

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

POLTTOPISTEEN ASEMAN VAIKUTUS TERÄKSEN
KUITULASERHITSAUKSESSA

THE EFFECT OF FOCAL POINT POSITION IN FIBER LASER WELDING OF STEEL

Lappeenrannassa 9.4.2014

Antero Koukku 0241677

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO.....	4
1 JOHDANTO.....	5
2 MENETELMÄT	6
3 LASERHITSAUS.....	7
3.1 Perusperiaate	7
4 TERÄKSEN HITSAUKSESSA KÄYTETTÄVÄT LASERTYYPIT	10
4.1 CO ₂ -laser.....	10
4.2 Diodilaser.....	11
4.3 Kuitulaser.....	13
4.4 Kiekkolaser	14
5 TÄRKEIMMÄT LASERHITSAUSPARAMETRIT	15
5.1 Laserparametrit	15
5.2 Prosessiparametrit	15
5.2.1 Laserteho.....	16
5.2.2 Hitsausnopeus	16
5.2.3 Käytettävä optiikka	16
5.2.4 Polttopisteen asema.....	18
6 POLTTOPISTEEN ASEMAN VAIKUTUS TERÄKSEN KUITULASERHITSAUKSESSA	19
6.1 Polttopisteen aseman vaikutus tehotiheyteen	19
6.2 Polttopisteen aseman vaikutus avaimenreiän geometriaan.....	21
6.3 Polttopisteen aseman vaikutus roiskeiden syntyyn.....	27
6.3.1 Roiskeiden syntymekanismi vajaa- ja läpitunkeumahitsauksessa	28
6.3.2 Roiskeisiin vaikuttaminen polttopisteen asemaa muuttamalla	33

6.3.3	Polttopiste hitsattavan kappaleen pinnalla ($z = 0$ mm).....	35
6.3.4	Polttopiste hitsattavan kappaleen pinnan yläpuolella ($z > 0$ mm)	35
6.3.5	Polttopiste hitsattavan kappaleen pinnan alapuolella ($z < 0$ mm)	36
6.3.6	Pohdintaa	36
7	HITSAUSKOKEET	37
7.1	Koejärjestelyt.....	37
7.1.1	Hitsauskoejärjestelyt.....	37
7.1.2	Hitsien jatkojalostus tutkimusta varten.....	40
8	TULOKSET	41
8.1	Hitsauskoesarja 8 mm rakenneteräkselle	41
8.2	Hitsauskoesarja 10 mm rakenneteräkselle	44
8.3	Hitsauskoesarja 12 mm rakenneteräkselle	48
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	52
9.1	Hitsin geometria ja HAZ pinta-ala.....	52
9.2	Roiskeet	53
9.3	Tunkeuma	54
9.4	Pohdintaa	54
	LÄHTEET	56
	LIITTEET	61

LYHENNE- JA SYMBOLILUETTELO

BPP	Säteen parametritulo [mm*mrad]
D	Raakasäteen halkaisija [mm]
d_{foc}	Fokusoidunsäteen halkaisija [mm]
f	Polttoväli [mm]
fpp	Polttopisteen asema [mm]
I_z	Tehotiheys [W/cm^2]
P	Laserteho [kW]
v	Hitsausnopeus [m/min]
Z_f	Polttopisteen syvyys [mm]
z	Polttopisteen etäisyys kappaleen pinnasta [mm]
z_r	Rayleigh pituus [mm]
λ	Aallonpituus [μm]
ω_0	Polttopisteen säde polttopisteessä [mm]
ω_z	Polttopisteen säde kappaleen pinnalla [mm]

1 JOHDANTO

Parametrien hallinta näyttelee suurta roolia laserhitsauksessa ja laadukkaiden hitsien aikaan saamiseksi on parametrien yhteisvaikutukset tunnettava ja hallittava (Trumpf-laser, 2013a). Yhteisvaikutusten ymmärtämiseksi on tärkeää ensin tuntea yksittäisten parametrien vaikutukset, jonka jälkeen yksittäisten parametrien rooli on helpompi ymmärtää (Steen & Mazumder, 2010, s.209–218). Tässä työssä tarkastellaan polttopisteen aseman vaikutuksia teräksen kuitulaserhitsauksessa. Työssä tutustutaan aluksi yleisesti laserhitsaukseen peruseräisiin ja selvitetään kuinka kuitulaserhitsaus eroaa muista laserhitsausprosesseista. Työn alussa käydään myös läpi tärkeimpiä laserhitsausparametreja ja selvitetään niiden vaikutuksia syntyvään hitsiin.

Polttopisteen aseman vaikutuksia selvitettiin kirjallisuuteen pohjautuen, sekä hitsauskokeiden perusteella. Työ rajattiin käsittelemään ainoastaan avaimenreikähitsausta ja painopiste kirjallisuuskatsauksessa oli hitsin geometriassa, hitsauksessa syntyneissä roiskeissa ja saavutetussa tunkeumassa. Koska laserhitsauslaitteet ovat kehittyneet huimaa vauhtia viime vuosina, pyrittiin kirjallisuuskatsauksessa suosimaan mahdollisimman tuoreita tieteellisiä artikkeleita aiheesta. Kuitenkin joidenkin perusilmiöiden kohdalla työssä on käytetty myös hieman vanhempaa aineistoa. Tutkimuksen hitsauskokeet suoritettiin osana suurempaa hitsauskoesarjaa. Koesarjasta valittiin tähän tutkimukseen kolme hitsauskoesarjaa sopivilla parametreilla. Näistä koesarjoista polttopisteen aseman vaikutuksia arvioitiin silmämääräisesti ja makrohieiden avulla.

Polttopisteen asemalla huomattiin olevan vaikutusta työssä tutkittaviin ilmiöihin ja hitsauskokeista tehdyt havainnot tukivat kirjallisuuskatsauksessa havaittuja ilmiöitä. Polttopisteen aseman vaikutusmekanismien ymmärtäminen helpottaa kokonaisvaltaista parametrien hallintaa, sekä helpottaa yleisesti avaimenreiässä tapahtuvien ilmiöiden ymmärtämistä.

2 MENETELMÄT

Tämä työ jakautuu kirjallisuustutkimukseen pohjautuvaan teoriaosaan ja hitsauskokeisiin pohjautuvaan kokeelliseen osaan. Kirjallisuustutkimus tehtiin tukemaan hitsauskokeita, koska polttopisteen aseman vaikutusmekanismien ymmärtäminen pelkästään hitsauskokeita silmämääräisesti tarkastelemalla olisi ollut lähes mahdotonta. Kirjallisuustutkimuksessa pyrittiin suosimaan pääosin tieteellisiä julkaisuja, sekä alan kirjallisuutta. Tiedonhaku työssä suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston tietokannoista, käytössä olleista konferenssimateriaaleista, sekä muista verkkojulkaisuista.

Tämän työn hitsauskokeet suoritettiin osana suurempaa hitsauskoesarjaa, joista tähän tutkimukseen valittiin yhteensä 11 hitsiä. Hitsauskokeissa käytetyt materiaalipaksuudet olivat 8, 10 ja 12 mm. Jokaisesta materiaalipaksuudesta valittiin hitsejä, joissa ainoana muuttuvana parametrina oli polttopisteen asema. Työhön valituista hitseistä valmistettiin makrohieet Lappeenrannan teknillisen yliopiston metallurgian laboratoriossa ja ne kuvattiin makroskoopilla tarkempaa tarkastelua varten. Makroskooppikuvien analysointiin käytettiin Axiovision kuvanalysointiohjelmaa ja Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelmaa. Tarkat hitsauskoejärjestelyt ja sädeanalyysi on esitelty hitsauskokeiden yhteydessä.

