

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan osasto

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

YLI 8 MM PAKSUJEN TERÄSTEN LASERHITSAAMINEN
CO₂-, KUITU- JA KIEKKOLASERILLA

Valkeakoskella 9.3.2011

Aleksi Korkee

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT LYHENTEET

1 JOHDANTO	1
1.1 Työn tavoite ja rajaus.....	1
2 LASERIN PERUSTEET	2
2.1 Lasersäteen synty.....	2
2.2 Lasersäteen ominaisuudet.....	2
3 RESONAATTORITYYPIT	3
3.1 CO ₂ -laser	3
3.2 Kiekkolaser	5
3.3 Kuitulaser.....	7
4 HITSAUSTAVAT	9
4.1 Avaimenreikähitsaus eli keyhole-hitsaus	9
4.2 Sulattava hitsaus	10
4.3 Pulssihitsaus.....	11
4.4 Käytettävät railomuodot	12
4.5 Laserhitsauksen etuja ja ongelmia.....	13
5 LASERHITSAUKSEN PARAMETRIT.....	14
5.1 Sädeparametrit	14
5.1.1 Aallonpituus.....	14
5.1.2 Absorptio ja heijastuminen	15
5.1.3 Säteenlaatu	16
5.1.4 Divergenssi	17
5.2 Työstöparametrit.....	17
5.2.1 Teho ja hitsausnopeus	17
5.2.2 Polttopisteen paikka	18
5.2.3 Polttopisteen poikkileikkauksen halkaisija ja polttoväli	19
5.2.4 Prosessikaasut ja kaasunpaine.....	19
5.2.5 Suutin- ja työtäisyys	22
5.3 Perusaineen parametrit	22
5.3.1 Perusaineen paksuus.....	23
5.3.2 Työkappaleen pinnanlaatu ja puhtaus.....	23
5.3.3 Materiaalin ominaisuudet ja kemiallinen koostumus	23
6 TERÄSTEN HITSAUS.....	24
6.1 Jäähtymisaika.....	26
7 TUTKIMUSTULOKSIA	27
7.1 CO ₂ -laser-tutkimukset.....	27
7.2 Kuitulaser-tutkimukset	29
7.3 Kiekkolaser-tutkimukset.....	33

8 TULOSTEN ANALYSOINTI	34
8.1 CO ₂ -laser	34
8.2 Kuitulaser.....	35
8.3 Kiekkolaser	35
9 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET	36
10 YHTEENVETO	36
LÄHDELUETTELO.....	38

KÄYTETYT LYHENTEET

Ar	argon
bar	paineen yksikkö, 1 bar = 10^5 Pa
BPP	beam parameter product, sädeparametritulo
CO ₂ -laser	hiilidioksidilaser
CEV	hiiliekvivalentti
H	vety
HAZ	heat affected zone, hitsin lämpövyöhyke
IR	infrapunasäteily
M ²	säteenlaatu parametri (times diffraction limit factor)
mW	milliwatti
mm	millimetri
mm/min	millimetriä minuutissa
mrad	milliradiaani
nm	nanometri
l/min	litraa minuutissa
kW	kilowatti
N ₂	typpikaasu
Nd:YAG	Neodymium:yttrium-Aluminum-granat-laser
O ₂	happikaasu
P	teho
P _L	laserteho kappaleen pinnalla
s	ainevahvuus
SSL	Solid State Laser
UV	ultraviolettisäteily
v	hitsausnopeus mm/min
W	watti

W/cm^2 wattia neliösenttiä kohden

V_w hitsausnopeus

μm mikrometri

1 JOHDANTO

Hitsaavassa konepajateollisuudessa on perinteisesti käytetty paksujen levyjen hitsaamiseen kaasukaariprosesseja. Kuitenkin lasereiden kehityksen ja sitä kautta käytössä olevan tehon kasvun myötä paksujen ainevahvuuksien hitsaaminen laserilla on yleistynyt. Laserin valtteina ovat nopeus ja syntyvän liitoksen tasalaatuisuus. Samalla myös railotilavuus jää pienemmäksi, mikä nopeuttaa liitosten syntymistä. Yleensä paksuja levyjä hitsattaessa käytetään lisäainetta tai erilaisia hybridiprosesseja, mutta paksujen levyjen liittäminen myös pelkkää lasersädettä käyttäen on nykyisin mahdollista. Tietyissä tapauksissa laserilla voidaan kilpailla niin kutsuttujen kapearailoprosessien kanssa.

Vanhan hiilidioksidilaserin rinnalle on syntynyt uusia lasertyyppisiä esimerkiksi kuitu- ja kiekkolaserit, joilla saavutetaan lähes saman suuruinen teho, mutta niiden säteenlaatu on hiilidioksidilaseria parempi. Samoin myös niiden resonattorit vievät huomattavasti vähemmän lattiapinta-alaa. Parempi säteenlaatu mahdollistaa laitteiston soveltuvuuden moneen muuhunkin tarkoitukseen. Uusien lasertyyppien hankintahinta on myös halvempi ja käyttökustannukset pienemmät.

1.1 Työn tavoite ja rajaus

Työn tavoitteena on tehdä yhteenveto jo tehdyistä tutkimuksista, jotka liittyvät paksujen, ainevahvuudeltaan yli 8 mm levyjen laserhitsaukseen ilman lisäainetta. Mikäli pelkällä säteellä tehtyjä tutkimuksia ei ollut saatavilla, otettiin mukaan myös erilaiset hybridisovellukset. Yhteenvedossa tarkastellaan käytettyjä laitteistoja, käytössä olleita hitsausparametreja ja niiden vaikutusta syntyneeseen hitsiin. Työssä käsitellään vain terästen hitsausta, ei sekaliitoksia.

2 LASERIN PERUSTEET

2.1 Lasersäteen synty

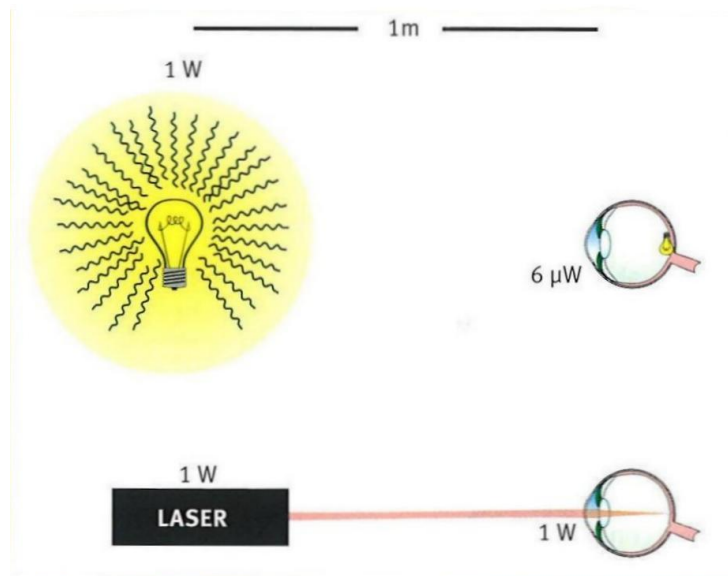
Lasersäde synnytetään resonattorin sisällä laseroivan väliaineen avulla. Laseroiva väliaine voi olla joko kiinteää tai kaasumaista. Yksinkertainen optinen resonattori koostuu laseroivasta väliaineesta, takapeilistä ja osittain valoa läpäisevästä etupeilistä. Peileillä on yhtenevät keskiakselit. Laseroiva väliaine emittoi laservaloa, kun sitä viritetään ulkoisella energialla. Energia tuonti tapahtuu tavallisesti sähkö- tai valoenergialla. Väliaine määrää resonattorista ulos tulevan lasersäteen aallonpituuden. (Kujanpää et al. 2005, s. 34)

2.2 Lasersäteen ominaisuudet

Normaali valkoinen valo eli näkyvä valo on sähkömagneettista säteilyä ja sisältää kaikkia aallonpituuksia välillä 400–700 nm. Tätä aallonpituusaluetta lyhyemmät aallonpituudet ovat ultraviolettisäteilyä ja pidemmät infrapunasäteilyä. Tavallinen hehkulamppu lähettää valkoista valoa, jossa on laaja spektri eri aallonpituuksia useaan eri suuntaan. (Kujanpää et al. 2005, s. 35–36)

Lasersäteilyn kolme perusominaisuutta ovat yhdensuuntaisuus, koherenttius ja monokromaattisuus. Nämä ominaisuudet erottavat laservalon tavallisesta valosta. Lasersäteily on yhdensuuntaista, eli se ei hajaannu matkan funktiona kovinkaan paljon. Lasersäteilyn koherenttius tarkoittaa, että kaikki säteet ovat samassa vaiheessa ja pystyvät siksi interferoimaan eli vahvistamaan toisiaan. Monokromaattisuus tarkoittaa, että säteily sisältää vain yhtä valon aallonpituutta. Kuvassa 1 on esitetty laservalon ja tavallisen valon erot. Kuvasta voidaan havaita, että tavallisen valon teho 1 m päässä on

laskenut kun taas laservalon valoteho on säilynyt ennallaan. Kuvassa tavallinen valo säteilee kaikkiin suuntiin ja laserin valo on samansuuntaista. Silmä muodostaa kuvan verkkokalvolle ja tarkentaa myös lasersäteilyn verkkokalvolle. Tästä syystä lasersäteily voi aiheuttaa pysyviä vaurioita verkkokalvolla. (Kujanpää et al. 2005, s. 33), (Laservision 2008, s. 9)



Kuva 1. Laservalon ja tavallisen valon eroavaisuudet (Laservision 2008, s. 9).

3 RESONAATTORITYYPIT

Tässä kappaleessa esitellään työssä esiintyvät laserresonaattorit.

3.1 CO₂-laser

Yksi vanhemmista konepajoissa käytettävistä lasertyypeistä on CO₂- eli hiilidioksidilaser. Hiilidioksidilaserissa laseroiva väliaine on kiinteän aineen sijaan kaasuseos. Kaasuseos sisältää hiilidioksidin, joka on laseroiva väliaine, lisäksi typpeä ja heliumia. CO₂-laserin laservalon muodostumisen energiatasot muodostavat kaksi

pääasiallista aallonpituutta 10,6 μm ja 9,6 μm . Tavallisimmin hiilidioksidilaserin säteelaatua kuvaava M^2 -luku on 1.1 – 5.0 ja sädeparametritulo (BPP) välillä 3 – 17 $\text{mm} \cdot \text{mrad}$. (Silfvast 2004, s. 511, Buchfink 2006, s.46-47, Ready 2001, s.27-35)

Typpi toimii hiilidioksidilaserissa eräänlaisena herättäjänä ja se avustaa sähköisen energian siirtoa CO_2 -molekyylin. Sillä on energiatasoero, joka vastaa hiilidioksidimolekyylin ylempää viritystasoa, josta laservalon vaatima kvantti voi muodostua. Helium puolestaan toimii seoksessa tehokkaana jäähdyttäjänä. Helium lämpiää resonaattorissa, jossa syntyy aina hukkalämpöä. Kun kaasu siirretään jäähdyttimeen, siirtää helium lämpöä tehokkaasti lämmönvaihtimeen. Tämä ei häiritse varsinaista laserointiprosessia. (Silfvast 2004, s. 511, Buchfink 2006, s.46-47, Ready 2001, s.27-35)

Käytettävä kaasuseos on täysin resonaattorikohtainen. Tyypillinen resonaattorikaasu sisältää heliumia 60 – 85 %, hiilidioksidia 1 – 9 % ja typpeä 13 – 55 %. Resonaattorissa käytettäviä kaasuja on saatavana myös valmiina seoksina. Mitä puhtaampaa resonaattorissa käytettävä kaasu on, sitä parempi hyötysuhde saadaan. Tyypillisesti kaasu kierrätetään lämmönvaihtimen läpi ja uusitaan koko ajan. (Silfvast 2004, s. 511, Buchfink 2006, s.46-47, Ready 2001, s.27-35)

Lasereissa hyötysuhteella tarkoitetaan säteen tehon suhdetta sen synnyttämiseen tarvittavaan sähkötehoon. Hiilidioksidilasereiden teoreettinen hyötysuhde on maksimissaan noin 21 %. Hiilidioksidilaserit voidaan jakaa niiden toimintaeriaatteen perusteella seuraaviin ryhmiin.

