

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

POLTTOPISTEEN KOON VAIKUTUS HITSIN OMINAISUUKSIIN TERÄKSEN
KUITULASERHITSAUKSESSA
THE EFFECT OF SPOT SIZE ON WELD CHARACTERISTICS IN FIBER LASER
WELDING OF STEEL

Konsta Hölttä 23.10.2014

Työn tarkastaja: Professori Salminen Antti

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	KUITULASER JA LASERHITSAUS	6
2.1	Kuitulasera.....	6
2.2	Laserparametrit.....	8
2.2.1	Säteenlaatu ja divergenssi.....	8
2.2.2	Säteen moodi	11
2.2.3	Polarisaatio.....	11
2.3	Laserhitsaus.....	12
2.4	Laserhitsauksen metallurgia.....	13
2.5	Prosessiparametrit	14
2.5.1	Teho.....	14
2.5.2	Hitsausnopeus.....	15
2.5.3	Polttopisteen koko	16
2.5.4	Säteen fokusointi ja polttoväli	16
2.5.5	Polttopisteen asema	18
2.5.6	Muut prosessiparametrit	18
2.6	Perusaineen parametrit ja hitsattavuus	19
2.6.1	Rakenneteräksen hitsattavuus.....	19
2.6.2	Austeniittisten ruostumattomien terästen hitsattavuus	20
3	KATSAUS AIHEESTA LÖYTYVIIN TUTKIMUKSIIN	21
3.1	Hilton & Verhaeghe	21
3.2	Kawahito, Mizutani & Katayama.....	24
3.3	Suder & Williams.....	27
4	HITSAUSKOKEET	30
4.1	Hitsauskoejärjestelyt	30
4.2	Metallurgiset tutkimukset.....	32
5	TULOKSET	33
5.1	Hitsien pinta ja juuri.....	33
5.2	Makrokuvat	35
5.3	Kovuusmittaukset.....	38

6	JOHTOPÄÄTÖKSET	41
7	JATKOTUTKIMUKSEN TARVE.....	43
8	YHTEENVETO	44
	LÄHTEET	45

SYMBOLI JA LYHENNELUETTELO

λ	Aallonpituus [nm]
θ	Divergenssi
D	Polttopisteen halkaisija [mm]
D_R	Raakasäteen halkaisija [mm]
f	Polttoväli [mm]
f_c	Kollimointioptiikan polttoväli [mm]
HV	Vickersin kovuuden tunnus
K	Lasersäteen fokusoitavuutta kuvaava luku
M^2	Lasersäteen laatua kuvaava luku
P	Teho [W]
P_F	Tehokerroin [W/m]
PD	Haluttu tunkeuma (mm)
TEM-luku	Lasersäteen poikkileikkauksen tehojakaumaa kuvaava luku
q_p	Säteen tehotiheys [W/cm ²]
t_i	Säteen vaikutusaika [s]
v	Hitsausnopeus [m/min]
Z_F	Polttopisteen syvyysterävyys [mm]
BPP	Beam Parameter Product, sädeparametritulo
CO ₂	Carbon dioxide, hiilidioksidi
FBG	Fiber Bragg Grating, optinen Braggin heijastuma
HAZ	Heat Affected Zone, muutosvyöhyke
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet

1 JOHDANTO

Laserhitsaus on ollut jo vuosikymmeniä hitsaavan teollisuuden käytössä perinteisten kaarihitsausmenetelmien rinnalla. Vaikka tietämyksen ja teknologian kehittymisen myötä prosessi on kehittynyt jatkuvasti suurin harppauksin, on se silti eri prosessimuotoineen edelleen Suomessa suhteellisen marginaalinen verrattuna esimerkiksi erilaisiin kaasukaarihitsausprosesseihin. Laserhitsaus yhdistetään tällä hetkellä useimmiten erilaisiin erikoissovelluksiin ja mikrotyöstöön ennemmin, kuin raskaampaan konepajateollisuuteen. Tähän on olemassa erilaisia syitä, kuten esimerkiksi isohkot investointikustannukset ja heikko ymmärrys teknologiasta ja sen mahdollisuuksista. Laitteistojen hinnat ovat kuitenkin tulleet jatkuvasti alaspäin ja teknologian kehittymisen myötä laitteistoista on tullut soveliaampia myös konepajateollisuuden käyttöön. Aiemmin käytetyt Nd:YAG- ja CO₂ – laserit ovat menettämässä valta-asemaansa markkinoiden täytyessä yhä edullisemmilla, paremman hyötysuhteen ja säteenlaadun omaavilla kuitu-, kiekko ja diodilaseilla. Aiemmin laserhitsausta oli resonaattoreiden heikon tehon vuoksi mahdollista käyttää vain ohutlevyjen hitsauksessa ja se olikin raskaammassa teollisuudessa lähinnä autoteollisuuden käytössä. Nyt saatavilla on yhä tehokkaampia lasereita ja laserhitsausta on mahdollisuus käyttää myös aina vain paksumpien levyjen liittämiseen. Laserteknologia kehittyy edelleen nopealla tahdilla mutta, jotta prosessin täysi potentiaali saataisiin hyödynnettyä hitsaavassa konepajateollisuudessa, täytyy tutkimusta tehdä lisää eri parametrien vaikutuksesta hitsaustapahtumaan ja itse hitsin ominaisuuksiin.

Tämä työ on rajattu käsittelemään pelkästään polttopisteen koon vaikutusta hitsin ominaisuuksiin kuitulaserhitsauksessa. Työ koostuu kolmesta osasta. Teoriaosuudessa käsitellään kuitulaseria, laserhitsausta ja niihin liittyviä oleellisia parametreja. Lisäksi työhön sisältyy kirjallisuusselvitys jo olemassa olevista tutkimuksista polttopisteen koon vaikutuksesta. Työn viimeinen osa koostuu niukkaseosteiselle ja ruostumattomalle teräkselle tehtävästä hitsauskoesarjasta. Koesarjan hitsauksen jälkeen hitsit valokuvataan ja testataan tehdyn suunnitelman mukaisesti. Lopuksi saatuja tuloksia analysoidaan.

2 KUITULASER JA LASERHITSAUS

Teoriaosuudessa käsitellään työn kokeellisessa osuudessa käytettävää kuitulaseria sekä käydään läpi erilaiset laserhitsaukseen olennaisesti liittyvät laser- ja hitsausparametrit ja niiden vaikutukset hitsin ominaisuuksiin. Pääpaino teoriaosuudessa on polttopisteen koossa, sen vaikutuksissa ja muissa siihen oleellisesti vaikuttavissa parametreissa.

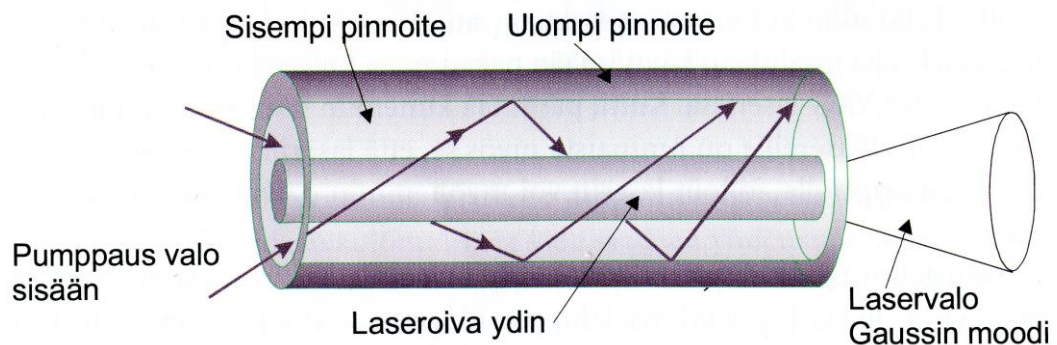
2.1 Kuitulaser

Kuitulaser on uutta laserteknologiaa ja se on ollut markkinoilla vasta suhteellisen lyhyen ajan. Se on kuitenkin osoittautunut jo tässä ajassa paremmuutensa, niin säteenlaadun, tehon sekä hyötysuhteen suhteen, verrattuna kilpaileviin vanhempiin teknologioihin kuten Nd:YAG- ja CO₂-lasereihin. Optisen kuidun halkaisija voi olla 100 µm ja optiikalla on mahdollista saada polttopiste fokusoitua vielä huomattavasti pienemmäksi, jopa alle 50 µm. Tällöin on mahdollista saavuttaa erittäin suuri tehotiheys jo pienemmilläkin tehoilla. Kuitulaserin hyötysuhde on hyvää noin 30 prosentin luokkaa, jonka lisäksi se vaatii erittäin vähän säännöllistä huoltoa diodien käyttöiän ollessa 100 000 tuntia. Säde siirretään optisella kuidulla, jolloin ei tarvita peilejä. Peilijärjestelmät ovat usein hankalasti säädettäviä ja ne edellyttävät jatkuvaa puhtaanapitoa. Näin ollen kuitulaser on myös käyttökustannuksiltaan edellä mainittuja teknologioita edullisempi. Tämän seurauksena se onkin kasvattanut tasaisen kovaa vauhtia osuuttaan lasermarkkinoilla tekniikan edelleen kehittyessä paremmaksi. Esimerkiksi vuonna 2012 kuitulasertyöstöasemien osuus maailmalla myydyissä lasertyöstöjärjestelmissä oli jo 18 prosenttia, kun se vielä vuonna 2008 oli 10 prosentin luokkaa. Taulukosta 1 nähdään kuinka raskaamman teollisuuden käyttöön hankittujen työstölaserien markkinoilla kuitulaserien myynti kasvoi vuonna 2013 24 % edellisvuoteen verrattuna. Lisäksi vuoden 2014 myynnin kasvun on ennakoitu olevan sama 24 %. Luvut ovat vaikuttavia etenkin, kun huomioi, että kaikkien lasertyyppien yhteenlaskettu myynti kasvoi vuonna 2013 edellisvuoteen verrattuna 3,4 % ja 2014 kasvun ennakoitaan olevan 4,5 %. (Steen & Mazumder, 2010, s. 46; Peach, 2013.; Belforte, 2014, s. 8-9.)

Taulukko 1. Konepajasovelluksissa käytettyjen teholtaan yli 1 kW lasereiden myyntiluvut lasertyypeittäin vuosina 2012–2014 (mukaillen Belforte, 2014, s. 9).

MYYNNTI (\$)	2012	2013	2014 (F)
CO ₂	\$750.9	\$696.1	\$647.3
MUUTOS EDELLISVUODESTA		-7%	-7%
KUITU	\$348.7	\$432.4	\$536.2
MUUTOS EDELLISVUODESTA		24%	24%
SOLID STATE	\$210.0	\$199.5	\$190.5
MUUTOS EDELLISVUODESTA		-5%	-5%
DIODI / MUUT	\$116.2	\$146.5	\$167.0
MUUTOS EDELLISVUODESTA		26%	14%
YHTEENSÄ	\$1,425.8	\$1,474.4	\$1,541.0
MUUTOS EDELLISVUODESTA		3.4%	4.5%

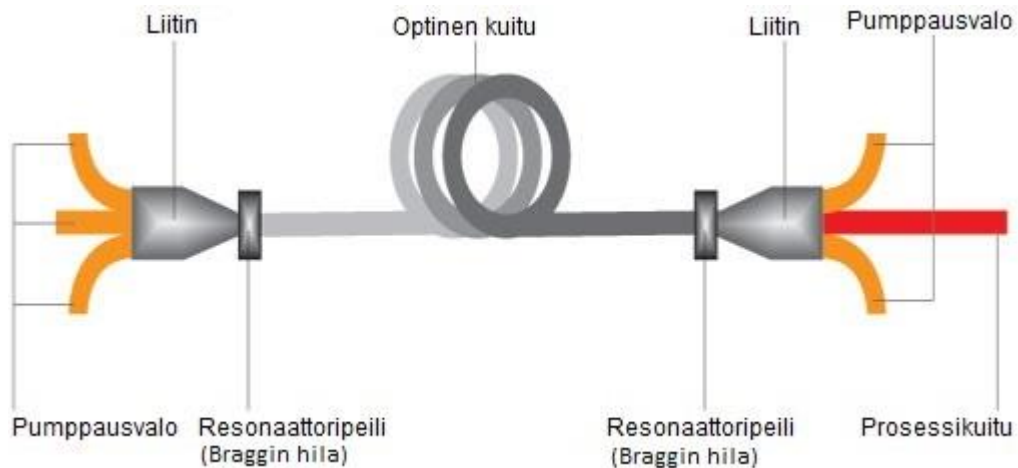
Kuitulaserin toiminta perustuu resonaattorina toimivaan optiseen kuituun, jonka laseroivalla väliaineella seostettua ydintä pumpataan diodilaserin valolla. Pumpaus on mahdollista toteuttaa, joko kuidun päistä tai sen sivusta koko pituudeltaan. Kuituun pumpattu valonsäde heijastelee kokonaisheijastuksen avulla kuidun sisällä lävistäen laseroivan ytimen useasti. Ulostulevan lasersäteen halkaisijan määrää kuidun ytimen halkaisija. Säteen syntyminen kuidun sisällä on kuvattu periaatetasolla kuvassa 1. (Kujanpää, Salminen & Vihinen, 2005, s. 68; Ion, 2005, s. 96.)



Kuva 1. Säteen syntymekanismi optisessa kuidussa (Kujanpää et al., 2005, s. 68).

Kuvassa 2 on kuvattuna kuitulaserin toimintaperiaate. Tässä esimerkissä useista laseriodiosta tuleva pumppausvalo tuodaan kuvan 1 kaltaisen optisen kuidun sisään liittimien kautta kuidun kummastakin päästä. Resonaattorina toimivan kuidun päissä olevat resonaattoripeilit toimivat optisen Braggin hilan (Fiber Bragg Grating, FBG) periaatteella ja määrittävät kuitulaserin aallonpituuden 1080 nm. Optisen kuidun ydin on mahdollista tehdä erittäin ohueksi, jolloin myös ulostulevan lasersäteen laatu on erittäin

hyvä. Suuri tehoinen kuitulaser koostuu useista pienemmistä edellä mainitun kaltaisista moduuleista, jotka saattavat olla teholtaan esimerkiksi muutama sata wattia. Huolimatta moduulien määrästä säteen laatu pysyy kuitenkin samana. Tehokkaimmat markkinoilla olevat kaupalliset kuitulaserjärjestelmät ovat tehoiltaan jopa 100 kilowattia. (Kujanpää et al., 2005, s. 68; Ion, 2005, s. 96; Rofin.)



Kuva 2. Periaatekuva suuritehoisen kuitulaserin yhden moduulin toiminnasta (mukaillen Rofin).

2.2 Laserparametrit

Säteen ominaisuuksista kertoviin laserparametreihin lasketaan säteenlaatu, divergenssi, polarisaatio, moodi ja raakasäteen halkaisija. Kaikkien näiden parametrien muuttaminen on työlästä ja vaatii muutosten tekemistä laitteistoon, joten käytännössä ne pysyvät työstön aikana vakiona. (Kujanpää et al., 2005, s. 164.)

