

Opinnäytetyö (AMK)
Kone- ja tuotantotekniikka
Koneautomaatio
2015

Mikko Pikanen

LAADUNVARMISTUS KUITULASERHITSAUKSESSA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka | Koneautomaatio

2015 | 40

Ohjaajat: Timo Vaskikari / Aki Piironen

Mikko Pikanen

LAADUNVARMISTUS KUITULASERHITSAUKSESSA

Tässä opinnäytetyössä käsitellään kuitulaserilla hitsattujen metallikappaleiden laadunvalvontaa, ja analysoidaan niissä esiintyviä hitsausvirheitä. Työ tehtiin Turun Koneteknologiakeskukselle. Työn tarkoituksena on selvittää 20 kappaleen koe-erässä esiintyviä virheitä ja niiden ehkäisykeinoja.

Koe-erän valvonta toteutettiin seuraamalla kappaleiden hitsausta, jonka jälkeen virheet dokumentoitiin kuvaamalla ja merkitsemällä ylös virheen laatu, vakavuus sekä mahdolliset korjaavat toimenpiteet.

Hitsauserän tuloksista saatiin hyvin viitteitä siitä, mikä käytettävässä laitteistossa altisti hitsatut kappaleet eri virheisiin. 20 kappaleen erästä vain 7 kappaletta oli täysin virheettömiä. Kappaleen taipuminen oli suurin ongelma, josta johtuvat hitsausvirheet voitaisiin ehkäistä monella tapaa, kuten railon seurannalla, paremmalla hitsauskiinnittimellä tai optiikan vaaputuksella. Kyseiset lisäinvestoinnit toisivat prosessia luotettavammaksi suurempia tuotantoeräiä ajatellen.

ASIASANAT:

Hitsaus, Hitsauslaitteet, Lasertekniikka, Robotiikka, Robotit.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering | Machine Automation

2015 | 40

Instructors: Timo Vaskikari / Aki Piironen

Mikko Pikanen

QUALITY CONTROL IN FIBER LASER WELDING

This thesis deals with the quality control of metal components welded using a fiber laser and focuses on analyzing the aberrations that occur during the welding process. The study was conducted in Machine Technology Center Turku Ltd, with the aim of discovering the welding anomalies present in the 20- piece sample pool, and focusing on finding out the ways to prevent such errors in the process.

The monitoring of the samples was done by observing the welding process, after which the aberrations were documented by photography, and by writing down the nature, severity and possible ways to prevent said anomalies.

The analysis of the sample pool gave good data on what caused which kind of mistake, how to prevent them in the future, and what further investments on the welding system would make the process more reliable when looking at larger quantities manufactured.

KEYWORDS:

Welding, Welding apparatus, Laser technology, Robotics, Robots.

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	6
2 LASER	7
2.1 Lasersäteen ominaisuudet	8
2.2 Tahtuminen	8
2.3 Heijastuminen ja absorptio	9
2.4 Aallonpituus	11
3 LASERTYYPIT	12
3.1 CO ₂ - ja Nd:YAG-laser	12
3.2 Kuitu- ja Kiekkolaser	13
3.3 Diodilaser	15
4 LASERHITSAUS	16
4.1 Hitsausmenetelmät	16
4.2 Hitsausparametrit	18
4.3 Prosessia helpottavat lisälaitteet	19
5 LAADUNVARMISTUS LASERHITSAUKSESSA	22
5.1 Laadunvarmistuksen erot laser- ja kaarihitsauksessa	22
5.2 Hitsausvirheet	23
5.3 Liitos- ja railovaatimukset	24
5.4 Hitsauslaitteiston vaikutus laadunvarmistuksessa	26
5.5 Osavalmistuksesta aiheutuvat valmistusvirheet	27
6 KOEJÄRJESTELYT	29
6.1 Laitteisto	29
6.2 Materiaali	31
6.3 Valvontamenetelmät	31
7 TULOKSET	33
8 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	35

LÄHTEET

37

LIITTEET

38

LIITTEET

Liite 1. Koe-erän Tulokset

1 JOHDANTO

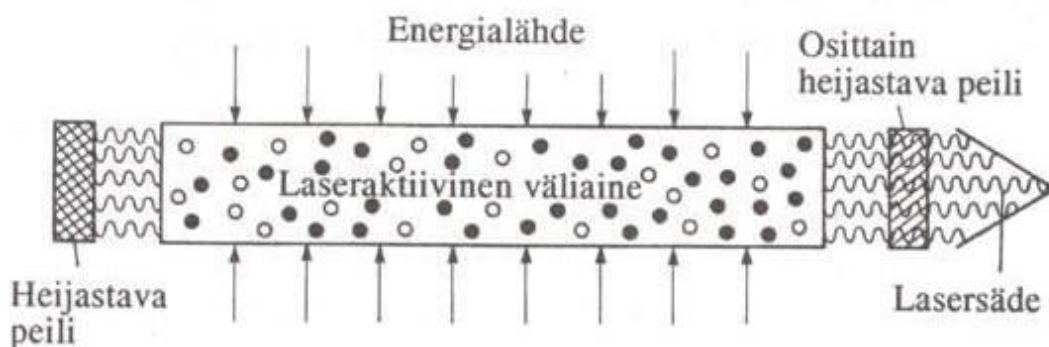
Opinnäytetyön tavoitteena oli suorittaa laadunvarmistusta kuitulaserhitsauksessa. Työ tehtiin Turun Koneteknologiakeskukselle. Tarkoituksena oli selvittää, mistä hitsauksessa mahdollisesti ilmenevät virheet johtuivat ja miten niitä olisi voinut ehkäistä. Työn ohessa hitsattiin 20 kappaleen koe-erä, josta tehtiin arviointitaulukko työn jäljen seuraamisen helpottamiseksi.

Työn teoriaosuudessa käsitellään laserhitsauksen perusasioita ja esitellään eri laserhitsauslaitteistoja. Lisäksi käsitellään asioita jotka vaikuttavat laadunvarmistukseen sekä kappaleessa että hitsauslaitteistoissa.

Käytännön osuudessa käydään läpi koehitsauserästä saadut tulokset, esitellään hitsauksessa käytetty laitteisto ja tutustutaan laadunvarmistuksessa käytettyihin valvontamenetelmiin.

2 LASER

Laser on lyhenne sanoista Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation, toisin sanoen valoa, joka on vahvistettu stimuloitujen emissioiden avulla. Kaikki laserit ovat optisia vahvistimia, joissa on aina kolme komponenttia: Laseroiva väliaine, neste, kaasu tai kiinteä. Laser vaatii myös kaksi peiliä, joista ainakin toinen osittain läpäisevä, sillä laserointi tapahtuu peilien välissä. Laseroinnissa käytettävä pumppausenergia, (sähkö- tai valoenergia) virittää laseroivien atomien elektroneja korkeammalle energiatasolle, josta alemmalle tasolle palatessaan ne lähettävät vakioaallonpituuksista valoa. (Steen & Mazumder 2010, 12.) Lasersäteen muodostumisprosessi kuvattu kuvassa 1.



Kuva 1. Lasersäteen muodostumisen periaate (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 35).

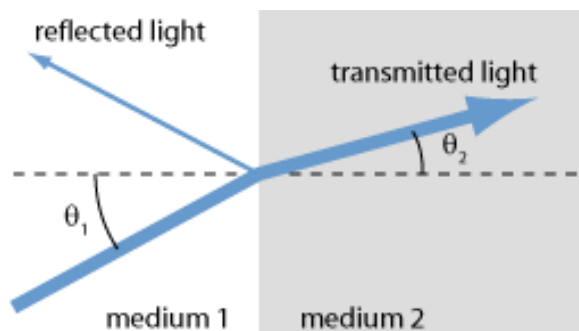
Lasertyöstössä käytetyltä laserilta vaaditaan ominaisuuksia, kuten suuri tehotehys, millä voidaan sulattaa tai höyryttää materiaaleja, toinen tärkeä parametri on laserin aallonpituus. Hyvin suuri tehointensiteetti saavutetaan pienen polttopisteen avulla, joka mahdollistaa laserin käytön leikkauksessa, hitsauksessa, merkkauksessa ja pintakäsittelyssä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 34.)

2.1 Lasersäteen ominaisuudet

Laserein valo on kollimoitua, koherenttia ja monokromaattista. Lasersäde voidaan fokusoida hyvin pieneksi pisteeksi, koska se on koherenttia, eli säteet ovat samassa vaiheessa. Laserein tuottama valo on monokromaattista, toisin sanoen se sisältää vain yhtä aallonpituutta, aallonpituudesta johtuen monokromaattinen valo koostuu vain yhdestä väristä. Lasersäteessä kaikki valo on yhdensuuntaista eli kollimoitua. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 35.)