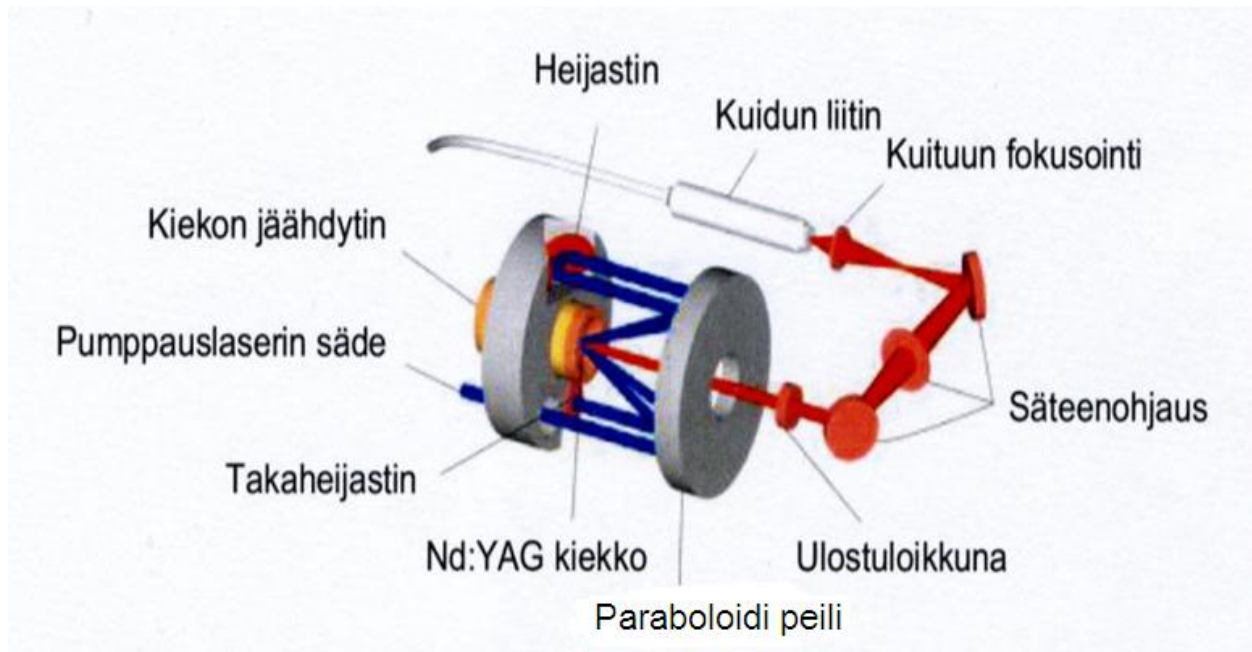
- Suljetun resonaattorin laser (sealed-off, sealed tube)
- Hitaan pitkittäisvirtauksen laser (slow-axial flow)

- Nopean pitkittäisvirtauksen laser (fast-axial flow)
- Poikittaisvirtauslaser (cross-flow)
- Diffuusiojäähdytetty (diffusion-cooled)
- TEA-laser

Kahta ensiksi mainittua ja viimeiseksi mainittua ei käytetä konepajatyöstösovelluksissa, koska niiden maksimiteho jää työstöön nähden liian pieneksi. Siksi suurin osa konepajoissa käytössä olevista lasereista on tällä hetkellä joko nopean pitkittäisvirtauksen, poikittaisvirtauksen tai diffuusiojäähdytettyjä lasereita. (Silfvast 2004, s. 511, Buchfink 2006, s.46-47, Ready 2001, s.27-35)

3.2 Kiekkolaser

Kiekkolaserissa laseroiva väliaine on ohut kiekon muotoinen kide, joka on kiinnitetty toisesta päästään jäähdytyselementtiin. Tämä kiekko on niin ohut, että se absorboi vain murto-osan siihen pumpatusta energiasta. Suurin osa kiekkoon pumpatusta energiasta menee suoraan kiekon läpi. Heikon absorption takia säde heijastetaan kiekon läpi 16 kertaa. Tämän jälkeen säde on saavuttanut kulman, jossa se tulee ulos moduulista paraboloidisen peilin keskellä olevasta reiästä. Tämä asetelma yhdistettynä tasaintensiteettiseen pumppaussäteeseen johtaa miltei tasaiseen ja yksisuuntaiseen lämmönsiirtymiseen kohtisuorassa kiteen ja jäähdytyselementin välisen pinnan yli. Näin voidaan käyttää suuren intensiteetin pumppaustehoa ilman, että kiteen lämpötila nousee liian korkeaksi. Samalla konstruktio vähentää myös kiteen lämpenemisestä johtuvaa vääristymistä verrattuna tankomaiseen konstruktioon. Yhdistettäessä kiteen pituussuuntainen jäähdytys ja usean pumppauskerran mahdollistava pumppausenergia, saadaan kiteestä irti suuri ulostuloteho ja hyvä säteenlaatu. Kuvassa kaksi on esitetty kiekkolaserin periaate. (Buchfink 2006, s.62–63, Hügel 2000, s.219, Giesen et al. 1994, 1.)



Kuva 2. Kiekkolaserin periaate (Rofin(a), 2010).

Kiekkolasereiden kanssa käytetään yleisesti Yb:YAG-kidettä, joka on pinnoitettu yläpinnalta ja sivuilta pumppausaallonpituutta heijastamattomaksi. Jäähdytys-elementin puolella käytetään erittäin hyvin kyseistä aallonpituutta heijastavaa pinnoitetta siten, että pumpattava säde heijastuu takaisin kiteen takapinnasta. Takaisin heijastunut pumppaussäde ohjataan paraboloidisen peilin ja heijastavien prismojen kautta takaisin useita kertoja. Tätä kutsutaan usean pumppauskerran pumppaukseksi. Tällainen toiminta pakollista, koska kide on ohut ja absorboi vain vähän yksittäisestä pumppaussäteestä. Kiekkolasereiden aallonpituus on Yb:YAG-kiteellä 940 nm. (Giesen et al. 2007), (Kujanpää et al. 2005, s. 65)

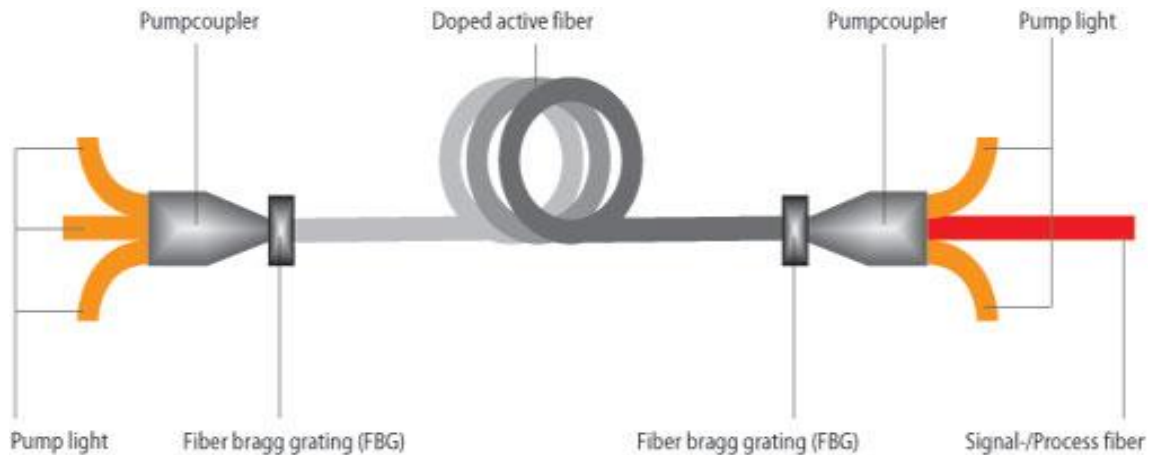
Vuoteen 2009 mennessä tehdyissä tutkimuksissa ei ole saavutettu korkeinta mahdollista yhdestä kiteestä saatavaa tehomäärää. Stuttgartin yliopistolla suoritettujen laskelmien mukaan mahdollinen laskennallinen maksimiteho on noin 30 kW. Teoriassa kidettä pumppaavan lasersäteen poikkipinta-alan muutoksilla ja vakioidulla pumppaussäteen tehotiheydellä saadaan säädettyä kiteestä saatavan tehon määrää. Tällöin pumppaavan säteen halkaisija kasvaa halutun ulostulotehon neliöjuuren verran.

Jos pumpattavan säteen halkaisija kaksinkertaistetaan, voidaan pumppausenergia nelinkertaistaa ilman että pumpattavan säteen tehotiheys tai pumpattavan kiteen lämpötila muuttuvat. Tällöin yksittäisestä kiteestä saatava tehoa voidaan nostaa ilman, että säteenlaatu muuttuu. Tästä syystä voidaan myös säteenlaatua muuttaa käyttökohteen mukaan. (Havrilla ja Brockman 2009, 2.)

3.3 Kuitulaser

Historiansa alussa kuitulaser oli lähinnä vain ja ainoastaan tietoliikennetekniikan käytössä. Se mahdollisti korkealaatuisen yhden moodin matalatehoisten järjestelmien käytön. Lisäksi järjestelmillä oli pitkä käyttöikä, jonka aikana laitteita ei juurikaan tarvinnut huoltaa. Tietoliikennemarkkinoiden romahdettua 1990-luvun loppupuolella, alkoivat kuitulasereiden valmistajat keskittyä teollisuuden, sotilasteollisuuden, lääketieteen ja ilmailutekniikan alojen tarpeiden täyttämiseen. Laitteiden kehittäminen suurempitehoisiksi ja tuottavammiksi mahdollisti markkinaosuuden hankkimisen lasertyöstöteollisuudesta. (O'Neil et al. 2004, 1.)

Kuitulasereissa säde synnytetään suoraan optisen kuidun sisään. Kuidun ydin on seostettu laseroivalla väliaineella ja sitä pumpataan diodilaserin valolla. Kuitu muodostaa itsensä resonattorin, jolloin erillistä resonattoria ei tarvita. Tekniikan perusta on siinä, että pumppausenergia tuodaan sisään kuidun päästä, jolloin se läpäisee laseroivan kerroksen useita kertoja edetessään kokonaisuutensa avulla kuidussa ilman häviöitä. Koska laseroivan ytimen halkaisija voidaan tehdä pieneksi, saadaan syntyneen säteen halkaisija pieneksi ja säteenlaatu erittäin hyväksi. (Kujanpää et al. 2005, s. 68) Kuvassa kolme on esitetty kuitulaserin periaate.



Kuva 3. Kuitulaserin toimintaperiaate (Rofin (b), 2010).

