hitsausohjeesta WPS (welding procedure specification) on apua hitsauksen suunnittelussa, tuotannossa sekä laadunvalvonnassa, ja sen avulla on helpompi täyttää hitsille asetetut vaatimukset. Hitsausohjeet tulee hyväksyä ennen varsinaista tuotantoa. Valmistaja laatii ensin alustavan hitsausohjeen, pWPS:n (preliminary welding procedure specification). Laserhitsaukselle käyviä tapoja hyväksyä alustava hitsausohje ovat menetelmäkoe, hyväksyminen aikaisemman hitsauskokemuksen perusteella, hyväksyminen standardimenetelmän avulla sekä hyväksyminen esituotannollisella kokeella. (SFS-EN ISO 15607, 2003)

SFS-EN ISO 15609-4 (Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure specification - Part 4: Laser beam welding) on standardi laserhitsattavan liitoksen hitsausohjeelle. Saman standardin osa 6, SFS-EN ISO 15609-6 (Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure specification. Part 6: Laser-arc hybrid welding) taas käsittelee laser-kaari - hybridiprosessin hitsausohjetta. On hyvä huomata, että hitsausohjetta ei voi suoraan siirtää toiselle työasemalle tehtäväksi. Molemmat hitsausohjeet ovat hyvin yksityiskohtaisia. Niissä määritellään kaikki hitsausprosessin muuttujat laitteistosta ja valmistajasta hitsausparametreihin, joita ovat muun muassa:

- Valmistaja
- Käytettävä laitteisto
- Liitettävät materiaalit sekä niiden paksuudet
- Mahdolliset lisäaineet
- Liitosmuoto piirroksineen
- Kiinnikkeet
- Hitsausasennot
- Tuet
- Hitsaustekniikka piirroksineen
- Hitsausparametrit

- Esi- ja jälkilämpökäsittelyt
- Hitsauksen jälkeiset työvaiheet

(SFS-EN ISO 15609-4, 2009) (SFS-EN ISO 15609-6, 2013)

3.5 Menetelmäkokeet

Alustava hitsausohje pWPS voidaan hyväksyä varsinaiseksi hitsausohjeeksi myös menetelmäkokeella. Laserhitsattavan liitoksen menetelmäkokeelle on oma standardi ISO 15614-11 (Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 11: Electron and laser beam welding). Standardissa kerrotaan kuinka testikappaleet valmistetaan, ja kuinka niille tehdään rikkova ja rikkomaton aineenkoetus. Menetelmäkokeen jälkeen voidaan tehdä hitsausmenetelmän hyväksymispöytäkirja WPQR (Welding Procedure Qualification Record), joka sisältää tarvittavat tiedot alustavan hitsausohjeen hyväksymiseen. (SFS-EN ISO 15614-11, 2002)

Laser-kaari –hybridihitsauksen menetelmäkokeille on olemassa oma standardinsa, SFS-EN ISO 15614-14 (Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 14: Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys). Siinä käsitellään hybridihitsauksen menetelmäkokeet teräksille, nikkelille sekä nikkelioksille. Sen sisältö on hyvin samankaltainen laserhitsauksen menetelmäkokeestandardin kanssa; standardista löytyy ohjeet testikappaleen tekoon, niiden testaukseen, pätevyysalueisiin sekä hyväksymispöytäkirjojen tekoon. (SFS-EN ISO 15614-14, 2013)

3.6 Aikaisempi kokemus

Myös aikaisempi kokemus riittää alustavan hitsausohjeen hyväksyntään, mikäli pWPS on standardin EN ISO 15609 soveltuvan osan mukainen. Aikaisempi hitsauskokemus on osoitettava dokumentoidulla selvityksellä ja/tai testaustuloksilla. Lisäksi hitsaavasta tuotannosta tai tyydyttävästä käyttösuorituksesta on tehtävä yhteenveto, ja siihen sisältyy tyydyttävä dokumentaatio sekä yhteenveto vähintään puolen vuoden hitsaavasta tuotannosta

tiettynä ajanjaksona tai hitsien soveltuvuutta käytössä tiettynä, esimerkiksi viiden vuoden, ajanjaksona. Hyväksymispöytäkirja WPQR rakentuu aikaisemman hitsauskokemuksen dokumentaatiosta. (SFS-EN ISO 16511, 1995)

3.7 Standardihitsausohje

Myös standardihitsausohjeen käyttäminen soveltuu laserhitsattavan pWPS:n hyväksymiseen. Standardihitsausohje tulee olla dokumentoitu standardin SFS-EN ISO 15612 mukaisesti, ja sitä voidaan käyttää ilman lisätestejä edellyttäen, että standardihitsausohjeen käyttäjä täyttää standardin EN 729 tarkoituksenmukaisen osan vaatimukset ja hitsauslaitteet kykenevät samoihin parametreihin, joita ohjeessa on käytetty. (SFS-EN ISO 15612, 1995)

3.8 Esituotannollinen hitsauskoe

Alustavan hitsausohjeen hyväksyntää esituotannollisella hitsauskokeella tulee käyttää, kun standardikoe kappaleet eivät muistuta tarpeeksi hitsattavaa liitosta. Esituotannollinen hitsauskoe tarkoittaa koekappaleen tekemistä, jolla simuloidaan tuotantoliitosta, jossa otetaan huomioon kappaleen mitat, jäykkyys, lämmönjohtumiserojen vaikutus sekä rajattu luoksepäästävyys. Kappaleen tulee simuloida todellisia tuotanto-olosuhteita mahdollisimman tarkasti, niin kiinnittimien kuin silloitusliitostenkin kannalta. WPQR on esituotannollisen hitsauskokeen tilanteessa selostus, josta löytyy koekappaleiden arviointien tulokset, mukaan lukien uusintakokeiden tulokset. Tällaiselle esituotannollisen hitsauskokeen WPQR:lle käytetään tiettyä WPQR-esitysmuotoa. (SFS-EN ISO 15613, 1995)

4 TUOTTEEN SUUNNITTELU

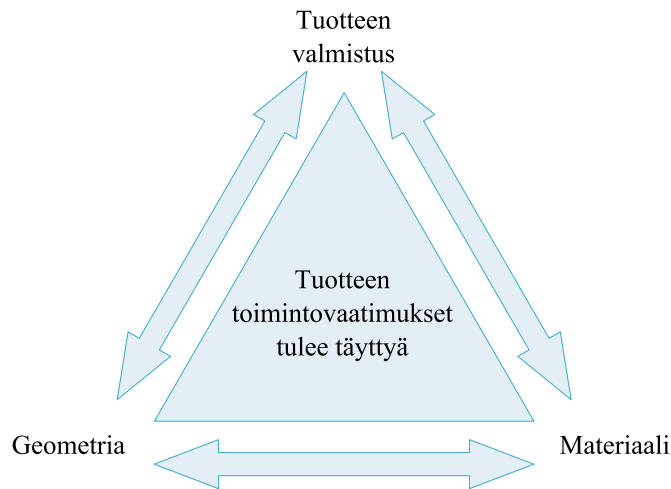
Kaupallisessa voittoa tekevässä yrityksessä tuotteiden tehtävänä on tuottaa voittoa. Se tarkoittaa sitä, että niitä täytyy voida valmistaa ja myydä hyvällä katteella. Katetuottoon vaikuttavat tuotteen laatu, valmistuksen kustannukset, sekä tuotekehityksen kesto ja hinta. Tuotesuunnittelu on siis vaativa tehtävä, sillä tuotteen käytettävyys ja tuotteen kustannukset määräytyvät suunnitteluvaiheessa. Suunnittelun ja valmistuksen välinen yhteistyö on onnistuneen kehitystyön suurimpia ongelmia. (Lempiäinen & Savolainen, 2003, ss. 3-4)

Valmistus- ja kokoonpanoystävällinen tuotesuunnittelu (Design for Manufacturing and Assembly, DFMA) pyrkii rikkomaan muurin tuotteen suunnittelusta ja valmistuksesta vastaavien välillä. Tuotteen toimintovaatimukset tulee aina täyttää. Ne tulisi täyttää siten, että tuotteen geometria- ja materiaalivalinnat ovat mahdollisimman kannattavat valmistuksen kannalta (Kuva 12). (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 7)

Eskelinen (Eskelinen & Karsikas, 2013) listaa kirjassaan DFMA:n päämääräksi suunnittelun ja valmistuksen paremman integroinnin, säästöt tuotekehityksen kuluvasta ajasta ja rahasta, tuotteen laadun ja luotettavuuden parantamisen, läpimenoaikojen lyhentämisen sekä nopeampaa reagointia asiakkaan toiveisiin. Valmistuksen näkökohdat tulisi ottaa huomioon heti tuotteen suunnittelun alkuvaiheista lähtien, eikä vasta kun tuote tulee tuotantoon. Uudelleensuunnittelu vie paljon aikaa ja rahaa. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 7)

4.1 DFMA

DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) tarkoittaa valmistus- ja kokoonpanoystävällistä tuotesuunnittelua, jonka tarkoituksena on saattaa yhteen tuotteen suunnittelu ja valmistus. DFMA on joukko työkaluja, joilla tavoitellaan suunnittelun ja valmistuksen integroinnin lisäksi säästöjä tuotekehityksessä, parempaa laatua ja luotettavuutta tuotteelle, nopeampaa valmistusta, parempaa tuottavuutta sekä nopeampaa reagointiaikaa asiakkaan toiveisiin. (Eskelinen & Karsikas, 2013)



Kuva 12. Tuotantovaatimusten tulee aina täytyä, mutta geometrian ja materiaalin kannalta optimaalisella tavalla. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 7)

Pelkkä DFM, eli valmistusystävällinen suunnittelu, analysoi yksittäisiä osageometrioita sekä prosessivalintoja materiaalin kannalta, valmistusprosesseja sekä koneistuskustannuksia. DFA eli kokoonpanoystävällinen suunnittelu keskittyy tuotekonseptien analysointiin sekä olemassa olevien tuotteiden kokoonpanojen yksinkertaistamiseen. Vaikka DFA ja DFM voidaan ajatella olevan erillisiä filosofioita, yleensä näitä molempia pidetään DFM:n keskeisinä elementteinä. (Kamrani & Nasr, 2010, s. 142)

Anderson, (Anderson, 2004) määrittelee kirjassaan, että DMF tarkoittaa ennakoivaa suunnittelua jossa optimoidaan kaikki tuotannolliset funktiot, joita ovat valmistus, kokoonpano, testaaminen, hankinta, toimitus, palvelu sekä varmistetaan paras mahdollinen kustannustehokkuus, laatu, luotettavuus, asiakastyytyväisyys ja turvallisuus. (Anderson, 2004)

Koska erilaisilla valmistusmenetelmillä on erilaiset ominaisuudet, eri valmistusmenetelmille on olemassa myös omat valmistusmenetelmäkohtaiset suunnitteluohjeet (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 9). Laserhitsauksen DFMA-sääntöihin perehdytään kappaleessa laserhitsattavan tuotteen suunnittelu.

4.2 DFMA:n tavoitteet ja toteuttaminen

DFMA:n tavoitteena on murtaa muuri suunnittelun ja valmistuksen välillä, joka Eskelisen (Eskelinen & Karsikas, 2013) mukaan voi johtua viidestä pääsyyistä. Ensimmäisenä standardoitujen tai modulaarisien ratkaisujen pakonomainen hyödyntäminen, jolloin suunnittelija helposti asettaa toiminnalliset moduulit valmistuksellisten moduulien edelle. Tuotteen valmistaja haluaa kehittää tuotetta laitekantansa mukaan, eikä tuotteen vaatimusten mukaan. Kolmantena on organisaatorakenteesta johtuva suunnittelun ja valmistuksen erillään työskentely ja vuorovaikuttamattomuus. Neljänneksi syyksi Eskelinen määrittää suunnittelijoiden puutteellisen tietämyksen valmistusmenetelmistä, ja näiden DFMA-säännöistä. Viidennes syy on valmistuksen sekä suunnittelun ulkoistus, jonka erottava vaikutus valmistuksen ja suunnittelun välillä on selvä. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 9)

DFMA:n konkreettisia toteuttamiskeinoja ovat

- Osien määrän minimointi, tuotteen yksinkertaistaminen
- Modulaaristen ja standardoitujen ratkaisujen käyttäminen
- Rakenneosien monikäyttöisyys
- Erilaisten kiinnitysosien ja –muotojen välttäminen
- Asennusvaiheiden mahdollistaminen yhdestä suunnasta
- Valmistusmenetelmien ja –vaiheiden minimointi
- Valmistusmenetelmäkohtaisien DFMA-sääntöjen noudattaminen
- Huomioimalla kiinnittimien ja muiden työkalujen vaatima tila

(Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 9)

Tuotesuunnittelun ja valmistuksen väliset linkit asettuvat neljälle eri tasolle, joita ovat yritystaso, tuoteperhetaso, rakennetaso sekä komponenttitaso. Yritystasolla voidaan miettiä, valmistetaanko tai suunnitellaanko päällekkäisiä tuotteita eri paikoissa, ja että käytetäänkö eri tuotteissa samoja teknisiä ratkaisuja, jos se vain on mahdollista. Tuoteperhetasolla tulisi vertailla tuotteen eri variantteja, kuinka niiden valmistus yhtenee, ja kuinka vanhoja hyväksi todettuja ratkaisuja voidaan käyttää hyväksi uuden tuotteen suunnittelussa. (Lempiäinen & Savolainen, 2003, s. 17)

Tuotteen rakennetasolla pohditaan kuinka tuotteen rakenne ja tuotantolaitteiden rakenne sopivat yhteen. Valmistusprosessi koostuu monesta eri vaiheesta ja tukitoiminnosta, jotka täytyy ottaa huomioon tuotteen rakenteessa. Myös tuotteen sisäisen kustannusrakenteen perusteella voidaan kiinnittää huomiota niihin kohteisiin, joista syntyy eniten valmistuskustannuksia tuotteelle. Komponenttitasolla mielenkiinto kiinnitetään kalliisiin osiin, tai sellaisiin, joiden valmistuksessa voi ilmetä usein häiriöitä tai toimitusongelmia. Monesti osien tuotantokehitys kannattaisi jättää niiden osien valmistuksesta vastaavien yritysten tehtäväksi. (Lempiäinen & Savolainen, 2003, s. 17)

4.3 Rinnakkaissuunnittelu

Rinnakkaissuunnittelu, joka tunnetaan myös nimillä Concurrent Engineering, Simultaneous Engineering, Parallel Engineering sekä Integrated Product Development, on suunnittelun tapa, jossa tuotteen ja valmistuksen suunnittelu, kaupalliset näkökohdat sekä tuotannon toteutus pyritään toteuttamaan yhtäaikaisesti. (Eskelinen & Karsikas, 2013, ss. 23-24) Tämä vaatii paljon ammattitaitoa tai tietoa valmistuksesta, suunnittelusta, markkinatilanteesta ja muista tuotekohtaisista asioista, joten yksi parhaista tavoista on suunnitella tuotetta ja sen valmistusta integroidussa tuotetiimissä, joka koostuu poikkitieteellisten sovellusalojen ammattilaisista. Suunnittelutyössä voi yhdistyä monet poikkitekniset aiheet kuten eri tieteiden alat, inhimilliset ja yksilölliset näkökulmat, tuotannolliset tavoitteet sekä filosofiset, psykologiset ja sosiaaliset näkökulmat. (Eskelinen & Karsikas, 2013, s. 19)

On tärkeää, että suunnittelutiimin kaikki jäsenet ovat mukana ja aktiivisia heti suunnittelun alkuvaiheista lähtien, jotta jokainen voi antaa merkityksellisen työpanoksen suunnitteluun. Tiimin muiden jäsenien ei tule odotella suunnittelijoiden suunnittelevan rakenteita, ja vasta sitten reagoida niihin. (Anderson, 2004, s. 20)

4.4 Modulaarinen tuotearkkitehtuuri

Eskelinen mainitsee DFMA-oppaassaan ensimmäiseksi muuriksi valmistuksen ja suunnittelun välille standardoitujen tai modulaarisien ratkaisujen pakonomaisen hyödyntämisen (Eskelinen & Karsikas, 2013). Modulaarinen tuotearkkitehtuuri kuitenkin mahdollistaa massaräätälöinnin, jolla on mahdollista yhdistää suuret tuotantomäärät sekä tuotevariointi. Varsinkin laserhitsaus robotisoituna prosessina vaatii paljon toistettavia toimintoja, joten on tärkeää käyttää moduloinnin keinoin esimerkiksi samaa osaa eri tuotteissa. Järkevästi toteutettuna moduloinnin ja automatisoinnin yhdistelmä voi olla hyödyllinen pienemmillekin tuotantomäärille. (Kah, et al., 2014, s. 240)

Moduloinnissa tuote jaetaan pienempiin itsenäisiin osiin, eli moduuleihin. Moduulit voidaan suunnitella itsenäisesti, sillä ne riippuvat toisistaan yleensä lähinnä rajapinnoistaan. Moduulit yhdistetään niiden rajapinnoista, ja rajapinnat ovatkin yleensä tarkkaan määritellyt ja ne säilytetään vakioina. Tyypillisesti yksittäinen moduuli toteuttaa yhtä tai useampaa toimintoa, ja moduulit vuorovaikuttavat toisiinsa rajapintojensa kautta. (Österholm & Tuokko, 2001, ss. 8-9)

Modulaarisuus mahdollistaa moninaisien alikokoonpanojen valmistamisen kerralla, jonka ansiosta valmistus sykli pienenee. Modulaarisuuden aiheuttama standardointi sallii suurempien alikokoonpanojen valmistamisen suuremmissa erissä useasta syystä; kokoonpanoaika on pienempi, sillä moduulien määrä on rajallinen ja kaikki rajapinnat ovat yhteensopivia, testaus voidaan tehdä erikseen kaikille alikokoonpanoille, ja alikokoonpanojen valmistus kokonaan eri sijainnissa on mahdollista. (Kah, et al., 2014, s. 241)

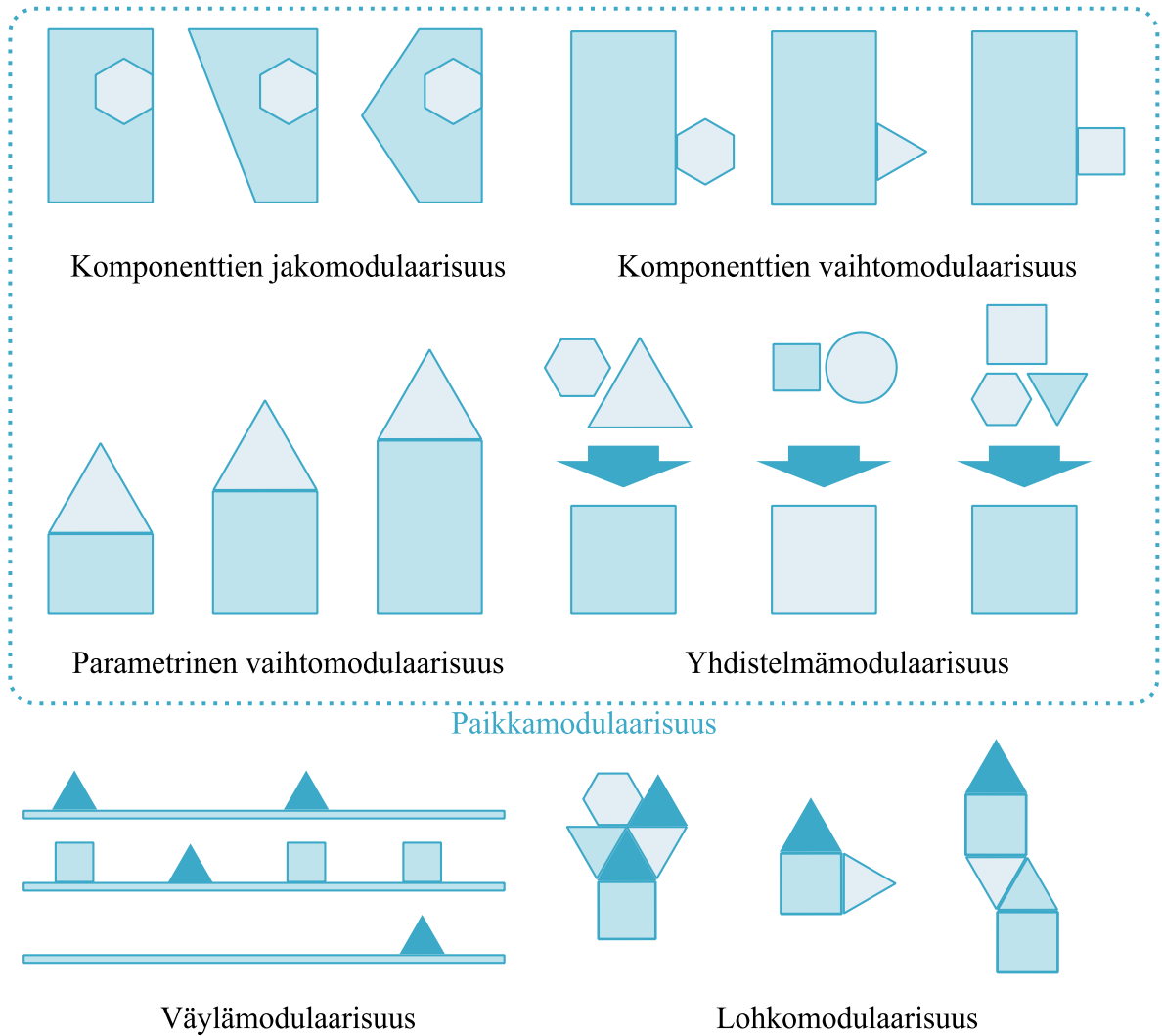
Modularisaatiosta löytyy huomattavien etujen lisäksi myös omat haasteensa. Modulaarisen tuoterakenteen muuttaminen, varsinkin kun muutokset ylettyvät modulaariseen rakenteeseen ja sen rajapintoihin, voi osoittautua kalliiksi ja työlääksi tehtäväksi. Vaikka modulaarinen rakenne sallii paljon tuotteen räätälöintiä, on mukautuvuudella rajansa; koko lopputuotteiden

valikoima täytyy olla selvillä suunnitteluvaiheessa. Modulaarisuus voi myös jarruttaa innovatiivisuutta määritellessään koko lopputuotteiden kirjon. (Kah, et al., 2014, s. 241)