2.2 Taittuminen

Valon taittuminen tarkoittaa kulkusuunnan muutosta materiaalien tai materiaalin ja ilman rajapinnalla. Taittuminen noudattaa valo-opin taittumislakia seuraavan kaavan mukaan: $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \eta$, jossa θ_1 on valonsäteen tulokulma, θ_2 on valonsäteiden lähtökulma ja η materiaalien välinen taitekerroin. Jos valo saapuu optisesti harvemmasta aineesta optisesti tiheämpään aineeseen, valon taitekulma on tulokulmaa pienempi. Jos valonsäde saapuu optisesti tiheämmästä aineesta optisesti harvempaan, on mahdollista, että tapahtuu kokonaisheijastuminen, eli valo ei taitu lainkaan, taittumis- ja heijastumiskulmat havainnollistettu kuvassa 2. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 38.)



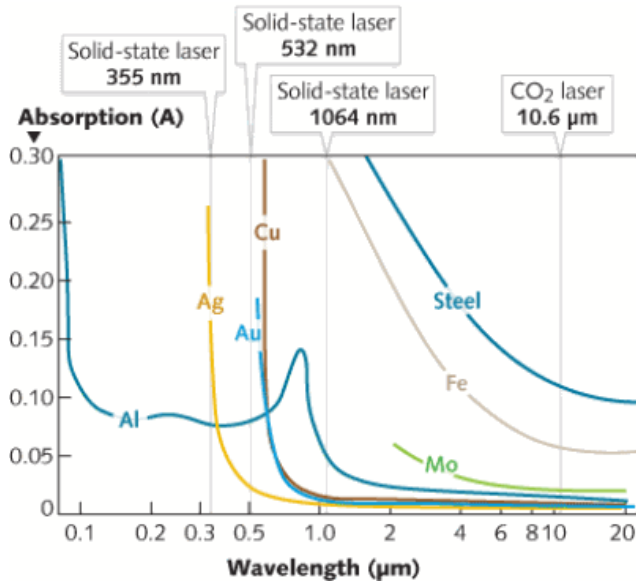
Kuva 2. Valon taittuminen ja heijastuminen (RP Photonics 2014. Refraction).

2.3 Heijastuminen ja absorptio

Valon kohdatessa kappaleen pinnan osa siitä heijastuu. Heijastumisella tarkoitetaan aaltoliikkeen kahden eri olomuotoalueen, faasin, rajapinnalla tapahtuvaa vuorovaikutusta, jossa aalto muuttaa suuntaansa ja jatkaa liikettään samassa faasissa. Heijastumisessa, kuten taittumisessa, tärkeässä osassa ovat valonsäteiden kulmat, eli tulokulma ja heijastuskulma. Tulokulma on kulma, jossa valonsäde saapuu kappaleen pintaan pinnan normaalin suhteen. Heijastuskulma taas on heijastuneen valonsäteiden ja heijastaneen kappaleen normaalin välinen kulma. Heijastuslain mukaan heijastuskulma on yhtä suuri kuin tulokulma materiaalista riippumatta. Tulo- ja heijastussäteet ovat samassa normaalin suuntaisessa tasossa, eli tulotasossa. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 44.)

Valon osuessa materiaaliin osa siitä taittuu materiaalin sisään ja kulkee sen läpi, tai absorboituu materiaaliin, jolloin materiaali ottaa vastaan valon kuljettaman energian. Prosessi kääntyy kaavaksi seuraavanlaisesti: $R+A+T=100\%$, kaavassa R on heijastunut teho, A on absorboitunut teho ja T on läpikulkeneen tehon osuus. Laservalon aallonpituuksille on olemassa läpinäkymättömiä materiaaleja, joissa läpikulkeneen tehon T osuus on 0 %. Näitä ovat esimerkiksi metallit. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 44.)

Materiaalin läpäisevyys eri aallonpituuksille on vaihteleva ominaisuus, jota on vaikea arvioida, sillä näkyvän valon läpäisevyys on eri asia kuin laserin läpäisevyys. Esimerkkinä läpäisevyyksien erosta voidaan käyttää hiilidioksidilaseria, joka absorboituu näkyvälle valolle läpinäkyviin materiaaleihin, kuten lasiin. Samasta syystä hiilidioksidilaser ei läpäise tavallisia silmä- tai suojalaseja, verraten esimerkiksi diodilaseriin, joka läpäisee tavalliset suojalaseit täysin. Absorptioon vaikuttavat useat eri ominaisuudet, kuten materiaali, lämpötila, aallonpituus ja absorboivan pinnan laatu, kuten alla olevasta absorptiotaulukosta nähdään. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 45.)

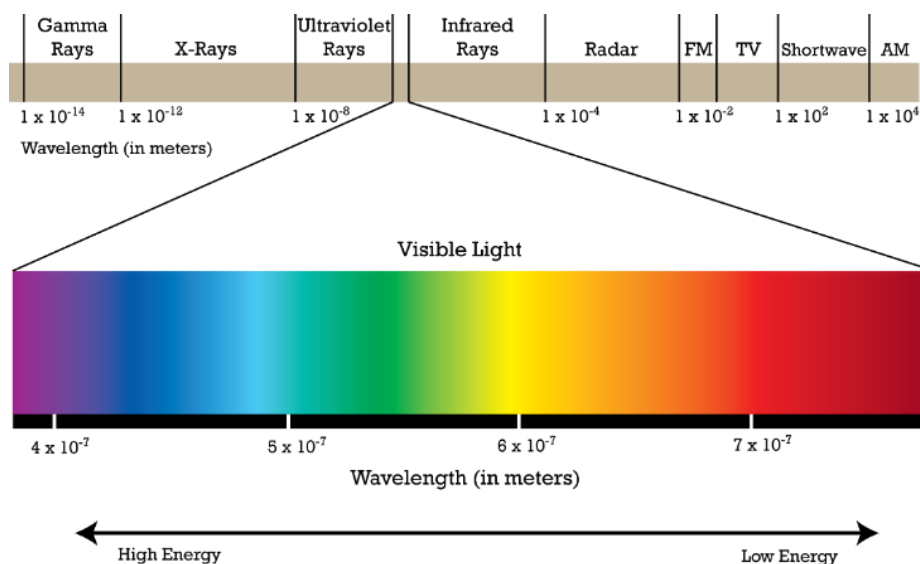


Kuva 3. Aallonpituuden ja materiaalin vaikutus absorptioon (Laserfocusworld 2014. Absorption).

Metallien absorptio on melko alhainen kaikilla aallonpituuksilla. Kuitenkin pienikin absorptio riittää lämpötilan nostoon, kun materiaalia lämmitetään fokusoidulla lasersäteellä. Lämpötilan noustessa myös absorptio kasvaa voimakkaasti ja aiheuttaa materiaalin kuumenemisen, sulamisen ja höyrystymisen, mikä käytännössä mahdollistaa materiaalin työstämisen laserilla. Toinen vaikuttava tekijä lasertyöstössä on lasersäteen intensiteetti, eli tehotiheys. Eritehoisilla lasereilla voidaan saavuttaa sama tehotiheys, isolla teholla isolla laserin pisteellä tai pienellä teholla hyvin pieneksi fokusoidulla pisteellä. (Kujanpää, Salminen & Vihiinen 2005, 45.)

2.4 Aallonpituus

Valo on energiasäteilyä, jonka ihminen näkee. Päivänvaloa kutsutaan myös valkoiseksi valoksi, koska siinä on kaikkia näkyviä valon aallonpituuksia eikä mikään väri näy muita vahvempana. Näkyvä valo koostuu useasta aallonpituudesta, joilla kaikilla on oma värinsä. Tätä värijoukkoa kutsutaan spektriä, ja näkyvä valo on vain pieni osa laajempaa elektromagneettista spektriä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 40.)



Kuva 4. Elektromagneettinen spektri (Pion 2014. Electromagnetic spectrum).

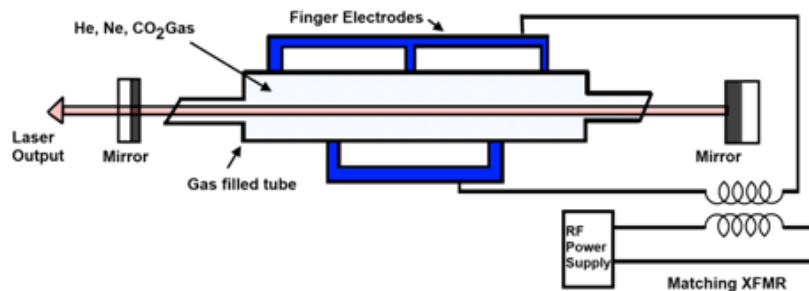
Näkyvän valon ulkopuolella ovat aallonpituudet, kuten infrapuna, ultravioletti, röntgen, mikroaallot ja radioaallot. Näitä ihmisen silmälle näkymättömiä säteilyjä voidaan havaita mittalaitteilla, kuten pyrometrillä. Suurin osa lasereista toimii infrapuna-alueella. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 41.)

3 LASERTYYPIT

Teknologiassa käytettävistä suuritehoisista työstölaseista tärkeimpiä ovat CO₂, Nd:YAG, kuitulaser, kiekkolaser ja diodilaser. Suuritehoisimmat työstölaserit toimivat infrapuna-alueella, toisin sanoen näkyvää valoa suuremmalla aallonpituudella. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 54.) Tällä hetkellä teollisesti merkittävät työstölaserit ovat kuituvälitteiset laserit, kuten kuitu- ja kiekkolaser, joiden yleistyttyä Nd:YAG on poistunut käytöstä. CO₂ laseria käytetään vielä esimerkiksi leikkaavissa tasokoneissa ja uusia CO₂ lasereita ostetaan vielä uutena, mutta niiden osuudet lasermarkkinoista pienenevät kokoajan. Lasertyössä tällä hetkellä yleisten kuitu- ja kiekkolaserien rinnalle ovat nousemassa myös suorat diodilaserit.