2.2.1 Säteenlaatu ja divergenssi

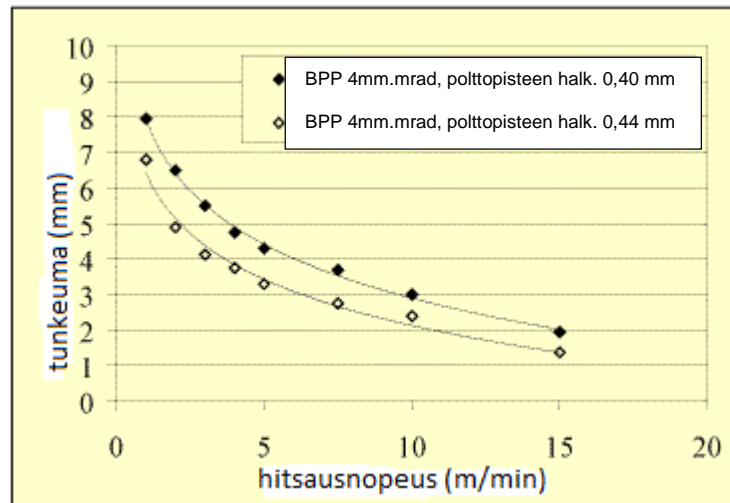
Lasersäteen laadulla on suuri vaikutus laserhitsauksen ja muidenkin lasertyöstöprosessien lopputulokseen ja se liittyy myös olennaisesti tämän tutkimuksen aiheena olevaan polttopisteen kokoon, sillä se vaikuttaa suoraan polttopisteen halkaisijaan sekä syvyysterävytyteen. Divergenssi, eli lasersäteen hajoamiskulman puolikas, kuvaa säteen taipumusta levetä, mitä kauemmaksi lasersäteen lähteestä liikutaan. Kuitulaserissa divergenssi saadaan valmistajan ilmoittamana arvona.

Divergenssin yksikkönä käytetään milliradiaaneja (mrad). Jos laserin ja työkappaleen etäisyys on suuri, on suositeltavaa, että divergenssi on alle 1.0 mrad. Kuitulaserissa sädettä kuljetetaan yleensä kuidun sisällä, jolloin divergenssin aiheuttamat ongelmat ovat vain vähäisiä. Pienellä divergenssillä saadaan aikaan pienempi polttopiste työkappaleeseen ja parempi syvyysterävyys. (Ion, 2005, s. 66.)

Säteen laadun mittaamiseen on erilaisia tapoja. Kuitulaserin tapauksessa, kun säteenkuljetus tapahtuu optisen kuidun avulla, käytetään säteenlaatua kuvaamaan termejä sädeparametritulo (Beam Parameter Product, *BPP*), K-luku ja M^2 – luku. Työstössä käytetyn optisen kuidun ominaisuudet asettavat vaatimuksia säteelle. Fokusoidun säteen tulee olla halkaisijaltaan pienempi, kuin optisen kuidun halkaisija ja divergenssin tulee olla pienempi kuin kokonaisuheijastuman rajakulma on kuidussa. Sädeparametritulon avulla saadaan laskettua kuinka ohutta optista kuitua pystytään kyseisellä säteellä käyttämään. Sädeparametritulo *BPP* saadaan laskettua seuraavasti (Ion, 2005, s. 67):

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

Yhtälössä 1 D_R on kuidusta ulostulevan raakasäteen halkaisija ja θ säteen hajoamiskulma. Yksikkönä sädeparametritulolla on mm*mrad. Mitä pienempi sädeparametritulo on, sitä parempi on säteenlaatu. Kuvan 3 kuvaajasta nähdään, kuinka parametritulon pieneneminen arvosta 23 mm*mrad arvoon 4 mm*mrad kasvattaa selvästi sekä hitsausnopeutta, että tunkeumaa. Polttopisteen koko on kummallakin *BPP* arvolla hitsattaessa suunnilleen sama. (Ion, 2005, s. 67.)



Kuva 3. Tunkeuma hitsausnopeuden funktiona hitsattaessa alumiinia kahdella eri säteenlaadulla (mukailen Hilton & Verhaeghe, 2005).

K-luku kuvaa säteen fokuusoitavuutta. Se on arvoltaan aina pienempi kuin 1 ja mitä pienempi se on, sitä huonompi säteen laatu on. Ideaalitapauksessa $K = 1$. Kun säteen tehojakauma vastaa Gaussin käyrää saadaan K-luku laskettua seuraavasti (Ion, 2005, s. 67) :

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

Yhtälössä 2λ on säteen aallonpituus. Fokuusoitavuutta kuvaa myös M^2 -luku, joka taas saadaan laskettua seuraavasti (Ion, 2005, s. 67):

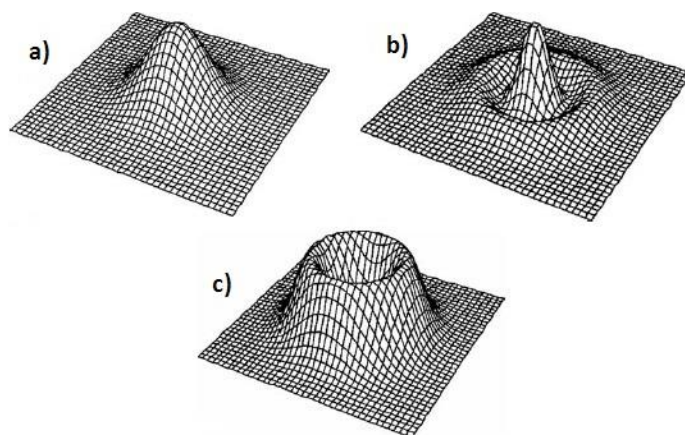
$$M^2 = \frac{\pi D_R \theta}{\lambda} \quad (3)$$

Yhtälöistä 2 ja 3 nähdään, että K- ja M^2 -lukujen välillä on riippuvuus (Ion, 2005, s. 67) :

$$M^2 = \frac{1}{K} \quad (4)$$

2.2.2 Säteen moodi

Lasersäteen moodilla kuvataan intensiteetin jakautumista säteen poikkileikkauksessa. Erilaisia moodeja kuvataan TEM-luvulla, jonka alaindeksit kertovat miten säteen intensiteetti on jakautunut. Kuvassa 4 on kuvattuna kolme erilaista moodia. Parhaiten työstökäyttöön soveltuu säde, jossa suurin intensiteetti on sen keskipisteessä. Kyseisen kaltaisella säteellä on paras fokuositavuus ja sillä saavutetaan hitsattaessa paras tunkeuma ja hitsausnopeus. Tällainen on esimerkiksi kuvassa 4 a) oleva yleisesti käytetty Gaussin käyrän muotoinen TEM₀₀ moodi. Kuitulaserissa säde on aina ns. top hat -muotoinen ja tehojakaumaltaan suhteellisen tasainen. Volppin aiheesta tekemän tutkimuksen, jossa tutkittiin säteen intensiteetin jakauman vaikutusta keyholen geometriaan, mukaan top hat – muotoisella säteellä hitsattaessa keyholen halkaisija on suurempi kuin Gaussin käyrän muotoisella säteellä hitsattaessa. Tällöin voisi olettaa myös hitsin olevan leveämpi. (Kujanpää et al., 2005, s. 164–165; Volpp, 2012, s. 24.)



Kuva 4. Erilaisia laserhitsaukseen hyvin soveltuvia sylinterimäisiä moodeja: (a) TEM₀₀, (b) TEM₁₀ ja (c) TEM₀₁₊ (Ion, 2005, s. 59).

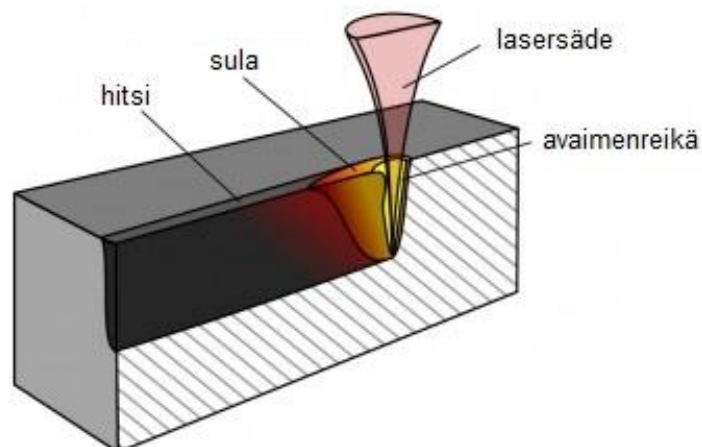
2.2.3 Polarisaatio

Laservalon polarisaatio vaikuttaa hitsauksessa tunkeumaan. Esimerkiksi lineaaripolarisoidulla säteellä hitsattaessa polarisaatiotason suuntaan saavutetaan suurempi tunkeuma, kuin hitsattaessa kohtisuoraan polarisaatiotasoon nähden. Ympyräpolarisoitu säde taas on symmetrinen optiseen akseliin nähden ja tämän takia sen tunkeuma jää kahden edellä mainitun esimerkin puoliväliin. Tässä tapauksessa työstöjälki on joka suuntaan identtinen. Kuitulaserissa laservalo on satunnaispolarisoitua jolloin se periaatteessa vastaa ominaisuuksiltaan ympyräpolarisoitua sädettä. (Kujanpää et al., 2005, s. 164.)

2.3 Laserhitsaus

Lasersäde tarjoaa tänä päivänä elektronisuihkun kanssa suurimman käytettävissä olevan tehotiheyden erilaisiin teollisuuden käyttämiin työstömuotoihin, kuten poraukseen, leikkaukseen ja hitsaukseen. Laserhitsauksesta on olemassa lukematon määrä erilaisia variaatioita, kuten pulssihitsausta, sulattavaa laserhitsausta, lisäaineellista laserhitsausta ja lukuisia erilaisia hybridihitsausprosesseja. Tässä osuudessa keskitytään kuitenkin pelkästään avaimenreikähitsaukseen, jota myös kokeellisessa osuudessa käytetään. (Steen et al., 2010, s. 199.)

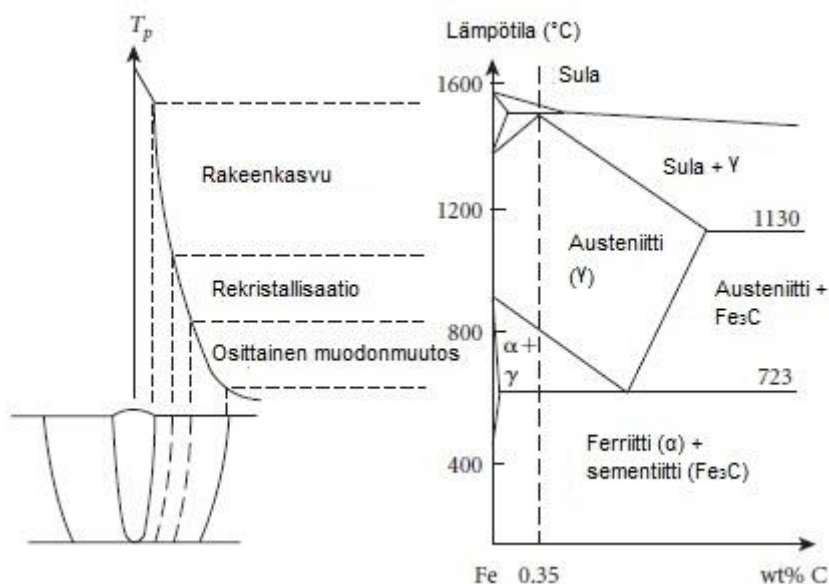
Avaimenreikähitsauksessa, jonka periaate on esitettyä kuvassa 5, työkappaleen pinnalle tai sen alapuolelle fokusoidun säteen tulee ylittää tehotiheys 10^6 W/cm^2 , jolloin materiaaliin höyrystyy onkalo, jota kutsutaan avaimenreikäksi. Sula perusmateriaali ympäröi avaimenreikää, joka pysyy auki materiaalin höyrystymisestä ja metallihöyryn muodostumisesta aiheutuvien voimien ansiosta. Säteen liikkuessa eteenpäin työkappaleen pinnalla liitoksen suuntaisesti sula kulkeutuu säteen ohi avaimenreian takaosaan ja pintajännityksen sekä hydrostaattisen paineen ansiosta sulkee avaimenreian takaa railon. Tämän jälkeen hitsi jäähmettyy lämmön johtuessa perusaineeseen. Hitsi on muodoltaan tavallisesti kapea suhteessa tunkeuman syvyyteen. Tämä johtuu siitä, että hitsauksessa kappaleeseen kohdistuva energia on tarkasti kohdistettu sinne missä sitä liitoksen onnistumisen kannalta tarvitaan. Tämän ansiosta ylimääräisen lämmön aiheuttamat haittavaikutukset pysyvät pienempinä verrattuna kaarihitsaukseen. (Kujanpää et al., 2005, s. 164; Steen et al., 2010, s. 200; Ion, 2005, s. 397.)



Kuva 5. Avaimenreikähitsauksen periaate (mukaillen Ionix, 2014).

2.4 Laserhitsauksen metallurgia

Laserhitsistä on erotettavissa kaksi selvästi erilaista aluetta: HAZ (Heat Affected Zone) eli muutosvyöhyke, joka on syntynyt perusaineeseen hitsauksessa syntyneen lämmön vaikutuksesta sekä sulavyöhyke, joka on jähmettynyttä hitsisulaa. Lisäksi muutosvyöhykkeestä on erotettavissa pienempiä erillisiä alueita, joiden laajuus riippuu hitsauksen aikana saavutetusta maksimilämpötilasta ja perusaineen koostumuksesta. Nämä vyöhykkeet on nähtävissä kuvassa 6, josta nähdään samalla myös missä maksimilämpötiloissa alueet muodostuvat. (Ion, 2005, s. 397.)



Kuva 6. Hitsin muutosvyöhykkeen eri alueet rakenneteräksessä (mukailen Ion, 2005, s. 398).

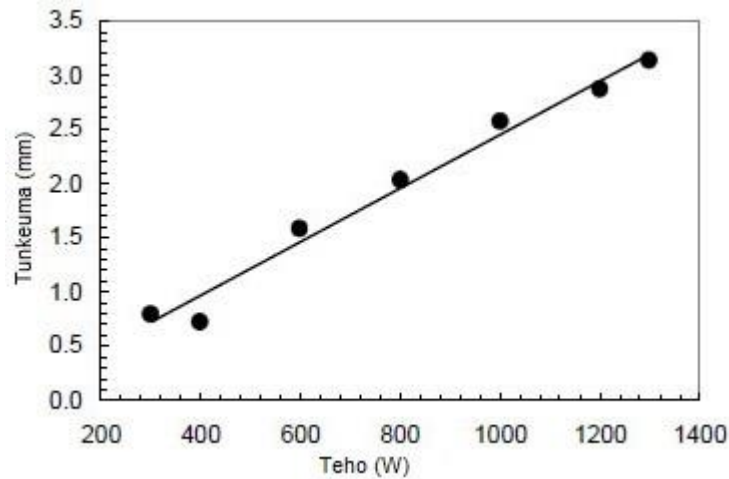
Sulavyöhykkeellä, jossa materiaali sulaa ja jähmettyy nopeasti, tapahtuu pylväsmäistä epitaksiaalisesti kerrostuvaa rakeenkasvua viereisten muutosvyöhykkeen rakeiden kanssa. Myös tasa-akselisia rakeita saattaa muodostua hitsipalon keskusta. Rakeiden muotoutuminen riippuu hitsausnopeudesta siten, että hitsausnopeuden ollessa suuri hitsin keskilinjalle muodostuu vierekkäisiä ja pitkittäisiä rakeita. Jälkilämpökäsittelyllä on mahdollista palauttaa hitsin ominaisuuksia lähemmäksi perusaineen ominaisuuksia riippuen perusmateriaalin koostumuksesta. (Ion, 2005, s. 397.)