3 LASERHITSAUS

Laserhitsaus on erittäin monipuolinen hitsausmenetelmä, joka soveltuu hyvin monenlaisille materiaaleille. Sen merkittävimmät edut ovat pieni lämmöntuonti ja parametrien erinomainen hallittavuus. Laserhitsauksella pystytään tuottamaan syviä hitsejä ja sitä voidaan soveltaa myös paksuille ja huonosti sulaville, sekä muuten perinteisillä menetelmillä vaikeasti hitsattaville materiaaleille. Laserhitsauksella pystytään myös joissain tapauksissa liittämään erilaisia materiaaleja toisiinsa lyhyen ja hyvin kontrolloitavan sulatusajan, sekä pienen hitsisulan ansiosta. Laserhitsausta voidaan suorittaa joko lisäaineellisena tai lisäaineettomana hitsauksena, sekä jatkuvalla tai pulssitetulla säteellä. Laserhitsaus voidaan myös yhdistää muihin perinteisempiin hitsausmenetelmiin. Mahdollisuuksia ja erilaisia sovelluksia on siis monia. (Trumpf-laser, 2013a.)

Laserhitsauksella saavutettava hitsin laatu on hyvä ja hitsauksen lämpövaikutus työkappaleeseen on pieni. Laserhitsattua kappaletta ei yleensä tarvitse jatkojalostaa ainakaan hitsauksen aiheuttamien muodonmuutosten tai muiden vastaavien vaikutusten osalta. Onnistunut laserhitsaus vaatii kuitenkin hyvää parametrien hallintaa ja hitsaus on suoritettava aina vähintään mekanisoidusti. Laserhitsausta käytetään usein esimerkiksi autoteollisuudessa, mutta se on leviämässä muihinkin sovelluksiin nopealla vauhdilla. Yksi uusista aluevaltauksista on paksujen metallilakanoiden päittäisliitokset, joissa laserhitsauksen etuna on yhdellä palolla saavutettava hitsaussyvyys. (Trumpf-laser, 2013a; Zhang et al., 2013, s.1.)

3.1 Peruseriaate

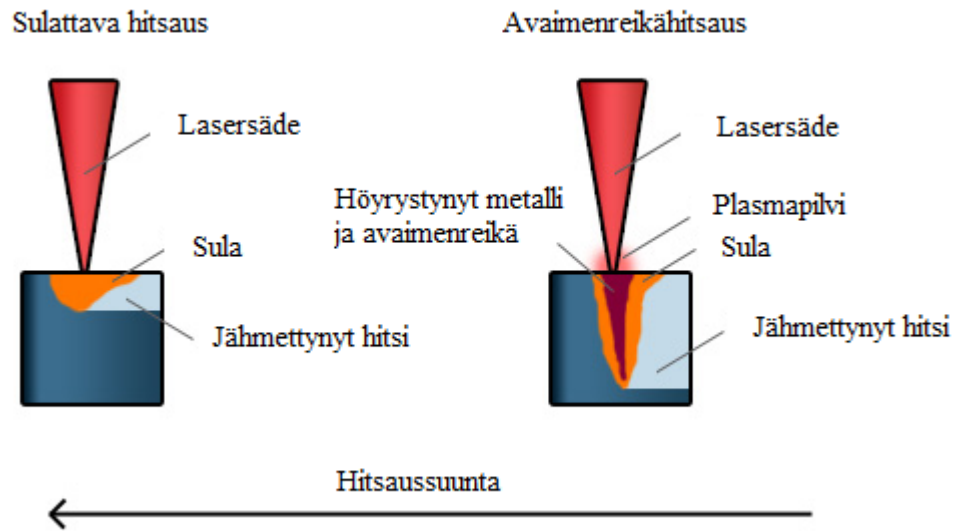
Laserhitsaus jaetaan kahteen perusprosessiin, sulattavaan hitsaukseen ja avaimenreikähitsaukseen. Sulattavassa laserhitsauksessa tarkoituksena on vain sulattaa kappaletta, muodostamatta kovin syvää hitsiä. Avaimenreikähitsauksessa muodostetaan kappaleeseen metallia höyrystämällä avaimenreikä, jolloin aikaan saadaan sulattavaa hitsausta syvempiä ja kapeampia hitsejä. (Kujanpää et al., 2005, s.44.)

Laserhitsauksessa lasersäde fokusoidaan kappaleeseen, jolloin lasersäteen fotonit iskeytyvät hitsattavan kappaleen pintaan, johon ne joko absorboituvat tai heijastuvat pois. Suurin osa metalleista heijastaa laservaloa huoneenlämmössä ja siksi suuriosa fotoneista osuessaan kappaleen pintaan heijastuu pinnasta pois. Kappaleeseen absorboituvat fotonit saavat kappaleessa aikaan paikallista lämmön nousua ja kappaleen lämpötilan noustessa, nousee myös fotoneiden absorptio kappaleeseen. Lisääntynyt absorptio aikaansaa ketjureaktion, joka johtaa lopulta lähes kaikkien kappaleeseen osuvien fotonien absorptioon, jolloin kappale lämpenee sulamislämpötilaansa ja sula muodostuu. Kappaleeseen muodostunutta sulaa aletaan liikuttaa hitsausrillon suuntaisesti liikuttamalla lasersädettä tai kappaletta. Säteen absorboitumiseen vaikuttaa hitsauksessa käytettävän lasersäteiden aallonpituus ja hitsattava materiaali. (Kujanpää et al., 2005, s.44.)

Laserenergian siirtyminen syvemmälle kappaleeseen riippuu käytettävistä hitsausparametreista. Sulattava laserhitsaus suoritetaan matalalla energiatiheydellä, jolloin hitsauksessa käytetään suurta säteen pinta-alaa kappaleen pinnalla tai hitsaus suoritetaan suurella nopeudella. Sulattavassa laserhitsauksessa käytettävä energiatiheys on tyypillisesti $10^4 - 10^6 \text{ W/cm}^2$. Tässä menetelmässä lasersäde absorboituu vain hitsattavan kappaleen pinnan atomeihin. Kun laserin energia siirtyy pinnan atomeihin, alkavat ne lämmitä ja siirtää lämpöä seuraavaan kerrokseen. Laserenergia siirtyy syvemmälle kappaleeseen johtamalla, ja tällöin kappaleeseen syntynyt hitsi on tyypillisesti matala ja leveä. Hitsin lopullinen muoto on kuitenkin riippuvainen hitsattavan materiaalin ominaisuuksista, käytettävästä hitsausenergiasta ja hitsausparametreista. Sulattavaa hitsausta voidaan hyvin soveltaa esimerkiksi ohuiden materiaalien- tai hienomekaniikan hitsaukseen ja sovelluksiin. (Chmelickova & Sebestova, 2012, s.1-19; Kujanpää et al., 2005, s.159.)

Kun energiatihyyttä kasvatetaan, saadaan hitsattava kappale lämmitettyä pisteeseen, jossa sula metalli alkaa höyrystyä ja säteen keskelle muodostuu avaimenreikä kuvan 1 mukaisesti. Tällöin kyseessä on avaimenreikähitsaus. Käytettävä energiatiheys on tyypillisesti esimerkiksi teräksien hitsauksessa yli 10^6 W/cm^2 . Syntyvän metallihöyryn paine pitää avaimenreiän avoimena mahdollistaen lasersäteiden ja energian suoran pääsyn syvemmälle kappaleeseen, lämmön johtumisen sijaan. Syntyneitä avaimenreikää liikutetaan liikuttamalla lasersädettä hitsausrillon mukaisesti. Avaimenreiän etuosassa syntyvä sula liikkuu reiän ympäri säteen liikkuessa, jähmettyen hitsiksi reiän takana.