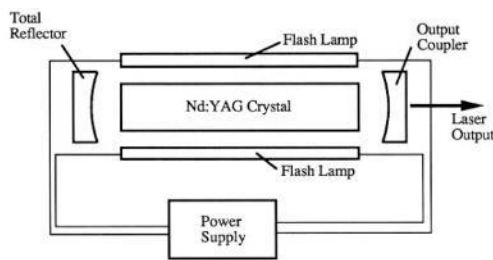
3.1 CO₂- ja Nd:YAG-Laser

CO₂ eli hiilidioksidilaser ja Nd:YAG eli neodyymikidelaser olivat ensimmäisiä yleisesti käytettyjä työstölaseereita. CO₂ laser on kaasulaser, joka käyttää laseroivan hiilidioksidikaasun lisäksi typpeä ja heliumia kaasuseoksessaan. Kaasuseoksessa typpi toimii eräänlaisena herättäjänä ja avustaa sähköisen energian siirtoa CO₂ –molekyylisiin ja heliumin tehtävä seoksessa on toimia jäähdyttäjänä. Tyypillinen CO₂ laserseos sisältää 60–85 % heliumia, 1–9 % hiilidioksidia ja 13–35 % typpeä. Hiilidioksidilaserin hyötysuhde on alhainen, vain 5–20 %, laserin hyötysuhteella tarkoitetaan säteen tehon suhdetta sen synnyttämiseen tarvittavaan sähkötehoon. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 54.)



Kuva 5. CO₂ laser suljetulla resonaattorilla (CO₂ Laser 2014).

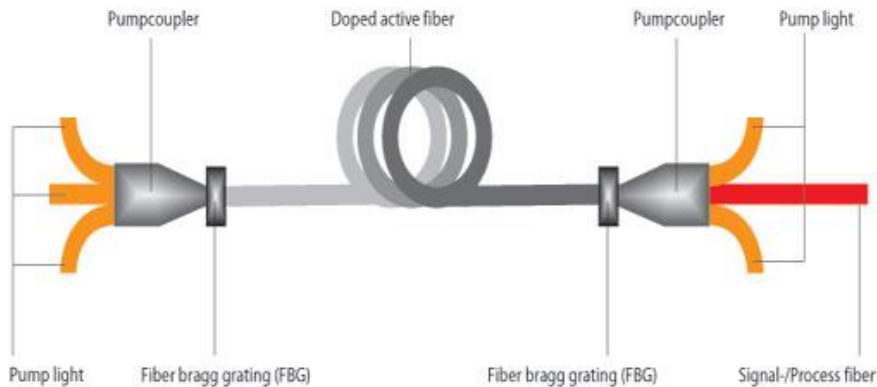
Nd:YAG-laser, eli neodyymikidelaser on kiinteä laser, eli laservalo syntyy kiinteässä neodyymikiteessä. Tangon muotoinen kide on yleensä sijoitettu kahden elliptisen heijastimen yhteiselle optiselle akselille. Kuitu- ja kiekkolaser ovat korvanneet vanhat Nd:YAG-laserit lähes kokonaan, syynä tähän on esimerkiksi Nd:YAG-laserin huono, vain 2–3 %:n hyötysuhde. (Kujanpää, Salminen & Vihi- nen 2005, 58.)



Kuva 6. Nd:YAG-laserin toimintaperiaate (YAG Laser Machining Of Materials 2014).

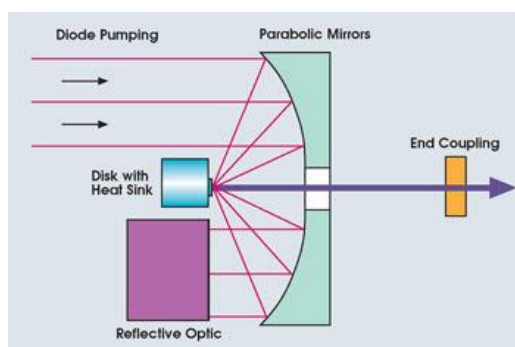
3.2 Kuitu- ja kiekko-Laser

CO₂- ja Nd:YAG-laserit saivat molemmat alkunsa jo 60-luvulla, myöhemmin Nd:YAG-laser on kehittynyt nykyään käytettyihin kuitu- ja kiekko- lasereihin. Kuitulaserissa säde synnytetään suoraan optisen kuidun sisään. Kuidun ydin on seos laseroivaa väliainetta, jota pumpataan diodilaserin valolla, kuitu itsessään muodostaa resonaattorin. Kuitulaserin ydin voidaan tehdä pieneksi, minkä ansiosta syntyneen säteen halkaisija on myös pieni ja säteenlaadultaan erittäin hyvä. Kuitulaserin modulaarisen rakenteen takia sillä saavutetaan suuri teho yhdistämällä useita, tyypillisesti 800–1000 W:n moduuleja toisiinsa. Tällä hetkellä suuritehoisin kuitulaser on 100 kW, mutta tyypilliset kuitulaserit ovat 2–6 kW:n tehoisia. (Kujanpää, Salminen & Vihi- nen 2005, 68.)



Kuva 7. Kuitulaserin toimintaperiaate (Rofin 2014).

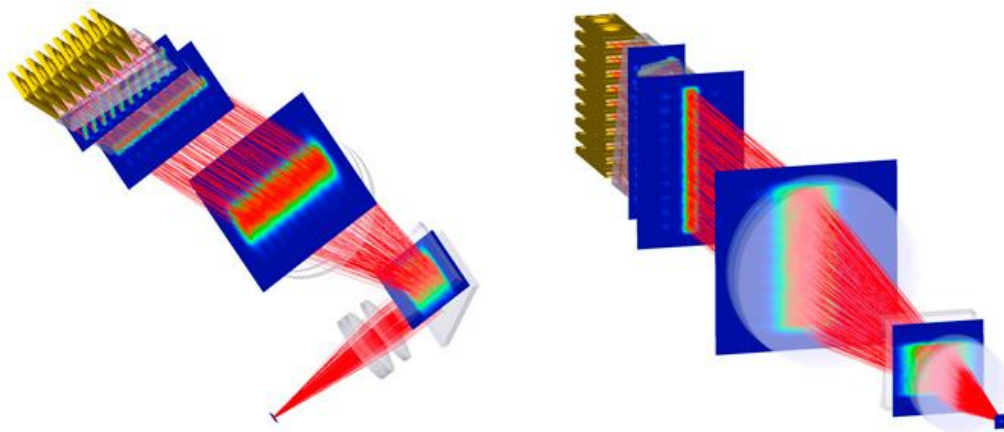
Kiekkolaser on Nd:YAG-laserin tapaan kidelaser, kiekkolaserissa käytetään ohutta kiekomaista kidettä. Kide on kiinnitetty lämmönvaihtimeen jäähdytyksen tasaamiseksi, ja sitä pumpataan diodilaserilla. Laserin säde ohjataan kiekon pintaan, säde heijastuu pinnasta ja se ohjataan osumaan kiteen pintaan useita kertoja. Kiekkolaserin säde on huomattavasti parempi laatuinen kuin tavallisen kidelaserin, koska se lämpiää tasaisesti. Kide on juotettu suureen kuparialustaan, joka jäähdytetään vedellä, tehokas jäähdytys parantaa myös säteen laatua entisestään. Toisin kuin muissa kidelasereissa, kiekkolasereissa käytetään yleensä ytterbium-pohjaista kidettä. Yksi kiekkolaserin eduista on sen sarjaan kytkettävyys. Kytkemällä kiekkolaserit sarjaan sen tehoa saadaan nostettua säteenlaadusta tinkimättä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 64.)



Kuva 8. Kiekkolaserin toimintaperiaate (RP Photonics 2014. Disc Laser).

3.3 Diodilaser

Diodilaserin kehitys alkoi jo 70-luvulla, mutta työstölaserina sitä alettiin käyttää vasta 2000-luvulla. Diodilaserin etuja ovat alhainen hinta, sekä huomattavan hyvä, jopa 50 prosentin hyötysuhde. Suuritehoiset suorat diodilaserit poikkeavat muista työstölasereista koostumuksellaan, diodilaser koostuu lukuisista pienistä 1-2 W:n diodeista, laserointi tapahtuu näiden diodien kiillotettujen pintojen välillä. Diodit kootaan noin 20 kappaleen nippuihin, joista tulee kapea valo, joka koostuu nipun diodeista tulevista säteistä. (Laserline 2014. Beam Source.)



Kuva 9. Diodipakasta lähtevän laserin ohjaaminen yhdeksi säteeksi (Laserline 2014. Beam Source).