Modulaariset tuotteet jaetaan tyypillisesti kolmeen luokkaan, paikka-, väylä- sekä lohkomodulaarisuusiin (Kuva 13). Lohkojärjestelmässä erilaiset tuotevariantit yhdistellään melko vapaasti eri moduuleista, joilla on standardoidut rajapinnat. Väylämodulaarisuudessa moduuleilla on oma rajapintansa, josta ne voidaan kiinnittää perusmoduuliin. Paikkamodulaarisuudessa jokainen moduulityyppi liitetään tietyssä asennossa standardirajapinnan avulla. Paikkamodulaarisuutta on kolmea erilaista:

- Komponenttien jakomodulaarisuus, jossa usealla tuotteella on yhteinen komponentti
- Komponenttien vaihtomodulaarisuus, jossa tuotteen ominaisuuksia voidaan muuttaa vaihtamalla komponentti, jolla on eri ominaisuus
- Parametrinen vaihtomodulaarisuus, jossa yhtä tai useampia komponentteja käytetään yhdessä jonkun parametrisesti muunneltavan komponentin kanssa. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 10)

Modulaarisuuden toteuttamiselle on olemassa systemaattinen tuotekehitysmenetelmä, nimeltään Modular Function Deployment, eli MFD. Se rakentuu viidestä päävaiheesta, jotka jakautuvat omiin työvaiheisiinsa. Päävaiheet ovat asiakastarpeiden selvittäminen, teknisten ratkaisujen valinta, modulaaristen konseptien valinta, niiden arviointi sekä moduulikohtainen suunnittelu. DFA sekä muut Design For -menetelmät ovat hyvin sovellettavissa viimeiseen vaiheeseen, eli moduulikohtaiseen suunnitteluun. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 18)



Kuva 13. Modulaarisuuden eri muotoja. Mukailtu: (Österholm & Tuokko, 2001, s. 11)

5 LASERHITSATTAVAN TUOTTEEN SUUNNITTELU

Kun lasereiden käyttö yleistyy konepajateollisuudessa, suunnittelijoiden ja tuoteinsinöörien täytyy tutustua laserhitsauksen teknisten ominaisuuksien lisäksi myös siihen, kuinka suunnitella komponentteja sekä kokoonpanoja menestyväan laserhitsaukseen. Lasertyypillä, hitsattavalla materiaalilla, osakokoonpanon osien valmistelemisella ja kiinnitintekniikalla on kaikilla tärkeä osa hitsauksen toteutuksella, mutta kaikki nämä ovat merkityksettömiä ilman hyvin suunniteltuja laserhitsattavia liitoksia tuotteessa. (Havrilla, 2012a)

Laserhitsaus on hyvä esimerkki uudesta teknologiasta, joka poistaa paljon perinteisen hitsauksen rajoituksia ja tuo suunnitteluun uusia mahdollisuuksia. Laserhitsauksen suunnittelumahdollisuuksien tuomat hyödyt voivat olla paljon suurempia kuin suoraan selvät matala lämmöntuonti ja suurempi hitsausnopeus. (Salminen, et al., 2010b)

Hitsattavan liitoksen optimoitu suunnittelu on oleellinen osa laserhitsauksen käyttöä, mutta tuote- ja liitossuunnittelusta löytyy myös taloudellinen oikeutus laserhitsauksen käytölle. Tärkeimmät pohdinnat tuotannon kustannuksien minimoinnissa sekä tuotannon materiaalivirran maksimoinnissa liittyvät tuotteen rakenteen ja fyysisten parametrien optimointiin sekä hitsauskokoonpanovaiheen muokkaamiseen. (Havrilla, 2012a)

Tärkeimmät DFM-keinot laserhitsauksen edistämiseksi ovat levynpaksuuden pienentäminen, ja liitosmuotojen mahdollistaminen vaihtoehtoisten rakenteiden sekä materiaalin valinta. Levynpaksuuden pienentäminen vähentää kappaleen painoa, ja laserhitsauksen mahdollistaman jatkuvan hitsausliitoksen vuoksi kappaleen kestävyys voi jopa kasvaa, mikäli laserilla hitsattava liitos korvaa esimerkiksi pistehitsauksen. (Havrilla, 2012a)

Laserhitsaus mahdollistaa pienellä lämmöntuonnillaan jatkuvan liitoksen hitsaamisen sellaisiin tuotteisiin ja sijainteihin, mihin perinteisellä kaarihitsauksella ei pysyttäisi ilman merkittäviä muodonmuutoksia. Ohuidenkin levyjen hitsaaminen onnistuu niin, että levyn tasomaisuus säilyy. Koska laserhitsaus soveltuu hankalemmillekin materiaaleille, voidaan

valita kestävämpi materiaali, ja valita sille ohuempi levynpaksuus, ja laskea valmiin tuotteen painoa. (Havrilla, 2012a)

Esimerkiksi, mikäli halutaan liittää vastushitsauksella levy putkeen, täytyy putki aukottaa liitoksen vastapuolelta vastushitsauskoneen toista elektrodia varten. Laserhitsauksen yksipuoleisen hitsauksen vuoksi voidaan aukko jättää tekemättä, ja mitoittaa putki aukottomana. Tätä hyödyntäen lujuudessa putken dimensioita voidaan pienentää, ja keventää valmista tuotetta. (Havrilla, 2012a)

5.1 Laserhitsaukselle sopivat tuotteet

Lähes kaikki sulahitsattavat tuotteet pystytään laserhitsaamaan. Laserhitsaus hitsausprosessina ei kuitenkaan välttämällä ole aina taloudellisin vaihtoehto. Toiset tuotteet soveltuvat laserhitsattaviksi paremmin kuin toiset. Koska laserhitsaava tuotanto on myös automatisoitua tuotantoa, täytyy pohtia kuinka hyvin tuotteen tuotanto soveltuu automatisoituun tuotantoon. Huomioitavia asioita ovat muun muassa tuotteen tuotantomäärät, sen oletettu elinkaari, tuotteen rakenteen mahdolliset muutokset, hitsin kokonaisuus tuotantoerässä sekä hitsien monimutkaisuus (Hiltunen, 2005). Koska laserhitsauksen hitsausnopeus on huomattavan suuri, voi erittäin paljon hitsiä sisältävissä tuotteissa pelkkä valmistusnopeus riittää kannattavaksi syyksi laserhitsaukseen siirtymiseen.

Hitsattavan tuotteen ja sen liitosten korkeat laatuvaatimukset ja tiukat toleranssit nostavat luonnollisesti tuotteen valmistuskustannuksia. Laserhitsauksen matalan lämmöntonin pienet muodonmuutokset sekä korkealaatuinen liitos tekevät laserhitsauksesta optimaalisen valinnan tällaisille tuotteille. Laserhitsauksen kokoonpanon tiukat paikkatoleranssit kokoonpanon osille varmistavat myös lopputuotteelle hyvän mittatarkkuuden.

Jotkin tuotteet ovat sellaisia, että niiden hitsaus on lähes mahdotonta kaarihitsausmenetelmillä. Esimerkiksi ohuiden levyjen pitkät päittäisliitokset, joissa on tärkeää säilyttää kappaleiden tasomaisuus, eivät onnistu kaarihitsausmenetelmillä niiden suuren lämmöntonin vuoksi. Hitsattavan materiaalin ominaisuuksien vuoksi jotkin

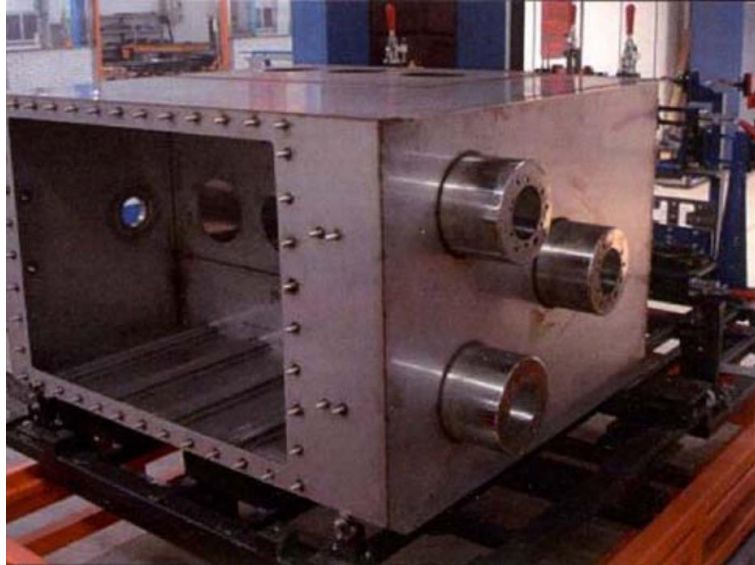
eripariliitokset onnistuvat järkevästi vain laserhitsaamalla ja joidenkin suurlujien materiaalien hitsausliitoksien lujuusvaatimukset saadaan täytettyä vain laserhitsaamalla.

Joissakin tuotteissa laserhitsauksen liitosmuodot mahdollistavat kaarihitsausprosesseille mahdottoman geometrian, jolla saavutetaan suuri valmistuksellinen höyry sekä tai parempi tuote. Laserhitsauksen tuomat edut ovat yleensä suurimpia juuri silloin, kun tuote suunnitellaan uudelleen hyödyntämään laserhitsauksen tuomia mahdollisuuksia. Esimerkiksi levyn läpi tapahtuva yksipuoleinen limihitsaus mahdollistaa paljon tuotteita, jotka eivät kaarihitsaamalla järkevästi luonnistu, kuten esimerkiksi Sandwich-ohutlevyrakenteet.

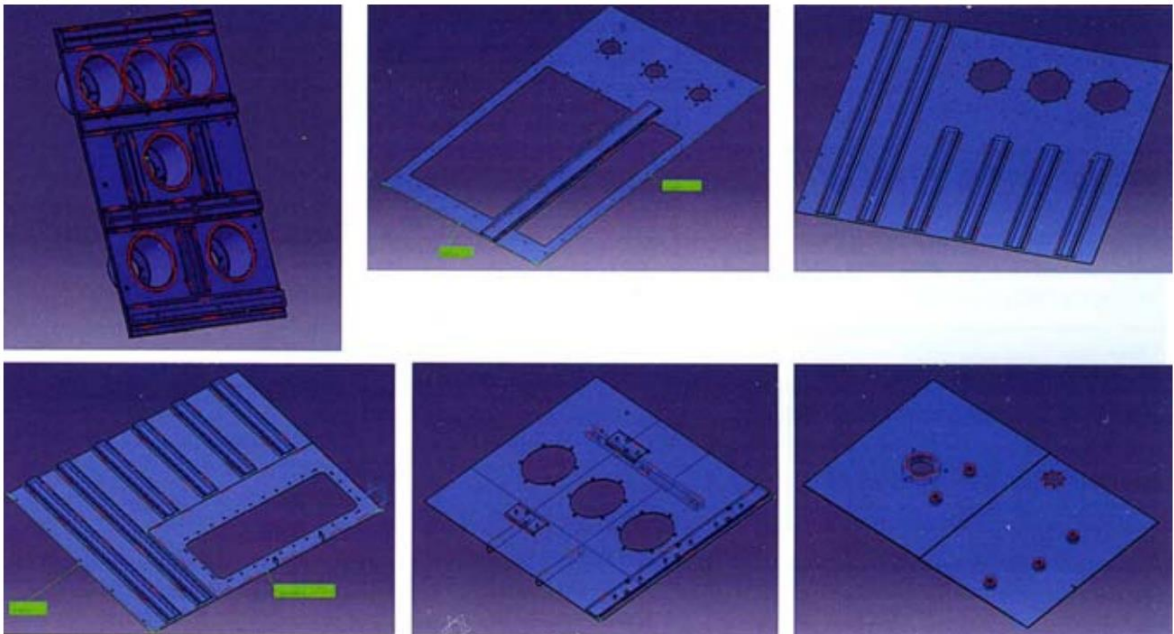
Laserhitsaamalla voidaan liittää myös paksumpia kappaleita yhdellä hitsillä. Tällöin kustannussäästöt perinteisiin hitsausmenetelmiin voivat myös olla suuria. Monipalkohitsausliitoksen korvaaminen yhdellä laserhitsillä voi nopeuttaa hitsausprosessia erittäin paljon, ja lisäainekustannuksista syntyvät säästöt voivat olla erittäin merkittäviä.

Case: Muuntajakaappi

Suuntaissärmiön muotoiset tuotteet, kuten sähkönjako- ja muuntajakaapit, sopivat mainiosti laserhitsaukseen, (Kuva 14). Tapauksen kaapit ovat suunniteltu uudelleen laserhitsausta varten. Ne koostuvat täysin taivuttamattomista laserleikatuista levyosista, jonka vuoksi liitoksien paikkatoleranssien saavuttaminen ei tuota vaikeuksia. Tuotteessa on siis todettu järkeväksi korvata myös särmäystä laserhitseillä. Koska laserhitsauksen matalan lämmöntonnin vuoksi ei alikokoonpanohitsauksien aikana synny muodonmuutoksia, täyttyvät liitostoleranssit myös lopullisessa kokoonpanohitsauksessa. Ensin kaapin kuusi seinää (Kuva 15) hitsataan omissa asemissaan, jonka jälkeen kaapin kokoonpanohitsaus suoritetaan neljässä vaiheessa (Kuva 16). (Appendino, 2014, s. 199)



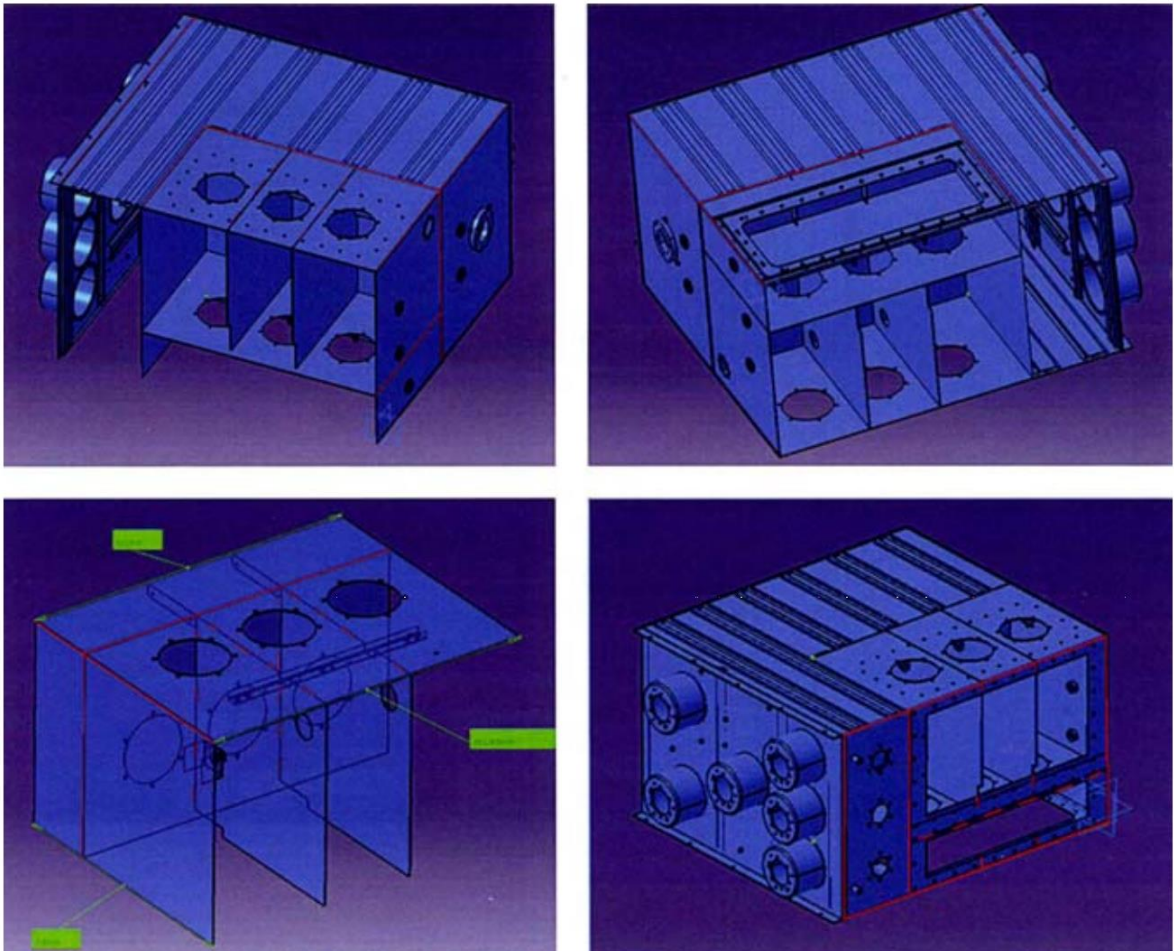
Kuva 14. Kabinetti sähköjakelijoille sekä muuntajille. (Appendino, 2014, s. 200)



Kuva 15. Kaapin kuuden seinän alikokoonpanot. (Appendino, 2014, s. 201)

Kaappien hitsaukseen käytettävä hitsaussolu koostuu laajaliikkeisestä karteesisesta robotista sekä neljän kilowatin hiilidioksidilaserista, mutta vaatii myös yksinkertaisen automatisoidun lastaus- ja purkujärjestelmän, jotta laserin hitsausnopeus voidaan hyödyntää. Tehokkuuden vuoksi lastauspöytien koko on sen mukainen, että niihin mahtuu kaikki kaappien hitsaukseen tarvittavat asemat hitsauskiinnittiminen. Näin kaikki purku- ja kokoonpanotoimenpiteet

ehditään suorittamaan yhden hitsauskierron aikana. Keskikokoisen kaapin seinien hitsausaika on yhteensä noin 4 minuuttia, ja kaapin kokoonpanohitsausvaiheiden yhteenlaskettu aika on noin 14 minuuttia. Yhden ohjelmajakson kokonaishitsausaika on noin 18 minuuttia. Perinteisillä valmistusmenetelmillä yhden kaapin valmistusaika oli noin kaksi päivää. (Appendino, 2014, s. 202)



Kuva 16. Kaapin kokoonpanon hitsausvaiheet. (Appendino, 2014, s. 201)

5.2 Kaarihitsauksen ja laserhitsauksen erot

Perinteisesti hitsattavan tuotteen tai kappaleen suunnittelussa lähtökohtana on, että se sisältää mahdollisimman vähän hitsausliitoksia. Perinteiselle hitsaukselle löytyy sanontoja kuten ”Paras hitsi on hitsi, jota ei ole olemassa” ja ”Hitsi on kalleinta olemassa olevaa metallia”.

