

Hybridihitsaus diodilaserin ja kuitulaserin yhdistelmällä



Tapio Väisänen

Hybridihitsaus diodilaserin ja kuitulaserin yhdistelmällä

Tapio Väisänen

Tapio Väisänen
Hybridihitsaus diodilaserin ja kuitulaserin yhdistelmällä

ISBN 978-951-784-459-8
ISSN 1795-424X
HAMKin e-julkaisuja 2/2008

© Hämeen ammattikorkeakoulu ja kirjoittajat

JULKAISIJA – PUBLISHER

Hämeen ammattikorkeakoulu
PL 230
13101 HÄMEENLINNA
puh. (03) 6461
faksi (03) 646 4259
julkaisut@hamk.fi
www.hamk.fi/julkaisut

Ulkoasu ja taitto: HAMK Julkaisut

Hämeenlinna, tammikuu 2008

Alkusanat

Tämä julkaisu liittyy Hämeen ammattikorkeakoulun Riihimäellä toimivan Teknologia-teollisuuden KT-keskuksen tutkimushankkeeseen Yhdistetyn kuitu- ja diodilaserin sovellukset metallin työstöön. Hankkeen vastuullinen johtaja oli Tapio Kostamo ja projektipäällikkö Tapio Väisänen. Hankkeen yhteistyöyritykset olivat:

- Aillos Oy
- Corelase Oy
- Finn-Power Oy
- Kemppi Oy
- Laserplus Oy
- Outokumpu Stainless Oy
- Pivatic Oy
- Rautaruukki Oyj

Tutkimushankkeen kesto oli noin 2,5 vuotta ja sen rahoittivat TEKES ja mainitut yritykset.

Hankkeen tavoitteena oli lisätä diodi- ja kuitulasereiden tuntemusta sekä selvittää kahden erilaisen laserin muodostaman hybridilaitteiston ominaisuuksia. Käytännön osuudessa tehtiin hitsauskokeita diodilaserilla, hitsaus- ja leikkauskokeita kuitulaserilla sekä hitsauskokeita kuitulaserin ja diodilaserin muodostamalla hybridilaitteistolla.

Sisällys

Alkusanat	4
1 Johdanto	6
2 Laserteknologia	7
2.1 Yleistä.....	7
2.2 Lasersäteen ominaisuudet.....	7
2.3 Työstölaserit.....	8
2.3.1 Diodilaser.....	8
2.3.2 Kuitulaser.....	8
2.3.3 Muut työstölaserit.....	9
3 Laserhitsaus	10
3.1 Laserhitsauksen perusteet.....	10
3.2 Laserhitsausparametrit.....	10
3.3 Laserhitsatun liitoksen ominaisuudet.....	12
3.4 Laserhitsaus käytännössä.....	13
3.5 Hybridihitsaus.....	13
4 Hitsauskokeet	15
4.1 Koelaitteisto.....	15
4.2 Koemateriaalit.....	17
4.3 Koemenetelmät.....	17
4.4 Koetulokset.....	18
4.4.1 Kuitulaserkokeet.....	19
4.4.1.1 Tunkeumasvyvyys.....	19
4.4.1.2 Hitsausnopeus.....	20
4.4.1.3 Hitsin kovuus.....	20
4.4.2 Hybridilaserkokeet.....	22
4.4.2.1 Tunkeumasvyvyys.....	22
4.4.2.2 Hitsausnopeus.....	23
4.4.2.3 Hitsin kovuus.....	23
4.4.2.4 Hitsin muokkautumiskyky.....	25
4.4.2.5 Lisäainehitsaus.....	26
4.4.3 Hybridilaserkokeet ruostumattomalle teräkselle AISI 304.....	29
5 Koetulosten tarkastelu	30
6 Johtopäätökset	33
7 Yhteenveto	34
8 Lähdeluettelo	35

1 Johdanto

Laserteknologian historia on varsin lyhyt, sillä ensimmäinen toimiva laser rakennettiin vasta vuonna 1960. Tästä eteenpäin, varsinkin viimeisen vuosikymmenen aikana, kehitys on ollut nopeaa. Tehokkaampia, paremman säteenlaadun omaavia ja edullisempia lasertyyppisiä on kehitetty ja kehitetään jatkuvasti. Laseria käytetään konepajateollisuudessa pääsääntöisesti hitsauksessa, leikkauksessa ja merkkauksessa. Muita mahdollisia käyttökohteita ovat lämpökäsittely, pinnoitus, kaiverrus, poraus ja juottaminen.

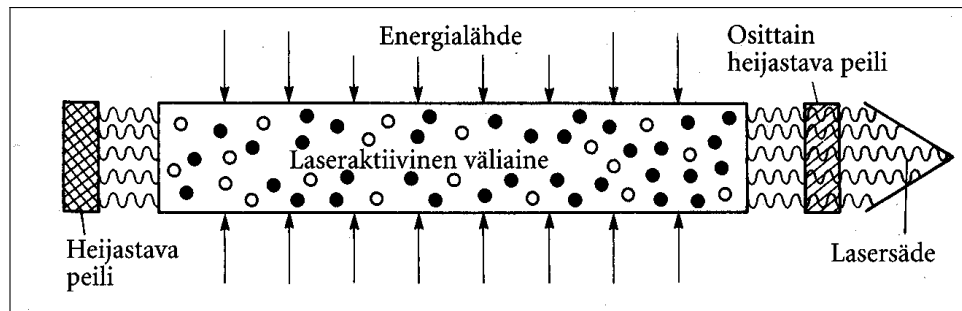
Laserhitsausta käytetään paljon autoteollisuudessa korin levyosien hitsauksessa. Sovellusalue on laajentunut myös konepajateollisuuteen. Laserhitsauksen etuja ovat suuri tuotantonopeus, joustavuus, tasalaatuisuus sekä pienet muodonmuutokset alhaisen lämmöntuonnin johdosta. Laserhitsauksen suurimpina ongelmina ovat sen asettamat tiukat railonvalmistustarkkuudet sekä kalleus. Railontarkkuusvaatimuksia voidaan lieventää käyttämällä hybridilaitteistoa, jossa samaan prosessiin on yleensä yhdistetty laserlaitteisto ja kaarihitsauslaitteisto. Myös kahden laserlaitteiston yhdistäminen on mahdollista.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kahden erilaisen laserin muodostaman hybridilaitteiston hitsausominaisuudet. Kokeellinen osuus tehtiin kuitulaserin ja diodilaserin muodostamalla hybridilaitteistolla ja hitsaustuloksia verrattiin pelkän kuitulaserin hitsaustuloksiin.

2 Laserteknologia

2.1 Yleistä

Sana LASER on lyhenne englanninkielisistä sanoista ”Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation”. Se tarkoittaa valoa, joka on vahvistettu stimuloitujen emissioavulla. Lasersäteen muodostamiseen tarvitaan pumppausenergiaa, laseroiva väliaine ja kaksi peiliä, kuva 1. Pumppausenergiaa käytetään virittämään laseroivien atomien elektroneja korkeammalle energiatasolle. Alemmalle tasolle palatessaan ne lähettävät vakioaallonpituuksista valoa eli fotoneja. Törmätessään toisiin virittyneen tilan elektroneihin fotonit aiheuttaa uusien fotonien vapautumisia. Tätä kutsutaan stimuloituksi emissioksi. Laserointi tapahtuu resonaattorissa, joka muodostuu kahdesta peilistä ja niiden välissä olevasta laseraktiivisesta väliaineesta. Laseroiva väliaine voi olla kaasumaista, nestemäistä tai kiinteää. Jokaiselle aineelle on oma ominainen aallonpituus, jolla se lähettää sähkömagneettista säteilyä. Kulkiessaan edestakaisin peilien välissä laservaloa vahvistetaan stimuloitulla emissiolla. Toinen peileistä on osittain läpäisevä, jotta työstöön käytettävä säde pääsee resonaattorista ulos. /5, 8, 11/



Kuva 1. Laseroinnin periaate /8/

2.2 Lasersäteen ominaisuudet

Lasersäteellä on ainutlaatuisia ominaisuuksia verrattuna tavalliseen valoon. Se on lähes yhdensuuntaista eli kollimoitua. Tämä tarkoittaa, että säde ei juuri laajene sen edetessä. Yhdensuuntaisuutta mitataan divergenssillä eli säteen halkaisijan laajentumiskulman puolikkaalla. Työstölaserien tyypilliset divergenssiarvot ovat välillä 1 - 20 mrad. Laservalo on myös yksiväristä eli monokromaattista. Lasersäteellä on siten vain yksi laseroivasta väliaineesta riippuvainen aallonpituus. Työstölaserin aallonpituudet sijoittuvat välille 100 – 10600 nm (0,1 - 10,6 μm). Lisäksi laservalo on samanvaiheista eli koherenttia, jolloin lasersäteet voivat vahvistaa toisiaan. /5, 8, 11, 13/

Sähkömagneettisen säteilyn sähkö- ja magneettikenttien poikkeavuutta symmetrisyydestä kutsutaan polarisaatioksi. Laservalo muokataan usein joko ympyräpolarisoiduksi tai tasopolarisoiduksi valoksi. Ympyräpolarisoitu säde on symmetrinen optiseen akse-

liin nähden. Tasopolarisoidulla säteellä sähkö- ja magneettikentät värähtelevät vain tietyn tason suuntaisena. Tällöin työstösuunta vaikuttaa säteen tehokkuuteen siten, että työstettäessä polarisaatiotason suuntaan saavutetaan parempi tunkeuma. Aallonpituus ja polarisaatio vaikuttavat lasersäteen energian absorptioon työkappaleeseen eli siihen, kuinka paljon energiasta siirtyy työkappaleeseen ja kuinka paljon heijastuu takaisin. /5, 8, 11, 13/

Laserin muita työstöprosessin kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat säteenlaatu, teho ja tehoteho. Säteenlaatu kuvataan erilaisilla termeillä, joista yleisimmät ovat sädeparametritulo, K-luku ja M^2 -luku. Käytettäessä optista kuitua säteenkuljetukseen säteenlaatu ilmaistaan yleensä sädeparametritulolla, joka määritellään seuraavasti:

$$BPP = D\theta/4 \quad (1)$$

missä D on ulostulevan säteen halkaisija ja θ on säteen divergenssi.

Sädeparametritulon yksikkö on mm*mrad. Mitä pienempi sädeparametritulo on, sitä parempi on säteenlaatu. Säteenlaatu vaikuttaa saavutettavaan polttopisteen halkaisijaan ja syvyysterävytyteen. Tehoteho tarkoittaa lasertehoa pinta-alayksikköä kohti ja se ilmoitetaan yleensä yksikössä W/cm². Lasersäteen keskimääräinen tehoteho on laserteho jaettuna säteen poikkipinta-alalla. /5, 8, 11/

2.3 Työstölaserit

2.3.1 Diodilaser

Suuritehoinen, metallien hitsaukseen soveltuva diodilaser (HPDL - high power diode laser) koostuu useista diodilaselementeistä, joiden yksikköteho on suuruusluokaltaan 1 W. Nämä diodielementit kootaan noin 20 diodin nippuihin, joista tuleva valo on kapea viiva. Laserin teho nostetaan hitsauksen edellyttämälle tasolle liittämällä useita nippuja päällekkäin, jolloin saadaan ns. lasermoduuli eli pakka. Pakan tyypillinen teho on luokkaa 700-1000 wattia. Suuritehoinen, useiden kilowattien diodilaser saadaan yhdistämällä useita säteitä samalle optiselle akselille esimerkiksi erikoisoptiikan avulla. Diodilaserin polttopisteen koko on suurempi ja säteenlaatu heikompi muihin yleisiin lasereihin verrattuna, minkä takia sitä ei yleensä voida käyttää leikkaukseen eikä syvätkunkeumahitsaukseen. Diodilaserien tyypilliset aallonpituudet ovat välillä 800-1000 nm, joten sädetä on mahdollista ohjata optisella kuidulla. Suuritehoisen diodilaserin kokonaisyötysuhde on hyvä, noin 30 %. Korkean hyötysuhteen ja diodien pitkän elinajan ansiosta diodilaserin käyttökustannukset ovat alhaiset. /5, 8/

2.3.2 Kuitulaser

Kuitulaserissa säde synnytetään suoraan optisen kuidun sisään. Resonaattorina toimii optinen kuitu, jonka ydin on seostettu laseroivalla väliaineella. Kuitulasereissa paljon käytetty laseroiva väliaine on ytterbium, joka antaa aallonpituudeksi 1070 nm. Pumpausenergiana toimii diodilaserin valo. Kuidun säde voidaan tehdä pieneksi, joten myös syntyvän säteen polttopiste on pieni ja säteenlaatu on erittäin hyvä. Kuitulaserin hyötysuhde on noin 30 %. Suuritehoisen kuitulaserin rakenne on modulaarinen eli useiden muutaman sadan watin moduulien säteet yhdistetään toisiinsa. Nykyisin markkinoilla on kuitulasereita aina 50 kW asti. /5, 6, 8, 14, 18/

2.3.3 Muut työstölaserit

Muut työstölaserityypit ovat hiilidioksidi- eli CO₂-laser, Nd:YAG-laser ja kiekkolaser.

