



LASERHITSAUKSEN KANNATTAVUUSEDELLYTYKSET
PIENSARJATUOTANTONA TEHTÄVÄN
OHUTLEVYTUOTTEEN KOKOONPANOSSA

Jyrki Ahtonen
2011
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

LASERHITSAUKSEN KANNATTAVUUSEDELLYTYKSET
PIENSARJATUOTANTONA TEHTÄVÄN
OHUTLEVYTUOTTEEN KOKOONPANOSSA

Jyrki Ahtonen
Opinnäytetyö
3.5.2011
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

OULUN SEUDUN AMMATTIKORKEAKOULU TIIVISTELMÄ

Koulutusohjelma	Opinnäytetyö	Sivuja	+	Liitteitä
Kone- ja tuotantotekniikka	Insinöörityö	58	+	1
Suuntautumisvaihtoehto	Aika			
Tuotantotalous	2011			
Työn tilaaja	Työn tekijä			
Oulun Eteläisen instituutti	Jyrki Ahtonen			
Työn nimi	Laserhitsauksen kannattavuusedellytykset piensarjatuotantona tehtävän ohutlevytuotteen kokoonpanossa			
Avainsanat	Laser, laserhitsaus, lasertekniikka, lasertyöstö, ohutlevytekniikka, robotiikka			

Tässä insinöörityössä selvitettiin laserhitsauksen kannattavuusedellytyksiä piensarjatuotantona tehtävälle ohutlevytuotekokoonpanolle. Tavoitteena oli selvittää laserhitsauksen kustannusrakenne ja verrata sen kannattavuutta toisesta hitsausmenetelmästä saatuihin tietoihin.

Työ toteutettiin tutkimusluonteisena työnä, johon kerättiin teoria-aineistoa ja materiaalia kirjallisuudesta ja internetistä. Teoriaosassa käsitellään erilaisia laserhitsausmuotoja, ohutlevytekniikkaa sekä kustannustekijöitä. Laserhitsauksen käyttökustannustasoa selvitettiin sähköpostitiedusteluilla teollisten työstö-laserien asiantuntijoilta. Laserlaitteisto rajattiin diodipumpattuun Yb:YAG-kiekkolaserlaitteistoon, joka on teholtaan 4 kilowattia. Vertailukohteeksi laserille valittiin mekanisoitu MIG-hitsaus. Työstettävänä kokoonpanona oli piensarjatuotantona valmistettava ohutlevytuote.

Työssä tarkasteltavia hitsausmenetelmiä olivat laserhitsaus sekä mekanisoitu MIG-hitsaus. Molemmille hitsausmenetelmille selvitettiin investointikustannukset ja hitsauskustannukset. Näiden kustannusten avulla oli mahdollista laskea ohutlevytuotekokoonpanon tuotantokustannukset. Kun tuotantokustannukset oli selvitetty, suoritettiin vertailua hitsausmenetelmien välillä. Laserhitsauksen kannattavuutta tarkasteltiin erilaisilla tuotantovariaatioilla. Työssä ilmeni, että ohutlevytuotekokoonpanon valmistuksessa laserhitsaus on edullisempi kuin mekanisoitu MIG-hitsaus.

ALKUSANAT

Haluan lausua kiitokseni kaikille insinööriyön valmistumiseen myötävaikuttaneille: työn tilaajalle Oulun Eteläisen instituutille, työtä ohjanneelle opettajalle Pentti Huhtaselle ja lehtori Tuija Juntuselle.

Yhteyshenkilönä on toiminut työn ohjaaja tutkimusjohtaja Kari Mäntyjärvi, jolle suuret kiitokset avusta ja erinomaisista ideoista. Kiitokset myös ELME Studion tutkija Jarmo Mäkikankaalle ja tutkija Milla Rasmukselle sekä Apricon Oy:n toimitusjohtaja Juha Vatsialle.

Oulussa 2.5.2011

Jyrki Ahtonen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ALKUSANAT

SISÄLLYS

KÄSITTEET

1 JOHDANTO	8
1.1 Oulun Eteläisen instituutti	8
1.2 ELME Studio	8
1.3 Työn tavoitteet	9
2 LASERHITSAUS.....	10
2.1 Laserhitsaus teollisuudessa ja sen edut.....	10
2.2 Lasertyypit	11
2.2.1 Hiilidioksidilaser.....	11
2.2.2 Kidelaser	11
2.2.3 Kiekkolaser, disk-laser	12
2.2.4 Kuitulaser	12
2.2.5 Diodilaser	12
2.3 Hitsausmuodot	13
2.3.1 Syvätunkeuma- eli avaimenreikähitsaus	13
2.3.2 Sulattava laserhitsaus	14
2.3.3 Pulssihitsaus	15
2.3.4 Lisäaineellinen laserhitsaus	16
2.3.5 Monipalkohitsaus.....	17
2.3.6 Hybridihitsaus.....	18
2.3.7 Skannerilaserhitsaus	19
2.4 Liitosmuodot.....	21
3 OHUTLEVYTUOTTEET	22
3.1 Ohutlevymateriaalit.....	22
3.1.1 Pinnoittamattomat teräsohutlevyt	22
3.1.2 Metallisesti pinnoitetut teräsohutlevyt.....	23
3.1.3 Ruostumattomat teräsohutlevyt.....	24
3.1.4 Alumiiniohutlevyt	24
3.2 Suunnittelu ja valmistus.....	25

3.3 Liittämismenetelmät	26
3.4 Hitsauksen mekanisointia.....	28
3.4.1 Kiinnittimet.....	28
3.4.2 Hitsausjigit.....	29
3.4.3 Robottiikka	29
3.4.4 Optiikka	31
4 KUSTANNUKSET	34
4.1 Kustannusvaikutukset.....	34
4.2 Investointikustannukset	34
4.3 Käyttökustannukset	36
4.4 Hitsauskustannukset	36
5 LÄHTÖARVOT.....	41
6 TULOKSET	45
6.1 Investointikustannukset	45
6.2 Hitsauskustannukset	46
6.3 Tuotantokustannukset	51
7 VERTAILU	52
8 YHTEENVETO.....	54
LÄHTEET.....	56
LIITTEET	
Liite 1. Lähtötietomuistio	

KÄSITTEET

CO ₂ -laser	Hiilidioksidilaser.
Diodi	Tasasuuntaava elektroniikan komponentti, joka päästää sähkövirran kulkemaan lävitseen vain yhteen suuntaan.
Diodilaser	Lasertyyppi, jossa diodit toimivat laseroivana väliaineena.
Kiekkolaser	Lasertyyppi, jossa käytetään ohutta kiekkomaista ki-dettä, joka on yleensä ytterbiumia.
Kuitulaser	Lasertyyppi, jossa lasersäde syntyy optisen kuidun si-sään.
Laser	Laservaloa tuottava laite.
MIG-hitsaus	Kaasukaarihitsausprosessi, jossa sähkövirran avulla aikaansaatava valokaari palaa lisäainelangan ja hitsat-tavan kappaleen välissä suojakaasun ympäröimänä.
Nd:YAG-laser	Kidelaser, jossa laseroiva väliaine on neodyymi.
Plasmahitsaus	Kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa plasmakaasun ja suojakaasun ympäröimänä sulamat-toman volframielektrodin ja työkappaleen välillä.
TIG-hitsaus	Kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa su-lamattoman volframielektrodin ja työkappaleen välissä suojakaasun ympäröimänä.
Yb:YAG-laser	Kidelaser, jossa laseroiva väliaine on ytterbium.

1 JOHDANTO

1.1 Oulun Eteläisen instituutti

Oulun Eteläisen instituutti on vuonna 2000 perustettu Oulun yliopiston alueyksikkö, jonka tehtävänä on organisoida yliopistollista koulutusta, tutkimusta ja kehittämistoimintaa Oulun Eteläisen alueella. Instituutin toimintaa ohjaa yliopiston asettama ohjausryhmä. Instituutti osallistuu alueen kehittämisen kannalta tärkeiden yliopistollisten koulutusohjelmien järjestämiseen. Sen tehtävänä on valmistella, koordinoita ja hallinnoida erilaisia tutkimus- ja kehittämishankkeita yhdessä alueen muiden kehittämisorganisaatioiden kanssa. (1.)

1.2 ELME Studio

ELME Studio on Nivalassa sijaitseva elektroniikan mekaniikan tuotantostudio, joka on asiantuntijoista muodostuva yrityspalvelukonsepti. Toimintaympäristö muodostuu Nivalan tuotantostudion ELME laboratorion ja Kalajokilaakson koulutuskuntayhtymän (KAM) toimintaympäristöistä. Yritys palvelee ensisijaisesti Oulun Eteläisen alueen metallin ja elektroniikan mekaniikan alan yrityksiä ja pyrkii kohottamaan yritysten kilpailukykyä tutkimuksen, tuotekehityksen ja koulutuksen keinoin. (2.)

Studion ytimen muodostavat Teknologiakeskus Nitek, ELME tuotantostudio ja laboratorio sekä niiden ympärillä tiiviissä yhteistyössä toimivat alueen yritykset, Oulun yliopiston konetekniikan osasto sekä Oulun Eteläisen instituutti, ammattikorkeakoulut ja ammatilliset oppilaitokset. (2.)

ELME Studio kuuluu kansalliseen ProMetal-verkosto-osaamiskeskukseen ja on yksi kolmesta metallialan kehitystä edistävästä tuotantostudiosta. ProMetal kehittää yritystoiminnan kansainvälistä kilpailukykyä metalliteollisuuden tuotekehityksen, tuotantopalvelun ja teollisuuden kunnossapitopalvelun alueella. ProMetal tuotantostudiot sijaitsevat Nivalassa, Raahessa ja Torniossa. (2.)

1.3 Työn tavoitteet

Työn tarkoituksena on selvittää laserhitsauksen kannattavuusedellytykset piensarjatuotantona tehtävän ohutlevytuotteen kokoonpanossa ja verrata laserhitsausmenetelmää muihin hitsausmenetelmiin. Työn tilaaja pystyy selvityksen avulla toteamaan, onko laserhitsauksen käyttäminen kannattavaa ohutlevytuotteen piensarjatuotannossa. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää laserhitsauksen kustannusrakenne sekä menetelmän kannattavuusraja ja kannattavuuteen liittyvät reunaehdot. Saatuja tuloksia verrataan toisista hitsausmenetelmistä saatuihin tietoihin. (Liite 1.)

2 LASERHITSAUS

2.1 Laserhitsaus teollisuudessa ja sen edut

Laserhitsaus on yksi eniten hyödynnetyistä ja tutkituista lasertyöstömenetelmistä ympäri maailmaa. Laserhitsausta käytetään yhä enemmän teollisessa tuotannossa. Tärkein sovellusalue on autoteollisuus, mutta sovellusalue on laajentunut myös konepajateollisuuteen. Suuritehoisilla lasereilla hitsataan muun muassa autoteollisuuden komponentteja, vaihteiston osia, lämmönvaihtimia ja autonkorin osia. Pienkomponenttien kuten sairaalakojeiden ja elektroniikkakoteloinnin hitsaukseen käytetään vastaavasti pienitehoisia lasereita. Teknitaloudelliset perusteet lisäävät laserhitsauksen kannattavuutta ja käyttöä, sillä laserhitsaus on edullinen prosessi tyydyttävälläkin laitteiston käyttösuhteella. (3.)

Laserhitsauksen etuina ovat sen tyypilliset ominaisuudet, joita ovat pieni lämmöntuonti, suuri hitsausnopeus, suuri hitsin syvyys-leveyssuhde sekä pienet muodon muutokset. Laserhitsaus mahdollistaa hyvän laaduntuottokyvyn, joka alentaa hukkaprosenttia ja puutekustannuksia, lyhentää läpäisyäikää sekä parantaa toimitusvarmuutta. Menetelmän ongelmia ovat vastaavasti tarkat toleranssit liitettävälle kappaleille, hitsausrailoille, kappaleiden kiinnittimille ja laser säteen liikuttamiselle. (3; 4.)

Laserhitsaus soveltuu hyvin useille erilaisille materiaaleille. Tavalliset, seostamattomat ja ruostumattomat teräkset ovat erittäin hyviä laserhitsattavia materiaaleja. Laserhitsausta pystytään myös käyttämään alumiiniseosten, kuparin, hopean ja kullan hitsauksessa. Materiaaliparien liittäminen onnistuu laserhitsauksella sen pienen lämmöntuonnin ansiosta. Eripariliitoksen hitsaus edellyttää materiaaleilta samanlaisia fysikaalisia ominaisuuksia kuten se, etteivät esimerkiksi sulamispiste, lämmönjohtokyky ja atomien koko saa erota liaksi toisistaan. Olennaisinta on, että materiaalien alkuaineet eivät muodosta hauraita faaseja keskenään. Lisäaine mahdollistaa onnistuneen hitsin monissakin ta-

pauksissa. Tärkein eripariliitos, jonka laserhitsaus mahdollistaa, on ruostumattoman ja seostamattoman teräksen liittäminen toisiinsa. (3.)

2.2 Lasertyypit

Tässä luvussa esitellään yleisimmät hitsauslasertyypit. Hitsauksessa käytettäviä lasereita ovat hiilidioksidilaser, kidelaser, kiekkolaser, kuitulaser ja diodilaser.

2.2.1 Hiilidioksidilaser

Hiilidioksidilaser (CO₂ -laser) on kaasulaser, jonka laseroivana väliaineena toimii kaasuseos. Kaasuseos muodostuu hiilidioksidista 5–10 %, heliumista 78 % ja typestä 12 %. Hiilidioksidi toimii laseroivana kaasuna, typpi avustaa hiilidioksidimolekyylien virittymisessä ja helium toimii kaasuseoksen jäähdyttäjänä. Hiilidioksidilaserin aallonpituus on 10 600 nm. Hiilidioksidi laserin teoreettinen hyötysuhde on noin 21 prosenttia, mutta käytännössä päästään laitteistosta riippuen 10–15 prosenttiin. Hiilidioksidilaserin säteen siirtoon voidaan käyttää ainoastaan vain peilejä. (3; 4.)

2.2.2 Kidelaser

Kidelasereita ovat Nd:YAG-laserit, ja niiden aktiivisena väliaineena toimii neodyymi, jota on seostettu YAG-kiteeseen. Lasersäteen aallonpituus on 1 064 nm, joka on huomattavasti pienempi kuin hiilidioksidilaserin, jolloin materiaalin työstämiseen tarvittava energia pienenee. Kide Nd:YAG-laserissa on tangon tai laatan muotoinen. Nd:YAG-laserin valoa on mahdollista kuljettaa valokuitua pitkin. Pumppausenergia kidelasereihin tuotetaan joko kryptonlampuilla tai diodilasereilla. Lamppupumpatuilla lasereilla hyötysuhde on vain 2–3 %, koska kideä joudutaan jäähdyttämään voimakkaasti. Uusinta tekniikkaa edustavat diodipumpatut Yb:YAG-laserit. Diodipumpatuilla lasereilla hyötysuhde on vastaavasti yli 20 %. Laserin koko ja jäähdytystarve pienevät sekä säteenlaatu paranee diodipumpatulla laserilla. Pumppausdiodien elinikä on jopa yli 10 000

tuntia toisin kuin pumppauslampuilla vain 500–1000 tuntia, mutta niiden uusiminen on kuitenkin huomattavasti suurempi investointikustannus. (3; 4; 5; 6; 7.)

