

LUT-YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

HITSAUSJAUHEEN JA FOKUSOINTIPISTEEN VAIKUTUS
KUITULASERHITSAUKSEN TUNKEUMAAN

THE EFFECT OF WELDING FLUX AND FOCUS POINT TO THE DEPTH OF FIBER
LASER WELD

Lappeenrannassa 25.11.2019

Juhani Mehtonen

Tarkastaja TkT Harri Eskelinen

Ohjaaja DI, Tkl, MBA Kari Lahti

TIIVISTELMÄ

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Juhani Mehtonen

HITSAUSJAUHEEN JA FOKUSOINTIPISTEEN VAIKUTUS KUITULASERHITSAUKSEN TUNKEUMAAN

Kandidaatintyö

2019

28 Sivua, 10 kuvaa, 3 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Harri Eskelinen

Ohjaaja: DI, Tkl, MBA Kari Lahti

Hakusanat: Kuitulaser, Kuitulaserhitsaus, Hybridihitsaus, laserhitsaus

Hybridihitsaus on hitsausmenetelmä, jossa yhdistetään kaksi erillistä hitsausmenetelmää yhdeksi, esimerkiksi laserin ja valokaarihitsauksen yhdistelmä on suosittu laivateollisuudessa, sen syvän tunkeuman ja hyvän hitsausnopeuden vuoksi.

Kandidaatintyö tehdään yritykselle Bayrock. Työn tarkoituksena on tutkia hitsausjauheen ja kuitulaserin yhteisvaikutus hitsauksessa. Tutkimuksien tuloksien tarkoitus on saada tietämystä laserin ja jauhekaarihitsauksen hybridihitsaus mahdollisuudesta.

Tutkimustuloksien perusteella voidaan todeta, että jauhe ei vähennä laserin tunkeumaa vahvaan rakenneteräkseen merkittävästi. Tunkeuma säilyy riittävän suurilla jauhekerroksen paksuuksilla, joka mahdollistaa jauhekaarihitsauksen lisäämisen kuitulaserhitsausmenetelmään.

ABSTRACT

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Juhani Mehtonen

THE EFFECT OF WELDING FLUX AND FOCUS POINT TO DEPTH OF FIBER LASER WELD

Bachelor's thesis

2019

28 pages, 10 figures, 3 tables

Examiner: D. Sc. (Tech.) Harri Eskelinen

Supervisor: M.Sc. (Tech.), Lic.Sc. (Tech.), MBA Kari Lahti

Keywords: fiber laser, fiber laser weld, hybrid weld, laser weld

Hybrid welding is a welding method that combines 2 different welding methods to a single welding technique. For example, laser-arc hybrid welding is popular in the ship industry because of the technique's deep penetration and good welding speed.

The bachelor's thesis is made for the company Bayrock. The purpose of this work is to build up knowledge about the possibility of a submerged arc-laser hybrid welding method.

The results of this study show that flux does not significantly decrease the penetration of fiber laser to the structural steel. The penetration withstands the necessary flux layer thickness required for the addition of submerged arc welding to the fiber laser welding process.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SYMBOLILUETTELO	6
1 JOHDANTO	7
1.2 Tutkimusongelma	7
1.3 Tavoitteet.....	8
1.3.1 Hypoteesi	8
1.4 Rajaukset	8
2 LASER	9
2.1 Kuitulaser	9
2.2 Teho.....	10
2.3 Aallonpituus.....	10
2.4 Säteen fokusointi.....	11
2.5 Polttopisteen asema.....	12
2.6 Hitsausnopeus	12
3 HYBRIDIHITSAUS	14
3.1 Laser-jauhekaarihitsaus	14
3.2 Absorptio	15
4 TERÄKSIEN HITSATTAVUUS	16
4.1 Hiilielkvivalentti	16
4.2 Tehokkuuden lisääminen.....	17
5 TUTKIMUSMENETELMÄT	18
5.1 Koejärjestelyt.....	18
5.2 Makrohie.....	19
5.3 Laitteisto	19

6 TULOKSET	21
7 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	25
7.1 Jauheen ja fokusointipisteen vaikutus tunkeumaan	25
7.2 Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin.....	25
7.3 Jatkotutkimukset	26
LÄHDELUETTELO.....	27

SYMBOLILUETTELO

C	Hiilen määrä [%]
c	Valonnopeus [m/s]
CE	Hiiliekvivalentti
Cr	Kromin määrä [%]
Cu	Kuparin määrä [%]
D_{foc}	Säteen polttopisteen halkaisija [mm]
E	Fotonin energia [J]
f	Polttoväli [mm]
h	Planckin vakio [J*s]
K	Laserin säteenlaadun kerroin
Mn	Mangaanin määrä [%]
Mo	Molybdeenin määrä [%]
Ni	Nikkelin määrä [%]
V	Vanadiinin määrä [%]
λ	Aallonpituus [mm]

1 JOHDANTO

Lasereiden käyttösovellukset riippuvat sen säteenlaadusta ja lajista. Tyypillisesti leikkausprosesseihin käytetään CO₂-lasereita, joiden aallonpituudet ovat noin 10 µm ja se soveltuu hyvän säteenlaadun vuoksi erinomaisesti leikkausprosesseihin. Hitsauksessa ja teollisuudessa yleisimpiä laserlajeja ovat kuitujen kautta siirtyvät laserit niiden monipuolisuuden vuoksi. Kuitulaserin aallonpituus on 1 µm, eli kymmenen kertaa alhaisempi kuin CO₂ laserilla, joka tekee siitä sovellettavan erityisesti hitsausprosesseihin. Pelkän kuitulaserin rajoituksena on materiaalin paksuus, ja jotta laseria voitaisiin käyttää paksujen rakenteiden hitsaukseen, prosessiin on integroitava valokaari. Tätä prosessia kutsutaan laser-hybridihitsaukseksi, sen kehitys ja käyttö ovat tulleet laivateollisuuteen, missä se on lisännyt hitsauksen tuottavuutta ja laatua laivarakenteissa. Laser-hybridi hitsauksen rajoituksena on taas materiaalin paksuus, vaikka sillä pystytään hitsaamaan rakenteita joiden paksuus ylittää 20mm tai 40 mm, jos hitsaus suoritetaan kappaleen molemmilta puolilta. Vielä paksuimmissa rakenteissa, kuten tuulivoimaloissa, laser-hybridi menetelmän hitsiaineentuotto ei ole riittävä suurien hitsiliitoksien täyttämiseen. Toinen ongelmana paksujen materiaalien syvissä tunkeumissa on prosessin muodostamat huokokset metallin sisään, joka heikentää materiaalin vahvuutta ja korroosion kestävyyttä. Tämän tutkimuksen esittämä ratkaisu tähän ongelmaan on lisätä prosessiin 5-20 mm kerros jauhekaarihitsauksessa käytettävää jauhetta, mikä muodostaa hitsin pintaan kuona kerroksen, joka tuo hitsille suojan ympäristön aiheuttamalle korroosiolle.