Hitsausliitoksia pyritään välttämään siksi, että hitsaus muodostaa epäjatkuvuuskohdan rakenteeseen ja voi pilata perusaineen ominaisuuksia, ja niistä voi muodostua suuret kustannuserät. Lisäksi hitsauslisäaine on aina kalliimpaa kuin levymateriaali. Laserhitsauksessa kuitenkin voi olla järkevää välttää hitsauksen minimointia muiden työvaiheiden kustannuksella, ja esimerkiksi korvata särmättävä kappale tasomaisilla laserleikattavilla levyleikkeillä, sillä näin saadaan helpommin tyydytettyä laserhitsauksen tarkat kokoonpanotoleranssit. (Lempiäinen & Savolainen, 2003, s. 84) (Appendino, 2014, s. 191)

Laserhitsauksessa hitsi ei muodosta rakenteellisesti samanlaista heikkoa lenkkiä kuin kaarihitsauksessa. Laserhitsauksessa särmäyksen korvaaminen hitsauksella voi olla kokonaiskustannuksien kannalta edullisempi vaihtoehto, sillä hyvin suunnitellulla kappaleella laserhitsauksessa varsinainen hitsausvaihe on varsin nopea vaihe.

Laserhitsaukseen siirryttäessä on ymmärrettävä tuotantoa kokonaisvaltaisesti. Jos tuotanto on huonosti suunniteltu, hitsaus ei sitä paranna, vaikka olisikin asianmukainen. Automatisoidessa hitsausta on ymmärrettävä, että asiat eivät toimi samoilla periaatteilla kuin käsinhitsauksessa, sillä taitava hitsari on todella joustava hitsausrobotti, joka huolehtii railon seurannasta sekä heikosta kokoonpanon toleransseista. (Lahti, 2011)

Perinteisesti kaarihitsausprosessilla hitsattavan kappaleen suunnittelu on monimutkainen prosessi. Lähtökohtana on, että tuote täyttää sille asetetut toiminnalliset vaatimukset sekä hitsauksen edellytykset. Perinteisesti hitsauksen rajoitukset muihin liitostapoihin verrattuna ovat:

- Liitettävien osien tulee olla samaa tai lähellä olevaa materiaalia
- Lämmöntonni aiheuttamat muotovirheet
- Hitsin muutosvyöhykkeen kiderakennemuutokset
- Pintakäsittelyn tuhoutuminen liitoskohdassa
- Railonvalmistuksen tarve

(Lempiäinen & Savolainen, 2003, s. 83)

Suunnittelun lähtökohdat säilyvät samankaltaisina myös laserhitsauksessa, mutta moni rajoitus lievenee tai katoaa kokonaan. Laserhitsauksen pieni lämmöntuonti mahdollistaa joidenkin sellaisten eripariliitoksien hitsauksen, joiden liittämistä perinteisillä kaarihitsausprosesseilla pidetään mahdottomana. Eripariliitoksissa materiaalien tulisi kuitenkin olla ominaisuuksiltaan samankaltaisia, jotta laserhitsaus voi onnistua. Materiaaleilla tulisi olla samankaltainen sulamispiste, atomikoko sekä lämmönjohtokyky. Tärkeää on, etteivät materiaalit muodosta keskenään hauraita faaseja. Lisäaineella voidaan monissa tapauksissa mahdollistaa muuten mahdoton eripariliitos. (Kujanpää, et al., 2005, s. 173)

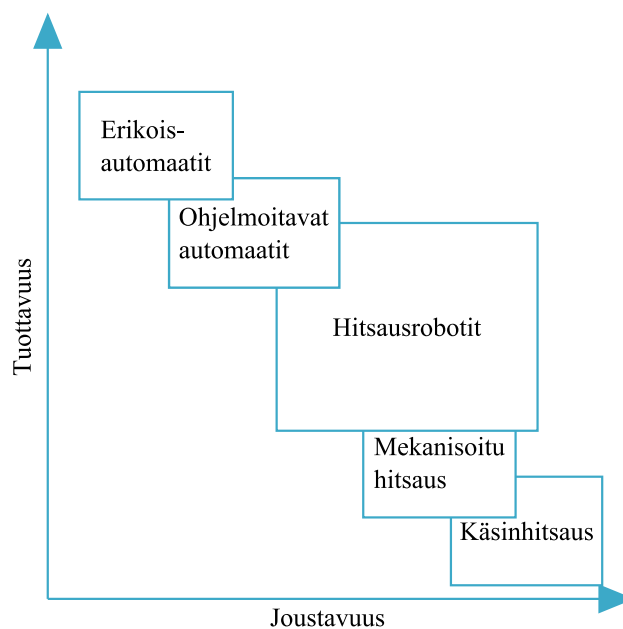
Lämmöntuonti on avaimenreikähitsauksessa huomattavan paljon matalampaa kuin kaarihitsauksessa, minkä vuoksi hitsien sijoittelu onnistuu lämmönherkkien komponenttien, kuten elektroniikan ja lasi-metalliliitoksien lähelle, hitsin muutosvyöhyke jää paljon kapeammaksi, ja voimakasta rakeenkasvua ei tapahdu. Suuren jäähtymisnopeuden vuoksi sekä hitsin että muutosvyöhykkeen kiderakenteet ovat hienorakeisia sekä suurikovuuksisia. Pienempi lämmöntuonti myös vähentää siitä aiheutuvia muodonmuutoksia, jonka vuoksi jälkikoneistuksen tarve voi jäädä kokonaan pois esikoneistettujen osien kokoonpanohitsauksessa. (Kujanpää, et al., 2005, ss. 159, 173)

Kaarihitsauksella on prosessin hallintaan liittyviä rajoitteita, joita laserhitsauksella ei ole. Esimerkiksi mekanisoidussa, robotisoidussa tai automatisoidussa kaarihitsauksessa yhdeltä puolelta tapahtuva päittäisliitos on lähes mahdoton saada läpihitsattua luotettavasti hyvälaatuisena ilman juuritukea. (Hiltunen, 2005)

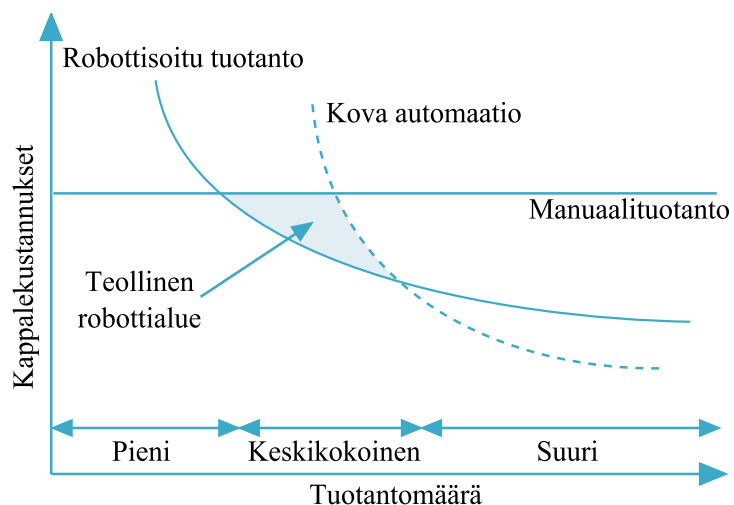
5.3 Mekanisointitaso

Normaalisti hitsauksen automatisoinnin ensisijaisena tavoitteena on tuottavuuden parantaminen. Sen muina etuina tulevat ergonomian parantaminen, tasaisempi laatu, sekä mahdollisuus käyttää hitsausprosesseja tehokkaammin (Hiltunen, 2005). Laserhitsaus on kuitenkin aina vähintään mekanisoitua.

Hitsauksen mekanisoinnin taso on yksinkertaisimmillaan pelkkää mekanisointia. Hitsaus voi olla myös robotisoitua, tai täysin automatisoitua. Tuottavuus kasvaa mekanisointitason noustessa ja automatisoinnin lisääntyessä joustavuus heikkenee (Kuva 17). Kappalekohtaisien valmistuskustannuksien ja sarjasuuruuden välinen suhde riippuu mekanisointitasosta (Kuva 18). (Hiltunen, 2005)



Kuva 17. Eri mekanisointitasojen tuottavuuden ja joustavuuden vertailua. (Hiltunen, 2005)



Kuva 18. Sarjasuuruuden vaikutus kappalekustannuksiin eri mekanisointitasoilla. (Pires, et al., 2006)

5.4 Laserhitsauksen liitosmuodot

Hitsausgeometria kuvaa kuinka liitettävät kappaleet liitetään yhteen. Liitoksen mekaaniset ominaisuudet ovat ensimmäinen asia, jota täytyy pohtia liitosmuotoa valittaessa. Mikäli on mahdollista valita useammista toimivista vaihtoehdoista, on järkevintä valita valmistuksen kannalta helpoin muoto. Tärkeimpiä liitosmuotoja ovat päittäis-, laippa-, limi-, ja T-liitokset. (Kujanpää, et al., 2005, s. 175) (Buchfink, 2007, s. 161)

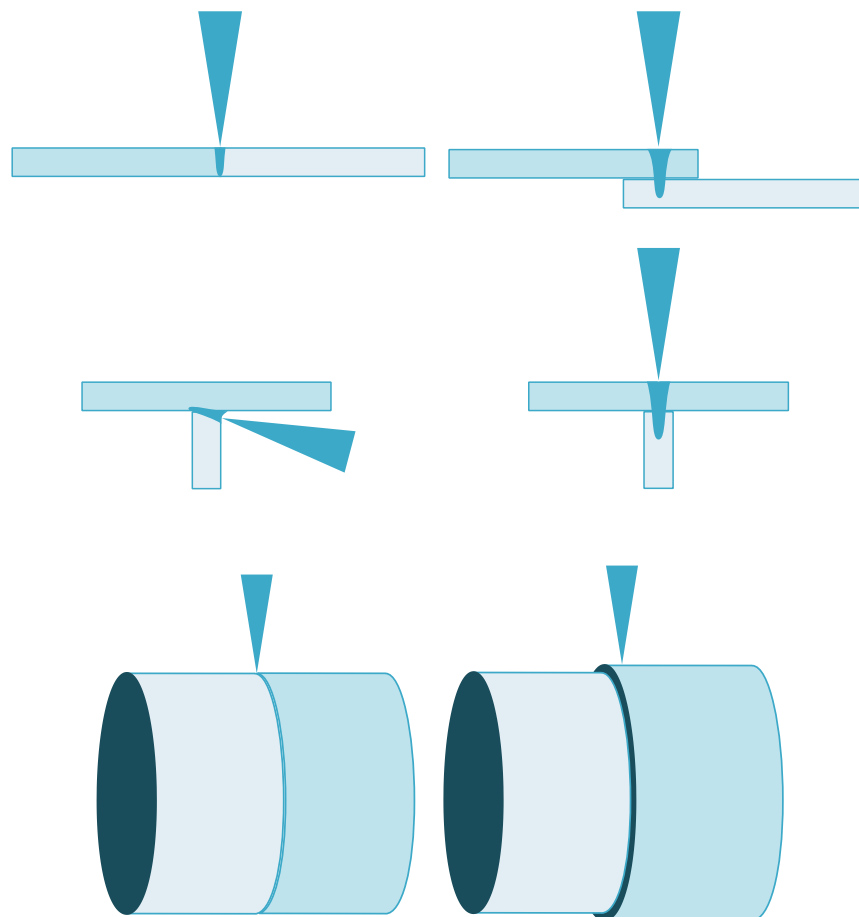
Myös hitsausliitostyyppin valinta on tärkeää, kuten tarvitseeeko liitos jatkuvan hitsin, vai voisiko liitos koostua useista yksittäisistä pistehitseistä, pienistä viivamaisista hitseistä tai useista pienistä hitsatuista ympyröistä. Tätä valintaa tehdessä on tärkeää ajatella, mikä on liitokselta vaadittu vahvuus sekä mikä on suurin sallittu lämmöntuonti liitokseen. (Buchfink, 2007, s. 161)

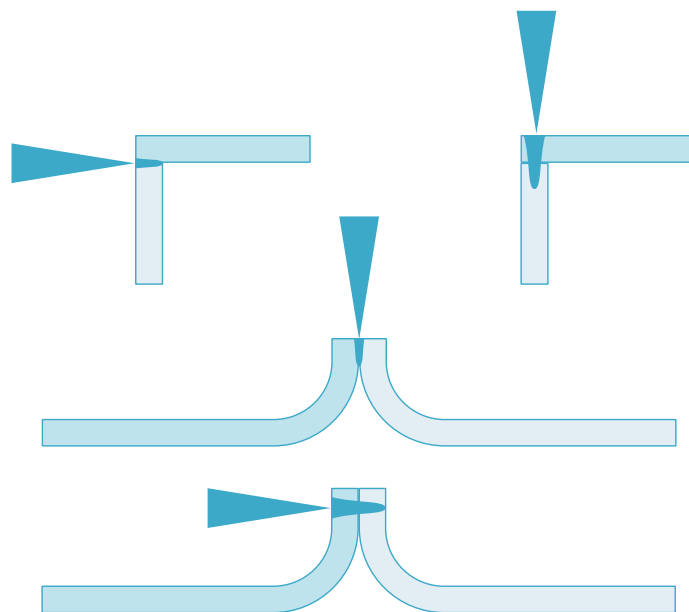
5.4.1 Avaimenreikähitsauksen liitosmuodot

Perinteisessä kaarihitsauksessa hitsilajeja on kaksi, pienahitsit sekä päittäishitsit. Pienahitseiksi kutsutaan pienarailoon hitsattuja hitsejä, ja kaikki loput ovat päittäishitsejä. Laserhitsauksessa jaottelu ei välttämättä toimi, sillä lisäaineettoman avaimenreikähitsauksen kapealla ja syvätunkeumaisella hitsillä voidaan liittää kappaleita sulattaen osat yhteen kuljettamalla sulaa avaimenreikää railoa pitkin, tai sulattaen osat yhteen toisen kappaleen läpi. Karkeasti ajateltuna näillä I-railoon hitsattavilla liitoksilla saadaan maksimaalinen liitospinta-ala, mutta ne vaativat tarkemmat liitos- sekä paikoitustoleranssit, kun läpihitsatuilla limiliitoksilla saadaan löysemmät toleranssit, mutta myös pienempi liitospinta-ala, eli heikompi hitsi. Useimpia liitosmuotoja voidaan hitsata molempia tekniikkoja käyttäen (Kuva 19). (Kujanpää, et al., 2005, s. 240) (Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys, 2004) (Havrilla, 2012b)

I-railoon hitsattava päittäisliitos soveltuu hyvin paksuille ainepaksuuksille, sillä ainepaksuuden kasvaessa liitostoleranssit eivät ole aivan yhtä tiukat. Paksummissa rakenteissa laserhitsaus on myös hyvin paljon kaariprosesseja tehokkaampi, kun liitos saadaan hitsattua yhdellä hitsauskerralla ilman lisäainetta. Ohuille ainepaksuuksille

lisäaineeton päittäisliitos on hankalampi, kun liitostoleranssit kiristyvät tiukemmiksi. Toisaalta mikäli liitettävät pinnat saadaan tarkasti vastakkain, voidaan saada aikaan todella laadukas hitsi, ja hitsata ohuitakin ainepaksuuksia ilman lämmöntonin aiheuttamia muodonmuutoksia ja säilyttää kappaleen tasomaisuus pitkilläkin jatkuvilla hitseillä. Limi- ja laippahitsaukset soveltuvat hyvin ohuille ainepaksuuksille, sillä näin liitostoleransseja saadaan helpotettua.



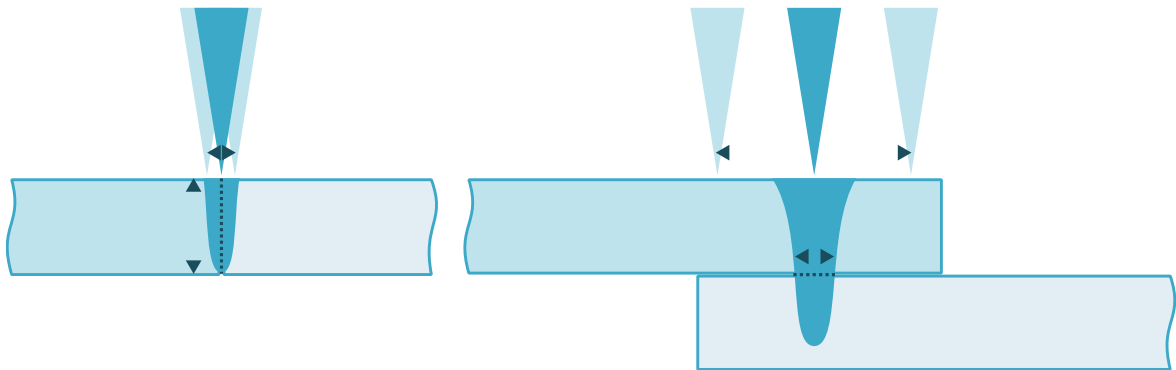


Kuva 19. Samankaltaisia liitosmuotoja sekä läpi että railoon hitsattuna.

5.4.2 Päittäis- ja limiliitokset

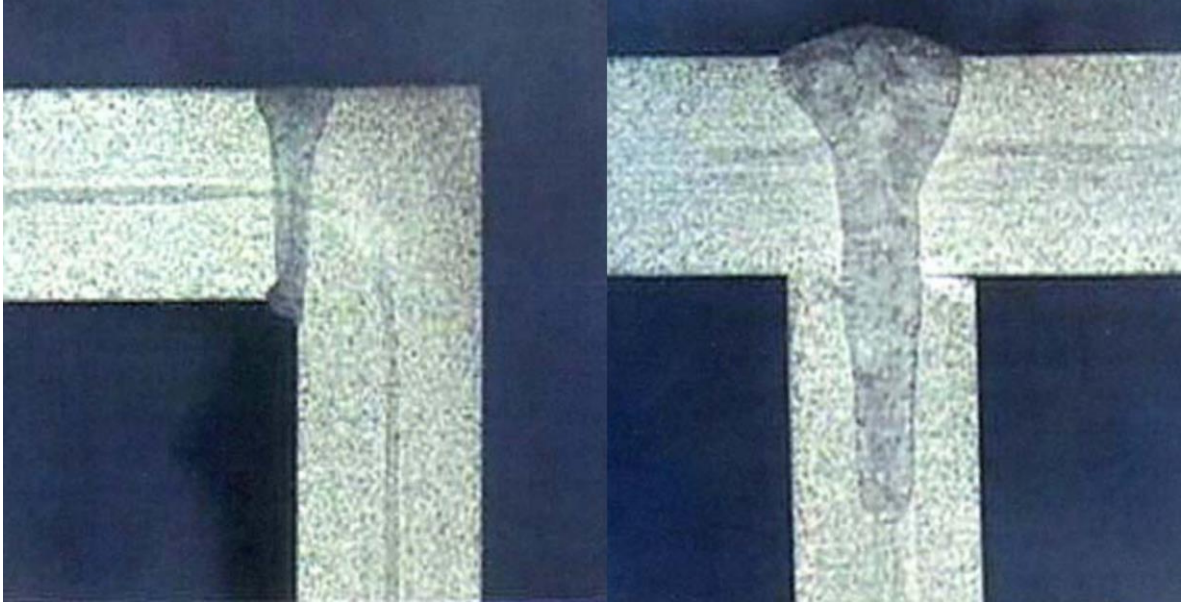
Päittäisliitoksien etuina limihitsattuihin päällekkäisliitoksiin nähden ovat matalampi hitsi, sillä hitsin syvyyden ei tarvitse olla kuin yhden levyn paksuinen (Kuva 20). Limiliitoksissa, hitsin täytyy läpäistä päällimmäinen levy saavuttaakseen liitospinnan. Tämän vuoksi limiliitoksiin verrattuna päittäisliitoksien käyttö tekee hitsauksesta joko nopeampaa, tai sitten hitsaukseen ei tarvita niin suurta tehoa kuin limiliitoksien avaimenreikähitsaukseen. Suuremman hitsausnopeuden tai pienemmän tehontarpeen mukana tulee myös pienempi lämmöntuonti, joka minimoi muodonmuutoksia sekä muutosvyöhykkeen kokoa. Tämä tuo myös tasaisen jännitys jakauman. Liitos on leveyteensä nähden hyvin syvä, joka mahdollistaa liitoksen sijoittamisen hankalaankin kohtaan tuotetta, kuten lähelle kulmaa tai lämmönarkaa paikkaa. Päittäisliitoksella on kuitenkin paljon korkeammat toleranssit säteen paikoituksen suhteen (Kuva 20), osien paikoituksen suhteen sekä liitettävän reunan muodon suhteen. (Havrilla, 2012b) (Kujanpää, et al., 2005, s. 174)

Limiliitoksilla saavutetaan suurempi prosessi-ikkuna, eivätkä säteen tai osien paikoitustoleranssit ole yhtä korkeat. Mikäli limiliitoksen hitsi ei läpäise alempaa kappaletta, saadaan esteettinen rikkoutumaton pinta liitoksen alapuolelle. Energiantarve on suurempi kuin päittäisliitoksessa, sillä avaimenreiän täytyy läpäistä molemmat liitettävät kappaleet, toisin kuin päittäisliitoksessa. Täten hitsauksessa täytyy käyttää joko suurempaa lasertehoä, tai hitaampaa säteen kuljetusnopeutta. Laippa- ja limiliitoksia käytettäessä täytyy huomioida todellinen liitospinta-ala, joka jää hitsin sulan levyiseksi, kun taas päittäisliitoksessa liitospinta-ala on yleensä koko railon matkalta (Kuva 20)(Kuva 21). (Kujanpää, et al., 2005, s. 175) (Havrilla, 2012b)



Kuva 20. Päittäis- ja päällekkäisliitoksien liitospinta-alojen sekä säteen paikoitustoleranssien erot.