2.5 Prosessiparametrit

Laserhitsaus on onnistuneesti käytettynä erittäin tehokas prosessi ja sillä on useita huomattavia etuja verrattuna kilpaileviin hitsausmenetelmiin. Näitä etuja ovat esimerkiksi pieni lämmöntuonti, jonka ansiosta lämmön aiheuttamat muodonmuutokset pysyvät pieninä. Lisäksi hitsin metallurgiset ominaisuudet paranevat, kun muutosvyöhyke pysyy pienenä ja voimakasta rakeenkasvua ei pääse tapahtumaan. Prosessin etuina on myös suuri tuotantonopeus ja joustavuus, koska hitsausnopeudet ovat suuria ja säde on mahdollista jakaa useaan työasemaan. Jotta nämä mahdolliset hyödyt saataisiin siirrettyä käytäntöön, tulee työstöparametrien olla oikeanlaiset. (Kujanpää et al., 2005, s. 157.)

2.5.1 Teho

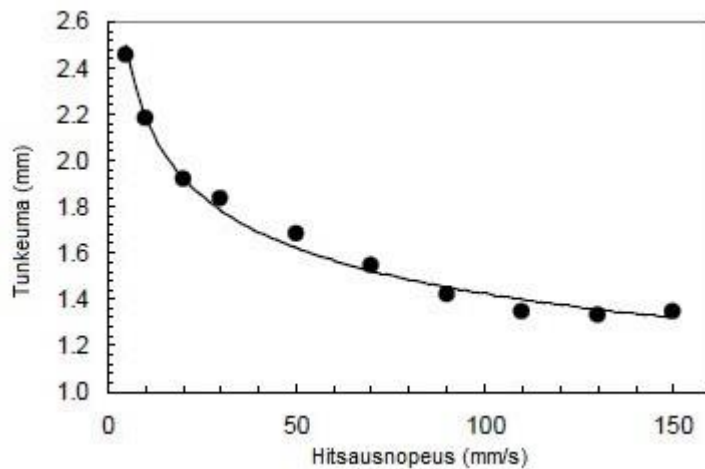
Teho on hitsausnopeuden ohella tärkein prosessiparametri. Suuremmalla teholla saadaan säteelle suurempi tehotiheys, jonka ansiosta pystytään käyttämään pidempää polttoväliä ja näin ollen saadaan parempi tunkeuma. Tätä tukee myös Medeiros de Carvalhon ja Fernandes de Liman (2012) tutkimus, jossa tutkittiin tehon ja hitsausnopeuden vaikutusta tunkeumaan. Hitsauskokeet tehtiin tutkimuksessa hitaamalla IPG:n 2 kW tehoisella kuitulaserilla ultralujaa 3 mm paksua AISI 300M terästä. Tehoa käsittelevissä kokeissa käytetyt tehot olivat 300 - 1300 W ja hitsausnopeutena käytettiin 3 m/min. Hitsauskokeiden tuloksista piirretyn kuvassa 7 olevan kuvaajan mukaan hitsin tunkeuma kasvaa lineaarisesti tehon kasvaessa. Suuremman tehotiheyden ansiosta pystytään myös käyttämään suurempaa polttopisteen kokoa, jolloin saadaan laajempi hitsausparametrialue ja esimerkiksi railotoleranssit eivät ole niin tiukat, kuin pienempää polttopistettä käytettäessä. Tunkeuma ei ole kuitenkaan suoraan verrannollinen lasertehon suuruuden kanssa ja myös muilla parametreilla, kuten säteenlaadulla ja aallonpituudella on vaikutusta asiaan. Teho työkappaleen pinnalla ei ole sama kuin laserin ulostuloteho, koska säteen kulkiessa sen muokkaamiseen tarkoitettujen optisten komponenttien läpi optisella tiellä, tapahtuu tehohäviöitä. (Kujanpää et al., 2005, s. 165; Medeiros de Carvalho & Fernandes de Lima, 2012.)



Kuva 7. Lasertehon vaikutus tunkeumaan AISI 300M teräksen kuitulaserhitsauksessa (mukailten Medeiros de Carvalho et al., 2012).

2.5.2 Hitsausnopeus

Suurempi teho mahdollistaa suuremman hitsausnopeuden käyttämisen, joka taas parantaa lyhyempien hitsausaikojen kautta työn tuottavuutta. Vakioteholla hitsattaessa tunkeuma kasvaa hitsausnopeuden laskiessa ja vastavaroisesti pienenee hitsausnopeuden kasvaessa. Edellisessä kappaleessa mainitun brasilialaisen tehoa ja hitsausnopeutta tutkineen tutkimuksen hitsausnopeutta käsitelleissä hitsauskokeissa saatiin myös tätä tukevia tuloksia, kuten kuvan 8 kuvaajasta nähdään. Nopeutta käsitelleissä kokeissa käytettiin vakiotehoa 800 W ja hitsausnopeudet olivat välillä 0,3 – 9,0 m/min. (Kujanpää et al., 2005, s.166; Medeiros de Carvalho et al., 2012.)



Kuva 8. Hitsausnopeuden vaikutus tunkeumaan AISI 300M teräksen kuitulaserhitsauksessa vakioteholla 800 W (mukailten Medeiros de Carvalho et al., 2012).

Karkeasti voidaan sanoa että nopeuden alarajaa määrittää avaimenreiän auki pysyminen ja ylärajaa läpätunkeuman saavuttaminen. Tavoiteltaessa virheetöntä ja ominaisuuksiltaan tietynlaista hitsiä on oikeiden arvojen löytäminen kuitenkin hitsausnopeuden osaltakin tarkempaa. (Kujanpää et al., 2005, s. 166.)

2.5.3 Polttopisteen koko

Polttopisteen koko määrää tehon ohella säteen tehotiheyden työstössä ja on sen myötä olennainen prosessiparametri. Suuri tehotiheys mahdollistaa suuremman tunkeuman ja suurempien hitsausnopeuksien käyttämisen, joka taas johtaa lyhyempiin hitsausaikoihin ja parempaan tuottavuuteen. Lisäksi voimakkaasti heijastavien materiaalien, kuten alumiinin, hitsauksessa vaaditaan säteeltä suurta tehotiheyttä. (Steen et al., 2010, s. 213.)

Pieni polttopiste ei ole yksiselitteisesti suurempaa parempi kaikissa tapauksissa vaan se asettaa vaatimuksia tiukempien railotoleranssien muodossa. Lisäksi säteen kuljetuksesta vastaavan laitteiston liikkeiden toleranssit ovat tällöin tarkemmat. Tämän vuoksi ei käytännössä ole aina järkevintä käyttää pienintä mahdollista polttopisteen halkaisijaa. Pienen polttopisteen koon aiheuttamia vaatimuksia voidaan kuitenkin lieventää käyttämällä esimerkiksi pyörittämällä sädettä tai vaaputtamalla sitä. Tämä tapahtuu kuitenkin hitsausnopeuden kustannuksella ja tällöin pienemmästä polttopisteen koosta saatu hyöty pienenee. (Steen et al., 2010, s. 214.)

2.5.4 Säteen fokuointi ja polttoväli

Lasersäteen fokuointi on raakasäteen halkaisijan lisäksi ainut tekijä, joka määrittää polttopisteen koon. Säde on pienintä mahdollista kuidun halkaisijaakin käytettäessä vielä liian suuri halkaisijaltaan käytettäväksi sellaisenaan. Tämä laserista tuleva säde fokusoidaan optiikan avulla työstöön sopivaksi eli käytännössä pienennetään säteen kokoa, jotta sen intensiteetti nousee työstön edellyttämälle tasolle. Säteen fokuoinnissa käytettävälle optiikalle on periaatteessa kaksi vaihtoehtoa eli linssi- tai peilioptiikka. Kummassakin vaihtoehdossa on omat hyvät ja huonot puolensa ja valinta näiden kahden välillä tulee tehdä käyttökohteen tarpeiden mukaan. (Kujanpää et al., 2005, s. 72.)

Säteen fokuksinnissa oleelliset muuttujat ovat raakasäteen halkaisija D_R , polttoväli f ja näiden lisäksi säteen ja käytettävän optiikan laatu sekä säteen moodi. Erilaisille prosessikuidun halkaisija - optiikkakokoonpanoille saadaan laskettua polttopisteen halkaisijalle D teoreettinen minimi seuraavasti (Ion, 2005, s. 105):

$$D = = \frac{4\lambda f}{\pi D_R} \quad (5)$$

Yhtälö 5 on voimassa vain säteen ollessa ideaalinen, jolloin säteen laatua kuvaava K -luku olisi arvoltaan 1. Otettaessa K -luku huomioon yhtälö muuttuu seuraavan kaltaiseksi. (Ion, 2005, s. 105)

$$D = = \frac{4\lambda f}{\pi D_R K} \quad (6)$$

Yhtälöstä 6 nähdään, että polttopisteen koko kasvaa, kun säteenlaatua kuvaava K -luku pienenee, eli säteenlaatu heikkenee. Lisäksi nähdään, että polttoväliä lyhentämällä myös polttopisteen halkaisija pienenee.

Tämän työn kokeellisessa osuudessa polttopisteiden halkaisijoiden teoreettiset arvot lasketaan seuraavasti:

$$D = D_R \left(\frac{f}{f_c} \right) \quad (7)$$

Yhtälössä 7 f_c on kollimointioptiikan polttoväli.

Oikeaa polttoväliä mietittäessä on otettava huomioon myös sen vaikutus työstön kannalta oleelliseen syvyysterävyyteen Z_F , joka tarkoittaa sitä osuutta fokusoidusta säteestä, jolla säteen intensiteetti pysyy suurin piirtein samana. Kuten polttopisteen koko, niin myös syvyysterävyys pienenee polttovälin lyhentyessä. Syvyysterävyys saadaan laskettua seuraavasti:

$$Z_F = 4f^2\lambda/D^2\pi K \quad (8)$$

Yhtälöstä 8 nähdään, että polttopisteen koon kaksinkertaistuessa, syvyysterävyys nelinkertaistuu. Tämä on otettava huomioon etenkin kun valitaan parametreja paksujen materiaalien hitsaukseen. (Kujanpää et al., 2005, s. 81.)

2.5.5 Polttopisteen asema

Polttopisteen asema kertoo polttopisteen etäisyyden työkappaleen pinnalta ja. Laserhitsauksessa polttopisteen aseman oletusarvo on 0 mm, jolloin se on työkappaleen pinnalla. Pinnan tason alapuolella arvo on miinusmerkinen ja yläpuolella vastaavasti positiivinen. Yleensä polttopiste fokusoidaan hitsattaessa, joko työkappaleen pinnalle tai noin neljänneksen verran aineenpaksuudesta sen alapuolelle. Polttopisteen paikkaa valittaessa on otettava huomioon riittävän tehotiheyden saavuttaminen, jotta materiaali höyrystyy, sekä tähän liittyen myös säteen syvyysterävyys. Lyhyen aallonpituuden lasereissa, joihin kuitulaser kuuluu, on hyvä absorptio, joten polttopisteen asema ei ole sillä hitsattaessa yhtä kriittinen parametri, kuin esimerkiksi CO₂ – laserilla hitsattaessa. Tästä huolimatta 2013 julkaistussa tutkimuksessa, jossa Zhang, Chen, Zhou & Liao (2013) tutkivat 12 mm paksun ruostumattoman teräksen kuitulaserhitsausta, huomattiin polttopisteen aseman olevan merkittävä parametri myös kuitulaserilla hitsattaessa. Esimerkiksi läpätunkeumaa ei ollut mahdollista saavuttaa pelkästään hitsausnopeutta muuttamalla, ilman polttopisteen oikeaa asemaa. Tutkimuksessa havaittiin polttopisteen aseman vaikuttavan huomattavasti hitsauksen tulokseen siten, että paras tunkeuma saavutettiin polttopisteen aseman ollessa negatiivinen. (Kujanpää et al., 2005, s. 167–168; Zhang, Chen, Zhou & Liao, 2013, s. 576.)

2.5.6 Muut prosessiparametrit

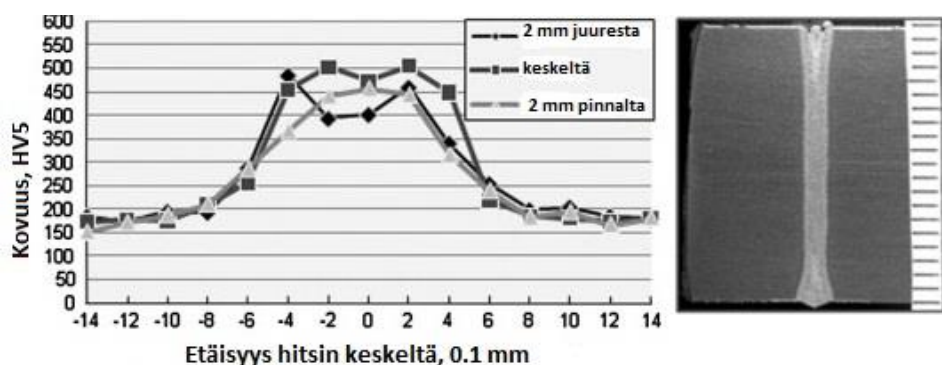
Muita prosessiparametreja ovat työetäisyys, suojakaasuparametrit ja lasersäteen poikkeutus eli vaaputus, jossa sädettä pyöritetään tai liikutetaan lineaarisesti hitsauksen aikana. Vaaputuksen ansiosta railotoleranssit ovat väljemmät. Työetäisyys on hitsaussuuttimen ja työkappaleen pinnan välinen etäisyys. Suojakaasua käytetään laserhitsauksessa suojaamaan hitsisulaa ja avaimenreikää hapettumiselta. Suojakaasuna käytetään yleisimmin argonia, typpeä, heliumia, hiilidioksidia tai näiden seoksia. Suojakaasu tuodaan hitsaustapahtumaan samasta hitsaussuuttimesta lasersäteen kanssa tai omasta erillisestä suuttimestaan. Lisäksi hitsauksessa on mahdollista käyttää juurensuojakaasua vastaavasti kuin kaarihitsausmenetelmillä hitsattaessa sekä poikittaista kaasuvirtausta suojaamaan optiikkaa hitsauksessa syntyviltä roiskeilta. (Kujanpää et al., 2005, s. 166–168.)