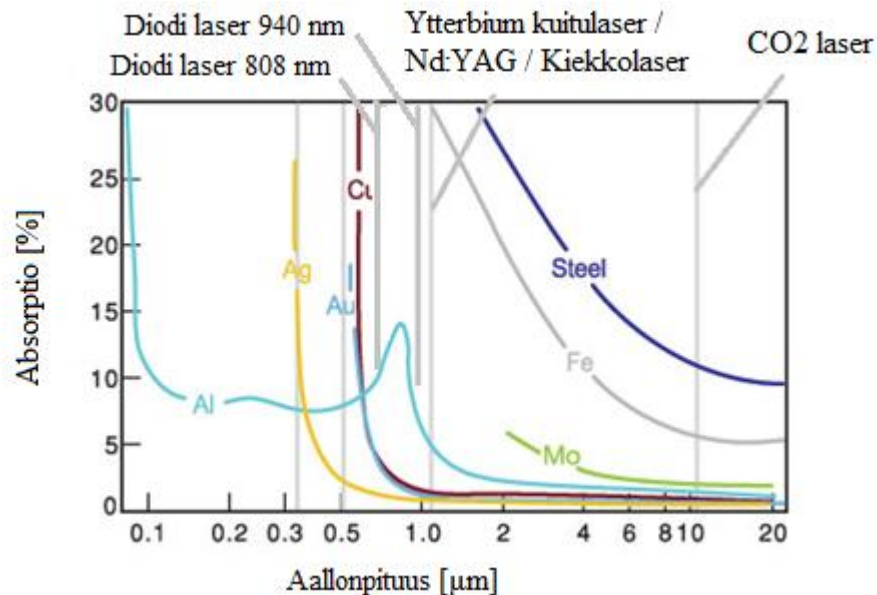
Avaimenreikähitsauksen tuloksena syntyy syvempiä ja kapeampia hitsejä kuin sulattavassa hitsauksessa. (Chmelickova & Sebestova, 2012, s.1-19.)



Kuva 1. Avaimenreikähitsaus ja sulattava hitsaus (Eagle-group, 2014).

4 TERÄKSEN HITSAUKSESSA KÄYTETTÄVÄT LASERTYYPIT

Laserhitsaukseen käytetään useita erityyppisiä lasereita. Aiemmin teollisuudessa käytettiin enimmäkseen CO₂- ja Nd:YAG -lasereita, mutta nykyään alaa valtaavat kuitu-, kiekko- ja diodilaser. Laserjärjestelmiä erottaa toisistaan lasersäteen aallonpituus, säteenlaatu ja säteentuottomenetelmä. Lasersäteen aallonpituus riippuu laserlaitteen laseroivasta väliaineesta ja vaikuttaa siihen kuinka säde absorboituu hitsattavaan materiaaliin. Kuvasta 2 näemme eri lasertyyppien aallonpituuksia ja niiden absorptiokykyä eri materiaaleihin. (Gula, 2013.)

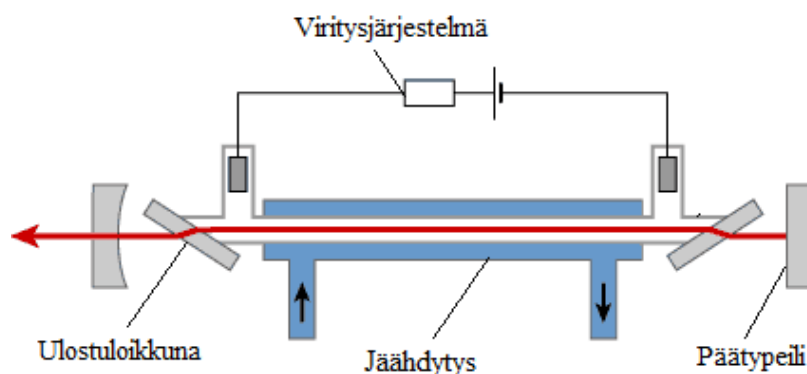


Kuva 2. Lasereiden aallonpituudet ja absorptio (Schubert & Zerner & Sepold, 1998).

4.1 CO₂-laser

Hiilidioksidilaser on ollut yksi yleisimmistä työstölasereista konepajasovelluksissa. Siinä laservalo synnytetään virittämällä laseroiva väliainekaasu resonaattorissa johtamalla siihen sähkövirtaa. Väliainekaasuna hiilidioksidilaserissa käytetään kaasuseosta, joka koostuu hiilidioksidista, heliumista ja typestä. Kaasuseoksen koostumus riippuu käytettävästä resonaattorityypistä. Kaasuseokseen tuotava sähköenergia virittää typpimolekyylit ja liikkuvat typpimolekyylit taas virittävät hiilidioksidimolekyylit törmätessään niihin. Tämän jälkeen virittynyt hiilidioksidimolekyyli palautuu takaisin alemmalle viritystasolle ja

luovuttaa fotonin. Fotonit törmäävät jälleen hiilidioksidimolekyyleihin, jotka jälleen virittyvät ja näin ollen lopputuloksena on ketjureaktio. Resonaattorin päissä olevien peilien ansiosta syntyneet fotonit saadaan liikkumaan yhdensuuntaisesti ja yhdistettyä lasersäteeksi. Heliumin tehtävä kaasuseoksessa on jäähdyttää kaasuseosta ja resonaattoria. Helium kuljettaa hukkalämmön lämmönvaihtimeen häiritsemättä varsinaista laserointiprosessia. Kuvassa 3 on esitelty suljetun resonaattorin hiilidioksidilaserissa. (RP Photonics, 2012a; Kujanpää et al., 2005, s.54–55.)

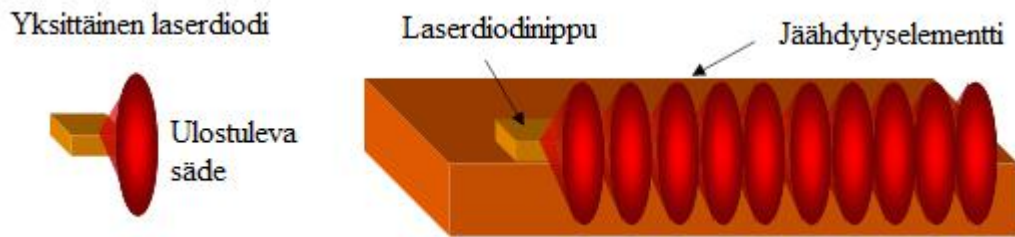


Kuva 3. Periaatekuva suljetun resonaattorin hiilidioksidilaserista (RP Photonics, 2012a).

4.2 Diodilaser

Matalatehoiset diodilaserit ovat olleet teollisuuden ja kuluttajien käytössä jo pitkään. Kuluttajatuotteissa niitä on käytetty lähinnä DVD- ja CD- soittimissa ja teollisuudessa lähinnä ohutlevyjen sulattavassa hitsauksessa. Nykyisin on kuitenkin saatavissa jo usean kilowatin tehoisia diodilasereita, joita voidaan käyttää jopa avaimenreikähitsaukseen. Diodilasereiden merkittävimpiä etuja ovat niiden hyvä energiatehokkuus, pitkä huoltovapaa elinikä, pieni koko, lyhyt aallonpituus, sekä säädettävä lasersäteen poikkileikkauksen muoto. (Coherent, 2009; Salminen, 2009; Horn, 2009, s.1.)