CO₂-laserin laseroivana väliaineena toimii kaasuseos. Varsinainen laseroiva kaasu on hiilidioksidi ja virittäminen tehdään sähkövirralla. Syntyvän valon aallonpituus on 10600 nm. Hyötysuhde on tyypillisesti 10 % luokkaa. CO₂-laserilla on useita toimintaperiaatteita, joista yleisimmät työstösovelluksiin ovat nopean pitkittäisvirtauksen, poikittäisvirtauksen tai diffuusiojähdytetty laser. /5, 8/

Nd:YAG-laserin laseroiva väliaine on neodyymi, jota on seostettu kiinteään YAG-kiteeseen. Syntyvän lasersäteen aallonpituus on 1064 nm. Pumppausenergia voidaan tuottaa joko kryptonlampuilla tai diodilasereilla. Lamppupumpatun laserin hyötysuhde on vain muutamia prosentteja. Diodipumppauksella hyötysuhde voidaan nostaa yli 20 %. /5, 8/

Kiekkolaser on Nd:YAG-laserin tavoin kiinteän väliaineen laser, jossa käytetään ohutta kiekkomaisista kideä. Muotonsa ansiosta kiteeseen saadaan tasainen jähdytys ja lämpötila. Yleisesti käytetty kide on Yb:YAG, ja syntyvän säteen aallonpituus on 1030 nm. Kideä pumpataan diodilaserilla. Kiekkolaserin hyötysuhde ja säteenlaatu ovat kohtalaisia. /5, 8/

Taulukossa 1 on vertailtu hyvän tai kohtalaisen säteenlaadun omaavien työstölaserien ominaisuuksia.

Taulukko 1. Työstölaserien vertailu /6/

	Kuitulaser	Nd:YAG-laser	CO ₂ -laser	Kiekkolaser
Kokonaishyötysuhde	30%	5%	10%	15%
Maksimi teho	50 kW	6 kW	20 kW	4 kW
BPP (4/5kW)	< 2,5 mm*mrاد	25 mm*mrاد	6 mm*mrاد	8 mm*mrاد
Diodin elinikä	100,000 h	10,000 h	-	10,000 h
Jähdytys	Ilma/vesi	Deionisoitu vesi	Vesi	Vesi
Lattiapinta-ala (4/5kW)	< 1 m ²	6 m ²	3 m ²	> 4 m ²
Käyttökustann./h	\$21.31	\$38.33	\$24.27	\$35.43
Huolto	Ei vaadita	Usein	Vaaditaan	Usein

3 Laserhitsaus

3.1 Laserhitsauksen perusteet

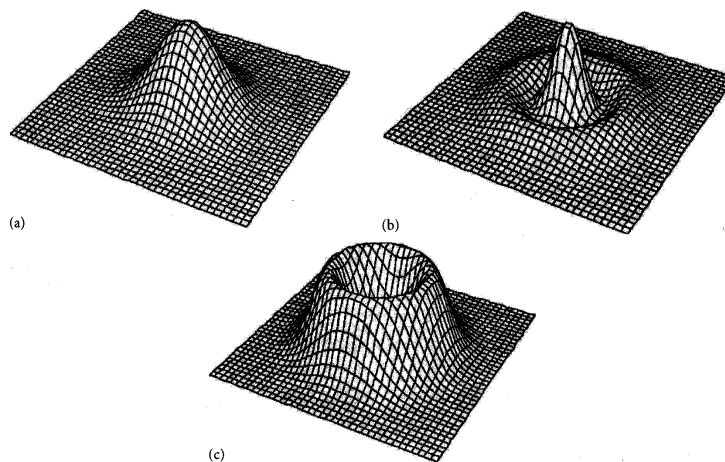
Laserhitsauksen tärkein käyttöalue on autoteollisuus, mutta se on hyvää vauhtia laajentumassa myös konepajateollisuuteen. Laserhitsauksen merkittävimmät edut perinteisiin hitsausmenetelmiin verrattuna ovat syvä kapea hitsi, alhainen lämmöntuonti, suuri tuotantonopeus ja prosessin joustavuus. Suurimpina ongelmina ovat sen asettamat tarkkuusvaatimukset liitettävälle kappaleille, railonvalmistukselle, kiinnitykselle sekä lasersäteen liikuttelulle. /7, 8/

Laserhitsauksessa voidaan erottaa kaksi erilaista prosessia, sulattava hitsaus ja syvätunkeumahitsaus. Syvätunkeumahitsaus edellyttää rajatehotiheyden 10^6 W/cm² saavuttamista. Mikäli laserteho on pieni tai polttopisteen koko suuri, ei rajatehotiheyttä saavuteta ja prosessi on sulattavaa hitsausta. Tämä muistuttaa tavallista kaarihitsausta, sillä lämpö siirtyy materiaalin pinnalta johtumalla. Prosessi tuottaa matalan ja leveän hitsin ja madaltaa siten hitsausasetusten tarkkuusvaatimuksia. Se soveltuu hyvin ohuiden materiaalien hitsaukseen. Sulattavaa laserhitsausta tehdään pääsääntöisesti diodilasereilla. Laserhitsauksen yleisempi muoto on syvätunkeuma- eli avaimenreikähitsaus. Suuren tehotiheyden ansiosta metalliin muodostuu avoin reikä, ns. avaimenreikä, joka suurentaa materiaalin absorptiota huomattavasti. Haittapuolena on metallin höyrystymisestä johtuva plasmopilven muodostuminen avaimenreiän yläpuolelle, joka haittaa hitsausta varsinkin suuren aallonpituuden lasereilla. Syvätunkeumahitsauksella on mahdollista tehdä kapeita ja syviä hitsejä. /7, 8, 10, 11, 13/

3.2 Laserhitsausparametrit

Laserhitsausparametrit voidaan jakaa sädeparametreihin, prosessiparametreihin ja perusaineen parametreihin. Sädeparametrit ovat laitteistokohtaisia, eikä niitä yleensä muuteta. Prosessiparametrit ovat helposti säädettävissä kuhunkin hitsaustapahtumaan sopivaksi. Myös hitsattavien kappaleiden materiaaliominaisuudet ja muoto vaikuttavat hitsauksen lopputulokseen.

Sädeparametreja ovat polarisaatio, moodi, säteen halkaisija ja divergenssi. Tasopolarisoidulla lasersäteellä hitsattaessa hitsaussuunta vaikuttaa tunkeumaan siten, että polarisaatiotason suuntaan hitsattaessa saavutetaan syvempi tunkeuma kuin hitsattaessa polarisaatiotasoon nähden kohtisuoraan. Ympyräpolarisoidulla säteellä tunkeuma on sama joka suuntaan. Käytettäessä optista kuitua säteen siirtoon ei polarisaatiolla ole merkitystä, sillä kuitu tekee säteestä satunnaispolarisoitua, jonka ominaisuudet ovat lähellä ympyräpolarisoidun säteen ominaisuuksia. Moodi kuvaa tehon jakautumaa lasersäteessä (kuva 2). TEM₀₀-tyyppisellä moodilla teho on keskittynyt säteen keskelle ja sillä on paras fokusoitavuus. Suuritehoisten epästabiilien resonaattorien työstölaserien moodit ovat yleensä tyyppiä TEM₀₁, jota kutsutaan multimoodiksi. TEM-luvulla kuvataan vain muokkaamattomia lasersäteitä. Muokattujen säteiden, kuten esimerkiksi optisen siirtokuidun jälkeen moodi muuttuu täysin ja TEM-luvun käyttö ei ole mielekäästä. Kuidusta tulee aina top-hat muotoinen säde, jonka tehojakauma on varsin tasainen. Säteen halkaisija ja divergenssi vaikuttavat säteenlaatuun kaavan (1) mukaisesti ja siten myös saavutettavaan polttopisteen halkaisijaan ja syvyyserävytyteen. /5, 8, 13/

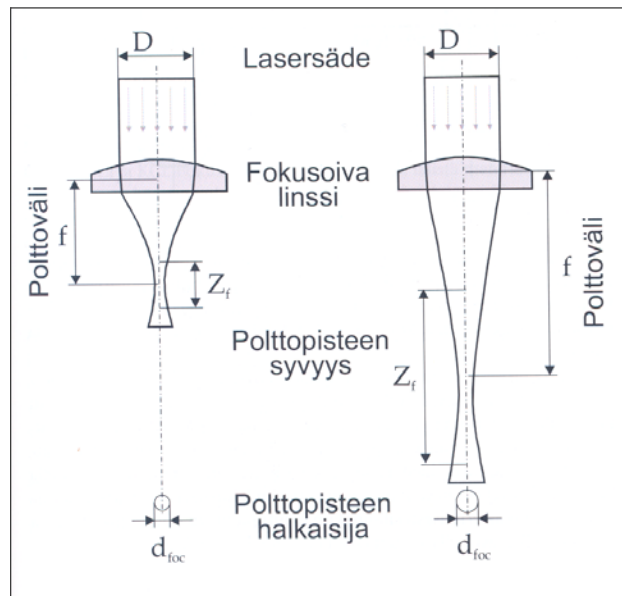


Kuva 2. Lasersäteiden tehojakaumia eli moodeja. a) TEM_{00} b) TEM_{10} and c) TEM_{01} /5/

Prosessiparametreja ovat teho, hitsausnopeus, säteen fokusointi, säteen polttoväli, polttopisteen asema ja suojakaasu. Prosessiparametreina voidaan lisäksi pitää lisäaineen tuontiin liittyviä parametreja, kuten langan laatu ja koko, langansyöttönopeus ja langansyöttösuunta. Lasertehoa tarkasteltaessa on tärkeää erottaa laserin ulostuloteho ja teho työkappaleen pinnalla toisistaan. Häviöt optisissa komponenteissa voivat joissain tapauksissa olla suuriakin. Teho ja hitsausnopeus yhdessä määräävät energiantuonnin sauman pituusyksikköä kohden seuraavasti:

$$W/s = P/v \quad (2)$$

Missä W/s on energia pituusyksikköä kohti, P on teho ja v on hitsausnopeus. Tämän energian kasvaessa sekä hitsin tunkeuma että leveys kasvavat. Säteen fokusoinnilla säteen koko pienennetään optiikan avulla raakasäteestä polttopisteen säteen kooksi. Polttopisteen minimikokoa rajoittavat säteen fokusoitavuus, optiikan virheellisyys ja säteen aallonpituus. Fokusointilinssin ja polttopisteen väliä kutsutaan polttoväliksi. Polttoväliin voidaan vaikuttaa muuttamalla fokusointioptiikka. Pitempi polttoväli parantaa syvysterävyyttä mutta samalla suurentaa polttopisteen halkaisijaa ja siten myös alentaa tehotehyyttä (kuva 3). Polttovälin muuttaminen edellyttää mekaanista optiikan vaihtamista. Mikäli vain polttopisteen kokoa halutaan suurentaa, voidaan se helpoiten tehdä siirtämällä työkappaletta tai laserhitsauspäättä siten, että polttopisteen paikka siirtyy pois liitospinnasta. Suojakaasun tehtävänä on suojata hitsisulaa hapettumiselta. Laserhitsauksessa suojakaasu tuodaan prosessiin yleensä erillisellä suuttimella. Käytettäviä suojakaasuja ovat argon, helium ja typpi. /8, 17/



Kuva 3. Polttovälin vaikutus polttopisteen halkaisijaan ja syvyysterävyteen /8/

Perusaineen parametreja ovat aineenpaksuus, työkappaleen pinnanlaatu, liitoksen ilmarako ja materiaalin ominaisuudet. Tietyn paksuisen levyn läpihitsaukseen vaaditaan tietty tehon ja hitsausnopeuden yhdistelmä. Työkappaleen pinnan puhtaus on laadukkaaksi hitsin edellytys. Epäpuhtaudet, kuten lika, öljy, pinnoitteet ja valssihilse aiheuttavat roiskeisuutta ja huokosia. Työkappaleen pinnanlaatu vaikuttaa myös säteen absorptioon. Mattapinnan absorptio on peilipinnan absorptiota suurempi. Absorptiota voidaan parantaa esimerkiksi grafiittipinnoituksella. Liitoksen ilmaraon suhteen pääsääntönä on, että sen tulisi olla mahdollisimman pieni. Ilmaraon ollessa suuri säde saattaa mennä railon läpi hitsattavia kappaleita koskematta. Suuri ilmarako vaatii yleensä lisäaineen käyttöä, koska muuten hitsistä tulee vajaa. Materiaalin koostumuksella on merkittävä vaikutus laserhitsattavuuteen. Teräksen korkea hiilipitoisuus aiheuttaa karkenemistä ja kuumahalkeiluerkkyyttä. Epäpuhtaudet voivat aiheuttaa huokoisuutta. Muita laserhitsattavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. lämmönjohtavuus, lämpölaajenemiskerroin, sulamis- ja höyrystymispiste sekä heijastavuus. /5, 8, 11/