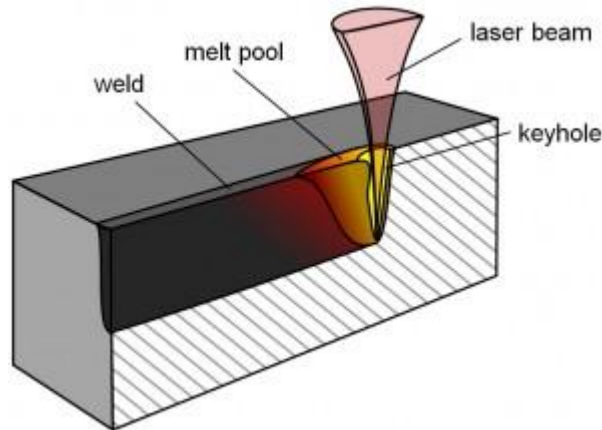
Jotta diodilaserin sädettä voidaan kollimoida, nippuun asennetaan mikrolinssi. Laserin tehoa nostetaan liittämällä lasernippuja 30–40 päällekkäin, jolloin saadaan moduuli, jota kutsutaan pakaksi. Pakan koko sekä pakan sisällä olevien nippujen koko vaihtelee vaadittavan säteenlaadun ja tehon mukaan. Suorien diodilasereiden modulaarisuuden takia, laserin tehoa voidaan nostaa myös liittämällä järjestelmään lisää diodipakkoja. (Jay Liebowitz 2014.)

4 LASERHITSAUS

Laserhitsaus perustuu lasersäteeseen, ja siinä käytetään yleensä valon infrapuna-aaltoaluetta, mutta myös muita aallonpituuksia voidaan käyttää muovien ja joidenkin metallien hitsauksessa. Esimerkiksi kuparin hitsauksessa on käytetty lyhyemmän aallonpituuden vihirlaseria. Materiaalinpaksuudeltaan 0,5–12 mm:n metallilevyjä hitsataan tyypillisesti alle 16 kW:n teholla, mutta tehokkaampia ratkaisuja on tarvittaessa saatavilla. Laserhitsauksella saadaan aikaan kapea sauma ja alhaisen lämmöntuoton takia aiheuttaa vain pieniä muodonmuutoksia hitsattavissa kappaleissa. (Sähköpostihaastattelu, 25.9.2014, Aki Piironen, Koneteknologiakeskus Turku Oy.)

4.1 Hitsausmenetelmät

Laserhitsauksessa voidaan käyttää useita eri hitsausmenetelmiä, riippuen hitsattavasta kappaleesta ja käytössä olevasta laitteistosta. Avaimenreikähitsaus, eli syvätunkeumahitsaus on konepajoissa yleisesti käytettävä laserhitsausmenetelmä. Lasersäde fokusoidaan työstettävän kappaleen pinnalle, tai noin 25 % aineenpaksuudesta pinnan alapuolelle. Säteen suuren tehotiheyden ansiosta materiaaliin muodostuu avoin reikä, jonka syvyys riippuu asetetuista parametreista. Sädetä kuljetetaan liitoksen suuntaisesti, jolloin säteen muodostaman reiän edetessä materiaalissa reiän eteen muodostuva sula kulkeutuu reiän taakseen. Reiän takana sula jähmettyy ja muodostaa hitsin. (Kujanpää, Salmi-
nen & Vihinen 2005, 158.)



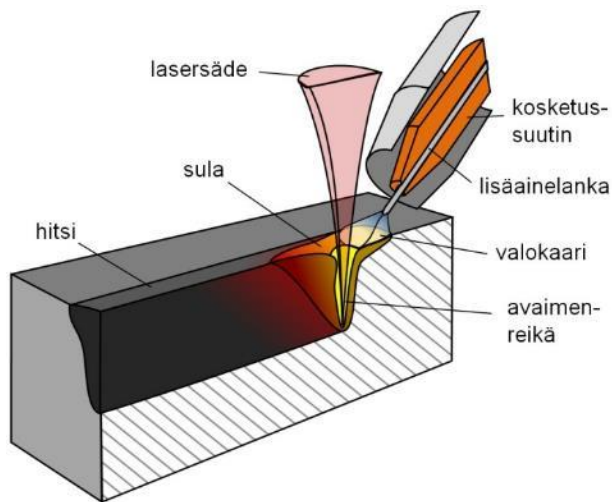
Kuva 10. Avaimenreikähitsaus (Ionix Oy 2014. Laser Welding).

Avaimenreikähitsaus edellyttää vähintään 1 MW/cm^2 :n rajatehotiheyden saavuttamisen, mikäli laserteho on pieni, tai polttopiste liian suuri, kriittistä tehotiheyttä ei saavuteta. Pienellä tehotiheydellä voidaan myös hitsata, mutta prosessi on sulattava. Sulattava hitsaus muistuttaa kaarihitsausta, lasersäde kuumentaa materiaalin pinnan, ja lämpö siirtyy materiaalin sisällä johtumalla ja sekoituksen avulla sulattaen sitä. Prosessi tuottaa matalamman ja leveämmän hitsin kuin avaimenreikähitsaus, mutta sillä on lievemmat railotoleranssit. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 159.)

Avaimenreikä- tai sulattava hitsaus voi olla myös lisäaineellista, lisäainelanka syötetään sulaan hitsaussuuntaan verrattuna edestä päin, jolloin laser sulattaa langan railon sisällä. Lisäaineen käytöllä voidaan täyttää leveitä ilmarakoja lisäaineettomaan verrattuna, eikä prosessi ole yhtä herkkä liitoksen asetusvirheille. Lisäaineellisen laserhitsauksen lievempien railovaatimusten haittapuolena on prosessin edellyttämä suurempi lämmöntuonti. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 161.)

Laserhitsaus voidaan myös yhdistää kaarihitsaukseen, hitsausmenetelmää jossa laser ja kaarihitsaus, esimerkiksi MIG tai TIG yhdistyvät kutsutaan hybridihitsaukseksi (kuva 11). Hybridihitsauksessa lasersäde ja valokaari muodostavat yhteisen hitsisulan, hybridihitsauksessa lasersäde toimii usein ensisijaisena lämmönlähteenä mahdollistaen syvän tunkeuman, kun taas valokaari toimii

toissijaisena lämmönlähteenä parantaen prosessin vakautta, luotettavuutta ja tehokkuutta, sekä nostaa hitsin laatua. (Ionix Oy 2014. Hybridihitsaus.)



Kuva 11. Hybridihitsaus (Ionix Oy 2014. Hybridihitsaus).

4.2 Hitsausparametrit

Laserhitsauksen perusparametrit jakaantuvat laserparametreihin, jotka ovat laserhitsaus laitteisto kohtaisia, sekä prosessiparametreihin, joihin kuuluvat hitsauksen aikana säädettävät, prosessin sujuvuuteen vaikuttavat parametrit.

Laserparametreihin kuuluvat polarisaatio, moodi, säteen halkaisija, divergenssi ja säteen laatu. Tyypillisesti nämä sädeparametrit ovat laserhitsauslaitteisto kohtaisia, eikä niitä muuteta hitsauksen aikana, vaan ne pyritään pitämään hyväksi havaituissa arvoissa. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 164.)

Lasersäde on valoenergiaa, jolla on tietty polarisaatio, polarisaatiolla tarkoitetaan säteen aaltoliikkeen muotoa. Säde voi olla esimerkiksi ympyräpolarisoitunut, lineaarisesti polarisoitunut tai elliptisesti polarisoitunut. Lasersäteen intensiteetti ei ole tasainen säteen poikkileikkauksessa. Tehon jakaumaa kutsutaan moodiksi. Suurin hitsausnopeus tietyllä teholla ja tunkeumalla saadaan moodilla, jolla on paras fokuositavuus, siinä teho on keskitetty poikkileikkauksen keskelle. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 164.)

Divergenssillä tarkoitetaan lasersäteen poikkipinta-alan kasvua laserresonaattorista pois päin. Divergenssin vaikutus hitsausprosessiin liittyy polttopisteen koon, polttopisteen koon muutos aiheuttaa hitsausprosessissa tehotiheyden muutosta ja saattaa aiheuttaa tunkeuman syvyyden laskua. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 165.)

Prosessiparametreista olennaisimmat ovat hitsausnopeus ja laserteho. Laserin tehoa tarkasteltaessa on erotettava ulostuloteho ja teho työkappaleen pinnalla. Lasertehon kasvaessa tunkeuman syvyys kasvaa, tunkeuman syvyys ei kuitenkaan ole suoraan verrannollinen lasertehoon, muut prosessiparametrit sekä käytetty lasertyyppi aiheuttavat myös eroja tunkeuman syvyydessä. Hyvälaatuisella säteellä voidaan saada moninkertaisesti syvempi tunkeuma, kuin huonolaatuisella säteellä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 165.)