1.2 Tutkimusongelma

Tämän hetkisen tietämyksen mukaan hiilidioksidilaser ja jauhekaarihitsauksessa käytettävä jauhe eivät sovellu keskenään hitsausprosessissa. Hiilidioksidilaserin teho absorboituu hitsin päälle muodostuvaan plasmaan, vähentäen hitsin tunkeumaa huomattavasti. Ainut tapa saada yhdistettyä nämä kaksi hitsausmenetelmää, on tuoda prosessiin käytettävä jauhe vasta lasersäteen jälkeen, ettei lasersäde kulje jauheen lävitse. Tämä tekee prosessista epäkäytännöllisen mahdollisten virheiden ja rajoitetun hitsausnopeuden syystä. (Reisgen et al. 2010 s.75 – 83)

1.3 Tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten kuitulasersäde käyttäytyy hitsausjauheen kanssa, ja millainen on lopullinen hitsin tunkeuma ja hitsin leveys (profiili), kun fokusointi etäisyyttä vaihdetaan liukuvasti 5 mm etäisyydellä pinnasta ja pinnan sisälle. Tutkimus suoritetaan Lappeenrannan teknillisen yliopiston hitsauslaboratoriossa, jossa koehitsaukset suoritetaan 10kW kuitulaserilla standardin EN 10029 mukaiseen teräslevyyn. Levyyn tehdään yhteensä 5 hitsausta, jossa vaihtelevana muuttujana on jauhekerroksen paksuus. Hitseistä tehdään makrohieet ja tarkastellaan hitsien laatua ja erityisesti tunkeumaa ja profiilia. Tämän tutkimuksen tarkoitus on selvittää, voidaanko jauhekaari laser-hybridi menetelmää hyödyntää paksujen rakenteiden hitsauksessa, vai häiritseekö hitsausjauhe prosessia.

1.3.1 Hypoteesi

Tutkimuksen hypoteesina on, että kuitulasersäde ei absorboidu merkittävästi jauheeseen ja ettei tule merkittäviä muutoksia hitsin tunkeumaan. Oletetaan, että löytyy optimaalinen jauhekerroksen paksuus, jolla hitsaus on vielä riittävän tehokasta.

1.4 Rajaukset

Tutkimustuloksiin vaikuttaa useita muuttujia, mutta tähän tutkimukseen on rajattu vain fokusointipisteen ja jauheen vaikutus hitsin laatuun. Kokeessa käytetään ainoastaan standardin EN ISO 14174 mukaista SA FB 1 55 AC H5 hitsausjauhetta. Tulokset otetaan fokusointipisteen ollessa -5 mm, 0 mm ja 5 mm. Tässä kokeessa vakiona pysyvät hitsausnopeus, laserin teho, aallonpituus ja hitsattava materiaali.

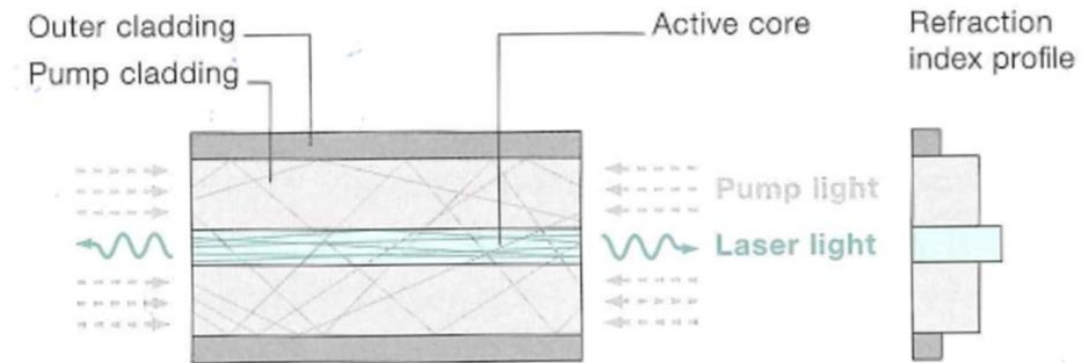
2 LASER

Lasertyypit eroavat toisistaan niiden laseroivasta väliaineesta, joka puolestaan muuttaa laservalon ominaisuuksia. On tärkeää ymmärtää mitä nämä ominaisuudet tarkoittavat ja miten ne vaikuttavat tutkimukseen ja hitsaukseen yleisesti.

Laservalo tuotetaan kaasuista (CO₂-laser) tai kiinteistä materiaaleista (solid-state laser) kuten lasista tai kristalleista. Kiinteän materiaalin laserit pystytään kytkemään tai muodostamaan kuiduissa, joilla pystytään ohjaamaan laservalo kauas itse varsinaisesta laitteistosta, ilman merkittävää tehon tai laadun menetystä, mikä tekee kuitulasereista ylivoimaisen teollisuudessa. Tässä tutkimuksessa rajataan laserit kuitulasereihin, koska ne ovat joustavuuden ja parametrien ansiosta parhaiten soveltuvia tutkimuksen tekemiseen ja soveltamiseen teollisuudessa. (Buchfink, 2007 s.46-56)

2.1 Kuitulaser

Tyypillinen solid-state laser muodostaa laservalon resonaattorissa, josta se ohjataan kuitua pitkin työpisteelle. Ideaalisesti kuitulaseriin on integroitu kaikki laservalon muodostamiseen tarvittavat elementit yhteen pitkään ja ohuuteen kvartsikuituun. Tätä kutsutaan yhtenäiseksi malliksi. Yksi kuitu kykenee tuottamaan tyypillisesti alle 1 kilowatin verran tehoa, tästä syystä alhaisen tehon kuitulasereita käytetään tyypillisesti telekommunikoinnissa ja graafisessa taiteessa. Nykyään pystytään soveltamaan kuitulaseria materiaaliprosesseihin yhdistämällä useita kuituja samansuuntaisesti, mikä lisää lasersäteen kokonaistehoa. Yleisesti korkeita tehoja saavutetaan kuiduilla käyttämällä ”double-clad” kvartsikuitua, joissa käytetään laseroivana aineena ytterbiumia. Nämä alle millimetrin paksuiset kuidut muodostuvat kolmesta kerroksesta. Keskimmäistä kutsutaan ytimeksi, missä tapahtuu laservalon varsinainen tuottaminen. Seuraava on pumppaava kerros, mikä aktivoi laseroivan aineen. Kolmas kerros on uloin kerros, minkä tehtävänä on suojata kuitua ja rajata pumppaavaa valoa. Kuidun poikkileikkaus on esitetty kuvassa 1. (Buchfink, 2007 s.59)



Kuva 1. Kuitulaserin toimintaperiaate (Buchfink, 2007 s.59)

2.2 Teho

Yleisesti ottaen laserin tehoa lisäämällä saavutetaan nopeampia työstönopeuksia ja suurempia tunkeumia. Teho ei kuitenkaan täysin lineaarisesti paranna hitsinlaatua ja tunkeuman syvyyttä, sillä tehoa lisätessä tulee potentiaalisia ongelmia, kuten leikkaustarkkuuden heikentyminen liiallisen lämmöntonin syystä. Näitä ongelmia voidaan ehkäistä tiettyyn pisteeseen saakka käyttämällä jatkuvan säteen (CW, continuous wave) laserin sijasta pulssitettua laseria. Laservalon tuottaminen pulsseina pitää tehointensiteetin vakiona, mikä mahdollistaa tunkeuman ja nopeuden säätämisen sopivaksi lämmöntonin kanssa. (Steen, 2010 s.171)