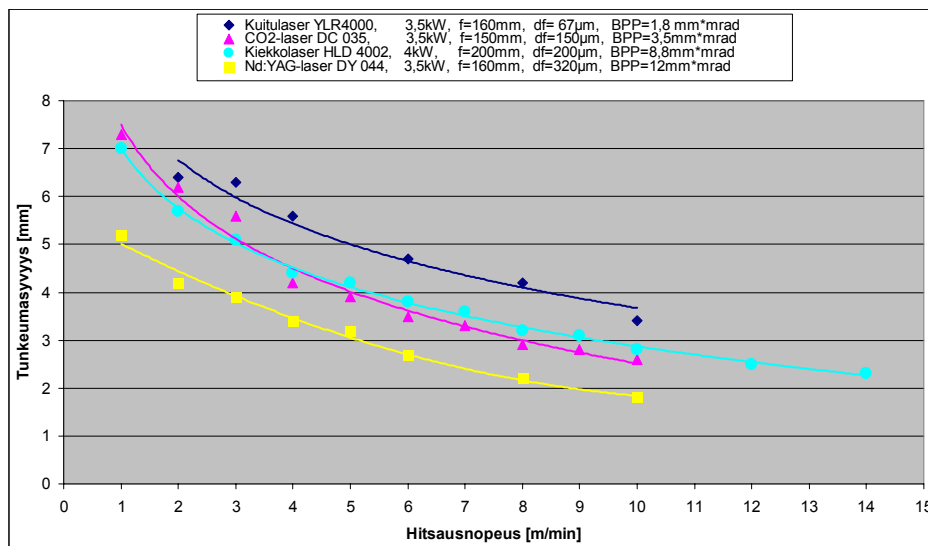
3.3 Laserhitsatun liitoksen ominaisuudet

Laserhitsausprosessi on vakaa ja laserhitsatun liitoksen laatu ja tasaisuus ovat yleensä yhtä hyviä tai parempia kuin perinteisillä menetelmillä hitsatun. Laserhitsauksen alhaisen lämmöntuonnin takia muodonmuutokset jäävät pieniksi. Avaimenreikähitsauksessa hitsistä saadaan syvä ja erittäin kapea, kapeimmillaan hitsi voi olla lähes yhtä pieni kuin säteen halkaisija. Terästä laserhitsattaessa hitsin lujuus ja kovuus nousevat yleensä perusaineen arvoja suuremmiksi ja vastaavasti murtovenymä jää pienemmäksi. Näihin voidaan vaikuttaa lämmöntuonnilla. Pienellä lämmöntuonnilla lämpösykli on nopea ja hitsin jäähtymisaika lyhyt, mikä aikaansaa kovan ja lujan martensiittisen rakenteen. Suurella lämmöntuonnilla jäähtymisnopeus hidastuu ja rakenne pehmenee. /5, 10/

3.4 Laserhitsaus käytännössä

Diodilaserin tehoteho ei yleensä riitä avaimenreikähitsaukseen. Se soveltuukin parhaiten sulattavaan laserhitsaukseen, jota käytetään tyypillisesti ohuiden materiaalien hitsauksessa. Paremman säteenlaadun omaavilla lasertyypeillä, kuten CO₂-, kiekko- ja kuitulasereilla tehdään syvätunkeumahitsausta. Kauimmin käytössä ollut ja vielä nykyisinkin yleisin konepajasovellusten lasertyyppi on CO₂- laser. Sen suuren aallonpituuden johdosta absorptio työkappaleeseen on pienempi. Toisaalta se on turvallisempi käyttää, eikä vaadi erikoisvalmisteisia silmäsuojaimia. Uutta teknologiaa edustavien kiekko- ja kuitulaserien aallonpituudet ovat luokka 1000 nm, joten niiden absorptio työkappaleeseen, samoin kuin hyötysuhde ovat parempia, kuin CO₂-laserilla. Lisäksi ne ovat varsin huoltovapaita ja ne ovatkin korvaamassa vanhanaikaiset hiilidioksidilaserit. /7, 11/

Kuvassa 4 on esitetty joidenkin lasertyyppien tyypillisiä hitsausnopeuksia eri laser-tehoilla ja levynpaksuuksilla. Kuitulaserilla saavutettava hitsausnopeus on kaikkein suurin kun taas Nd:YAG-laserin hitsausnopeus on alhaisin. Syvätunkeumahitsauksen alaraja määräytyy avaimenreiän aukkipysymisen mukaan ja on CO₂-laserilla noin 0,5 m/min. Lyhyemmän aallopituuden lasereilla voidaan hitsata jonkin verran hitaammin. /5, 18/



Kuva 4. Tunkeuma hitsausnopeuden funktiona eri työtolasereilla /3/

3.5 Hybridihitsaus

Hybridihitsaus tarkoittaa kahden eri hitsausmenetelmän yhdistämistä samaan prosessiin. Yleisin hybridihitsauslaitteisto on laserin ja kaarihitsauslaitteiston yhdistelmä. Laser aikaansaa syvätunkeuman ja kaarihitsausmenetelmää hyödynnetään siten, että tunkeuma levenee ja syvenee, hitsausnopeus suurenee ja vaadittavat railonvalmistustarkkuudet väljenevät tuodun lisäaineen ansiosta. Kahden hitsausprosessin yhteisvaikutuksella saavutettavia muita etuja ovat vähäinen ja hallittavissa oleva lämmöntuonti ja parempi hyötysuhde. Kaarihitsausmenetelmän lisäaineella ja lisälämmöntuonnilla

voidaan myös hallita syntyvän hitsin mikrorakennetta, kovuutta ja sitkeyttä. Haittapuolena on kaarihitsauspään sijoitus ja liikuttelu usein ahtaissa työtiloissa. /2, 7, 9, 12/

Hybridihitsauslaitteisto voi koostua myös kahdesta laserlaitteistosta, jolloin hitsauspäästä saadaan kompakti ja pienikokoinen kokonaisuus. Kaarihitsauslaite korvataan laserlaitteistolla, jolla tarvittava lisälämpö tuodaan prosessiin. Yhdistämällä erilaisen tehojakauman omaavat laserit saavutetaan vastaavanlaisia etuja kuin perinteisellä laser-kaarihitsaus -hybridillä. Lasereista koostuvan hybridilaitteiston lisäetuja ovat roiskeeton hitsaus ja hitsauspään pieni ja kompakti rakenne, kun säteet tuodaan hitsauspäähän optisella siirtokuidulla. Haittapuolena on lasereiden kallis hinta verrattuna kaarihitsauslaitteistoon. /15, 16/

Kahden laserin hybridilaitteisto toteutetaan yleisimmin siten, että lasereiden säteet fokusoidaan työstökohtaan eri tulokulmilla. Etuna tässä on, että lasersäteiden paikkoja toistensa suhteen voidaan säätää. Haittapuolena on, että molempien lasereiden säteitä ei voida tuoda kohtisuorassa työstökohtaan. Toinen mahdollinen toteutustapa on yhdistää säteet samanaksellisiksi ja fokusoida säteet työstökohtaan samaa optiikkaa käyttäen. Tällöin molemmat säteet voidaan tuoda kohtisuorassa työstökohtaan, mutta säteiden paikkoja toistensa suhteen ei voida muuttaa. /5, 15, 16, 18, 19/

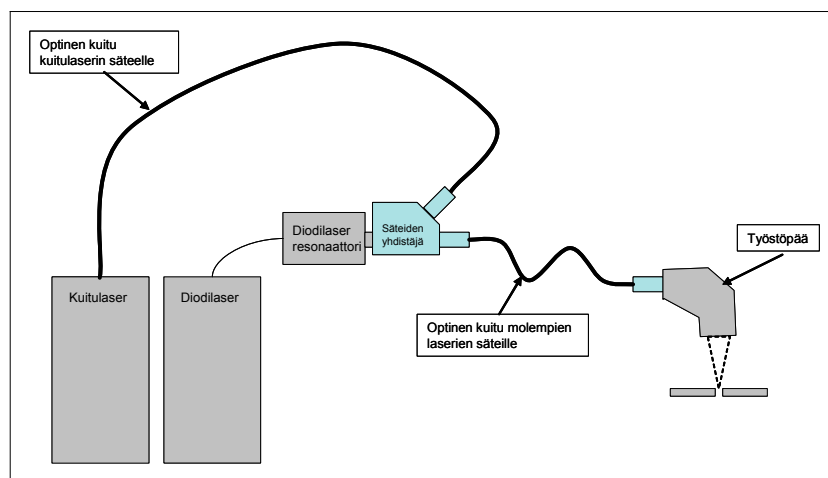
4 Hitsauskokeet

4.1 Koelaitteisto

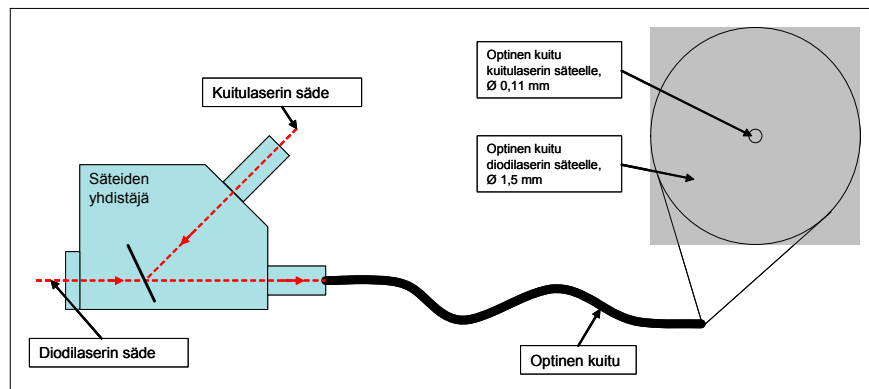
Hitsauskokeita tehtiin kahdella erilaisella laitteistokokoonpanolla. Kuitulaserkokeissa, jotka tehtiin ensin vertailuarvojen saamiseksi, käytettiin täysin kaupallista laitteistoa. Tämän jälkeen siirryttiin varsinaisiin hybridihitsauskokeisiin. Nämä tehtiin kaupallisilla lasereilla, joiden yhdistämiseen käytettiin erikoiskomponentteja.

Kuitulaserkokeet tehtiin kuitulaserilla IPG YLR-1000, jonka nimellisteho oli 1 kW. Ytterbium-kuitulaserin aallonpituus oli 1070 nm. Säteen siirtoon käytetyn optisen kuidun halkaisija oli 0,05 mm. Kuidusta ulostulevan säteen polttopisteen halkaisija oli 0,1 mm ja mitattu suurin tehotiheys oli 12,7 MW/cm². Sädeparametritulo BPP oli 2,2 mm*mrad. Hitsauspäänä oli Highyag BOK+3W 120 mm polttovälin optiikalla. Hitsauspää oli varustettu cross-jet -toiminnalla ja siihen oli kiinnitetty laitteisto langansyöttöä ja suo- jakaasun syöttöä varten. Hitsauspää oli kiinnitetty nivelvarsirobottiin Fanuc ARC mate 100i.

Hybridilaserkokeissa käytettiin kuitulaseria IPG YLR-1000 ja diodilaseria Rofin-Sinar DL021Q. Molemmat lasersäteet fokuoitiin erikoisrakenteiseen kaksoissiirtokuituun säteiden yhdistäjän avulla. Yhdistäjään tuotiin diodilaserin kollimoitu säde sekä kuitulaserin optisesta siirtokuidusta ulostuleva säde. Säteiden yhdistäjässä oli kollimaattori kuitulaserin säteelle, puoliläpäisevä peili sekä fokusointioptiikka. Kuitulaserin säde heijastui ja diodilaserin säde läpäisi puoliläpäisevän peilin. Kaksoissiirtokuidussa oli kaksi kuitua sisäkkäin. Kuitulaserin säde fokuoitiin halkaisijaltaan 0,11 mm kuituun ja diodilaserin säde halkaisijaltaan 1,5 mm kuituun. Kuvassa 5 on esitetty koelaitteiston periaate ja kuvassa 6 nähdään säteiden yhdistäjän ja kaksoissiirtokuidun periaatteellinen rakenne. Lasereiden ominaisuudet hybridikokoonpanossa on esitetty taulukossa 2.



Kuva 5. Hybridihitsauksen koelaitteisto

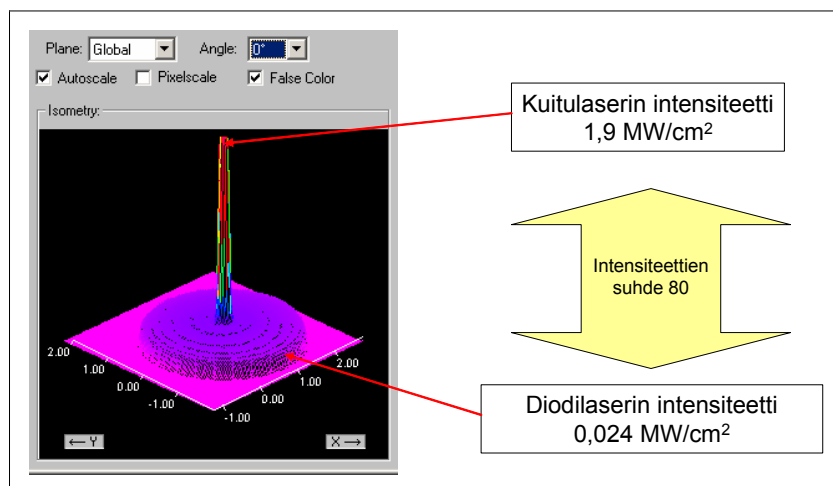


Kuva 6. Säteiden yhdistäjä ja kaksoissiirtokuitu

Taulukko 2. Hybridilaitteiston lasereiden ominaisuudet

Laser	Diodilaser	Kuitulaser
Nimellisteho (kW)	2	1
Optisen siirtokuidun halkaisija (mm)	1,5	0,11
Polttopisteen halkaisija (mm)	2,9	0,23
Sädeparametritulo BPP (mm*mrاد)	132	3,6
Suurin teho työkappaleen pinnalla (kW)	1,6	1,0
Suurin tehotiheys polttopisteessä (MW/cm ²)	0,024	1,9

Hybridilaitteiston tehojakaumassa (kuva 7) näkyy selkeästi kuitulaserilla saatava korkea piikki keskellä sekä diodilaserin laaja, matala intensiteetti. Kuitulaserin piikki ylittää syvätunkeumahitsaukseen vaadittavan 1 MW/cm² tehotiheyden rajan, kun taas diodilaserin tehotiheys on huomattavasti tämän rajan alapuolella.