2.2.3 Kiekkolaser, disk-laser

Kiekkolaserissa käytetään ohutta kiekkomaista kidettä. Kiekkolasereissa on yleensä Yb:YAG-kide eli neodyymi on korvattu ytterbiumilla. Kide on hyvin ohut ja se on kiinnitetty suoraan lämmönvaihtimeen, minkä ansiosta saadaan saman akselinen lämmöntuonti sekä jäähdytys. Koska lämpötilavaihtelut eivät vaikuta säteeseen hyvän jäähdytyksen ansiosta, saadaan tuloksena hyvä säteen laatu. Yb:YAG-laserissa syntyvä aallonpituus on 1 030 nm. (3; 4; 6)

Kiekkolaserin etuna on, että sen tehoa voidaan nostaa asentamalla kiteitä sarjaan, koska pumpattavan pinta-alan suurentaminen nostaa lasertehoa ilman, että säteen laatu muuttuu. Laserteho on suoraan verrannollinen pumpattavaan pinta-alaan kiteillä. Kiekkolaserista ennustetaan hiilidioksidilaserin korvaajaa, koska siinä on parempi hyötysuhde ja lasersäde voidaan kuljettaa kuitua pitkin. Korvaus rajoittuu ainoastaan ohuisiin materiaaleihin. Esimerkiksi laserleikkauksessa yli 4–6 millimetrin paksuisessa materiaalissa hiilidioksidilaserilla on parempi nopeus sekä laatu. (3; 4; 5; 6; 7.)

2.2.4 Kuitulaser

Kuitulaserissa säde synnytetään optisen kuidun sisään ja laseroivana väliaineena toimii usein ytterbium, joka antaa aallonpituudeksi 1 070 nm. Pumpausenergiana käytetään diodilaserin valoa. Pumppausenergia voidaan tuoda kahdella tavalla kuidun sisemmälle pinnoitekerrokselle: joko aktiivikuidun päästä peilien ja linssien avulla tai useasta eri diodilaserista optisen kuidun avulla. Kuitulaserilla hyötysuhde on noin 20 %. (3; 4; 5; 6.)

2.2.5 Diodilaser

Suuritehoinen diodilaser (HPDL, High power diode laser) koostuu useista diodilaserielementeistä. Diodit kootaan noin 20 diodin nippuihin, joista tuleva valo on

kapea viiva. Diodilaserin teho nostetaan laserhitsauksen edellyttämälle tasolle liittämällä lasernippuja noin 30–40 päällekkäin, jolloin syntyy lasermoduuli eli pakka. Toinen mahdollinen rakenne on kuituun liitettyjen yksittäisten diodien kuitujen liittäminen toisiinsa, kuten kuitulasereissa. Diodilaserin tyypillinen aallonpituus on välillä 800–1 000 nm, ja sen sädetä on mahdollista ohjata optisella kuidulla sen aallonpituuden ansiosta. Suuritehoisen diodilaserin hyötysuhde on yli 30 % ja itse säteen muodostuksessa yli 40 %. Polttopisteen koko ja säteenlaatu on kuitenkin heikompi muihin yleisiin lasereihin verrattuna, minkä takia sitä ei pystytä käyttämään esimerkiksi syvätunkemahitsaukseen. Diodien pitkän eliniän ja korkean hyötysuhteen ansiosta sen käyttökustannukset ovat alhaiset, mikä lisää diodilaserin kannattavuutta. (3; 5; 6.)

2.3 Hitsausmuodot

Tässä luvussa esitellään yleisimmät laserhitsauksessa käytettävät hitsausmuodot. Laserhitsaus voidaan jakaa avaimenreikähitsaukseen, sulattavaan laserhitsaukseen, pulssihitsaukseen, lisäaineelliseen laserhitsaukseen, monipalkohitsaukseen, hybridihitsaukseen ja skannerilaserhitsaukseen.

2.3.1 Syvätunkeuma- eli avaimenreikähitsaus

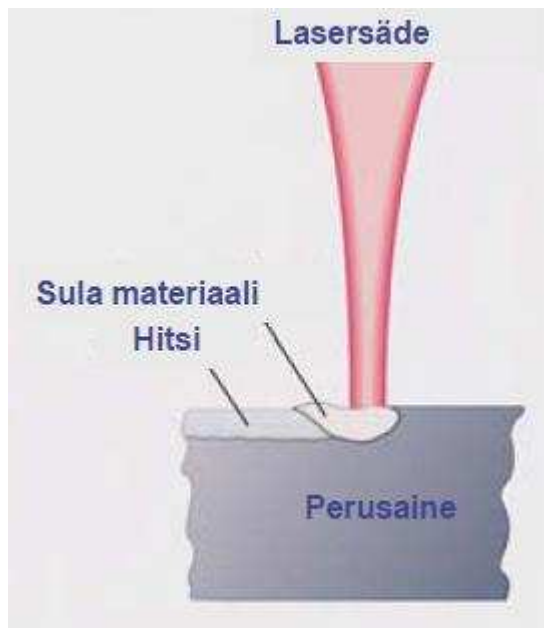
Konepajasovellutuksissa käytetään yleensä syvätunkeuma- eli avaimenreikähitsausta. Avaimenreikähitsauksessa lasersäde kohdistetaan yleensä kohtisuoraan hitsattavaan pintaan. Säde kohdistetaan työkappaleen pinnalle tai neljänneksen verran työkappaleen aineenpaksuudesta pinnan alapuolelle. Säteen suuren tehotiheyden ansiosta materiaalin höyrystyy avoin reikä. Jos polttopiste on liian paljon hitsattavan työkappaleen pinnan ala- tai yläpuolella, ei tehotiheys riitä avaimenreiän synnyttämiseen. Lasersädettä kuljetetaan liitoksen suuntaisesti, jolloin lasersäde sulattaa materiaalia avaimenreiän edestä säteen kuljetussuuntaan nähden. Säteen kulkiessa eteenpäin sula materiaali kulkeutuu avaimenreiän reunoja pitkin reiän taakse. Välittömästi reiän takana oleva sula jähmettyy ja muodostaa liitokseen hitsin. Kuva 1 havainnollistaa avaimenreikähitsausprosessia. (3; 8.)



KUVA 1. Syvätunkeuma- eli avaimenreikähitsaus (5)

2.3.2 Sulattava laserhitsaus

Sulattavassa laserhitsauksessa tehotehous ei ole niin korkea, jotta se saisi materiaalin höyrystymään, mutta kuitenkin säde saa materiaalin sulamaan. Sulattavahitsaus muistuttaa perinteistä kaarihitsausta, koska lasersäde kuumentaa materiaalin pinnan ja lämpö kulkeutuu materiaalissa johtumisen ja sulan sekoittumisen avulla sulattaen sitä. Tällä prosessilla saatava hitsi on avaimenreikähitsiä huomattavasti matalampi ja leveämpi, mikä mahdollistaa suuremmat railoteranssit. Matala hitsin syvyys rajoittaa sulattavan laserhitsauksen ohuiden ainepaksuuksien hitsaamiseen. Tämän takia se soveltuu hyvin esimerkiksi hienomekaniikan hitsauksiin ja sovelluksiin. Sulattavaan laserhitsaukseen voidaan käyttää Nd:YAG-lasereita, diodilasereita, disk-lasereita sekä kuitulasereita. Kuva 2 havainnollistaa sulattavaa laserhitsausprosessia. (3; 5; 8.)



KUVA 2. Sulattava laserhitsaus (5)

2.3.3 Pulssihitsaus

Pulssitus on tehon säännöllistä vaihtelua ajan mukana. Pulssituksella saavutetaan suurempi hetkellinen tehotiheys pienellä keskiteholla, ja sen avulla syvempi tunkeuma liitokseen tai pienempi lämmöntuonti. Pulssihitsauksessa käytetään perinteisesti pulssitettua Nd:YAG-laseria tai hiilidioksidilaseria, ja menetelmää käytetään tarkkuutta vaativien tuotteiden hitsaukseen. Hitsaus perustuu lämmönjohtumiseen, joten hitsi on leveämpi ja matalampi eli hitsausprosessi on sulattavan hitsauksen tyyppinen. (3; 5.)

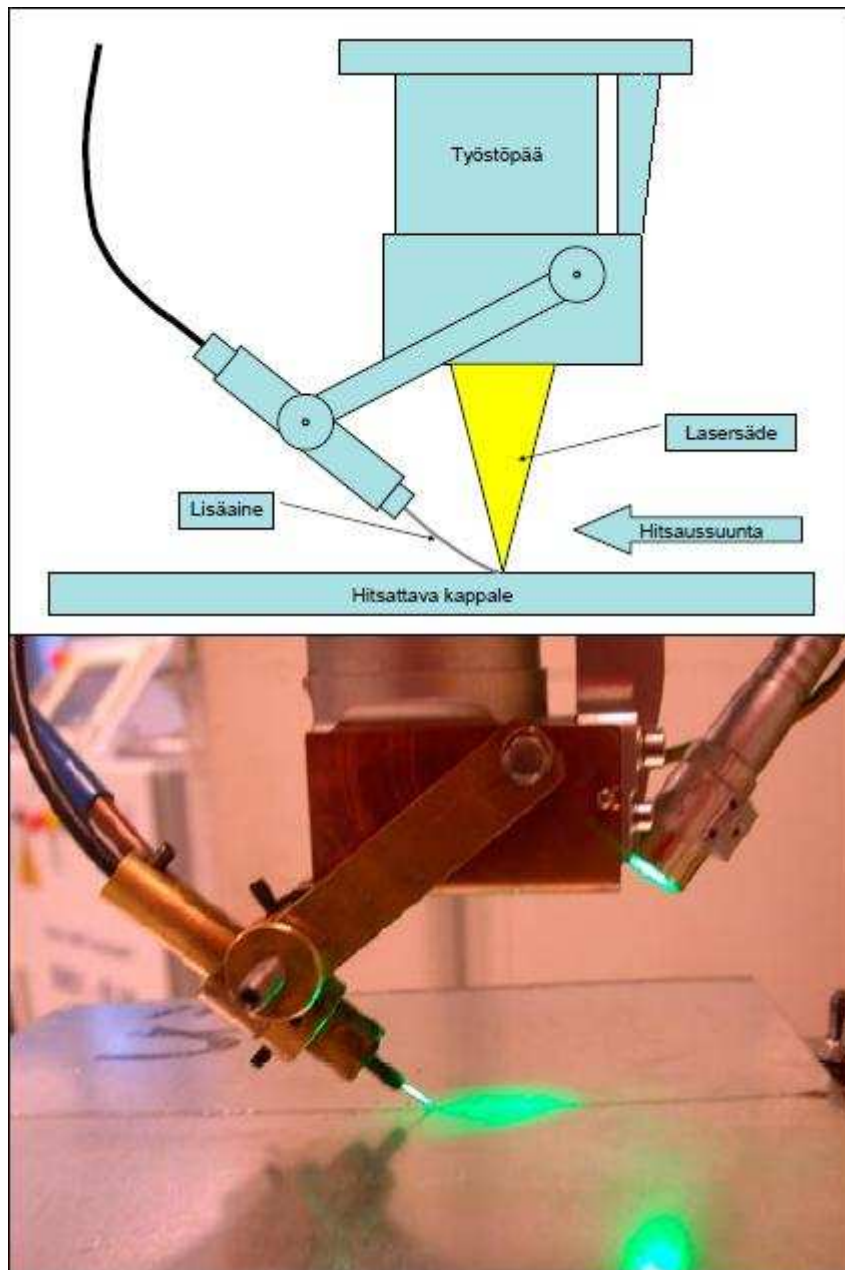
Menetelmän etuja jatkuvatehoiseen hitsaukseen verrattuna ovat muun muassa suuri energiatiheys, vakaampi prosessi, erittäin tarkka lämmöntuonti ja prosessin hallinta. Myös railotoleranssit lievenevät ja voidaan käyttää pidempää polttoväliä ja suurempaa polttopisteen halkaisijaa, mikä mahdollistaa liitoksen tavoitavuuden paranemisen ja optiikan pysymisen puhtaampana. Pulssihitsauksella on myös heikkoutensa jatkuvatehoiseen hitsaukseen verrattuna. Heikkouksia ovat matalampi tunkeuma ja prosessin hitaus jatkuvatehoiseen verrattuna. Koska hitsausprosessi on sulattavan hitsauksen tyyppinen, on siitä materiaaliteknisesti niin etuja kuin myös haittoja. (3; 5.)

2.3.4 Lisäaineellinen laserhitsaus

Lisäaineellisessa hitsauksessa (kuva 3) laserhitsausprosessiin syötetään lisäainetta ja käytetty prosessi voi olla avaimenreikähitsaus tai sulattava hitsaus. Tärkeimmät parametrit menetelmässä ovat langan syötön kohdistus, kohdistuskulma ja langansyöttönopeus. Lasersäde ja perusaineen sula sulattavat lisäainelangan, joka syötetään hitsaussuuntaan verrattuna edestäpäin, ja näin lanka sekoittuu hitsisulassa perusaineen sulaan ja täyttää railon. Lankaa syötetään 110–120 prosenttia railotilavuudesta, jolloin saavutetaan riittävä hitsin kupu ja juuri. (3.)

Langansyöttölaitteen vaatimuksena ovat tasainen syöttönopeus, syöttönopeuden tarkka säätö ja mahdollisuus pystyä syöttämään eripaksuisia lankoja. Langan halkaisija on noin 0,6–1 mm ja langansyöttölaitteen on suoristettava lanka tai sen on oltava suora ennen syöttölaitetta. Langan syöttökulmana käytetään 45–60 astetta, jolloin lanka osuu parhaiten sulaan ja hitsausprosessi on vakainta. (3.)

Lisäaineellisessa laserhitsauksessa on lievemmat railovaatimukset kuin lisäaineettomassa laserhitsauksessa, ja se ei ole herkkä ilmaraolle. Ilmaraon muutokset ovat ongelma, sillä lisäaineen määrä tulee olla vakio suhteessa railotilavuuteen, joka muuten aiheuttaa vajaata hitsiä tai liian suuren kuvun. Haittapuolena menetelmässä on prosessin edellyttämä suurempi lämmöntuonti. (3; 5.)