2.6 Perusaineen parametrit ja hitsattavuus

Perusaineen parametreja ovat aineenpaksuus, kemiallinen koostumus, kuten hiiliekvivalentti ja sen muut materiaaliominaisuudet, liitoksen ilmarako sekä työkappaleen ja railopintojen pinnanlaatu. Laserhitsauksessa liitoksen ilmaraon täytyy olla tarpeeksi pieni, jotta säde ei mene suoraan läpi liitoksesta osumatta railopintoihin. Ilmaraon tulisi olla pienempi kuin puolet säteen halkaisijasta. Tämä asettaa tiukat toleranssit railopintojen laadulle, jonka takia niiden tulee olla käytännössä koneistettuja, jotta riittävä tarkkuus saavutetaan. (Steen et al., 2010, s. 221.)

2.6.1 Rakenneteräksen hitsattavuus

Tässä tutkimuksessa toisena tutkittavana materiaalina käytettävä S355 rakenneteräs on seostamaton teräs ja se on hyvin laserhitsattavissa, kuten muutkin seostamattomat ja niukkaseosteiset teräslaadut. Yleisimpiä hitsausvirheitä niitä hitsattaessa ovat huokokset ja kuumahalkeilu. Seostamattomia teräksiä hitsattaessa on myös huomattu, että hitsien väsymislujuus on ollut parempi kuin perusaineella hitsin pintaan muodostuvien puristusjännitysten ansiosta. Sokolovin, Salmisen, Kuznetsovin & Tsibulskiyn tekemässä tutkimuksessa, jossa tutkittiin paksun S355 rakenneteräksen laserhitsausta ja aikaansaatuja hitsien kovuuksia, havaittiin yli kaksinkertaisia kovuusarvoja muutosvyöhykkeen alueella perusaineen 190–200 HV kovuuteen verrattuna. Kuvan 9 kuvaajassa nähdään yhden, 20 mm paksuun S355 teräkseen tehdyn, yksipalkohitsin mitatut kovuusarvot. Mittaukset tehtiin kolmesta eri kohdasta: hitsin keskeltä, 2 mm juuren puolelta alapinnan yläpuolelta ja 2 mm yläpinnan alapuolelta. Hitsattavien kappaleiden paksuudet olivat tutkimuksessa 20 ja 25 mm sekä käytetty laserteho 15 ja 30 kilowatin välillä. (Ion, 2005, s. 422; Sokolov, Salminen, Kuznetsov & Tsibulskiy, 2011, s. 5128-5131.)



Kuva 3. Kuvaaja 20 mm paksun S355 teräksen kovuusarvoista (mukaiillen Sokolov et al., 2011, s. 5130).

2.6.2 Austeniittisten ruostumattomien terästen hitsattavuus

Tässä työssä toisena tutkittavana materiaalina ollut AISI 304 teräs kuuluu austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin. Kyseisillä materiaaleilla on hyvä hitsattavuus, niin perinteisin kaarihitsausmenetelmin, kuin myös laserilla. Niillä on suurempi taipumus kuumahalkeiluun, kuin ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä, joissa haitalliset aineet, kuten rikki ja fosfori liukenevat tasaisemmin koko hitsiin. (Ion, 2005, s. 423.)

Taulukko 2. AISI 304 teräksen tyypillinen kemiallinen koostumus painoprosentteina (Outokumpu, 2009).

EN	AISI	C (%)	Cr (%)	Ni (%)
1.4301	304	Maks. 0,07	18,1	8,2

3 KATSAUS AIHEESTA LÖYTYVIIN TUTKIMUKSIIN

Tässä luvussa perehdytään kirjallisuudesta löytyviin polttopisteen koon vaikutusta hitsin ominaisuuksiin kuitulaserhitsauksessa käsitteleviin artikkeleihin. Koska aihe on rajattu, käsiteltiin kaikissa tutkimuksissa polttopisteen koon lisäksi yhtä tai useampaa muuta eri parametria. Alla olevissa tiivistelmissä keskitytään kuitenkin pelkästään polttopisteen kokoa koskeviin osuuksiin tutkimuksissa.

3.1 Hilton & Verhaeghe

Hiltonin ja Verhaeghen (2005) The Welding Institutelle suorittamassa 2005 julkaistussa tutkimuksessa tutkittiin polttopisteen koon ja säteenlaadun vaikutusta hitsaukseen suuritehoisella laserilla hitsattaessa. Tutkimuksessa vertailtiin ohuihin ja paksuihin teräs- ja alumiinilevyihin, erilaisilla säteenlaaduilla varustetuilla laserkoonpanoilla, tehtyjä hitsejä toisiinsa. Tutkimuksen tuloksien analysoinnissa on keskitytty jostain syystä melkein pelkästään alumiinin hitsauksessa saatuihin tuloksiin, mutta siinä mainitaan myös, että tulokset olivat myös teräkselle samansuuntaisia. (Hilton & Verhaeghe, 2005.)

Kuvassa 10 on taulukoituna hitsauskokeissa käytettyjen laserkoonpanojen oleellimmat parametrit. Tutkimuksessa käytettiin Nd:YAG -laseria ja Ytterbium kuitulaseria. Kummallakin käytettiin kahta erikokoista prosessikuitua. Lisäksi käyttämällä erilaisia kollimointi- ja polttovälikoonpanoja saatiin 7 erilaista polttopisteen halkaisijaa, jotka olivat laskennallisesti välillä 0,13 – 0,60 mm. Säteen analysointiin käytettyjen Prometecin ja Primesin analysointilaitteistojen avulla saadut mitatut polttopisteen halkaisijat olivat välillä 0,14 – 0,61 mm. Analysointilaitteistoista saadun tiedon avulla eri polttopisteiden halkaisijoille saatiin johdettua myös sädeparametritulon arvot, jotka vaihtelivat välillä 4 – 23 mm* mrad . Tehona työkappaleen pinnalla oli kaikissa tapauksissa 4 kW. (Hilton & Verhaeghe, 2005.)

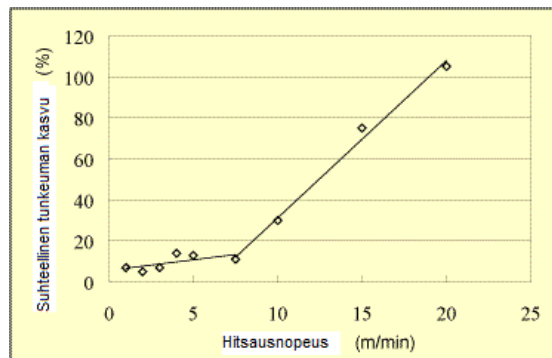
Työkappaleina tutkimuksessa käytettiin paksuudeltaan 5 ja 10 mm ja kooltaan 300 mm * 75 mm olevia S275 teräslevyjä ja vastaavan kokoisia 5083-O alumiinilevyjä, jotka oli koneistettu siten että 5 mm paksujen levyjen paksuus pieneni 300 mm matkalla viidestä millistä yhteen milliin ja 10 mm paksujen levyjen kymmenestä millistä neljään milliin. Työkappaleet olivat kiinnitettynä hitsatessa koneistettu puoli alaspäin. Teräksen hitsauksessa ei käytetty ollenkaan suojakaasua. Alumiinin hitsauksessa käytettiin argonia

sekä suoraan hitsaustapahtumaan, että juuren puolelle. Hitsaus suoritettiin jalkoasennossa siten, että lasersäde oli kohtisuorassa työkappaleen pinnan suhteen. Polttopiste oli asetettuna työkappaleen pinnalle. Kohdat joissa menetettiin täysi tunkeuma, merkittiin ja kohdasta mitattiin työkappaleen paksuus. (Hilton & Verhaeghe, 2005.)

Laser	Laser 1		Laser 2		Laser 3		Laser 4	
	Nd:YAG		Yb:Fibre		Yb:Fibre		Yb:YAG disc	
Prosessikuidun halkaisija (mm)	0.6		0.3		0.1		0.2	
Kollimointilinssin polttoväli (mm)	200		120		120		150	200
Fokusointilinssin polttoväli (mm)	200	150	160	500	160	280	200	
Nimellinen polttopisteen halkaisija (mm)	0.60	0.45	0.40	0.42	0.13	0.37	0.20	
Mitattu polttopisteen halkaisija (mm)	0.61	0.44	0.39	0.40	0.14	0.34	0.20	
BPP (mm ² mrad)	23	22	18	4	4	7	7	
Rayleigh pituus (mm)	4.0	2.5	2.1	9.9	1.2	4.0	1.1	
Laserteho työkappaleen pinnalla	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	
Tehotiheys (kW/mm ²)	13.7	26.6	33.8	31.5	264.4	45.1	134.2	
Kirkkaus (10 ⁵ W/mm ² . steradiaania)	2.79	3.04	5.96	54.25	46.60	18.01	27.34	

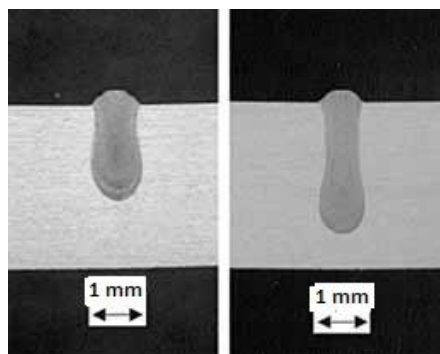
Kuva 10. Hitsauskokeissa käytettyjen laserkokoonpanojen parametrit (mukailien Hilton & Verhaeghe, 2005).

Tutkimuksen tuloksia tarkastellessa nähdään, että polttopisteen pienentyessä ja näin ollen säteen tehotiheyden kasvaessa, hitsin tunkeuma kasvaa huomattavasti. Tämä käy ilmi selvästi kuvassa 11, jossa on kuvattuna tunkeuman prosentuaalinen kasvu hitsattaessa 0,14 mm polttopisteellä verrattuna 0,4 mm polttopisteeseen hitsausnopeuden funktiona. Kuvaajasta nähdään, että hitsausnopeuden ollessa alle 7,5 m/min ero ei ole kuin kymmenen prosentin luokkaa mutta nopeuden kasvaessa yli tuosta arvosta, kasvaa ero tunkeumassa jyrkästi ja lineaarisesti sen ollessa yli sadan prosentin luokkaa hitsausnopeuden ollessa 20 m/min. (Hilton & Verhaeghe, 2005.)



Kuva 11. Tunkeuman prosentuaalinen kasvu 0,14 mm polttopisteellä verrattuna 0,4 mm polttopisteeseen hitsausnopeuden funktiona (mukaan Hilton & Verhaeghe, 2005).

Kuvassa 12 nähdään polttopisteen koon vaikutus hitsin geometriaan hitsausnopeuden pysyessä vakiona. Vasemmanpuoleinen poikkileikkaus on hitsattu 0,34 mm polttopisteellä ja oikeanpuoleinen 0,20 mm polttopisteellä. Hitsaus on suoritettu suoraan levyn päälle hitsausnopeuden ollessa 15 m/min ja BPP 7 mm* mrad . Kuvasta näkee, että pienemmällä polttopisteellä hitsattaessa tunkeuma on selvästi suurempi ja hitsi kapeampi. Hitsin pinta-alaat ovat mittausten mukaan lähes yhtä suuret, joka viittaa siihen, että sulatusteho on molemmissa tapauksissa sama. (Hilton & Verhaeghe, 2005.)



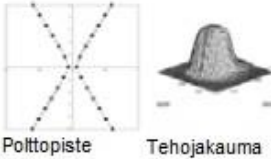
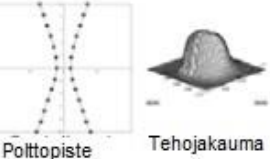
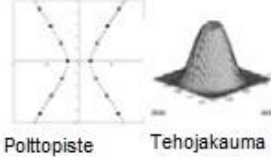

Kuva 12. Poikkileikkauskuvat hitseistä, jotka hitsattu 0,34 mm polttopisteellä (vasen) ja 0,20 mm polttopisteellä (oikea) (Hilton & Verhaeghe, 2005).

Tutkimuksen loppupäätelminä todetaan, että ensinnäkin pienemmällä polttopisteellä saavutetaan hitsauksessa, joko suurempi tunkeuma tietyllä hitsausnopeudella, tai suurempi hitsausnopeus tietyllä tunkeumalla verrattuna suurempaan polttopisteeseen, mikäli säteenlaatu pysyy vakiona. Samalla tavoin vaikuttaa myös säteenlaadun paraneminen polttopisteen koon pysyessä vakiona. Lisäksi loppupäätelmissä on mainittu, että tunkeuman kasvaminen on verrattain pientä, kun polttopisteen koko menee alle 0,3 millimetriin. (Hilton & Verhaeghe, 2005.)

3.2 Kawahito, Mizutani & Katayama

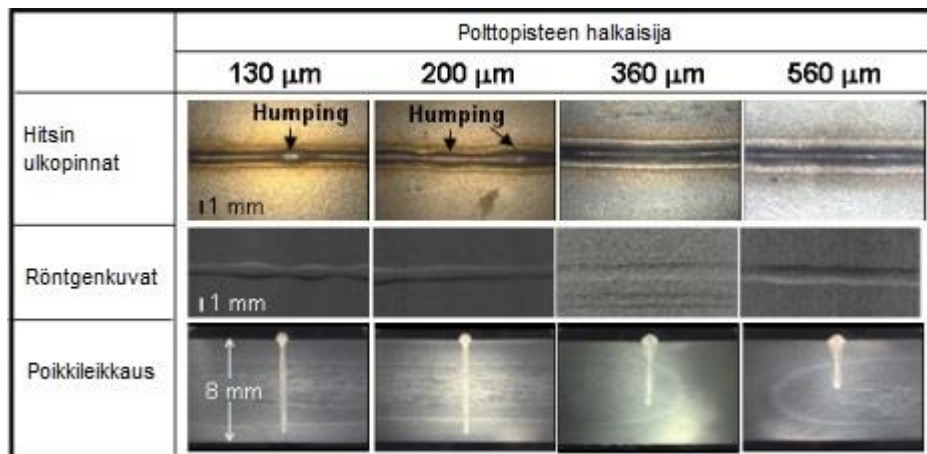
Tässä vuonna 2007 julkaistussa tutkimuksessa tutkittiin erilaisten laserparametrien vaikutuksia hitsiin. Laserina tutkimuksessa käytettiin IPG:n 10 kilowatin kuitulaseria ja hitsauksessa käytettiin neljää erilaista polttopisteen halkaisijaa. Hitsattavana materiaalina oli ruostumaton 304 tyyppinen austeniittinen teräs ja hitsit hitsattiin suoraan levyn päälle. Hitsaus suoritettiin avaimenreikähitsauksena mutta siinä haettiin pelkästään osittaista tunkeumaa. (Kawahito, Mizutani & Katayama, 2007, s. 11.)