Kuva 7. Hybridilaitteiston tehojakauma

4.2 Koemateriaalit

Koemateriaaleina olivat sekä niukkaseosteinen teräs että austeniittinen ruostumaton teräs. Niukkaseosteinen teräs oli Rautaruukin kylmävalssattu muovattava teräs Racold 01F, joka vastaa terästä DC01 standardin EN 10130 mukaan. Taulukossa 3 on esitetty teräksen kemiallinen koostumus ja taulukossa 4 sen mekaanisia ominaisuuksia.

Taulukko 3. Teräksen Racold 01F kemiallinen koostumus

Seosaine	C	Mn	P	S
Määrä (%)	<0,12	<0,6	<0,045	<0,045

Taulukko 4. Teräksen Racold 01F mekaaniset ominaisuudet levynpaksuudella 2 mm

Myötölujuus $R_{p0,2}$ (MPa)	Murtolujuus R_m (MPa)	Murtovenymä A_{80} (%)	Rockwell B kovuus (HRB)
195	317	40	67

Lähteen /4/ mukaan 0,1 % hiiliteräkselle saavutettava karkaisukovuus perinteisiä karkaisumenetelmiä käyttäen on noin 375 HV.

Koekappaleiden paksuudet olivat 0,5 mm, 1 mm ja 2 mm. Tunkeumakokeet tehtiin rakenneterästä S235 vastaavalle teräkselle.

Austeniittinen ruostumaton teräs oli Outokumpu Polaritin AISI 304 -tyyppinen teräs, jonka tyypillinen kemiallinen koostumus on

- 0,04 % hiiltä
- 18,1 % kromia
- 8,1 % nikkeliä.

Myös ruostumattoman teräksen koekappaleiden paksuudet olivat 0,5 mm, 1 mm ja 2 mm. Ruostumattomalle teräkselle tehtiin lähinnä vertailevia kokeita teräksen Racold 01F suhteen.

4.3 Koemenetelmät

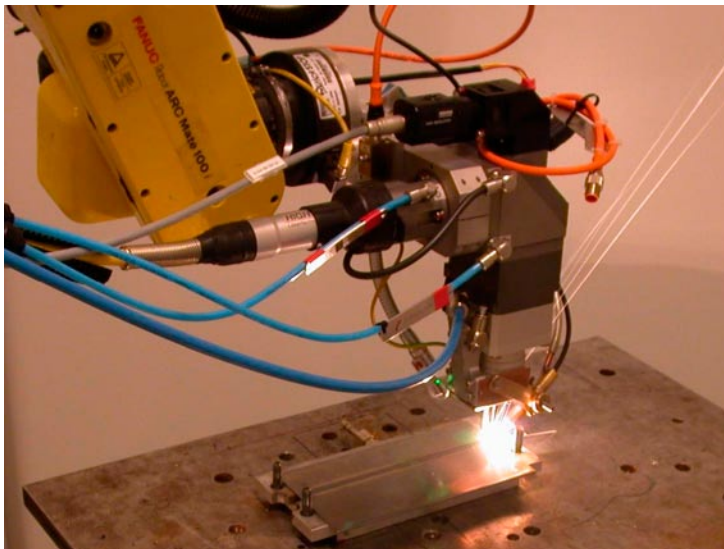
Molemmilla laserjärjestelmillä tutkittiin saavutettavaa tunkeumasyvyyttä ja hitsausnopeutta. Lisäksi tutkittiin hitsiin syntyviä kovuuksia. Hitsausparametreina olivat hitsausnopeus ja hitsausteho. Hitsaukset tehtiin umpiaineeseen lasersäteiden polttopisteen sijaitessa koekappaleen yläpinnalla. Suojakaasua ei käytetty. Hybridilaserilla tehtiin lisäksi kokeita hitsin muokkautumiskyvystä sekä lisäaineellisia hitsauskokeita. Muokkautumiskykyä mitattiin tekemällä pitkittäisiä vetokokeita erimittaisiin päällekkäishitsein. Koelaitteistona oli hydraulisesti toimiva Wolpert U10 vetokone, jonka suurin vetovoima on 100 kN. Vetokone on varustettu voima- ja siirtymäantureilla. Lisäaineko-

keissa selvitettiin hybridilaitteiston soveltuvuus lisäaineelliseen hitsaukseen sekä vaadittavat railonvalmistustarkkuudet. Kokeet tehtiin I-railoon.

Tunkeumasyyvyys mitattiin hitsin poikkileikkaushieestä. Hybridilaserkokeissa eri nopeuksilla/diodilaseritehoilla tuloksena käytettiin 5 kokeen keskiarvoa, kun taas kuitulaserkokeissa tehtiin vain yksi mittaus yhtä hitsausnopeutta kohden. Maksimi hitsausnopeudeksi määritettiin nopeus, jolla vielä syntyi yhtäjaksoisesti koko levyn läpäisevä hitsi. Kovuuden mittaukset tehtiin Vickersin mikrokovuusmittausmenetelmällä. Mittalaitteena oli valomikroskooppiin liitettävä Reichert Microhärteprüfer 60/0,65 ja mittausvoimana käytettiin 100 gramman painoa vastaavaa voimaa. Hitsin maksimikovuus mitattiin mahdollisimman läheltä hitsisauman keskiviivaa vähintään yhdeksän mittauksen keskiarvona. Kovuusprofiilien määrittelyssä on käytetty vain yhtä mittaustulosta pistettä kohden.

Edellä mainitut kokeet tehtiin kylmävalssatulle muovattavalle teräkselle Racold 01F lukuun ottamatta tunkeumasyyvyyskokeita, jotka tehtiin rakenneteräkselle S235. Tunkeumasyyvyys- ja hitsausnopeuskokeet tehtiin lisäksi myös ruostumattomalle teräkselle AISI 304.

Kuvassa 8 on esitetty hitsauskokeiden suoritusjärjestely. Hitsauspää oli kiinnitetty robotin ranteeseen ja koekappaleet erityiseen kiinnittimeen. Kaikki koehitsaukset tehtiin jalkoasennossa.



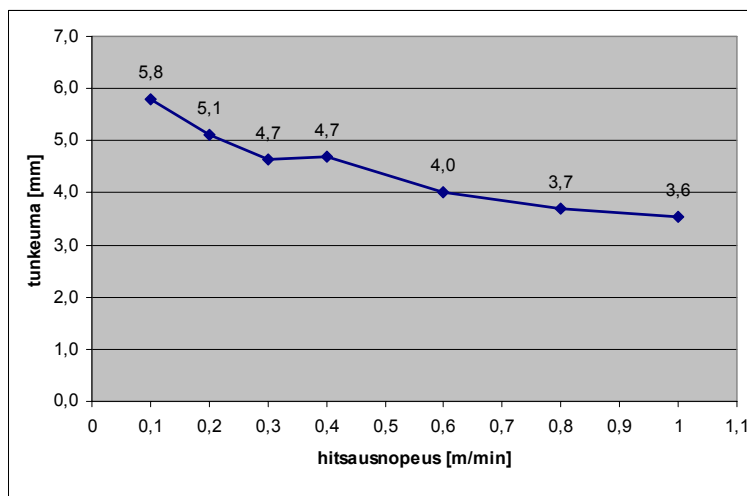
Kuva 8. Hitsauskokeiden suoritusjärjestely. Kuvassa levy on irrallaan kiinnittimen päällä.

4.4 Koetulokset

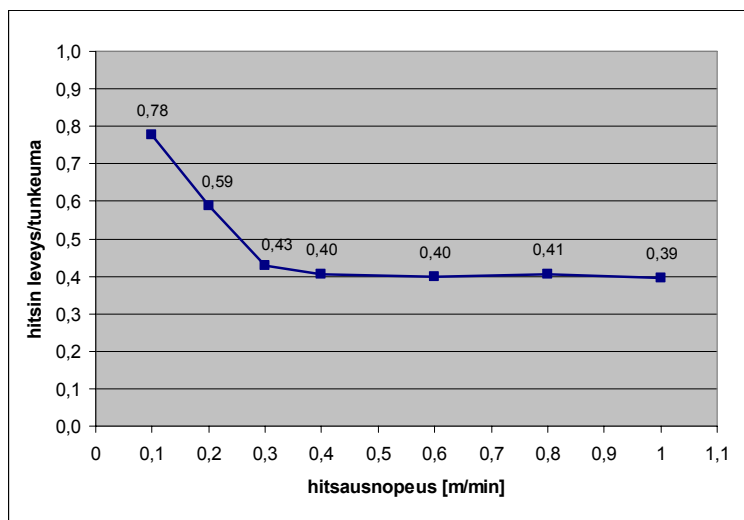
4.4.1 Kuitulaserkokeet

4.4.1.1 Tunkeumasyyvyys

Kuvassa 9 esitetään tunkeuman riippuvuus hitsausnopeudesta. Hitsausnopeuden suu-
retessa tunkeumasyyvyys pienenee. Kuvassa 10 esitetään hitsin yläpinnan leveyden ja
tunkeuman suhde hitsausnopeuden funktiona. Alhaisilla nopeuksilla lämpö ehtii le-
vitä johtumalla, joka leventää hitsiä varsinkin yläreunasta. Hitsausnopeudesta noin
0,4 m/min ylöspäin leveyden ja tunkeuman suhde pysyy vakiona.



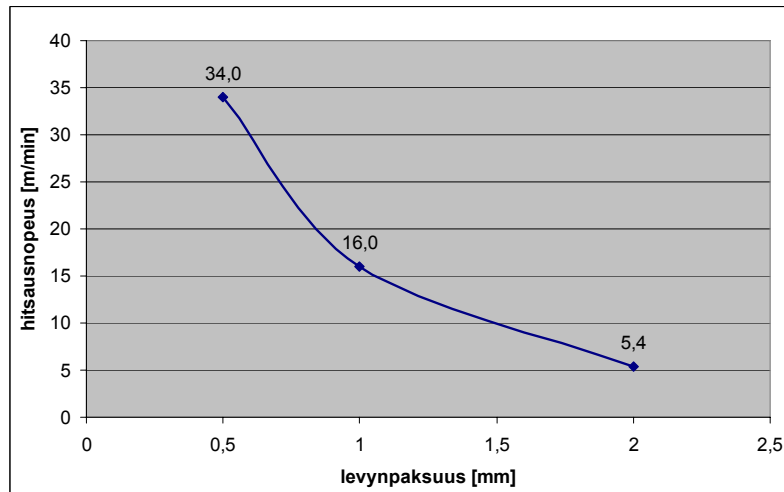
Kuva 9. Tunkeumasyyvyys hitsattaessa 1 kW kuitulaserilla 8 mm paksuista rakenneterästä S235.



Kuva 10. Hitsin yläpinnan leveyden ja tunkeuman suhde hitsattaessa 1 kW kuitulaserilla 8 mm pak-
suista rakenneterästä S235.

4.4.1.2 Hitsausnopeus

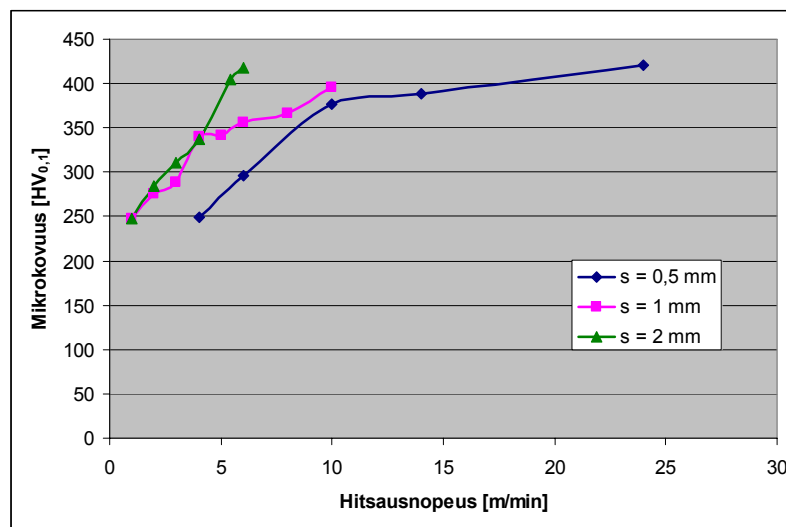
Kuva 11 esittää hitsausnopeudet eri levynpaksuuksilla. Hitsausnopeuden ylittäessä noin 10 m/min robotin tarkkuus ei enää riittänyt tekemään suoraa hitsiä. Tällöin myös korkeussuuntainen asema saattaa muuttua hieman aiheuttaen fokuspisteen poikkeamisen kappaleen pinnalta ja siten myös pieniä muutoksia tunkeumassa.