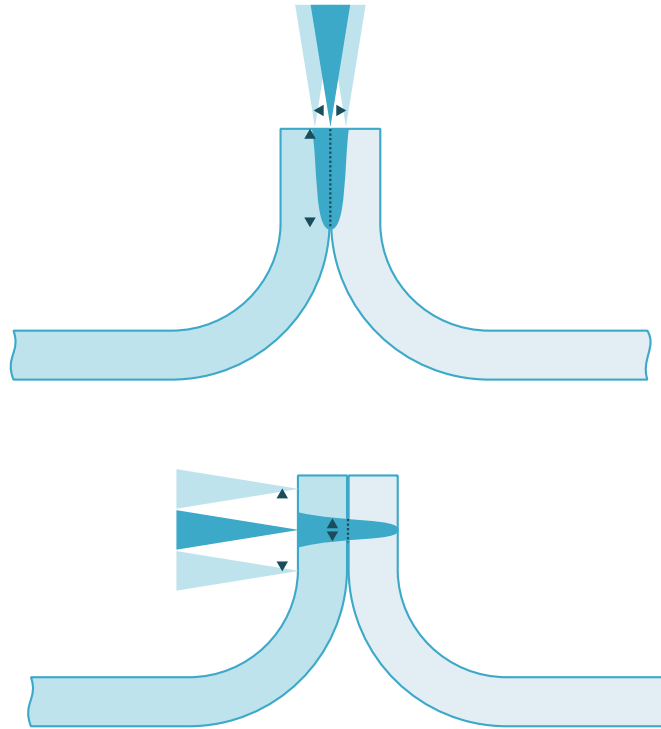
Päittäisliitoksen hitsaaminen säästää materiaalia ja siten laskee tuotteen painoa, kun liitosta verrataan päällekkäishitsiin, kun liitettävien osien ei tarvitse jatkua päällekkäin liitoksen kohdalla. Liitoskohta on myös tasainen, eikä liitoksen viereen jää askelmaa, joka päällekkäisliitokseen tulee. Päittäisliitoksessa ei ole myöskään ongelmia pinnoitteiden kuten sinkkikerroksen kanssa, sillä höyrystynyt sinkki ei jää liitokseen loukkuun muodostamaan huokosia. (Havrilla, 2012b)



Kuva 21. Makrokuva päittäisnurkkaliitoksesta sekä limihitsatusta T-liitoksesta.
(Appendino, 2014, s. 191)

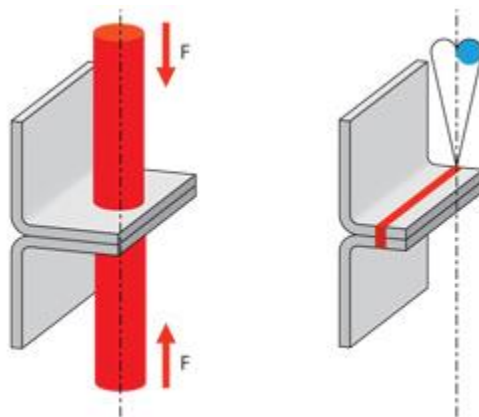
5.4.3 Laippaliitokset

Myös laippaliitokset voivat olla limihitsattuja tai I-railoon hitsattuja liitoksia. Laippaliitoksella voidaan tavoitella liitostoleranssien löysentämistä, jolloin luonnollinen valinta on limihitsattu laippaliitos. Myös tässä tapauksessa limiliitoksen etuna on löysemmät liitostoleranssit, kun I-railoon hitsatun liitoksen etuina on suurempi liitospinta-ala. (Kuva 22)



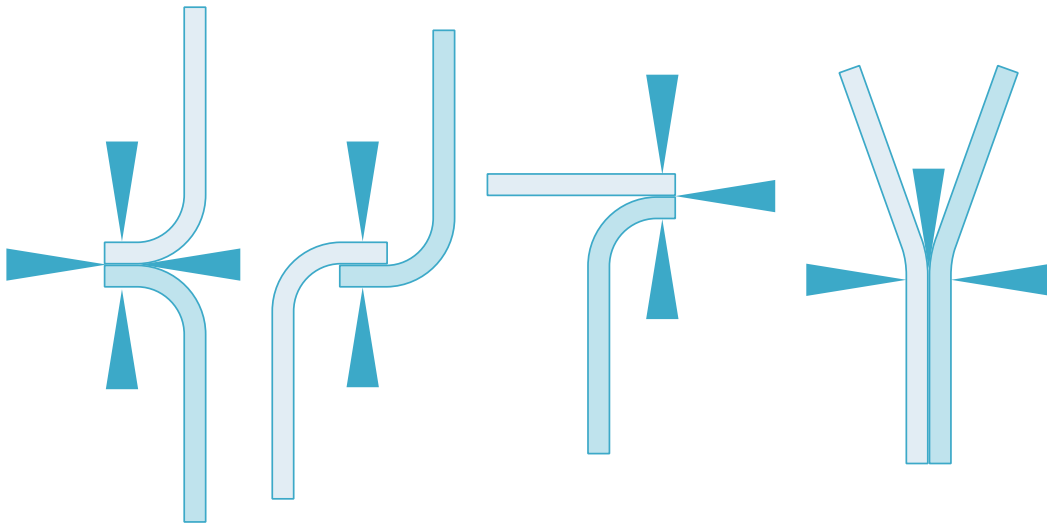
Kuva 22. Päittäishitsatun (ylhällä) ja limihitsatun (alhaalla) laippaliitoksen eroja.

Laippaliitokset soveltuvat hyvin korvaamaan vastushitsattuja rakenteita. (Kuva 23). Laippojen kokoa voidaan kaventaa, tai ne voidaan poistaa kokonaan. Pistehitsausliitosta varten suunniteltu laippa voi olla 20 mm:stä ylöspäin, kun laserhitsauksella toteutettavan liitoksen laippa voi olla alle 10 mm, tai laippa voidaan jättää kokonaan pois, mikäli liitos toteutetaan yksinkertaisella päittäishitsillä. (Havrilla, 2012a)

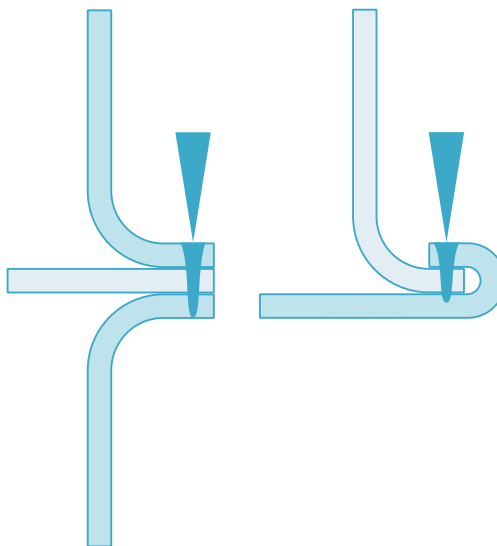


Kuva 23. Laserille riittää kapeampi laippa hitsaukseen kuin pistehitsaukselle. (Havrilla, 2012a)

Laippaliitoksien käytöllä voidaan saada aikaan monia erilaisia liitosmuotoja, joita voidaan laserhitsata useasta eri suunnasta (Kuva 24). Laippaliitoksena on myös mahdollista hitsata useampi levy yhteen, sekä hitsata sopivan syvällä tunkeumalla siten, että liitoksen alemman levyn pinta jää ehyeksi.



Kuva 24. Erilaisia laippaliitoksia ja eri suuntia, joista liitosmuotoja on mahdollista hitsata.



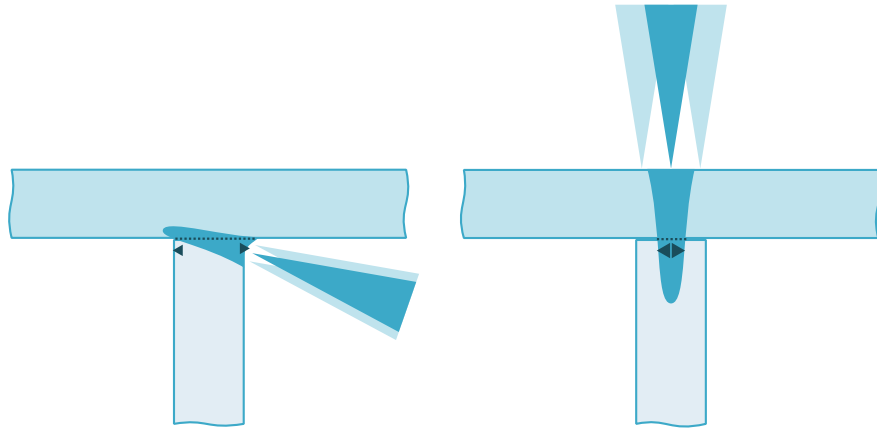
Kuva 25. Useampi levy liitettynä yhteen laippaliitoksella sekä ehyeksi jätetty alemman levyn pinta.

5.4.4 T-liitos

Laserilla hitsattaessa T-liitos voidaan hitsata sekä limiliitoksen tapaan toisen levyn läpi, tai se voidaan hitsata päittäisliitoksen tapaan kulmasta. (Kuva 26.)

Kun laserilla hitsattavaa T-liitosta verrataan kaarihitsausmenetelmillä hitsattaviin T-liitoksiin, on huomioitava, että laserille riittää yksi hitsauskerta pois lukien paksummat ainepaksuudet, jolloin voi olla hyödyllistä hitsata T-liitos molemmilta puolilta, mikä tarkoittaa, että laserilla hitsattaessa ei tarvitse päästä hitsaamaan liitosta kuin yhdestä suunnasta. Levyn läpi tapahtuva hitsaus ei ole kaarihitsausmenetelmillä mahdollista.

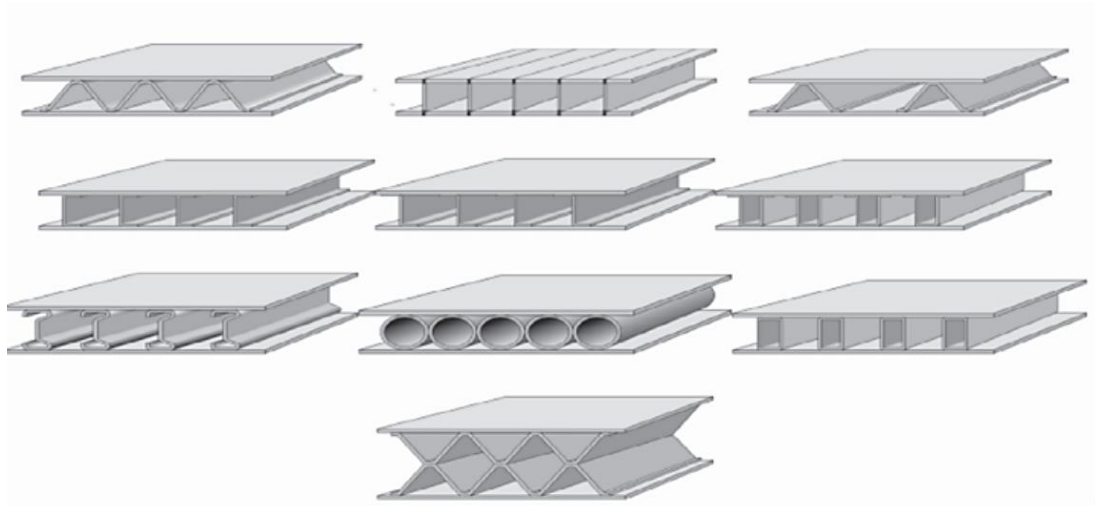
Levyn läpi hitsattava T-liitos on paikoitustoleransseiltaan vähemmän vaativa, mutta se on myös kapeampi kappaleiden liitospinnalla, jolloin liitos on heikompi. Päittäisliitoksena hitsattava T-liitos vastaavasti on sulanut koko liitosalueelta, mutta sen säteen paikoitustoleranssit ovat tiukemmat, ja liitoksen luoksepäästävyys voi aiheuttaa ongelmia. (Havrilla, 2012b)



Kuva 26. T-liitos hitsattuna läpi sekä kulmasta.

Laserihitsaus mahdollistaa T-liitoksien hitsaamisen limiliitoksena päällimmäisen levyn läpi. Tämä tekniikka on erityisen hyödyllinen esimerkiksi erilaisten sandwich-elementtien hitsaamisessa. Paneeleja voidaan rakentaa erilaisilla ydinprofiileilla (Kuva 27), ja valinta riippuu käyttökohteesta. Standardiprofiileja kuten Z-, putki- ja hattuprofiileja on suhteellisen helppo saada, ja niiden mittatarkkuus yleensä riittää laserhitsaukseen. Erikoisemmat ydinprofiilit, kuten aallotettu sekä I-ydin, tarvitsevat erikoislaitteiston niiden valmistukseen, mutta niillä päästään kevyimpään rakenteeseen. Kaikilla sandwich-paneeleilla on yhteisiä etuja perinteisiin rakenteisiin nähden, kuten

- Erinomainen painon ja jäykkyyden suhde, jopa 50% painonsäästö
- Pienempi tilantarve
- Hyvät lämmön- ja ääneneristys- sekä paloturvallisuusominaisuudet
- Huomattava parannus törmäysturvallisuudessa
- Korkea valmistustarkkuus sekä tasomaisuus, joka vähentää sovittamisen sekä profiloinnin tarvetta
- Kilpailukykyinen hintataso
- Suunnittelulla hyvät mahdollisuudet muunteluun, joka mahdollistaa tarpeisiin räätälöityjen paneelien valmistamisen. (Kujala & Klanac, 2005, s. 306)



Kuva 27. Erilaisia sandwich-paneelien ydinprofiileja. (Kujala, et al., 2003)

Case: Siipipyörä

Levyn läpi tapahtuva limi-T-liitos mahdollistaa myös monia muita tuotteita. Italiassa toimiva konepaja valmistaa laserhitsaamalla pumppujen siipipyöriä (Kuva 28). Siipipyörät hitsataan kolmessa eri vaiheessa, jokainen vaihe omassa kiinnittimessään. Näin siivet saadaan tarkemmin sijoitettua sekä hitsattua ylempään kansilevyyn, joka on ensimmäinen hitsausvaihe. Toisessa vaiheessa siipipyörän alempi pinta hitsataan siipiin, ja viimeisenä pohjimmainen laippa. Ruostumattomat teräsosat hitsataan yhteen 3 kW hiilidioksidilaserilla. Hitsauspäättä liikuttaa karteesinen robotti. Pyörittävät kappaleenkäsittelijät helpottavat pyrähdysymmetristen kappaleiden hitsauksessa. (Appendino, 2014, s. 194)



Kuva 28. Laserhitsatun siipipyörän osat sekä valmiita hitsattuja siipipyöriä. (Appendino, 2014, s. 194)



Kuva 29. Siipipyörän laserhitsaus. (Appendino, 2014, s. 194)

Case: Laivaportaat

Turun telakalla valmistettavien TUI-varustamon risteilijöiden laivaportaiden (Kuva 30) reisi sekä askelmia valmistettiin laserhitsaamalla Koneteknologiakeskuksessa Turussa. Laivaportaan reisi on erikoismittainen suorakaideprofiili, joka valmistetaan laserleikatuista ja C-profiiliin särmätyistä 4mm S355-terälevystä leikatuista aihioista. C-profiilit hitsataan toisiinsa päittäisliitoksella. Ne kokoonpannaan käsin ja silloitetaan TIG-hitsaamalla kiinnittimeen asentamista varten. Kaikki tuotteen lasersilloitukset ja –hitsaukset suoritetaan yhdessä vaiheessa (Kuva 31). Hitsaussolun hitsausrobotti liikkuu portaalissa, joka mahdollistaa hitsausrobotille suuren liikkeen yhdessä aksiaalisuunnassa. Hitsaussolun laser on 10 kW IPG YLS-10000 kuitulaser, ja työasema on Pemamek/Motoman - robottihitsausasema. (Koneteknologiakeskus Turku Oy, 2014)



Kuva 30. TUI-varustamon risteilijän laivaportaatt asennuksessa. (Koneteknologiakeskus Turku Oy, 2014)



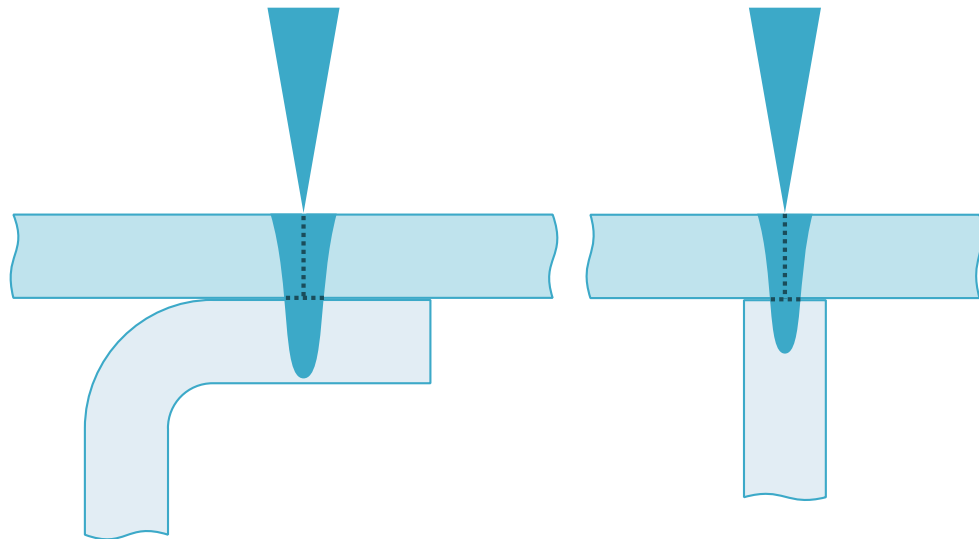
Kuva 31. Hitsaamaton laivaportaatan reiden kokoonpano, sekä reiden hitsaus hitsaussolussa. (Koneteknologiakeskus Turku Oy, 2014)

Portaiden askelmat koostuvat kahdesta U-profiilista sekä keskelle tulevasta U-keskituesta, jotka ovat valmistettu 3mm S355-teräksestä. Yhteen hitsauskiinnittimeen kasataan kaksi askelmaa samanaikaisesti. Askelmien puoliskot puristetaan toisiaan vastaan paineilmalla, pituussuuntainen ja pystysuuntainen pito saavutetaan puristimilla (Kuva 32). Kiinnittimen runkolevyyn on leikattu aukko askelmien pohjassa olevaa liitosta varten, jonka ansiosta molemmat kappaleet saadaan hitsattua yhdellä kertaa. (Koneteknologiakeskus Turku Oy, 2014)



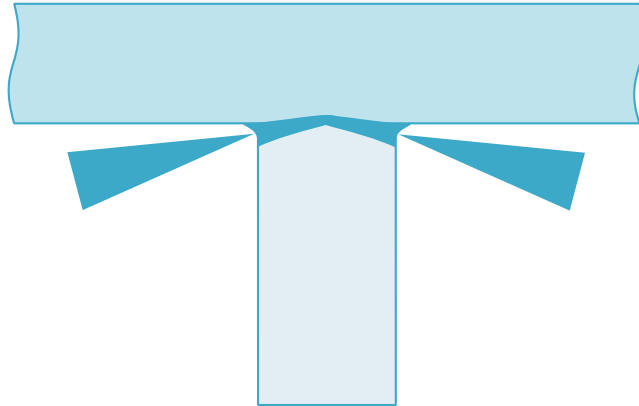
Kuva 32. Laivaportaiden askelmien hitsauskiinnitin. (Koneteknologiakeskus Turku Oy, 2014)

Laserhitsauksella on myös mahdollista yhdistää päittäisliitos ja T-liitos, tai päittäisliitos ja limiliitos (Kuva 33). Laivaportaiden askelmissa hyödynnetään kolmen kappaleen yhteen hitsauksessa yhdistettyä päittäis- ja limiliitosta.



Kuva 33. Yhdistetty päittäis- ja limiliitos sekä yhdistetty päittäis- ja T-liitos.