Hitsattavat levyt olivat paksuudeltaan 8 ja 20 mm. Paksumpaa materiaalia käytettiin, jos 8 mm levyjä hitsattaessa saavutettiin täysi tunkeuma. Hitsauksessa käytetty laserteho oli 6 kW ja BPP 4,5 mm* mrad . Kuvassa 13 tarkemmin kuvatut neljä erikokoista polttopistettä välillä 130 – 560 μm saatiin käyttämällä kahta eri prosessikuitua ja kahta eri polttoväliä. Ja näillä saavutettiin tehotiheyden skaala 0,6 MW/mm^2 – 20 kW/mm^2 . Hitsausnopeudet olivat kokeissa välillä 0,6 – 10 m/min. Hitsauksen aikaisessa seurannassa käytettiin suurnopeuskameraa ja röntgenkuvauslaitteistoa. Suojakaasuna käytetty argon tuotiin hitsaustapahtumaan omasta suuttimestaan lasersuuttimen vierestä. (Kawahito et al., 2007, s. 11.)

Polttoväli	150 mm	250 mm
Prosessikuitu (ϕ 100 μm)		
	Polttopiste 130 μm	Polttopiste 200 μm
	Tehotiheys 0,6 MW/mm^2	Tehotiheys : 0,2 MW/mm^2
Prosessikuitu (ϕ 300 μm)		
	Polttopiste : 360 μm	Polttopiste 560 μm
	Tehotiheys : 60 kW/mm^2	Tehotiheys : 20 kW/mm^2

Kuva 4. Hitsauskokeissa käytettyjen neljän erilaisen polttopisteen ominaisuudet ja niiden aikaan saamiseksi käytetyt parametrit (mukailen Kawahito et al., 2007, s. 12).

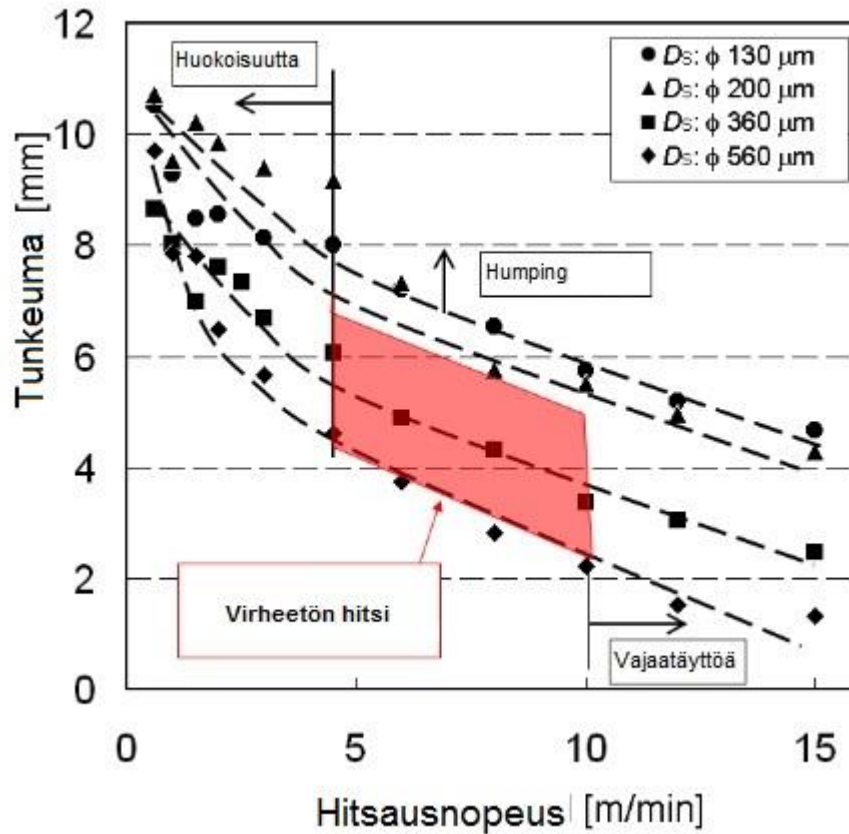
Hitsauskokeista saadut tulokset kertovat, että polttopisteen koon muuttuessa pienemmäksi ja tehotehyyden kasvaessa, tunkeuma odotetusti kasvaa merkittävästi. Kuvan 14 läpileikkauksista nähdään kuinka hitsausnopeudella 6 m/min hitsattujen hitsien tunkeuma pienentyy noin puoleen, kun polttopisteen halkaisija muuttuu 130 mikrometristä 560 mikrometriin. Saavutettu tunkeuma 130 μm polttopisteellä kyseisellä hitsausnopeudella oli 7,4 mm. Samassa kuvassa olevista hitsauspalon pinnalta otetuista kuvista nähdään, kuinka kahdella pienemmällä polttopisteen koolla hitsattaessa on tapahtunut ns. humping ilmiö, jossa hitsin pinnasta tulee epätasainen. Suurnopeusvideokameran kuvan perusteella näyttäisi, että syynä valumiin oli mahdollisesti päällekkäisestä hitsisulan virrasta keyholen etuosasta sen takaosaan yhdistettynä laserin aiheuttamaan metallihöyrypilveen sekä kapean hitsisulan aiheuttamaan suurempaan sulan pintajännitykseen. Muutoin hitsit olivat virheetömiä, eikä röntgenkuvissa näy jälkiä huokosista. (Kawahito et. al. 2007, s. 12.)



Kuva 5. Kuvat hitsien pinnalta ja polttoleikkauksista sekä röntgenkuvat hitsauskokeesta, jossa käytettiin vakiohitsausnopeutta ja neljää eri polttopisteen kokoa (mukaillen Kawahito et al., 2007, s. 12).

Kokeessa jossa verrattiin erilaisia hitsausnopeuksia, havaittiin että alle 4,5 m/min nopeuksilla hitseihin alkoi syntyä huokosia ja yli 10 m/min nopeuksilla roiskeita ja vajaata hitsin täyttymistä. Vajaaseen tunkeumaan auttoi kuitenkin kohtisuoraan työkappaleeseen nähden olleen hitsauskulman vaihtaminen joko vetävään tai työntävään kulmaan. Kuvassa 15 on koostettuna erilaisten parametrien vaikutukset hitsiin. Kuvaa rajatulla punaisella alueella, jossa hitsausnopeus on 5-10 m/min, saatiin aikaan virheetöntä hitsiä kahdella suuremmalla polttopisteen halkaisijalla. Kahdella halkaisijaltaan pienemmällä polttopisteellä esiintyi myös kuvassa 14 näkyvä humping ilmiö. Alle 5 m/min

hitsausnopeuksilla hitseissä alkoi esiintyä huokoisuutta ja yli 10 m/min nopeuksilla vajaata täyttöä. (Kawahito et al., 2007, s. 13.)



Kuva 6. Hitsausnopeuden ja polttopisteen koon vaikutukset hitsin tunkeumaan ja hitsausvirheisiin (Kawahito et al., 2007, s. 13).

Loppuyhteenvetona tutkimuksesta voisi sanoa, että se mukailee tunkeuman osalta saavutettujen tulosten osalta hyvin TWI:n suorittamaa kohdassa 2.1 läpikäytyä tutkimusta. Lisäksi se antoi lisätietoa polttopisteen koon vaikutuksista hitsausvirheisiin, joita ei TWI:n tutkimuksessa käsitelty lainkaan. Kahdella pienimmällä polttopisteen halkaisijalla saavutettiin syvimät tunkeumat mutta näissä hitseissä esiintyi edellä mainittua humpingia. Suuremmilla polttopisteen halkaisijoilla saavutetut tunkeumat jäivät pienemmiksi mutta hitsit olivat oikeilla hitsausnopeuden arvoilla virheettömiä.

3.3 Suder & Williams

Suderin ja Williamsin (2013) tutkimuksessa yritettiin etsiä fenomenologista mallia hitsin tunkeuman ja leveyden määrittäville parametreille polttopisteen halkaisijasta riippumatta. Tällainen tehokertoimeen ja säteen vaikutusaikaan perustuva malli helpottaisi oikeiden hitsausparametrien löytymistä erilaisilla laserhitsausjärjestelmillä ja erilaisilla polttopisteen halkaisijoilla hitsattaessa verrattuna nykytilanteeseen, jossa oikeat parametrit on haettava usein puhtaasti kokeilemalla. Tässä tiivistelmässä keskitytään pääasiassa polttopisteen koon muutoksien aiheuttamiin vaikutuksiin tutkimuksen varsinaisena aiheena olevan mallin sijaan. (Suder & Williams, 2013, s. 224.)

Tehokerroin P_F voidaan laskea seuraavasti:

$$P_F = q_p D = \frac{P}{D} \left[\frac{W}{m} \right] \quad (9)$$

Yhtälössä 9 säteen tehoitehuys q_p kerrotaan polttopisteen halkaisijalla D . Sama saadaan myös jakamalla säteen teho P polttopisteen halkaisijalla. (Suder & Williams, 2013, s. 224.)

Säteen vaikutusaika τ_i taas saadaan laskettua seuraavasti:

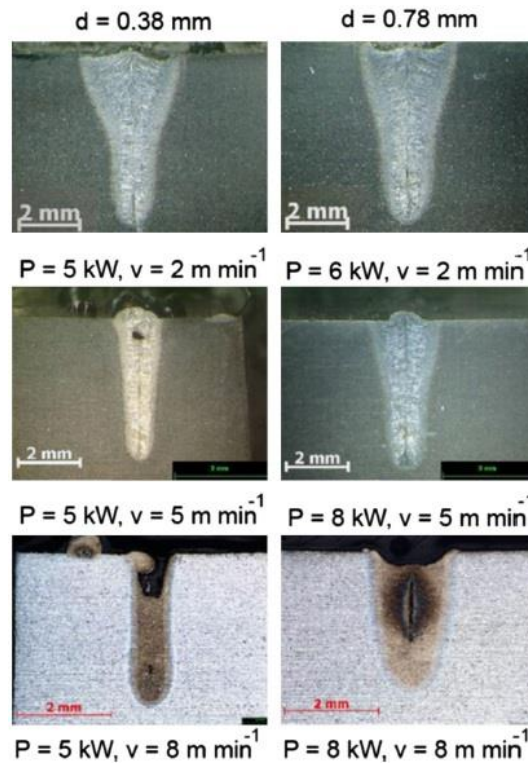
$$\tau_i = \frac{D}{v} [s] \quad (10)$$

Yhtälössä 10 jaetaan polttopisteen halkaisija D hitsaussuunnassa hitsausnopeudella v . (Suder & Williams, 2013, s. 224.)

Hitsauskokeet suoritettiin hitsaamalla 12 mm paksun S355 teräslevyn pintaan maksimiteholtaan 8 kW olevalla kuitulaserilla, jossa BPP oli 16 mm*mrad. Prosessikuitu oli halkaisijaltaan 300 μm ja neljää eri fokusointilinsikokoonpanoa käyttämällä saatiin neljä erikokoista polttopistettä halkaisijoiltaan 0,38 - 0,78 mm. Eri fokusointilinssejä käyttämällä varmistettiin, että säteen tehojakauma pysyy samanlaisena riippumatta polttopisteen halkaisijasta. Polttopiste oli kohdistettu työkappaleen pinnalle ja suojakaasuna käytettiin argonia. Hitsaus suoritettiin avaimenreikähitsauksena. (Suder & Williams, 2013, s. 224.)

Ensimmäisessä vaiheessa koetta, jonka avulla tutkittiin polttopisteen koon vaikutusta tunkeumaan, käytettiin 0,38 mm ja 0,78 mm halkaisijoiltaan olevia polttopisteitä. Lasertehto kappaleen pinnalla vaihteli välillä 2 – 8 kW ja hitsausnopeus 0,3 – 10 m/min. Toisessa vaiheessa, jossa tutkittiin polttopisteen koon vaikutusta sulavyöhykkeen leveyteen, käytettiin ensimmäisestä vaiheesta saatua dataa, jotta saatiin hitsattua tunkeumaltaan vastaavat hitsit 0,5; 2,0 ja 3,0 m/min hitsausnopeuksilla. Polttopisteet olivat tässäkin tapauksessa halkaisijaltaan 0,38 mm ja 0,78 mm. Lasertehto säädettiin sen mukaan, että saatiin jokaisella tietyllä hitsausnopeuden ja polttopisteen koon kombinaatiolla 6 mm tunkeuma. Lopuksi hitseistä otettuja makrokuvia verrattiin keskenään. (Suder & Williams, 2013, s. 224.)

Kokeiden tuloksia tarkastellessa huomataan, että polttopisteen koko vaikuttaa tunkeuman syvyyden lisäksi myös sen muotoon. Tämä ilmenee kuvassa 16 olevissa hitsien poikkileikkauksista otetuissa makrokuvissa. Lisäksi on huomioitava, että tunkeuman muodon ero kahden eri polttopisteen välillä muuttuu suuremmaksi hitsausnopeuden kasvaessa, eron ollessa vielä 2 m/min nopeudella hitsattaessa erittäin pieni. Tutkimuksessa mainitaan, että hitsattavan materiaalin termiset ominaisuudet mahdollisesti vaikuttavat tähän ilmiöön siten, että huonommin lämpöä johtavilla materiaaleilla se on havaittavissa entistä alemmilla hitsausnopeuksilla. Tällöin ilmiö olisi voimakkaampaa esimerkiksi hitsattaessa ruostumatonta terästä, jolla on heikompi lämmönjohtokyky verrattuna tässä kokeessa käytettyyn seostamattomaan S355 rakenneteräkseen. Kuvasta näkee myös sen, että pienemmällä polttopisteellä saavutetaan yhtä suuri tunkeuma pienemmällä teholla, kuin suurempaa polttopistettä käytettäessä. Tämä seikka on tosin käynyt ilmi myös jo kahdessa aiemmin käsitellyssä tutkimuksessa. (Suder & Williams, 2013, s. 225.)



Kuva 7. Polttopisteen halkaisijan vaikutus hitsin leveyteen hitsausnopeuden ja tunkeuman pysyessä vakiona (Suder & Williams, 2013, s. 226).