Kuva 11. Maksimi läpihitsautuvuusnopeus hitsattaessa 1 kW kuitulaserilla kylmävalssattua muovattavaa terästä Racold 01F.

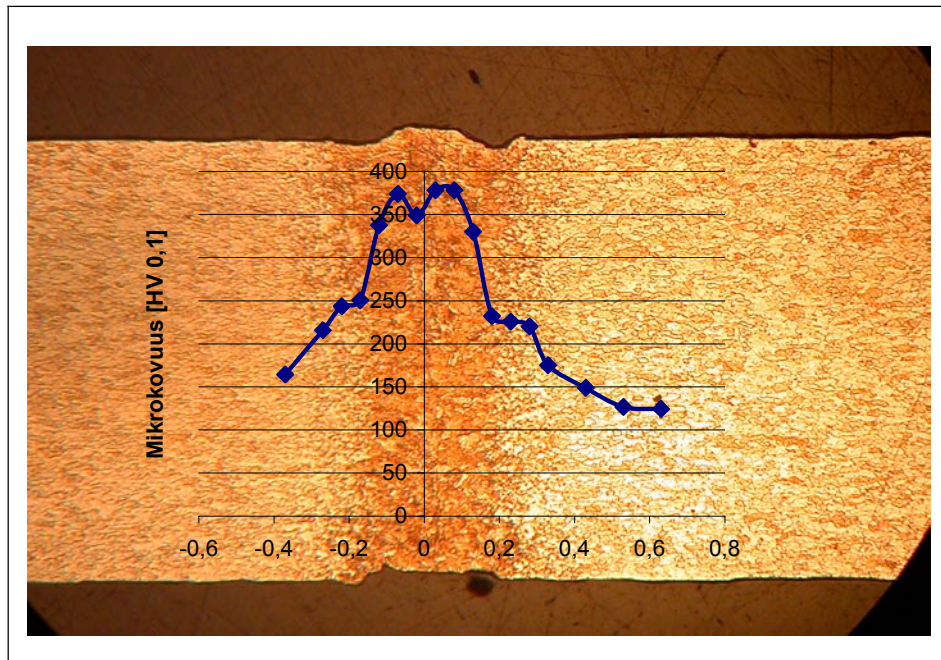
4.4.1.3 Hitsin kovuus

Perusaineen kovuudeksi mitattiin $116 \text{ HV}_{0,1}$. Kuvasta 12 havaitaan kovuuden kasvavan sekä nopeuden että levynpaksuuden kasvaessa. Molemmat parametrit lisäävät jäähtymisnopeutta, joka edesauttaa martensiitin muodostumista.

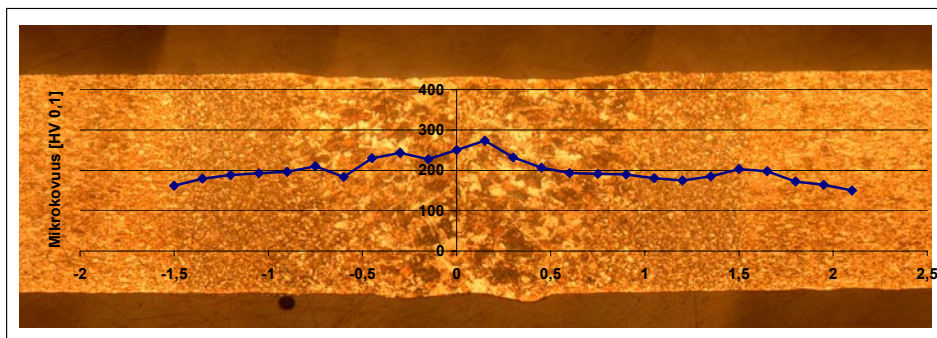


Kuva 12. Hitsin mikrokovuus hitsattaessa 1 kW kuitulaserilla kylmävalssattua muovattavaa terästä Racold 01F.

Kuvissa 13 ja 14 on esimerkkejä kuitulaserilla hitsattujen hitsien kovuusprofileista. Käytettäessä suurta hitsausnopeutta kovuusprofiili on jyrkkä ja kapea. Pienen lämmön-
tuonnin johdosta hitsin lämpövyöhyke rajoittuu kapealle alueelle. Alhaisen hitsausno-
peuden käyttö tekee kovuusprofiilista loivan ja suhteellisen leveän. Lämpövaikutusvyö-
hyke voi tällöin olla useita millimetrejä leveä.



Kuva 13. Hitsien kovuusprofiilit hitsattaessa 1 kW kuitulaserilla 1 mm paksuista kylmävalssattua muo-
vattavaa terästä Racold 01F hitsausnopeudella 4 m/min.

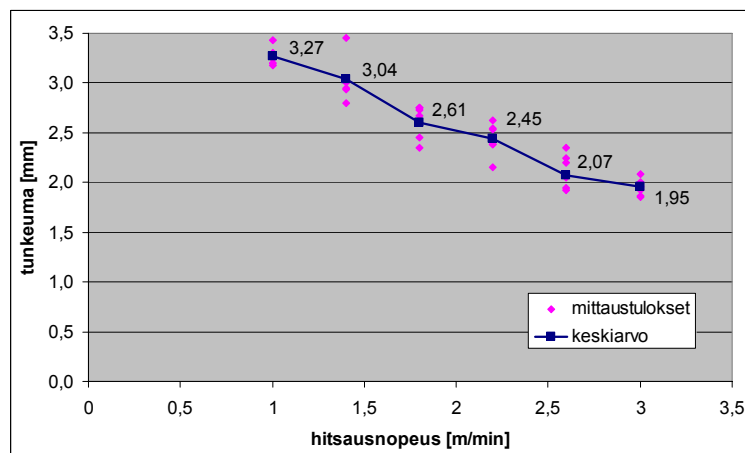


Kuva 14. Hitsin kovuusprofiili hitsattaessa 1 kW kuitulaserilla 1 mm paksuista kylmävalssattua muo-
vattavaa terästä Racold 01F hitsausnopeudella 1 m/min.

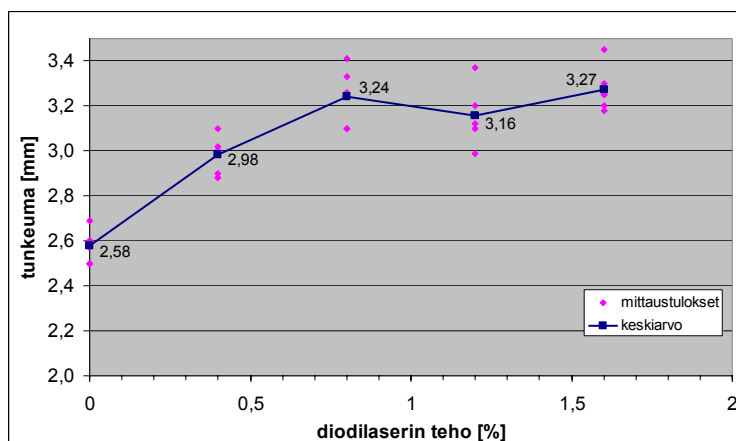
4.4.2 Hybridilaserkokeet

4.4.2.1 Tunkeumasyyvyys

Kuvassa 15 on esitetty hybridilaserin tunkeumasyyvyys hitsausnopeuden funktiona ja kuvassa 16 tunkeumasyyvyys diodilaserin tehon funktiona. Vaikka hybridilaserin kokonaisteho on huomattavasti suurempi kuitulaserin tehoon verrattuna, on tunkeumasyyvyys nopeudella 1 m/min kuitenkin noin 10 % pienempi (hybridilaserilla 3,27 mm ja kuitulaserilla 3,6 mm). Tämä johtuu hybridilaserin alhaisemmasta säteenlaadusta sekä siitä, että diodilaserin tehotehiys riittää vain sulattavaan hitsausprosessiin. Kuvasta 9 ja 16 havaitaan, että ilman diodilaseria tunkeumasyyvyys on vain noin 70 % kuitulaserin tunkeumasyyvydestä vastaavilla hitsausarvoilla (2,58 mm/3,6 mm). Tunkeumasyyvyys kasvaa diodilaserin tehon kasvaessa aina tehoarvoon noin 800 wattia asti, jonka jälkeen se pysyy lähes vakiona. Tulos on tulkittavissa siten, että diodilaserin teho kuumentaa tai sulattaa hitsattavan materiaalin pintaa parantaen näin kuitulaserin säteen absorptiota. Diodilaserin tehon ollessa 800 wattia pinta on jo täysin sulanut ja lisäteho ei tuo enää juurikaan hyötyä tunkeumaan.



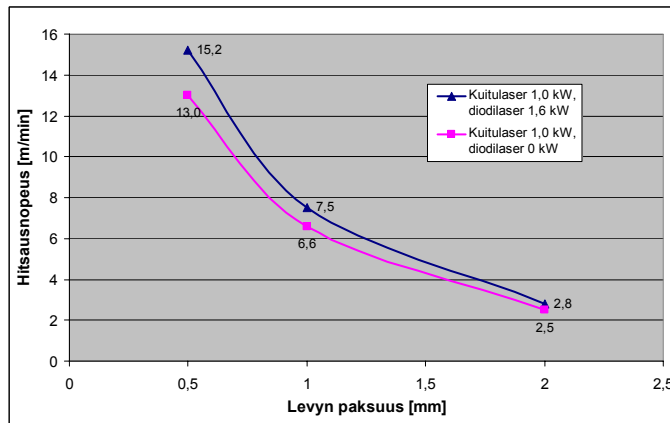
Kuva 15. Tunkeumasyyvyys hybridihitsauksessa, kun kuitulaserteho on 1,0 kW, diodilaserteho on 1,6 kW ja koemateriaalina on rakenneteräs S235.



Kuva 16. Tunkeumasyyvyys hybridihitsauksessa diodilaserin eri tehoarvoilla, kun kuitulaserin teho on 1,0 kW, hitsausnopeus 1,0 m/min ja materiaalina rakenneteräs S235

4.4.2.2 Hitsausnopeus

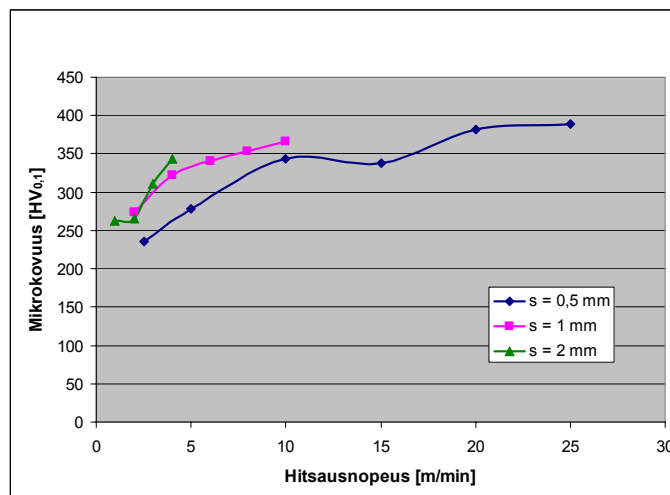
Kuvassa 17 on esitetty hybridilaserhitsauksen läpihitsautuvuusnopeudet. Diodilaserin hitsausnopeutta suurentava vaikutus on noin 15 %. Kuitulaserhitsauksen tuloksiin verrattuna hitsausnopeudet alenevat noin 50 %.



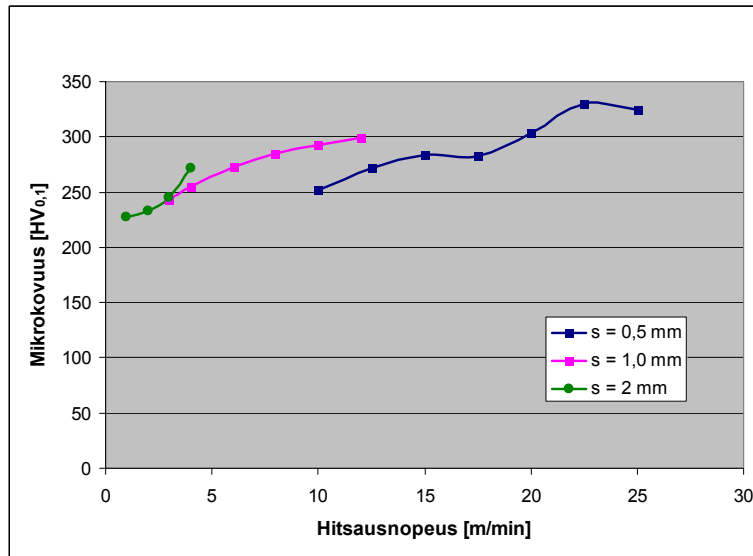
Kuva 17. Maksimi läpihitsautuvuusnopeus hitsattaessa hybridilaserilla kylmävalssattua muovattavaa terästä Racold 01F.