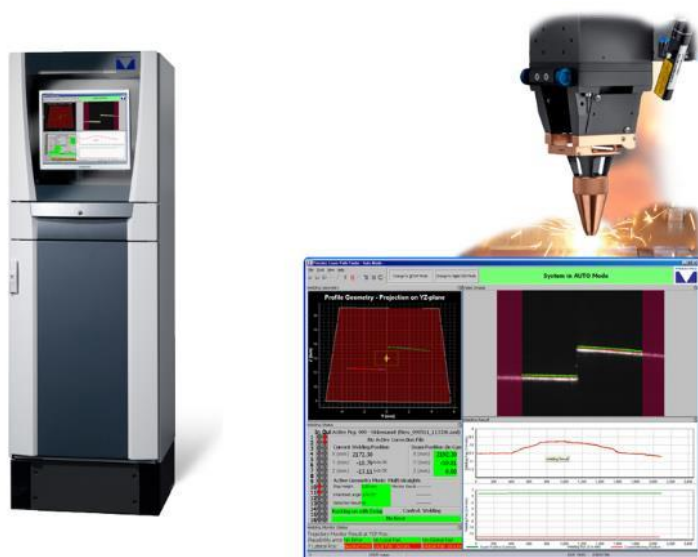
Tunkeuman syvyyteen vaikuttaa myös hitsausnopeus, vakioteholla tunkeuman syvyys pienenee nopeuden kasvaessa. Hitsausnopeus vaikuttaa myös hitsin leveyteen. Kasvava leveys merkitsee sitä, että nopeutta tulee vähentää, eli maksiminopeutta ei voida käyttää. Hitsausnopeutta voidaan muuttaa muiden parametrien avulla ja yleensä vaaditaan useita eri kokeita ennen kuin optimaalinen kombinaatio parametrien välillä löytyy. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 166.)

4.3 Prosessia Helpottavat Lisälaitteet

Laserhitsaukseen on saatavilla erilaisia lisälaitteita, laitteilla voidaan paikata joitain laserin heikkouksia, tai helpottaa käyttöä. Erilaisia lisälaitteita on saatavilla esimerkiksi optiseen prosessinseurantaan.

Yksi optisen prosessinseurannan käyttökohde on railon seuranta, eli LPF, LPF tunnistaa liitettävien kappaleiden asennon ja seuraa automaattisesti kappaleiden saumaa. Lisäaineettomassa laserhitsauksessa säteen asento saumaan nähden on tärkeää, sillä pienikin säteen paikan muutos saattaa aiheuttaa reiän

hitsaussaumassa, LPF järjestelmä varmistaa, että näin ei tapahdu. (Precitec Oy 2014.)



Kuva 12. LPF seurantajärjestelmä (Precitec Oy 2014).

Railon seurannan lisäksi on kehitelty muita tapoja lisääaineettoman laserhitsauksen saumojen varmistamiseksi. Precitec Groupiin kehittämä Scan Tracker - hitsausoptiikka mahdollistaa laserin sauman kasvattamisen niin sanotulla laser-säteen vaaputtamisella, eli säteen nopealla pyörittämisellä. Tämä mahdollistaa leveämmän railon hitsauksen ja eliminoi railon epätasaisuudesta johtuvat hitsausvirheet. Scan Tracker voidaan yhdistää myös railon seuranta kameraan ja osaa muuttaa vaaputuksen keskipistettä railon mukaan sekä kaventaa tai levenittää vaaputusta railon koon mukaan. (Precitec Oy 2014.)



Kuva 13. Scan Tracker hitsausoptiikka (Precitec Oy 2014).

Näiden sovelluksien lisäksi on saatavilla myös muita laitteita hitsausseaman laadun takaamiseksi, kuten järjestelmä joka monitoroi hitsausparametrien muutoksia, eroavaisuuksia saumassa ja liitosongelmia. Järjestelmä käyttää valvonnassa apuna referenssiarvoja plasmasta, metallihöyryn tai lasersäteiden lämpötilasta ja vertaa niitä muihin ohjearvoihin. Suuri osa näistä sovelluksista perustuu sauman pitävyyden takaamiseen joko prosessiin vaikuttamalla, tai sitä valvomalla. (Precitec Oy 2014.)

5 LAADUNVARMISTUS LASERHITSAUKSESSA

Laadunvalvontaan käytettävät toimenpiteet koostuvat tekijöistä ennen työstöä, työstön aikana ja työstön jälkeen. Hyvälle laserhitsille on tyypillistä kapea ja tasainen hitsi ja juuripalko. Mikäli laserhitsauksessa on ongelmia, silmämääräisessä tarkastelussa voidaan havaita monenlaisia virheitä, kuten läpipalaminen, vajaa tunkeuma, epätasainen hitsin kupu ja reunahaava. Virheet voivat johtua epäsuorista liitospinnoista, väärin säädetyistä hitsausparametreista tai liian suuresta ilmaraosta. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 313.)

5.1 Laadunvarmistuksen erot laser- ja kaarihitsauksessa

Laserhitsit ovat yleisesti kaarihitsejä huomattavasti kapeampia, vastaavasti myös hitsausvirheet ovat pienempiä. Siksi virheiden havaitseminen on vaikeampaa, tämä edellyttää NDT-tarkastukselta, eli rikkomattomalta tarkastukselta, erityistä tarkkuutta ja luotettavuutta. Hitsit ja niiden paikat on suunniteltava niin, että ne voidaan tarvittaessa tarkastaa riittävän helposti vaadituilla tarkastusmenetelmillä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 315.)

Laserhitsauksen laadunvarmistusta vaikeuttaa esimerkiksi säteen korkea paikoitustarkkuusvaatimus ja hitsattavien kappaleiden tarkat toleranssit, liitettävien saumojen tasaisuus on paljon tärkeämpää laserhitsauksessa, kuin kaarihitsauksessa. Laadunvarmistusta voidaan helpottaa automaattisilla prosessimontoreilla tai railonseurantaa hyödyntämällä. Laadunvarmistukseen tarvittavat lisälaitteet nostavat usein kynnystä vaihtaa tavallinen kaarihitsaus laserhitsaukseen, mutta suuremmilla tuotantovolyymeilla laserhitsausta helpottavat lisäinvestoinnit kannattavat. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 315.)

5.2 Hitsausvirheet

Sädehitsausmenetelmien laatuvaatimusstandardi kattaa sekä hitsin muodon että hitsausvirheet. Standardin pätevyysalue on laserhitsaukselle aineenpak-suusalue 0,5-12 mm. Kaarihitsauksen tapaan hitsit jaotellaan kolmeen laatu- luokkaan, vaativa (B), hyvä (C) ja kohtuullinen (D). Hitsausvirheissä on otettu huomioon myös sellaiset sädemenetelmille tyypilliset virheet, joita perinteisillä menetelmillä ei juuri esitelty. Laserhitsauksen yleisin halkeamatyyppi on jähmet- tymisen aikana syntyvä kuumahalkeama. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 318.)

Taulukko 1. Silmämääräisessä tarkastuksessa havaittavia hitsausvirheitä. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 316).

Virhe	Aiheuttaja
Epätasainen kupu	Liitoksen ilmaraon leveyden vaihtelut
	Energian tuonnin vaihtelut
	Väärin toteutettu kaasusuojaus
Läpipalaminen	Limiliitoksessa ilmarako
	Liitospinnat eivät ole suoria ja suorakulmaisia
	Liian suuri energiantuonti
	Liian suuri tehotiheys
Roiskeisuus	Likaiset työkappaleet
	Sinkityn tai maalatun levyn liitos
Vajaa kupu	Liian suuri ilmarako
	Liian suuri energiantuonti
Vajaa tunkeuma	Liian pieni energiantuonti
	Likainen hitsausoptiikka
	Polttopisteen paikka väärä
	Virheellinen kaasusuojaus

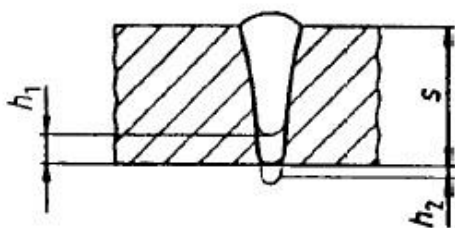
Laserhitsin virheet kuten reunahaava, vajaa tunkeuma tai hitsautumissyvyys, liitosvirhe ja muut geometriset virheet ovat lähes aina seurausta väärästä para- metrivalinnasta tai huonosta hitsauksen esivalmisteluista, johon kuuluu silloitus, railonvalmistus sekä kiinnittimet. Virheille alttiita kohtia ovat aloitus- ja lopetus-

kohdat erityisesti pyörähdykappaleita hitsattaessa. Lämmöntuonnin muuttuminen ja jähmettymisrintamien suunnan vaihtuminen saattavat lisäksi aiheuttaa ongelmia kuumahalkeiluerkillä materiaaleilla, se voi aiheuttaa myös merkittäviä muutoksia liitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin, esimerkiksi kovuuteen ja iskusitkeyteen. (Kujanpää, Salminen & Vihinen 2005, 316.)