Kuitulasereita on mahdollista suunnitella käyttämään pulssitettuna sekä CW asetuksilla. Kuitujen tuottamaa tehoa voidaan nostaa lisäämällä kuituun pituutta tai säätämällä pumppaustehoa, joka ei vaikuta laisinkaan säteen laatuun. Näillä menetelmillä voidaan kuitenkin säätää tehoa vain tiettyyn pisteeseen asti, tällä hetkellä yksittäinen kuitu kykenee tuottamaan maksimissaan noin 1 kilowatin tehon. Ainut keino saavuttaa korkeampia tehoja on yhdistämällä useita kuituja yhdensuuntaisesti, tämä menetelmä mahdollistaa kuitulasereiden käyttämisen monipuolisesti teollisuudessa, mutta samaan aikaan kuitujen yhdistäminen heikentää säteenlaatua. (Buchfink, 2007 s.61)

2.3 Aallonpituus

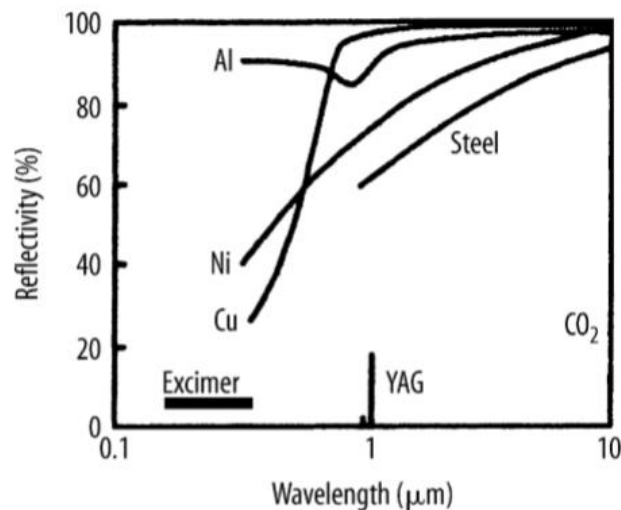
Kuten kaikella valolla, myös laservalolla on oma aallonpituutensa. Laservalon ominainen aallonpituus määräytyy laservoivasta väliaineesta esimerkiksi hiilidioksidilla on noin 10600 nm aallonpituus ja Nd:YAG lasereilla noin 1064 nm. Kaikkea sähkömagneettista säteilyä

voidaan käsittää fotoneina, joiden energia määräytyy säteilyn aallonpituudesta. sähkömagneettisen säteilyn energia voidaan laskea seuraavalla tavalla:

$$E = h \times c / \lambda$$

Yhtälössä E on fotonin energia, h on Planckin vakio, c on valonopeus ja λ on aallonpituus. Kaavassa pysyvät vakioina kaikki paitsi energia ja aallonpituus, joten mitä pienempi aallonpituus sitä suurempi energia sähkömagneettisella säteilyllä on. (Kujanpää, 2005 s.42)

Laservalolla itsessään on enemmän energiaa, kun aallonpituus pienenee. Laservalon aallonpituus vaikuttaa myös materiaalin kykyyn absorboida fotonien kuljettamaa lämpöenergiaa. Mitä enemmän fotoneilla on energiaa, sitä enemmän materiaali kykenee absorboimaan itseensä lämpöä, sen sijaan että fotonien energia heijastuisi ympäristöön. Erilaisten materiaalien absorptiota on esitetty kuvassa 2. (Steen, 2010 s.90)



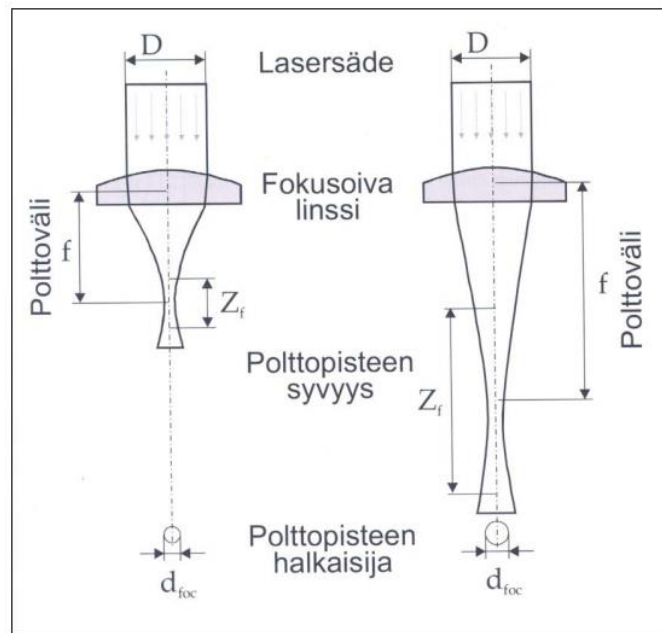
Kuva 2. Erilaisten materiaalien heijastavuus aallonpituuden funktiona (Steen, 2010).

2.4 Säteen fokusointi

Teräksen syvätunkeumahitsaukseen tarvitaan noin 10^6 W/mm² tehotiheys. Yksi tapa lisätä tätä tehotiheyttä on kasvattaa laserin tehoa. Toinen tapa on pienentää polttopistettä käyttämällä peilejä ja linssejä, eli fokusoida. Polttopiste saadaan laskettua soveltamalla ideaalisen polttopistekoon kaavaa, lisäämällä yhtälöön laserkohtainen säteenlaatua kuvaava kerroin K . Polttopisteen halkaisijan koko saadaan käyttämällä seuraavaa yhtälöä.

$$d_{foc} = 4f\lambda/D\pi K$$

Yhtälössä d_{foc} on polttopisteen halkaisija, f on polttoväli, λ on aallonpituus ja K on laserin säteenlaadun kerroin. K :n ollessa 1, kaava kuvailee ideaalista laserin polttopistettä, todellisuudessa K on aina pienempi kuin 1. Esimerkiksi tutkimuksessa käytettävässä kuitulaserissa K :n arvo oli 0.023. Fokusointiin liittyvät muuttujat on esitetty alla olevassa kuvassa 3. (Kujanpää, 2005 s.80-81)



Kuva 3. Lasersäteen fokusoinnin muuttujat (Kujanpää, 2005 s.81)