4.4.2.3 Hitsin kovuus

Hitsien mikrokovuudet hybridilaitteistolla on esitetty seuraavissa kuvissa siten, että kuva 18 esittää kovuuksia diodilaserin ollessa pois käytöstä, kun taas kuvassa 19 ovat molemmat laserit olleet täydellä teholla käytössä. Kokeiden suurimmilla hitsausnopeuksilla tunkeumasyyvyys ei riittänyt läpihitsautuvuuteen. Hybridihitsauksessa pätee sama jo kuitulaserhitsauksessa esiintynyt asia, että kovuus kasvaa sekä hitsausnopeuden kasvaessa että levynpaksuuden suuretessa. Huomioitavaa on myös se, että hitseissä syntyvät suurimmat kovuudet jäävät sitä alhaisemmiksi, mitä huonompilaatuisempaa sädettä hitsauksessa käytetään. Kuitulaserhitsauksessa levynpaksuudelle 0,5 mm suurin kovuus oli noin 420 HV_{0,1}. Hybridihitsaus pelkällä kuitulaserilla antoi suurimmaksi kovuudeksi noin 390 HV_{0,1} ja hybridihitsaus molemmilla lasereilla antoi suurimmaksi kovuudeksi noin 330 HV_{0,1}, kun levynpaksuutena oli sama 0,5 mm.

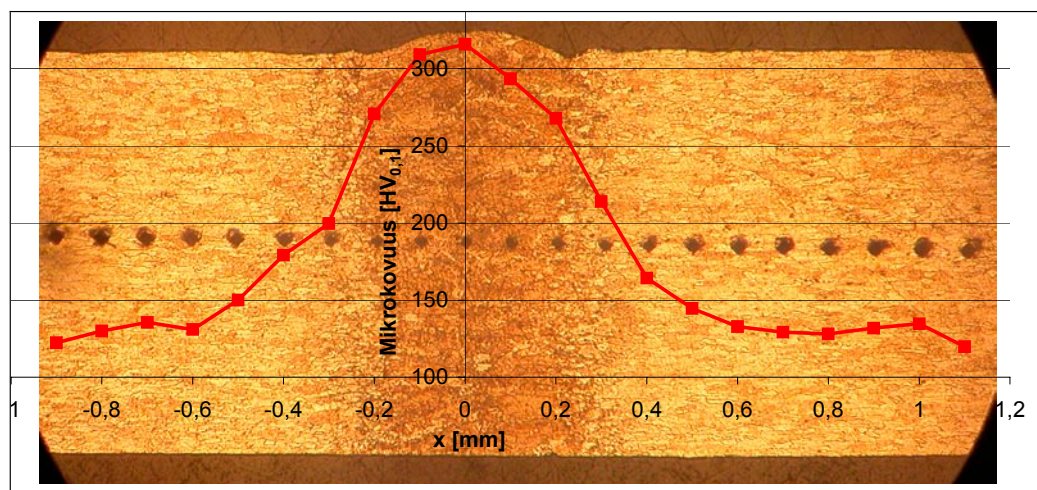


Kuva 18. Hitsin mikrokovuudet hitsattaessa kylmävalssattua muovattavaa terästä Racold 01F hybridilaserlaitteistolla kuitulaserin teholla 1 kW ja diodilaserin teholla 0 kW.

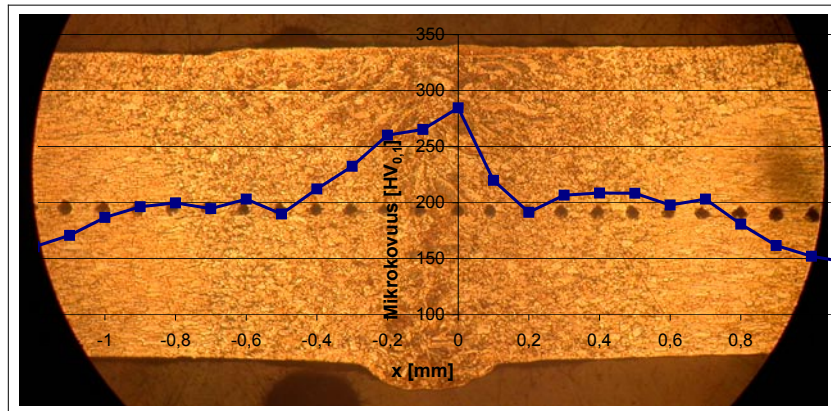


Kuva 19. Hitsin mikrokovuudet hitsattaessa kylmävalssattua muovattavaa terästä Racold 01F hybridilaserlaitteistolla kuitulaserin teholla 1 kW ja diodilaserin teholla 1,6 kW.

Kuvissa 20 ja 21 on esimerkkejä hybridilaserilla hitsattujen hitsien kovuusprofileista. Hitsattaessa ilman diodilaseria kovuusprofiili on jyrkkä ja kapea. Pienen lämmöntuonin johdosta hitsin lämpövyöhyke rajoittuu kapealle alueelle. Diodilaserin käyttö tekee kovuusprofiilista loivan ja suhteellisen leveän. Lämpövaikutusvyöhyke voi tällöin olla useita millimetrejä leveä.



Kuva 20. Hitsin kovuusprofiili hitsattaessa kylmävalssattua muovattavaa terästä Racold 01F hybridilaserlaitteistolla kuitulaserin teholla 1 kW ja diodilaserin teholla 0 kW. Hitsausnopeus 6 m/min ja levyn paksuus 1 mm. Kuvassa tummat pisteet ovat kovuusmittausjälkiä.

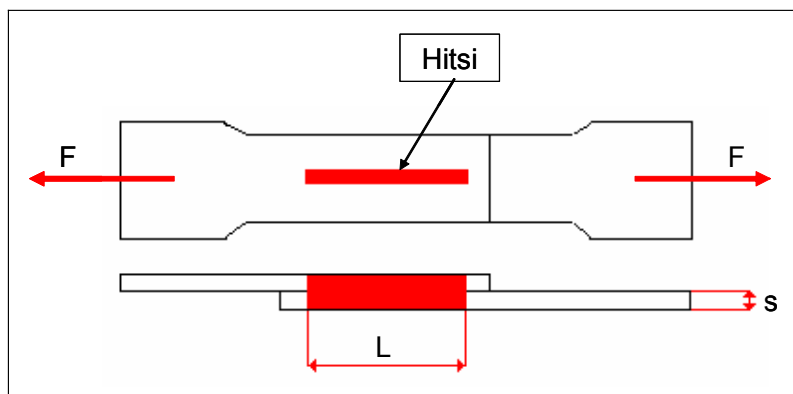


Kuva 21. Hitsin kovuusprofiili hitsattaessa kylmävalssattua muovattavaa terästä Racold 01F hybridilaserlaitteistolla kuitulaserin teholla 1 kW ja diodilaserin teholla 1,6 kW. Hitsausnopeus 6 m/min ja levyn paksuus 1 mm. Kuvassa tummat pisteet ovat kovuusmittausjälkiä.

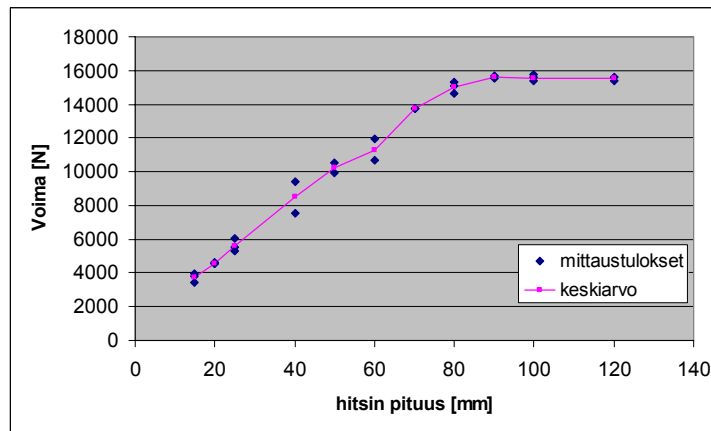
4.4.2.4 Hitsin muokkautumiskyky

Hitsin muokkautumiskykyä tutkittiin tekemällä vetokokeita hybridilaserilla päällekkäishitsatuille koekappaleille siten, että hitsiä kuormitettiin pituussuuntaisesti (kuva 22). Kuvassa 23 on esitetty päällekkäishitsin murtumiseen tarvittava voima hitsin pituuden funktiona. Voima kasvaa lineaarisesti hitsin pituuteen noin 90 mm asti, jonka jälkeen se pysyy lähes muuttumattomana. Koeparametreilla hitsattaessa hitsin suurin kantava pituus on siten noin 90 mm. Suuremmilla pituuksilla hitsin muokkautumiskyky ei ole enää riittävä, vaan hitsi lähtee repeämään toisesta päästään ennen kuin kuormitus on jakautunut koko hitsin pituudelle. Kuvan 24 voima-pituuden muutos -piirroksista nähdään, miten maksimijännitys kestää pidemmän ajan ylipitkällä hitsillä.

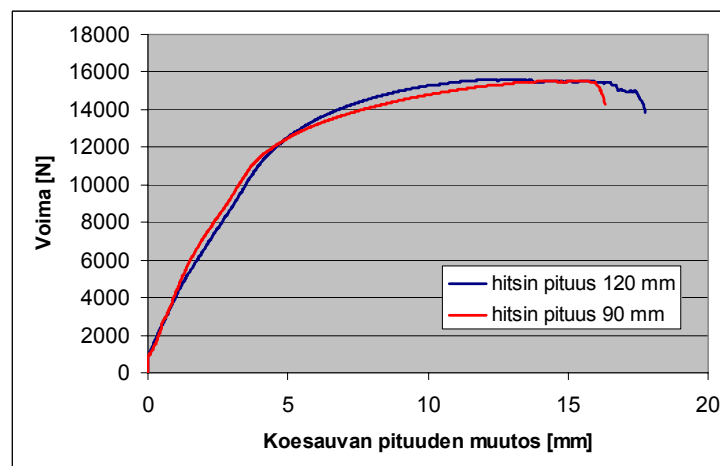
Lähteen [1] mukaan laskelmissa voidaan perinteisin hitsausmenetelmin tehdyn pienahitsin tehollisena pituutena käyttää korkeintaan arvoa $100 \cdot \text{hitsin } a\text{-mitta}$. Kokeissa päällekkäishitsin leveys 1 mm paksuisten hitsattujen levyjen välissä oli noin 0,4 mm, jolloin hybridihitsauksen kantavaksi pituudeksi saadaan $225 \cdot \text{hitsin } a\text{-mitta}$. Hybridihitsaukseen voidaan siten kokeiden mukaan soveltaa edellä mainittua tehollisen pituuden ylärajaa.



Kuva 22. Periaatekuva hitsin pituussuuntaisen vetokokeen koekappaleesta. L on hitsin pituus, s on levyn paksuus ja F on vetokoevoima.



Kuva 23. Päälekkäisliitoksen murtovoima hitsin pituuden funktiona kuormituksen ollessa hitsin pituus-suuntainen. Materiaalina oli kylmävalssattu muovattava teräs Racold 01F, levynpaksuus 1 mm ja hitsausnopeus 3 m/min.



Kuva 24. Voima-pituuden muutos -piirros päälekkäishitsatulle hitsille kuormituksen ollessa hitsin pituus-suuntainen. Materiaalina oli kylmävalssattu muovattava teräs Racold 01F, levynpaksuus 1 mm ja hitsausnopeus 3 m/min.

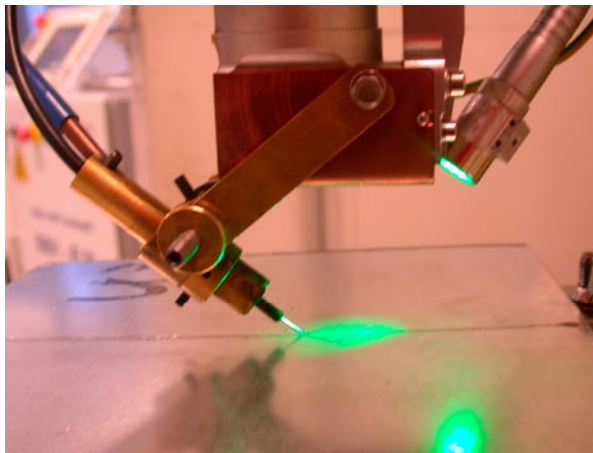
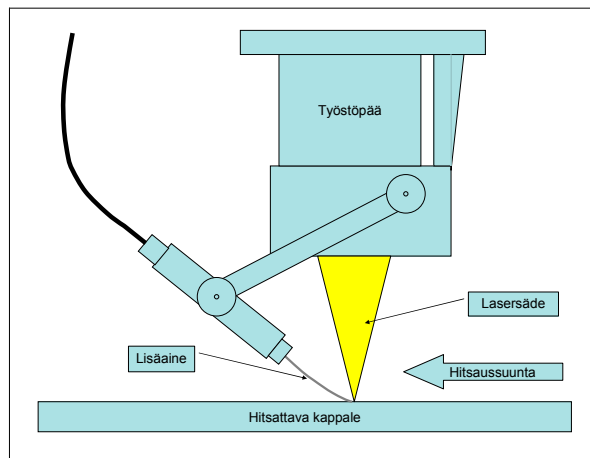
4.4.2.5 Lisäainehitsaus

Lisäainehitsauskokeissa etsittiin ensin käyttökelpoiset hitsausparametrit. Aluksi testattiin kahta erisuuruista lisäainelankaa, \varnothing 0,6 mm ja \varnothing 1,0 mm. Ohuempi lanka toimi paremmin ja varmemmin kokeissa käytetyillä levynpaksuuksilla ja lasertehoilla. Varsinaisissa kokeissa päädyttiin siten käyttämään halkaisijaltaan 0,6 mm:n lisäainelankaa. Railon leveys asetettiin laittamalla tietynpaksuiset metallipalat levyjen väliin. Kokeissa käytettiin railon laskennallista täyttöastetta 150 %. Levyleikkurilla leikattujen reunojen epäsuoruudesta johtuen todellinen täyttöaste oli kuitenkin huomattavasti pienempi (kuva 25).