Tutkimuksen varsinaisena aiheena olleen tehokertoimeen ja säteen vaikutusaikaan perustuvan mallin osalta tulokset osoittivat, että erilaisilla hitsausnopeuden ja tehon yhdistelmillä voidaan saavuttaa sama tunkeuma eri polttopisteiden halkaisijoilla. Polttopisteen halkaisija kuitenkin monimutkaistaa oikeiden parametrien valintaa. Saatujen tulosten avulla saatiin muodostettua tehokertoimelle yhtälö. (Suder & Williams, 2013, s. 225-227.)

$$P_F = (4.25PD + 17) \times \tau_i^{(0.045PD - 0.782)} [\text{MW/m}] \quad (11)$$

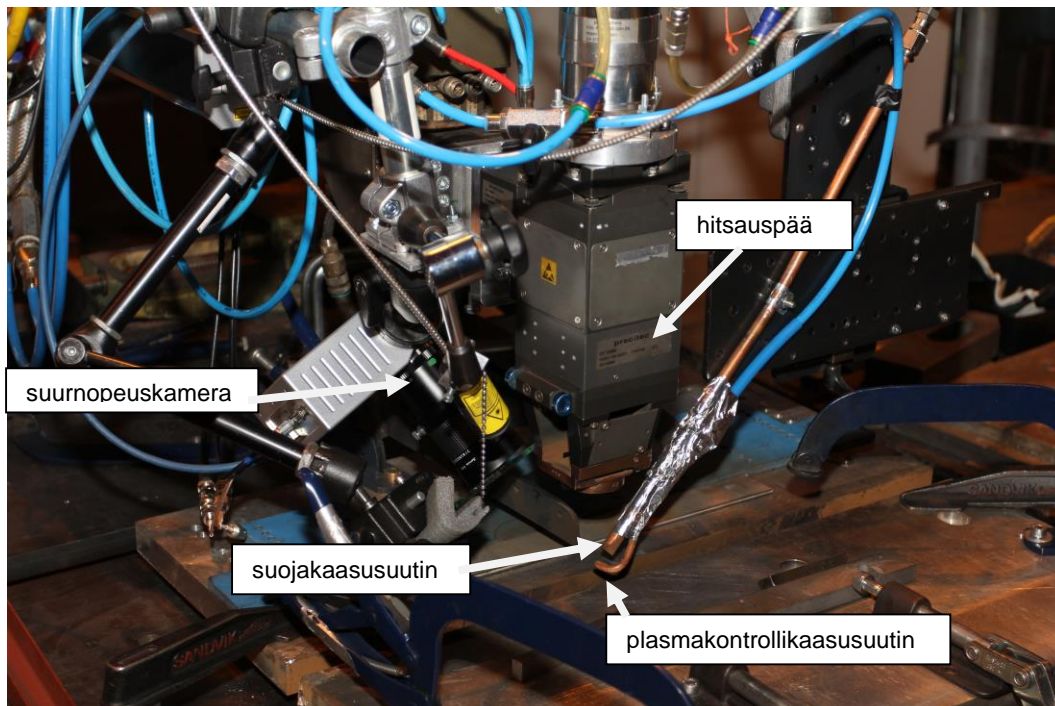
Tehokerroin P_F muodostuu yhtälössä 11 halutusta tunkeumasta PD (mm) ja säteen vaikutusajasta τ_i (ms). On otettava kuitenkin huomioon, että kaavaa on testattu ainoastaan polttopisteiden halkaisijoilla 0,35 – 1 mm ja säteen vaikutusajoilla 2,5 – 150 ms. Kaavan mukaisia arvoja käyttämällä hitsauskokeissa saadut tunkeumat eri polttopisteen halkaisijoilla erosivat maksimissaan noin millin. Lisäksi on huomioitavaa, että polttopisteen kasvaessa tarpeeksi suureksi, tulee hitsaukseen vaadittavan säteen tehotiheyden saavuttaminen mahdottomaksi huolimatta säteen vaikutusajasta. (Suder & Williams, 2013, s. 225-227.)

4 HITSAUSKOKEET

Työtä varten tehdyt hitsauskokeet suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston lasertekniikan laboratoriossa. Kokeissa hitsattiin 10 kW kuitulaserilla kahta erilaista teräslaatua erilaisilla polttopisteen halkaisijoilla. Polttopisteen halkaisijan vaikutusta hitsin ominaisuuksiin arvioitiin silmämääräisesti, makrohietutkimuksen avulla ja kovuusmittauksilla.

4.1 Hitsauskoejärjestelyt

Hitsauskokeissa tehdyt hitsit hitsattiin IPG:n kymmenen kilowatin YLS-10000 kuitulaserilla, johon oli liitetty Precitecin YW50 hitsauspää. Kokeissa käytettiin kolmea halkaisijoltaan 200 μm , 300 μm ja 600 μm olevaa prosessikuitua. Lisäksi käytettiin kahta erilaista fokuointilinssiä polttoväleiltään 200 mm ja 300 mm. Kollimointioptiikan polttoväli oli 150 mm. Suojakaasu ja hitsaustapahtumassa syntyvää metallihöyryä poistava plasmakontrollikaasu tuotiin hitsaustapahtumaan erillisistä suuttimistaan. Hitsauksen seurannassa käytettiin lisäksi suurnopeuskameraa. Kuvassa 17 on yleiskuva koejärjestelyistä hitsauspään osalta.



Kuva 17. Hitsauspää, siihen liitetty suurnopeuskamera sekä suoja- ja plasmakaasusuuttimet.

Hitsauskokeet suoritettiin päittäisliitoksena I-railoon kahdelle eri materiaalille. Materiaaleina käytettiin niukkaseosteista S355 rakenneterästä ja austeniittista ruostumatonta AISI 304 terästä. Aineenpaksuus oli kummallakin materiaalilla 6 mm. S355 teräksen koekappaleet olivat muilta mitoiltaan 50 mm x 150 mm ja AISI 304 koekappaleet 140 mm x 230 mm.

Käytetyt hitsausparametrit valittiin siten, että ainoastaan polttopisteen halkaisijaan vaikuttavia parametreja eli prosessikuidun halkaisijaa ja fokusointioptiikan polttoväliä käytettiin muuttujina eri hitsien välillä. Muut parametrit, kuten: teho, hitsausnopeus, suojakaasun syöttö ja polttopisteen asema pidettiin samana, joka hitsillä. Tehon ollessa 8 kW, hitsausnopeuden 2,0 m/min ja polttopisteen aseman 3 mm työkappaleen pinnan alapuolella. Eri hitseillä käytetyt muuttujien arvot ovat esitettyinä taulukossa 3, jossa on myös laskettuna kaavan 5 mukaan teoreettinen polttopisteen halkaisija eri muuttujien arvoilla.

Taulukko 3. Hitsauskokeissa eri hitseille käytetyt muuttujien arvojen yhdistelmät.

Hitsi nro.	Materiaali	Prosessikuidun halkaisija (µm)	Polttoväli (mm)	Polttopisteen halkaisija (µm)
2	S355	200	200	267
3	AISI 304	200	200	267
5	S355	200	300	400
6	AISI 304	200	300	400
11	S355	300	200	400
12	AISI 304	300	200	400
14	S355	300	300	600
15	AISI 304	300	300	600
20	S355	600	200	800
21	AISI 304	600	200	800
23	S355	600	300	1200
24	AISI 304	600	300	1200

4.2 Metallurgiset tutkimukset

Valmiit hitsit merkittiin tunnistettavuuden takia hitsin numerolla ja kirjaimilla T (pinta) tai R (juuri), jonka jälkeen kummaltakin puolelta otettiin valokuvat. Tämän jälkeen työkappaleesta leikattiin levyleikkurilla hitsin molemmilta puolilta ylimääräinen materiaali pois siten, että hitsin muutosvyöhyke jäi selvästi näkyviin ja jäljelle jäävän kappaleen leveys oli noin 30 mm. Seuraavaksi kappaleesta sahattiin hitsin alusta 30 mm pois, jonka jälkeen siitä sahattiin vielä varsinainen 15 millimetrin pituinen hieaihio.

Hieaihioista hiottiin ensin terävät särmät pois ja merkittiin tunnistamisen helpottamiseksi stanssaamalla hitsien numerot aihioihin. Tämän jälkeen hitsien poikkileikkauspinnat hiottiin kahdella eri hiomapaperin karkeudella ja lopuksi kiillotettiin, jonka jälkeen kiillotetut pinnat syövytettiin, niin että hitsien sula- ja lämpövaikutusvyöhykkeet saatiin selvästi näkyviin makrokuvausta varten.

Makrokuvien ottamisen jälkeen S355 teräkselle tehdyille hitseille tehtiin vielä kovuusmittaukset. Kovuudet mitattiin Vickersin kovuuskokeella 5 kilon painolla. Mittaukset suoritettiin siten, että kustakin hieestä otettiin yksi mittaussarja aineenpaksuuden puolivälistä. Sarjassa oli hitsin leveydestä riippuen 10–13 mittauskohdtaa, joiden välit olivat 0,5 mm. Lopuksi mitattujen hieiden pinnat vielä kuvattiin.

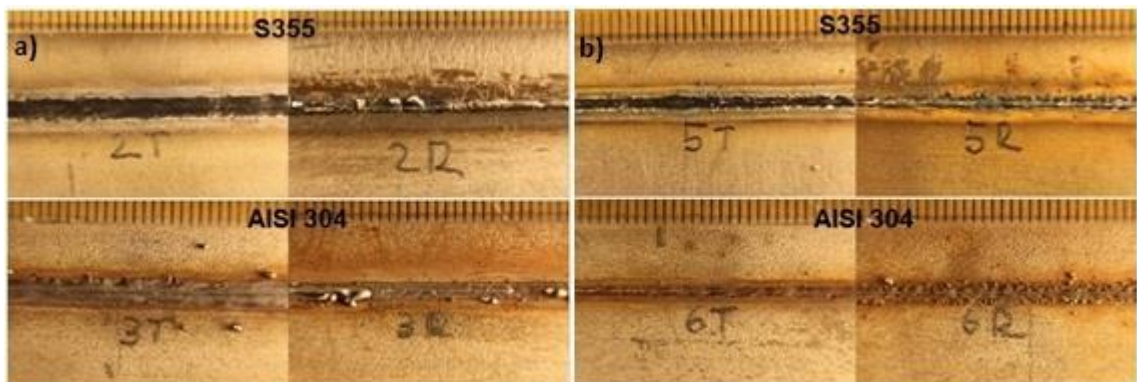
5 TULOKSET

Tulosten tarkastelussa käydään ensin läpi hitsien silmämääräinen tarkastelu pinnan ja juuren osalta. Tämän jälkeen tarkastellaan hitsien poikkileikkauksista otettuja makrokuvia ja viimeiseksi käsitellään kovuusmittausten tulokset.

5.1 Hitsien pinta ja juuri

Kuvat esitellään kolmessa osassa, jotka on jaettu hitsauksessa käytetyn prosessikuidun halkaisijan mukaan. Kuviin on merkitty hitsattava materiaali.

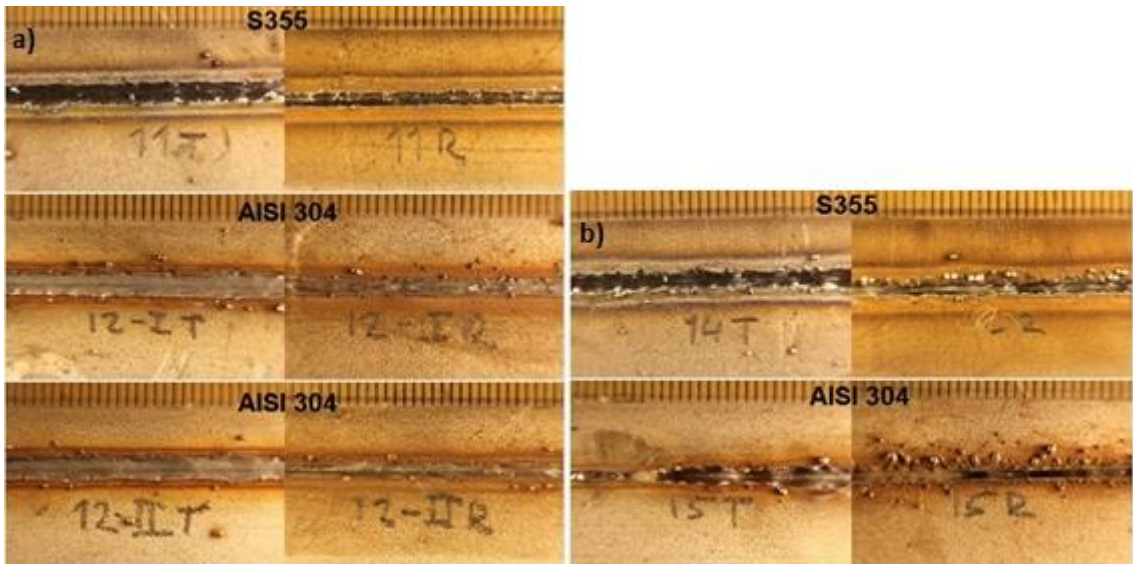
Kuvassa 18 olevista 200 μm prosessikuidulla hitsattujen hitsien valokuvista nähdään, että pienemmällä 270 μm polttopisteellä hitsatuissa kuvan a) hitseissä 2 ja 3 hitsit ovat pintapaloltaan leveämpiä, kuin suuremmalla 400 μm polttopisteellä hitsatuissa kuvan b) hitseissä 5 ja 6. Lisäksi pienemmällä polttopisteellä hitsattujen hitsien juuren puolella on havaittavissa valumia. Tästä voi päätellä, että hitsausprosessi on ollut vakaampi käytettäessä suurempaa polttopisteen halkaisijaa.



Kuva 8. a) Prosessikuitu 200 μm , polttoväli 200 mm ja polttopisteen halkaisija 270 μm **b)** Prosessikuitu 200 μm , polttoväli 300 mm ja polttopisteen halkaisija 400 μm .

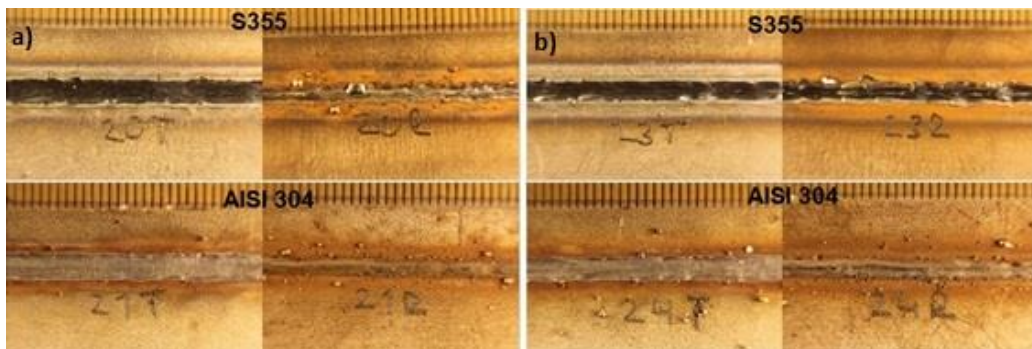
Kuvan 19 hitsit on hitsattu 300 μm prosessikuidulla polttopisteen halkaisijan ollessa 200 mm polttoväliä käytettäessä 400 μm ja 300 mm polttoväliä käytettäessä 600 μm . Kummallakin polttopisteen halkaisijalla hitseihin syntyi jonkun verran roiskeita, etenkin ruostumattomalla teräksellä. Hitsit ovat myös tässäkin tapauksessa leveämpiä pinnan, kuin juuren puolelta lukuun ottamatta hitsiä numero 15, jossa hitsausprosessi oli kauttaaltaan epävakaata. Suurnopeusvideosta oli nähtävissä, että avaimenreiän koko

vaihteli hitsauksen aikana ja sula käyttäytyi erittäin epävakaasti. Tämän seurauksena juuren puolella onkin nähtävissä paljon roiskeita ja reikiä, joista osa meni jopa läpi koko kappaleesta. Vastaavilla parametreilla rakenneteräkseen hitsattu hitsi onnistui hieman paremmin mutta siinäkin hitsi on vajaa, niin pinnan, kuin juuren puolelta.



Kuva 19. a) Prosessikuitu 300 μm , polttoväli 200 mm ja polttopisteen halkaisija 400 μm **b)** Prosessikuitu 300 μm , polttoväli 300 mm ja polttopisteen halkaisija 600 μm .