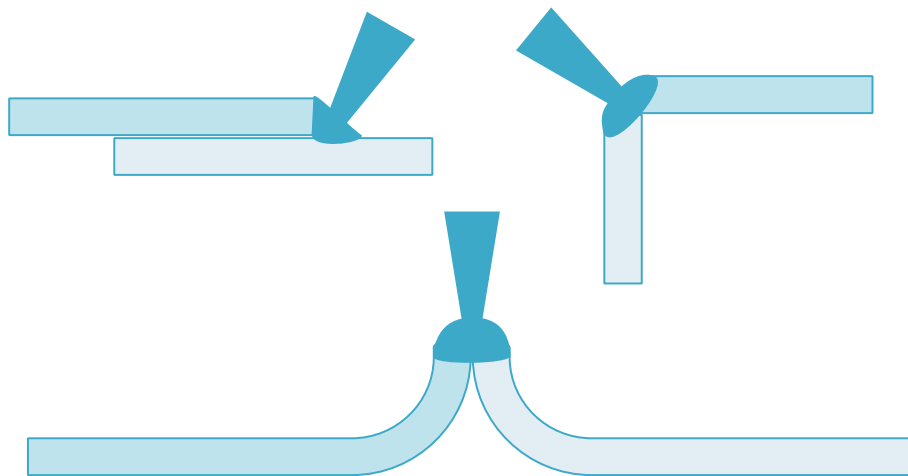
Mikäli liitetään T-liitoksella suurempia ainevahvuuksia, voi järkevin menetelmä olla kaksipuolinen T-liitos.



Kuva 34. T-liitos suuremman ainepaksuuden tapauksessa.

5.4.5 Sulattavan hitsauksen liitosmuodot

Sulattavan hitsauksen liitosmuodot ovat hyvin lähellä lisäaineettoman TIG-hitsauksen liitosmuotoja, sillä molemmissa prosesseissa tuodaan lämpöä kappaleen pintaan, josta se johtuu syvemmälle synnyttäen hitsin, jolla on pienempi syvyys leveys suhde kuin avaimenreikä hitsillä. Tämän tyyppisten liitosten hitsaus tehdään yleensä vähän normaalia isommalla lasersäteen polttopisteellä ja tyypillisesti laserilla jonka sädettä voidaan kuljettaa optisella kuidulla. (Kuva 35)



Kuva 35. Sulattavan hitsauksen liitosmuotoja.

5.5 Hitsauskokoonpanon toleranssit

Polttopisteen koolla on suuri merkitys laserhitsauksessa, ja suuremmalla polttopisteellä voidaan kompensoida hitsauskokoonpanon epätarkkuutta. Suuremmalla polttopisteellä voidaan kompensoida päittäisliitoksen heikkoa reunanlaatua, heikkoa reunojen yhteensopivuutta, sekä liitoksen heikkoa toleranssia. Suuremmalla polttopisteellä saadaan myös limiliitokseen suurempi liitospinta-ala. (Havrilla, 2012b)

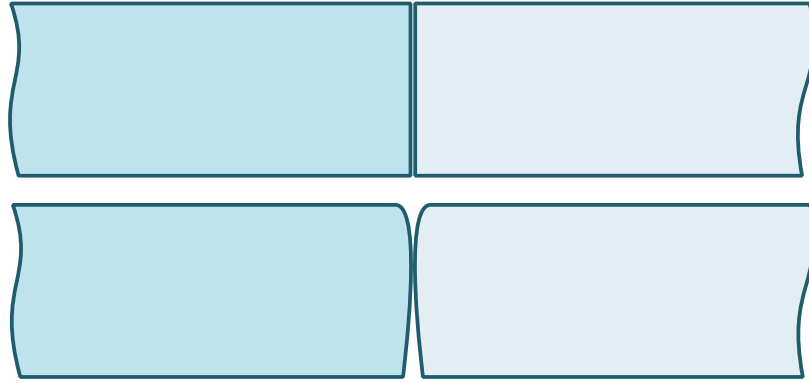
Laserhitsauksen ominaisuudet pääsevät kuitenkin parhaimmilleen hyvällä säteenlaadulla ja pienellä polttopisteellä, jolloin tehotehoisuus on suurimmillaan. Tällöin lämmönsiirto on pienintä, jolloin myös muodonmuutokset jäävät vähäisimmiksi. Myös hitsausnopeutta voidaan nostaa, tai vaadittava lasertehoa laskea. Tällöin kuitenkin vaaditaan hyviä liitospintoja, tarkkaa hitsauskokoonpanoa, sekä tarkkaa säteen ja liitoksen kohdistusta. (Havrilla, 2012b)

Päittäisliitoksen hitsaaminen laserilla ilman lisäainetta vaatii kapean railon. Ihanteellisin tilanne olisi, ettei kappaleiden välissä olisi rakoa ollenkaan, mutta käytännössä I-railon ilmarako on 0,5 – 0,01 mm. Jotta liitettävät kappaleet asettuisivat näin lähelle toisiaan, täytyy niiden valmistus olla todella mittatarkkaa, ja liitettävän reunan geometrian täytyy olla ilmarakoa tarkempi, särmiä ja pintojen täytyy olla kohtisuoria. Laserleikattujen osien laatu riittää laserin päittäishitsaukseen, mutta levytyökeskuksella lävistämällä työstetty reuna ei ole yleensä tarpeeksi suora. Tällöin hybridihitsaus voi toimia.

Liitettävien pintojen puhtaus on tärkeää, sillä epäpuhtaudet haihtuvat hitsauksen aikana. Varsinkin limiliitoksia hitsatessa puhtaus on erittäin tärkeää, sillä epäpuhtaudet voivat jäädä loukkuun ohutlevyjen väliin. Likaiset ja rasvaiset pinnat täytyy puhdistaa, ja ruoste, maali sekä anodisoidut kerrokset täytyy poistaa.

Toleranssien tiukkuuteen vaikuttavat polttopisteen koko, liitokselta vaadittava lujuus. Pienempi polttopiste tiukentaa toleransseja, sillä pienempi polttopiste menee helpommin

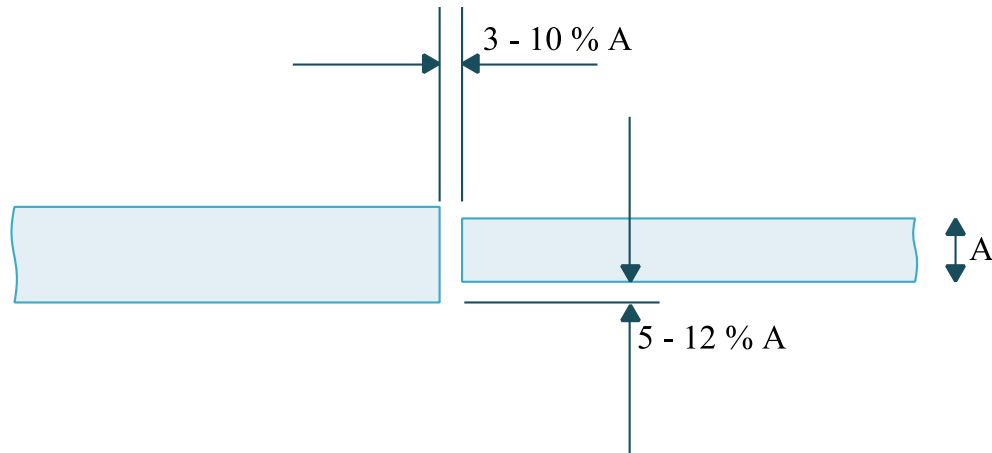
liitoksesta ohi. Liitettävien kappaleiden heikko reunanlaatu synnyttää liitoksen ilmarakoa, vaikka levyt olisivatkin tarkasti vastakkain. (Kuva 36). (Havrilla, 2012b)



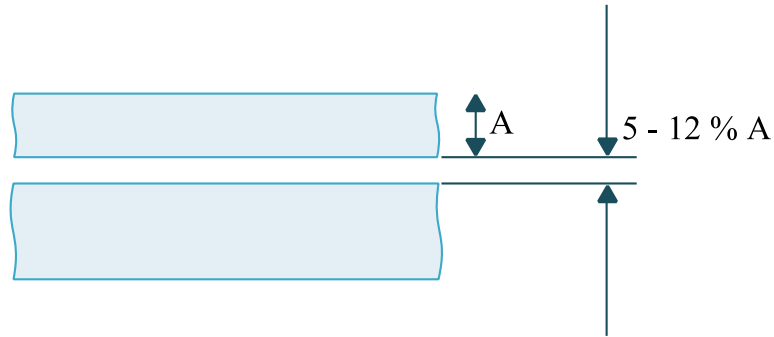
Kuva 36. Huono reunanlaatu synnyttää päittäisliitokseen ilmarakoa. (Havrilla, 2012b)

Laserhitsauksen liitostoleransseille on olemassa karkeita sääntöjä, mutta laserhitsauksen toleranssit ovat kuitenkin tapauskohtaisia. Aina ratkaiseva tekijä ei ole se, onnistuu hitsaus, vaan liitoksen vaatimukset voivat aiheuttaa tiukempia toleransseja.

Ilmarako hitsattaessa päittäisliitosta tyypillisesti on maksimissaan noin 3-10% kapeamman levyn paksuudesta, ja levyjen korkeusero noin 5-12% ohuemman levyn paksuudesta. Suurin sallittu ilmarako limiliitoksissa on noin 5-10% ylemmän levyn paksuudesta. Kurottavan ilmaraon kokoon kuitenkin vaikuttavat jo aiemmin mainitut polttopisteen koko, liitettävien reunojen laatu sekä liitoksen lujuusvaatimukset. (Havrilla, 2012b)

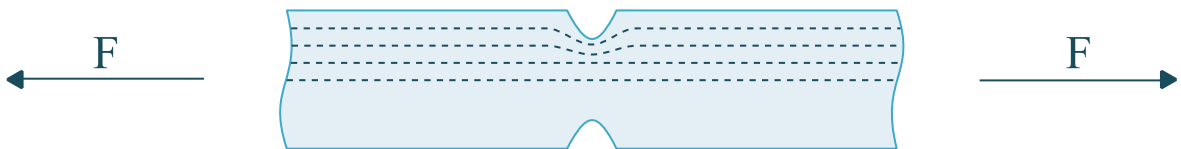


Kuva 37. Ilmaraon ja asetusvirheen toleranssit hitsatessa päittäisliitoksia. (Havrilla, 2012b)



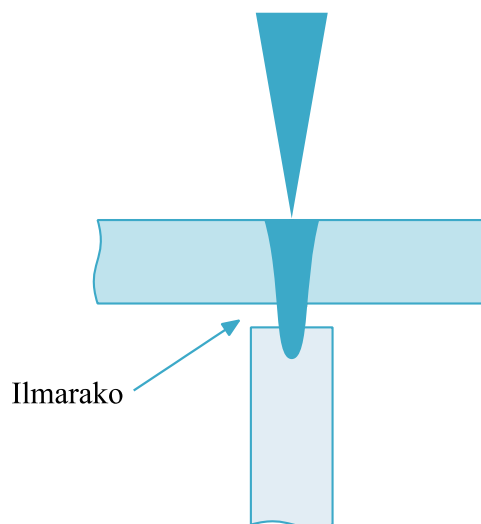
Kuva 38. Osapaikoituksen toleranssi hitsatessa päällekkäisliitoksia. (Havrilla, 2012b)

Lisäaineettomassa päittäishitsauksessa liitoksen vahvuus määrittyy suoraan sen mukaan, kuinka tarkasti liitettävät reunat ovat toisiaan vasten. Ilmarako tai sivuttain epätarkasti vastakkain olevat levyt voivat aiheuttaa reunahaavaa tai vajaata hitsiä, joka pienentää liitoksen poikkileikkauksen pinta-alaa ja aiheuttaa jännityskeskittymiä. (Kuva 39.) (Havrilla, 2012b)

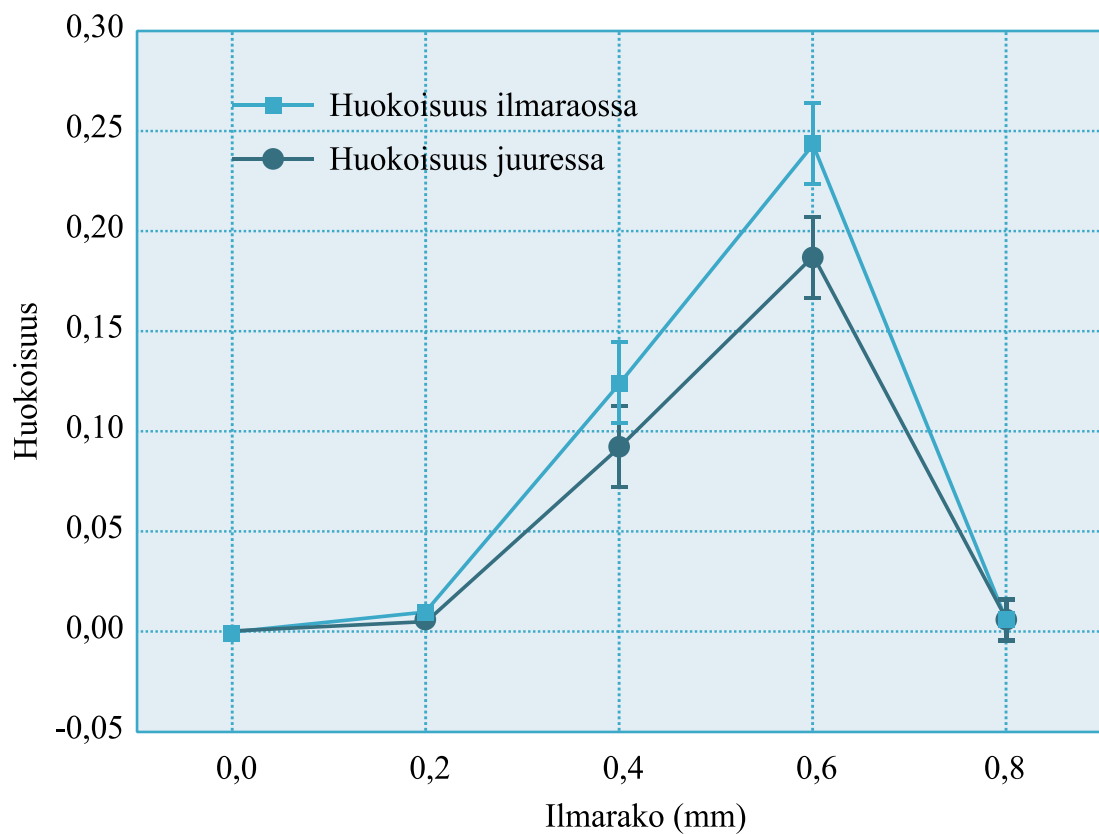


Kuva 39. Ilmaraon aiheuttaman hitsivirheen vaikutus liitoksen yli vaikuttavan voiman akautumiseen. (Havrilla, 2012b)

Limihitsattu T-liitos on yleinen laserhitsausliitos, ja mahdollistaa useita konstruktioita, kuten sandwich-rakenteet. Tällaisessa liitoksessa ilmarako voi heikentää avaimenreiän vakautta, joka voi aiheuttaa huokoisuutta hitsiin, joka vaikuttaa negatiivisesti hitsin ominaisuuksiin. Huokoisuutta voidaan vähentää pitämällä ilmarako pienenä, ja isommalla ilmaraolla huokoisuutta voidaan pyrkiä minimoimaan suuremmalla hitsausnopeudella. (Meng, et al., 2014)



Kuva 40. Ilmarako T-liitoksessa.



Kuva 41. Ilmaraon vaikutus huokoisuuteen limittäisessä T-liitoksen hitsauksessa. (Meng, et al., 2014)

5.6 Materiaalit

Laserilla voidaan hitsata käytännössä kaikkia yleisesti sulahitsattavia materiaaleja. Ongelmallisimpia materiaaleja ovat ne, joilla on hyvä lämmönjohtavuus sekä suuri heijastuvuus käytettävälle laservalon aallonpituudelle. Heijastuvuus on suurempi ongelma hiilidioksidilaserin aallonpituudella (Kuva 11). Heijastuvuuden merkitys ei ole kuitenkaan yhtä suuri kuin lämmönjohtavuuden vaikutus. (Kujanpää, et al., 2005, ss. 169-170)

Tavalliset, seostamattomat ja ruostumattomat teräkset soveltuvat hyvin laserhitsaukseen, ja suurin osa laserhitsauksesta onkin näiden materiaalien hitsausta. Alumiiniseokset soveltuvat hyvin hitsattavaksi lyhemmän aallonpituuden lasereille pienemmän heijastuvuutensa vuoksi. Myös titaanin, tantaalin ja sirkoniumin hitsattavuus laserilla on hyvä. Perinteisten menetelmien tavoin näille materiaaleille tarvitaan erittäin hyvä kaasusuojaus tai tyhjiö. (Kujanpää, et al., 2005, ss. 173, 286)

Tyypillisiä materiaalilähtöisiä laserhitsauksen ongelmia ovat: (Locke & Havrilla, 2013)

1. Huokoisuus, reunahaavat sekä vajaatäyttö
 - a. epävakaisuutta aiheuttavat seosaineet, kuten rikki ja fosfori
 - b. pinnoitteet ja pinnan epäpuhtaudet, kuten sinkki tai öljypohjaiset voiteluaineet
 - o Sinkittyjä pintoja voidaan limihitsata, kun höyrystyvälle sinkille varmistetaan poistumisreitti, esimerkiksi järjestämällä levyjen väliin ilmarakoa, tai jos huokoisuuden heikentävä vaikutus kompensoidaan pidentämällä liitosta.
2. Hauraus ja halkeilu
 - a. Voi tapahtua teräksillä, kun hiiliiekvivalentti ylittää 0.4 %
 - b. 6000- sarjan alumiineilla
3. Heijastuvuus
 - a. Heijastavilla materiaaleilla, kuten alumiinilla ja kuparilla
 - b. 10.6 mikronin aallonpituudella suuri ongelma

5.6.1 Hiiliteräs

Hiiliterästenkin laserhitsattavuus on erittäin hyvä. Kun liitoksen valmistelu, hitsauksen parametrit sekä säteen kohdistus on kunnossa, säästytään suurimmilta ongelmilta eli geometrisilta hitsausvirheiltä. Mikäli hiilipitoisuus on yli 0,25 %, voi olla tarpeen käyttää korotettua lämpötilaa. Hiiliekvivalentti tulisi olla korkeintaan 0,35 - 0,4 %, jotta vältetään hauraudelta sekä halkeilulta. Rikin ja fosforin määrä tulisi pysyä alle 0,04 %, jotta vältetään kuumahalkeilulta. Rikin, fosforin, seleenin ja kadmiumin yhteisosuuden tulisi olla korkeintaan 0,05 % jotta vältetään huokoisuudelta sekä kuumahalkeilulta. Yleiset hitsattavuuden arviointiin käytettävät menetelmät soveltuvat laserhitsaukseen vain rajoitetusti. (Kujanpää, et al., 2005, s. 281) (Locke & Havrilla, 2013)

5.6.2 Ruostumaton teräs

Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat erittäin hyvin laserhitsattavia materiaaleja. Niiden huono lämmönjohtavuus on omiaan laserhitsaukselle, ja johtaa hiiliteräksiin nähden hieman (5-10 %) syvempään ja kapeampaan hitsiin. Laserhitsaus säilyttää ruostumattoman teräksen korroosionkeston ennallaan, sillä matala lämmöntuonti ja korkea hitsausnopeus ei anna kromirikkaille karbideille aikaa erkautua raerajoilla. Joillakin materiaaleilla molybdeenin epätasainen suotautuminen voi heikentää pistekorroosionkestävyyttä, mutta laserhitsauksella tämä on huomattavasti pienempää kuin kaarihitsausmenetelmillä (Kujanpää & David, 1986). Poikkeuksen austeniittisiin teräslaatuihin tekevät ne laadut, jotka sisältävät liikaa rikkiä tai seleeniä, jotka voivat aiheuttaa kuumahalkeilua, kuten kaarihitsauksessakin. Tavallinen austeniittinen ruostumaton teräs AISI 304/304L ja haponkestävä teräs AISI 316/316L sopivat laserhitsaukseen erinomaisesti. (Kujanpää, et al., 2005, s. 279) (Locke & Havrilla, 2013)

Ferriittiset ruostumattomat teräkset eivät sovellu laserhitsaukseen aivan yhtä hyvin kuin austeniittiset laadut, mutta sopivat kuitenkin hyvin laserhitsaukseen. Ferriittisten teräksien hitsaus voi alentaa liitoksen lujuutta, sitkeyttä ja korroosionkestoa. Tämä johtuu liitokseen syntyvästä karkearakenteisesta vyöhykkeestä sekä korkeahiilisillä seoksilla martensiitin syntymisestä. Laserhitsauksen pieni lämmöntuonti pienentää kuitenkin rakeenkasvua, ja

laserhitsin liitos on tavallista kaarihitsausliitosta lähempänä perusaineen lujuutta. Ferriittisistä laaduista parhaiten laserhitsaukseen soveltuvat laadut, joilla on matalat hiili- ja kromipitoisuudet, kuten 409, 430 sekä 434. (Kujanpää, et al., 2005, s. 279) (Locke & Havrilla, 2013).