KUVA 3. Kuva ylhäällä on graafinen esitys lisäaineellisesta laserhitsauksesta ja kuva alhaalla valokuva (6)

2.3.5 Monipalkohitsaus

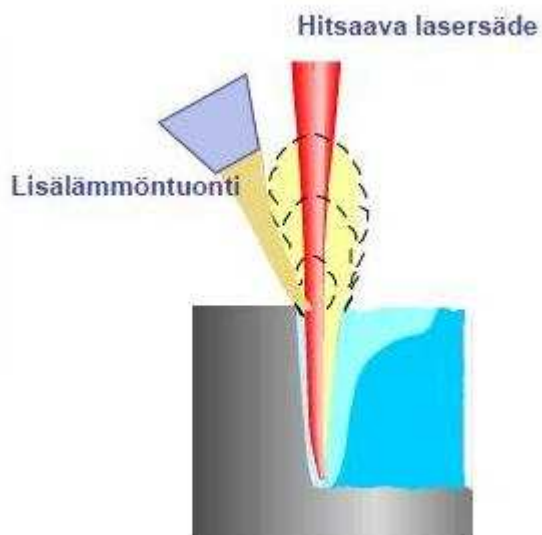
Monipalkohitsauksella pystytään saavuttamaan syvempi tunkeuma kuin yksipalkohitsauksella. Suurin mahdollinen tunkeuma, esimerkiksi hiilidioksidilaserilla 5 kW:n teholla, on noin 10 mm. Monipalkohitsaustekniikalla on hitsattu 10 kW:n laserilla 50 mm:n tunkeuma ja 5 kW:n laserilla 25 mm:n aineenpaksuus kolmella palolla. Nd:YAG-laserilla on pystytty hitsaamaan 3 kW:n teholla 40 mm

paksujen kappaleiden liitoksia. Ensimmäinen palko hitsataan ilman lisäainetta ja seuraavat palot lisäaineen kanssa. (3.)

2.3.6 Hybridihitsaus

Hybridihitsauksessa yhdistetään kaksi eri hitsausmenetelmää samaan hitsausprosessiin. Laserhitsausmenetelmä voidaan yhdistää kaasukaarihitsausmenetelmään, kuten TIG-, MIG- tai plasmahitsaukseen. Menetelmän avulla voidaan lieventää railotoleransseja, parantaa hitsausnopeutta ja saada leveämpi tunkeuma. Tunkeuman lisääntyminen ei ole aina yhtä varmaa, mutta tunkeumaa saadaan lisää prosessin vaatiman ilmaraon ansiosta. Kahden hitsausprosessin yhteisvaikutuksella hyötysuhde kasvaa ja saadaan vähäinen ja hallittavissa oleva lämmöntuonti. Kaasukaarihitsauspään sijoitus ja liikuttelu ahtaissa työtiloissa on näiden kahden hitsausmenetelmän yhdistämisen haittapuolena. (5; 6.)

Hybridihitsauslaitteisto voi koostua myös kahdesta laserlaitteistosta. Lasereista koostuvan hybridihitsauslaitteiston etuina saavutetaan tehon nouseminen, esi- ja jälkilämmitys sekä sulan muotoilu. Haittapuolena on kahden laserlaitteen kallis hinta. Kuva 4 havainnollistaa hybridihitsausmenetelmää. (5; 6.)

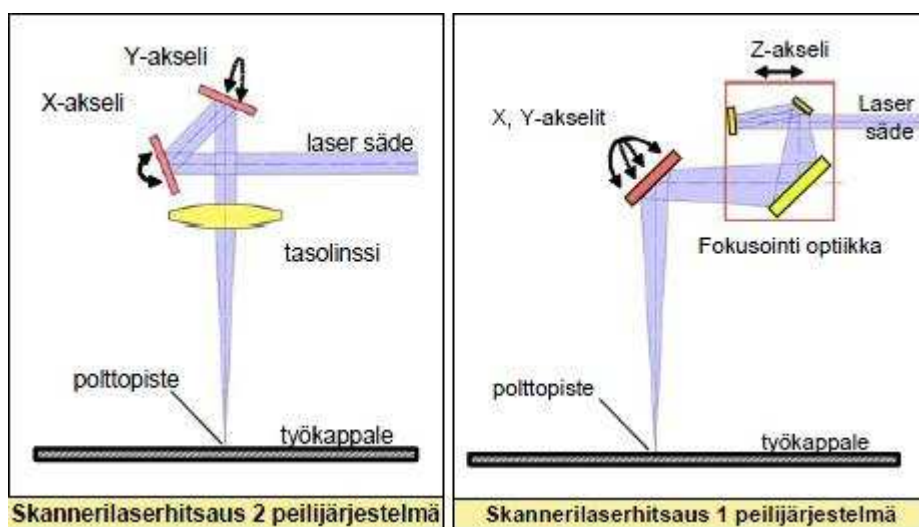


KUVA 4. Hybridihitsaus (5)

2.3.7 Skannerilaserhitsaus

Skannerilaserhitsaus on yksi huipputeknologioista hitsaavassa ohutlevyteollisuudessa. Teknologia tuli käyttöön 2000-luvun alkupuolella ja tätä varten diskilaser on kehitetty. Teknologian käyttöönoton edellytyksenä on ollut suurteholaserien säteen laadun kehittyminen. Menetelmällä on mahdollista joissain määrin korvata pistehitsausta ohutlevyrakenteista aina autonkorin valmistuksesta matkapuhelimien rakenteisiin. (5; 9.)

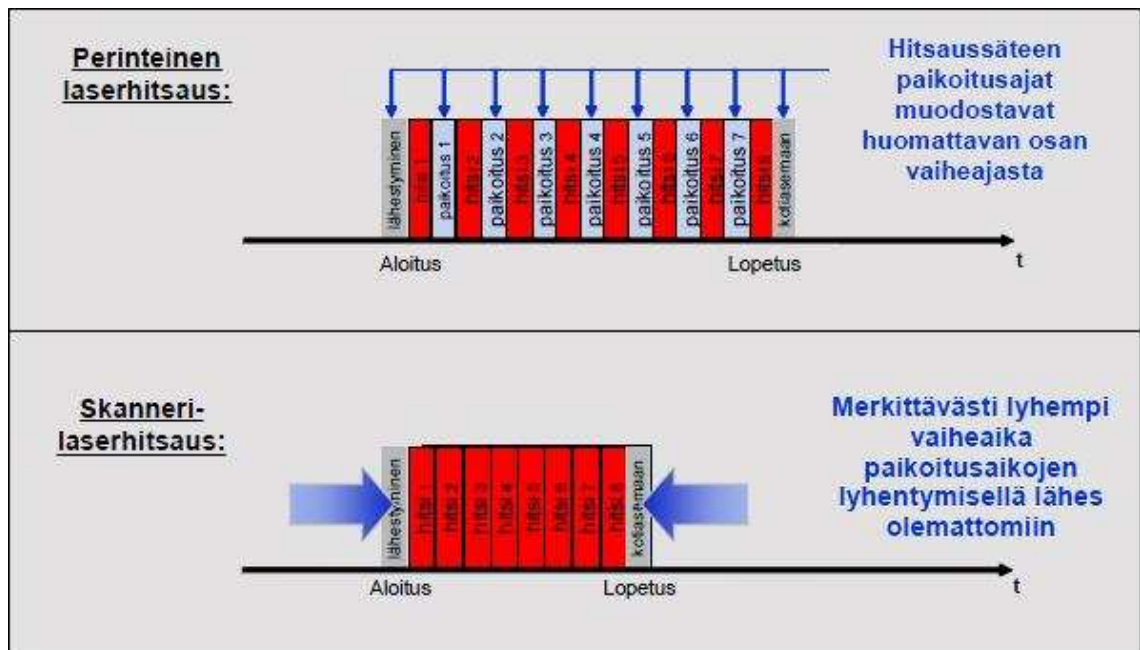
Skannerilaserhitsauksen ydin on yksi tai kaksi nopeasti ohjattavaa suuren dynamiikan omaavaa elektro-optista peiliä. Peilit sijaitsevat yleensä 500–1 000 mm hitsattavan kappaleen yläpuolella, mistä pienikin peilien kiertymä siirtää lasersädettä nopeasti uuteen hitsauspisteeseen työkappaleen pinnalla. Paikoitusajat hitsipisteiden välillä ovat muutaman millisekunnin luokkaa. Kuva 5 havainnollistaa skannerilaserhitsauksen peilijärjestelmiä. Robotin ja skannerin yhdistäminen on mahdollistanut suuren joustavuuden ja se johti disk-lasereiden kehittämiseen. Hiilidioksidilaser skannerisysteemit ovat jo jäämässä pois, sillä sen joustavuus on kovin heikko tasomaisen hitsausalueen vuoksi. Robotin ja skannerin yhdistelmällä päästään myös kulman taakse ja orientaatio kappaleeseen nähden on lähes vapaa. Nykyään on käytössä myös 3D-skannereita. (5; 9.)



KUVA 5. Skannerilaserhitsauksen peilijärjestelmät (9)

Uusi menetelmä poikkeaa perinteisestä laserhitsauksesta sen suuren paikoitusnopeuden ja suuremman hitsausgeometrijoustavuuden ansiosta. Menetelmä mahdollistaa paikoituksen jopa 1 000 metrin minuuttivauhdilla ja paikoitus-tarkkuudella <math><0,2\text{ mm}</math>. Skanneriteknologian soveltaminen on yleistynyt myös Suomessa elektroniikkateollisuudessa ja hitsausnopeutta menetelmällä on voitu kasvattaa jopa 100 pisteeseen sekunnissa. Skannerilaserhitsauksen sovelluskohteita ovat muun muassa matkapuhelinten metallirakenteiden, liittimien tai lämpöherkkien komponenttien ja anturien hitsaaminen. (5; 9.)

Skannerilaserhitsauksen edut ohutlevyhitsauksessa perinteisiin sekä muihin laserhitsausmenetelmiin ovat paikoitusaikojen lyhentymisellä saatavat lyhyemmät vaiheajat (kuva 6), säteen päälläoloajan maksimointi ja sitä kautta suurempi tuottavuus, uudet mahdollisuudet tuotesuunnitteluun ja hitsien muodon räätälöinti liitosvaatimusten mukaan. Kuva 6 havainnollistaa perinteisen laserhitsauksen ja skannerilaserhitsauksen paikoitusaikoja. (5; 9.)



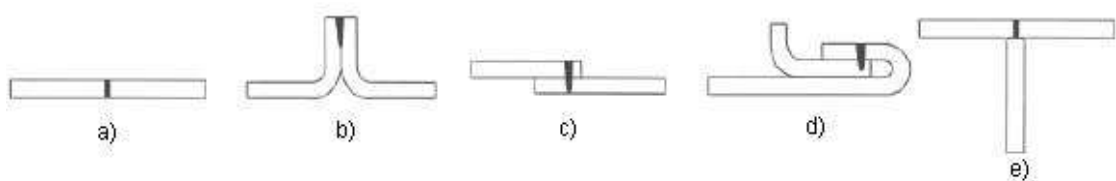
KUVA 6. Paikoitusaikojen vertailua (9)

2.4 Liitosmuodot

Laserhitsattava tuote tulee suunnitella siten, että valitaan valmistuksen kannalta paras liitosmuoto. Syvätunkeumahitsaus on tärkein laserhitsausprosessi ja se antaa suunnittelijalle runsaasti vapauksia liitosmuotovalinnoissa. Tärkeimmät liitosmuodot ovat päittäis-, laippa-, limi(päällekkäis)- ja T-liitokset (kuva 7). (3.)

Päittäisliitoksen käytön etuina ovat sen tasainen jännitys jakauma ja tuotteeseen aiheutuvien muodonmuutosten vähäisyys. Laserhitsin ominaisuudet antavat lisämahdollisuuksia hitsien sijoittelulle, joten hitsi voi sijaita tarvittaessa ahtaissa-kin paikoissa tai lähellä kulmaa tai lämmönarvoja paikkoja. Jotta välttyttäisiin liitosvirheiltä, tulee railojen pinnan laadun olla hyvä sekä asetusvirheet hyvin pieniä. (3; 7.)

Laippa- ja limiliitosten etuina ovat lievemmat tarkkuusvaatimukset ja paikoitus-tarkkuudet kuin päittäisliitoksessa. Limiliitoksille riittää myös, että liitettävät levyt puristetaan kiinni toisiinsa vain yhdessä suunnassa, jolloin kiinnittimien suunnit-telu yksinkertaistuu. Autoteollisuudessa laippaliitoksia käytetään korvaamaan pistehitsattuja rakenteita, koska laserhitsillä saavutetaan jatkuvan hitsin pa-remmat väsymisominaisuudet ja kapeamman laipan leveyden materiaalisääs-töt. Ohutlevyjen liittämässä erilaiset limi- ja korilaippaliitokset ovat usein järke-viä vaihtoehtoja. (3; 7.)



KUVA 7. Laserhitsauksen liitosmuotoja: a) päittäisliitos, b) reunaliitos, c) limi-liitos, d) korilaippaliitos ja e) T-liitos (7)

3 OHUTLEVYTUOTTEET

Ohutlevyä käytetään runsaasti elektroniikkaa sisältävien tuotteiden koteloihin ja runkoihin, koska ohutlevyrakenteet ovat suhteellisen keveitä ja lujia. Materiaalin valintaan ohutlevytuotteissa vaikuttavat vaatimukset kestoiälle, muovattavuudelle, pinnanlaadulle ja ulkonäölle. Suurin valintaperuste on kuitenkin ohutlevyn hinta. Oikealla materiaalilla ja levypaksuudella voidaan vaikuttaa merkittävästi tuotteen valmistuskustannuksiin. Materiaali tulee valita tarkasti käyttökohteen mukaan. Laserhitsaus soveltuu ohutlevytuotteille hyvin, mutta sen asettamat vaatimukset tulee ottaa huomioon jo tuotteen suunnitteluvaiheessa. (7.)

3.1 Ohutlevymateriaalit

Ohutlevymateriaaleina käytetään pinnoittamattomia teräsohutlevyjä, metallisesti pinnoitettuja teräsohutlevyjä, ruostumattomia teräsohutlevyjä ja alumiiniohutlevyjä. Jokaisella ohutlevymateriaalilla on omat heikkoutensa ja vahvuutensa.

3.1.1 Pinnoittamattomat teräsohutlevyt

Pinnoittamattomat teräsohutlevyt luokitellaan niiden valmistustavan perusteella kuuma- ja kylmävalssattuihin. Ohutlevyiksi voidaan kutsua kylmävalssattuja levyjä, jotka ovat materiaalipaksuudeltaan alle 3 mm:n. Kylmävalssatut ohutlevyt valmistetaan mittatarkoiksi ja pinnanlaadultaan hyväksi. Kuumavalssattuja ohutlevyjä on saatavilla 1,5–3 mm:n materiaalipaksuudesta lähtien ja niitä käytetään kohteisiin, joissa pinnanlaatuvaatimukset ovat alhaisemmat. Pinnoittamattomat ohutlevyteräokset soveltuvat hyvin hitsaukseen niiden vähäisen seostuksen ansiosta. (7.)