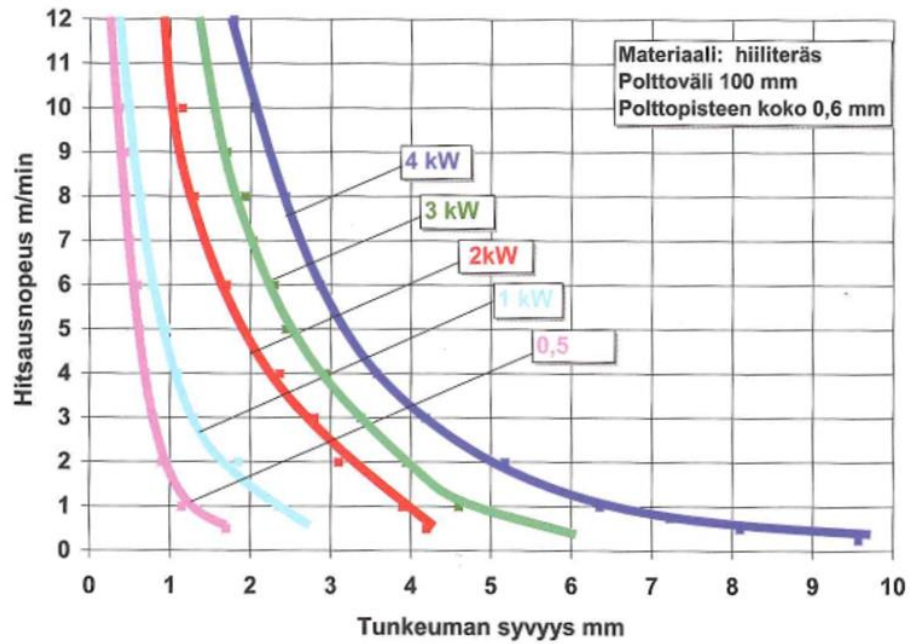
2.5 Polttopisteen asema

Polttopisteen etäisyyttä työstettävästä pinnasta kutsutaan polttopisteen asemaksi. Etäisyyttä mitataan millimetreissä, ja oletusarvona on 0. Miinusmerkkiset luvut tarkoittavat etäisyyttä pinnasta alaspäin, sekä plusmerkkiset pisteen etäisyyttä pinnasta ylöspäin. Aseman määrittäminen oikein on kriittistä onnistuneen hitsauksen suorittamiseen, sillä teräksen höyrystymiseen tarvittava intensiteetti 10^6 W/mm^2 on saatava riittävän syvälle, jotta saadaan hitsauksessa haluttu tunkeuma. Pienemmillä aallonpituuksilla laservalon absorptio teräkseen on parempi, joten polttopisteen asemalla on pienempi merkitys. (Kujanpää, 2005 s.167-168)

2.6 Hitsausnopeus

Laserhitsauksen tunkeumaa ja hitsin leveyttä voidaan kasvattaa vähentämällä hitsausnopeutta käytettäessä vakiotehoa. Eri materiaaleille ja laatuvaatimuksille on lukuisia

kombinaatioita tehon ja nopeuden kanssa, mutta nopeuden alarajana toimii avaimenreiän auki pysymisen mukaan ja yläraja läpätunkeuman mukaan. Useimmiten käytettävät parametrit kuitenkin määräytyvät valmistustoleransseista kuten tunkeuma, railon leveys, hitsin virheiden määrä. Tunkeuman riippuvuutta hitsausnopeuteen erilaisilla hitsaustehoilla on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. hiilidioksidilaserin hitsausnopeuden [m/min] suhde tunkeumaan [mm] eri lasertehoilla. (Kujanpää, 2005 s.281)

3 HYBRIDIHITSAUS

Tämän tutkimuksen kokeessa ei hitsata hybridihitsausmenetelmällä vaan tutkitaan, onko uuden hybridihitsaus menetelmän kehittäminen mahdollista. Tämän kappaleen tarkoituksena on kertoa mitä hybridihitsauksen eduista ja tutkittavalle menetelmälle olennaisimman ongelman.

Hybridihitsauksella on tarkoitus paikata yksittäisen hitsausmenetelmän puutteita, soveltamalla kahta prosessia samanaikaisesti. Laser-valokaarihitsauksen etuina ovat suuri hitsausnopeus, vähäiset muodonmuutokset, suuret tunkeumat yhdellä hitsauskerralla ja helppo automaatio. Laser-valokaarihitsauksessa syvä tunkeuma riippuu suurimmaksi osaksi käytettävästä laserista, tässä hybridihitsausmenetelmässä valokaaren tehtävänä on lisätä hitsausnopeutta ja täten tehdä hitsauksesta huomattavasti kannattavampaa. (Olsen, 2009 s.178-179)

3.1 Laser-jauhekaarihitsaus

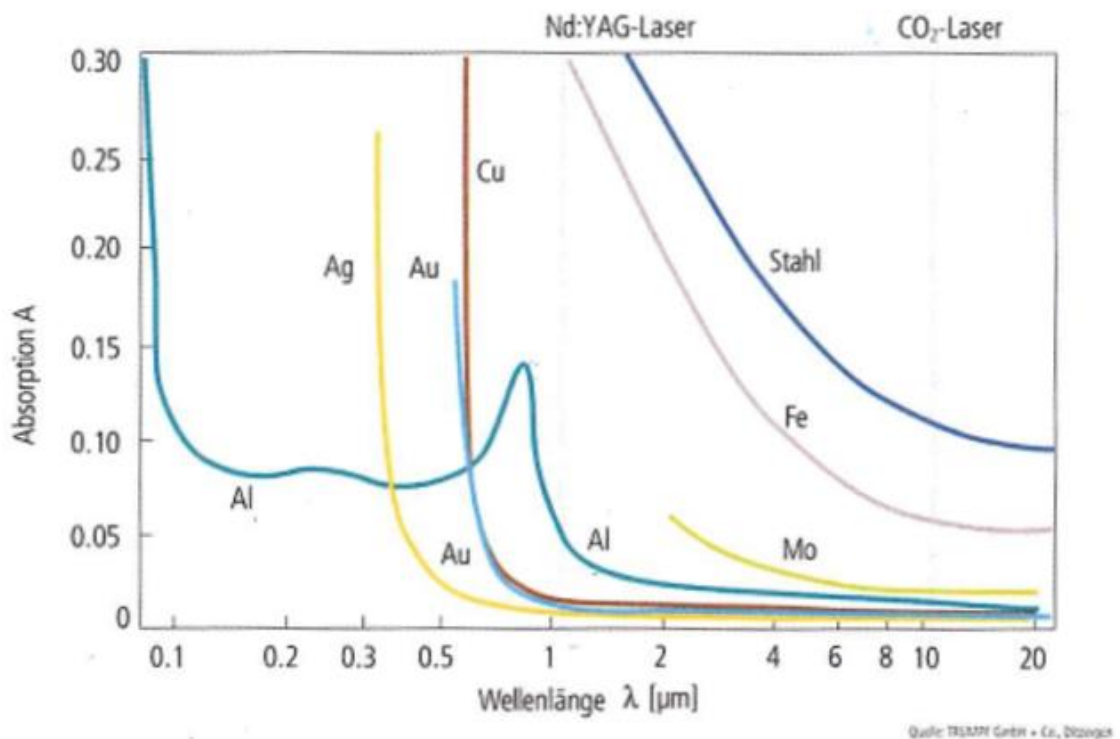
Jauhekaarihitsauksessa lämpöenergia tuodaan hitsattavaan materiaaliin elektrodin kautta. Valokaari muodostuu tässä menetelmässä jauhekerroksen sisälle, mikä sulattaa valokaarta lähimmäisen kerroksen jauhetta muodostaen hitsattavan materiaalin pinnalle kuonakerroksen. Tämä kerros suojaa hitsiä reagoimasta ympäristön kanssa ja täten ehkäisee hitsin korroosiota hapen ja typen kanssa. Jauhe suojaa myös ympäristöä hitsaukselta, sillä valokaaren peittyminen jauheen sisälle estää roiskeiden ja savun pääsemisen ympäristöön. Jauhekaarihitsaus soveltuu materiaaleille, joiden paksuus on 1.5 mm tai enemmän, mutta tyypillisesti tätä menetelmää käytetään paksuimmissa kohteissa kuten laivateollisuudessa. (Weman, 2012 s.105-106)