Kuidun korkea hyötysuhde vähentää lämpötilan nousun aiheuttamia ongelmia ja jäännöslämpö poistuu hyvin koko kuidun matkalta helposti. Kuidussa oleva laseroiva ydin on yleensä erbiium- tai ytterbium seostettu, jolloin kuidusta saadaan ulos 1550 nm tai 1070 nm aallonpituuksista laservaloa. Ytterbium-seostuksella saadaan korkeampi hyötysuhde. Valon sähkömagneettista aaltomuotoa hallitaan puolestaan kuidun aktiivisen ytimen säteenkuljetusominaisuuksilla. Ohuet kuidut, joissa ytimen halkaisija on joitain kymmeniä mikrometrejä tuottavat single mode-valoa, kun taas suurempien halkaisijoiden kuidut tuottavat multi mode-valoa. Kuitulasereiden hyötysuhde on noin 30 % ollen noin kaksinkertainen verrattuna muihin kiinteän laseroivan väliaineen lasereihin. (O’Neil et al. 2004, 2.)

Kuitulaser koostuu yleensä useista moduuleista, joissa yksittäinen moduuli tuottaa satoja watteja lasertehoa. Kun moduleita yhdistetään, saadaan ulos tulevaa kokonaistehoa kasvatettua helposti. Laserlaitteeseen voidaan asentaa varamoduuleja, jotka käynnistyvät jonkun toisen moduulin rikkouduttua. Tällöin yhden moduulin rikkoutuessa ei laserin kokonaisteho laske vaan se pysyy koko ajan halutulla tasolla. Useasta moduulista rakennettu laser on multi mode-laser. (IPG Photonics 2009, 3.)

Kuitulaserin vahvuuksia ovat

- Matalat käyttökustannukset
- Hyvä säteenlaatu
- Hyvä tehokkuus

Kuitulaserin tehokkuutta parantaa sen rakenteesta johtuva vähäinen huollon ja lattiapinta-alan tarve sekä laitteiston keveys. Yleisesti ottaen kuitulaserilla saadaan aikaan huippulaatuinen säde verrattuna muihin samassa teholuokassa oleviin lasertyyppeihin. Hyvälaatuinen säde parantaa tarkkuutta ja kasvattaa työstönopeuksia sekä mahdollistaa yhä korkeampien tehojen käytön yhdistämällä yksittäisiä lasereita. (Hansen ja Broeng 2006.) Yksi kuitulaserin erityispiirteistä on sen hyvin yksinkertainen peruseräite. Sen vuoksi eri tehoisia ja säteenlaatuista kuitulasereita on helppo valmistaa. (O'Neil et al. 2004, 1.)

4 HITSAUSTAVAT

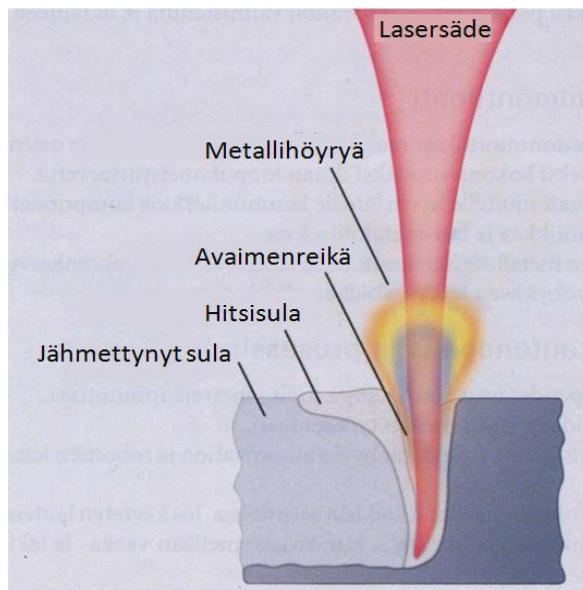
Laserhitsaus voi tapahtua kahdella eri menetelmällä: sulattavana hitsauksena tai avaimenreikähitsauksena. Laserhitsaukseen voidaan myös liittää perinteinen kaasukaarimenetelmä, jolloin puhutaan hybridihitsauksesta.

4.1 Avaimenreikähitsaus eli keyhole-hitsaus

Yleensä konepajoissa tapahtuva laserhitsaus on syvätunkeuma- eli avaimenreikähitsausta. Lasersäteen fokusointi ja kohdistaminen tapahtuu pinnan normaalin suuntaisesti. Säde fokusoidaan joko kappaleen pinnalle tai noin 25 % ainepaksuudesta pinnan alapuolelle. Säteen suuren tehotiheyden ansiosta materiaaliin höyrystyy avoin reikä. Syntyneen reiän syvyys riippuu käytettävistä parametreista. Jotta höyrystyminen tapahtuisi, on kappaleen pinnalle osuvan säteen tehotiheys oltava

vähintään 10^6 W/m^2 . Polttopisteen ollessa liian ylhäällä tai alhaalla ei riittävää tehotiheyttä synny ja reikää ei muodostu. (Kujanpää et al. 2005, s. 158–159.).

Sädettä kuljetetaan railon suuntaisesti ja sulaa materiaali siirtyy säteen edestä säteen taakse. Heti säteen takana sulaa jähmettyy ja syntyy hitsi. Jos hitsausnopeutta pudotetaan liikaa tehon pysyessä vakiona, kasvaa sulan määrä suhteessa energiantuonnin kasvuun ja avaimenreikä luhistuu gravitaation vaikutuksesta. CO₂-laserilla syntyvä plasmapiilvi häiritsee pienillä nopeuksilla. Avaimenreikähitsaukseen voidaan käyttää edellä mainittua CO₂-laseria tai Nd:YAG-laseria. Kuvassa neljä on esitetty avaimenreikä hitsauksen periaate. (Kujanpää et al. 2005, s. 158–159.).

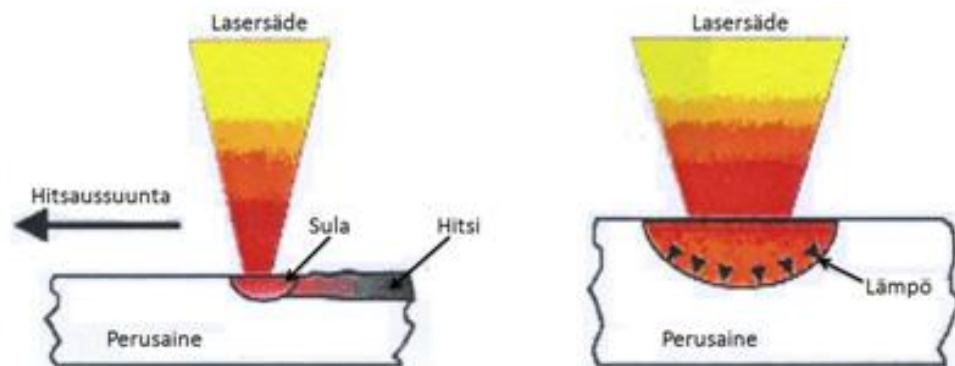


Kuva 4. Avaimenreikähitsauksen periaate. (Trumpf, 2010)

4.2 Sulattava hitsaus

Jos avaimenreikään tarvittavaa tehotiheyttä ei saavuteta, voidaan hitsata myös pienemmällä tehotiheydellä. Tällöin tapahtuva hitsaus ei ole lävistävää hitsausta vaan

materiaalit sulavat yhteen. Sulattava hitsaus muistuttaa tavanomaista kaarihitsausta. Lasersäde kuumentaa pinnan ja lämpö siirtyy materiaaliin johtumalla ja sekoituksen avulla sulattaen sitä. Prosessi tuottaa leveän ja matalan hitsin ja sen railotoleranssit ovat väljemmät. Sulattava hitsaus soveltuu hyvin ohuille materiaaleille. Hitsausta tehdään yleensä suuritehoisilla Nd:YAG- ja/tai diodilasereilla. Kuva viisi esittää sulattavan laserhitsauksen periaatteen. (Salminen ja Siltanen 2003, s. 32)



Kuva 5. Sulattava laserhitsaus. (Salminen ja Siltanen 2003, s. 32)

4.3 Pulssihitsaus

Pulssihitsauksessa tehoa vaihdellaan säännöllisesti ajan mukana. Pulssituksen tarkoituksena on saavuttaa suurempi energiatiheys ja sitä kautta suurempi tunkeuma tai pienempi lämmöntuonti. Yleensä pulssihitsauksessa käytetään Nd:YAG- tai CO₂-laseria ja tulevaisuudessa myös kuitu- ja kiekkolasereita. Parhaiten näistä pulssihitsaukseen soveltuu Nd:YAG-laser, koska sen tyypillinen pulssi- ja maksimitehon välinen suhde on 20/1 (Kujanpää 2005, s. 159–160).

4.4 Käytettävät railomuodot

Tärkeimmät laserhitsauksen railomuodot ovat päittäis-, laippa-, limi- ja T-liitokset. Päittäisliitoksen etuja ovat tasainen jännitys jakauma ja muodonmuutosten vähäisyys. Laserhitsin suuri syvyys/leveys-suhde ja kapean I-railon käyttö antavat lisämahdollisuuksia hitsien sijoittelulle. Laippa- ja limiliitosten etuja on niiden lievemmat railotoleranssit. Tällöin on myös huomioitava liitospinnalla olevan hitsin todellinen suuruus. Jatkuvan laserhitsin väsymisominaisuudet ovat paremmat kuin pistehitsin. Siksi autoteollisuus on siirtynyt käyttämään laserhitsausta pistehitsin sijaan. Lisäksi laserhitsaus vaatii kapeamman laipan, joka tuo materiaalisäästöjä. Laserhitsaus soveltuu myös hyvin eri paksuisten materiaalien liittämiseen (Kujanpää et al. 2005, s. 174).

Taulukko 1. Laserhitsattavan liitoksen vaatimukset (Kujanpää et al. 2005, s. 175).

Vaatimukset	Valmistelu
Terävät railoreunat	Lastuava työstö, poraus, sorvaus, jrsintä
Railo perusaineen pinnan normaalin suuntainen	Levyosilla laserleikkaus
Pinnan karheus alle max. railon leveyden	Jos osat nakerrettu: käytettävä pienintä mahdollista syöttöä ($1-3 \text{ mm/isku}$)
Kapea sulavyöhyke edellyttää tiukkaa ilmaraon ja paikoituksen toleranssien valvontaa	Riippuu polttopisteen halkaisijasta, hitsin muodosta, hitsin tyypistä ja kappaleen muodosta, sekä lisäksi perusaineen metallurgisista ominaisuuksista

4.5 Laserhitsauksen etuja ja ongelmia

Normaalin kaarihitsauksen tuottavuutta mitataan yleensä yksiköllä kg/h ja mitä suurempi tulos sitä parempi tuottavuus. Tämä ei sovellu käytettäväksi sädeprosesseilla, koska tavoitteena on sulattaa osat yhteen eikä sulattaa mahdollisimman paljon materiaalia aikayksikköä kohden. Tällöin voidaan avuksi ottaa liittämisen tehokkuus-kaava (kaava numero yksi), joka kuvaa hitsien poikkileikkauksien määrää aikayksikköä kohden. (Salminen A. et al. 2010, s. 1020)

$$E_J = \frac{s}{(P_L V_W)} \quad (1)$$

Kaavassa yksi s on kappaleen paksuus (mm), P_L on teho kappaleen pinnalla (W) ja V_W on hitsausnopeus (mm/s).

Laserhitsauksen etujen maksimointi edellyttää tuotteen uudelleen suunnittelua, tarkkoja sovitteita ja toimivaa railonseurantaa. Laserhitsauksen etuja ovat

- pieni lämmöntuonti
- suuri hitsausnopeus
- suuri hitsin leveys/syvyys-suhde
- pienet muodonmuutokset
- soveltuvuus joustaviin tuotantojärjestelmiin
- robotisointimahdollisuudet ovat hyvät
- säteen jako useaan työasemaan mahdollista
- hyvä optiikan suojaus mahdollistaa hitsauksen kaikissa asennoissa
- mahdollistaa hitsien sijoittamisen paikkoihin, joihin päästään vain toiselta puolelta
- useiden kerrosten liittäminen yhdeltä puolelta yhdellä palolla mahdollista

- suunnitteluvaihtoehdot laajenevat

(Kujanpää et al. 2005, s. 24, 157–158)

Laserhitsauksen ongelmia

- kalliit hankintakustannukset
- vaatii tarkat liitossovitteet ja toimivan railonseurannan.