Useissa käyttökohteissa, esimerkiksi huonon korroosionkeston tai ulkonäön takia, pinnoittamaton ohutlevy tarvitsee pintakäsittelyn. Tämän takia pinnoittamattomia teräsohutlevyjä toimitetaan myös pinnanlaadultaan vaativaan pintakäsittelyyn soveltuvana. Tämä osaltaan vähentää pinnoittamattomien teräsohutlevyjen käyttöä, koska pintakäsittelystä aiheutuu lisäkustannuksia. (7.)

3.1.2 Metallisesti pinnoitetut teräsohutlevyt

Metallisilla ja orgaanisilla pinnoitteilla pystytään suojaamaan teräsohutlevyä korroosiolta. Yleisimpiä pinnoitettuja teräsohutlevyjä ovat kuuma- ja sähkösinkityt ohutlevyt ja niiden pinnoitteiden seokset vaihtelevat käyttökohteiden mukaan. (7.)

Kuumasinkityksessä metalli upotetaan sulaan sinkkiin, missä teräs ja sinkki reagoivat keskenään. Lyijyttömät kuumasinkityt pinnoitteet kestävät muovausta ja korroosiota hyvin ja niiden maalattavuus paranee jälkivalssattuna. Nykyisillä ohuilla sinkkipinnoitteilla saavutetaan hyvä työstettävyys ja vastushitsattavuus, mutta sinkki-rauta-pinnoitteilla vastushitsattavuus ja maalattavuus edelleen paranevat. (7.)

Teräsohutlevyjä pinnoitetaan myös sähkösinkityksen avulla. Päälystäminen tapahtuu saostamalla sinkki elektrolyytisesti nestekylvyssä teräksen pinnalle. Sähkösinkityksellä on mahdollista pinnoittaa puhtaan sinkin lisäksi myös sinkin ja muiden metallien seoksia, kuten esimerkiksi nikkeliä, alumiinia ja tinaa. Yleisin seospinnoite on sinkki-nikkeli-pinnoite, jolla tavoitellaan parempaa hitsattavuutta, muovattavuutta ja korroosionkestävyyttä. Sähkösinkityn teräsohutlevyn pinnoite on yleensä ohuempi kuin kuumasinkityksellä valmistetun teräsohutlevyn, joten sähkösinkittyjen pinnoitteiden antama korroosiosuoja on kuumasinkittyä pinnoitetta heikompi. Sähkösinkityksellä pinnoitettuja ohutlevyjä käytetään yleensä tuotteissa, jotka pintakäsitellään maalaamalla. Maalipinnoitettu ohutlevy tunnetaan myös nimellä värivalmis ohutlevy. Maalipinnoitetut teräsohutlevyt soveltuvat hyvin erilaisiin kohteisiin esimerkiksi rakennus-, elektroniikka- ja konepajateollisuudessa. (7; 10.)

Sinkityt teräsohutlevyt sopivat hyvin hitsattavaksi niiden alhaisen hiilipitoisuuden vuoksi. Vastushitsattavuus on sitä parempi mitä ohuempi pinnoite teräsohutlevyissä on. Korroosiosuoja säilyy oikein tehdyssä vastushitsauksessa myös hitsin kohdalla, koska sinkkipinnoite ei pala levyn ulkopinnoilta. Sinkin kuten muidenkin pinnoitteiden vaikutus hitsausjärjestelyihin ja kiinnittämiseen tulee huomioida, koska esimerkiksi sinkin höyrystymislämpötila on alempi kuin te-

räksen sulamislämpötila. Tällöin liitokseen mahdollisesti muodostuvalle sinkkikaasulle täytyy olla pääsy pois muutoin kuin sulan läpi. (7.)

3.1.3 Ruostumattomat teräsohutlevyt

Ruostumattomat teräkset luokitellaan niiden metallurgisen rakenteen perusteella austeniittisiin, ferriittis-austeniittisiin, ferriittisiin ja martensiittisiin laatuihin. Eniten ohutlevyinä käytetään austeniittista terästä. Austeniittisilla laaduilla on parempi yleinen korroosionkestävyys kuin ferriittisillä laaduilla. Ruostumattomia teräsohutlevyjä toimitetaan rullissa tai määrämittaan leikattuina arkkeina useisiin erilaisiin viimeistelytiloihin valmistettuna, kuten esimerkiksi peitattuna, harjattuna, hiottuna, kiiltohehkutettuna, kuviovalssattuna tai irrotettavalla suoja-
muovilla pinnoitettuna. (7.)

Laserhitsaus soveltuu ruostumattomille teräsohutlevyille erittäin hyvin. Laserhitsauksessa syntyvä hitsi on kapeampi ja tunkeuma syvempi kuin kaarihitsauksella syntyvä ja lisäksi hitsausnopeudet voivat olla jopa 5-kertaisia verrattuna kaarihitsaukseen. Laserhitsausta käyttämällä voidaan vähentää monia ongelmia, kuten vetelyä, seosaineiden suotautumista ja metallien välisten yhdisteiden erkautumista. Hitsattaessa tulee huomioida kuitenkin metallurgia, koska ruostumattomien joukossa on materiaaleja, joiden hitsaus on hankalaa seostuksesta ynnä muusta johtuen. (5; 7.)

3.1.4 Alumiiniohutlevyt

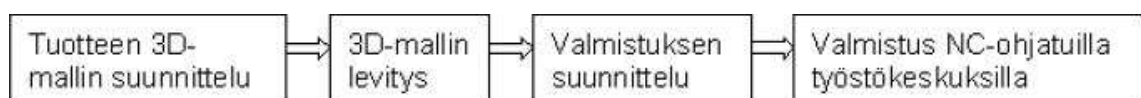
Alumiini ja sen seokset mahdollistavat laajat käyttöalueet ominaisuuksiensa puolesta. Eniten käytetään alumiiniseoksia, joiden lujuus on parempi kuin puhtaalla alumiinilla. Alumiiniohutlevyillä on kohtuullisen hyvät lujuusominaisuudet, hyvä muokattavuus, hyvä korroosionkestävyys, hyvä sähkön- ja lämmönjohtavuus ja lisäksi ne ovat keveitä verrattuna moniin muihin materiaaleihin. Alumiinin korroosionkestävyys on seurausta sen pinnalle muodostuvasta tiiviistä oksidikerroksesta, mutta se ei kuitenkaan kestä suojaamattomana epäorgaanisia happoja ja alkaaleja. (7.)

Alumiinin ja sen seosten hitsaus on vaativampaa kuin terästen, koska alumiinilla on suuri lämmönjohtavuus ja ominaislämpö. Laserhitsaus soveltuu paremmin alumiiniseoksille kuin puhtaalle alumiinille. Kaasukaarihitsausmenetelmillä hitsatut liitokset vaativat lähes aina viimeistelyä, toisin kuin laserhitsauksella, jolla hitsistä saadaan usein tasalaatuisempi, joten viimeistelyyn kuluva työn osuus pienenee tai jää kokonaan pois. Alumiineja hitsattaessa on yleensä aina välttämätöntä käyttää lisäainetta hitsin seostuksen hallintaan. (5; 7.)

3.2 Suunnittelu ja valmistus

Ohutlevytuotteen suunnittelu aloitetaan nykyisin mallintamalla se jollakin 3D-CAD-ohjelmistolla. Aluksi mallinnetaan tuotteen pääosat, jonka jälkeen malliin lisätään yksityiskohtia, kuten esimerkiksi reikiä, upotuksia, viisteitä, siltoja tai pyöristyksiä. Tuotteen 3D-malli pyritään rakentamaan ohjelmistolla siten, että tiettyjen mittojen muuttaminen tai piirteiden lisääminen tai poistaminen sujuisi mahdollisimman vaivattomasti myös myöhemmissä tuotekehityksen vaiheissa. Hyvin suunnitellun mallin muokkaaminen nopeuttaa tuotekehitystä ja rinnakkaistuotteiden suunnittelua. Useasta osasta koostuvassa kokoonpanossa jokainen osa mallinnetaan erikseen, jonka jälkeen osat liitetään yhteen ja saadaan valmis kokoonpano. Osien yhteensopivuutta ja mahdollisia mittavirheitä voidaan eliminoida jo suunnitteluvaiheessa. (7.)

Tuotteesta tehty 3D-malli on yleensä useiden suunnittelijoiden muokattavissa, ja myös eri teknologioiden asiantuntijat voivat käyttää samaa 3D-mallia. Kun suunnittelu ja lopullinen tuotteen 3D-malli on valmis, tehdään tuotteesta täydelliset kokoonpanopiirustukset, osaluettelot ja tarvittavat työpiirustukset kaikista tuotteen osista (kuva 8). (7.)



KUVA 8. Esimerkki tyypillisestä ohutlevyteollisuuden työnkulkuprosessista (7)

Tuotannon valmistusprosessiketjut vaihtelevat tuotteittain ohutlevyteollisuudessa. Tavallisesti tuotteen valmistus aloitetaan leikkaamalla levytyökeskuksille

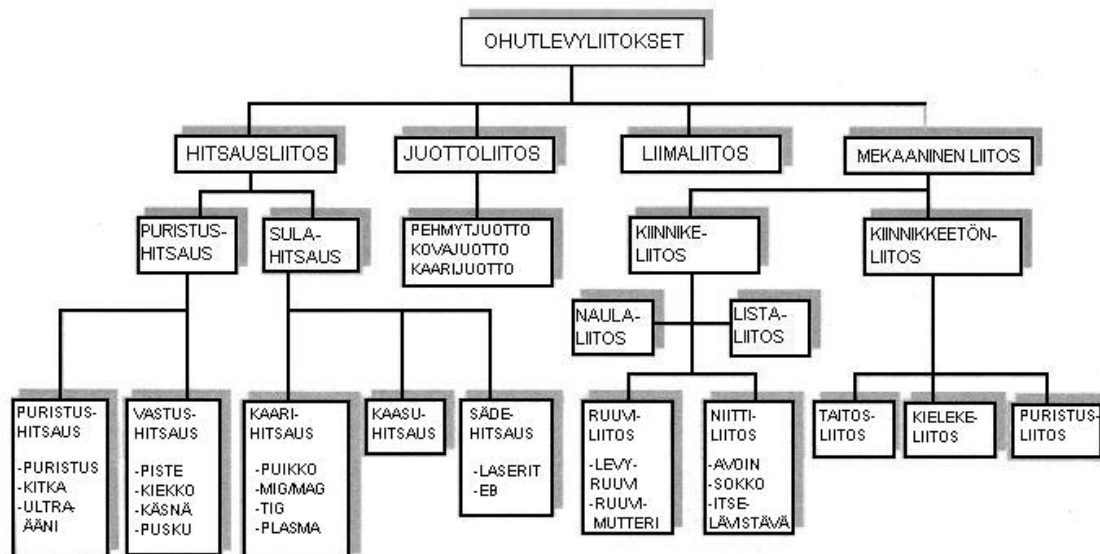
menevät levyaihiot sopivan kokoisiksi. Mekaaninen leikkaus on tärkein leikkausmenetelmä ohutlevyteollisuudessa ja leikkauskoneena käytetään yleensä suuntaisleikkuria. Laserleikkaus on noussut mekaanisen leikkauksen rinnalle ja sitä käytetään yhä enemmän teollisuudessa. (7.)

Leikkauksen jälkeen ohutlevytuotteita yleensä muovataan. Muovauksella haetaan rakenteellista jäykkyyttä ja parempaa toiminnallisuutta. Tuotteita taivutetaan eli särmätään särmäyspuristimilla, taivutuskoneilla ja taivutusautomaateilla. Muovausta suoritetaan myös syvävedolla ja venytysmuovauksella. (7.)

Ohutlevytuotteen osat liitetään toisiinsa erilaisilla liittämismenetelmillä muovauksen jälkeen. Ohutlevytuotteiden liittämismenetelmiä on esitetty tarkemmin luvussa 3.3. Liittämisen jälkeen ohutlevytuote viimeistellään ja pintakäsitellään. Tuotteelle suoritetaan jäysteenpoisto tarpeen vaatiessa jäysteenpoistokoneella. Jauhemaalaus on yleisesti käytetty ohutlevytuotteiden pintakäsittelymenetelmä ja se soveltuu erityisesti sarjatuotantoon. Lopuksi ohutlevytuote pakataan, minkä jälkeen se on valmis lähetettäväksi asiakkaalle. Valmistusprosessin vaiheiden järjestys vaihtelee tuotekohtaisesti. (7.)

3.3 Liittämismenetelmät

Yleisimpiä ohutlevyjen liittämismenetelmiä ovat ruuvi-, niitti- ja hitsausliitokset. Ohutlevyliitoksissa käytetään myös perusmateriaalin muovaukseen perustuvia menetelmiä ja liitoksia suunniteltaessa on aina otettava huomioon työkalujen ulottuvuus. Laserhitsaus uutena menetelmänä antaa suunnittelijalle uusia mahdollisuuksia ja etuja liitosten muotoiluun ja tekemiseen. Laserhitsauksen etuna on, että liitokseen tarvitsee päästä käsiksi vain yhdeltä puolelta. Kuvassa 9 on esitettyinä käytetyimpiä ohutlevyjen liittämismenetelmiä. (7.)



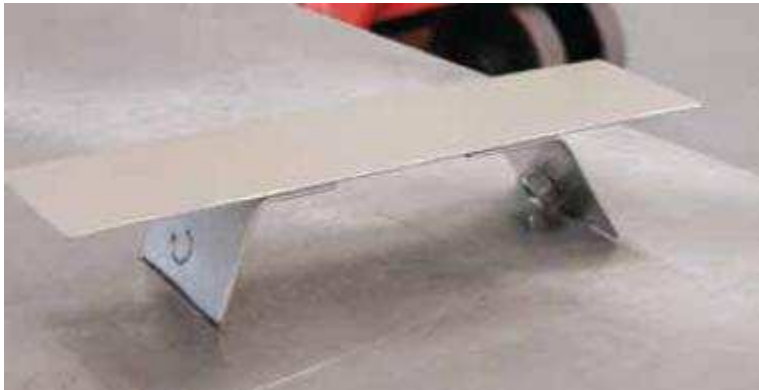
KUVA 9. Ohutlevyjen liittämismenetelmiä (7)

Vastushitsaus on yleisin liittämismenetelmä teräsohutlevy tuotteissa. Vastushitsauksessa ei tarvita lisäainetta, koska hitsaukseen tarvittava lämpö syntyy yhteenliitettävien osien vastuksista läpi kulkevan korkean hitsausvirran ansiosta. Ohutlevyjen liittämässä pistehitsaus on yleisin vastushitsausmenetelmä. Vastushitsaus soveltuu hyvin sekä automatisoituihin tuotantolinjoihin että myös useimmille metallisesti pinnoitetuille ohutlevyille. (7.)