Heikkoutena laserhitseille on niiden taipumus muodostaa huokosia hitsin syvimille tasoille, kun hitsauksen tunkeumaa kasvatetaan. (Katayama et al. 2000 s.16-19). Hitsauksen laatua pyritään parantamaan yhdistämällä laserhitsaus ja jauhekaarihitsaus. Laser-jauhekaarihitsaus mahdollistaisi yli 20mm paksujen levyjen hitsaamisen yhdellä kerralla menettämättä hitsin laatua. Hiilidioksidilaserin ja jauhekaarihitsauksen yhdistäminen on ollut haasteellista, sillä pienikin määrä jauhetta hitsattavan kappaleen päällä muodostaa hiilidioksidilaserin kanssa massiivisen plasmakuvun. Plasma absorboi valtaosan lasersäteiden tehosta ja täten pienentää tunkeumaa merkittävästi. Toimivassa laser-

jauhekaarihitsausmenetelmässä lasersäde ei saa kulkea jauheen läpi, jos käytössä on hiilidioksidilaser. (Reisgen et al. 2010 s.75 – 83)

3.2 Absorptio

Laservalon osuessa materiaaliin osa siitä heijastuu takaisin ympäristöön, osa valosta kulkee materiaalin läpi ja osa absorboituu materiaaliin. Esimerkiksi teräksessä valo ei kulje lainkaan materiaalin läpi. Materiaalin absorptiokyvyn tärkeimpinä muuttujina ovat valon aallonpituus, työstettävän materiaalin pinnanlaatu ja lämpötila. Metallien kyky absorboida laservaloa on heikko huoneenlämmössä, mutta pienikin absorptio lämmittää materiaalia, joka parantaa absorptiota merkittävästi. Aallonpituudella on suuri merkitys materiaalin kykyyn absorboida laservaloa, erilaisten materiaalien absorptiokykyjä on esitetty kuvassa 4. (Kujanpää, 2005 s.44-46)



Kuva 4. erilaisten materiaalien absorptio aallonpituuden suhteenä. (Kujanpää, 2005 s.15)

4 TERÄKSIEN HITSATTAVUUS

Hitsauksen lopputulokseen vaikuttaa hitsauslaitteen lisäksi hitsattavan kappaleen ominaisuudet. Tämän kappaleen tarkoituksena on kertoa niistä ominaisuuksista, joilla on merkittävä vaikutus tutkimustuloksiin.

Materiaalin hitsattavuus ei ole yksinkertaisesti määriteltävissä, sillä siinä on otettava huomioon rakenteelle asetetut vaatimukset, perusaineen ominaisuudet ja valmistukselle asetetut rajoitukset ja vaatimukset. Tiivistettynä hitsattavuus on parempi mitä vähemmän materiaali tarvitsee esivalmistelua ja jälkikäsitteilyä sekä kuinka vapaasti hitsausmenetelmä voidaan valita. (Suomen hitsausteknillinen yhdistys, 2014 s.103)

Pääongelmat laserhitsauksessa on niiden taipumus muodostaa kylmä- tai kuumahalkeamia, hitsin huokoisuus ja huono lasersäteen absorptio. Halkeamat johtuvat keskilinjan muodostuneista jännityksistä, jotka tapahtuvat ennen hitsin jäähmettymistä ja materiaalin vahvistumista. Halkeamia voidaan ehkäistä tai vähentää esilämmittämällä materiaalia tai käyttämällä lisäainetta hitsauksessa (Steen, 2010 s.229)

4.1 Hiiliekvivalentti

Hiiliekvivalentti (CE) on kaava, jolla pystytään laskennallisesti määrittämään materiaalin karkenevuus. Hiiliekvivalentti on määritelty IIW:n (International Institute of Welding) ja standardin EN 1011-2 mukaan:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni+Cu}{15} + \frac{Cr+Mo+V}{5}$$

Yhtälössä CE on hiiliekvivalentti (carbon equivalent), C on hiili, Mn on mangaani, Ni on nikkeli, Cu on kupari, Cr on kromi, Mo on molybdeeni ja V on vanadiini. Kaikilla kaavan alkuaineilla on merkitys materiaalin karkenevuuden kokonaisuuteen. Tätä kaavaa voidaan käyttää kokemusten perusteella vain hiili, hiilimangaani- ja mikroseostetuille teräksille, joiden hiilipitoisuus ylittää 0.16%. Hitsattavuutta pidetään erittäin hyvänä, eikä teräs tarvitse esilämmitystä, kun hiiliekvivalentti on alle 0,40. Esimerkkinä tutkimuksessa käytettävän S500 ML teräksen hiiliekvivalentti on 0,43 (Suomen hitsausteknillinen yhdistys, 2014 s.104 ja SFS-EN 10025-4 2019, s. 21)

Hiilikvivalentti on tyypillisissä hitsausprosesseissa erittäin hyödyllinen, mutta laserhitsauksessa se on vain suuntaa antava. Laserhitsaus poikkeaa perinteisestä hitsauksesta sen lisääineettomuudella mikä tarkoittaa, että hitsin mikrorakenne riippuu täysin hitsattavan materiaalin ominaisuuksista ja lämpösyklistä. Hitsien syvyys on myös suuri leveyden suhteessa, jäähtyminen tapahtuu nopeasti ja lämmöntuonti on alhainen. Suuren jäähtymisnopeuden ansiosta hitsistä tulee hienorakeinen ja kova. (Kujanpää, 2005 s.278-281)

4.2 Tehokkuuden lisääminen

Materiaalin laserhitsattavuutta voidaan lisätä parantamalla materiaalin kykyä absorboida laservaloa. Kirjallisuuden mukaan absorptio parantamisen voi jakaa kolmeen ryhmään: Pinnan muutokset, materiaalin esilämmitys ja ympäristöolosuhteiden muuttaminen (Solokov, 2015 s.26)

Käytettäessä hiilidioksidi lasereita, pinnan karheuden lisääminen paransi materiaalin absorptio kykyä, toisaalta tämä vaikutti vain hitsauksen alkuvaiheeseen eikä sillä ollut vaikutusta absorptioon, kun avaimenreikä materiaaliin oli saavutettu. Pinnanlaadulla on vaikutusta vain laserhitsauksen aloitukseen. Pinnankarheudella on vielä suurempia vaikutuksia, kun käytössä on korkean tehon kiekko- ja kuitulasereita. (Solokov, 2015 s.26)

Esilämmityksen tehtävä on ehkäistä tai vähentää hitsiin syntyviä kuuma- ja kylmähalkeamia sekä lisätä hitsin tunkeumaa ja leveyttä. Laserhitsaukselle ominainen nopea lämpötilan laskeminen lisää hitsin kovuutta ja riskiä muodostaa halkeamia. Nopea jäähtyminen teräksessä 800° ja 500° asteen välillä aiheuttaa martensiitin muodostumista ja täten lisää kuumahalkeamien riskiä, jopa teräksissä, joiden hiilipitoisuus on alle 0,2%. Esilämmityksen tehtävä on hidastaa jäähtymistä näillä kriittisillä alueilla. (Solokov, 2015 s.26)

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

Kokeellisen osan tarkoituksena on tutkia, miten kuitulaser toimii yhdessä hitsausjauheen kanssa ja miten lasersäteen fokusointipiste vaikuttaa hitsauksen tunkeumaan erilaisilla hitsausjauheen kerroksien paksuuksilla. Tutkimuksen hypoteesina on, ettei hitsausjauheella ole merkittäviä vaikutuksia hitsin tunkeumalle tai laadulle. Tavoite on löytää oikeat prosessiparametrit laserille, jotta saataisiin parhaimmat mahdolliset hitsaustulokset käyttäen kuitulaseria ja hitsausjauhetta yhdessä.