(Steen 2003, s.160), (Kujanpää et al. 2005, s. 24)

5 LASERHITSAUKSEN PARAMETRIT

Tässä kappaleessa käydään läpi laserhitsaukseen vaikuttavat parametrit.

5.1 Sädeparametrit

Sädeparametreilla kuvataan säteen ominaisuuksia. Sädeparametreilla on suuri vaikutus suoritettavaan työstön laatuun ja siksi niiden optimoiminen onkin hyvin tärkeää. Tässä kappaleessa käydään läpi tärkeimpiä parametreja sekä niiden vaikutusta.

5.1.1 Aallonpituus

Aallonpituus on paikan suhteen kahden vierekkäisen samassa vaiheessa olevan pisteen välinen etäisyys. Etäisyys voidaan laskea mistä kohdasta tahansa, mutta helpoimmin se saadaan aallon huipusta tai pohjasta. Aallonpituus määrittää myös

näkyvän valon värin ja valokvantin sisältämän energian määrän. (Kujanpää et al. 2005, s. 40)

Aallonpituus vaikuttaa laserhitsauksen yhteydessä säteen absorptioon. Keyhole-hitsauksen suuresta absorptiosta johtuen on vain pieni toiminnallinen ero tapahtuuko hitsaus pitkällä vai lyhyillä aallonpituuksilla. Sulattavassa hitsauksessa on absorptiolla merkittävämpi rooli, koska teho pitää saada ”imeytymään” työkappaleen pintaan. Tällöin pinta ei saa olla liian heijastava, koska säde ei absorpoidu pintaan vaan heijastuu siitä pois. (Steen 2003, s. 121)

5.1.2 Absorptio ja heijastuminen

Valon osuessa materiaaliin osa siitä heijastuu rajapinnalta takaisin tulosuuntaan ja osa taittuu materiaalin sisään ja kulkeutuu sen läpi. Metalleilla valo absorpoituu metallin sisään ja osa heijastuu pois. Absorptoitunut valo lämmittää metallia ja lopulta metalli alkaa sulaa. Tällöin materiaali ottaa vastaan valon kuljettaman energian. Absorptioon vaikuttaa useita tekijöitä, joista tärkeimmät ovat materiaali, työkappaleen lämpötila, valon aallonpituus ja työkappaleen pinnan laatu. Absorptioon vaikuttavat myös säteen intensiteetti ja säteenlaatu. Suuremmalla intensiteetillä pienempi teho riittää nostamaan työkappaleen lämpötilaa. Säteenlaadun ja tehosiheyden merkitys korostuu työstettäessä hyvin heijastavia materiaaleja. Absorptio huononee tai paranee lämpötilan funktiona, kun säde kohdistetaan pintaan kohtisuorassa kulmassa. Nd:YAG-lasereiden aallonpituudella lämpötilan nousu heikentää absorptiota. (Ion 2005, s. 168–169), (Kujanpää et al. 2005, s. 44–45)

5.1.3 Säteenlaatu

Säteenlaatu ilmoitetaan sädeparametritulolla. Sädeparametri tulo on esitetty kaavassa kaksi.

$$BPP = D \frac{\theta}{4} \quad (2)$$

Kaavassa kaksi BPP on lyhenne sanoista beam parameter product, D on säteen poikkileikkauksen halkaisija millimetreissä ja θ on säteen divergenssi (mrad). Sädeparametritulo kuvaa, miten hyvin sädettä voidaan fokusoida. Jotta säde saadaan vietyä kuituun, on fokusoidun säteen halkaisija oltava kuidun halkaisijaa pienempi. Sisään menneen ja ulos tulleen säteen laatu on yleensä yhtä hyvä. Kuidun kaarevuudet ja pienet häviöt kuidussa heikentävät säteen laatua. (Ion 2005, s. 67)

Hiilidioksidilasereissa laseroivaa väliainetta viritetään johtamalla siihen sähkövirtaa. Vuritykseen voidaan käyttää tasavirtaa tai vaihtovirtaa RF-taajudella. Vaihtovirtaviritys on säilyttänyt asemansa pienempitehoisissa lasereissa lähinnä yksinkertaisemman ja edullisemman rakenteensa ansiosta. Kuitenkin se on käytössä myös suurempitehoisissa, 6 – 8 kW:n poikittaisvirtauslasereissa. (Silfvast 2004, s. 511, Buchfink 2006, s.46-47, Ready 2001, s.27-35)

Puhuttaessa optisen kuidun kautta tuodusta säteestä käytetään sädeparametrituloa muodossa (Ion 2005, s. 67):

$$BPP = \frac{d_B * \theta}{4} = M^2 \frac{\lambda}{\pi} = \frac{\lambda}{K * \pi} \quad (3)$$

Kaavassa kolme, d_b on säteen poikkileikkauksen halkaisija, λ on aallonpituus, θ on divergenssikulma, M^2 on säteen laadun M^2 -luku ja K on säteenlaadun K -luku.

5.1.4 Divergenssi

Fokusoinnissa säteen poikkipinta-alaa pienennetään, jolloin säteen tehotiheys pinta-alayksikköä kohden kasvaa. Fokuspisteen jälkeen lasersäteen poikkipinta-ala kasvaa matkan funktiona kuljettaessa fokusoivasta linssistä tai peilistä poispäin. Tätä syntyvää poikkileikkauksen halkaisijan muutosta kutsutaan divergenssiksi, joka on säteen hajaantumiskulman puolikas. Yksikkönä divergenssin ilmoittamisessa käytetään milliradiaania, [mrad]. (Ion 2005, s. 66)

5.2 Työstöparametrit

Työstöparametrit riippuvat työstettävästä materiaalista, käytössä olevasta laserista ja laserlaitteistosta. Työstöparametreja voidaan muuttaa hitsauksen suorituksen aikana. Tässä kappaleessa on esitelty yleisimpiä työstöparametreja.

5.2.1 Teho ja hitsausnopeus

Laserin tehoa tarkasteltaessa on hyvä erottaa laserin lähtöteho ja ulostuloteho. Ero näiden välillä muodostuu lasersäteen kuljettamisessa käytettyjen optisten komponenttien määrästä ja niissä tapahtuvista tehohäviöistä. Siksi optisten komponenttien hyötysuhteiden tulisi olla hyviä, ettei syntyisi suurta tehohäviötä. Työstön

kannalta tärkeintä on tietää työkappaleen pinnalle tulevan tehon määrä. Tunkeuman syvyys kasvaa tehon kasvaessa. Se ei kuitenkaan ole suoraan verrannolliseen tehoon. Fokusoitavuudella ja aallonpituudella on suuri merkitys tunkeuman suuruuteen. Hyvälaatuisella säteellä voidaan saada aikaiseksi jopa kaksi kertaa syvempi tunkeuma kuin huonolaatuisella säteellä. (Kujanpää et al. 2005, s. 166)

Tunkeuman syvyys pienenee hitsausnopeuden kasvaessa käytettäessä vakioitehoa. Jokaiselle materiaalille ja ainepaksuudelle löytyy useita yhdistelmiä hitsausnopeuden ja muiden parametrien välille. Hitsausnopeuden alaraja määräytyy avaimenreiän aukipysymisen ja yläraja läpätunkeuman saavuttamisen mukaan. Edellä mainitut rajat ovat karkeita ja niiden väliin voidaan asettaa tiukempia rajoja, muun muassa hitsausvirheiden ja hitsin ominaisuuksien mukaan. Hitsiltä vaaditaan useissa tapauksissa myös tietty leveys, joten myös railotoleranssit ja hitsin leveys asettavat rajoja. Kasvanut hitsin leveys merkitsee myös hitsausnopeuden alentamista. Tällöin ei voida "ajaa" maksiminopeudella. Käytännön kokeilla etsitään paras kombinaatio parametrien välille. (Kujanpää et al. 2005. s. 166)

5.2.2 Polttopisteen paikka

Polttopisteen paikalla tarkoitetaan polttopisteen etäisyyttä työkappaleen yläpinnasta. Oletusarvona pidetään 0 mm. Tämä tarkoittaa, että polttopiste on kappaleen pinnalla. Positiivinen polttopisteen paikka on pinnan yläpuolella ja negatiivinen pinnan alapuolella. Yleensä säde fokusoidaan kappaleen pinnalle tai noin 25 % työstettävästä ainepaksuudesta pinnan alapuolelle. Polttopisteen paikan raja-arvot määräytyvät prosessin reunaehdoista, ennen kaikkea tarvittavasta tehottiheydestä. Tehottiheyden on ylitettävä tietty taso, jotta materiaali höyrystyy. Oltaessa liian kaukana polttopisteestä riski intensiteetin alenemisesta kasvaa. Syvyysterävyys on kriittisimmillään ± 1 mm. Tämä asettaa liitoksen yläpinnan toleranssin. Riittäväillä tehoilla polttopisteen paikan

merkitys pienenee. Lyhyillä aallonpituuksilla säteen absorptio on parempi ja polttopisteen asema ei tästä syystä ole niin tarkka. (Kujanpää et al. 2005, s. 168–168)

5.2.3 Polttopisteen poikkileikkauksen halkaisija ja polttoväli

Fokusoinnilla pienennetään lasersäteen koko raakasäteestä niin pieneksi, että säteen intensiteetti kasvaa hitsauksen edellyttämälle tasolle. Fokusoinnin muuttujia ovat polttoväli, polttopisteen syvyys ja polttopisteen halkaisija (Kujanpää 2005, s. 81). Polttopisteen minimiä rajoittaa säteen fokusoitavuus. Polttopisteen koko voi muuttua laitekohtaisesti tehon mukana. Nopeuden kasvaessa pyritään valitsemaan lyhyt polttoväli, jolloin polttopiste on pienimmillään. Pitkän polttovälin etuna on, että ahtaassa paikassa olevan liitoksen tavoitettavuus paranee ja optiikan altistuminen roiskeille pienenee. (Kujanpää et al. 2005, s. 167)

5.2.4 Prosessikaasut ja kaasunpaine

Lasertyöstöasemissa käytetään tyypillisesti kahdenlaisia kaasuja, resonaattori- ja prosessikaasuja. Resonaattorikaasut ovat käytössä vain CO₂- ja joidenkin hienotyöstölasereiden kanssa. Prosessikaasut taas ovat olennainen osa kaikkia laserprosesseja. (Kujanpää et al. 2005, s. 111.)

Prosessikaasujen tehtävä on esimerkiksi avustaa leikkaustapahtumaa, suojata hitsisulaa hitsauksessa ja pinnoituksessa, kuljettaa pinnoituksessa käytettäviä jauhepartikkeleita ja suojata hitsiä hapettumiselta (Kujanpää et al. 2005, s. 112).

Suojakaasu tuodaan samansuuntaisesti säteen kanssa. Juuren puolen kaasusuojaus voidaan tehdä kuten perinteisessä hitsauksessa. Herkästi hapettuvia materiaaleja voidaan suojata hitsaamalla esimerkiksi kaasuatmosfäärissä tai kaasukengällä. Liian suuri suojakaasun virtausnopeus voi romahduttaa avaimenreiän, jolloin hitsiin syntyy paljon huokosia. Taulukossa kaksi on käsitelty lasertyöstössä käytössä olevat työstökaasut. (Kujanpää et al. 2005, s. 112)

Taulukko 2. Lasertyöstössä käytettävät työstökaasut (Kujanpää et al. 2005, s. 112).