Ohutlevyjen liittämiseen käytetään myös kaarihitsausmenetelmiä, joista yleisimpiä ovat MIG-, MAG-, TIG- ja plasmahitsaus. Kaarihitsauksessa lämmöntuonti on runsasta, jolloin muodonmuutokset ovat suuria ja niiden estämiseen tarvitaan tukevia hitsauskiinnittimiä. Kaarihitsausmenetelmiä on mahdollista yhdistää robottiin, jolloin tuotannolle saadaan varsin tasainen laatu sopivien hitsausarvojen löytyttyä. (7.)

Laserhitsaus soveltuu hyvin ohutlevyjen hitsaukseen. Ohutlevyjen hitsaamiseen riittää 1–5 kW:n laser. Pinnoitettujen ja värivalmiiden ohutlevyjen hitsauksessa pinnoitteen vaurioituminen ja muodonmuutokset ovat hyvin vältettävissä laserhitsauksella. Laserhitsauksessa sopivien hitsausparametrien avulla, esimerkiksi limiliitoksia tehdessä, pystytään välttymään pinnoitteen vaurioitumiselta limiliitoksen vastapuolella. Tutkimusten mukaan maalipinnoitettu ohutlevy voidaan

liittää limiliitoksella toiseen maalaamattomaan kuumasinkittyyn ohutlevyyn ilman maalipinnan vaurioita (kuva 10). (10.)



KUVA 10. Laserhitsattu ohutlevyosa, jossa värivalmis ohutlevy on liitetty kuumasinkittyyn ohutlevyyn limiliitoksella (10)

3.4 Hitsauksen mekanisointia

Mekanisoitu hitsaus on koneellista hitsausta. Hitsauksen mekanisointi tuo monia etuja ohutlevytuotteiden käsittelyyn. Mekanisoinnin avulla pystytään tuottamaan parempaa ja tasaisempaa laatua, saadaan nostettua tuottavuutta ja hitsin ulkonäkö sekä työturvallisuus paranevat.

3.4.1 Kiinnittimet

Hitsauskiinnittimen tehtävänä on paikoittaa osat oikeaan paikkaan ennen hitsausta ja pitää osat paikoillaan hitsauksen aikana. Kiinnitys perustuu joko tarkkoihin osiin tai kiinnitysvoimaan. Laserhitsaus vaatii tarkan kiinnittimien paikoitustarkkuuden, toisin kuin kaarihitsausmenetelmät. Kiinnitin ei saa muuttaa työstettävän kappaleen muotoa eikä se saa rajoittaa kappaleen hitsattavuutta. Laserhitsauksessa kiinnittimeen kohdistuu suuria voimia hitsausprosessin aikana, jos käytetään suuria tunkeumia sekä liitospintoja. Laserhitsauksen voimat ovat pieniä suhteessa kaasukaarihitsausmenetelmiin, mutta koska tarkkuusvaatimukset ovat korkeat, tulee ne kuitenkin huomioida. Hyvällä kiinnitinsuunnittelulla voidaan parantaa laitteiston käyttösuhdetta, lopputuotteen laatua ja laadun tasaisuutta. Laserhitsausaseman tehottomuus johtuu usein huonosta

kappaleenkäsittelysuunnittelusta, jolloin kappaleenkäsittelyyn voi mennä jopa 80 % hitsaustyövaiheen ajasta. (3; 5.)

Ohuiden ja tarkkojen osien hitsauksessa on erityisesti varmistettava, että kiinnitin ei vaurioita hitsattavia kappaleita hitsausprosessin aikana. Paineilma soveltuu hyvin kiinnitysvoiman tuottamiseen, koska paineilman avulla voidaan tarkasti säätää sopiva puristus. Sarjatuotannossa tai paljon hitsejä sisältävän tuotteen hitsauksessa on huomioitava tuotteen ja kiinnittimen lämpeneminen. Lämpenemistä voidaan vähentää hyvällä jäähdytysjärjestelmällä. (3.)

3.4.2 Hitsausjigit

Hitsausjigi on teline, johon kappaleen osat laitetaan ja jossa ne voidaan hitsata hallitusti yhdeksi kokonaisuudeksi. Jigiä suunnitellessa tulee huomioida, että se on helposti käsiteltävissä robotilla, ja että hitsausjigi ei ole liian painava. Kappaleen ja hitsausjigin yhteenlaskettu massa ei saa ylittää robotin käsittelykykyä. Kappaleen kiinnitys jigiin tulee suunnitella siten, että kappale on helppo irrottaa ja kiinnittää. Toimenpiteen tulisi olla nopeaa ja varmatoimista, jotta kappaleen asetus aika saadaan minimoitua. (18.)

Hitsausjigin rakenne on hyvä olla avoin, jotta se ei kerää hitsauksessa syntyvää lämpöä itseensä. Avonaisella rakenteella pyritään myös välttämään kappaleen lämpölaajenemista, jotta kappaleen mitat eivät muuttuisi. Hitsausjigi ei saa millään tavoin estää kappaleen hitsaamista. (18.)

3.4.3 Robotiikka

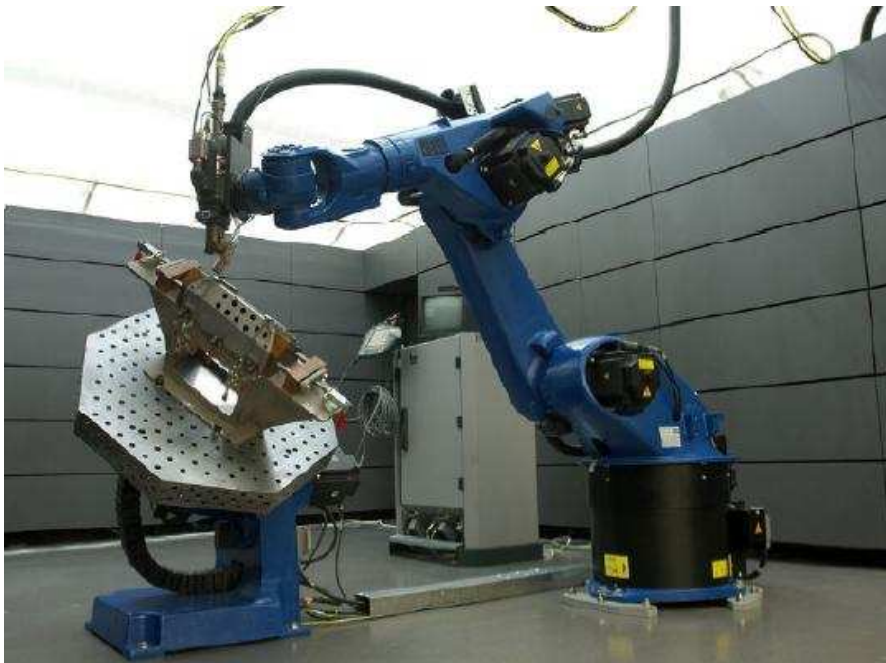
Robottityöasemien käyttö yleistyy jatkuvasti tekniikan kehittymisen ansiosta. Vakiintuneita teollisuusrobottityyppejä ovat suorakulmaiset, kiertyväniveliset, sylinteri- ja scara-robotit. Hitsauksen robotisoinnit ovat metalliteollisuuden yleisimpiä robottien käyttökohteita. Hitsausroboteista ehdottomasti yleisin robottityyppi on kuusiaskelinen kiertyvänivelrobotti, jonka liikkeet toteutetaan servomooottoreilla. Kyseistä robottityyppiä kutsutaan myös nivelvarsirobotiksi ja sen vahvuutena on laaja työalue ja monipuolisuus. Nivelvarsirobotin heikkoutena on

sen alhainen kuormankantokyky, mutta hitsausprosessissa siitä ei ole haittaa. Ratatarkkuus on roboteilla riippuvainen nopeudesta, jonka vuoksi pienet ja nopeat hitsausgeometriat laserilla tehdäänkin nykyisin skannerilla, ja robotti liikkuu suhteellisen hitaasti sellaista rataa, joka riittäväällä tarkkuudella seuraa aiottua rataa. Hitsaus tehdään liikkeessä pysähtymättä. Robottien yleisimmät rakenteet, niiden kinemaattiset kaaviot ja työalueet on esitetty kuvassa 11. (5; 7; 11.)

Nimitys pääakseleiden mukaan	Rakenne	Kinemaattinen kaavio	Työalue
Suorakulmainen robotti			
Sylinterirobotti			
Napa-koordinaatistirobotti			
Scara-robotti			
Kiertyvänivelinen robotti			
Rinnakkaisrakenteinen robotti			

KUVA 11. Yleisimpien robottityyppien rakenne-esimerkkejä (11)

Toistotarkkuus roboteilla on parhaimmillaan noin 0,07 mm, mutta mekaniikassa olevat välykset aiheuttavat säännöllistä työstetyn liikeradan poikkeamista ohjelmoidusta liikeradasta. Robotin työskentelyä voidaan helpottaa ja monipuolistaa integroitavilla lisälaitteilla, kuten esimerkiksi pyörityspöydällä. Pyörityspöydän avulla liikeakselien määrä kasvaa ja työstettävä kappale voidaan tarvittaessa kääntää robotin liikkeen kannalta helpompaan asentoon (kuva 12). (7.)



KUVA 12. Robottityöasema pyörityspöydällä (7)

Ohjaimet ovat viime aikoina kehittyneimpiä osia robotisoidussa hitsauksessa. Ohjaimen suorituskyky on ratkaiseva tekijä koko robottityöaseman suorituskyvyssä. Nykyaikaisten ohjaimien suorituskyky mahdollistaa ohjaamaan robotin lisäksi toisia laitteita, kuten esimerkiksi toista robottia. (11.)

3.4.4 Optiikka

Optisia komponentteja ovat esimerkiksi heijastava optiikka, läpäisevä optiikka, optiset anturit ja optinen monitorointi. Lasertyöstösystemissä on paljon optisia laitteita, joilla vaikutetaan prosessointiin. (3.)

Sädettä siirretään ja muokataan fokusointia varten optisten komponenttien avulla ja komponentit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: heijastavaan ja läpäisevään optiikkaan. Heijastavassa optiikassa käytetään peilejä säteen siirtoon ja muokkaukseen. Hiilidioksidilasereita ja kidelasereita ohjataan peilien avulla, koska niiden teho, säteenlaatu tai pulssiteho on niin korkea, että kuituoptiikka ei sitä kestä. Lasertyöstösystemeissä, joissa käytetään peilejä säteen siirtoon, on yleensä 1–15 peiliä. Peilit ovat yleensä kupari- tai piipeilejä ja ne voivat olla pinnoitettuja. Kuparin heijastavuus työstettynä peilipinnaksi on noin 99 % 10 600 nm:n aallonpituudella. Kuparipinnan heikkoutena on kuitenkin sen pehmeys ja helppo naarmuuntuminen, joten kuparipeilejä tyypillisesti pinnoitetaan joko kullalla tai molybdeenillä. (3; 5.)

Läpäisevässä optiikassa käytetään säteen siirtoon ja muokkaukseen kuitua. Kuidun etuja verrattuna peilioptiikkaan ovat sen helppo integroitavuus robottiin tai muuhun työasemaan. Etuna on myös joustavuus, joten laserin ei tarvitse olla lähellä työpistettä. Optinen kuitu on kvartsilasia (SiO_2). Fokusoinnissa voidaan käyttää läpäisevää optiikkaa myös hiilidioksidilasereissa sekä kidelasereissa matalilla tehoilla. Suurilla tehoilla tulee käyttää aina heijastavaa optiikkaa myös kuituoptisen siirron kanssa. (3; 5.)

Optisia antureita käytetään railon etsintään ja seurantaan. Optisilla antureilla saadaan paljon tietoa railosta. Sijaintitiedon lisäksi optisten antureiden avulla pystytään mittaamaan muun muassa railon muotoa, tilavuutta ja ilmaraon suuruutta. Railonhaun ansiosta robotti osaa paikoittaa polttimen oikeaan kohtaan hitsausrailoa ja railonseurannan avulla pyritään saamaan hitsauspoltin seuraamaan haluttua railoa, jotta hitsi saadaan haluttuun paikkaan. Optisten antureiden vahvuutena on, että niissä ei ole mekaanisesti kuluvia osia. Anturit ovat tyypillisesti hitsausoptiikan sisällä turvassa prosessin häirttekijöiltä. (5; 12.)

Optinen monitorointi perustuu kameran, hahmontunnistuksen ja tietokoneen käyttöön, minkä avulla seurataan ja valvotaan työstöprosessia. Prosessia on mahdollista kuvata joko sivusta tai samanakselisesti säteen kanssa. Kuvauksen ongelmana on laserhitsausprosessista syntyvä plasmapiilvi. Prosessin lähettämä valomäärä on niin suuri, että kuvaus täytyy tehdä tiukkojen suodattimien lä-

pi, jotta kuvauksesta voidaan erottaa mitään. Monitorointia voidaan nykyään tehdä myös prosessin lähettämien muiden emissioiden mukaan kuin vain kuvan avulla. Tällaisia emissioita ovat esimerkiksi plasman intensiteetti, lämpötila reiän ympärillä, takaisinheijastus ja akustiset emissiot. Hitsausta myös monitoroidaan välittömästi prosessin jälkeen hitsingeometrian monitoroinnilla. (3; 5.)

4 KUSTANNUKSET

Kustannukset ovat yksi ratkaisevimmista tekijöistä laserhitsauslaitteen valinnalle ja käytölle. Kustannukset tulee selvittää, jotta osataan hankkia sopiva laite, tiedetään, kuinka paljon laitteen käyttö maksaa, pystytään suunnittelemaan laitteeseen lisäinvestointeja ja osataan budjetoida tulevaisuuden suunnitelmia.

4.1 Kustannusvaikutukset

Kustannusvaikutusten avulla pystytään vertailemaan eri hitsausmenetelmiä laserhitsaukseen, voidaan hahmottaa hitsausmenetelmien kustannusrakenteet, vertailla vaihtoehtoisia valmistusmenetelmiä ja löytää kokonaisuuden kannalta oleelliset kustannukset. Hitsauksen kustannuksia ja tuottavuutta arvioidaan monilla eri mittareilla. (3.)

Kustannuksia laskiessa tulee huomioida muutkin kustannukset kuin pelkästään hitsaustyöstä aiheutuvat kustannukset. Huomioon tulisi ottaa hitsausta edeltävien ja sitä seuraavien valmistusketjun vaiheiden vaikutukset. Hitsaustyön ja muiden tuotteen valmistusprosessien vaiheiden vuoro- ja kokonaisvaikutusta vertaamalla voidaan laskea todellinen hitsauskustannusten suurus ja hitsaustyön tuottavuus. Laserhitsauksessa hitsausprosessi on täysin automatisoitua tai robotisoitua, joten käsityön osuus rajoittuu korkeintaan kappaleenkäsittelyyn ja kiinnitykseen. (3.)