Tutkimustuloksilla luodaan perustus uuden hitsausmenetelmän toteuttamiselle. Tällä menetelmällä pyritään mahdollistamaan laserhybridihitsauksen käyttö paksuissa rakenteissa, joka olisi edullisempi ratkaisu verrattuna nykyisiin menetelmiin, joita sovelletaan esimerkiksi tuulivoimaloiden hitsauksessa.

5.1 Koejärjestelyt

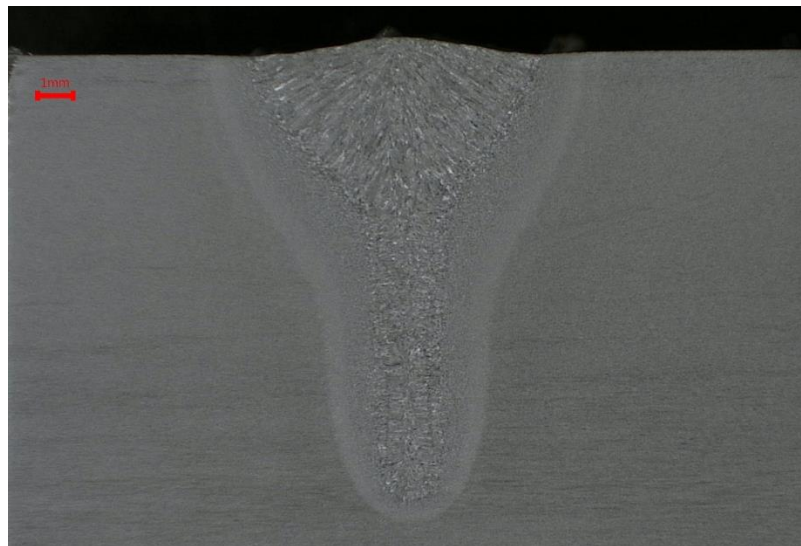
Materiaalina koehitsauksissa käytettiin erikoislujuutta levyä kuumavalssatusta teräksestä EN 10029 (S500ML). Levyn paksuus oli 24 mm. Kokeessa tehtiin 5 hitsiä eri hitsausjauheen kerroksien paksuuksilla. Ensimmäinen hitsi tehtiin ilman hitsausjauhoa ja seuraavilla hitseillä nostettiin jauhekerroksen paksuutta 5 mm, kunnes saatiin hitsi 20 mm paksuisella kerroksella. Fokusointipisteen etäisyyttä pinnasta vaihdettiin lineaarisesti hitsauspituuden matkan aikana alkaen -5 mm ja päättyen +5 mm etäisyyteen pinnasta. Hitseistä tehdään 300 mm pitkiä ja ne hitsataan rinnan, jotta makrohiettä tehdessä saadaan tulokset kohdista, joissa on käytetty samoja laserin parametrejä, mikä eristää hitseissä vaihtuvaksi muuttujaksi vain jauhekerroksen paksuuden. Tällä tavoin voimme tarkastella jauhekerroksien ja fokusointipisteiden vaikutusta hitsin tunkeumaan ja yleiseen laatuun. Kokeen parametrit ovat koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Tutkimuksessa huomioon otetut muuttujat

Levyn paksuus [mm]	24
Hitsausnopeus [m/min]	0,6
Hitsattava teräs	S500ML
Jauhekerroksen paksuus [mm]	0, 5, 10, 15, 20
Hitsien pituus [mm]	300

5.2 Makrohie

Hitsatusta levystä leikattiin kolme näytettä jokaisesta hitsistä, siten että jokaisella näytteellä oli eri jauheenkerros ja fokusointipisteen sijainti. Jokaiselle kappaleelle tehtiin makrohie, jotta hitsaustuloksia voitaisiin tarkastella. Esimerkki makrohieestä on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Makrohie kappaleesta, jossa on käytetty 5 mm jauhekerrosta ja 0 mm fokusointipisteen etäisyyttä.

5.3 Laitteisto

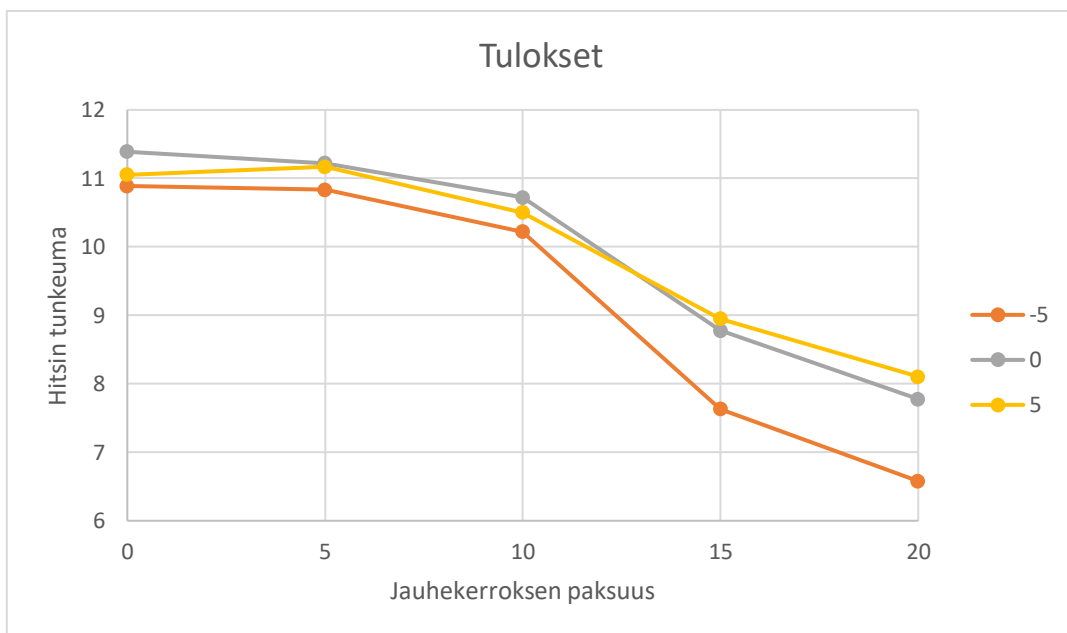
Koehitsaukset suoritettiin käyttämällä IPG YLS-10000 (Ytterbium Laser System) jatkuvan säteen kuitulaseria. Laserissa käytettiin Trumpf hitsauspäätä 300mm fokusointilinssillä ja 200mm kollimoinnilla. Tarkemmat laserin spesifikaatiot on kirjattu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Tutkimuksessa käytetyn laserin tekniset tiedot