5.3 Liitos- ja railovaatimukset

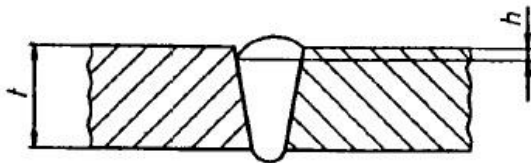
Hitsausluokille B, C ja D määritellään standardissa ISO 13919-1 vaatimukset, joilla laserhitsi saadaan haluttuun laatuluokitukseen. Standardi kattaa elektroni-suihku- ja laserhitsauksen seostamattomilla ja seostetuilla teräksillä, kaiken-tyyppisillä hitseillä lisäainelangalla tai ilman ja vaatii vähintään 0,5mm:n aineen-paksuuden jotta standardia voidaan soveltaa. (SFS-EN ISO 13919-1.)

Standardissa havainnollistetaan erilaisia esimerkkejä hitsaussaumojen epätäydellisyyksistä ja eritellään virheen vaikutus hitsausluokkaan. Virheille, kuten epätäydellinen tunkeuma, vajaa kupu, korkea juurikupu ja lineaarinen epätasaisuus on tarkkaan määritelty sallitut raja-arvot. Liitosrakoja sallitaan vain D-luokan hitseissä ja niissäkin maksimissaan 1mm matkalla. (SFS-EN ISO 13919-1.)



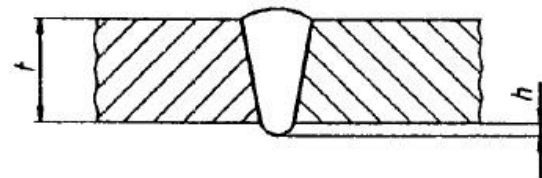
Kuva 14. Vajaa tunkeuma. (SFS-EN ISO 13919-1).

Tunkeuman vajetta sallitaan vain D-luokan hitseissä. B- ja C hitsausluokissa ei tällaista virhettä sallita. Lähdestandardissa on määritelty D-luokkahitsin sallima maksimiarvo tunkeuman vajeelle. (SFS 1996: SFS-EN ISO 13919-1.)



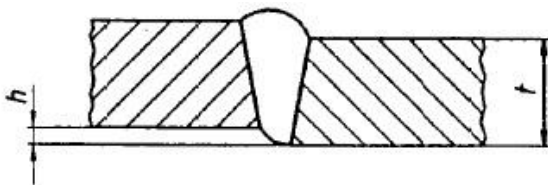
Kuva 15. Vajaa kupu. (SFS-EN ISO 13919-1).

Hitsauskuvun toispuolista vajausta mitataan kappaleen pinnasta vajauksen pohjaan, standardissa määritellään tarkkaan kuinka iso osa kappaleen paksuudesta suhteessa vajauksen suuruuteen saa olla, vajausta saa tästä riippumatta olla maksimissaan 1 mm D-luokan hitsiin ja 0,5 mm C- ja B-luokan hitsiin. (SFS 1996: SFS-EN ISO 13919-1.)



Kuva 16. Korkea juurikupu. (SFS-EN ISO 13919-1).

Juurikuvun korkeus ei saa ylittää 5 mm missään hitsausluokissa, standardissa on määritelty juurikuvun sallittu koko suhteessa hitsattavien kappaleiden paksuuteen. Juurikuvun korkeutta sallitaan vähiten B-luokan hitseissä ja eniten D-luokassa. (SFS 1996: SFS-EN ISO 13919-1.)



Kuva 17. Lineaarisesti epätasainen hitsi. (SFS-EN ISO 13919-1).

Lähtökohtaisesti hitsattavat kappaleet ovat oikeassa asennossa, kun kappaleiden keskikohdat ovat vastakkain. Lineaarista epätasaisuutta mitataan hitsin alapuolelta ja sitä sallitaan standardin mukaan maksimissaan 3 mm, tai viidesosa kappaleen paksuudesta D-luokan hitsissä ja 2 mm, tai neljäsosa kappaleen paksuudesta C-luokan hitsissä, B-luokassa sallitun epätasaisuuden määrä on 2 mm tai kymmenesosa kappaleen paksuudesta. (SFS 1996: SFS-EN ISO 13919-1.)

5.4 Hitsauslaitteiston vaikutus laadunvarmistuksessa

Laserhitsauksessa parasta työnjälkeä tavoitellessa on huomioitava tyypillisten hitsausvirheiden lisäksi se, miksi ne syntyvät. Hitsausvälineistä sekä olosuhteista johtuvat virheet voidaan minimoida tietämällä, mitkä asiat hitsauslaitteistoissa, roboteissa sekä hitsattavien kappaleiden hitsauskiinnittimissä ovat alttiita niille.

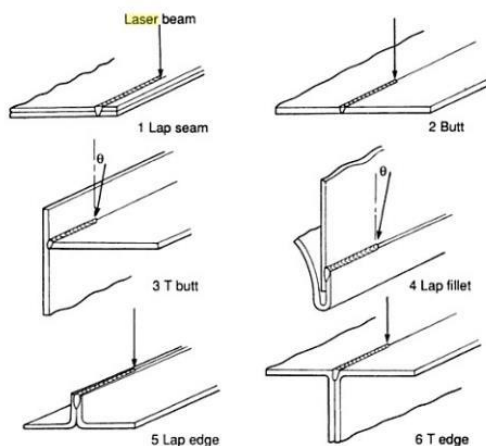
Ilman railonseurantaa tai muita saumanvalvontaa tehtävässä laserhitsauksessa on tärkeää, että robotin tarkkuus riittää lisäaineettoman, ohuen hitsaussauman sulkemiseen. Laserhitsausoptiikka voidaan kiinnittää suoraan robottiin, tämä mahdollistaa hitsauslaitteen monipuolisen käytön erilaisissa töissä. Eräät robotivalmistajat tarjoavat tähän sovellukseen tarkoitettuja kalibroituvaihtoehtoja, nämä korkeatarkkuuksiset robottiasetukset on suunniteltu käytettäviksi pakkaus-, kokoonpano- ja hitsaussovelluksissa. Korkeatarkkuuskalibrointi tarkoittaa sitä, kuinka tarkasti robotin voi opettaa liikkumaan tiettyyn pisteeseen robotin rungosta katsottuna. Korkeatarkkuuskalibrointi on tärkeä tekijä kun hitsataan

useita samanlaisia kappaleita ja robotin rata ei saa muuttua kappaleiden välillä. (Kuka industrial robots 2015.)

Hitsausmaun laatuun vaikuttaa myös radan ohjelmointi ja hitsauskiinnitin. Usean samanlaisen kappaleen hitsauksessa voidaan käyttää hitsauskiinnittimiä. Kappaleissa, joita hitsatessa vaaditaan kappaleen kääntöä, voidaan kiinnitin rakentaa pyörityspöytään, jotta kappaleen kääntö sujuisi helposti. Pitkiä, raskaita kappaleita hitsatessa on tärkeää, että kiinnittimeen ei kohdistu voimia, jotka voisivat alistaa sitä vääntymiselle. Kiinnittimen vääntyessä myös hitsattava sauma vaihtaa paikkaa, joka saattaa aiheuttaa reikiä, tai kokonaan auki jääneen sauman. Hitsausradan ohjelmoinnissa täytyy varmistaa, että laserin etäisyys kappaleesta pysyy samana ja näin fokuksipisteen tehotiheys pysyy vakiona. (Sähköpostihaastattelu, 25.9.2014, Aki Piironen, Koneteknologiakeskus Turku Oy.)

5.5 Osavalmistuksesta aiheutuvat valmistusvirheet

Laserhitsauksessa käytettävät hitsausmenetelmät sekä prosessiparametrit riippuvat myös hitsattavien kappaleiden ominaisuuksista. Ohutlevyä hitsatessa tyypillisesti käytetään vähemmän tehoa kuin paksummissa kappaleissa. Kappaleiden liitosta suunnitellessa materiaalin paksuuden huomiointi on tärkeää, tyypillisesti noin 3 mm:n paksuista levyä hitsatessa voidaan käyttää liitostyyppijä, joita ei paksummissa materiaaleissa ole käytännöllistä hyödyntää. (Dawes 1992, 117.)

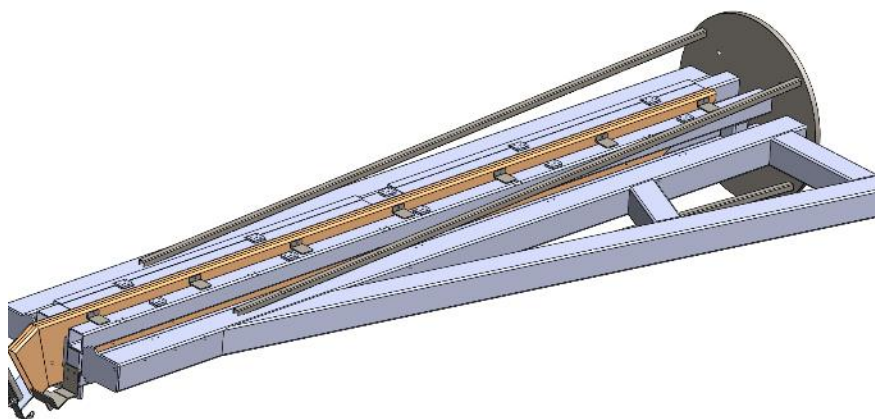


Kuva 18. Ohutlevyjen liitosmenetelmiä (Dawes 1992, 118).