4.2 Investointikustannukset

Laserhitsauslaitteiston investointikustannukset perinteisiin hitsauskoneisiin verrattuna ovat korkeat. Laitteiston tuottavuus on suuri, joten mikäli laitteen kapasiteetti pystytään tehokkaasti hyödyntämään, on investointi todennäköisesti kannattava. Laserhitsauslaitteistot eivät kuitenkaan ole merkittävästi kalliimpia kuin muut automatisoidun järjestelmän työkoneet ja niiden käyttökustannukset ovat varsin alhaiset. Laserlaitteiston investointi koostuu monista eri tekijöistä muun

muassa laserista, jäähdyttimestä, kiinnittimistä, työasemasta, asennuskustannuksista, testauksesta, suojauksesta ja käyttöönottokustannuksista. (3; 13.)

Laserin teholla ja säteen laadulla (fokusoitavuudella) on suora yhteys investointikustannuksiin. Tärkeintä on käyttää optimaalisinta säteen laatua sekä tehoa, jotka tulevat itse prosessista suhteessa kustannuksiin. Jotta kustannukset voitaisiin optimoida prosessille, on yleensä saman tehoisia lasereita erilaisilla säteen laaduilla saatavissa. Laserilaite tulee valita omien käyttötarpeiden mukaan, mikä tarkoittaa sitä, että tulee tuntea omat todelliset tarpeet nyt ja lähitulevaisuudessa. (3; 5.)

Työaseman hinnalla on suuri merkitys kokonaiskustannuksiin. Työaseman monipuolisuus ja koko nostavat sen hintaa. Työasema kannattaa räätälöidä työstettävän kappaleen mukaan, jollei työstettävälle tuotteelle ole vakioratkaisua, koska vakiotyöasemissa voi olla tarpeettomia toimintoja. Tässä asettuvat vastakkain joustavuus ja tuottavuus sekä vakiokone ja räätälöitykone. Asema voi olla monipuolinen, mutta sen tuottavuus voi olla heikko. (3; 5.)

Kiinnitinkustannukset ovat merkittävä kustannustekijä laserhitsauksessa. Laserhitsaus vaatii tarkat toleranssit, joten kiinnittimien tulee olla hyviä ja luotettavia. Piensarjatuotannossa voidaan käyttää yksinkertaisia kiinnitinratkaisuja, mutta tyypillistä on, että kappaleen asetus- ja hitsauskustannukset näissä sovelluksissa ovat moninkertaiset verrattuna siihen, mitä hyvällä kiinnittimellä pystytään saavuttamaan. Kiinnitininvestoinnin suuruus tulee harkita tapauskohtaisesti. (3.)

Merkittäviä investointikustannuksia ovat myös optiikkaan, kuitukaapeleihin, suojakaasuihin ja työturvallisuuteen liittyvät kustannukset. Suojakaasut vaativat erikoisjärjestelyjä ja kiristyneet työturvallisuus vaatimukset ovat merkittävä kustannuserä. Ihmissilmälle näkyvä haitallinen laservalo estetään sädesuojauksen avulla ja valmistuksen visuaaliseen tarkkailuun käytetään kameroita ja monitoireita. (3;13.)

4.3 Käyttökustannukset

Laserhitsauksessa käyttökustannukset koostuvat suurimmaksi osaksi sähkö- ja kaasukustannuksista. Kaasukustannukset koostuvat suojakaasuista (prosessikaasut) ja laserkaasuista (resonaattorikaasut), mutta kaikissa lasertyypeissä eivät prosessikaasut ole kriittisiä. Tärkeää on myös tietää laserin hyötysuhde ja käyttösuhde. Hyötysuhde tulee huomioida tuottavuuden suhteen eikä ainoastaan laitteiden energian oton jaannon välillä. Käyttösuhde vaikuttaa myös, koska jos konetta ei käytetä, on energian kulutus tällöin nolla. (3; 5.)

Laserin ja jäädyttimen energiakulujen lisäksi tulee huomioida kuluvien komponenttien kulut. Kuluvia komponentteja lasertyyppistä riippuen ovat esimerkiksi peilit, ulostuloikkuna, virityslamput, linssit, diodit ja suodattimet. Lasertyyppistä riippuen diodit kuluvat. Aktiivijäädytteisissä lasereissa diodit kuluvat, mutta nykyisissä passiivijäädytteisissä lasereissa eivät varsinaisesti kulu. Huoltokustannukset ovat pienempi kustannustekijä laserissa. Laitteille suoritetaan määräraikaishuollot vakiokäyttötuntimäärien mukaisesti, mikä mahdollistaa huoltokustannusten tarkan laskemisen etukäteen. (3; 5.)

Käyttökustannuksiin vaikuttavat myös henkilökustannukset. Henkilökustannukset vaihtelevat voimakkaasti riippuen sarjakoosta ja työstettävien kappaleiden ja työstön eroista. Lyhyet sarjat vaativat enemmän ohjelmointia. (3; 20.)

4.4 Hitsauskustannukset

Laserhitsauksen hitsauskustannusten hinta pohjautuu pitkälti käytössä olevan laserin tehoon. Hintaesimerkkinä teholtaan 2,5 kW laser jäädyttimen kanssa kuluttaa arviolta noin 4,5 €/h säteen ollessa 70 % ajasta päällä sisältäen kaasun (esimerkiksi helium), sähkö- ja huoltokulut. Teholtaan 5 kW laser kuluttaa vastaavasti noin 6,52 €/h. Nämä hinta-arviot ovat amerikkalaisesta lähteestä, joten kaasu- ja sähkökustannukset voivat olla hyvinkin erihintaisia kuin Suomessa (taulukko 1 ja 2). (14; 15.)

Eri lasertehojen kustannukset (taulukko 1 ja 2) 25,4 m:n eli 1 000 tuumanpituis- ta hitsiä kohden. Ohuemilla materiaaleilla tehokkaampi laser on kalliimpi kuin paksummilla materiaaleilla. (14; 15.)

TAULUKKO 1. Laserhitsauksen hinta euroina 2,5 kW laserilla per 25,4 m (14; 15.)

Syvyys (mm)	Käyttökustannukset (€/h)	Lisänä kiinteät kustannukset +36,57 €/h (€/h)
1,0	0,17	1,27
2,0	0,33	2,55
3,0	0,59	4,53
4,0	1,14	8,80
5,0	2,60	20,02

TAULUKKO 2. Laserhitsauksen hinta euroina 5 kW laserilla per 25,4 m (14; 15.)

Syvyys (mm)	Käyttökustannukset (€/h)	Lisänä kiinteät kustannukset +36,57 €/h (€/h)
1,0	0,25	1,35
2,0	0,43	2,37
3,0	0,64	3,55
4,0	0,86	4,73
5,0	1,15	6,31

Koneen tuntihinta (H_{KT})

Koneen tuntihinta molemmille hitsausmenetelmille lasketaan kaavalla 1 (16; 17).

$$H_{KT} = \left(H_H \cdot \left(\frac{1}{T_p} + \frac{p}{2 \cdot 100} \right) + Y \right) \cdot \frac{1}{T_K} \quad [\text{€/h}] \quad \text{KAAVA 1}$$

H_H = koneen ostohinta (€)

T_p = koneen poisto-aika (v)

p = pääoman korkoprosentti (%)

Y = koneen vuosittaiset huoltokustannukset (€)

T_K = koneen vuosittainen käyttöaika (h)

Suojakaasukustannukset (K_{SL})

Suojakaasukustannukset laserille lasketaan kaavalla 2 (16;17).

$$K_{SL} = (V \cdot H_{SL}) \cdot e [\text{€} / \text{h}] \quad \text{KAAVA 2}$$

V = suojakaasun virtaus (l/h)

H_{SL} = suojakaasun litrahinta (€/l)

e = paloaikasuhte (desimaaliluku)

Työkustannukset (K_T)

Työkustannukset MIG-hitsaukselle voidaan laskea kaavalla 3 (16; 17).

$$K_T = \frac{M}{T} \cdot \frac{1}{e} \cdot H_T [\text{€} / \text{m}] \quad \text{KAAVA 3}$$

M = hitsiainemäärä (kg/m)

T = hitsiaineentuotto (kg/h)

e = paloaikasuhte (desimaaliluku)

H_T = työtunnin hinta (€/h)

Lisäainekustannukset (K_L)

Lisäainekustannukset MIG-hitsaukselle saadaan laskettua kaavalla 4 (16; 17).

$$K_L = \frac{M}{N} \cdot H_L [\text{€} / \text{m}] \quad \text{KAAVA 4}$$

M = hitsiainemäärä (kg/m)

N = hyötyluku (desimaaliluku): 0,95 MIG/MAG-hitsauksessa

H_L = lisäaineen ostohinta (€/kg)

Suojakaasukustannukset (K_S)

Suojakaasukustannukset MIG-hitsausmenetelmälle lasketaan kaavalla 5 (16; 17).

$$K_S = \frac{M}{T} \cdot V \cdot H_S \cdot k \text{ [€ / m]}$$

KAAVA 5

M = hitsiainemäärä (kg/m)

T = hitsiaineentotto (kg/h)

V = suojakaasun virtaus (l/min)

H_S = suojakaasun ostohinta (€/m³)

k = muuntokerroin (seoskaasu): 0,06

Energiakustannukset (K_E)

Energiakustannukset MIG-hitsaukselle lasketaan kaavalla 6 (16; 17).

$$K_E = M \cdot E \cdot H_E \text{ [€ / m]}$$

KAAVA 6

M = hitsiainemäärä (kg/m)

E = energian ominaiskulutus (kWh/hitsiaine kg)

H_E = energian hinta (€/kWh)

Konekustannukset (K_K)

Konekustannukset MIG-hitsaukselle voidaan laskea kaavalla 7 (16; 17).

$$K_K = \frac{M}{T} \cdot \frac{1}{e} \cdot H_{KT} \text{ [€ / m]}$$

KAAVA 7

M = hitsiainemäärä (kg/m)

T = hitsiaineentotto (kg/h)

e = paloaikasuhte (desimaaliluku)

H_{KT} = koneen tuntihinta (€/h)

Kokonaisaika (t_k)

Kappaleen valmistukseen kuluva kokonaisaika t_k saadaan laskettua kaavalla 8.

$$t_k = t_h + t_p \text{ [s]}$$

KAAVA 8

t_h = hitsausaika (s)

t_p = paikoitusaika (s)

Hitsausaika (t_h)

Paikoitus aika t_p on molemmille hitsausmenetelmille sama, joten ratkaiseva aika on hitsausaika. Hitsausaika saadaan laskettua kaavalla 9.

$$t_h = \frac{s_h}{v_h} [s]$$

KAAVA 9

s_h = hitsausmatka (mm)

v_h = hitsausnopeus (mm/s)

Hitsausmatka tunnissa (s_{HT})

Menetelmillä saatava hitsausmatka tunnissa voidaan laskea kaavalla 10.

$$s_{HT} = v_h \cdot e [m/h]$$

KAAVA 10

v_h = hitsausnopeus (m/h)

e = säde aika (paloaikasuhte)

Hitsauskustannukset (K_{HI})

Hitsauskustannukset saadaan laskettua kaavalla 11.

$$K_{HI} = H_{TU} / s_h [€ / m]$$

KAAVA 11

H_{TU} = hitsausprosessin tuntihinta (€/h)

s_h = hitsausmatka (m/h)

Kappaleen työhinta (H_{KA})

Kappaleen työhinta voidaan laskea kaavalla 12.

$$H_{KA} = s_h \cdot H_{HI}$$

KAAVA 12

s_h = hitsausmatka (m)

K_{HI} = hitsauskustannukset (€/m)

5 LÄHTÖARVOT

Laserhitsauslaitteeksi tässä selvityksessä valitaan Trumpf HLD 4002 -laser, joka on tyypiltään diodipumpattu Yb:YAG-kiekkolaserlaitteisto. Kiekkolaserilla on parempi hyötysuhde ja säteenlaatu kuin vanhempaa tekniikkaa edustavalla Nd:YAG-laserilla. Hyvästä säteenlaadusta on etua leikkauksessa ja hitsauksessa. Laserin suurin saatava teho työkappaleen pinnalle on 4 kilowattia. Leikkauskaasuina laserilla käytetään typpeä ja happea ja hitsauskaasuna käytetään argonia. Robottityöaseman laser on esitetty kuvassa 13.



KUVA 13. Robottityöaseman laser ELME Studiolla, Trumpf HLD 4002 -kiekkolaser (7)

Laser on varustettu Precitec YW50 -hitsauspäällä ja Precitec YK52 -leikkauspäällä. Kuvassa 14 on Precitecin prosessioptiikat.



KUVA 14. Precitec prosessioptiikat: vasemmalla leikkauspää YK52 ja oikealla hitsauspää YW50 (7)

Robottina käytetään Motoman UP50N -teollisuusrobottia. Robotti on kuusiakselinen ja sen käsittelykyky on noin 50 kg. Ulottuvuus on 2 046 mm ja robotin toistotarkkuus on $\pm 0,07$ mm. Robotin paino on noin 550 kg. Robottiohjaimena on käytössä Motoman NX100. Robottityöasemaan kuuluu lisäksi Motoman MT1-250 S2CX -käsittelylaite. Käsittelylaite on kaksiakselinen pyörityslaite. Käsittelylaitteen avulla saadaan työkappale työstöprosessin kannalta optimaaliseen asentoon. Käsittelylaitteen kantavuus on 250 kg, kun massa on pyöritettävän akselin keskellä.



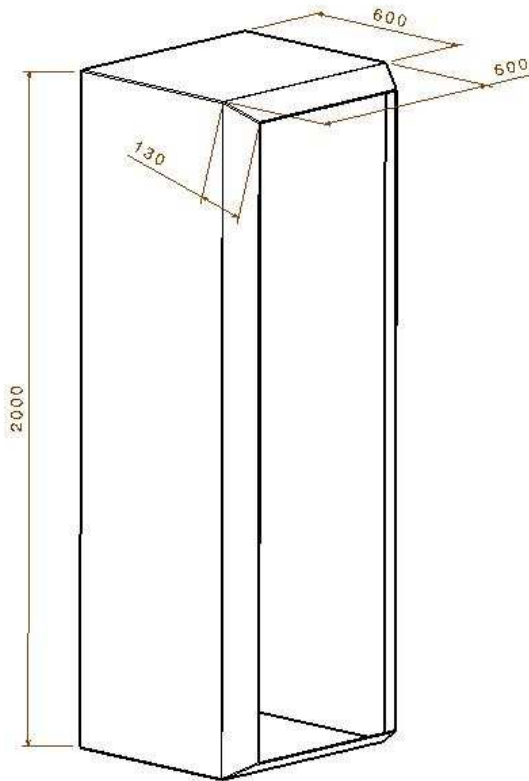
KUVA 15. Motoman UP50N -robotti ja Motoman NX100 -ohjaus (7)



KUVA 16. Robottityöaseman Motoman MT1-250 S2CX -käsittelylaite (7)

Vertailukohteeksi laserhitsaukselle valitaan robotisoitu MIG-hitsaus. Robottina toimii sama Motoman UP50N -teollisuusrobotti kuin laserilla. Vertailu tehdään taulukkolaskelman avulla käyttäen Excel-ohjelmaa. Molemmille menetelmille selvitetään investointikustannukset ja hitsauskustannukset. Vertailussa huomioidaan myös hitsausjigeistä aiheutuvat kustannukset ja selvitetään jälkityöstön vaikutusta.