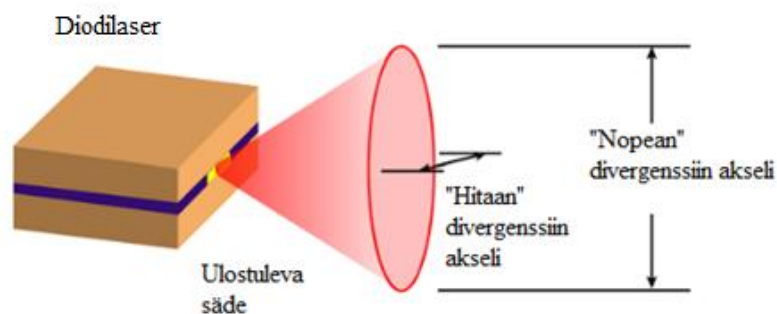
Diodilaser perustuu puolijohteisiin, joiden avulla voidaan muuttaa sähköenergiaa laservaloksi. Yksittäisellä diodilla aikaansaatu teho on vain muutamia watteja, mutta yhdistämällä yksittäisiä diodeja kuvan 4 mukaisiin nippuihin, saadaan nipun teho kasvatettua noin 100 wattiin. Yhdistämällä useampia tällaisia nippuja toisiinsa saadaan tehoa kasvatettua jopa useisiin kilowatteihin. (Coherent, 2009.)



Kuva 4. Yksittäinen laserdiodi ja laserdiodinippu (Coherent, 2009).

Diodilasereissa käytetään yleensä vesikiertojäähdytystä, ettei järjestelmän tuottama hukkalämpö rajoittaisi yksittäisestä nipusta saatavaa maksimitehoa. Lasereiden pienen koon ansiosta vesikiertojäähdytys on helppo järjestää, jolloin koko järjestelmän ulostulotehoa saadaan kasvatettua. (Coherent 2009; Kujanpää et al., 2005, s.65.)

Yksittäisestä diodista ulos saatava laservalo on muista lasereista poikkeavaa. Kuvassa 5 on esitelty diodilaserin säteen muoto. Yksittäisen diodin lasersäde hajautuu nopeammin diodinipun pidempää sivua vastaisen tason suuntaan jolloin säteestä tulee elliptinen. Tästä syystä diodilasereissa joudutaan käyttämään erityistä optiikkaa raakasäteen kollimoimiseksi työstösovelluksiin. Suuritehoisten diodilasereiden säde on aallonpituudeltaan yleensä lähellä infrapunavaloa, jolloin ne toimivat yleensä joko 808 nm tai 940 nm aallonpituudella, mutta muutkin aallonpituudet ovat mahdollisia. (Coherent, 2009; Kujanpää et al., 2005, s.65.)



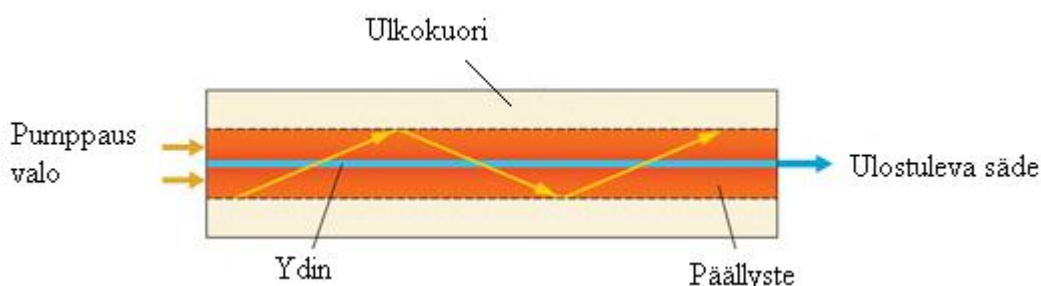
Kuva 5. Diodilaserista ulostulevan lasersäteen muoto (Coherent, 2009).

Diodilaserin sädettä kuljetetaan joko vapaasti ilmassa tai optisella kuidulla käyttösovelluksesta riippuen. Hitsauksessa säteestä tehdään kapea ja pintakäsittelyssä saatetaan käyttää leveämpää elliptistä tai neliömäistä sädettä. Käytettäessä kuitua, ohjataan

lasersäde siirtokuituun, mistä se edelleen fokusoidaan työkappaleeseen. Yleisesti käyttämällä diodilaserin säteen siirtämiseen optista kuitua aikaansaadaan pienempi polttopiste ja parempi tehotiheys, kuin vapaasti ilmassa kulkevalla säteellä. (Coherent, 2009.)

4.3 Kuitulaser

Kuitulaserissa lasersäde synnytetään suoraan optiseen kuituun, jonka ydin on seostettu laseroivalla väliaineena. Kuten kuvassa 6 optinen kuitu siis toimii itsessään resonaattorina, jota pumpataan diodilaserin valolla. Kuidussa pumppaus laservalo etenee kuidussa lähes häviöttömästi kokonaisuheijastumisen ansiosta, läpäisten laseroivan väliaineen useita kertoja ennen saapumistaan kuidun toiseen päähän. Kuitulasereissa laseroivana väliaineena käytetään aineita, joihin diodilaserin valo absorboituu helposti. Tämänlaisia aineita ovat esimerkiksi erbium (Er), neodmium (Nd), ytterbium (Yb) ja thulium (Tm), joista suurteholasereissa yleisin on ytterbium. Kuituun pumpattu laservalo läpäisee laseroivan ytimen virittäen ytimen elektronit. Elektronien palautuessa takaisin normaaliin tilaan luovuttavat ne fotonin, joka kulkee nyt ydintä pitkin. Syntyvän laservalon aallonpituus riippuu ytimessä käytettävästä väliaineesta. (Kujanpää et al., 2005, s.65.; ORC, 2013.)



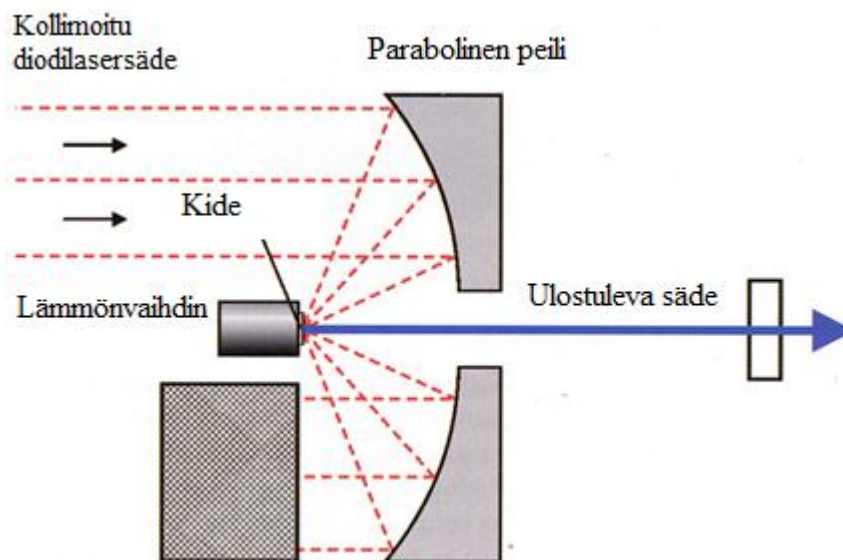
Kuva 6. Kuitulaserin toimintaperiaate (Laser Focus World, 2014).