Leikkauskaasut	happi, typpi, argon, paineilma
Hitsauksen suojakaasut	argon, helium, typpi, seoskaasut
Pinnoituskaasut	argon, helium, seoskaasut
Karkaisu	argon

Helium on yleinen valinta suojakaasuksi sen korkean ionisoitumisenergian, matalan molekyylin painon ja suuren lämmönjohtavuuden takia. Helium on kuitenkin kallista ja sillä on alhainen tiheys, mikä alentaa peitto- ja suojausominaisuuksia hitsatessa (Ion 2005, s. 497–408).

Argon on yleensä hyvä vaihtoehto heliumille, kun hitsataan lasereilla, joiden säde on lähellä infrapuna-aluetta, eli niin sanotulla NIR (near infra red) –alueella eli n. 1000 nm. Argonilla on pienempi ionisoitumisenergia kuin heliumilla, joten se ei ole yhtä hyvä plasman kontrollointiin. Argonin tiheys on kymmenen kertaa suurempi kuin heliumin, joten se suojaa hitsisulaa heliumia paremmin. Argon-heliumseoksella (50 % -suhteella) voidaan parantaa hitsauksen taloutta vaarantamatta plasman kontrollia (Ion 2005, s. 408.).

Massatuotannossa typpi on hyvä vaihtoehto heliumille. Typpi vaatii kuitenkin suuren virtausnopeuden. Typen käyttö lisää niukkaseosteisissa teräksissä martensiittista ja bainiittista rakennetta, joka lisää hitsin kovuutta ja halkeiluriskiä. Hiilidioksidi on verrattain halpaa ja ominaisuuksiltaan hyvää. Suojakaasuun happea lisäämällä saadaan säteeseen ja siten hitsiin lisää energiaa eksotermisen reaktion kautta (Ion 2005, s. 408). Taulukossa kolme on esitelty yleisesti käytössä olevien hitsauskaasujen ominaisuuksia.

Taulukko 3. Kaasujen ominaisuuksia hitsauksessa (Ion 2005, s. 407).

Kaasu	Molekyylin paino	Lämmönjohtavuus (W/mK)	1. Ionisoitumis-potentiaali (eV)	Tiheys (g/L)	Suhteutettu-hinta
He	4	0.405	24.46	0.1769	1
Ar	40	0.049	15.68	1.7828	0.4
N ₂	28	0.076	15.65	1.2057	0.1
O ₂	16	0.082	12.50	1.4289	0.1
CO ₂	44	0.080	14.41	1.9768	0.1

Crossjet eli ilmaveitsi ei ole varsinainen prosessikaasu, mutta sitä käytetään usein hitsausjärjestelmissä suojaamaan hitsausoptiikkaa. Se voidaan toteuttaa paineilmalla. Crossjetin tarkoituksena on estää pölyn, huurujen ja roiskeiden pääsy optiikan pinnalle (suojaikkuna, linssit, peilit). (Hovikorpi, 2008)

5.2.5 Suutin- ja työetäisyys

Suojakaasun tuontiin voidaan käyttää erilaisia suuttimia, joilla pyritään tuomaan suojakaasu mahdollisimman hyvin sulan ympärille. Suuttimen tarkoitus on ohjata suojakaasun virtaus mahdollisimman laminaarina työkappaleen pinnalle.

Työetäisyydellä tarkoitetaan hitsaussuuttimen etäisyyttä työkappaleesta. Hitsauksessa työetäisyys on kiinteä hitsauksen aikana. Työetäisyys määritetään vähentämällä polttovälistä fokusointioptiikan kiinnitysten lisäksi työkappaleen ja optiikan välillä olevan suuttimen dimensiot. Työetäisyys on usein noin 50 mm, mutta joissain tapauksissa voidaan käyttää jopa 500 mm työetäisyyttä (Kujanpää et al. 2005, s. 168).

Suojakaasusuuttimena voidaan käyttää ulkoista kaasuntuontiputkea, joko säteen toisella tai molemmilla puolilla, kaasukenkää tai koaksiaalista suutinta. Ulkoinen kaasuputki on yleensä kiinnitetty suoraan hitsauspähän ja putkimaista ratkaisua käytetään yleensä pistemäisten hitsien valmistuksessa. Kaasukenkää käytettäessä saadaan hyvä kaasusuojaus. Kaasukenkä levittää suojakaasun laajalle alueelle, jolloin hitsin jäähtymisen aikainen suojaus saadaan riittäväksi. Koaksiaalista suutinta käytettäessä suojakaasu tulee säteen kanssa samansuuntaisesti ja samasta suuttimesta. Menetelmä soveltuu parhaiten robottihitsaukseen. (Kujanpää, Salminen 1998, s. 25)

5.3 Perusaineen parametrit

Perusaineen parametreihin kuuluvat työstettävä ainepaksuus, työkappaleen pinnanlaatu, materiaaliominaisuudet, materiaalin kemiallinen koostumus, hitsattavan liitoksen ilmarako ja railopintojen laatu.

5.3.1 Perusaineen paksuus

Laserhitsauksessa laserin teho määrittää hitsattavan ainepaksuuden. Vakioteholla hitsattaessa läpituokeumaa on hitsausnopeutta alennettava ainepaksuuden kasvaessa. Paksuilla materiaaleilla tarvitaan paljon tehoa, mikäli halutaan hitsata lävistävänä keyhole-hitsauksena läpituokeumaa. Vajaatunkeumahitsauksessa hitsausnopeudella voidaan vaikuttaa syntyvän hitsin muotoon. Hitsausnopeuden kasvaessa hitsi kapenee ja syvenee ja päinvastoin. (Kujanpää, Salminen 1998, s. 13)

5.3.2 Työkappaleen pinnanlaatu ja puhtaus

Työkappaleen pinnan tulee olla myös puhdas kaikista epäpuhtauksista. Epäpuhtaudet vaikuttavat negatiivisesti syntyvän hitsin laatuun. Hitsattavalla pinnalla oleva pöly, rasva, valssihilse, öljy ja ruoste on poistettava ennen hitsausta. Nämä saattavat aiheuttaa hitsiin esimerkiksi huokosia. (Kujanpää, Salminen 1998, s. 13)

Säde heijastuu helposti kirkkaista pinnoista takaisin tulosuuntaan, eikä tarpeeksi suurta absorptiota ja tehosiheyttä kappaleen pinnalla saavuteta. Kirkkaiden pintojen absorptiota voidaan lisätä esimerkiksi ruiskuttamalla pintaan tummaa ainetta, joka sitten hitsauksen jälkeen poistetaan pinnasta. (Kujanpää, Salminen 1998, s. 14)

5.3.3 Materiaalin ominaisuudet ja kemiallinen koostumus

Materiaalin koostumus on laserhitsauksessa tärkeä tekijä. Hiilipitoisuuden kasvaessa yli 0,25 %:iin tulee karkenemis-, kylmähalkeilu- ja kuumahalkeiluongelmia. Huokoisuutta ja kuumahalkeilua lisäävät rikin ja fosforin kaltaiset epäpuhtaudet. Ongelmia hitsauksessa

aiheuttavat myös materiaalin hyvä lämmönjohtavuus ja suuri pinnan heijastavuus. (Kujanpää et al. 2005, s. 173), (Rautaruukki 2003, s. 44)

Ruostumattomat teräkset ovat tavallisten ja seostamattomien teräksien tavoin hyvin laserhitsattavissa. Austeniittisten ruostumattomien teräksien huono lämmönjohtavuus tuottaa hiiliteräksiin verrattuna syvemmän ja kapeamman tunkeuman. Yleensä hitsauksessa esiintyvät ongelmat johtuvat työkappaleiden asetusvirheistä ja osavalmistuksen epätarkkuudesta. (Kujanpää et al. 2005, s. 173, 279)

6 TERÄSTEN HITSAUS

Terästen hitsattavuudessa on huomioitava niiden valmistusmenetelmät sekä raaka-aineet. Teräksen rakenteeseen syntyvät muutokset voivat heikentää teräksen lujuutta, muodonmuutoskykyä tai iskusitkeysominaisuuksia. Rakenteen muutokset voivat myös aiheuttaa kuuma- tai kylmähalkeamia tai lamellirepeilyä. Myös erilaiset työstömenetelmät kuten kylmämuovaus, terminen leikkaus, kuumilla oikaisu ja erilaiset lämpökäsittelyt aiheuttavat muutoksia teräksen rakenteessa. (Rautaruukki 2003, s. 16)

Määritelmän mukaan teräksen hitsattavuus on hyvä, kun siihen pystytään tekemään hitsausliitos, joka ominaisuuksiltaan ja rakenteeseen kohdistuvilta vaatimuksilta täyttää asetetut vaatimukset. (Rautaruukki 2003, s. 16)

Hitsauksen aikana liitoksen huippulämpötila vaihtelee sulan teräksen lämpötilasta hyvin kapealla alueella käytettyyn lämpötilaan. Lämmöntuonnin johdosta hitsauksiin kohdistuu erilainen lämpökäsittelyvaikutus ja erilaisen mikrorakenteen omaavia vyöhykkeitä syntyy

hitsin vaikutuksen alueelle. Liitoksen ja sen eri vyöhykkeiden ominaisuudet määräytyvät syntyneen mikrorakenteen perusteella. (Rautaruukki 2003, s. 18)

Teräksessä on myös liuenneena erilaisia kaasuja, kuten typpi, vety ja happi. Happi aiheuttaa huokoisuutta ja huonontaa iskusitkeyttä. Vety ja typpi huonontavat vanhenemisen kestävyyttä ja vety lisää myös kylmähalkeiluriskiä. (Rautaruukki 2003, s. 18)

Hitsiliitos voidaan jakaa metallurgisesti kolmeen vyöhykkeeseen

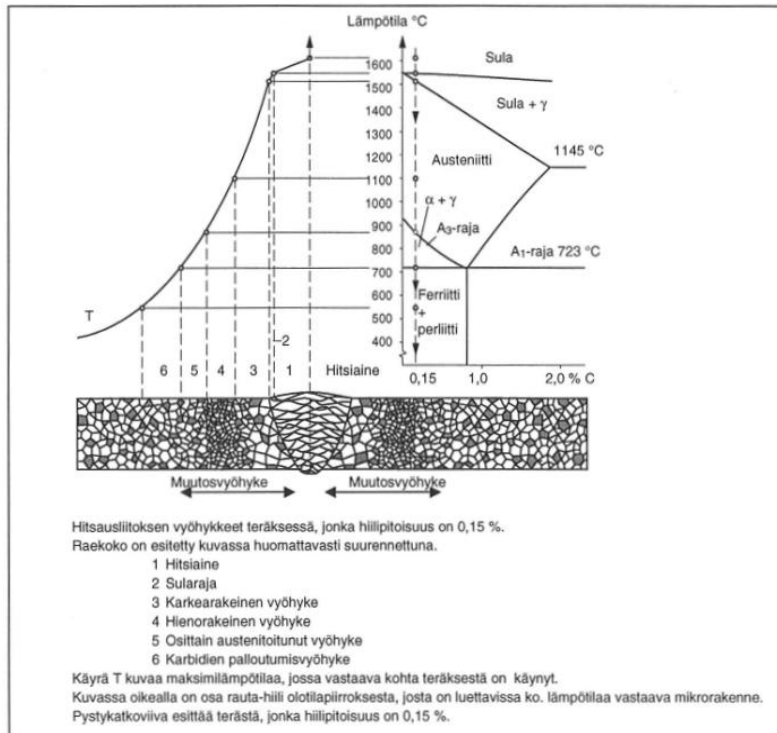
- Hitsiaine
- Muutosvyöhyke (HAZ)
- Lämpövyöhyke