Ohutlevyvuotekokoonpanoksi valitaan kotelorakenne (kuva 17). Ohutlevymateriaaliksi valitaan 2 mm paksu kylmävalssattu hiiliteräs ja teräslajiksi Ruukin DC 05. Levynaihion leveys on 1 000 mm ja pituus 2 000 mm. Levyt ovat standardin EN 10131:2006 mukaisia.



KUVA 17. Ohutlevyvuotekokoonpanona on kotelorakenne

Laserhitsauslaitteen nopeus Motomanin robotilla suoritettuna on tyypillisesti 50–400 mm/s. Alhaisemmat nopeudet ovat käytössä, kun hitsataan ohutlevyä sulattavalla hitsauksella. Sulattavalla hitsauksella saadaan pieni tunkeuma, esimerkiksi nurkkaliitoksia tehdessä, jolloin materiaali sulaa vain läheltä pintaa. Suuremmat nopeudet ovat käytössä, kun tehdään esimerkiksi limi- ja päittäisliitoksia. Laserin tunkeuma on limi- ja päittäisliitoksissa noin 1–3 mm. Käytännössä 400 mm/s on maksimiarvo robotille, koska suuremmilla nopeuksilla robotti ei enää toteuta ohjelmoitua rataa. Robotisoidun MIG-hitsauksen hitsausnopeus on 13,33 mm/s, joka paljon alhaisempi kuin laserin.

6 TULOKSET

Laserhitsauksen etuna kokoonpanoja hitsattaessa on sen ylivoimainen hitsausnopeus kilpailijaansa nähden. Kummassakin hitsausmenetelmässä on käytetty samaa robottia, jolloin paikoitusliikkeiden nopeus on sama, joten ratkaisevat tekijät ovat hitsausaika ja hitsausnopeus. Hitsausmenetelmille tulee selvittää hitsauskustannukset, joiden avulla voidaan laskea kokoonpanon tuotantokustannukset.

6.1 Investointikustannukset

Tulokset osoittavat, että investointikustannukset (taulukko 3) laserilla ovat huomattavasti suuremmat kuin MIG-hitsauksella. Koneen tuntihinta hitsausmenetelmille on laskettu kaavalla 1. MIG-hitsauksen vuosittaisiksi huoltokustannuksiksi on arvioitu 10 prosenttia investointikustannuksista. Käyttöaika on kaksivuorotyöstä saatu tuntimäärä. Hitsaussolu sisältää laserin, optiikan, jäähdytyksen, kaasunsyötön, työaseman ja integraation.

TAULUKKO 3. Hitsausmenetelmien investointikustannukset

Investointikustannukset	Laser	MIG
Hitsaussolun hinta (€)	250000	20000
Robotin hinta (€)	50000	50000
Yhteishinta (€)	300000	70000
Koneen poistoaika (v)	5	5
Pääoman korkoprosentti (%)	10	10
Koneen vuosittaiset huoltokustannukset (€)	10000	7000
Koneen vuosittainen käyttöaika (h)	3200	3200
Koneen tuntihinta (€/h)	26,56	7,66

$$H_{KT} = \left(H_H \cdot \left(\frac{1}{T_p} + \frac{p}{2 \cdot 100} \right) + Y \right) \cdot \frac{1}{T_K} [\text{€}/h]$$

$$H_{KT} = \left(300000 \text{€} \cdot \left(\frac{1}{5} + \frac{10}{2 \cdot 100} \right) + 10000 \text{€} \right) \cdot \frac{1}{3200h} = 26,56 \text{€}/h$$

$$H_{KT} = \left(70000\text{€} \left(\frac{1}{5} + \frac{10}{2 \cdot 100} \right) + 7000\text{€} \right) \cdot \frac{1}{3200h} = 7,6\text{€} [\text{€}/h]$$

6.2 Hitsauskustannukset

Käyttökulut on selvitetty molemmille menetelmille taulukossa 5 ja hitsauskustannukset taulukossa 6. Henkilökustannukseksi on arvioitu 25 €/h molemmissa hitsausprosesseissa. Laserhitsauksen käyttökulut ovat 18,01 €/h, mikä sisältää kuluvien osien kustannukset, energia- ja huoltokustannukset sekä arvonalennuksen tuntia kohden (taulukko 4).

Käyttökulut on laskettu Trudisk 4002 (4C) -laserille, koska HLD 4002 ei enää ole valmistettu vuoden 2006 jälkeen, joten sen käyttökulut ovat vaikeampia saada. Nämä laserit ovat säteen suhteen vertailukelpoisia, mutta muuten täysin eri koneita hyötysuhteen, huoltotarpeen ja hankintahinnan osalta verrattuna. Suojakaasun kulutus laserilla on noin 30 l/min, minkä avulla on laskettu suoja- kaasukustannukset. Litrahinta argon kaasulla on 0,017 €/l ja se on laskettu 12 pullon pakkauksesta. Sädepäällä aika suhteessa työaikaan on 80 prosenttia. (21; 22.)

TAULUKKO 4. Trudisk 4002 (4C) - laserin käyttökustannukset

Käyttökustannukset Trudisk 4002 (4C)

Arvonalennus	16,93 €/h
Energiakustannukset	0,88 €/h
Osat	0,06 €/h
Huolto	0,14 €/h
Yhteensä	18,01 €/h

Suojakaasukustannukset laserille saadaan laskettua kaavalla 2.

$$K_{SL} = (V \cdot H_{SL}) \cdot e [\text{€}/h]$$

$$K_{SL} = (1800l / h * 0,017\text{€} / h) * 0,8 = 25,10 [\text{€} h]$$

MIG-hitsauksen hitsauskustannukset on laskettu kaavoilla 3-7. Hitsiainemäärä alapienahitsille on a-mitalla 5 mm noin 0,20 kg/m. Hitsiaineen tuotto robottihitsauksessa on arviolta 6,4 kg/h ja lisäaineen ostohintana 1 €/kg. Suojakaasuna käytetään argonia ja virtaamana arvona on 20 l/min ja ostohintana 17,5 €/m³. Suojakaasun kuutiohintana on laskettu 12 pullon pakkauksesta. Paloaikasuhte on 80 prosenttia. Energian kulutus robottihitsauksessa on 5 kWh/kg ja energian ostohintana 0,0527 €/kWh. (16; 19; 22.)

Työkustannukset MIG-hitsaukselle saadaan laskettua kaavalla 3.

$$K_T = \frac{M}{T} \cdot \frac{1}{e} \cdot H_T \text{ [€/m]}$$

$$K_T = \frac{0,20 \text{ kg/m}}{6,40 \text{ kg/h}} \cdot \frac{1}{0,80} \cdot 25,00 \text{ €/h} = 0,98 \text{ [€/m]}$$

Lisäainekustannukset lasketaan kaavalla 4.

$$K_L = \frac{M}{N} \cdot H_L \text{ [€/m]}$$

$$K_L = \frac{0,20 \text{ kg/m}}{0,95} \cdot 1,00 \text{ €/kg} = 0,21 \text{ [€/m]}$$

Suojakaasukustannukset voidaan laskea kaavalla 3.

$$K_S = \frac{M}{T} \cdot V \cdot H_S \cdot k \text{ [€/m]}$$

$$K_S = \frac{0,20 \text{ kg/m}}{6,4 \text{ kg/h}} \cdot 20,00 \text{ l/min} \cdot 17,42 \text{ €/m}^3 \cdot 0,06 = 0,65 \text{ [€/m]}$$

Energiakustannukset saadaan laskettua kaavalla 4.

$$K_E = M \cdot E \cdot H_E [\text{€}/m]$$

$$K_E = 0,20 \text{ kg}/m \cdot 5,00 \text{ kWh}/h \cdot 0,053 \text{ €}/\text{kWh} = 0,05 [\text{€}/m]$$

Konekustannukset saadaan laskettua kaavalla 5.

$$K_K = \frac{M}{T} \cdot \frac{1}{e} \cdot H_{KT} [\text{€}/m]$$

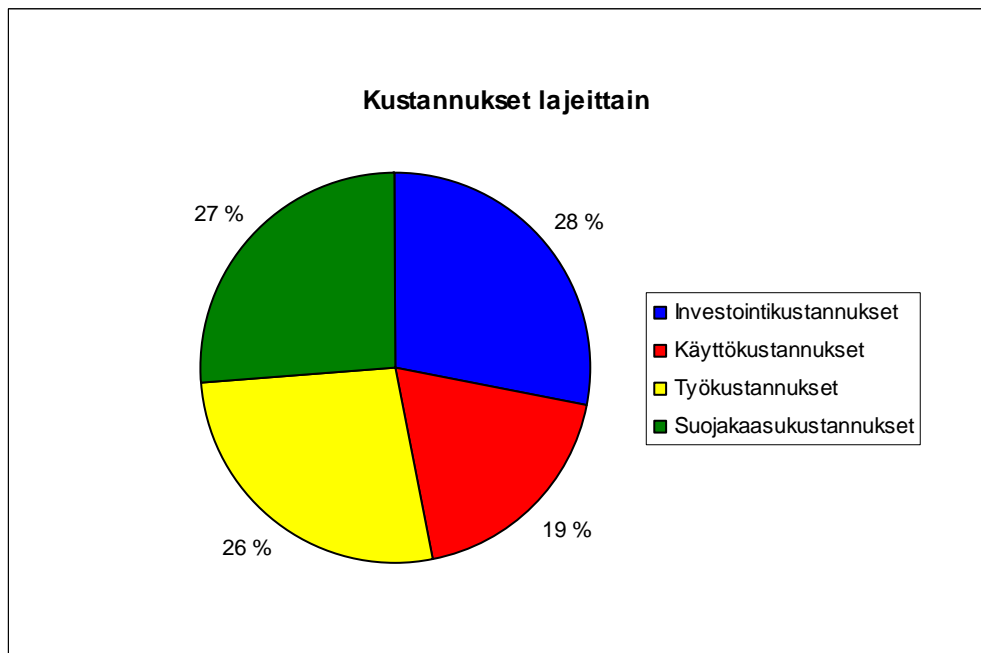
$$K_K = \frac{0,20 \text{ kg}/m}{6,40 \text{ kg}/h} \cdot \frac{1}{0,63} \cdot 7,66 \text{ €}/h = 0,30 [\text{€}/m]$$

TAULUKKO 5. Hitsausmenetelmien kustannuslaskelma

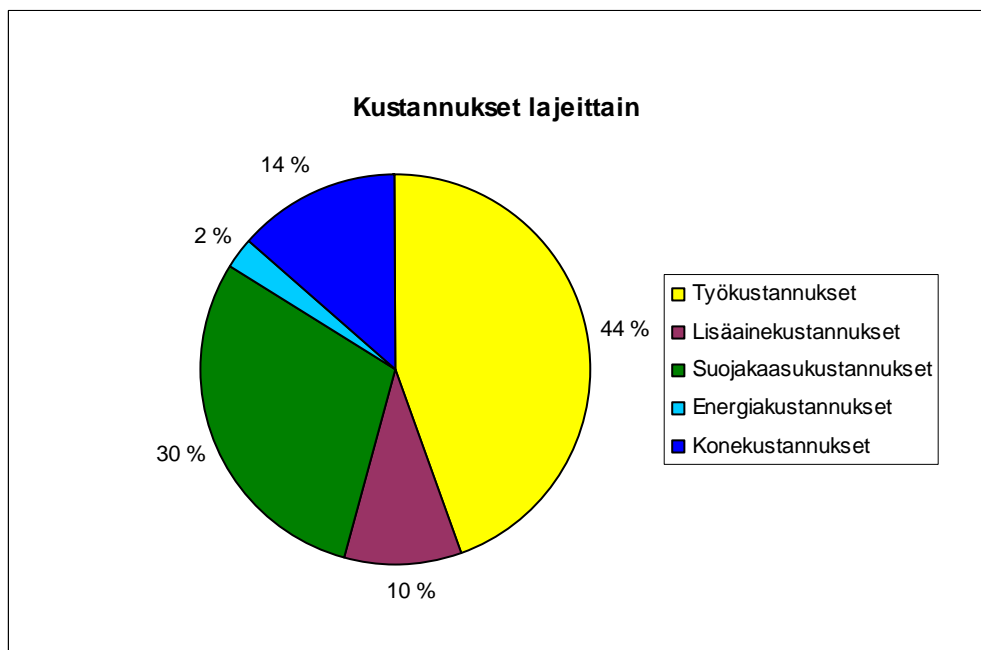
Kustannuslaskelma

	Laser	MIG
Investointikustannukset	26,56 €/h	Huomioitu konekustannuksissa
Käyttökustannukset	18,01 €/h	Huomioitu konekustannuksissa
Työkustannukset	25,00 €/h	0,98 €/m
Lisäainekustannukset	Ei ole	0,21 €/m
Suojakaasukustannukset	25,10 €/h	0,65 €/m
Energiakustannukset	Sisältyy käyttökuluihin	0,05 €/m
Konekustannukset	Sisältyy käyttökuluihin	0,30 €/m
Yhteensä	94,67 €/h	2,19 €/m

Kuvassa 18 havainnollistetaan laserhitsauksen kustannukset lajeittain prosentiosuuksina. Ympyrädiagrammi osoittaa, että investointikustannusten osuus on 28 %, käyttökustannusten osuus 19 %, työkustannusten osuus 26 % ja suoja-kaasukustannusten osuus 27 %. Kuva 19 vastaavasti osoittaa kustannukset MIG-hitsauksen osalta, jolloin työkustannusten osuus on 44 %, lisäainekustannusten osuus 10 %, suoja-kaasukustannusten osuus 30 %, energiakustannusten osuus 2 % ja konekustannusten osuus 14 %.



KUVA 18. Laserhitsaukset kustannukset lajeittain



KUVA 19. MIG-hitsauksen kustannukset lajeittain

Tiedetään MIG-hitsauksen hitsauskustannukset euroa per metri, mutta laserille tiedetään vasta hitsauskustannusten tuntihinta. Jotta menetelmät olisivat vertailukelpoisia, täytyy laserhitsauksen hitsauskustannukset euroa per metri selvittää. Hitsauskustannukset laserille saadaan laskettua kaavojen 10–11 avulla. Laserin hitsausnopeus on 200 mm/s ja MIG-hitsauksen 13,33 mm/s, joten hitsin tuotto tuntia kohden voidaan laskea. Laserin tuntihinnan ja hitsin tuoton avulla pystytään laskemaan hitsin hinta eli hitsauskustannukset euroa per metri. Kun lopulta tiedetään molempien menetelmien hitsauskustannukset (taulukko 6), pystytään laskemaan hitsauskustannukset kokoonpanolle (kuva 17).