Kuitulasereiden säteenlaatu on erinomainen ja niillä saavutettava tehotiheys on suuri. Laservalo synnytetään suoraan kuituun, jolloin sen käsittely sekä siirtäminen ovat helppoa ja turvallista. Kuitulasereissa lasersäteen siirtämiseen käytetään optista kuitua ja säteen muokkaamiseen peilejä ja linsejä. Lisäksi kuitulaserit ovat pienikokoisia, erittäin energiatehokkaita ja luotettavia. Kuitulasereita on saatavilla nykyisin jo 100 kW tehoon asti ja laitteita kehitetään jatkuvasti. Näistä syistä kuitulasereiden käyttö on voimakkaassa kasvussa lasertyöstösovelluksissa. (ORC, 2013; Optics, 2012.)

4.4 Kiekkolaser

Kiekkolaser on kidelaser, jossa perinteinen tankomainen kide, kuten Nd:YAG-laserissa, on korvattu ohuella kiekkomaisella kiteellä. Kiekkomainen kide on kiinnitetty suoraan lämmönvaihtimeen ja sitä pumpataan diodilaserilla. Lämmönvaihdin on yleensä massiivinen kuparialusta, jota jäähdytetään vedellä. Tehokkaan jäähdytyksen ja tasaisen lämpenemisen ansiosta syntyneen säteen laatu on parempi kuin perinteisillä tankomaisilla kidelasereilla. Laseroivana väliaineena käytetään yleisesti Yb:YAG-kidettä, joka tuottaa laservaloa 1030 nm aallonpituudella. (Kujanpää et al., 2005, s.64; RP Photonics, 2013b.)

Kiekon pintaan ohjattu pumppaus säde absorboituu kiekkoon osittain aktivoiden kiekon elektronit. Elektronit palautuessaan takaisin alemmalle energiatasolle emittoivat laservaloa kuvan 7 mukaisesti. Osa pumppaus laserin säteestä heijastuu kiteen pinnasta, jolloin heijastunut säde ohjataan parabolisten peilien kautta takaisin kiteeseen. Tällöin pumppausenergia saadaan paremmin hyödynnettyä. Kiekkolaserin etuna on sen sarjankytettävyys, jolloin lasertehoa voidaan nostaa säteenlaadun kärsimättä huomattavasti. (Kujanpää et al., 2005, s.64; PR Photonics, 2013b.)



Kuva 7. Kiekkolaserin periaatekuva (Photonics Spectra, 2004).

5 TÄRKEIMMÄT LASERHITSAUSPARAMETRIT

Hitsausparametrit ja niiden hallinta ovat ensiarvoisen tärkeää laserhitsauksessa. Hyvän hitsaustuloksen saavuttamiseksi on parametrit hallittava erikseen sekä ymmärrettävä niiden yhteisvaikutukset. Hitsausparametrit voidaan jakaa laserparametreihin ja prosessiparametreihin. Hitsausoperaattori voi vaikuttaa hitsatessaan vain prosessiparametreihin, ja laserparametrit määräytyvät käytettävän laitteiston perusteella. Laserhitsauksessa on myös tärkeää ymmärtää parametrien ja hitsattavan materiaalin väliset suhteet ennen käytettävän lasertyypin ja hitsauskoneen valintaa. (Kelkar, 2008, s.1-9; Kujanpää et al., 2005, s.164–165.)

5.1 Laserparametrit

Laserparametreja ovat mm. lasersäteen aallonpituus, polarisaatio, moodi, halkaisija, divergenssi ja säteenlaatu. Tyypillisesti nämä parametrit ovat riippuvaisia käytettävästä hitsauslaitteistosta, eikä niitä yleensä säädetä hitsauksen aikana. CO₂-lasereissa osaa parametreista, kuten polarisaatiota ja moodia, pystytään muuttamaan vain työaseman tai resonaattorin sisäisen optiikan vaihdolla tai säädöllä. Nämä ovat kuitenkin usein niin suuritöisiä muutoksia, ettei niitä yleensä pystytä vaihtuvassa tuotannossa toteuttamaan. Laserparametrit on otettava huomioon valittaessa käytettävää laitteistoa kyseessä olevalle materiaalille ja vaadittavalle hitsaustulokselle. Esimerkiksi eri aallonpituudet absorboituvat eri materiaaleihin erilailla. (Kujanpää et al., 2005, s.164–165; Steen & Mazumder, 2010, s. 215.)

5.2 Prosessiparametrit

Prosessiparametrit ovat hitsauksen aikana säädettäviä parametreja, joilla vaikutetaan syntyvään hitsiin ja prosessin sujuvuuteen. Prosessiparametreilla on monimutkainen keskinäinen riippuvuus ja niiden ymmärtäminen on ensiarvoisen tärkeää laserhitsauksessa. Yksittäiseen hitsin ominaisuuteen pystytään vaikuttamaan usealla eri parametrilla ja yhden parametrin säätämällä voi olla vaikutusta useaan eri asiaan. Parametrien yksittäis- ja yhteisvaikutuksista on olemassa paljon tutkimustietoa. Parametrien ja hitsin ominaisuuksien välisiä suhteita tutkitaan edelleen paljon. (Kujanpää et al., 2005, s.164–168; Steen & Mazumder, 2010, s. 209–218.)

5.2.1 Laserteho

Käytettävä laserteho vaikuttaa hitsauksessa moneen asiaan. Teholla pystytään vaikuttamaan hitsin tunkeumaan, muotoon ja suurimpaan käytettävissä olevaan hitsausnopeuteen. Saavutettava tunkeuma ei kuitenkaan riipu pelkästään tehosta, vaan myös hitsausnopeudella ja säteen laadulla on vaikutusta tunkeumaan. Haluttaessa tiettyä tunkeumaa, löytyy kullekin tehoasetukselle maksimihitsausnopeus. Jos nopeutta halutaan kasvattaa, joudutaan tehoa lisäämään. Sopivan tehon löytäminen halutun hitsin saavuttamiseksi voi olla joskus vaikeaa. Liian pieni teho jättää tunkeuman vajaaksi, kun taas liian suuri teho aiheuttaa liian suuren sulan ja avaimenreiän romahtamisen. Tehoa ja nopeutta ei siis voida nostaa loputtomiin, vaan tietyssä vaiheessa syntyvän hitsin laatu alkaa huonota. Käytettävä teho yhdessä polttopisteen halkaisijan kanssa määrittää tehotiheyden, josta puolestaan riippuu onko hitsaus sulattavaa vai avaimenreikähitsausta. (Kujanpää et al., 2005, s.165; Steen & Mazumder, 2010, s. 209.)