(Rautaruukki 2003, s. 18)

Hitsiaine muodostuu sulaneesta hitsiaineesta sekä siihen sekoittuneesta sulasta perusaineesta. Sekoittumisaste, eli perusaineen osuus hitsiaineesta, määräytyy käytetystä hitsausprosessista, railosta ja hitsausparametreista. Sulassa tilassa olevan hitsiaineen ja jähmeänä pysyneen perusaineen muutosvyöhykkeen (lämpövyöhykkeen) välissä on sularaja. Se muodostuu joko kokonaan tai osittain sulana olleesta perusaineesta. Muutosvyöhyke voidaan jakaa kolmeen vyöhykkeeseen

- Karkearakeinen vyöhyke (ylikuumentunut vyöhyke)
- Hienorakeinen vyöhyke (normalisoitunut vyöhyke)
- Kolmas vyöhyke on osittain austenisoitunut

(Rautaruukki 2003, s. 19)



Kuva 6. Kaaviollinen kuva hitsausliitoksen vyöhykkeistä. (Rautaruukki 2003, s. 18)

6.1 Jäähtymisaika

Hitsiliitoksen ominaisuudet riippuvat pitkälti liitoksen jähmettymisnopeudesta. Jähmettymisnopeuteen vaikuttavat lähinnä hitsauksen lämmöntuonti, materiaalin paksuus, liitosmuoto ja lämpötila. Hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen ominaisuuksien kannalta merkittävimmät kiderakenteen muutokset muodostuvat liitoksen jäähtyessä lämpötilavälillä 800–500 °C. Jäähtymisnopeutta kuvaavana suurena käytetään jäähtymisaikaa $t_{8/5}$, joka tarkoittaa edellä mainitun lämpötila-alueen ohittamiseen kulunutta aikaa. Tähän aikaan voidaan vaikuttaa esi- ja jälkikäsitteilyillä, jolloin parannetaan mahdollisuuksia saavuttaa halutut hitsiliitoksen ominaisuudet. (Rautaruukki 2003, s. 23)

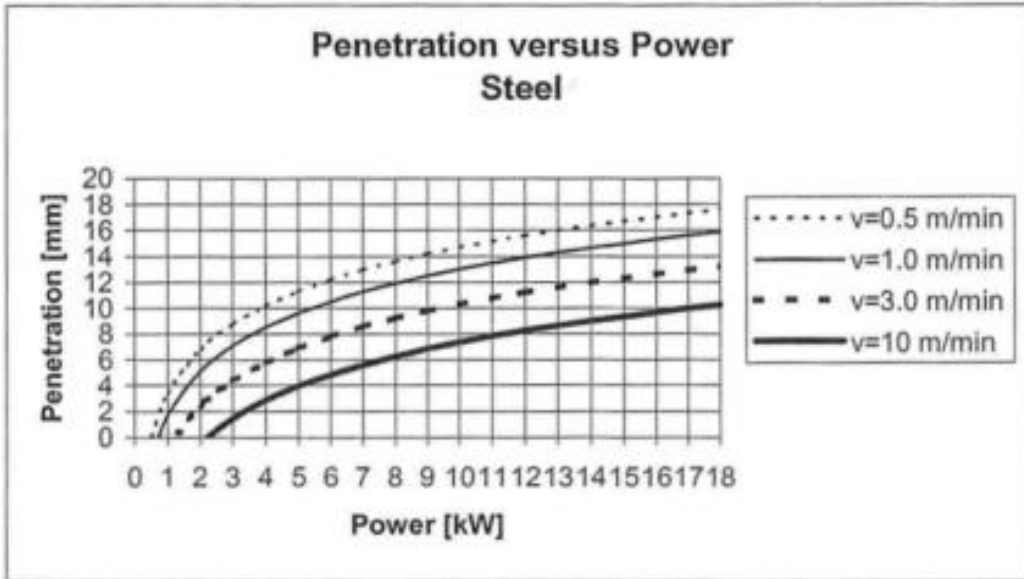
7 TUTKIMUSTULOKSIA

Tässä kappaleessa käydään läpi lasertyypeittäin tehtyjä tutkimuksia. Tutkimuksiin viitataan niiden tekijän ja vuoden mukaan.

7.1 CO₂-laser-tutkimukset

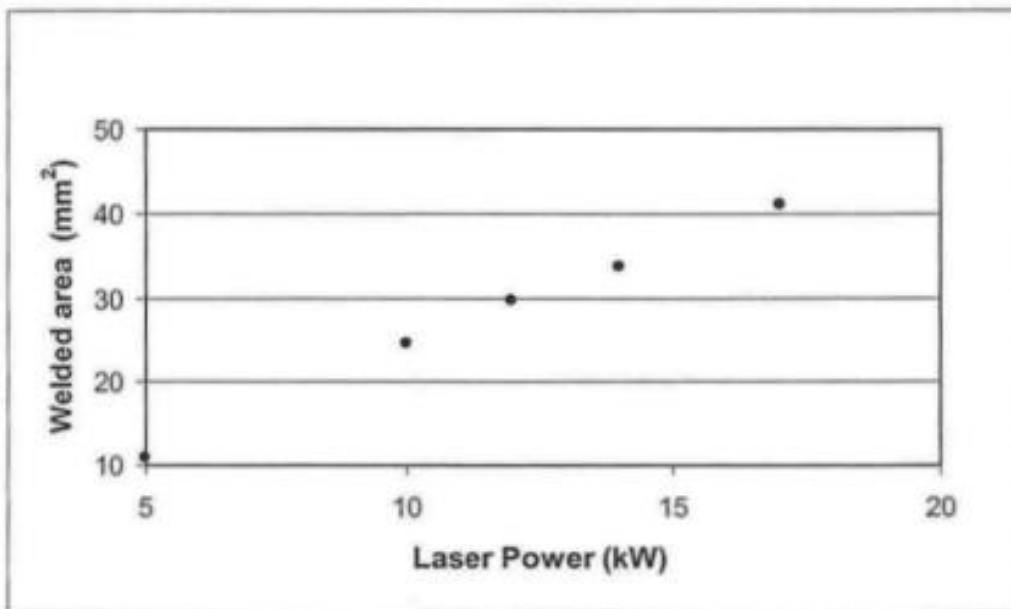
Tanskalaisen J. Weldingh & co. tekemässä tutkimuksessa oli käytössä 17 kW:n Rofin sinarin CO₂-laser. Polttoväli oli 300 mm, polttopisteen asema 3 mm kappaleen pinnan yläpuolella, suojakaasuna käytettiin heliumia (virtausnopeus 20 l/min) ja prosessiin tuotiin myös heliumia plasmakaasuna samalla virtausnopeudella 2 mm suuttimen läpi. Hitsit tehtiin 40 mm tai 20 mm ainepaksuiseen levyn pintaan.

Kokeissa tarkasteltiin lasertehon vaikutusta tunkeumaan ja syntyneen hitsin poikkipinta-alaan sekä hitsausnopeuden vaikutusta tunkeumaan. Aikaisemmissa tutkimuksissa matalille lasertehoille on todettu, että saavutettu tunkeuma on lineaarisesti riippuvainen käytössä olevasta lasertehosta. Tämän suuremmilla tehoilla tehdyn tutkimuksen mukaan, suurilla tehoilla näin ei ole, vaan seuraavasta kuvasta kuusi voidaan havaita tunkeuman ja tehon välillä olevan logaritminen riippuvuus.



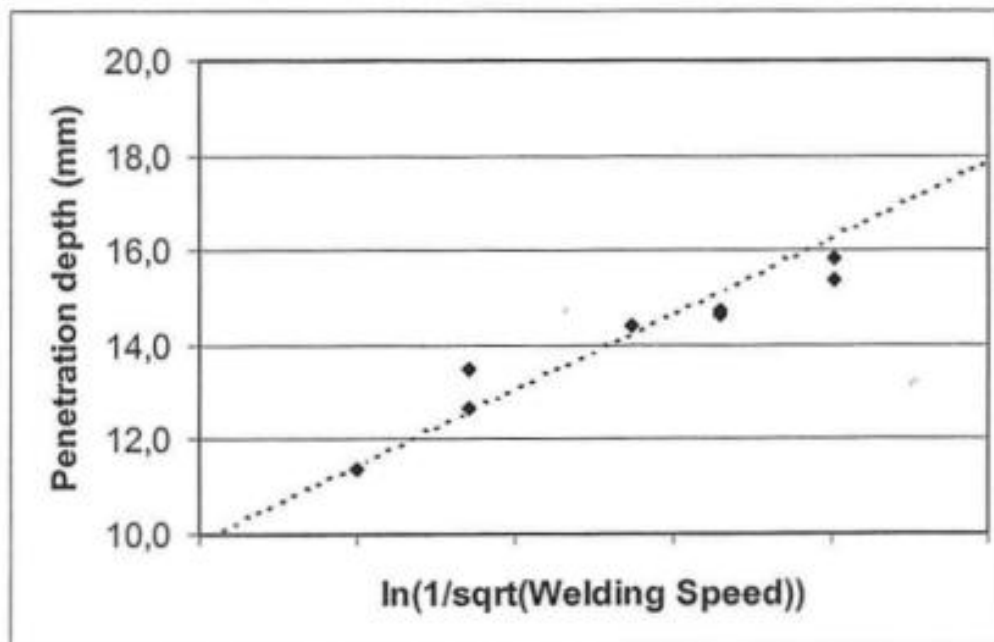
Kuva 7. Laser tehon ja saavutetun tunkeuman suhde.

Kuitenkaan kaikkea lineaarista riippuvutta lasertehon ja hitsausnopeuden välillä ei hävitetä, vaan lineaarinen riippuvuus säilyy saadun hitsin poikkipinta-alan ja lasertehon suhteessa. Tämä suhde on esitetty kuvassa kahdeksan.



Kuva 8. Syntyneen hitsin poikkipinta-ala suhteessa lasertehoon.

Kokeissa tehtiin malli ideaalisesta tunkeumasta kaavalle, jossa otetaan logaritmi hitsausnopeuden käänteisestä neliöjuuresta. Näin saatiin kuvassa yhdeksän oleva kuvaaja, missä näkyy kuinka hyvin oletettu malli toimii.



Kuva 9. Tunkeuman suhde käänteiseen hitsausnopeuteen. Pisteviiva on tehty malli.

7.2 Kuitulaser-tutkimukset

Luulajan teknillisessä yliopistossa A. Kaplan ja G. Wiklund ovat tehneet tutkimuksen 15 kW:n kuitulaserin käytössä paksujen ruostumattomien terästen hitsauksesta. Heidän tutkimuksessa käytettiin AISI 304 terästä 8 mm ja 16 mm ainevahvuuksilla. Kokeessa simuloitiin päittäisliitosta, hitsaamalla pelkällä säteellä suoraan levyyn nolla ilmaraolla. Kokeissa käytettiin IPG:n valmistamaa YLR-15000 diodi-pumpattua kuitulaseria. Säde vietiin resonaattorilta työkohteeseen 30 metriä pitkällä halkaisijaltaan 200 μm olevalla kuidulla. Tutkimuksessa varioitiin säteen tehoa (P), hitsausnopeutta (v), polttopisteen asemaa välillä -10 mm - +10 mm (z_0) ja optiikan polttoväliä (f). Käytetyn laitteiston ädeparametritulo oli 10,4 mm* mrad ja säteenlaadun K-luku oli 0,033.