Martensiittisten laatujen laserhitsattavuus on heikompi kuin muilla ruostumattomilla teräksillä. Liitoksista sekä muutosvyöhykkeistä tulee kovia ja hauraita suuren hiilipitoisuuden vuoksi. Alle 0,1 % hiilipitoisille martensiittisille teräksille voidaan käyttää austeniittista täytelankaa halkeilun sekä sitkeyden parantamiseksi, mutta se ei poista lämpövyöhykkeen haurautta. Myös esilämmitystä ja jälkilämpökäsittelyä voidaan käyttää halkeilun ja haurauden vähentämiseksi. (Kujanpää, et al., 2005, s. 280) (Locke & Havrilla, 2013)

5.6.3 Alumiiniseokset

Alumiinin hitsauksen kriittisimmät ongelmat ovat muutosvyöhykkeen pehmeneminen, kaasuhuokokset, kuumahalkeilu joissain seoksissa, sekä helposti haihtuvien seosaineiden hukka haihtumisen vuoksi. Pinnan luonnollinen oksidi sekä kosteus huoneilmasta tuottavat vetyä, joka liukenee helposti alumiiniin ja aiheuttaa liitoksessa huokoisuutta. Anodisoitu alumiini on halkeilualtis, ja vaahtoutuu. Alumiinin pinnalle syntyvän oksidikalvon poistaminen on järkevää limittäisliitoksissa, jotta liitoksen leveyttä saadaan kasvatettua liitospinnalla. (Locke & Havrilla, 2013)

1000-sarja sekä 5000-sarjasta suurin osa soveltuu hyvin laserhitsaukselle. Myös 3003, 4032 sekä 4047 soveltuvat hitsaukselle. 6000-sarja ei ole tarpeeksi taipuisa kestääkseen kutistumisjännityksiä, ja sillä on taipumusta halkeilla. Se on kuitenkin hitsattavissa, kun piipitoisuus on maksimissaan 3 % ja magnesiumpitoisuus on maksimissaan 4,5 %. Näissä tapauksissa lisäainelangan käytöllä voidaan parantaa liitoksen ulkonäköä sekä keskimääräistä lujuutta. (Locke & Havrilla, 2013)

Alumiinin hitsauksessa sula täytyy suojata sopivalla suojakaasuseoksella. Sopivia kaasuseoksen aineksia ovat Argon, Typpi sekä Helium. Suojakaasun käytöllä voidaan vähentää sulkeumien sekä pinnan huokosien syntymistä. Alumiinin hitsauksessa lisäainelangan käytöllä ja valinnalla voidaan parantaa hitsattavuutta vähentämällä halkeilualttiutta, vaikuttaa liitoksen muovattavuuteen, sekä parantaa liitoksen lujuutta vaikuttamalla sen veto- ja iskulujuuteen sekä väsymiskestävyyteen. Lisäainelangan käytöllä voidaan myös tehostaa liitoksen korroosionkestoa. (Kujanpää, et al., 2005, s. 286) (Locke & Havrilla, 2013)

5.6.4 Sekaliitokset

Laserhitsauksen nopea sulaminen, jähmettyminen sekä jäähtyminen ja syntyneen hitsin kapeus tekevät laserhitsauksesta oivan liittämistavan eripariliitoksille. Laserhitsauksen kohdistettavissa olevan lämmöntonni ansiosta onnistuu niin eriparimateriaalien kuin eripaksuistenkin materiaalien sekaliitokset. Tavallisen hiiliteräksen ja austeniittisen ruostumattoman teräksen välinen sekaliitos lienee konepajateollisuuden tärkeimpiä laserhitsauksen eripariliitoksista. Se tehdään perinteisessä kaarihitsauksessa yleensä yliseostetulla lisäaineella, jolloin lisäainekustannukset nousevat huomattavasti. Laserhitsaamalla liitos on mahdollista saada aikaan ilman lisäainetta. Tämä vaatii huolellisuutta, sillä päittäisliitoksessa säde kohdistetaan hieman ruostumattoman teräksen puolelle, jolloin liitos seostuu sopivasti, ja säästytään kylmähalkeilulta. Kun eripariliitos tehdään limiliitoksena esim. vuoraussovelluksissa, säilyy päällimmäisen ruostumattoman levyn korroosionkesto-ominaisuudet ennallaan, mikäli hitsausnopeus on riittävän suuri, jolloin sekoittuminen jää riittävän pieneksi. (Kujanpää, et al., 2005, s. 288)

5.7 Kiinnittimet

Ennen kuin hitsaus voi alkaa, täytyy liitettävät kappaleet kasata kiinnittimeen. Tämän vuoksi pelkkä kappaleen suunnittelu ei riitä, vaan kappaleen hitsaukselle täytyy luoda myös soveltuva kiinnitin. Kiinnittimellä on monta tehtävää;

- Se mahdollistaa, että kappaleet asettuvat toistuvasti ja tarkalleen samalla tavalla
- Sen täytyy varmistaa kapeiden liitosgeometrioiden tarkkuus alle millimetrin kymmenyksen
- Kiinnittimellä voidaan kompensoida edeltävissä työvaiheissa syntyneitä mittapoikkeamia
- Skanneripäällä tehtävän etähitsauksen tapauksessa kiinnittimeen voidaan lisätä suojakaasun syöttö

(Buchfink, 2007, s. 162)

Kiinnittimen suunnittelu ja valmistaminen on tärkeä osa automatisoitua laserhitausta. Kunnollisen kiinnittimen kehittämiseen voi mennä viikkojakin, mutta se on siitä huolimatta kannattava sijoitus, kun kappaleita valmistetaan keskikokoisia tai suuria eriä. Pienille erille kiinnittimen valmistamisessa on järkeä vain, jos sen valmistus ei vaadi suuria ponnistuksia. Helposti kiinnittimen valmistus onnistuu esimerkiksi käyttämällä automaattisia suunnitteluohjelmistoja, ja toinen vaihtoehto on käyttää standardisoituja moduulirakenteisia kiinnittimiä, joita on mahdollista mukauttaa erilaisiin työkappaleisiin. (Buchfink, 2007, s. 163)

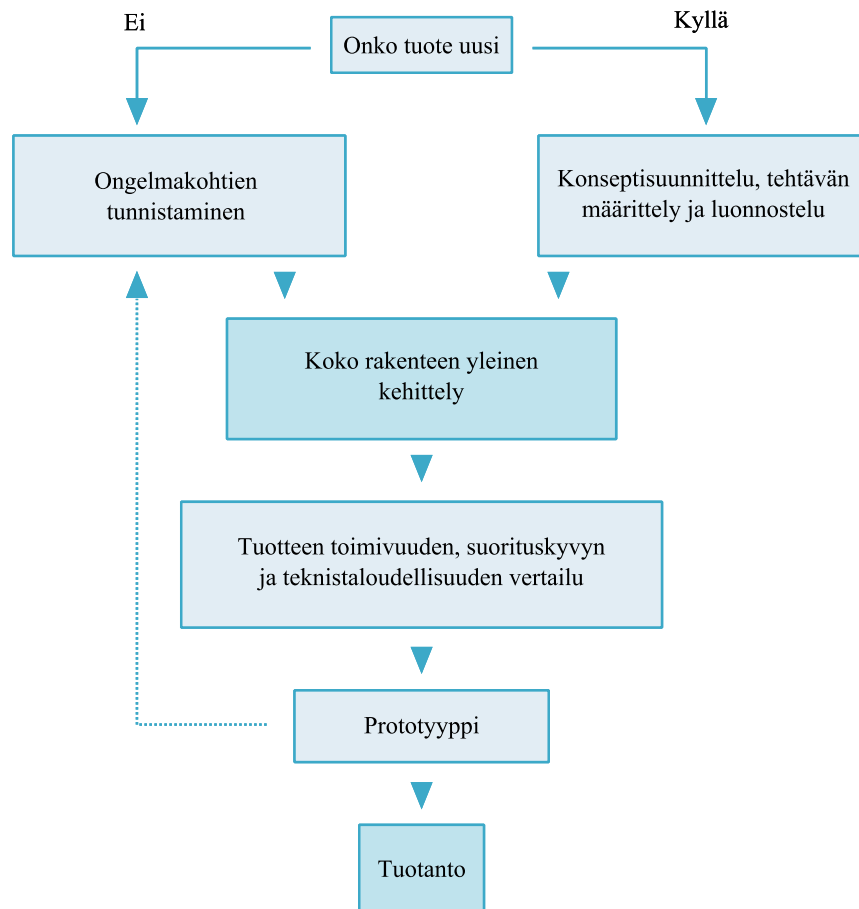
Normaaleja kiinnittimiä valmistetaan usein ohutlevyrakenteista, ja ne voivat olla hyvinkin monimutkaisia. Eri pinnat kiinnittimisessä voivat toimia kappaleen tukena sekä vasteina kappaleen kokoonpanolle. Kiinnittimen lukituselementit kiinnittävät kokoonpanon tukevasti kiinnittimeen. (Buchfink, 2007, s. 163)

Yksittäiskappaleilla tai pienillä sarjoilla kiinnitin usein korvataan käyttämällä tiheää silloitusta laserhitaamalla. Se tosin lisää asetusaikaa moninkertaiseksi.

5.8 Hitsattavan tuotteen suunnittelun malli

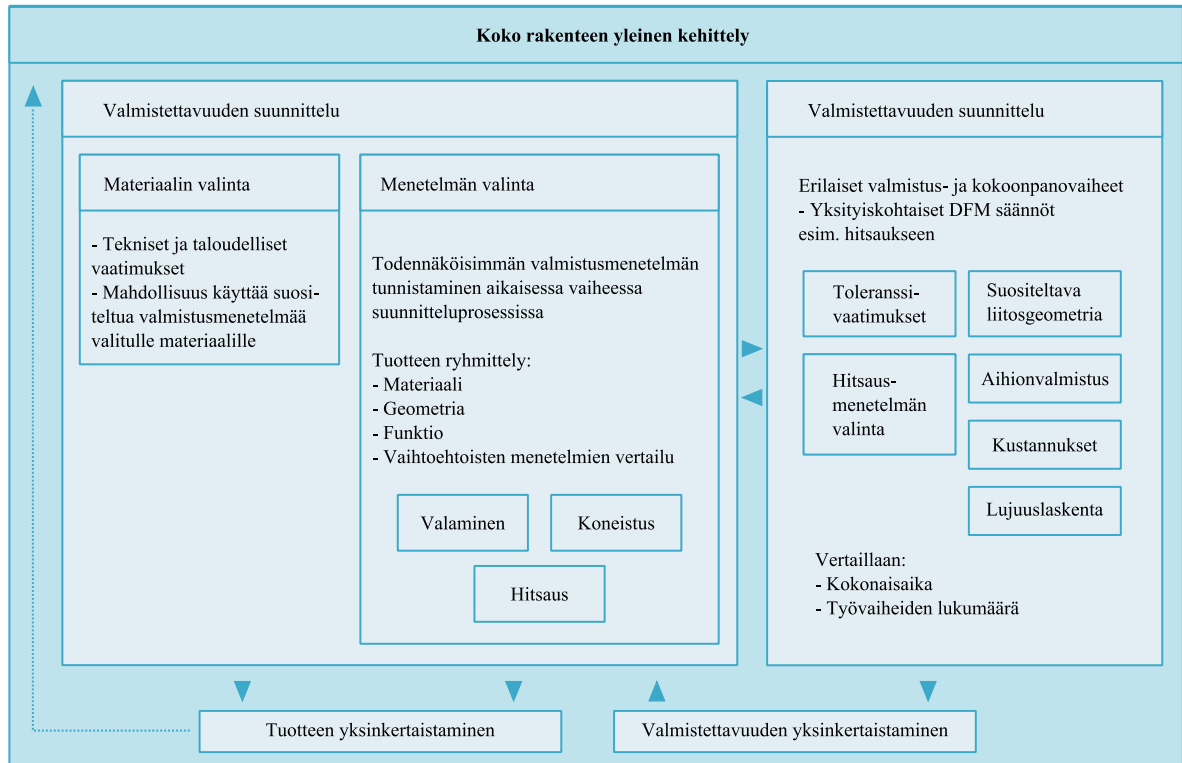
Marko Vattulainen on kehittänyt diplomityössään perinteisiin DFMA-malleihin sekä rinnakkaissuunnittelumalliin pohjautuvan hitsauksen suunnittelumallin, DFW:n (Design for Welding) (Kuva 42). DFW-mallia ei ole tehty varsinaisesti laserhitausta varten, mutta se on

sovellettavissa hyvin kaikkiin hitsausmenetelmiin. Mallin mukaan suunnitteluprojektin alku riippuu siitä, onko suunniteltava tuote olemassa oleva vanha vai kokonaan uusi tuote. Uuden tuotteen suunnittelu alkaa konseptoinnista, kun olemassa olevan tuotteen suunnittelu aloitetaan sen ongelmakohtien tunnistamisesta. (Vattulainen, 2009, s. 42)



Kuva 42. DFW-suunnittelumalli. (Vattulainen, 2009, s. 42)

Seuraava vaihe suunnitteluprojektissa on rakenteen yleinen kehittäminen, jossa hyödynnetään rinnakkaissuunnittelua. (Kuva 43.) Tässä vaiheessa kaikkia tuotteeseen liittyviä asioita tarkastellaan samanaikaisesti suunnittelun näkökulmasta. Osien valmistusta pohditaan samaan aikaan kun tuotteen kokoonpanoa suunnitellaan. Tässä kehittelyn vaiheessa tuote saa geometrian, dimensiot, yksityiskohdat ja osaluettelon. Tämä on myös vaihe, jossa tuote kannattaa jakaa moduuleihin, joita kehitetään erikseen, ja tuotteesta pyritään saamaan mahdollisimman yksinkertainen. (Vattulainen, 2009, s. 43)



Kuva 43. Koko rakenteen kehittäminen, osa DFW-mallia. (Vattulainen, 2009, s. 44)

Koko rakenteen yleinen kehittäminen on jaettu tarkemmin kahteen osaan, joista toinen tarkastelee valmistettavuuden suunnittelua ja toinen valmistettavuuden/hitsattavuuden viimeistelyä. Valmistettavuuden suunnittelu on jaettu vielä erikseen materiaalin sekä valmistusmenetelmän valintaan; materiaali valitaan teknisten ominaisuuksien sekä hinnan perusteella, ja samalla mietitään valmistusmenetelmää valitulle materiaalille. Erilaisia tuotekonsepteja saadaan, kun suositetaan suunnittelussa erilaisia menetelmiä, muotoja, sekä arvoja. Näistä paras valitaan testattavaksi prototyypiksi. (Vattulainen, 2009, s. 44)

Valmistusmenetelmää valitessa taitava suunnittelija osaa valita todennäköisimmän valmistusmenetelmän kullekin osalle. Suunnittelun tuotteen osat jaetaan sen jälkeen materiaalin, geometrian ja osan toiminnon mukaan eri ryhmiin, joiden valmistusta voidaan tutkia erikseen. (Vattulainen, 2009, s. 44)

Valmistettavuuden/hitsattavuuden viimeistelyvaiheessa käydään läpi valmistuksen ja kokoonpanon vaiheita, joita käydään myös DFMA-mallissa. Tässä vaiheessa käydään läpi rakenteen, hitsausmenetelmän sekä materiaalin vaatimuksia. Suunniteltaessa hitsattavaa rakennetta, täytyy miettiä hitsin mekaanisia ominaisuuksia, viranomaismääräyksiä, laatuluokkia, toleransseja, liitosgeometriaa, aihionvalmistusta, kustannuksia, kappaleen kiinnitystä, lämmöntuontia, hitsausjärjestystä sekä monia muita hitsaukseen liittyviä asioita. (Vattulainen, 2009, s. 45)

Hitsattavan tuotteen suunnittelumalliin liittyy paljon takaisinkytkentöjä, joiden seurauksena suunnitteluprosessiin liittyy paljon uudelleen suunnittelua. Nämä ovat kuitenkin erittäin tärkeitä suunnittelun ongelmakohtien selvittämisessä. Tuotteen yksinkertaistaminen on yksi valmistusystävällisen suunnittelun tärkeimmistä periaatteista, ja sen vuoksi takaisinkytkennät ovat toimivalle suunnittelumallille välttämättömiä. (Vattulainen, 2009, s. 42)

6 LASERHITSAUKSEN EDUT JA HAASTEET

Laserhitsauksen kapasiteetti on perinteisempiä hitsausmenetelmiä suurempi useasta syystä. Laserhitsauksen pieni lämmöntuonti yhdessä kapean ja korkean hitsimuodon kanssa johtavat pieniin kutistumiin ja muodonmuutoksiin työkappaleessa. Myös muutosvyöhyke pysyy kapeana. Hyvälaatuisen laserhitsin ulkonäkö on myös todella laadukas. Vahvat hitsiliitokset parantavat kappaleiden jäykkyyttä ja pienentävät tuotteiden tai rakenteiden tarvittavaa kokoa. Laser soveltuu hankalasti luoksepäästävien hitsien hitsaamiseen, koska säde on kapea, kosketukseton ja prosessi voidaan tehdä yhdestä suunnasta. (Havrilla, 2013)

Laserhitsaus on helposti automatisoitavissa ja hyvin toistettavissa oleva hitsausprosessi, jonka hitsausliitosten jälki ja laatu on yhtenäistä. Laserhitsaus on joustava prosessi kattavien hitsausgeometria- ja materiaalivalikoimien vuoksi. Laserhitsaus on myös usein perinteisiä hitsausprosesseja nopeampaa. Sen tuotantokapasiteetti on hyvä korkean tehotiheyden ja hyvän sädeajan vuoksi. Sädeaikaa voidaan maksimoida jakamalla sädettä useammalle hitsauspäälle. (Havrilla, 2013)

Laserhitsaus voi tuoda myös paljon taloudellisia säästöjä. Suuresta tuottavuudesta seuraa, että hitsausasemia ei tarvita välttämättä yhtä monia. Metallijätteen ja korvaavan työn määrä laskee, ja myös manuaalinen työ jää vähemmälle. Mikäli tuotteiden suunnittelu optimoidaan laserhitsausta varten, pienenee myös tuotteen fyysinen koko sekä paino. Laserhitsauksen siistin lopputuloksen vuoksi osa työvaiheista voi jäädä kokonaan pois. (Havrilla, 2013)

Laserhitsaus on tuotantomenetelmä, joka tuo monia uusia mahdollisuuksia tuotesuunnitteluun. Tuotantoa varten optimoidulla tuotesuunnittelulla saatavat edut voivat olla paljon suurempia kuin ilmeiset aiemmin mainitut korkea hitsausnopeus ja matala lämmöntuonti. (Salminen, et al., 2010b)

Laserhitsauksella on myös huonotkin puolensa. Pääomasijoitus on moninkertainen perinteisiin menetelmiin verrattuna, ja hankinnan lisäksi täytyy palkata tai kouluttaa paljon tietotaitoa. Laserhitsaus on todella tarkka hitsausmenetelmä, joten se myös vaatii hitsattavalta kokoonpanolta tarkempia toleransseja, joka voi vaatia ylimääräisiä työvaiheita. Osakokoonpanon kappaleiden geometria ja railojen sijainti täytyy saada sijoilleen tarkemmin kuin perinteisiä menetelmiä käytettäessä. Tämä vaatii tarkkoja valmistusmenetelmiä kokoonpanojen komponenteilta sekä käytettäviltä hitsauskiinnittimiltä. (Havrilla, 2013).

Lisäksi on hyvä korostaa, että vertailtaessa laserhitsauksen kustannuksia muihin menetelmiin tulisi vertailla kokonaistuotteen hitsimetrejä eikä palo- tai sädeajoja, koska laserhitsaus on nopea ja korvaa usein monipalkohitseja yksipalkohitseilla.