5.2.2 Hitsausnopeus

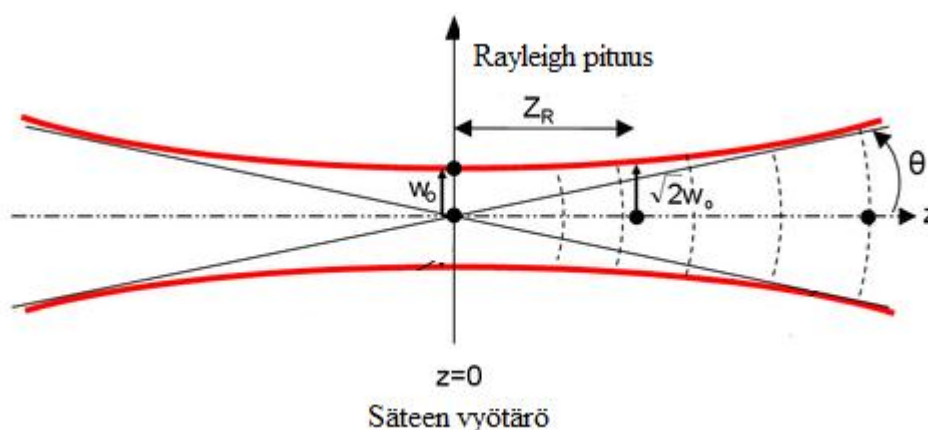
Hitsattaessa vakioteholla laserhitsin tunkeuma pienenee hitsausnopeuden kasvaessa. Yleensä hyvän hitsaustuloksen tuottavaa hitsausnopeusaluetta rajoittaa avaimenreiän romahtaminen liian hitaalla hitsausnopeudella ja riittämätön tunkeuma liian nopealla hitsausnopeudella. Hitsattaessa suurella hitsausnopeudella ja teholla, muuttuu sulan virtaus suhteessa pieneen hitsausnopeuteen ja suureen tehoon. Tällöin syntynyt hitsi on muodoltaan kapeampi kuin pienellä hitsausnopeudella ja suurella teholla hitsattu hitsi. Myös syntyneiden hitsien muoto riippuu hitsausnopeudesta. Hitsattaessa liian suurella hitsausnopeudella avaimenreiän ympäri virtaava sula virtaa hitsin keskilinjalle ja jähmettyy muodostaen yläpuolen hitsipalon keskelle korkean kuvun. Samaan aikaan hitsipalon molemmat sivut jäävät mataliksi ja siten hieman vajaiksi. Hitsattaessa liian pienellä hitsausnopeudella alkaa hitsisulan koko kasvaa saavuttaen lopulta pisteen, jossa hitsisula romahtaa hitsin juurta kohti. Avaimenreiän romahtaminen näkyy hitsissä reikänä tai vajonneena hitsinä. (Kujanpää et al., 2005, s.166; Steen & Mazumder, 2010, s. 216.)

5.2.3 Käytettävä optiikka

Säteen fokuosoinnilla tarkoitetaan laserista ulostulevan säteen poikkipinta-alan pienentämistä optiikkaa hyväksikäyttäen halutun tehotiheyden saavuttamiseksi. Syntyneen polttopisteen koolla on olennainen rooli säteen hyödyntämisessä. Mitä pienempi polttopiste

on, sitä suurempi on säteen tehotiheys. Suuri tehotiheys on oleellista etenkin avaimenreikähitsauksessa. Suuri tehotiheys helpottaa myös helposti heijastavien materiaalien kuten alumiinin hitsausta. Polttopisteen minimikokoa rajoittavina tekijöinä ovat säteen fokuositavuus, optiikan laatu ja käytettävä aallonpituus. Viime vuosina laserhitsauksessa yleistyneiden kuitu- ja kiekkolasereiden myötä säteen laatu on merkittävästi parantunut, ja näin ollen säteen fokuositavuus on parantunut. Polttopisteen minimikoko on myös samasta syystä pienentynyt. (Kujanpää et al., 2005, s.166; Steen & Mazumder, 2010, s. 216; Verhaeghe & Hilton, 2005.)

Säteenlaadulla ja käytettävällä optiikalla on myös olennainen merkitys säteen syväterävyyteen. Suurempi syväterävyys säteessä pienentää säteen paikoitustoleranssia korkeussuunnassa, josta on hyötyä varsinkin ohuiden materiaalien läpätunkeumahitsauksessa. Säteen syväterävyydestä käytetään myös nimitystä Rayleigh –pituus (Z_R). Rayleigh -pituus määräytyy kuvan 7 mukaisesti säteen kapeimmasta kohdasta pisteeseen, jossa säteen halkaisija on kasvanut $\sqrt{2}$ -kertaiseksi. Hyvä säteenlaatu mahdollistaa myös pidemmän polttovälin optiikan käytön, joka puolestaan mahdollistaa paremman luoksepäästävyuden ja vähentää optiikan altistumista roiskeille ja kuumuudelle. (Kujanpää et al., 2005, s.166; Steen & Mazumder, 2010, s. 216; Verhaeghe & Hilton, 2005.)



Kuva 8. Rayleigh –pituus ja säteen syväterävyys (Optique Ingenieur, 2012).

Säteenlaatua voidaan mitata usealla eri parametrilla, ja näistä yleisimpiä ovat K , M^2 ja BPP (engl. Beam Parameter Product) -arvot. K -arvo esiintyy yleisesti

hiilidioksidilasereiden yhteydessä. BPP -arvon etuna on sen riippumattomuus laserin aallonpituudesta, jolloin eri aallonpituuksilla toimivien lasereiden keskinäinen vertailu helpottuu. Tästä syystä BPP onkin yksi käytetyimmistä säteenlaatua kuvaavista parametreista. (Optoskand, 2013.)

5.2.4 Polttopisteen asema

Polttopisteen asema voi sovelluskohteesta riippuen olla asetettuna työkappaleen yläpinnasta ylöspäin tai kappaleen sisälle. Polttopisteen paikoitustarkkuus riippuu fokusoidun säteen syvyysterävyydestä, käytettävästä optiikasta ja työkappaleen paksuudesta. (Kujanpää et al., 2005, s.166.) Polttopisteen asemalla voidaan vaikuttaa laserhitsauksessa ilmiöihin, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa osiossa.

6 POLTTOPISTEEN ASEMAN VAIKUTUS TERÄKSEN KUITULASERHITSAUKSESSA

Polttopisteen asema on tärkeä parametri laserhitsauksessa ja sen vaikutuksen ymmärtäminen on oleellista onnistuneen hitsauksen kannalta. Työn tässä osiossa määritetään polttopisteen aseman vaikutusta teräksen kuitulaserhitsaukseen kirjallisuuden ja tieteellisten artikkeleiden avulla. Suurin osa kirjallisuuden tuloksista perustuu joko matemaattiseen mallinnukseen tai umpiaineeseen hitsattuihin päällehitseihin, jotka ovat vajaatunkeumaisia. Ainoastaan Vänskä et al. (2013) esittelee tuloksia, joissa on käytetty päittäisliitosta ja myös läpätunkeumaa. Vaikka kirjallisuuden asetukset eivät kaikilta osin vastaa reaalimaailman hitsaussovelluksia, voidaan löydettyjä havaintoja käyttää tukena työn hitsauskokeiden tulosten analysoimisessa.

Polttopisteen asema vaikuttaa yhdessä muiden parametrien kanssa esimerkiksi tehotiheyteen, avaimenreiän geometriaan ja sitä kautta esimerkiksi tunkeumaan sekä roiskeisiin. Suotuisa polttopisteen asema riippuu hitsattavasta materiaalista, sekä muista hitsaus- ja sädeparametreista. Tässä työssä selvitetään miten polttopisteen asema vaikuttaa edellä mainittuihin ilmiöihin ja kuinka hitsauksen laatuun voidaan vaikuttaa polttopisteen asemaa muuttamalla. Polttopisteen asema voi muuttua hitsauksen aikana myös tahattomasti, johtuen esimerkiksi hitsauspään optiikan lämpenemisestä. Tällaisten tahattomien ilmiöiden vaikutus polttopisteen asemaan ja edelleen hitsiin rajattiin tämän työn ulkopuolelle. (Steen & Mazumder, 2010, s. 218–219; Thiel et al., 2013, s.210; Weberpals & Dausinger, 2008, s.364; Weberpals et al., 2011, s. 9.)