Kokeissa tehtiin yli 100 parametrikokeilua 8 mm paksulle materiaalille. 16 mm materiaalille tehtiin vain muutamia kokeita. Hitsattaessa 8 mm paksua materiaalia 15 kW:n teholla hitsausnopeudella 7 m/min havaittiin, että prosessi-ikkuna hitseille oli todella pieni. Kuitenkin 7,5 kW:lla ja 3 m/min havaittiin, että hitsaus oli vakaata.

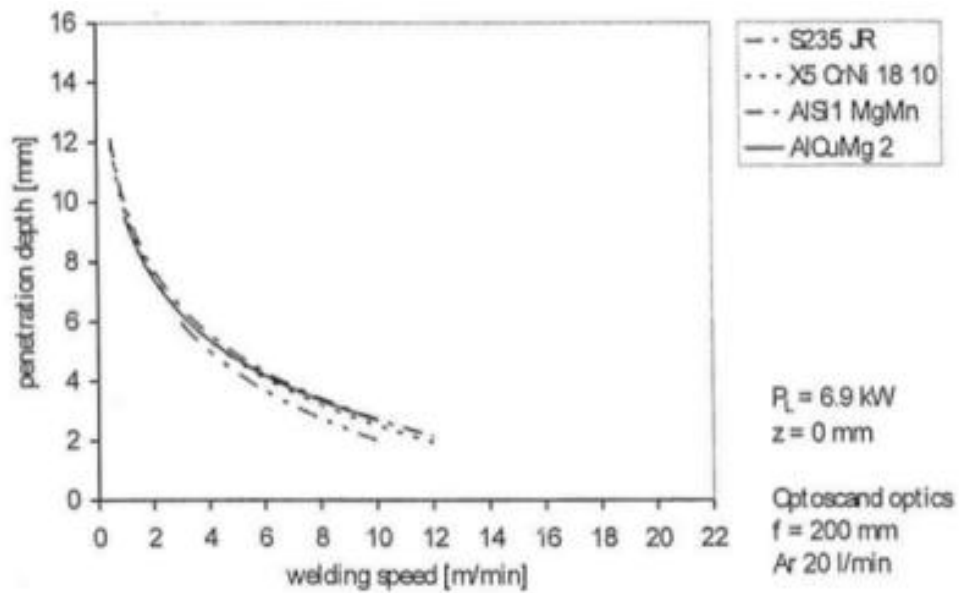
C. Thomy & co. ovat tehneet tutkimuksen terästen ja alumiinien hitsauksesta Saksassa vuonna 2005. He käyttivät kokeissaan IPG:n kuitulaseria. He ovat tehneet tutkimusta myös vuosina 2003 ja 2004. Taulukossa neljä on esitetty tutkimuksissa käytetyt laserit eri vuosilta.

Taulukko 4. Tutkimuksissa käytetyt laservirtalähteet.

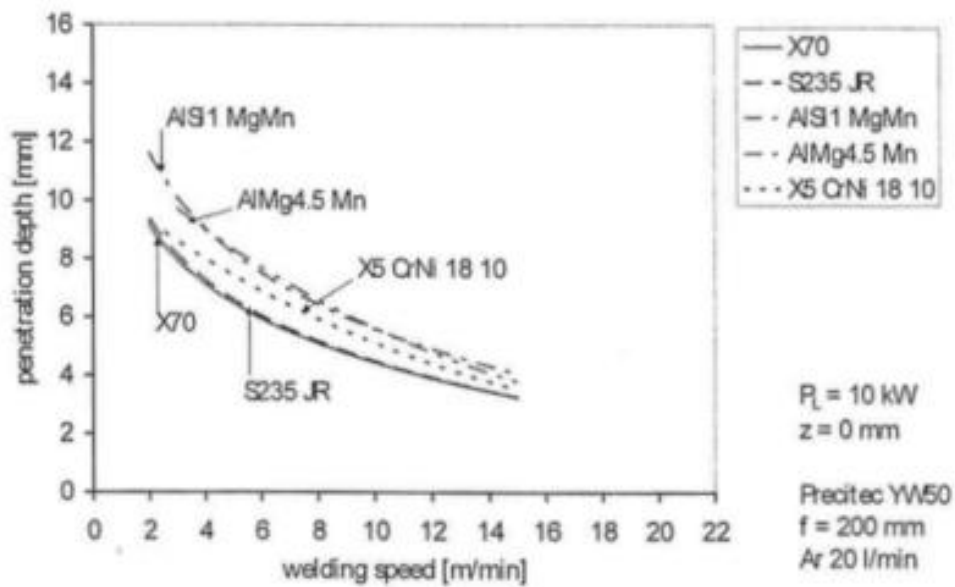
Laser- tyyppi	Tutkimus- vuosi	Maksimiteho työkappaleen pinnalla [kW]	Kuidun halkaisija [μm]	Polttoväli [mm]	Poltto- pisteen halkaisija [μm]	BPP [mm* mrad]
YLR- 17000	2005	16,7	200	250	420	11,7
YLR- 10000	2004	10,5	200	200	360	11,6
YLR- 7000	2003	6,9	300	200	510	18,5

Kuvassa 8, 9 ja 10 on esitetty edellisen taulukon laserit hitsausnopeuden ja tunkeuman kaavioina. Kuvassa X70 teräksen koepalan paksuus oli vain 12 mm. Tästä syystä voi helposti näyttää siltä, että tunkeuma tavalliseen S355 rakenneteräkseen verrattuna olisi huomattavasti pienempi. S355 teräksellä päästiin jopa 16 mm tunkeumaan, hitsausnopeuden ollessa 2 m/min.

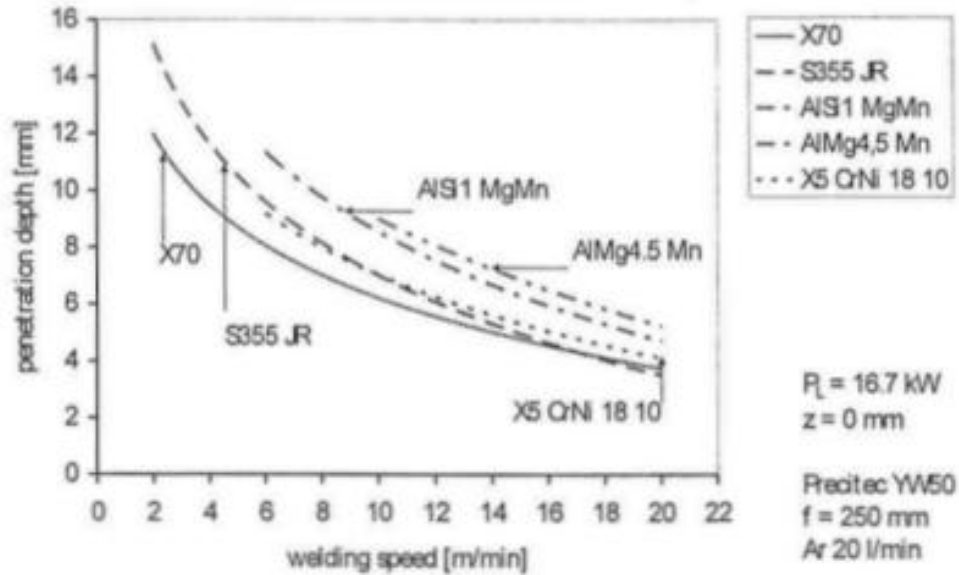
Kuvissa 10-11 on esitetty YLR-7000, YLR-10000 ja YLR-17000 lasereilla saavutetut tunkeumat hitsausnopeuden suhteen eri materiaaleilla. Kuvasta voidaan havaita, että tunkeuma pienenee rajusti hitsausnopeuden kasvaessa pienillä lasertehoilla, mutta tehon kasvaessa voidaan hitsausnopeutta nostaa ilman että tunkeuma pienenee niin rajusti.



Kuva 10. YLR-7000 laserilla saavutetut tunkeumat.

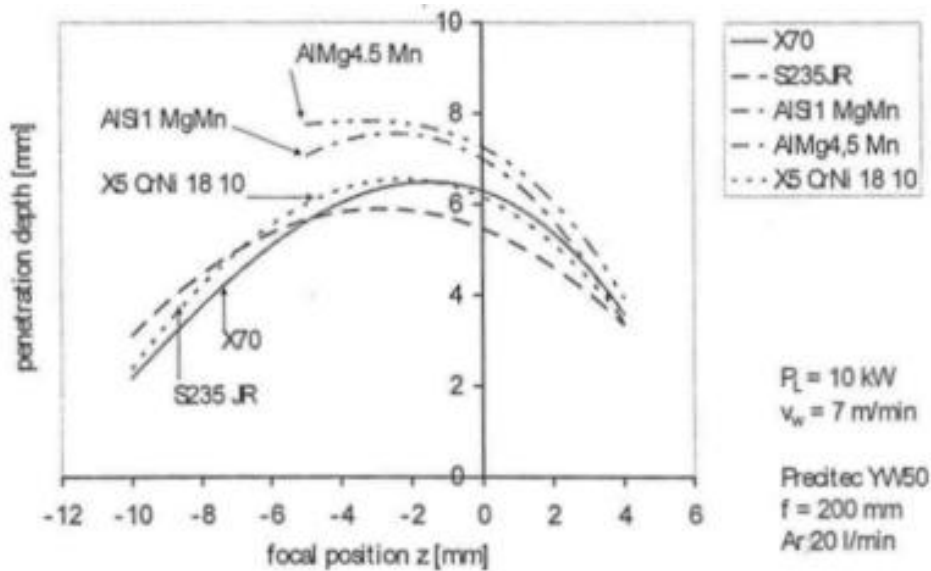


Kuva 11. YLR-10000 laserilla saavutetut tunkeumat.



Kuva 12. YLR-17000 laserilla saavutetut tunkeumat.

Testeissä tarkasteltiin myös polttopisteen aseman vaikutusta tunkeumaan. Kuvassa 13 on esitetty YLR-10000 kuitulaserin tunkeuma eri materiaaleille. Polttopisteen asema vaihtelee välillä -10 mm (polttopiste 10 mm materiaalin pinnan alapuolella) ja + 4 mm hitsausnopeuden ollessa 7 m/min. Kuvasta havaitaan, että sekä X70- että S355-teräksille paras tunkeuma saavutetaan suurin piirtein samassa kohtaa, noin -2 mm pinnan alapuolella.



Kuva 13. Polttopisteen aseman vaikutus YLR-10000 laserilla

7.3 Kiekkolaser-tutkimukset

Kiekkolaserin ollessa vielä kohtalaisen uusi sovellus, ei pelkällä säteellä hitsattuja kokeita yli 8 mm vahvuisille materiaaleille ollut tehty juuri lainkaan. Laservalmistaja Trumpfilta saatiin työtä varten kaksi erillistä asiakaspohjaista koetulosta kiekkolasereille. Teksti pohjautuu puhelinkeskusteluun Juha Vatsian kanssa.

Kokeissa käytettiin TD10003 kiekkolaseria 1:1 optiikalla. Optiikka tarkoittaa sitä, että polttopisteen halkaisija oli 0,3 mm. Kuitenkaan TD10003-laser, ei ole enää tuotannossa. Kyseinen malli kehitettiin alun alkaen hybridihitsaukseen. Vatsian mukaan tuotantokäytössä paksuja materiaaleja hitsataan hyvin vähän, joten julkisia parametreja on hyvin vähän saatavilla. Paksujen materiaalien hitsauksessa ruostumatoneräs ja hiiliteräs käyttäytyvät lähes identtisesti. Taulukossa viisi on esitetty esimerkkejä päittäisliitoksista, jotka on hitsattu Trumpfin TD10003:lla.

Taulukko 5. TD10003:lla hitsattuja päittäisliitoksia.