Materiaalin hitsattavuus voidaan määritelmien mukaan jakaa kolmeen tekijään, perusaineen hitsattavuus, rakenteellinen hitsattavuus ja valmistuksellinen hitsattavuus. Valmistukselliseen hitsattavuuteen vaikuttavat hitsauksen edellyttämät esivalmistelut kuten menetelmä, liitos- ja railomuoto ja esikuumennus. Hitsauksen jälkeiset jälkikäsittelyt, kuten lämpökäsittely, viimeistelytyöstö ja mahdollinen peittäus vaikuttavat valmistukselliseen hitsattavuuteen. Perusaineen hitsattavuuteen vaikuttavat materiaalin ominaisuudet, kuten karkenevuus, kuumahalkeiluherkkyys sekä hitsisulan käyttäytyminen. Rakenteelliseen hitsattavuuteen vaikuttavat tuotteen ja osien muotoilu sekä voimien vaikutussuunnat, hitsien sijoittelu, aineenpaksuus lovet ja jäykkyyserot rakenteen sisällä. (Dawes 1992, 118.)

6 KOEJÄRJESTELYT

Opinnäytetyön kokeellisessa osassa seurattiin noin kolmemetrinen porrastukien lisäaineetonta hitsausta kuitulaserilla. Porrastukikappaleet kiinnitettiin vaakasuorassa olevaan, pyöritettävään hitsauskiinnittimeen.



Kuva 19. Hitsattava kappale hitsauskiinnittimessä.

Hitsausmenetelmänä käytettiin yhdistelmää avaimenreikä- ja sulattavaa hitsausta, kappaleita hitsattiin 5,25–5,5 kW:n teholla, hitsausnopeus oli 30 mm/sekunti.

6.1 Laitteisto

Tässä työssä käytettiin Motoman UP-50 -robottia. UP-50 on korkeanopeuksinen teollisuusrobotti, joka on suunniteltu toimimaan esimerkiksi kokoonpanossa, kaarihitsauksessa tai pakkaustöissä. Robotin paikoitustarkkuus on 0,07 mm ja kantavuus 50 kg. Robotin rata- ja paikoitustarkkuus soveltuvat hyvin lisäaineetomaan laserhitsaukseen.



Kuva 20. Hitsauksessa käytetty UP-50 robotti.

Robotissa käytettiin Precitec YW52 -hitsausoptiikkaa, optiikka soveltuu käytettäväksi kaikissa kuitulaser järjestelmissä ja toimii korkeallakin teholla. Hitsausoptiikkaa voidaan käyttää jopa 20 kW:n teholla ja painaa 3–6 kg mallista riippuen. Hitsausoptiikka sisältää 200 mm:n kollimointilinssin ja 500 mm:n fokusointilinssin.



Kuva 21. Precitec YW52 hitsausoptiikka.

Laserhitsaus resonaattorina käytettiin YLS, eli Ytterbium Laser System (YLS-10000-S4). YLS on IPG Photonics Corporationin valmistama kuitulaser.

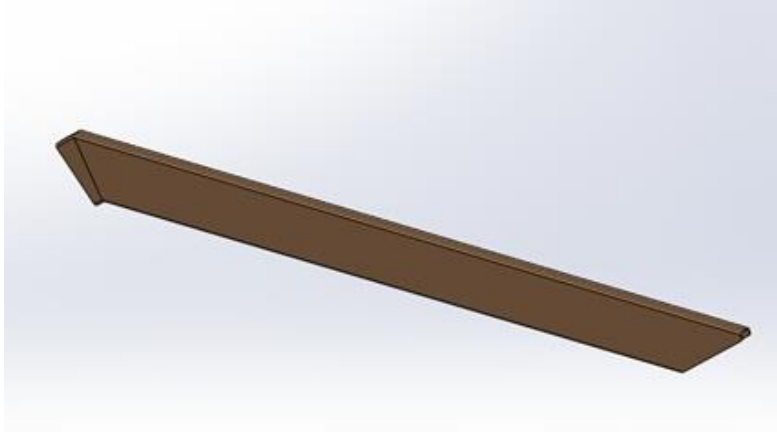
YLS-10000-S4 on 10 kW:n kuitulaser, jonka säteilyaallonpituus on 1070 nm. Hitsauksessa käytettiin 200 µm:n kuitua ja optiikkaa, jossa kollimoinnin ja fokuksinnin suhde on 500 µm / 200 µm tästä saadaan optiseksi suurennokseksi 2,5. Hitsauksessa käytetyn säteen halkaisija on fokuksessa 500 µm.

6.2 Materiaali

Hitsattavana materiaalina käytettiin S355-terästä, joka soveltuu hyvin rakenteellisiin sovelluksiin, kuten siltojen teräsrakenteisiin, voimaloiden rakenteisiin, maansiirtolaitteisiin sekä nostokoneisiin. Yhteen hitsattavat kappaleet olivat 2–4,5 metriä pitkiä ja neljä millimetriä paksuja u-profiileja, jotka oli tehty muotoon leikatuista levyistä särmäämällä.

6.3 Valvontamenetelmät

Kappaleet esikiinnitettiin toisiinsa TIG-hitsaamalla, hitsauskiinnittimeen kiinnityksen jälkeen kappaleet tarkastettiin silmämääräisesti mahdollisten ongelmakohtien varalle, liian leveä railo kappaleiden välillä saattaisi aiheuttaa reikiä valmiissa saumassa. Kappaleen tarkastuksen jälkeen kappaleet esikiinnitettiin, toisiinsa vielä laserilla, jonka jälkeen laser hitsasi ensin tärkeämmän, näkyviin jäävän puolen, eli A-puolen. Tämän jälkeen pyörityspöytä käänsi kappaleen, ja B-puoli hitsattiin umpeen.



Kuva 22. Hitsattavan kappaleen A-puoli.

Hitsauksen jälkeen kappaleen saumat tarkastettiin virheiden varalta ja mahdolliset hisausvirheet kirjattiin ylös ja kuvattiin. Kirjauksen yhteydessä kappale arviointiin asteikolla 0–5.



Kuva 23. Esimerkki hylätystä hitsistä.(Liite 1).

Yleisimpiä hitsauksessa ilmenneitä virheitä olivat reiät hitsissä ja kokonaan sauman ohi menneet hitsit. Koehitsausserään kuului 20 testikappaletta, joista 9 oli lyhyttä ja 11 pitkä kappaletta.

7 TULOKSET

Koehitsattavat kappaleet arvioitiin asteikolla 0–5. Arvosanan 5 hitseissä ei ollut mitään virheitä, arvosanan 3–4 hitseissä oli pieniä kosmeettisia virheitä, mutta 1–2 arvosanan hitsejä jouduttiin korjaamaan jälkeinpäin. Arvosanan 0 saaneet hitsit jouduttiin hitsaamaan kokonaan uudelleen laserilla, tai käsin. Virheen löytyessä siitä kirjattiin huomiot, joissa listattiin virheen laatu sekä mahdolliset korjaavat toimenpiteet hitsausprosessiin tai laitteisiin. (Taulukko 2.)

Taulukko 2. Koehitsauksen tulostaulukko.

Koehitsausjärjestelmän tulokset			
Kpl Nro	Pituus	Arvosana	Huom.
1	Lyhyt	4	A-puolen saumassa tasomainen sovitusrvirhe t=55mm, sovitusrvirheen kohdassa hitsaus saumasta ohi. (radan päätä korjattiin)
2	Lyhyt	2	A-puolen saumassa tasomainen sovitusrvirhe t=55mm, heftin kohdalla B-puolella läpivalunut hitsaus. (heftauksen tehoa laskettu 500W)
3	Lyhyt	2	B-puolen saumassa tasomainen sovitusrvirhe t=0,5mm, heftin kohdalla B-puolella läpivalunut hitsaus.
4	Lyhyt	1	B-puolen saumassa tasomainen sovitusrvirhe t=0,33mm, B-puolen alkupäässä läpivalunut hitsaus, B-alkupään sauma n.2mm alhaalla. (puristimia lisätty)
5	Lyhyt	5	Ei virheitä
6	Lyhyt	0	A-puolen kulman pääty jäänyt auki, B-puolen sauma lähes kokonaan auki, A- ja B- puolella läpivalumia, hitsattava uudelleen. (uudelleenhitsaus ei auttaanut, korjattava käsin)
7	Lyhyt	2	Molemmilla puolilla läpivalumia.
8	Lyhyt	3	B-puolen heftauksen kohdalta sauma auennut
9	Lyhyt	2	A- ja B-puolella läpivalumia.
10	Pitkä	2	A- ja B-puolella läpivalumia, B-puolen sauman hitsaus alkaa myöhässä.
11	Pitkä	3	A-puolen alkupäässä sauma ohi. (hitsauspisteitä korjattu)
12	Pitkä	5	Ei virheitä
13	Pitkä	2	A- puolella sauma alhaalla, B-puolella railon suuruudesta johtuva läpivaluma
14	Pitkä	2	A-puolen alkupäässä läpivaluma
15	Pitkä	5	Ei virheitä
16	Pitkä	4	A-puolella sauma valunut syvemmälle, muttei läpi asti
17	Pitkä	5	Ei virheitä
18	Pitkä	5	Ei virheitä
19	Pitkä	5	Ei virheitä
20	Pitkä	5	Ei virheitä

Tuloksista nähdään, että 20 testikappaleesta vain seitsemän olivat virheettömiä, mutta vain yksi kappale jouduttiin hylkäämään ja täysin uudelleenhitsaamaan käsin. Hitsauksessa pyrittiin B-luokan hitsiin, eli vaativaan hitsausluokkaan. Kaikki arvosanan 3 tai alle saaneet kappaleet jouduttiin jollain tapaa korjaamaan, jotta ne täyttäsivät hitsausluokan laatuvaatimukset.