6.1 Polttopisteen aseman vaikutus tehotiheyteen

Riippuen hitsausmenetelmästä, on lasersäteen tehotiheyden kappaleen pinnalla yllettävä tietylle tasolle. Esimerkiksi avaimenreikähitsauksessa tehotiheyden on yllettävä tasolle, jossa materiaali höyrystyy. Käytettävän raakasäteen tehotiheys saadaan nostettua tarvittavalle tasolle fokuointioptiikkaa hyväksi käyttäen. Kuitenkin kappaleen pinnalla saavutettava tehotiheys riippuu polttopisteen asemasta kappaleen pintaan verrattuna. Jos säteen polttopiste ei ole asetettu kappaleen pintaan, alkaa kappaleeseen kohdistuvan säteen halkaisija tietyn raja-arvon jälkeen kasvaa etäisyyden funktiona. Tästä johtuen tehotiheys

kappaleen pinnalla pienenee, eikä välttämättä ole enää riittävä avaimenreikähitsaukseen ja materiaalin höyrystymiseen. (Steen & Mazumder, 2010, s. 218–219.)

Polttopisteen aseman ollessa asetettuna hitsattavan kappaleen yläpinnan ala- tai yläpuolelle, muuttuu polttopisteen säde kappaleen pinnalla seuraavan kaavan mukaisesti.

$$\omega_z = \omega_0 * \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_r^2}} \quad (1)$$

Kaavassa 1 ω_z on polttopisteen säde kappaleen pinnalla, ω_0 on polttopisteen säde polttopisteessä (mm), z on polttopisteen etäisyys kappaleen pinnasta (mm) ja z_r on Rayleigh –pituus (mm). Tällöin kappaleen pintaan vaikuttava tehotiheys I_z määräytyy taas kaavan

$$I_z = P / (\pi * \omega_z^2) \quad (2)$$

mukaan. Tästä huomataan että tehotiheys I_z pienenee polttopisteen säteen kasvaessa ja tehon P pysyessä vakiona. Tällöin polttopisteen aseman poikkeutuessa kappaleen pinnasta, alkaa kappaleeseen kohdistuvan säteen säde kappaleen pinnalla kasvaa, jolloin tehotiheys pienenee. (Thiel et al., 2013, s. 210.)

Polttopisteen aseman paikoitustarkkuus tehotiheyden kannalta määräytyy käytettävän optiikan perusteella. Fokusoitaessa raakasädettä, jonka halkaisija on D , saadaan polttopisteen halkaisija kaavan

$$d_{\text{foc}} = 4f\lambda/D\pi \quad (3)$$

mukaan. Kaavassa 3 d_{foc} on fokusoidun säteen halkaisija, f on polttoväli, λ on aallonpituus ja D on raakasäteen halkaisija. Kaavasta huomataan, että haluttaessa pientä polttopisteen halkaisijaa tulee myös polttovälin olla pieni. Vastaavasti Rayleigh –pituus z_r taas määräytyy kaavan

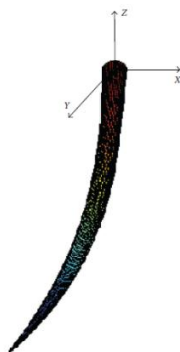
$$z_r = (2\pi\lambda(f/D)^2)/2 \quad (4)$$

mukaan. Kaavoista 3 ja 4 huomataan, että käyttämällä pientä polttoväliä f saadaan polttopisteen halkaisija d_{foc} pieneksi, mutta samalla myös Rayleigh -pituus pienenee. Koska rayleigh -pituutta voidaan pitää säteen tehotiheyden kannalta yhtenä polttopisteen aseman paikoitustarkkuuden parametrina, seuraa sen pienenemisestä myös säteen paikoitustarkkuuden pieneneminen. (Thiel et al., 2013, s.210; Sintec Optronics, 2013.)

Säteen polttopisteellä on siis säteestä ja käytettävästä optiikasta riippuva säteen halkaisija, syväterävyys ja muoto. Polttopisteen aseman ollessa poikkeutettuna hitsattavan kappaleen pinnasta rayleigh -pituuden verran tai sen alle, ei poikkeutuksella ole suurta merkitystä tehotiheyteen kappaleen pinnalla. Poikkeuttaessa sädetä kappaleen pinnasta tätä raja-arvoa enemmän, tehdään se aina kappaleen pintaan kohdistuvan tehotiheyden suuruuden kustannuksella. (Thiel et al., 2013, s.210; Sintec Optronics, 2013.)

6.2 Polttopisteen aseman vaikutus avaimenreiän geometriaan

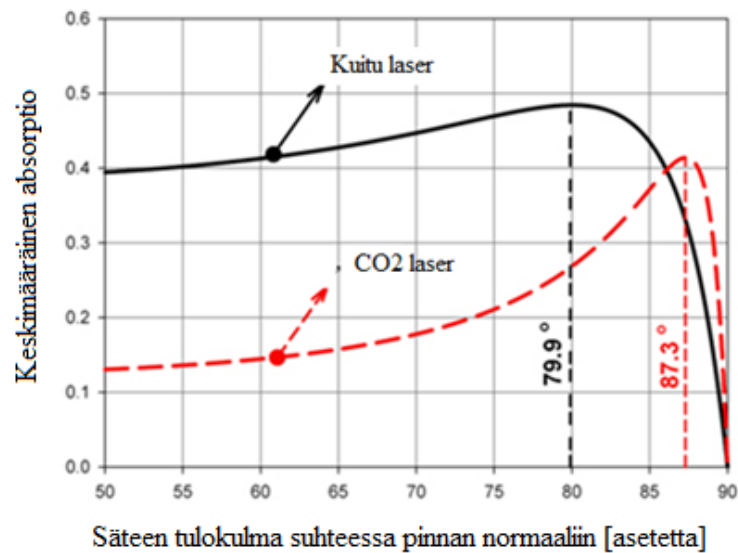
Avaimenreikähitsaus perustuu materiaalin höyrystymiseen, syntyneen metallihöyryn ylläpitämään avaimenreikään ja säteen useisiin heijastumiin avaimenreiässä. Tällöin syntynyt avaimenreikä on perusmuodoltaan kuvan 9 mukainen. Syntyneen avaimenreiän halkaisija, kaarevuus ja syvyys riippuvat käytettävistä parametreista, sekä hitsattavasta materiaalista. Esimerkiksi, jos laserteho pidetään vakiona ja hitsausnopeutta kasvatetaan, kaareutuu avaimenreikä voimakkaammin taaksepäin hitsausnopeuden kasvaessa. (Zhang et al., 2013, s.1-9; Jin et al., 2012, s.1-9.)



Kuva 9. 3D avaimenreikä (Jin et al., 2012, s.2).