	Teho [kW]	Materiaalin Paksuus [mm]	Polttopisteen halkaisija [mm]	Hitsausnopeus [m/min]	Fokus [mm]	Huomioita
1	10	12	0,6	1	-4	Hitsauskaasu argon
2	10	10	0,6	1	-4	Hitsauskaasu argon, 3D-rata
3	10	15	0,6	2	-	-
4	12	8	0,4	3	-	Ei läpi asti

Seuraavat esimerkit on hitsattu Trumpfin TF15000 laserilla.

Taulukossa kuusi on esitetty esimerkkejä päittäisliitoksista, jotka on hitsattu Trumpfin TF15000:lla.

Taulukko 6. TF15000:lla hitsattuja päittäisliitoksia.

	Teho [kW]	Materiaalin paksuus [mm]	Hitsausnopeus [m/min]
1	15	8	5
2	15	10	4
3	15	14	2
4	15	17	1

8 TULOSTEN ANALYSOINTI

8.1 CO₂-laser

CO₂-laser tutkimuksessa havaittiin avaimenreiän sisään syntyvän plasmapiilven vaikeuttavan hitsausta olennaisesti. Plasmapiilvi absorpoo käytössä olevaa lasertehoa, vähentäen näin tunkeuman määrää. Plasmapiilvestä on kuitenkin mahdollista päästä eroon oikeanlaisilla säteen pulssitusasetuksilla. Kuitenkin yli 15 mm paksujen materiaalien hitsaaminen tulee olemaan haasteellista. Haasteellisuus johtuu

epälineaarista suhteesta hitsausnopeuden ja lasertehon välillä. Plasmapilven havaittiin vaikuttavan ylimmässä kolmasosassa materiaalia. Ylemmissä osissa hitsiä tämä johtaa leventyneeseen hitsiin ja hitsin alemmissä osissa suhde lasertehoon on säilynyt normaalina.

8.2 Kuitulaser

Kuitulaserilla tehtyjä tutkimuksia, joissa olisi käytetty materiaalien hitsaukseen pelkkää sädettä ja materiaalin paksuus olisi yli 8mm, on saatavilla hyvin vähän. Löydetyissä tutkimuksissa kuitulaserilla tehdyt kokeet olivat hitsausnopeuden ja tunkeuman suhteen yhteneviä. Vaikkakin vain päällekkäisten arvojen osuus oli 7,5 kW:n teho ja 3 m/min hitsausnopeus. Tunkeumissa oli huomattavia eroja polttopisteen aseman suhteen. Tulosten perusteella paras tunkeuma saavutettiin, kun polttopiste oli noin 2 mm hitsattavan pinnan alapuolella. Tulosten mukaan havaittiin parhaan tunkeuman tulevan teräksillä noin 2 mm hitsattavan pinnan alapuolella. Kaplanin tutkimuksessa ongelmaksi muodostuivat kappaleen pinnoille syntyvät roiskeet. Roiskeiden määrä väheni kun sulasta tehtiin leveämpi. Tutkimuksissa huomattiin 15 kW:n kuitulaserin olevan sopiva paksuille materiaaleille, mutta prosessi-ikkuna hyväksyttävän lopputuloksen saavuttamiseksi oli erittäin kapea.

8.3 Kiekkolaser

15 kW:n kiekkolaserilla päästään samoihin tuloksiin kuin kuitulaserilla. Kiekkolaserillekään ei ollut tehty tutkimuksia pelkällä säteellä, joten tutkimukset perustuvat laservalmistaja Trumpfilta saatuihin kuvaajiin. Kuvaajien perusteella tunkeumat ja hitsausnopeudet 10 kW:n teholla ja yli 8mm tunkeumilla ovat samansuuruisia kuin CO₂- ja kuitulasereille.

9 JATKOTUTKIMUSEHDOTUKSET

Koska työ oli tutkimuskatsaus on jatkokehitys ehdotuksia vaikea määrittellä. Kuitenkin selväksi on tullut, että uudet lasertyypit vaativat vielä testausta. Tällä hetkellä vanhat laserlaitteet, kuten Nd:YAG ja CO₂, ovat paljon virtaa tarvitsevia ja niiden hyötysuhteet ovat hyvin matalat. Samoin niiden tilan tarve on huomattavasti suurempi verrattuna uusiin laitteistoihin. Myös kW:n hinta on pudonnut viimeisen 5 vuoden aikana.

Kuitu- ja kiekkolasereiden kehittyessä niistä on tulossa selkeästi varteenotettava vaihtoehto suuren tehon CO₂-lasereille. Tällöin tutkimusta edellä mainittujen lasertyyppien käytöstä hitsauksessa pelkällä säteellä tulisi tutkia tarkemmin. Mahdollisuuksien mukaan voitaisiin myös tarkastella kuinka pelkällä säteellä hitsattaessa polttopisteen halkaisijan suhde railon ilmarakoon vaikuttaa. Voitaisiinko suuremmalla teholla ja suuremmalla polttopisteen halkaisijalla lieventää railotoleransseja? Pelkällä säteellä hitsattaessa prosessiin tulee vähemmän muuttujia, jolloin prosessin hallittavuuskin on helpompaa. Tästäkin syystä tutkimuksia tulisi tehdä.

10 YHTEENVETO

Tutkimuksia pelkällä säteellä yli 8 mm ainevahvuudelle ei ole hirveästi saatavilla. Suurin osa tutkimuksista on tehty hybridiprosesseilla, joten tarvetta pelkällä säteellä tehtäville tutkimuksille on. Tehtyjen tutkimuksien valossa näyttää vahvasti siltä, ettei tekniikka kuitenkaan ole täysin ajanut CO₂-lasereiden ohi, mutta tarkasteltaessa asiaa hyötysuhteiden kannalta, olisi järkevää siirtyä hyötysuhteeltaan tehokkaampiin lasertyyppeihin.

CO₂-laserilla havaittiin hitsauksessa avaimenreiän sisään syntyvän plasmapiilven vaikuttavan suoraan hitsauksen lopputulokseen. Plasmapiilvi absorptoi laserin tehoa,

jolloin tunkeuman määrä pienenee. Plasmapilvestä on mahdollista päästä eroon tehion pulssituksella, mutta vaikka plasmapilvestä päästäisiin eroon tulee yli 15 mm paksuisten ainevahvuuksien hitsaaminen olemaan haasteellista lasertehon ja hitsausnopeuden epälineaarista suhteesta johtuen.

Kuitulaserilla tehtyjen tutkimuksien tulokset olivat yhteneviä, vaikkakin yhteneviä arvoja saavutettiin vain 7,5 kW:n teholla ja hitsausnopeudella 3 m/min. Suurimmat erot tulivat eri materiaaleilla polttopisteen aseman suhteen. Paras tulos teräksillä saavutettiin noin 2 mm hitsattavan pinnan alapuolella. Tutkimuksissa suurimman ongelman muodostivat hitsattavalle pinnalle muodostuneet roiskeet. Roiskeiden määrää saatiin vähennettyä leventämällä sulaa.

Kiekkolaserin tutkimustulokset ovat suurilta osin samoja kuin kuitulaserilla. Työssä tarkastellut tutkimustulokset perustuvat laservalmistaja Trumpfilta saatuihin asiakaskokeisiin. Saatujen tuloksien perusteella hitsausnopeudet ja saavutetut tunkeumat ovat samaa luokkaa kuin kahdella edellä mainitulla.

Tekniikan koko ajan kehittyessä hurjaa vauhtia on tarve lisätutkimukselle koko ajan kasvamassa. Mahdollisuuksien mukaan tulisi pelkällä säteellä hitsausta tutkia ja yksi tutkimuskohde voisi olla ilmaraon vaikutus kun polttopisteen kokoa kasvatetaan. Voidaanko näin tehokkaammilla lasereilla railotoleransseja lieventää ilman, että hitsatun hitsin laatu kärsii.

LÄHDELUETTELO

Buchfink G, The Laser as a Tools. Käännös: Matthew R. Coleman, Vogel Buchverlag, Würzburg, 2006, s. 280

Giesen, A., Speiser, J., Peters, R., Kränkel, C. and Petermann, K, 2007, Thin-Disk lasers come of age, Photonics Spectra 5/2007. [online] Viitattu 6.9.2010, saatavilla: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=29420>

Havrilla, D. And Brockman, R, Disk laser: A new generation of industrial laser, Proc. 28th Int. Conf. on Applications of Lasers and Electro Optics ICALEO 09, Orlando, FL. USA November 2 – 5, Laser Institute of America, paper 302.

Hügel H, “New solid-state lasers and their application potentials”, Optics and lasers in Engineering, Volume 34, 2000, pp.213-229

Ion, J., 2005. Laser processing of engineering materials. Elsevier Butterworth-Heinemann, UK; Oxford. 556 s. ISBN 0-7506-6079-1

IPG Photonics, 2009, High power fiber lasers for industrial applications, Esitemateriaali. [online] Viitattu 6.9.2010, saatavilla: http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/HP_Brochure.pdf

Kujanpää, V., Salminen, A., 1998. Suurtehoisen Nd:YAG-laserin käyttö konepajateollisuudessa. Met-julkaisuja, tekninen tiedotus 5/98. Helsinki, Metalliteollisuuden keskusliitto, MET. 53 s.

Kujanpää, V., Salminen, A., Vihinen, J., 2005. Lasertyöstö. Teknologia teollisuus, Helsinki. s. 373. ISBN 951-817-876-3

Laservision, 2008. Guide to lasersafety. Laservision GmbH & Co. KG. 51 s.

Lukkari, J., 2002. Hitsaustekniikan perusteet ja kaarihitsaus. 4. painos. Helsinki, Edita Prima OY. 292 s. ISBN 952-13-1409-5

Lukkari, J., 1997. Hitsausenergia ja lämmöntuonti hitsauksessa. Hitsaustekniikka-lehti 4/1997. ISSN 0437-6056

O'Neil, W., Sparkles, M., Varnham, M., Horley, R., Birch, M., Woods, S. and Harker, A., 2004, High power high brightness industrial fiber laser technology, Proc. Of the 23rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO 2004, October 4-7. 2004. San Francisco, USA, Laser Institute of America, paper 301.

Rautaruukki Oyj. 2003. Hitsaajanopas. Otava. 96 s.

Ready, J F, Farson, D F. LIA Handbook of Laser Materials Processing. Laser Institute of America Magnolia Publishing, Orlando, 2001, s. 715

Ream, S., 2004. Proceedings of the 23rd international congress on applications of lasers and electro-optics: Laser welding efficiency and cost: CO₂, YAG, fiber and disc. Edison welding institute, Columbus.

Rofin(a) [online] viitattu: 6.9.2010 saatavilla:
<http://www.rofin.com/index.php?id=395&L=1>

Rofin(b) [online] viitattu: 6.9.2010 saatavilla: http://www.rofin.com/master-of-applications/images/technic_en.jpg

Salminen, A., ja Siltanen, J. 2003. Ohutlevyjen diodilaserhitsaus, Hitsaustekniikka, Vol. 53, 5, 2003, s. 31-33.

Salminen, A., Piili, H. ja Purtonen, T. The characteristics of high power fibre laser welding. Journal of mechanical engineering science, proceedings of the institution of mechanical engineering part C, vol. 24 No C5, 2010.

Steen, W. M., 2003. Laser material processing third edition. Lontoo, Springer-Verlag London Limited. 408 s. ISBN 1-85233-698-6

Silfvast W, Laser Fundamentals. Cambridge University Press. 2 painos, 2004, s. 666

Trumpf, Deep penetration welding. [online] viitattu: 6.9.2010 saatavilla:
<http://www.trumpf-laser.com/index.php?id=2655&0=&L=1>