Kuva 24. Hylätty-arvosanan saanut kappale uudelleenhitsattuna. (Liite 1).

Tämän otoskoon perusteella voidaan todeta että alle 50 % kappaleista oli täysin virheettömiä, joitakin korjaustoimenpiteitä piti suorittaa 50 %:lle kappaleista, varsinkin suuremmissa tuotantoerissä noin 50 %:n todennäköisyys onnistuneeseen kappaleeseen on liian matala.

Helpoin tapa lisätä onnistuneen hitsauksen todennäköisyyttä olisi suunnitella uusi hitsauskiinnitin, tällä hetkellä käytössä oleva malli mahdollistaa kappaleessa pienen taipumisen, jonka takia sauma ei välttämättä sulkeudu. Kiinnittimen tulisi olla pidempi, jotta pidemmät kappaleet eivät ylittäisi kiinnittimen mittaa, sekä jäykempi, ettei kiinnitin alistuisi taipumiselle. Uuden hitsauskiinnittimen suunnittelu mahdollistaisi myös käsin tehtävän esihitsauksen korvaamisen kokonaan laserilla tehtäväksi prosessiksi.

Hitsauksen luotettavuutta voisi parantaa myös hitsausoptiikan ”vaaputtamisella” jolloin sauma saataisiin leveämmäksi. Tämä ratkaisu korjaisi kappaleiden saumassa esiintyvien leveyserojen aiheuttamat raot, sekä tekisi pienistä taipumista merkityksettömiä, sillä hitsi olisi leveämpi.

Railonseuranta ratkaisisi taipumisen aiheuttamat virheet, muttei välttämättä korjaisi saumaan jääviä reikiä, joita esiintyy esimerkiksi liitteen 1. kuvassa 26.

8 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tavoitteena oli suorittaa laadunvarmistusta kuitulaserilla hitsattavissa kappaleissa ja selvittää hitsauksessa ilmenneiden virheiden syyt, sekä ratkaisut niiden estämiseksi.

Tavoitteena oli myös tutustua yleisesti laserhitsausprosessiin sekä laserin toimintaperiaatteeseen ja eri lasertyyppeihin. Työssä käsiteltiin myös laadunvarmistus metodeja sekä vaatimuksia, jotka ovat ominaisia laserilla tehtävään hitsaukseen.

Tavoitteissa onnistuttiin hyvin. 20 kappaleen koehitsauserästä löytyi useita erilaisia virheitä, joten virheiden analysointi oli monipuolisempaa. Hitsausvirheiden monipuolisuuden ansiosta työssä voitiin hyvin analysoida sitä, mitkä virheistä olisi saatu ehkäistä tietyillä lisälaitteilla tai prosessia muuttamalla.

Työssä haastavimmaksi osoittautui laserhitsauksen ja erityisesti kuitulaserien suhteellinen tuoreus hitsausmenetelmänä. Koska lasereihin liittyvät työstösovellukset kehittyvät nopeasti, oli tärkeää, ettei työssä käsitellä vanhentunutta tietoa. Myös tiedon löytäminen oli ajoittain hankalaa. Aiheesta on toki saatavilla kirjallisuutta, mutta niistä löytyvä tieto saattaa olla vanhentunutta.

Koe-erän tulosten perusteella hitsausprosessista olisi voinut tehdä luotettavamman. 20 koekappaleesta yhdeksää jouduttiin korjaamaan, joista yksi jouduttiin hitsaamaan kokonaan käsin.

Tapoja, joilla hitsausprosessia olisi saanut luotettavammaksi ilmeni hitsatessa. Hitsauskiinnitin oli esimerkiksi alttiina taipumiselle, ja taipuminen ilmeni hitsatessa usein railon ohi menneellä hitsillä. Lisääaineettomalla laserhitsauksella hitssaussauma jää usein todella ohueksi, noin 1–2 mm:iin, mikä tarkoittaa sitä, että pienikin heitto hitsausrailon suoruudessa altistaa sen rakoilulle.

Valmistettavien kappaleiden määrän ollessa suurempi olisi hitsausprosessiin ollut mahdollista saada lisää luotettavuutta erilaisilla lisäinvestoinneilla. Erilaiset mahdollisuudet parantaa hitsausjälkeä, kuten prosessia helpottavat lisälaitteet, olisivat tuoneet hitsausjälkeen parempaa luotettavuutta eikä kiinnittimen taipuminen olisi ollut ongelma. Hitsausoptiikan vaaputuksella hitsausaumaa olisi saanut levennettyä pienentäen virheen syntymismahdollisuutta, joka johtuu radan epätarkkuudesta tai railojen leveyseroista. Railon seurannan käyttäminen olisi myös omalta osaltaan pienentänyt virheriskiä. Railon seurannalla radan suorudella ei olisi niinkään ollut merkitystä, mutta saumojen leveyksien mittaheitoista johtuvia ongelmia se tuskin olisi korjannut.

Lisäaineettoman hitsausvaihtoehdon olisi myös voinut korvata lisäaineellisella laserhitsauksella, jonka olisi voinut yhdistää myös Precitecin Scan Tracker -optiikkaan, joka on yhdistelmä railon seurannan ja lineaariskannerin välillä.

LÄHTEET

- CO2 Laser 2014. Viitattu 11.12.2014.
<http://www.daenotes.com/electronics/microwave-radar/co2-gas-laser>
- Dawes 1992. Laser Welding, a practical guide.
Abrington Publishing. Cambridge.
- Ionix Oy 2014. Hybridihitsaus. Viitattu 11.12.2014.
<http://ionix.fi/teknologia/lasertyosto/hybridihitsaus/>
- Ionix Oy 2014. Laser Welding. Viitattu 11.12.2014.
<http://ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-welding/>
- Jay Liebowitz 2014. High-power direct-diode lasers for cutting and welding.
Viitattu 11.12.2014. <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-29/issue-3/features/high-power-direct-diode-lasers-for-cutting-and-welding.html>.
- Kujanpää, Salminen, Vihinen 2005. Lasertyöstö.
Teknoliigateollisuus ry. Helsinki.
- Kuka industrial robots 2015. High Accuracy Robots. Viitattu 17.3.2015
http://www.kuka-robotics.com/usa/en/products/industrial_robots/special/high_accuracy_robots/
- Laserfocusworld 2014. Absorption. Viitattu 11.12.2014.
http://www.laserfocusworld.com/content/dam/etc/medialib/new-lib/laser-focus-world/online-articles/2011/04/21370.res/_jcr_content/renditions/pennwell.web.400.367.gif.
- Laserline 2014. Beam Source. Viitattu 11.12.2014.
<http://www.laserline.de/beam-source.html>
- Pion 2014. Electromagnetic spectrum. Viitattu 11.12.2014.
<http://www.pion.cz/en/article/electromagnetic-spectrum>.
- Precitec Oy 2014. Joining Technology. Viitattu 11.12.2014.
<http://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yw52/welding-head-yw52-with-scantracker/#tab3>
- Rofin 2014. Fiber Laser Principle Viitattu 11.12.2014
<http://www.rofin.com/master-of-applications/en/>
- RP Photonics 2014. Disc Laser. Viitattu 11.12.2014.
http://www.photonics.com/images/Web/Articles/2004/1/1/Trumpf_Fig1.jpg
- RP Photonics 2014. Refraction. Viitattu 11.12.2014.
<https://www.rp-photonics.com/refraction.html>.
- Steen, Mazumder 2010. Laser Material Processing.
Springer. London.
- SFS-EN ISO 13919-1: Hitsaus. Elektronisuihku- ja Laserhitsatut Liitokset. Hitsausluokat. Osa 1: Teräs. SFS. Helsinki.
- YAG Laser Machining Of Materials 2014. Viitattu 11.12.2014.
<http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level1/ch05/html/l1c05s07.htm>

LIITTEET

Liite 1: Koe-erän tulokset.



Kuva 25. Kappaleen vääntymisestä johtuen hitsausauma on jäänyt auki.



Kuva 26. Saumassa leveämpi rako, josta johtuen kappaleessa pieni läpivaluma.



Kuva 27. Vääntymisen aiheuttama rako hitsaussaumassa.



Kuva 28. Hitsausroiskeita kappaleessa, saumassa läpivalumia.



Kuva 29. Saumassa leveämpi rako aiheuttanut läpivaluman.



Kuva 30. Kappaleessa hitsausroiskeita, sauma jäänyt auki kappaleen vääntyessä.