600 μm prosessikuidulla hitsatuissa kuvan 20 hitseistä nähdään jälleen, että ruostumattomalle teräkselle tehdyissä hitseissä 21 ja 24 on enemmän roiskeita, niin pinnan, kuin juurenkin puolella. Myös pienemmällä 800 μm polttopisteellä hitsatussa hitsissä numero 20 on juuren puolella jonkun verran roiskeita. Isommalla 1200 μm polttopisteellä hitsatussa hitsissä numero 23 prosessi on ollut vakaa, eikä roiskeita ole kummallakaan puolella.



Kuva 20. a) Prosessikuitu 600 μm , polttoväli 200 mm ja polttopisteen halkaisija 800 μm **b)** Prosessikuitu 600 μm , polttoväli 300 mm ja polttopisteen halkaisija 1200 μm .

5.2 Makrokuvat

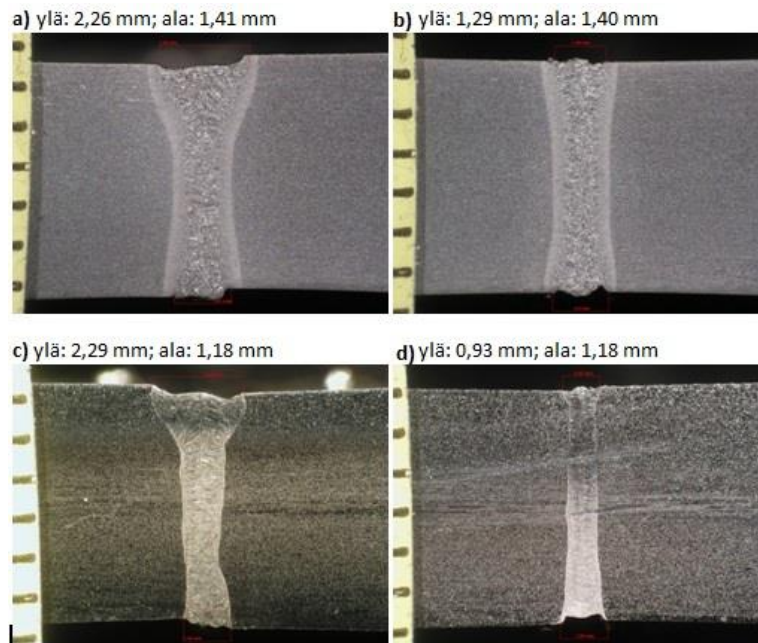
Makrokuvat esitellään edellisen kappaleen tavoin kolmessa osassa prosessikuidun halkaisijan mukaan. Joka kuvasta mitattiin sulavyöhykkeiden leveydet hitsin pinnalta ja juuresta Zeissin AxioVision ohjelmalla. Mitatut leveydet ovat merkittyinä kuviin. Lisäksi kuvista mitattiin hitsien poikkipinta-alat.

Taulukoon 4 on koottuna kaikkien hitsien sulavyöhykkeiden leveydet pinnalta ja juuresta sekä hitsien poikkipinta-alat. Poikkipinta-alojen osalta on nähtävissä selvästi, että polttopisteen halkaisijan kasvaessa myös hitsin poikkipinta-ala kasvaa. Rakenneteräksellä ja ruostumattomalla teräksellä ei ole havaittavissa selkeitä eroja poikkipinta-aloissa, kun vertaa samoilla parametreilla tehtyjä hitsejä keskenään.

Taulukko 4. Hitsien makrokuvista mitatut sulavyöhykkeiden leveydet ja poikkipinta-alat.

hiksi nro.	polttopiste (mm)	leveys - pinta (mm)	leveys - juuri (mm)	pinta-ala (mm ²)
2	0,27	2,26	1,41	6,98
3	0,27	2,29	1,18	7,42
5	0,4	1,29	1,4	6,02
6	0,4	0,93	1,18	4,68
11	0,4	2,32	1,44	8,14
12-I	0,4	2,33	1,53	8,13
12-II	0,4	2,21	1,47	7,85
14	0,6	1,8	1,88	7,22
15	0,6	1,64	1,16	5,5
20	0,8	2,75	1,82	9,48
21	0,8	3,23	1,49	9,72
23	1,2	2,56	2,4	10,03
24	1,2	2,62	2,03	11,03

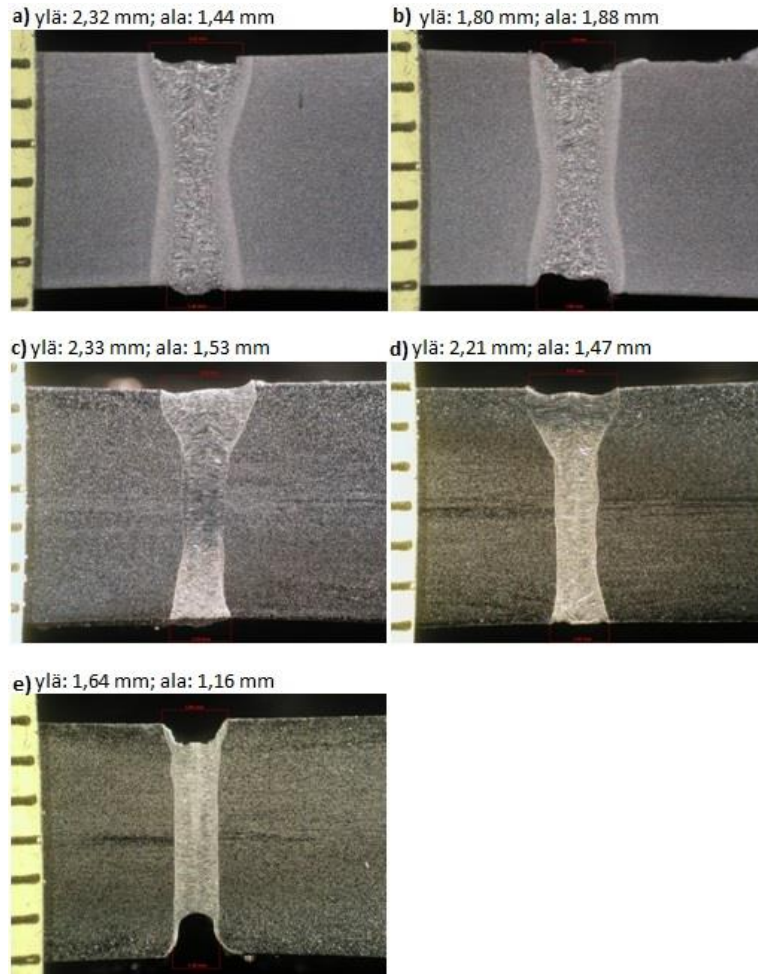
Kuvassa 21 on makrokuvat hitseistä, jotka hitsattiin 200 µm prosessikuidulla. Odotusten vastaisesti kummallakin materiaalilla suuremmalla 400 µm polttopisteellä hitsatut hitsit 5 ja 6 ovat yläosastaan kapeampia, kuin pienemmällä 270 µm polttopisteellä hitsatut hitsit 2 ja 3. Etenkin hitsi numero 3 on muodoltaan maljamainen. Yläosia lukuun ottamatta hitsit olivat leveydeltään kuitenkin hyvin samankaltaiset riippumatta polttopisteen koosta. Kuvista havaitaan myös, että ruostumattomalla teräksellä hitsin sulavyöhyke on noin 0,2 mm kapeampi rakenneteräkseen verrattuna kummallakin polttopisteen halkaisijalla.



Kuva 21. a) Hitsi numero 2, S355 **b)** Hitsi numero 5, S355 **c)** Hitsi numero 3, AISI 304 **d)** Hitsi numero 6, AISI 304.

Kuvan 22 300 µm prosessikuidulla hitsattujen hitsien poikkileikkauskuvista nähdään, että rakenneteräksellä pienemmällä 400 µm polttopisteellä hitsattu hitsi numero 11 on vastaavasti, kuin kuvassa 21, yläosastaan leveämpi, kuin suuremmalla 600 µm polttopisteellä hitsattu hitsi numero 14. Yläosaa lukuun ottamatta pienemmällä polttopisteellä hitsattu hitsi on kuitenkin jonkun verran kapeampi, kun ne 200 µm prosessikuidun tapauksessa olivat yhtä leveitä. Hitsit numero 12-I ja 12-II ovat hitsattu samoilla parametreilla ja ne ovatkin, niin mitoiltaan, kuin muodoltaan lähes identtiset. Epäonnistunut hitsi numero 15 on selvästi kuvan muita hitsejä kapeampi ja selvästi vajaa sekä kuvasta, että juuresta. Sitä lukuun ottamatta ruostumattomaan teräkseen tehdyt hitsit olivat 300 µm kuidulla hitsattaessa muodoltaan maljamaisia vastaavasti, kuin kuvan 23 c) hitsi numero 3.

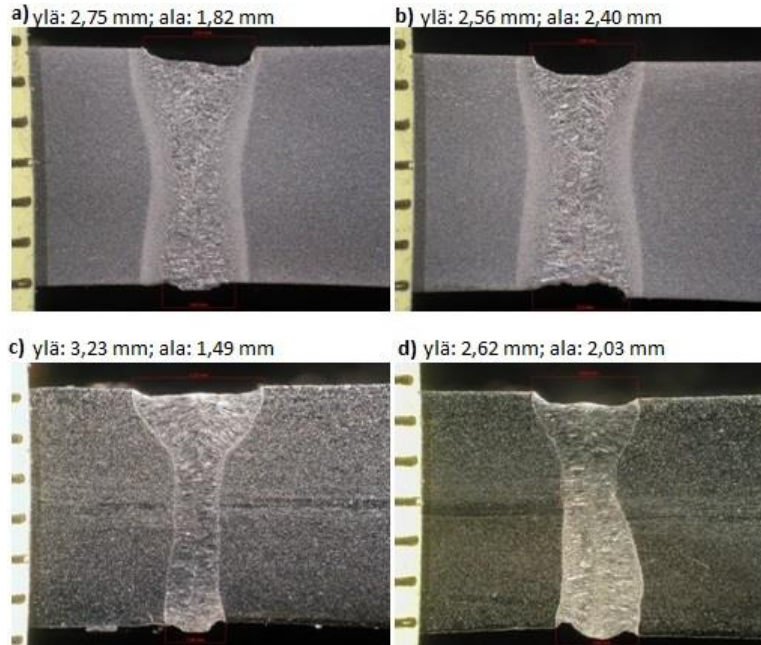
Kuvan 22 hitseissä 11, 12-I ja 12-II polttopiste oli halkaisijaltaan laskennallisesti yhtä suuri, kuin kuvan 21 b) ja d) hitseissä 5 ja 6. Verrattuna näihin 200 µm prosessikuidulla hitsattuihin hitseihin ne olivat hieman leveämpiä etenkin ruostumattoman teräksen tapauksessa, jossa pienemmällä prosessikuidulla hitsattu hitsi oli erityisen kapea sekä myös muodoltaan erilainen. Rakenneteräksellä hitsien välinen ero oli pienempi suuremmalla prosessikuidulla hitsatun hitsin ollessa lähinnä yläosastaan leveämpi.



Kuva 22. a) Hitsi numero 11, S355 b) Hitsi numero 14, S355 c) Hitsi numero 12 - I, AISI 304 d) Hitsi numero 12 – II, AISI 304 e) Hitsi numero 15, AISI 304.

Kuvan 23 poikkileikkauksista nähdään, että 600 µm prosessikuidulla ja tätä myöten suuremmilla halkaisijoiltaan 800 µm ja etenkin 12000 µm polttopisteillä hitsit ovat kauttaaltaan leveämpiä verrattuna aiemmin läpi käytyihin hitseihin. Ainoana poikkeuksena tähän on 800 µm polttopisteellä hitsattu hitsi numero 21, joka on pinnasta mitattuna kaikista kokeen hitseistä levein 3,23 mm, hitsin keski- ja alaosan ollessa kuitenkin erittäin kapea vain 1,49 mm. Ruostumattomalla teräksellä hitsit ovat edelleen muodoltaan

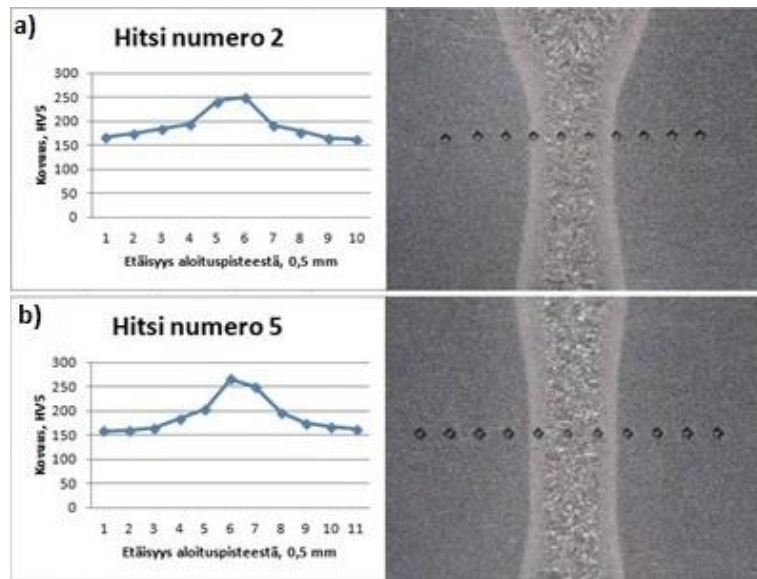
maljamainen, joskin hitsi numero 24 on muodoltaan enemmän tiimalasimainen sulavyöhykkeen leventyessä lähempänä juurta.



Kuva 23. a) Hitsi numero 20, S355 b) Hitsi numero 23, S355 c) Hitsi numero 21, AISI 304 d) Hitsi numero 24, AISI 304.

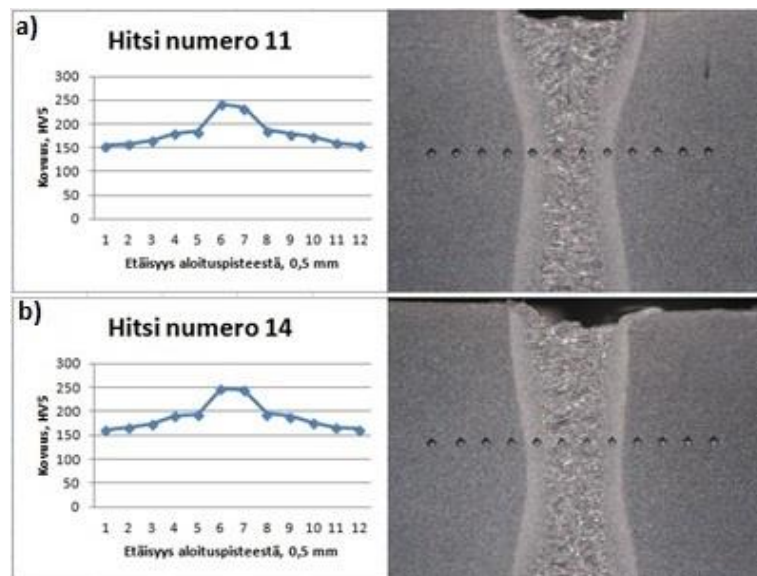
5.3 Kovuusmittaukset

Kuvassa 24 nähdään kovuuskuvaukset 200 µm prosessikuidulla hitsatuista hitseistä 2 ja 5. Pienemmällä 270 µm polttopisteellä hitsatussa hitsissä suurin mitattu kovuus oli 250 HV hitsin keskeltä, kun taas suuremmalla 400 µm polttopisteellä hitsatussa hitsissä numero 5 suurin, myös hitsin keskeltä, mitattu kovuus oli 266 HV. Aiemmissä makrokuvissa nähtiin, että hitsit olivat käytännössä yhtä leveitä pienemmällä polttopisteellä hitsatun hitsin pintaa lukuun ottamatta, jolloin suuremmalla polttopisteellä hitsatun hitsin numero 5 poikkipinta-ala on luonnollisesti suurempi. Tällöin voi olettaa, että sen suurempi kovuusarvo johtuu hitsisulan nopeammasta jäähtymisestä verrattuna hitsiin numero 2.