Aallonpituus [nm]	1070 ± 10
Ulostuloteho [kW]	10
Prosessikuidun halkaisija [μm]	400
Säteen halkaisija [mm]	0.3
Sädeparametritulo [mm x mrad]	14.5

6 TULOKSET

Hitsauskappaleeseen suurimmat tunkeumat saavutettiin käyttämällä fokusointipisteenä 0 mm, eli kun säde fokusointiin kappaleen pinnassa. 0 mm fokusointipisteellä saavutettiin syvin tunkeuma jokaisella jauhekerroksen paksuudella. Tunkeuman merkittävät vähenemisen tapahtuivat jauhekerroksen kasvaessa yli 10 mm. Suurin tunkeuman muutos tapahtui siirryttäessä 15 mm jauhekerroksen paksuuteen, ja erityisesti käytettäessä fokusointipisteenä -5 mm. Käyttäessä 5 mm fokusointipistettä tunkeuma kasvoi noin 0.12 mm, kun käytettiin 5 mm jauhekerrosta. Alla olevassa kuvassa 7 on esitetty tulokset jauhekerroksen ja tunkeuman funktiona, sekä tarkemmat arvot ovat esitetty taulukossa 3.

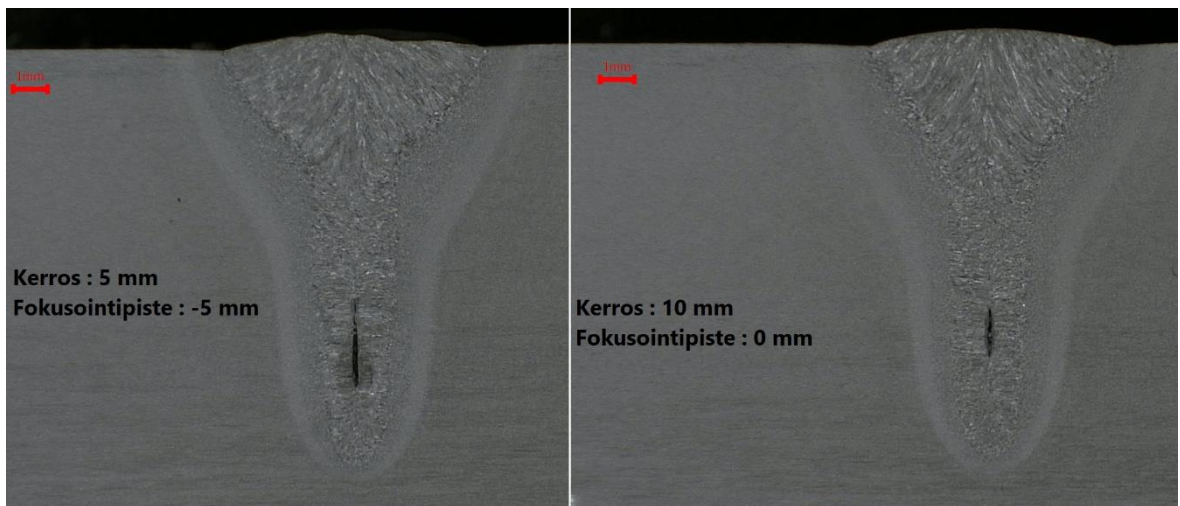


Kuva 7. Hitsauksen tunkeuman muutos jauhekerroksen paksuuden funktiona jokaisella fokusointipisteellä

Taulukko 3. Tarkat tunkeuman arvot jokaisella fokuointipisteellä ja jauhekerroksen paksuudella

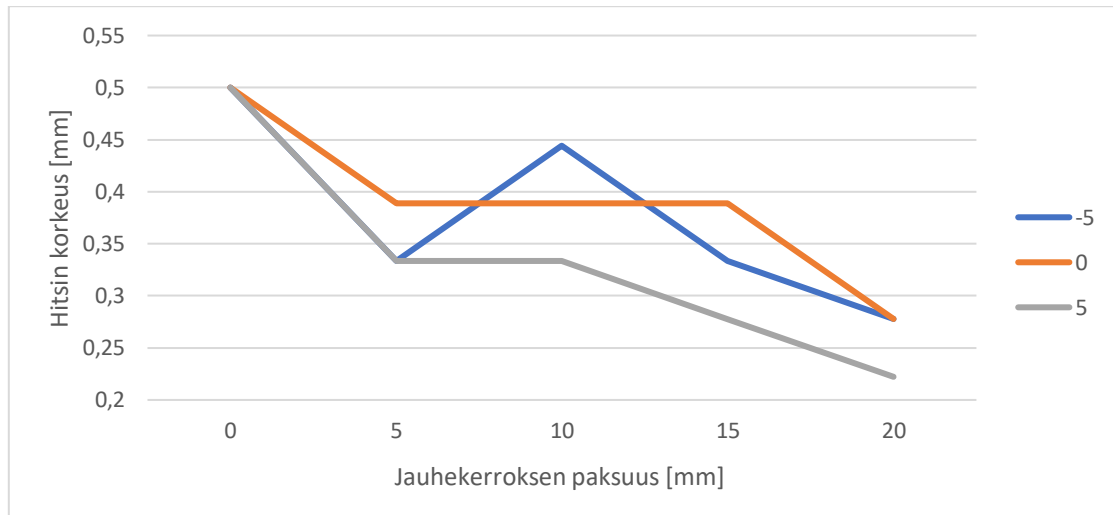
	-5	0	5
0	10,89	11,39	11,05
5	10,83	11,22	11,17
10	10,22	10,72	10,50
15	7,63	8,78	8,95
20	6,58	7,78	8,11

Kahden hitsin kohdalla oli molemmissa ilmaantunut hitsin myötäinen jähmettymishalkeama. Yhdessä kappaleessa käytettiin 5 mm jauhekerrosta ja -5 mm fokuointipistettä, sekä toisessa 10 mm jauhekerrosta sekä 0 mm fokuointipistettä. Ensimmäisessä kappaleessa halkeama oli noin 2,2 mm pitkä, ja seuraavassa kappaleessa noin 1,2 mm pitkä. Kyseiset kappaleet ovat esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Molemmat hitsit, joissa on jähmettymishalkeamat.

Hitsin pintojen korkeudet vaihtelivat eri jauhekerroksilla, ja pieniä muutoksia on havaittavissa fokusointipisteiden välillä. Pinnan korkeus putosi huomattavasti eri jauhekerroksilla, lukuun ottamatta koekappaletta, jossa käytettiin -5 mm fokusointipistettä ja 10 mm jauhekerrosta, jossa pinta oli korkeampi. Tulokset on esitetty alla olevassa kuvassa 9.



Kuva 9. Hitsin korkeus jauhekerroksen funktiona.