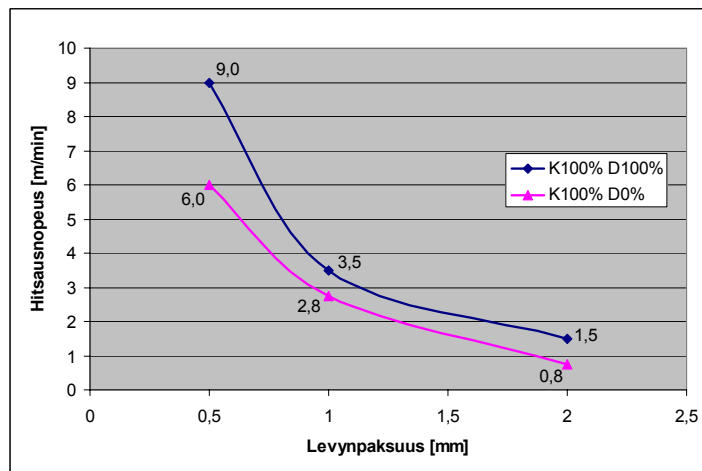
Kuva 25. Railon tyypillinen muoto, kun levyt olivat levyleikkurilla leikattuja

Hybridin käyttö osoittautui lähes välttämättömäksi lisäainehitsauksessa. Hitsattaessa ilman diodilaseria langan syötön ja säteen paikoituksen tuli olla erittäin tarkka onnistuneen hitsauksen aikaansaamiseksi. Käytetyllä koelaitteistolla tämä onnistui vain satunnaisesti. Suurihalkaisijaisen diodilasersäteen ansiosta lisäaineellisen hybridihitsauksen paikoitustarkkuusvaatimukset eivät olleet aivan yhtä tiukat kuin lisäaineellisessa hitsauksessa pelkällä kuitulaserlaitteistolla. Kuitenkin hybridilaserillakin hyvän hitsaustuloksen aikaansaamiseksi poikkeaman tuli olla pienempi kuin 0,2 mm. Kaikille koemateriaalin paksuuksille ilmaraon leveys 0,2 mm osoittautui hyväksi arvoksi. Suuremmilla levynpaksuuksilla oli mahdollista käyttää myös suurempaa ilmarakoa aina noin 0,4 mm asti. Lisäainelangan optimaalinen syöttösuunta oli säteen etupuolelta. Langansyöttö onnistui parhaiten siten, että se törmäsi noin 2 mm ennen säteen keskipistettä raiioon. Näin railo ohjasi lankaa juuri oikeaan paikkaan railon keskelle ja langansyöttö oli vakaa. Langansyöttökulma oli noin 30 astetta hitsattavaan levyyn nähden. Kuvassa 26 on periaatekuva ja valokuva langansyötöstä.



Kuva 26. Langansyöttö, yläkuvassa graafinen esitys ja alakuvassa valokuva

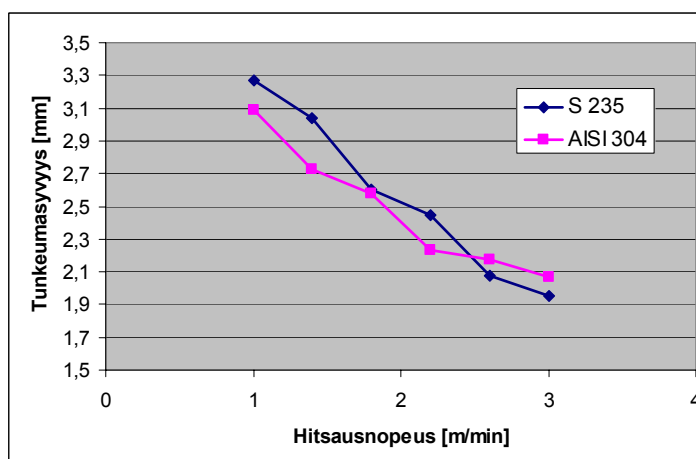
Lisäainehitsauksen läpihitsautuvuusnopeudet on esitetty kuvassa 27. Nopeudet olivat noin 50 % pienemmät kuin hybridihitsausnopeudet ilman lisäainetta. Looginen selitys tälle on, että lisäainehitsauksessa oli enemmän sulatettavaa materiaalia. Diodilaserin vaikutus hitsausnopeuteen oli huomattavasti suurempi lisäainehitsauksessa kuin hitsauksessa ilman lisäainetta. Lisäaineellisessa hitsauksessa diodilaserin hitsausnopeutta suurentava vaikutus oli noin 50 %, kun se oli vain noin 15 % lisäaineettomassa hitsauksessa. Diodilaserin teho voitiin käyttää paremmin hyödyksi leveämmässä hitsissä ja lisäainelangan sulatuksessa.



Kuva 27. Maksimi läpihitsautuvuusnopeus lisäaineellisessä hybridihitsauksessa lisäainelangan paksuudella 0,6 mm ja ilma-araolla 0,2 mm. Materiaalina on kylmävalssattu muovattava teräs Racold 01F.

4.2.3 Hybridilaserkokeet ruostumattomalle teräkselle AISI 304

Kuvassa 28 on vertailtu AISI 304:n tunkeumasyvyyksiä rakenneteräksen S235 vastaaviin arvoihin. Kaikki tunkeumasyvyydet olivat hyvin lähellä toisiaan, suurin ero oli noin 10 %. Tulokset viittaavat kuitenkin siihen, että hitsausnopeuden suuretsa AISI 304:n tunkeuma paranee rakenneteräksen S235 verrattuna.



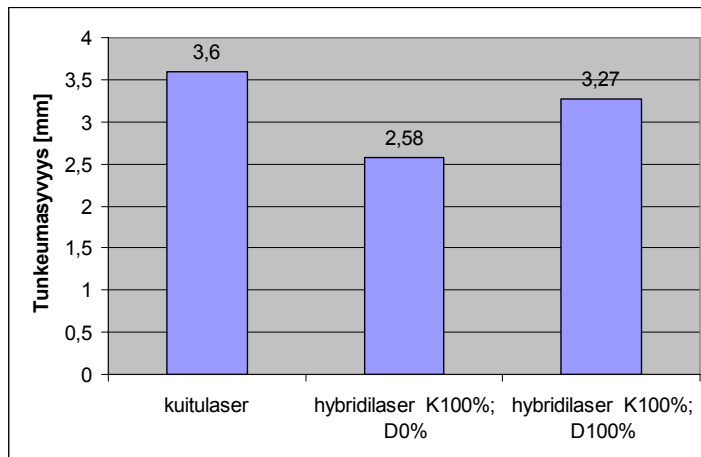
Kuva 28. AISI 304:n tunkeumasvyvyys verrattuna rakenneteräksen S235 tunkeumasvyvyteen hybridilaserilla (K100%, D100%) hitsattaessa

Ruostumattomalle teräkselle tehtiin myös hitsausnopeuden vertailukokeita suhteessa teräksen Racold 01F. Maksimi hitsausnopeudet olivat ruostumattomalle teräkselle noin 10 % suuremmat kuin teräkselle Racold 01F. Pääsääntönä voidaan kuitenkin pitää, että ruostumattomalle teräkselle voidaan käyttää samoja hitsausnopeuksia kuin mustalle teräkselle.

5 Koetulosten tarkastelu

Tunkeumasyyvyys

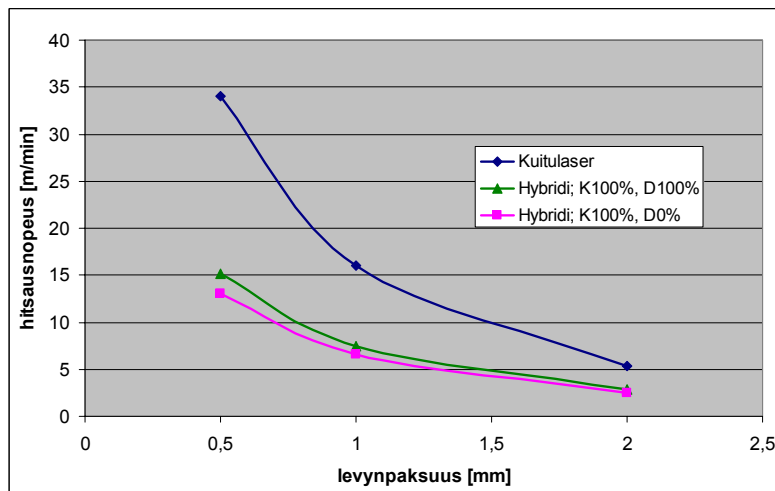
Hitsauskokeiden tunkeumasyyvyys oli kuvan 29 mukaisesti kuitulaserilla 3,6 mm ja hybridillä hieman alempi, kun nopeutena oli 1 m/min. Käytännön hitsausnopeuksilla koelaitteiston kaltainen laserjärjestelmä sopii ainoastaan ohutlevyille, joiden paksuus on korkeintaan 3 mm. Pällekkäin liitettävien levyjen paksuus tulisi olla korkeintaan 2 mm. Paksummille materiaaleille pitää käyttää suurempitehoista laseria, parempaa säteenlaatua tai pienempää hitsausnopeutta. Hitsausnopeuden liiallinen pienentäminen aiheuttaa kuitenkin epävakaan ja herkästi luhistuvan avaimenreiän, jolloin syvätunkeumahitsaus ei enää onnistu. Syvätunkeumahitsauksessa nopeuden alarajana pidetään yleisesti noin 0,5 m/min.



Kuva 29. Tunkeumasyyvyys hitsausnopeudella 1 m/min rakenneteräkseen S235.

Hitsausnopeus

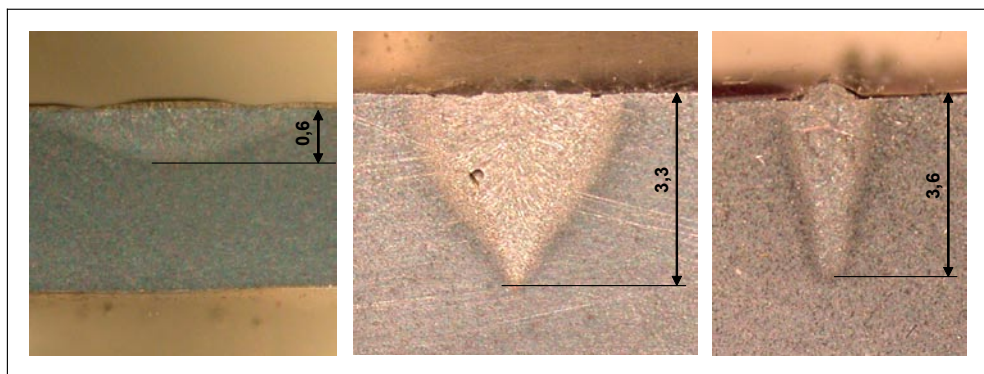
Kuitulaserin suurin tehotiheys fokuksessa on noin 7-kertainen hybridilaseriin verrattuna ($12,9/1,9 \text{ MW/cm}^2$). Kuitulaserin hitsausnopeus on levynpaksuudella 0,5 mm noin 2,6-kertainen ja levynpaksuudella 2 mm noin kaksinkertainen hybridilaseriin (K100%, D0%) verrattuna (kuva 30). Kuitulaserin tunkeumasyyvyys on enää vain noin 1,4-kertainen hybridilaseriin (K100%, D0%) verrattuna. Säteen laadun merkitys siis pienenee, kun levynpaksuus kasvaa ja hitsausnopeus pienenee.



Kuva 30. Hitsausnopeudet kuitulaserilla ja hybridilaserilla

Hitsin muoto

Hybridilaserilla hitsatun hitsin muoto on diodilaserilla ja kuitulaserilla hitsattujen hitsien välimuoto (kuva 31). Muoto on suhteellisen leveä verrattuna kuitulaserin muotoon tunkeuman säilyessä kuitenkin kohtuullisena. Hitsin tunkeuman ja yläpinnan leveyden suhde on suuruusluokaltaan 0,2 diodilaserilla, 1,0 hybridilaserilla ja 2,5 kuitulaserilla.



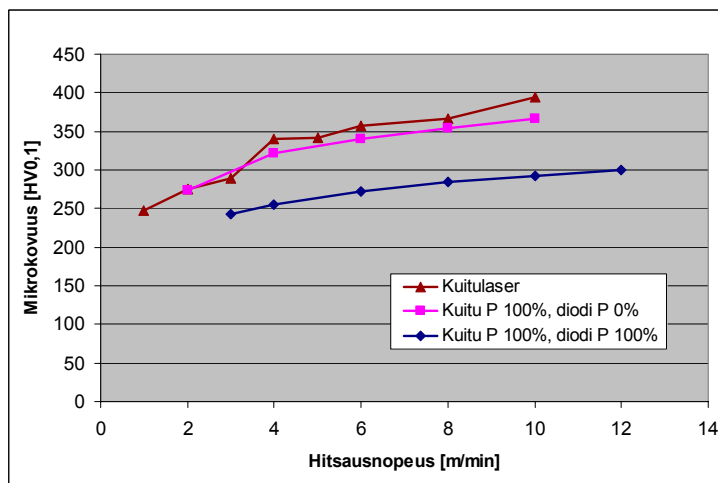
Kuva 31. Esimerkkejä eri laserhitsien muodoista. Vasemmalla diodilaserilla hitsattu, keskellä hybridilaitteistolla ja oikealla kuitulaserilla hitsatun hitsin poikkileikkaus. Annetut mitat millimetrejä.