Hitsausmatka tunnissa saadaan laskettua kaavalla 10.

$$s_{HI} = v_h \cdot e [m / h]$$

$$s_{HI} = 720m / h \cdot 0,8 = 576 [m / h]$$

$$s_{HI} = 47,98m / h \cdot 0,8 = 38,39 [m / h]$$

Hitsauskustannukset voidaan laskea kaavalla 11.

$$K_{HI} = H_{TU} / s_h [€ / m]$$

$$K_{HI} = \frac{94,67€ / h}{576m / h} = 0,16 [€ / m]$$

TAULUKKO 6. Laserhitsauksen ja MIG-hitsauksen hitsauskustannukset

Hitsauskustannukset	Laser	MIG
Hitsausmatka tunnissa (m/h)	576,00	38,39
Hitsausprosessin tuntihinta (€/h)	94,67	84,17
Hitsauskustannukset (€/m)	0,16	2,19

6.3 Tuotantokustannukset

Kotelorakenteen hitsausmatka on 13,32 metriä. Yhden kotelorakenteen kappalehinta voidaan laskea hitsauskustannusten avulla kaavalla 12.

$$H_{KA} = s_h \cdot H_{HI}$$

$$H_{KA} = 13,32m \cdot 0,16\text{€} / m = 2,19\text{€}$$

$$H_{KA} = 13,32m \cdot 2,19\text{€} / m = 29,21\text{€}$$

Laserhitsaus ja MIG-hitsaus saattavat vaatia erilaisen hitsausjigin. Toinen voi olla huomattavasti kalliimpi kuin toinen, mikä vaikuttaa lopullisiin kustannuksiin. Hitsausprosessissa voidaan käyttää myös esimerkiksi yhtä robottia, kahta robottia tai kahta robottia sekä pyörityspöytää. Erilaiset variaatiot hitsauskokoonpanossa vaikuttavat lopputulokseen.

Piensarjatuotannossa vuotuinen tuotantomäärä on 10–1 000 kappaletta vuodessa. Sarjamäärä vaikuttaa huomattavasti lopullisiin tuotantokustannuksiin. Piensarjatuotannon nopeutta ja kannattavuutta voidaan parantaa hyvällä layout-suunnittelulla.

TAULUKKO 7. Esimerkki tuotantokustannuksista hitsausprosesseille

Tuotantokustannukset	Lasert	MIG
Valmistustapa		
Hitsausmatka (m)	13,32	13,32
Hitsauskustannukset (€/m)	0,16	2,19
Kappaleen työhinta (€/kpl)	2,19	29,21
Sarjamäärä (kpl)	10,00	10,00
Hitsausjigi (€)	50,00	50,00
Yhteensä (€)	71,89	342,05

Jälkityöstö, kuten roiskeiden poisto ja kupujen hiominen, on työstettävälle kappaleelle suoritettava toimenpide hitsauksen jälkeen. MIG-hitsaus vaatii usein paljon jälkityöstöä, mikä nostaa osittain valmistuskustannuksia. Laserhitsauksesta saatava hitsi on siisti ja tasainen eikä se vaadi jälkityöstöä.

7 VERTAILU

Laserhitsaus on tulosten mukaan paljon edullisempi kuin kilpailijansa (taulukko 7). Vaikka laserhitsauksen investointikustannukset ovat moninkertaiset MIG-hitsaukseen verrattuna, sen hitsauskustannukset ovat alhaisemmat kuin MIG-hitsauksen, koska laser pystyy tuottamaan todella paljon enemmän hitsiä kuin mekanisoitu MIG-hitsaus. Mitä suurempi on sarjakoko, sitä kannattavampi laserhitsaus on kilpailijaansa nähden. Pitempi hitsausmatka on myös laserhitsauksen etuna.

Jos laserhitsauksen hitsausnopeus olisi puolet aiemmasta eli 100 mm/s, ja koneen hankintahinta ja kaasun hinta olisivat 20 prosenttia kalliimpia, nostaisi se laserhitsauksen hitsauskustannuksia merkittävästi. Taulukko 8 havainnollistaa tätä vertailua. Laser numero 2 on laskettu alennetulla hitsausnopeudella ja laser numero 3 alennetulla hitsausnopeudella ja korotetuilla hankintahinnoilla.

TAULUKKO 8. Vertailu on suoritettu laserhitsauksen korotetuilla arvoilla

Tuotantokustannukset	Laser (1)	Laser (2)	Laser (3)
Valmistustapa			
Hitsausmatka (m)	13,32	13,32	13,32
Hitsauskustannukset (€/m)	0,16	0,33	0,34
Kappaleen työhinta (€/kpl)	2,19	4,38	4,56
Sarjamäärä (kpl)	50,00	50,00	50,00
Hitsausjigi (€)	50,00	50,00	50,00
Yhteensä (€)	159,46	268,93	277,96

Laserhitsauksen hitsauskustannukset yli kaksinkertaistuivat alhaisemmalla hitsausnopeudella ja korotetulla laitteen sekä kaasun hankintahinnalla (taulukko 8). Eniten hintaa nostaa alennettu hitsausnopeus, koska se nostaa hitsauskustannukset kaksinkertaiseksi.

Laserhitsaus on huomattavasti halvempi kuin mekanisoitu MIG-hitsaus, vaikka hitsausnopeutta pienennettäisiin puolella ja kustannuksia nostettaisiin (taulukko 9). Hitsausjigin hinnannosto ei vaikuta merkittävästi laserhitsauksen kustannuksiin kilpailijaan verrattuna (taulukko 9, esimerkki 1). Sarjamäärä voi olla huomattavasti suurempi laserhitsauksessa ennen kuin kustannukset ovat samaa luokkaa (taulukko 9, esimerkki 3).

TAULUKKO 9. Tuotantovertailua

Tuotantokustannukset	Esim. 1	Esim. 1	Esim. 2	Esim. 2	Esim. 3	Esim. 3
	Laser (1)	MIG	Laser (3)	MIG	Laser (3)	MIG
Valmistustapa						
Hitsausmatka (m)	13,32	13,32	13,32	13,32	13,32	13,32
Hitsauskustannukset (€/m)	0,16	2,19	0,34	2,19	0,34	2,19
Kappaleen työhinta (€/kpl)	2,19	29,21	4,56	29,21	4,56	29,21
Sarjamäärä (kpl)	20,00	20,00	100,00	100,00	65,00	10,00
Hitsausjigi (€)	100,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Yhteensä (€)	143,79	634,10	505,92	2971,00	346,35	342,10

8 YHTEENVETO

Työssä selvitettiin laserhitsauksen kannattavuusedellytyksiä piensarjatuotantona tehtävälle ohutlevytuote kokoonpanolle. Laserhitsauksen kustannuksia verrattiin toiseen hitsausmenetelmään, jotta työn tilaaja pystyy selvityksen avulla toteamaan, onko laserhitsauksen käyttäminen kannattavaa esimerkiksi kyseisessä kokoonpanossa.

Laserhitsauksen käyttökuluista ja laserlaitteiston investointikustannuksista saatiin tietoa teollisten työstölaserien asiantuntijoilta. Kaasupullojen hinnat selvisivät kaasuyhtiön kautta. Näiden tietojen avulla oli mahdollista laskea laserhitsauksen hitsauskustannuksia ja tuotteelle toteutuvia tuotantokustannuksia. Mekanisoidun MIG-hitsauksen hitsausparametrit selvisivät internetistä saatavien hitsausuutisten ja opinnäytetöiden avulla, joiden avulla oli mahdollista laskea MIG-hitsauksen hitsauskustannukset. Työssä työstettävänä kokoonpanona oli kotelorakenne. Saatujen tulosten avulla oli mahdollista arvioida laserhitsauksen kannattavuutta piensarjatuotantona tehtävälle ohutlevytekokokoonpanolle ja mahdollisuus verrata sitä toiseen hitsausmenetelmään.

Laserhitsaus osoittautui halvemmaksi hitsausmenetelmäksi ylivoimaisen hitsausnopeuden ansiosta, mikä mahdollisti alhaiset hitsauskustannukset. Vaikka laserhitsauksen investointikustannukset ovat korkeat, sen käyttökustannukset ovat suhteellisen alhaiset. Laserhitsausprosessin kannattavuutta tutkittiin erilaisilla tuotantovariaatioilla, joissa sen lähtöarvoja muutettiin. Erilaisten tuotantovariaatioiden avulla oli mahdollista havaita hitsausmenetelmän kannattavuusedellytyksiä piensarjatuotannossa, kun tuloksia verrattiin mekanisoidun MIG-hitsauksen tuloksiin.

Laserhitsauksen käyttökustannukset voivat olla hyvinkin erilaisia eri tilanteissa, esimerkiksi hitsauskaasun käyttö voi vaihdella todella paljon, mikä vaikuttaa merkittävästi kustannuksiin. Kuluvien osien ja huollon kustannukset voivat vaihdella lasertyyppistä riippuen. Myös laserlaitteen valinnalla ja työstettävän kappaleen levyaihion paksuudella sekä materiaalilla olisi varmasti merkittävät vaiku-

tukset laserhitsauksen toteutuviin kustannuksiin, mutta tässä työssä ohutlevy-materiaali ja laserlaitteisto rajattiin tietyn tyyppisiin.

Tulevaisuudessa laserlaitteiden kehittymisen ansiosta ne voivat soveltua hyvin-kin uusiin toimintaympäristöihin. Kustannuksia voidaan saada vieläkin alhaisimmiksi tulevaisuudessa, joten laserhitsaus voi haastaa uusia liittämismenetelmiä, joita se ei ole aiemmin kyennyt haastamaan kovassa kustannuskilpailussa. Laserhitsaus on yksi merkittävimmistä hitausmenetelmistä nyt ja tulevaisuudessa ja tulee varmasti vielä kehittymään paljon.

LÄHTEET

1. Oulun Eteläisen instituutti. 2010. Saatavissa: <http://www oulu.fi/oeinst>. Hakupäivä 25.10.2010.
2. ELME Studio. 2011. Yleisesittely. Saatavissa: <http://www.elmestudio.fi/elmestudio.html>. Hakupäivä 18.1.2011
3. Kujanpää, Veli – Salminen, Antti – Vihinen, Jorma 2005. Lasertyöstö. Tampere: Tammer-Paino Oy.
4. Sirviö, Jani 2009. Hitsauksen lasersäteenlähteet tekniikan, nykytila ja kustannustaso. Oulu: Oulun seudun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
5. Vatsia, Juha 2011. Re: Opinnäytetyö. Sähköpostiviesti. 6.4.2011.
6. Väisänen, Tapio 2008. Hybridihitsaus diodilaserin ja kuitulaserin yhdistelmällä. Hämeenlinna: HAMK julkaisut. Saatavissa: http://portal.hamk.fi/portal/page/portal/HAMKJulkisetDokumentit/Yleisopalvelut/Julkaisupalvelut/Kirjat/tekniikka_liikenne/Hybridihitsaus_Diodilaserin_Ja_Kuitulaseri_Yhdistelmalla.pdf. Hakupäivä 2.11.2010.
7. Mäkikangas, Jarmo 2006. Lasertyöstö elektroniikan mekaniikan tuotannossa. Oulu: Oulun yliopisto, konetekniikan osasto. Diplomityö.
8. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, konetekniikan osasto. Saatavissa: <http://www.lut.fi/fi/technology/lutmechanical/research/laser/prosessit/laserhitsaus/sulattava/Sivut/Default.aspx>. Hakupäivä 27.10.2010.
9. Hovikorpi, Jari – Lahti, Kari 2006. Skannerilaserhitsaus. Hitsaustekniikka 1/2006.

10. Mäkikangas, Jarmo 2009. Maalipinnoitetun ohutlevyn liittäminen laserhitsauksella. Ohutlevy 2/2009. Saatavissa:
http://www.ohutlevy.com/pdf/Ohutlevy209_s18_20.pdf. Hakupäivä 13.12.2010.
11. Martikainen, Erkki 2008. Robotisoitu TIG-hitsaus. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, konetekniikan osasto. Kandidaatintyö. Saatavissa:
http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/37869/KANDI_ROBOTISOITU_TIG.pdf?sequence=1. Hakupäivä 15.12.2010.
12. Haula, Janne 2008. Kosketukseton railon seuranta kevytmekanisoidussa hitsauksessa. Satakunta: Satakunnan ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Insinöörityö. Saatavissa:
<https://publications.theseus.fi/handle/10024/690>. Hakupäivä 20.12.2010.
13. Pöysti, Tuomas – Tuurinkoski, Kaisa – Virtanen, Antti 2004. Laser metalliteollisuudessa. Oulu: Oulun yliopisto, konetekniikan osasto.
14. Rabb, Niklas 2010. Taajuusmuuttajan ohutlevyrungon eri liitostapojen vertailu. Vaasa: Vaasan ammattikorkeakoulu tekniikan ja liikenteen yksikkö, kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Insinöörityö. Saatavissa:
https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16531/Rabb_Niklas.pdf?sequence=1. Hakupäivä 31.1.2011.
15. Robinson, Dan 2009. Laser welding basics. Saatavissa:
<http://www.thefabricator.com/article/laserwelding/laser-welding-basics>. Hakupäivä 31.1.2011.
16. Jääskeläinen, Esa – Solehmainen, Kari – Tuunainen, Aku 2010. Uudet innovaatiot hitsausautomaatiossa. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu. Hit-Savonia II hankkeen loppuraportti. Saatavissa:
<http://portal.savonia.fi/pdf/julkaisutoiminta/hit2netversio.pdf>. Hakupäivä: 18.1.2011.

17. Lukkari, Juha 2006. Hitsausuutiset 1/2006. Helsinki: OY ESAB. Saatavissa: http://www.esab.com/fi/fi/news/upload/HU_1_06.pdf. Hakupäivä 18.1.2011.
18. Isokoski, Janne – Luostari, Kimmo 2010. Takalanan rungon robotisoidun hitsauksen kehittäminen. Ylivieska: Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Insinöörityö. Saatavissa: https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12879/luostari_isokoski.pdf?sequence=1. Hakupäivä 2.3.2011.
19. Lukkari, Juha 2008. Hitsausuutiset 1/2008. Helsinki: OY ESAB. Saatavissa: <http://www.esab.fi/fi/fi/news/upload/HU-1-08.pdf>. Hakupäivä 18.1.2011.
20. Kujanpää, Veli – Salminen, Antti 1998. Suuri tehoisen Nd:YAG-laserin käyttö konepajateollisuudessa. MET-julkaisuja 5/1998. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
21. Vatsia, Juha 2011. Re: Laserhitsauksen kustannukset. Sähköpostiviesti. 21.3.2011.
22. Honkanen, Jyrki 2011. Re: Kaasukustannukset. Sähköpostiviesti. 20.1.2011.