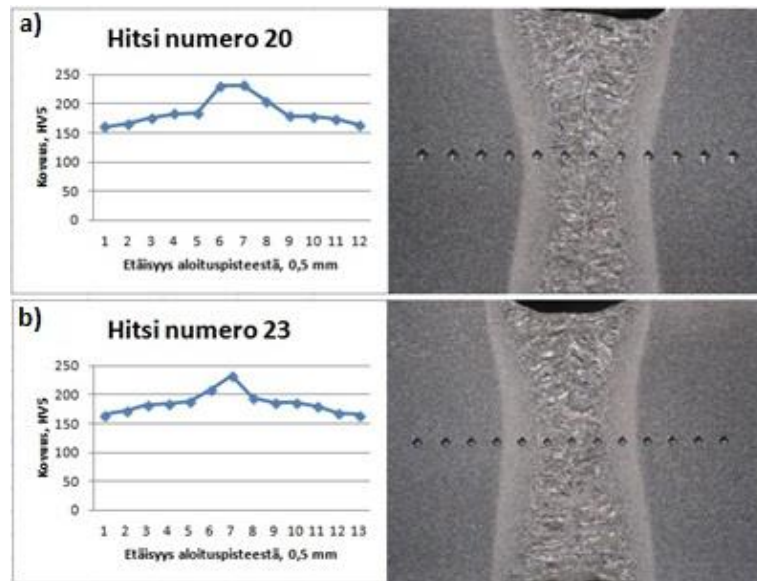
Kuva 9. a) Prosessikuitu 200 μm , polttoväli 200 mm ja polttopisteen halkaisija 270 μm **b)** Prosessikuitu 200 μm , polttoväli 300 mm ja polttopisteen halkaisija 400 μm .

Kuvan 25 300 μm prosessikuidulla hitsatuissa hitsaissa hitseissä kovuudet olivat samaa luokkaa, kuin hitsissä numero 2, maksimikovuuden ollessa hitsin keskeltä mitattuna 400 μm polttopisteellä hitsatussa hitsissä 242 HV ja 600 μm polttopisteellä hitsatussa hitsissä 247 HV. Tulokset olivat odotetun kaltaisia, koska hitsien poikkileikkausten pinta-alat olivat myös hyvin lähellä toisiaan ja näin ollen jäähtymisnopeudet ovat olleet samaa luokkaa.



Kuva 25. a) Prosessikuitu 300 μm , polttoväli 200 mm ja polttopisteen halkaisija 400 μm **b)** Prosessikuitu 300 μm , polttoväli 300 mm ja polttopisteen halkaisija 600 μm .

Kuvan 26 suurimmilla 800 ja 1200 μm polttopisteillä 600 μm prosessikuidulla hitsatuissa hitseissä mitatut maksimikovuudet jäivät aiemmin esiteltyjä pari kymmentä HV:ta pienemmiksi maksimikovuuden ollessa hitsissä numero 20 hitsin keskellä 231 HV ja hitsissä numero 23 jälleen hitsin keskellä 232 HV. Hitsien poikkipinta-alat olivat kahdessa aiemmassa kuvassa olevia hitsejä selvästi suurempia.



Kuva 26. a) Prosessikuitu 600 μm , polttoväli 200 mm ja polttopisteen halkaisija 800 μm **b)** Prosessikuitu 600 μm , polttoväli 300 mm ja polttopisteen halkaisija 1200 μm .

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Silmämääräisen tarkastelun perusteella polttopisteen halkaisijan kasvaessa hitsien leveys kasvoi, niin pinnan, kuin juurenkin puolelta. Tämä ei kuitenkaan pätenyt kaikissa tapauksissa. Kuten osassa kuvista nähtiin, saattoi esimerkiksi parin kymmenesosan verrattuna suuremmalla polttopisteen halkaisijalla hitsistä tulla huomattavastikin kapeampi verrattuna pienemmällä polttopisteellä hitsattuun hitsiin. Tästä voidaan päätellä, ettei polttopisteen halkaisija ole ainoa määräävä tekijä hitsin leveydessä, vaan tärkeämpää on löytää oikeanlainen kombinaatio eri parametreille.

Ruostumattomalla teräksellä hitseissä oli pääsääntöisesti enemmän roiskeita, niin pinnan, kuin juurenkin puolella. Rakenneteräksellä hitsit olivat pääosin roiskeettomia etenkin pinnan puolelta, vaikka osassa hitseistä oli nähtävissä pientä valumaa ja pienempiä roiskeita. Ruostumattomalla teräksellä hitsit olivat pinnan puolelta suurimmassa osassa hitseistä leveämpiä, kuin rakenneteräksellä. Juuren puolelta suurta eroa hitsien leveydessä ei ollut havaittavissa.

Makrokuvien perusteella voidaan sanoa, että pääsääntöisesti hitsit olivat leveämpiä polttopisteen halkaisijan kasvaessa. Tämä huomattiin myös edellisessä kappaleessa pinnan ja juuren valokuvien osalta. Yksi huomattava seikka on se, että hitsien muoto rakenneteräksen ja ruostumattoman teräksen välillä on huomattava. Rakenneteräksen tapauksessa hitsit olivat pääsääntöisesti kauttaaltaan enemmän tasapaksuja, kun taas ruostumattomalla teräksellä hitsit olivat yläosastaan selvästi leveämpiä muistuttaen muodoltaan maljaa lukuun ottamatta kuvan 23 c) hitsiä numero 6 ja kuvan 24 e) epäonnistunutta hitsiä numero 15. Yhtenä syynä tälle voisi esittää näiden kahden materiaalin erilaisia lämmönjohto-ominaisuuksia austeniittisen ruostumattoman teräksen ollessa lämmönjohtavuudeltaan selvästi seostamatonta rakenneterästä huonompi.

Myös poikkipinta-alat kasvoivat pääsääntöisesti polttopisteen halkaisijan kasvaessa. Huomattiin myös että, vaikka rakenneteräksellä ja ruostumattomalla teräksellä hitsit olivat muodoltaan erilaisia, ei hitsien poikkipinta-aloissa ollut keskenään merkittäviä eroja samankokoisella polttopisteellä hitsattaessa.

Kovuusmittausten osalta tulokset olivat kyseiselle teräslaadulle oletetun kaltaisia, eikä odottamattoman suuria vaihteluita kovuuksissa löytynyt. Perusmateriaalin kovuuden ollessa 160 HV luokkaa, olivat suurimmat mitatut kovuudet hitsin keskeltä mitattuna 266 HV. Suurimmat kovuudet löytyivät pienemmillä polttopisteen halkaisijoilla hitsatuista kapeammista hitseistä, kun suuremmilla polttopisteen halkaisijoilla hitsattujen sulavyöhykkeiltään leveämpien hitsien maksimikovuudet jäivät edellä mainituista muutaman kymmentä HV:ta pienemmiksi.

Mahdollisia virheitä ja tulosten epätarkkuutta tutkimuksessa on voinut aiheuttaa hitsauskokeissa koesarjan pieni koko, jolloin satunnaisvirheet ovat voineet vaikuttaa huomattavastikin tuloksiin. Yksi merkittävä tutkimukseen epätarkkuutta aiheuttanut tekijä voi olla kaava, jolla polttopisteen halkaisija kullakin prosessikuitu-fokusointilinssi – kokoonpanolla laskettiin. Kaava on enemmänkin suuntaa antava mutta tarkempaakaan metodia polttopisteen halkaisijan selvittämiselle ei löytynyt.

7 JATKOTUTKIMUKSEN TARVE

Tulevaisuudessa voisi olla tarpeellista selvittää polttopisteen koon vaikutusta erilaisilla materiaaleilla, kuten esimerkiksi suurlujuusteräksillä. Lisäksi voitaisiin tehdä selvittää, miten hitsin ominaisuudet muuttuvat hitsattaessa suurempia aineenpaksuuksia eri polttopisteen halkaisijoilla. Hitsauskokeissa olisi hyvä käyttää monipuolista hitsauksen aikaista seurantalaitteistoa, jotta saataisiin tarkempaa tietoa avaimenreiän ja sulan käyttäytymisestä hitsauksen aikana sekä tiedettäisiin tarkasti polttopisteen halkaisija.

8 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin polttopisteen koon vaikutusta hitsin ominaisuuksiin teräksen kuitulaserhitsauksessa. Tavoitteena oli selvittää, kuinka polttopisteen halkaisijan muuttaminen vaikuttaa hitsin ulkonäköön, geometriaan, hitsausvirheisiin ja rakenneteräksen tapauksessa kovuuteen.

Työn teoriaosassa käytiin läpi kuitulaserin ja laserhitsauksen periaatteet ja olennaisimmat parametrit sekä selvitettiin hitsauskokeissa käytettyjen materiaalien S355 rakenneteräksen ja AISI 304 ruostumattoman teräksen ominaisuudet laserhitsauksen kannalta. Teoriaosuuden jälkeen käytiin läpi kolme aihetta käsitellyttä tutkimusta. Tutkimuksista selvisi, että pienemmällä polttopisteen halkaisijalla hitsit ovat pääsääntöisesti kapeampia sekä tunkeumaltaan suurempia. Lisäksi polttopisteen koko vaikuttaa koko hitsin muotoon. Selvisi myös että liian pienellä polttopisteellä hitsattaessa alkaa esiintyä hitsausvirheitä, kuten pintapalon valumaa.

Käytännön osuudessa suoritettiin hitsauskokeet lasertekniikan laboratoriossa. Hitsauskokeissa tehtiin kummallekin materiaalille 6 hitsiä. Hitsaus suoritettiin päittäisliitoksena ja läpihitsauksena. Erilaisilla prosessikuitujen ja fokusointilinssien kokoonpanoilla saatiin aikaan polttopisteelle erilaisia halkaisijoita. Hitsauskokeissa aikaansaadut hitsit kuvattiin, jonka jälkeen kustakin hitsistä tehtiin hieet. Hieistä otettiin metallurgian laboratoriossa makrokuvat ja S355 teräksen tapauksessa niille tehtiin myös kovuusmittauskokeet.

Hitsauskokeiden tuloksista selvisi, että pääsääntöisesti pienemmällä polttopisteellä hitsattaessa hitsit ovat kapeampia ja poikkipinta-alaltaan pienempiä. S355 teräksellä hitsit olivat roiskeettomia, kun taas AISI 304 tapauksessa roiskeita syntyi, niin pinnan, kuin juurenkin puolelle. Lisäksi rakenneteräksellä hitsit olivat lähes tasalevyisiä koko tunkeuman mitalta, kun ruostumattomalla teräksellä ne olivat pinnan puolelta leveämpiä. Poikkipinta-alat olivat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan samoilla parametreilla hitsatuissa hitseissä. Kovuusmittauksista selvisi, että pienemmällä polttopisteellä hitsatuissa, ja näin ollen kapeammassa, hitseissä kovuudet olivat hieman suurempia, kuin suuremmilla polttopisteillä hitsatuissa leveämmässä hitseissä. Hitsauskokeista saadut tulokset olivat odotetunlaisia ja vastasivat työssä aiemmin esiteltyjä muiden tekemiä tutkimuksia.

LÄHTEET

Belforte, D. A. 2014. Fiber laser revenues boost the 2013 laser market. *Industrial Laser Solutions*, 29: 1. s. 6-9.

Hilton, P. & Verhaeghe, G. 2005. The effect of spot size and laser beam quality on welding performance when using high-power continuous solid-state lasers. [verkkojulkaisu]. [Viitattu 27.3.2014]. Saatavissa: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-effect-of-spot-size-and-laser-beam-quality-on-welding-performance-when-using-high-power-continuous-wave-solid-state-lasers-n/>

Ion, J. C. 2005. *Laser Processing of Engineering Materials. Principles, procedure and industrial application.* Elsevier Butterworth Heinemann. 556 s.

Ionix Oy. 2014. Laser Welding. [Ionix Oy:n www-sivuilla]. [viitattu 27.3.2014]. Saatavissa: <http://ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-welding/>

Kawahito, Y., Mizutani, M. & Katayama, S. 2007. Investigation of High-Power Fiber Laser Welding Phenomena of Stainless Steel, *Transactions of JWRI*, 36: 2. s. 11-15

Kujanpää, V., Salminen, A. & Vihinen, J. 2005. *Lasertyöstö.* Tampere: Teknologiainfo Teknova Oy. 373 s.

Medeiros de Carvalho, S. & Fernandes de Lima, M. S. 2012. Laser Beam Welding Tempered 300M Ultrahigh Mechanical Strength Steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34: 1.

Outokumpu. 2012. EN 1.4301, AISI 304, EN 1.4307, AISI 304L Product Information. [Outokumpu Oy:n www-sivuilla]. [Viitattu 27.3.2014]. Saatavissa: http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Austenitic-Stainless-Steel-1.4304-1.4307_Datasheet.pdf

Peach, M. 2013. LASER 2013: Laser market "at record high" – analyst. Optics.org [verkkolehti]. [viitattu 27.3.2014]. Saatavissa: <http://optics.org/news/1/1/16>

Rofin. [Rofin www-sivuilla]. [Viitattu 24.9.2014]. Saatavissa: <http://www.rofin.com/master-of-applications/en/>

Sokolov, M., Salminen, A., Kuznetsov, M. & Tsibulskiy, I. 2011. Laser welding and weld hardness analysis of thick section S355 structural steel. *Materials & Design*, 32: 10. s. 5127-5131.

Steen, W.M. & Mazumder, J. 2010. *Laser Material Processing*. 4. painos. Lontoo: Springer-Verlag. 558 s.

Suder, W.J. & Williams, S. 2013. Power factor model for selection of welding parameters in CW laser welding. *Optics & Laser Technology*, 56: s. 223-229.

Volpp, J. 2012. Investigation on the influence of different laser beam intensity distributions on keyhole geometry during laser welding. *Physics Procedia*, 39: s. 17-26.

Zhang, M., Chen, G., Zhou, Y. & Liao, S. 2013. Optimization of deep penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser. *Materials & Design*, 53: s. 568-576.