Hitsien pintojen väri ja ulkonäkö vaihtelivat eri jauheen kerroksilla. Jokaisella kerroksella on hiukan erilainen väritymä, sekä pinnoille muodostuvien huokoisten määrä vaihtelee jokaisella jauhepaksuudella. Huokoset vähenevät, kun kerrospaksuus kasvaa 5 mm korkeammalle. Hitsauksessa syntyviä roiskeita nähdään ainoastaan hitsauksessa, jossa ei ole käytössä hitsausjauhetta. Fokusointipisteen sijainnilla ei ole väritykseen tai huokoisuuteen huomattavaa merkitystä. Kokeessa tehdyt hitsisaumat ovat esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Hitsisaumojen pintojen eroavaisuudet erilaisilla jauhekerroksen paksuuksilla.

7 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä osiossa tarkastellaan saatuja tutkimustuloksia, sekä pohditaan mitkä tutkimuksen ulkopuolelle jääneet muuttujat voisivat vaikuttaa hitsaustuloksiin.

7.1 Jauheen ja fokusointipisteen vaikutus tunkeumaan

Jauhekerroksella oli heikentävä vaikutus tunkeumaan tutkimustuloksien mukaan. Jauhekerroksen paksuuden kasvaessa tunkeuma väheni. Tunkeuman väheneminen oli kuitenkin erittäin vähäistä, kun jauhekerroksen paksuus oli 10 mm tai vähemmän. Tuloksissa nähtiin noin 0,5 mm väheneminen tunkeumassa, mutta kun jauhekerroksen paksuutta lisättiin, tunkeuma putosi merkittävästi. Tunkeuman huonoimpia tuloksia saatiin jokaisella jauhekerroksen paksuudella, kun käytettiin fokusointipisteenä -5 mm. Jauhekerroksen ollessa 10 mm tai vähemmän, optimaalinen fokusointipiste on 0 mm, eli pisteen ollessa kappaleen pinnalla. Kerroksilla 15 mm ja 20 mm syvimmät tunkeuman saatiin fokusointipisteellä 5 mm. Laserhitsin tunkeuman vähäinen pieneneminen 10 mm jauhekerroksilla tarkoittaa, että laserhitsaus ja jauhekaarihitsauksen hybridimenetelmä on mahdollinen, sillä 10 mm kerros jauhetta on riittävä jauhekaarihitsaukseen. Tutkimuksessa kahteen kappaleeseen muodostui jähmettymishalkeama. Ainut yhdistävä tekijä näillä halkeamilla on fokusointipisteen etäisyys jauhekerroksen pinnasta. Ensimmäisessä kappaleessa käytettiin 5 mm jauhekerrosta ja -5 mm fokusointipistettä ja toisessa kappaleessa 10 mm jauhekerros sekä 0 mm fokusointipiste. Molemmissa kappaleissa fokusointipisteellä oli 10 mm etäisyys jauhekerroksen pinnasta. Hitsausten pintojen väri ja huokoisuus vaihteli jauhekerroksien mukaan, huokoisuus väheni jauhekerroksen paksuuden kasvaessa. Tyypillisesti hitseihin ilmenee huokosia, kun jähmettyvään materiaaliin jää kaasua. Huokoisuus johtuu huonosta hitsaustekniikasta, hitsattavasta materiaalista tai ympäristön epäpuhtauksista. (Singh 2012, s. 233.) Koska tutkimuksessa hitsien muuttujana on ainoastaan jauhekerroksen paksuus, voidaan päätellä että jauhekerroksen paksuudella oli hitsin pinnanlaatuun parantava vaikutus.

7.2 Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin

Aikaisemmassa aiheeseen liittyvässä tutkimuksessa selvitettiin, onko mahdollista yhdistää jauhekaari sekä laser yhteiseksi hybridihitsaukseksi. Tutkimuksessa käytettiin hiilidioksidilaseria, minkä laservalo absorboitui käytettävään jauheeseen ja hitsaukseen

tarvittava tunkeuma menetettiin. Ainut tapa yhdistää nämä kaksi menetelmää on pitää jauhe erillään lasersäteestä, mikä tekee prosessista monimutkaisen. Tässä tutkimuksessa onnistuttiin yhdistämään laser ja hitsausjauhe, menettämättä merkittävästi tunkeumaa. Tutkimuksessa on todistettu, ettei jauhe absorboi kuitulaserille ominaista 1 µm aallonpituista säteilyä samoissa määrin kuin hiilidioksidilaserille ominaista 10 µm sädettä.

7.3 Jatkotutkimukset

Tässä tutkimuksessa tutkittava aihe rajautui fokusointipisteen ja jauhekerroksen paksuuden aiheuttamille muutoksille hitsaustulokseen. Hitsauksessa on useita muuttujia, joilla on mahdollisesti merkitystä tuloksiin. Tutkimuksessa ei tarkasteltu lämpötilan vaikutusta hitsaukseen, jolla voisi olla vaikutusta halkeamien muodostumiseen sekä pinnanlaatuun. Jauheen vaikutus tunkeumaan on mahdollisesti erilainen, kun säädellään hitsausnopeutta tai laserin tehoa. Kokeessa käytettiin vain yhdenlaista jauhetta ja kaikki tulokset perustuivat SA FB 1 55 AC H5 (kauppanimike: st 55) jauheen ja kuitulaserin yhteisvaikutukseen.

LÄHDELUETTELO

Buchfink, G. 2007. The laser as a tool. Würzburg: Vogel Buchverlag. 280 s.

Katayama, S., Seto, N., Mizutani, M., Matsunawa, A. 2000. Formation mechanism of porosity in high power yag laser weld. ICALEO 2000, Laser institute of america. Dearborn, Michigan, USA. 2-5.10.2000. S. 16-19.

Kujanpää, V. Salminen, A & Vihinen, J. 2005. Lasertyöstö. Helsinki: Teknologiateollisuus ry. 373 s.

Olsen, F.O. 2009. Hybrid laser-arc welding. Cambridge: CRC Press. 323 s.

Reisgen, U. Olschok, S. Jakobs, S. 2014. Laser Submerged Arc Welding (LUPuS) with Solid State Lasers. Teoksessa: Physics Prodecia. Schmidt, M. Vollertsen, F. Merklein, M. Painos 56. Fürth: ScienceDirect. 2014. S. 653-662.

SFS-EN 10025-4 2019. Hot rolled products of structural steels. Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys r.y. 2. Painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 29 s.

SFS-EN 10029. 2011. Kuumavalssatut teräslevyt, paksuus 3mm tai yli. Mitta- ja muototoleranssit. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys r.y. 2. Painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 23 s.

SFS-EN 1011-2. 2001. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys r.y. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 114 s.

SFS-EN ISO 14174:2019. Welding consumables. Fluxes for submerged arc welding and electroslag welding. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys r.y. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 21 s.

Singh, R. 2012. Applied welding engineering: processes, codes, and standards. Waltham, MA: Butterworth-Heinemann. 349 s.

Solokov, M. 2015. Thick section laser beam welding of structural steels: Methods for improving welding efficiency. Lappeenranta: Lappeenranta university of technology. 117 s.

Steen, W. M, Mazumder, J. 2010. Laser Material Processing. 4. PAINOS. London: Springer London. 558 s.

Suomen hitsausteknillinen yhdistys. 2014. Hitsauksen materiaalioppi. 4. PAINOS. Helsinki: Suomen hitsausteknillinen yhdistys r.y. 304 s.

Weman, K. 2012. Welding processes handbook. 2. PAINOS. Cambridge: Woodhead Publishing. 270 s.