7 KUSTANNUS- JA INVESTOINTILASKELMAT

Hitsauskustannuksia tarvitaan selvittäessä tuotteen kustannusrakennetta, jolloin voidaan määrittää kokonaisuuden kannalta oleelliset kustannukset, joihin kannattaa paneutua. Tuotteen suunnittelija on avainasemassa, ja hän vaikuttaa olennaisesti tuotteen taloudellisuuteen, niin valmistuksen kuin lopputuloksenkin kannalta. Myös turvallisuus ja

laadunhallinta ovat tärkeitä asioita tuottavuuden kannalta, vaikka usein unohdettuja ovatkin. (Lukkari, 2011, s. 2)

Hitsauskustannuksien laskennalla saadaan selvitettyä eri tekijöiden osuudet ja vaikutukset tuotteen kustannuksiin hitsaustuotannossa. Hitsauksen kustannusten osuus koko tuotteen kustannuksista voi vaihdella eri teollisuuden toimialoilla hyvinkin paljon. (Stenbacka, 2011, ss. 21,38)

Tuotteen hitsauskustannukset on selvitettävä, jotta tuote voidaan hinnoitella kannattavasti. Lisäksi laskennasta on hyötyä valmistusmenetelmää päätettäessä, arvioidessa suunnitteluvaihtoehtojen merkitystä valmistuskustannuksiin ja hitsausmenetelmien keskinäisessä vertailussa. (Lukkari, 2011, s. 2)

7.1 Laser- ja kaarihitsauksen kustannuserot

Perinteisessä MIG/MAG hitsauksessa kustannuksia syntyy koneen sekä työvoiman tuntihinnasta, suojakaasusta, energiasta sekä lisäaineesta. Hitsauskustannuksien yleispätevä esittäminen on kuitenkin hyvin hankalaa, sillä hitsauskustannukset ovat usein ”materiaali-, talo- ja tapauskohtainen” asia. Joka tapauksessa käsin kuljetettavassa hitsauksessa ylivoimaisesti suurin osa kustannuksista muodostuu työvoimasta, ja tämän vuoksi paloaikasuhteella (valokaaren paloajan osuudella kokonaistyöajasta) on hyvin suuri merkitys kokonaiskustannuksiin perinteisessä hitsauksessa. Lukkarin mukaan manuaalisessa kaarihitsauksessa työkustannusten osuus kustannuksista on yleensä 75-90% . (Lukkari, 2006, s. 9)

Stenbackan mukaan puikko ja puolikoneellisen MIG/MAG hitsauksen työkustannusten osuus on noin 60-80% kokonaiskustannuksista. Robotisoidussa hitsauksessa osuudet muuttuvat huomattavasti suurien koneinvestointien vuoksi. (Stenbacka, 2011, s. 84) Myös laserhitsauksen lisäaineettomuus muuttaa kustannusrakennetta.

Hitsauksen kokonaiskustannukset voidaan jakaa

- Työkustannuksiin
- Hitsausainekustannuksiin
- Konekustannuksiin
- Energiakustannuksiin
- Kunnossapitokustannuksiin (Stenbacka, 2011, s. 84)

Työkustannuksien tuntikustannus pitää sisällään palkan, erilaiset sosiaalikulut sekä lakisääteiset maksut. Hitsausainekustannuksiin kuuluvat lisäaineet, suojakaasut ja jauheet, riippuen prosessista. Lisäaineettomassa laserhitsauksessa tämä tarkoittaa lähinnä prosessikaasua. Energiakustannukset jätetään usein laskuista pois, sillä niiden osuus jää monesti hyvin pieneksi. (Stenbacka, 2011, s. 85)

Koneen tuntihinta H_k voidaan laskea kaavalla

$$H_k = \left(H_h * \left(\frac{1}{T_p} + \frac{p}{2 * 100} \right) + Y \right) * \frac{1}{T_k} \text{ [€/h]} \quad (x)$$

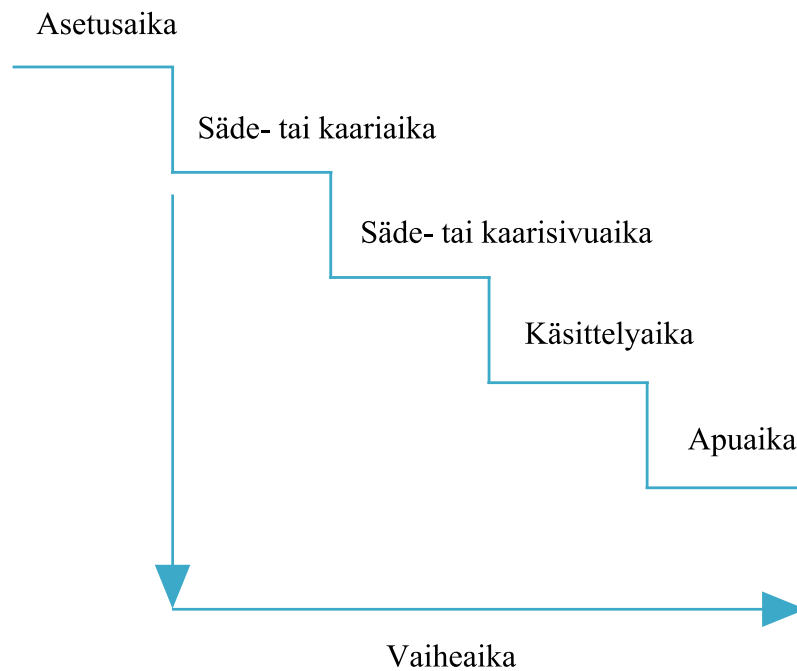
Jossa H_h on koneen investointikulutus euroissa, T_p on koneen poistoaika vuosissa, p on pääoman korko prosentteissa, Y on koneen vuosittaiset huoltokustannukset ja T_k on koneen vuosittainen käyttöaika. (Jääskeläinen, et al., 2010, s. 79)

Kuten kuvaajasta voidaan nähdä, koneen tuntihinta kasvaa suoraan suhteessa investointihintaan, ja laskee kun koneen vuosittainen käyttöaika ja koneen poistoaika kasvavat. Jotta koneen tuntihinnan saisi kannattavalle tasolle, täytyy mahdollisesti hyväksyä normaalia pidempi takaisinmaksuaika, ja koneelle täytyy löytyä reilusti töitä, jotta vuosittainen käyttöaika saadaan korkealle. Mikäli hitsattavaa ei riitä kuin yhteen vuoroon kahden vuoron sijasta, on koneen tuntikustannus lähes kaksinkertainen.

7.2 Hitsauksen osa-ajat

Robotisoidun hitsauksen tehtävääika voidaan jakaa osa-aikoihin, joita ovat asetusaika, säde- tai kaariaika, säde- tai kaarisivuaika, käsittelyaika, apuaika sekä vaiheaika (Kuva 44). Samat

osa-ajat pätevät karkeasti myös käsinhitsaukseen. Asetusaika tarkoittaa aikaa, joka kuluu valmisteluun ennen varsinaisen työn aloittamista. Tällaista valmistelua ovat esimerkiksi kappaleen ohjelman valitseminen, sekä kiinnittimen asettaminen kappaleenkäsittelijään. Säde- tai kaariaika on aika, joka hitsaussolulta kuluu varsinaiseen hitsaamiseen, eli aika jona säde on päällä. Säde- tai kaarisivuaika on aika, joka liittyy suoraan hitsaukseen, kuten suuttimen puhdistus tai prosessikaasupullon vaihto. Käsittelyaika käsittää kappaleen käsittelyyn kuuluvan ajan, kuten kappaleen kokoonpano kiinnittimeen, mahdollinen silloitus ynnä muut. Apuaika on aikaa, jota ei voida suorasti liittää hitsaustyöhön. Vaiheaika on säde- tai kaariajan, säde- tai kaarisivuajan, käsittelyajan, apuajan sekä vaiheajan summa.



Kuva 44. Hitsaustehtävään kuluva aika robotisoidussa hitsauksessa. Muokattu: (Stenbacka, 2011, s. 66)

Kun koneen tuntihinta muodostavaa suuren osuuden hitsauskustannuksissa, on kappaleen hitsaussolulta viemä aika hyvin merkityksellinen. Materiaalivirta on saatava sujuvaksi ja koneen käyttöaste on saatava korkeaksi, ja sivu- sekä asetusajat on minimoitava. Sädeaikaan vaikuttavat lähinnä tuotteessa oleva hitsin määrä sekä hitsausnopeus, mutta muihin aikoihin voi vaikuttaa huomattavasti helpommin. Esimerkiksi jos kyseessä on pienempi solu, voidaan käyttää kääntyvää kappaleenkäsittelylaitetta johon saa kaksi kiinnitintä. Näin operaattori voi

purkaa hitsatun tuotteen kiinnittimestä ja kokoonpanna siihen seuraavan samaan aikaan kun lasersolu hitsaa toisessa kiinnittimessä olevaa tuotetta. Mikäli purku ja kokoonpano ehditään suorittaa ohjelman sädeajan aikana, koostuu vaihe aika sädeajasta, kappaleenkäsittelylaitteen puolen vaihdosta sekä ohjelman uudelleen käynnistämisestä. Käsittelyaika riippuu myös suuresti toiminnan järjestelystä, materiaalivirroista, kiinnittimen tyypistä, sekä tuotteen kokoonpantavuudesta.

Paloaikasuhte on termi jota käytetään paljon kaarihitsauksessa kuvaamaan tuottavuutta. Se on kuitenkin käsitteenä problemaattinen. Mikäli hitsausnopeutta saadaan kasvatettua muiden aikojen kuitenkin säilyessä samana, paloaikasuhte laskee, vaikka hitsauksen tuottavuus nousee kokonaisajan laskiessa. Paloaikasuhte vaihtelee hyvin laajalla alueella riippuen tuotteesta, hitsausprosessista, tuotanto-olosuhteista ja mekanisointiasteesta. (Lukkari, 2011, s. 3)

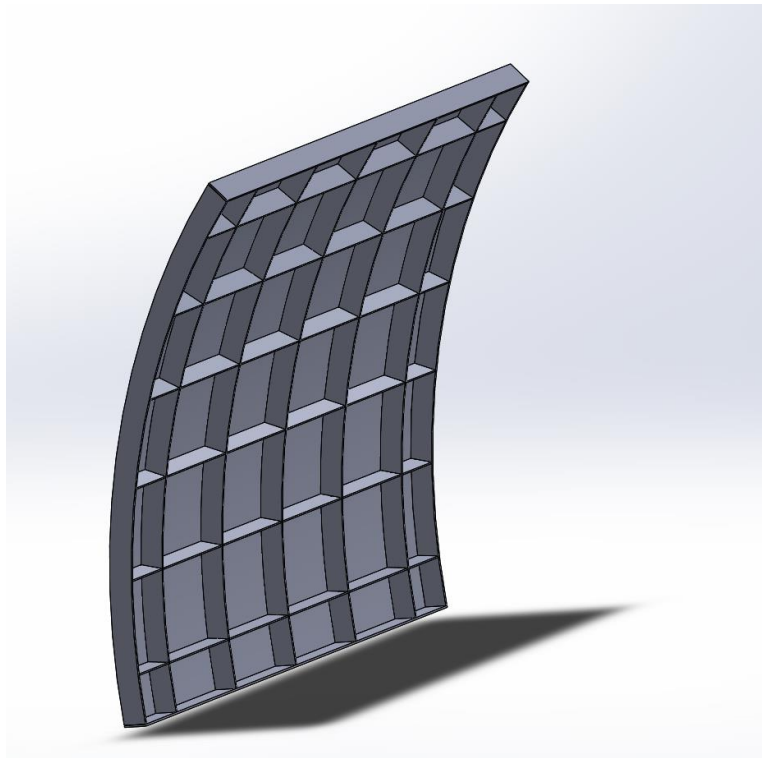
7.3 Esimerkkilaskenta

Tässä kappaleessa on laskettu kuvitteellisen tuotteen hitsauskustannuksia laserilla hitsattuna. Laskennan tuloksia arvioidessa on huomioitava, että vaikka lähtöarvot ovat realistisia, ne ovat kuitenkin kaikki fiktiivisiä arvioita.

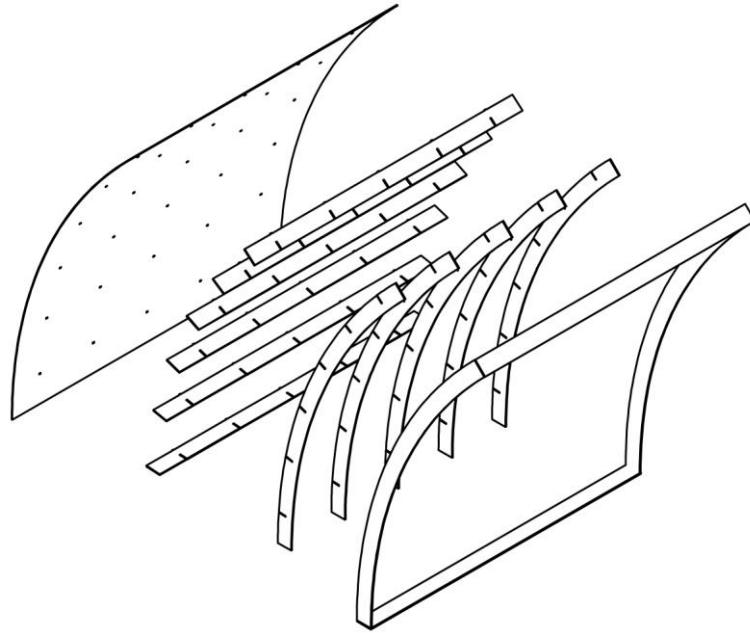
Esimerkkilaskennassa käytettävä kuvitteellinen tuote on jäykistetty kaareva teräsovi (Kuva 45). Se koostuu yhdestätoista ristiin asetetusta jäykisteestä, oven ulkokehikosta sekä oven pintalevystä (Kuva 46). Pintalevyn ainevahvuus mahdollistaa kokoonpanon ilman erillistä taivutusta, ja kaikki kokoonpanon osat voidaan kokoonpanna kiinnittimeen suoraan laserleikkauksen jälkeen.

Tuote hitsataan kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa hitsataan jäykisteet ovilevyyn. Jäykistekehikko kasataan levy puoli ylöspäin kiinnittimeen, ja levy asetetaan kohdistusnastojen avulla jäykistekehikon päälle. Jäykisteet hitsataan levyyn kiinni levyn läpi limi-T-liitoksella. Toisessa vaiheessa hitsataan oven ulkokehikko sekä jäykisteisiin että ovilevyyn. Hitsatut jäykisteet ja levy siirretään toisen vaiheen kiinnittimeen, johon tämän

ympärille kokoonpannaan oven uloin kehikko. Kehikon nurkat sekä kehikon ja levyn välinen hitsaus suoritetaan päittäisnurkkaliitoksella, ja kehikon sekä jäykistelevyjen välinen liitos on limi-T-hitsaus.



Kuva 45. Jäykistetty ovi.



Kuva 46. Jäykistetyn oven räjäytyskuva.

Molempien hitsausvaiheiden sädeajat yhteenlaskettuina ovat 2 minuuttia ja 16 sekuntia (*Taulukko 3*). Vaiheajaan sisältyy vielä hitsausrobotin vapaaliikkeeseen kuluva aika, sekä kappaleenkäsittelijän kääntymiseen kuluva aika. Täksi ajaksi arvioidaan laskennassa 30 sekuntia, jolloin yhden jäykistetyn oven hitsauksen vaiheajaksi tulisi 2 min 46 s, sillä olettamuksella, että operaattorit ehtisivät tässä ajassa purkaa valmiin kehikon, siirtää ensimmäisen vaiheen kiinnittimestä hitsatun oven toisen vaiheen kiinnittimeen ja kokoonpanna toisen vaiheen kiinnittimeen oven ulkokehikon, sekä kasata jäykisteet ja ovilevyn ensimmäisen vaiheen kiinnittimeen.

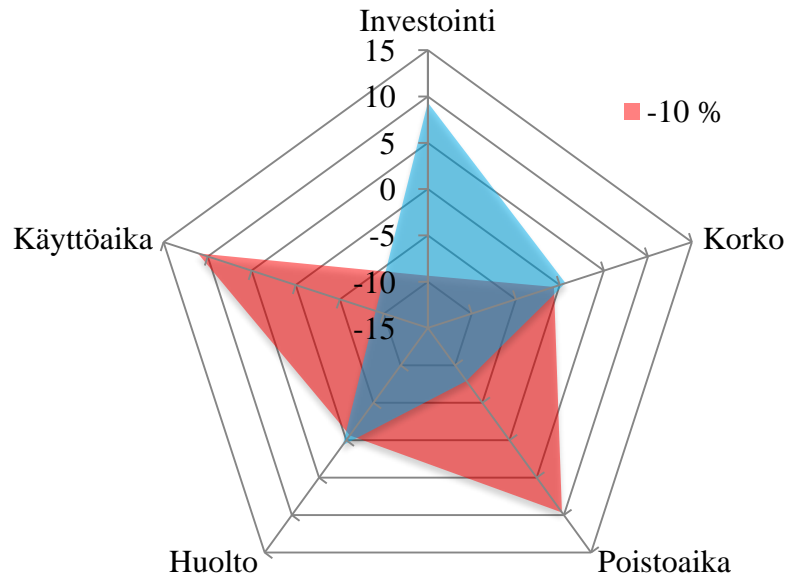
Taulukko 3. Jäykistetyn oven hitsauksen sädeajan taulukko.

	hitsausnopeus [m/min]	hitsin pituus [m]	sädeaja [min]
Ensimmäinen vaihe			01:41,9
Ovi/jäykisteet	7	11,885	01:41,9
Toinen vaihe			00:34,3
Ovi/kehikko	10	4,354	00:26,1
Kehikko/jäykisteet	10	1,1528	00:06,9
Kehikon nurkat	10	0,2096	00:01,3
Vaihe yhteensä			02:16,2

Laitteiston tuntihinnan laskemiseksi tarvitaan lähtöarvot, joita ovat investointihinta, takaisinmaksuaika, pääoman korko, vuosittaiset huoltokulut sekä vuosittainen käyttöaika. Oletetaan, että investoinnin suuruus kaikkine kertaluontoisine kassamaksuineen olisi miljoona euroa, takaisinmaksuaika olisi viisi vuotta, pääoman korko 3 prosenttia, vuosittaisiksi huoltokustannuksiksi annettiin arvioksi 15 000 € ja käyttöaika 3542 tuntia vuodessa. Käyttöajan laskennassa on käytetty arvoja 21,5 työpäivää/kuukausi, kaksi vuoroa/työpäivä sekä 7 tehokasta työtuntia työvuorolle. Laskennassa on huomioitu laitteistolle viisi päivää huoltoa vuodessa.

$$\begin{aligned}
 H_k &= \left(H_h * \left(\frac{1}{T_p} + \frac{p}{2 * 100} \right) + Y \right) * \frac{1}{T_k} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \\
 &= \left(1\,000\,000 * \left(\frac{1}{5} + \frac{3}{2 * 100} \right) + 15\,000 \right) * \frac{1}{3542} \\
 &= 64,94 \text{ €/h}
 \end{aligned}$$

Koneen investoinnin tuntihinnaksi laskennassa saatiin 64,94 €/h. Herkkyysanalyysillä voidaan tarkastella, kuinka paljon kymmenen prosentin vaihtelu lähtöarvossa vaikuttaa laitteiston tuntihintaan (Kuva 47). Analyysistä nähdään, että sekä poistoajalla että käyttöajalla on huomattavan suuri merkitys laitteiston tuntihintaan, kun suhteellisen suuren 15000 € vuosittaisen huoltokustannuksen kymmenen prosentin vaihtelu tai pääoman koron kymmenen prosentin vaihtelu ei tuo suuria muutoksia tuntihintaan.



Kuva 47. Herkkyysanalyysi laitteiston tuntihinnalle.

Oletetaan, että ovia tehtäisiin 40 kappaletta erä viikoittain, eli 2080 kappaletta vuosittain. Asetusaikaa kiinnittimien kiinnittämiseen, ja muihin valmisteleviin toimenpiteisiin varataan tunti. Varmuuskertoimeksi vaiheajan laskentaan valitaan 1,3. Näillä arvoilla 40 kappaletta erän hitsausajaksi tulisi 178 minuuttia.

$$\begin{aligned}
 & \text{asetusaika} + 1,3 * \text{vaiheaja} * 40 \text{ kpl} [\text{min}] \\
 & = 60 + 1,3 * 2,27 * 40 [\text{min}] \\
 & = 178,04 \text{ min}
 \end{aligned}$$

Oletetaan, että operaattorin tuntikustannus olisi 35 €/h, suojakaasun tuntikustannus olisi 3 €/h, ja sähkön tuntikustannus olisi 5€/h. Aiemmin laskennassa koneen tuntikustannukseksi saatiin noin 65 €/h. Hitsauksen yhteenlaskettu tuntihinta olisi siis 108 €/h. Tässä laskelmassa ei ole otettu vaadittavan lattiapinta-alan kustannuksia huomioon. Yhden 40 kappaleen ovierän hitsauskustannukset olisivat siis

$$\frac{178min}{60} [h] * 108 \text{ €/h} = 320 \text{ €}$$

Josta yhdelle ovelle hitsauskustannuksia jäisi

$$\frac{320 \text{ €}}{40 \text{ kpl}} = 8\text{€/kpl}$$

Koko vuoden tuotannon, eli 52 viikon erien yhteenlaskettu hitsausaika olisi 154,3 tuntia. Oletuksena on, että hitsaussolulle riittää töitä kahteen vuoroon, joten hitsausovien prosentuaalinen osuus hitsaussolun koko vuoden 3542 tunnin työajasta olisi 4,3 %. Mikäli hitsaussolulle ei riittäisi töitä kuin yhteen vuoroon, se kaksinkertaistaisi solun tuntikustannukset, joka taas nostaisi tapauksen hitsauskustannuksia noin 60%. Toisen operaattorin lisääminen kahdessa vuorossa toimivaan hitsaussoluun kasvattaisi tapauksen hitsauskustannuksia noin 33%.