Kovuus

Hitsin kovuus kasvaa lähinnä martensiittisen mikrorakenteen syntymisestä. Koemateriaalin hiilipitoisuudella noin 0,1 % martensiittisen rakenteen syntymiseen vaadittava jäähtymisnopeus on niin suuri, että siihen ei perinteisillä karkaisumenetelmillä yleensä

päästä. Laserhitsauksen pieni ja paikallinen lämmöntuonti aiheuttaa kuitenkin jäähtymisnopeuden kasvamisen suureksi lämmön siirtyessä nopeasti hitsin ympärillä olevaan kylmään materiaaliin. Näin jopa martensiittisen rakenteen syntyminen on mahdollista.

Hitsin kovuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat käytetyn lasersäteen ominaisuudet (teho ja polttopisteen koko), hitsausnopeus ja ainepaksuus. Näistä lasersäteen ominaisuudet ja hitsausnopeus vaikuttavat pituusyksikköä kohti tuotuun lämpömäärään, jolla on välillinen vaikutus jäähtymisnopeuteen. Mitä pienempi lämpömäärä kappaleeseen tuodaan, sitä nopeammin hitsi jäähtyy. Toisin sanoen pienempi laserteho, pienempi polttopisteen koko ja suurempi hitsausnopeus lisäävät jäähtymisnopeutta ja suurentavat siten syntyvän hitsin kovuutta (kuva 32). Hitsattavan materiaalin paksuus vaikuttaa suoraan jäähtymisnopeuteen. Mitä suurempi on paksuus, sitä nopeampaa on jäähtyminen ja hitsistä tulee kovempi.



Kuva 32. Kovuuksien vertailu eri lasereilla ja hitsausnopeuksilla levyn paksuudella 1 mm. Laserit on luetteloitu polttopisteen koon mukaan pienimmästä suurimpaan.

Lisäainehitsaus

Hybridihitsauksen edut tulevat parhaiten esille lisäainehitsauksessa. Lisäaineen sulatus tapahtuu suuren säteen halkaisijan omaavan laserin avulla, jolloin langansyötössä sallitaan pienet epätarkkuudet. Myöskään säteen paikoitus railoon nähden ei ole niin tarkka kuin pelkällä kuitulaserilla hitsattaessa. Alhaisilla nopeuksilla nivelvarsirobotin liiketarkkuudet riittävät hyvin lisäaineelliseen hybridilaserhitsaukseen. Lisäksi lisäainehitsaus sallii väljemmät railon tarkkuusvaatimukset, jolloin railonvalmistelu voidaan tehdä levyleikkurilla. Lisäaine täyttää muuten vajaaksi jäävän hitsin. Lisäainehitsauksessa tarvittava suurempi lämpömäärä hillitsee myös hyvin hitsin kovuuden kasvua.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää diodilaserista ja kuitulaserista koostuvan hybridilaitteiston käyttömahdollisuuksia hitsauksessa. Tutkimuskohteina olivat tunkeumasyyvyys, hitsausnopeus ja hitsin kovuus. Lisäksi tehtiin lisäaineellisia hitsauskokeita. Työn perusteella voidaan tehdä seuraavat hybridilaserhitsaukseen liittyvät johtopäätökset:

- Hybridilaserhitsauksessa diodilaserin tehon lisääminen suurentaa tunkeumasyyvyttä, mutta vain tiettyyn tehoarvoon asti. Koelaitteistolla diodilaserin tehoon noin 800 wattia asti tunkeumasyyvyys kasvoi, jonka jälkeen se pysyi vakiona
- Diodilaserin hitsausnopeutta suurentava vaikutus hybridihitsauksessa on marginaalinen, kun hitsataan ilman lisäainetta. Lisäaineellisessa hitsauksessa sen sijaan vaikutus on merkittävä, noin 50 %
- Hybridihitsaus alentaa hitsin kovuutta verrattuna samalla nopeudella tapahtuvaan kuitulaserilla hitsaukseen. Hybridilaserilla voidaan hitsata noin kolme kertaa nopeammin kuin pelkällä kuitulaserilla hitsin kovuuden pysyessä samana
- Lisäaineellinen syvätunkeumahitsaus on mahdollista hybridilaserilla ja menetelmä sallii pienet paikoitusvirheet niin säteelle kuin lisäaineen syötöllekin. Käytännössä lisäaineellinen hybridihitsaus voidaan hyvin toteuttaa nivelvarsirobotilla ja yksinkertaisella langansyöttölaitteistolla.
- Tunkeuma ja maksimi hitsausnopeus ovat ruostumattomalle teräkselle lähes samoja kuin kylmävalssatulle muovattavalle teräkselle Racold 01F
- Hybridilaserhitsin muodonmuutoskyky on hyvä ja hitsin kantava pituus ylittää perinteisillä menetelmillä tehdyn hitsin laskelmissa käytetyn suurimman tehollisen pituuden 100*a-mitta

7 Yhteenveto

Laserlaitteistolla muodostetaan sähkömagneettista säteilyä eli valoa, jolla on yksi aallonpituus ja joka on yhdensuuntaista ja samanvaiheista. Näiden ominaisuuksien ansiosta laservalo voidaan fokusoida hyvin pieneen pisteeseen ja saavutetaan suuri tehotiheys. Tyypillisten metallin työstöön käytettävien lasereiden teho on 1 kilowatista ylöspäin ja polttopisteen halkaisija vaihtelee laserista riippuen välillä 0,05...3,0 mm. Metalliteollisuudessa lasereita käytetään lähinnä hitsaukseen ja leikkaukseen. Muita käyttökohteita ovat erilaiset lämpökäsittelyt, pinnoitus, juottaminen ja merkkkaus. Yleisimmät lasertyypit metalliteollisuudessa ovat hiilidioksidi- ja Nd:YAG-laser sekä viime vuosina markkinoille tulleet diodi-, kiekko- ja kuitulaser.

Laserhitsausta voidaan tehdä joko sulattavana hitsauksena tai syvätunkeumahitsauksena. Syvätunkeumahitsauksessa syntyy absorptiota suurentava avaimenreikä ja hitsistä muodostuu kapea ja syvä. Syvätunkeumahitsauksen tehotiheyden raja-arvona pidetään arvoa 10^6 W/cm². Alemmilla tehotiheyksillä hitsaus on sulattavaa ja muistuttaa tavallista kaarihitsausta. Hybridihitsauksessa yhdistetään syvätunkeumahitsaus- ja sulattava hitsausmenetelmä. Yleisin hybridilaitteisto on laserin ja kaarihitsauksen yhdistelmä, mutta se voi koostua myös kahdesta erilaisesta laserista.

Tutkimuksen kokeellisessa osassa tehtiin ensin hitsauskokeita pelkällä kuitulaserilla, jonka teho oli 1 kW, säteen halkaisija oli 0,1 mm ja suurin tehotiheys oli 12,7 MW/cm². Tämän jälkeen tehtiin kokeita kuitulaserin ja diodilaserin muodostamalla hybridilaitteistolla, jonka nimellisteho oli 1 kW + 2 kW, säteen halkaisija oli 0,23 mm/2,9 mm ja suurin tehotiheys oli 1,9 MW/cm². Koemateriaaleina olivat sekä niukkaseosteinen teräs että austeniittinen ruostumaton teräs ja tutkimuskohteina olivat tunkeumasyyvyys, hitsausnopeus ja hitsin kovuus. Lisäksi tutkittiin lisäaineellista hybridihitsausta.

Tunkeumasyyvyys oli pelkällä kuitulaserilla hitsattaessa 3,6 mm, joka oli noin 10 % suurempi kuin hybridilaitteistolla hitsattaessa. Diodilaserin käyttö vaikutti tunkeumasyyvyyteen lähinnä suurentamalla kuitulaserin absorptiota. Maksimi hitsausnopeus oli kuitulaserihitsauksessa noin 16 m/min, kun levynpaksuus oli 1 mm. Hybridilaitteistolla hitsattaessa nopeus aleni noin 50 % ja diodilaserin käytön vaikutus nopeuteen oli marginaalinen. Hitsin kovuuteen vaikuttavia tekijöitä olivat lasersäteiden ominaisuudet, hitsausnopeus ja hitsattavan levyn paksuus. Kovuus suureni, kun hitsaustehoa pienennettiin, polttopisteen kokoa pienennettiin, hitsausnopeutta suurennettiin tai levyn paksuutta suurennettiin.

Lisäaineellinen laserhitsaus onnistui parhaiten hybridilaitteistolla. Pelkällä kuitulaserilla hitsattaessa paikoitustarkkuusvaatimukset sekä lasersäteelle että langansyötölle olivat korkeat ja langan sulaminen ja railon täyttö jäivät helposti epätäydellisiksi. Hybridihitsauksessa diodilaserin säde sulatti langan pienistä langansyötön epätarkkuuksista huolimatta ja myös lasersäteiden paikoitustarkkuusvaatimus väljeni. Sopiva ilmarako oli 0,2 mm levynpaksuuksille 0,5 mm-2,0 mm ja railonvalmistus voitiin tehdä levyleikkurilla.

8 Lähdeluettelo

- /1/ Airila, M.; Ekman, K.; Hautala, P.; Kivioja, S.; Kleimola, M.; Martikka, H.; Miettinen, J.; Niemi, E.; Ranta, A.; Rinkinen, J.; Salonen, P.; Verho, A.; Vilenius, M.; Välimaa, V.: Koneenosien suunnittelu. WSOY Porvoo 1997. 796 s.
- /2/ Arias, J.L.; Romero, P.; Vandewynckele, A.; Vazquez, J: Laser-TIG hybrid welding of very thin austenitic stainless steel sheets. ICALEO 2005 Congress Proceedings, October-November 2005, Miami, USA, s. 104-107.
- /3/ Beyer, E.: High Power Fibre Laser Applications in Germany. Presentation in Ailu Workshop Fibre lasers, 8 march 2006.
- /4/ Hirogaki, T.; Nakagawa, H.; Hayamizu, M.; Kita, Y.; Kakino, Y.: In-situ heat treatment system for die steels using YAG laser with a machining center. Journal of the International Societies fo Precision Engineering and Nanotechnology 25 (2001). s. 212-217
- /5/ Ion, J.: Laser processing of engineering materials. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK 2005. 556 s.
- /6/ IPGPhotonics: Low-order-mode kilowatt fiber lasers operating at 1.07 microns. WWW-dokumentti. http://www.ipgphotonics.com/apps_materials_multi.htm. Luettu 10.12.2007
- /7/ Jokinen, T.: Novel ways of using Nd:YAG laser for welding thick section austenitic stainless steel. VTT publications 522, Espoo 2004. 120 s.
- /8/ Kujanpää, V.; Salminen, A.; Vihinen, J.: Lasertyöstö. Teknologiateollisuus ry, Tampere 2005. 373 s.
- /9/ Messler, R.W.: What's next for Hybrid Welding?. Welding Journal, March 2004, s. 30-34.
- /10/ Migliore, L.: Welding with lasers. Industrial laser review, july 1998. 5 s.
- /11/ Ready, J.: Lia handbook of laser materials processing. Laser institute of America, Orlando, USA 2001. 715 s.
- /12/ Reutzler, E.W.; Kern, L.A.; Tressler, J.F.: Continued experimental analysis of practical aspects of hybrid welding of thick sections. ICALEO 2006 Congress Proceedings, October-November 2006, Scottsdale, USA, s. 979-987.
- /13/ Steen, W.: Laser Material Processing. Springer-Verlag, London, UK 1991. 266 s.

- /14/ Thomy, C.; Seefeld, T.; Vollertsen, F.: Application of high-power fibre lasers in laser and laser-MIG welding of steel and aluminium. *Welding in the World*, v 49, n 9 SPEC. ISS., July, 2005. s. 88-98
- /15/ Trautman, A.; Roeren, M.; Zaeh, M.F.: Welding of Extruded Aluminium Profiles by a Hybrid Bifocal Laser System. *Proceedings of the 4th Lane Conference*, September 2004, Erlangen, Germany, s. 169-180.
- /16/ Trautman, M.; Zaeh, M.F.: Laser Bifocal Hybrid Welding of Aluminium. *Advanced Materials Research*, Vol 10 (2006), Trans Tech Publications, Switzerland. s.65-78.
- /17/ Verhaeghe, G.; Hilton, P.: The effect of spot size and laser beam quality on welding performance when using high-power continuous wave solid-state lasers. *ICALEO 2005 Congress Proceedings*, October-November 2005, Miami, USA, s. 264-271.
- /18/ Vollertsen, F; Thomy, C.: Welding with fiber lasers from 200 to 17000 W. *ICALEO 2005 Congress Proceedings*, October-November 2005, Miami, USA, s. 254-263.
- /19/ Väisänen, T.: Laser-laser-hybrid welding of cold rolled formable steel sheets. 11th NOLAMP conference in laser processing of materials, Lappeenranta, Finland, august 20-22 2007, *Acta Universitatis Lappeenrantaensis* 273. s 57-65.