7.4 Vaikutukset kokonaiskustannuksiin

Laserhitsauksen kustannuksia vertaillen kaarihitsauksiin ei tule tarkastella pelkästään hitsausprosessin kustannuksia, sillä laserhitsauksella on vaikutuksia sekä hitsausta edeltävään että hitsauksen jälkeiseen tuotantoon ja niiden kustannuksiin. Laserhitsaus nostaa edellisten työvaiheiden laatua korkeiden railo- ja dimensiotoleranssien vuoksi, ja laserhitsauksen hyvä laatu, visuaalinen ulkonäkö sekä pienet muodonmuutokset poistavat mahdollisia arvoa lisäämättömiä viimeistely- ja korjaustyövaiheita.

Laserhitsattavan tuotteen uudelleensuunnittelun tuloksena esimerkiksi särmäysvaihe voi jäädä kokonaan tai osittain pois, joka madaltaisi koko tuotteen kustannuksia. Muita poistuvia työvaiheita voivat olla esimerkiksi muun muassa railonvalmistus, puhdistus, hionta, juuren avaus ja rakenteen oikomisiet. Näistä voi joissain tapauksissa syntyä merkittävän suuri osa hitsauskustannuksista.

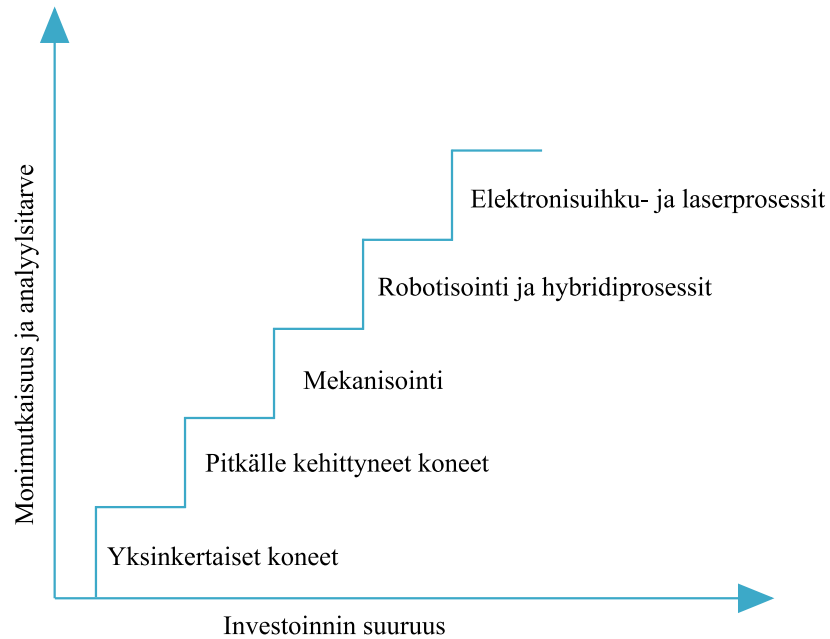
Laserhitsauskokoontalon tarkkojen toleranssivaatimusten vaikutukset kokonaiskustannuksiin eivät ole yksinkertainen asia. Osavalmistuksen parempi laatu heijastuu koko tuotannon laadun nousuun, ja noussut laatu voi muun muassa poistaa paljon hukka- sekä virheaikaa tuotannosta. Kun osakokoontalon osat ovat tarkasti mitoissaan, on myös niiden kasaaminen hitsauskiinnittimeen sujuvaa. Laserhitsaus tuo mukanaan tietenkin myös automatisoinnin edut. Automatisointi onkin pohjoismaisessa sarjahitsaustuotannossa lähes edellytys.

7.5 Investointi

Jotta investointi laserhitsauslaitteistoon olisi kannattava, täytyy hyödyn olla merkittävä. Tämä tarkoittaa sitä, että laitteistolle täytyy löytyä paljon hitsattavaa. Asia ei kuitenkaan ole näin yksinkertainen, vaan laserhitsauslaitteiston tuoma lisäarvo voi löytyä myös muualta kuin itse hitsausvaiheesta.

Investoinnilla voi olla hyvinkin merkittävä rooli yrityksen menestykseen; epäonnistuneet ja väärin ajoitetut investoinnit ovat kaataneet monia yrityksiä, kun taas monet yritykset ovat nousseet osin investointiensa ansiosta kansainväliseen menestykseen. Mitä merkittävämmästä investoinnista on kysymys, sitä tärkeämpi on ajoitus ja tarkasti tiedossa oleva valmistumishetki. (YT22 Investoinnin laskentaopas)

Mitä monimutkaisempaa ja kalliimpaa järjestelmää ollaan hankkimassa, sen tarkemmin tulee analysoida hitsausprosessin valintaa. (Kuva 48)



Kuva 48. Hitsausprosessin valinnan monimutkaisuus ja vaatima analyysitarve. (Stenbacka, 2011, s. 56)

Kun halutaan hankkia laserhitsausjärjestelmä, tarvitaan päätöksentekoon investointilaskelmaa arvioimaan investoinnin pääomakustannuksia. Yleensä investoinnin tarkoituksena on ensisijaisesti hankkia takaisin enemmän pääomaa kuin mitä siihen sijoitetaan. Perusinvestointisumma kattaa kaikki kertaluontoiset maksut, joita investointiprojekti vaatii. Näitä ovat muun muassa fyysiset laitehankinnat, operaattoreiden koulutus, hitsaussolun asennus ja käyttöönotto, kuljetukset, työkalut sekä kiinnittimet ynnä muut. Juoksevia kuluja ovat sellaiset maksuseuraamukset jotka investointi aiheuttaa koko sen elinkaarelle. Näitä ovat esimerkiksi kunnossapito, korjaus, energia, varaosat ja niin edespäin. (Stenbacka, 2011, s. 110)

Monella yrityksellä on omat laskentatapansa, jotka on kehitetty pitkän ajan saatossa. Tunnettuja erilaisia laskentatapoja ovat annuiteettimenetelmä, takaisinmaksun menetelmä, nykyarvomenetelmä sekä sisäisen koron menetelmä. Annuiteettimenetelmässä oletetaan investoinnin vuotuisen tuotot ja maksut yhtä suuriksi koko investoinnin ajalle.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laserhitsauksen käyttöönotto vaatii paljon tietotaitoa ja kokemusta automatisoidusta hitsaustuotannosta, suunnittelusta sekä koko tuotantoketjusta, sekä alkusijoituspääomaa ja riskinottoa laitteistoinvestointiin. Laserhitsaustuotanto vaatii liitettävien kappaleiden tuotannolta toistettavuutta sekä mittatarkkuutta, ja näiden vaatimusten täyttäminen nostaa koko tuotannon sekä lopputuotteen laatua. Oikein käyttöön otettuna laserhitsauksen käyttöönotto lisää yrityksen kilpailukykyä teknisen osaamistason nousun sekä kasvaneen tuotetarjonnan myötä, ja se parantaa tuotteiden sekä tuotannon tuottavuutta ja varmuutta, sekä laskee läpimenoaikoja.

Kun suunnitellaan tuotetta, lähtökohtana pitäisi olla itse tuote, eikä valmistusmenetelmä. Tämä ei tarkoita kuitenkaan sitä, etteikö tuotteen valmistusmenetelmää olisi tärkeää ottaa huomioon tuotetta suunniteltaessa. Mikäli tuotetta suunniteltaessa valmistusmenetelmäksi valikoituu laserhitsaus, tulee suunniteltaessa suosia geometrioita ja liitosmuotoja, joilla saadaan optimoitua laserhitsausvaiheen sujuvuus. Tätä varten on olemassa suunnittelutyökaluja, kuten DFMA sekä rinnakkaissuunnittelu.

Laserhitsauksen tunnetuimmat, selvimmät ja suurimmat hyödyt ovat suuri hitsausnopeus ja verrattain matala lämmöntuonti ja vähäiset muodonmuutokset. Laserhitsaus tuo myös mukanaan automatisoinnin edut, kun siirrytään käsinhitsauksesta laserhitsaukseen. Automatisoinnin hyödyt eivät kuitenkaan ole laserhitsauksen yksinoikeus. Laserhitsauksen kaikkein potentiaalisimmat hyödyt kuitenkin liittyvät tuotesuunnittelun mahdollisuuksiin. Laserhitsaus prosessina on kaarihitsaukseen nähden hyvin erilainen prosessi, ja mahdollistaa monia konstruktioita, joita perinteisillä menetelmillä ei ole mahdollista valmistaa. Suunnittelemalla tuote uudelleen laserhitsauksen suunnittelusääntöjä noudattaen voidaan saada aikaan tuote, jolla on vähemmän työvaiheita, tasaisempi ja korkeampi laatu, joka on kevyempi, nopeampi ja edullisempi valmistaa, ja jolla on enemmän lisäarvoa loppukäyttäjälle.

Työvaiheiden vähentymisestä hyvänä esimerkkinä on suuntaissärmiön muotoinen tuote, joka on järkevästi laserhitsattavissa suorista levyosista, jolloin särmäysvaihetta ei tarvita, ja laserhitsauksen korkean laadun ja lähes kuvuttoman hitsin vuoksi konstruktio ei tarvitse viimeisteleviä työvaiheita. Esikoneistettujen osien tapauksessa hitsauskokoontantu tuote ei välttämättä tarvitse enää koneistusta.

Laserhitsattavan osan, sen kiinnittimen sekä laserhitsaussolun suunnittelu on avainasemassa hitsausvaiheen tehokkuudessa ja taloudellisuudessa. Kun laserin sädeaikaprocentti sekä materiaalivirta saadaan korkealle, on tehokkuus kunnossa. Kun laserhitsaussolulle saadaan tarpeeksi töitä, saadaan koneen tuntihinta pidettyä taloudellisena, jolloin on mahdollista saada hitsauskustannukset sekä tuotteen kokonaiskustannukset erittäin kilpailukykyiseksi. Joustavan laserhitsaussolun työllistämisen ei kannattaisikaan olla yhden tuotteen varassa, vaan muutkin potentiaaliset laserhitsattavat tuotteet tulisi hyödyntää, jolloin investoinnin riskiä saadaan madallettua allokoinnin keinoin.

Suunnittelu ja valmistus suomalaisessa konepajateollisuudessa harvoin ovat samalla tontilla tai edes tekemisissä toisiensa kanssa. Tämän vuoksi menestyksekkäs laserhitsauksen käyttöönotto vaatisi alihankkijoiden, veturifirmojen sekä suunnittelutoimistojen välisiä yhteisprojekteja. Tuotteiden suunnittelun rooli niin tärkeä laserhitsauksen käyttöönotossa, ettei alihankintaa tekevä konepaja voi ottaa askelta yksin.

9

LÄHTEET

Anderson, D. M., 2004. Design for Manufacturability & Concurrent Engineering. Cambria, California: CIM Press.

Appendino, D., 2014. Robotic laser welding for the fabrication of stainless steel components. Welding International, 28(3), ss. 190-204.

Bachmann, F., Loosen, P. & Poprawe, R., 2007. High Power Diode Lasers. Aachen, Hamburg: Springer.

Buchfink, G., 2007. Laser as a tool. 1st edition ed. Würzburg: Vogel Buchverlag.

Coherent, 2009. Introduction to Diode Lasers for Material Processing. Saatavissa:

http://www.coherent.com/downloads/HPDDLBackground%20Whitepaper_Final.pdf

[Viitattu 2 7 2014].

Dahotre, N. B. & Harimkar, S. P., 2008. Laser Fabrication and Machining of Materials. s.l., Springer, s. 565.

Eskelinen, H. & Karsikas, S., 2013. DFMA-OPAS - Valmistus- ja kokoonapanoystävällisen tuotteen suunnittelu. Lappeenranta: LUT Scientific and Expertise Publications.

Fellman, A., 2008. Laserhybridihitsaus kasvun eväänä? Hitsaustekniikka, vol. 58, nro 5, ss. 35-42.

Havrilla, D., 2012a. Successful laser welding demands optimized laser joint design. Laser Focus World, 48(9), ss. 43-48.

Havrilla, D., 2012b. Great Designs in Steel 2012 - Design for Laser Welding.

Saatavissa: [http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great Designs in Steel/GDIS 2012/Design for Laser Welding1 - David Havrilla.pdf](http://www.autosteel.org/~media/Files/Autosteel/Great%20Designs%20in%20Steel/GDIS%2012/Design%20for%20Laser%20Welding1%20-%20David%20Havrilla.pdf)
[Viitattu 15 7 2014].

Havrilla, D., 2013. Design for Laser Welding Seminar.
Saatavissa:
http://www.us.trumpf.com/fileadmin/DAM/us.trumpf.com/Product_Images/Laser/2013-06-04_Design_for_Laser_Welding_Seminar/Design_for_Laser_Welding_rev_6-2013.pdf
[Viitattu 5 3 2014].

Havrilla, D., Brockmann, R., Strohmaier, S. & Holzer, M., 2010. Dramatic advances in direct diode lasers. San Francisco, s.n.

Hiltunen, E., 2005. Hitsauksen automatisointimahdollisuuksien huomiointi.
Saatavissa:
http://webd.savonia-amk.fi/projektit/markkinointi/hit/users/materials/commonmaterial/seminars/Hitsaustekniikka_suunnittelijoille/2005-09-27_Hitsauksen_automatisointi_Esa_Hiltunen.pdf
[Viitattu 26 8 2014].

Ion, J. C., 2005. Laser Processing of Engineering Materials. Oxford: Elsevier.

Jääskeläinen, E., Solehmainen, K. & Tuunanen, A., 2010. Uudet Innovaatiot hitsausautomaatiassa. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

Kah, P., Hiltunen, J., Martikainen, J. & Pirinen, M., 2014. Robotic welding of aluminium boat hulls. Advanced Materials and Information Technology Processing, Volume 87, ss. 239-255.

Kamrani, A. K. & Nasr, E. A., 2010. Engineering Design and Rapid Prototyping. Houston, Riyadh, Helwan: Springer.

Katayma, S., 2013. Handbook of laser welding technologies. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2013.

Koneteknologiakeskus Turku Oy. 2014. Turku.

Kujala, P. & Klanac, A., 2005. Steel Sandwich Panels in Marine Applications. Brodo Gradnja, 56(4), ss. 305-3014.

Kujala, P. et al., 2003. Teräksiset kerroslevyrakenteet, Tekninen tiedotus 1/2003. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus.

Kujanpää, V.-. & David, S., 1986. Microsegregation in a laser and gas tungsten arc welded Mo austenitic stainless steel. Int. Conf. on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO '86), Volume Nov. 10-14, ss. 63-69.

Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J., 2005. Lasertyöstö. Tampere: Teknologiateollisuus ry.

Lahti, K., 2011. Mekanisoitu hitsaus - Ai, mitä varten?. Hitsaustekniikka, Vol 61, Nro 2, ss. 2-5.

Lempiäinen, J. & Savolainen, J., 2003. Hyvin suunniteltu - Puoliksi valmistettu. Helsinki: Hakapaino Oy.

Locke, D. & Havrilla, D., 2013. Design for Laser Welding Seminar. Saatavissa:

http://www.us.trumpf.com/fileadmin/DAM/us.trumpf.com/Product_Images/Laser/2013-06-04_Design_for_Laser_Welding_Seminar/Design_for_Laser_Welding_rev_6-2013.pdf

[Viitattu 6 8 2014].

Lukkari, J., 2006. Hitsauskustannukset - työtä, työtä, työtä!. Hitsausuutiset, Volume 1, ss. 8-11.

Lukkari, J., 2011. Hitsaustalous ja tuottavuus. Hitsaustekniikka, Volume 61, Nro 3, ss. 2-8.
Löffler, K., 2013. Developments in disk laser welding. In: Handbook of laser welding technologies. s.l.:Woodhead publishing Limited.

Meng, W. et al., 2014. Porosity formation mechanism and its prevention in laser lap welding for T-joints. Journal of Materials Processing Technology, ss. 1658-1664.

Petring, D., Benter, C. & Poprawe, R., 2001. Fundamentals and Applications of Diode Laser Welding. Jacksonville, FL, ICALEO.

Pires, J., Loureiro, A. & Bolmsjö, G., 2006. Welding Robots: Technology, system Issues and Application. London: Springer.

Poprawe, R., 2010. Tailored Light 2. Aachen: Springer.

Poprawe, R. & Schultz, W., 2003. Development and application of new high-power laser beam sources. Riken Review No. 50: Focused on Laser Precision Microfabrication, ss. 3-10.

Quintino, L. et al., 2007. Welding with high power fiber lasers - A preliminary study. Materials & Design, 28(4), ss. 1231-1237.

Ready, J. F., 2005. Handbook of Laser Materials Processing. Orlando: Laser Institute of America.

Richardson, D. J., Nilsson, J. & Clarkson, W. A., 2010. High power fiber lasers: current status and future perspectives. *Journal of the Optical Society of America B*, 27(11), ss. B63-B92.

Salminen, A., 2010a. The filler wire - laser beam interaction during laser welding with low alloyed steel filler wire. *MECHANIKA* 2010, 84(4), ss. 67-74.

Salminen, A., Kara, J., Vattulainen, M. & Piironen, A., 2010b. *Product design for welding*. London, Springer London, ss. 283-286.

Schubert, E., Zemer, I. & Sepold, 1998. New possibilities for joining by using high power diode lasers. *ICALEO Proceedings*, Volume 85G, ss. s.111-120.

SFS-EN ISO 13919-1:en, 1996. *Welding. Electrons and laser beam welded joints. Guidance on quality levels for imperfections. Part 1: Steel*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN ISO 13919-2:en, 2001. *Welding. Electron and laser beam welded joints. Guidance on quality levels for imperfections. Part 2: Aluminium and its weldable alloys*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 15607, 2003. *Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille, yleisohjeet*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 15609-4, 2009. *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure specification Part 4: Laser beam welding*. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 15609-6, 2013. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure specification. Part 6: Laser-arc hybrid welding. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 15612, 1995. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Standardihitsausohjeet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 15613, 1995. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä esituotannollisella hitsauskokeella. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 15614-11, 2002. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Menetelmäkokeet. Osa 11: Elektronisuihku- ja laserhitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 15614-14, 2013. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 14: Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 16511, 1995. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä aikaisemmalla hitsauskokemuksella. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 3834-1, 2006. Metallien sulahitsauksen laatuvaatimukset. Osa 1: Laatuvaatimustason valintaperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Steen, W. & Mazumder, J., 2010. Laser Material Processing. London: Springer.

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

Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys, 2004. Hitsauksen teoriaopetus - B2 Levyjen hitsausliitokset. Saatavissa:

<http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/B2.pdf> [Viitattu 28 8 2014].

Trumpf, 2014b. Lasers and laser systems for material processing. Saatavissa:

<http://www.trumpf-laser.com/en/products.html> [Viitattu 20 8 2014].

Vatsia, Juha. 2014. Kustannuslaskentaa. [yksityinen sähköpostiviesti].

Vastaanottaja: reima.kokko@lut.fi. Lähetetty 22.6.2014.

[Tekstiviite: (Vatsia, 2014)]

Vattulainen, M., 2009. Hitsaustuotannon kehittäminen ja valmistusystävällinen tuotanto, Diplomityö, LUT.

Väisänen, T., 2008. Hybridihitsaus diodilaserin ja kuitulaserin yhdistelmällä. Hämeenlinna: Hämeenlinnan ammattikorkeakoulu.

YT22 Investoinnin laskentaopas, n.d. YT22 Investoinnin laskentaopas.

Saatavissa: http://www.yritystulkki.fi/files/yt22_investoinnin_laskenta_keuke.pdf

[Viitattu 4 7 2014].

Yu, Y. et al., 2013. Investigation of melting dynamics of filler wire during wire feed laser welding. Journal of Mechanical Science and Technology, 27(4), ss. 1097-1108.

Österholm, J. & Tuokko, R., 2001. Systemaattinen menetelmä tuotemodulointiin. Modular function deployment. MET-julkaisuja 21/2001. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.