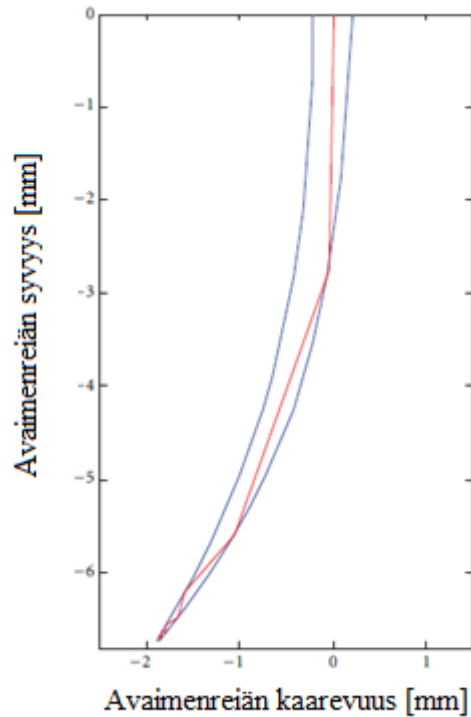
Avaimenreiän kaareutuminen vaikuttaa siihen millä etäisyydellä kappaleen pinnasta säde osuu muodostuneen avaimenreiän etuseinään ja mikä on tällöin säteen tulokulma. Kuvassa 10 on esitetty säteen tulokulman vaikutus absorptioon. Kuvaajassa esitetty säteen

tulokulma määräytyy suhteessa pinnan normaaliin ja pinta, johon säde avaimenreikähitsauksessa ensimmäisenä osuu, on avaimenreiän etuseinä. Tällöin avaimenreiän etuseinän kaltevuus vaikuttaa oleellisesti myös säteen absorptioon. (Khan & Hilton, 2010.)



Kuva 10. Säteen absorptio sulaan metalliin erilaisilla säteen tulokulmilla (Khan & Hilton, 2010).

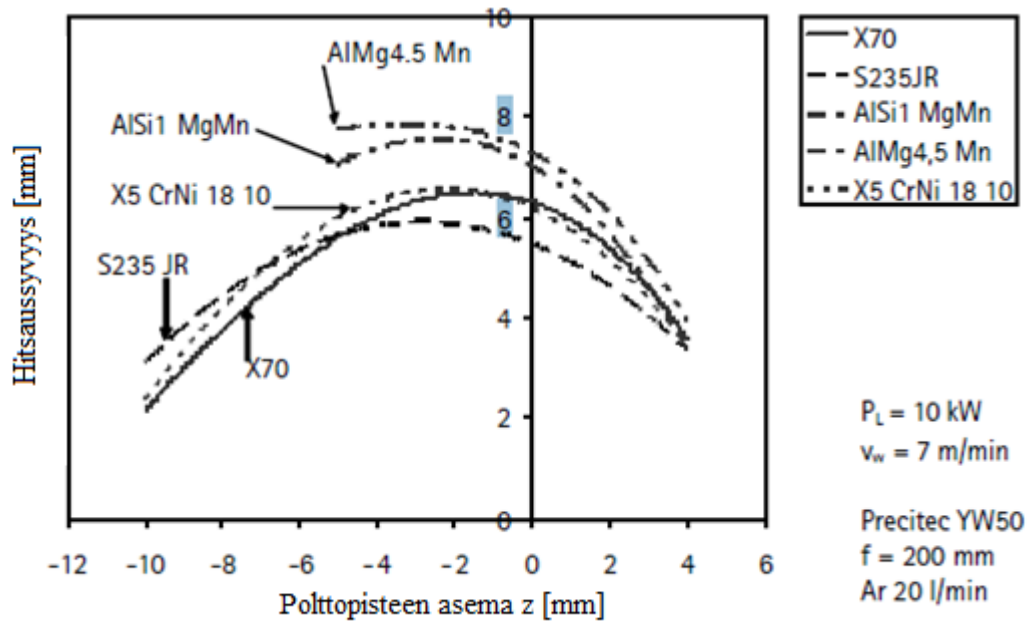
Avaimenreiän kaltevuus vaikuttaa myös siihen millä etäisyydellä kappaleen pinnasta lasersäde osuu ensimmäisen kerran avaimenreiän etuseinään. Esimerkiksi kuvassa 11 lasersäde osuu avaimenreiän etuseinään ensimmäisen kerran noin 2,5 mm kappaleen pinnan alapuolella. Jos polttopisteen asema on tässä tapauksessa asetettu kappaleen pintaan, on säteen tehotiheys avaimenreiän etuseinällä pienempi kuin kappaleen pinnalla. Tällöin polttopisteen asema tulisi asettaa noin 2,5 mm kappaleen pinnan alapuolelle, että avaimenreiän etuseinään saataisiin mahdollisimman suuri tehotiheys. (Zhang et al., 2013, s.1-9; Jin et al., 2012, s.1-9.)



Kuva 11. Säteen heijastuminen avaimenreiässä (Jin et al., 2012, s.6).

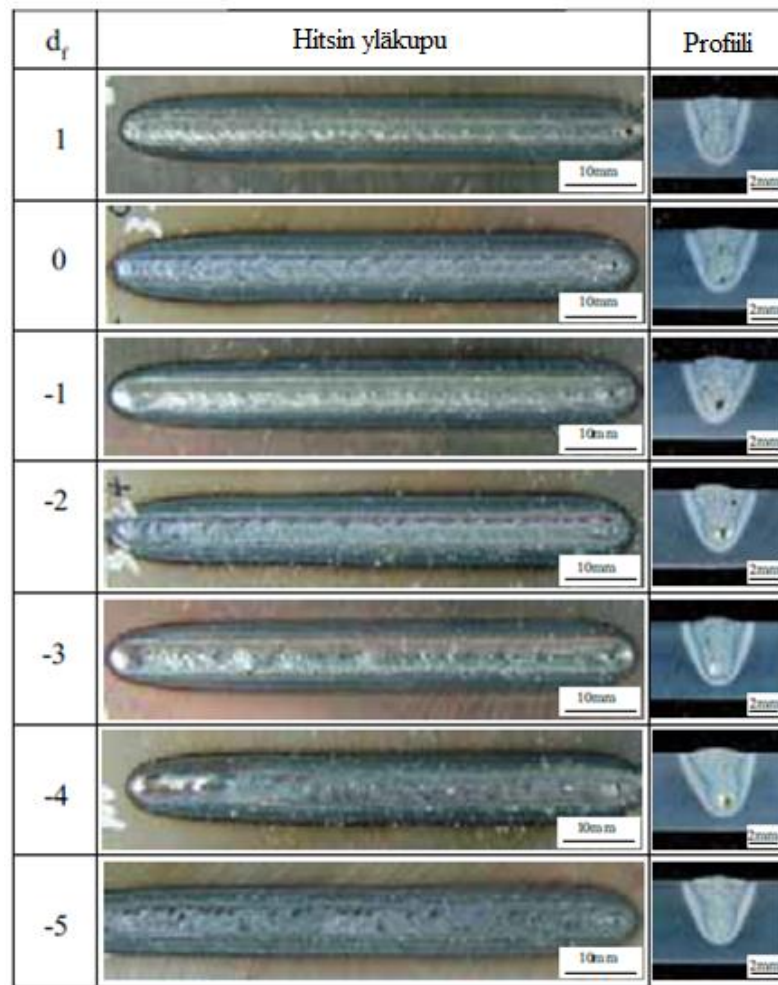
Polttopisteen aseman asettaminen kappaleen pinnan alapuolelle kasvattaa siis tehotiheyttä avaimenreiän etuseinällä. Tehotiheyden kasvu voi aiheuttaa avaimenreiän etuseinän kaltevuuden jyrkkenemisen, mikä taas vaikuttaa säteen tulokulmaan ja lopulta absorptioon. Avaimenreiän jyrkkeneminen näkyy yleensä tunkeuman kasvamisena. (Weberpals et al., 2011, s.1-9; Volttersen & Thomy, 2005, s. 260; Khan & Hilton, 2010.)

Kuten kuvasta 12 voidaan havaita, riippuvat polttopisteen aseman vaikutukset myös hitsattavasta materiaalista. Esimerkiksi alumiineilla polttopisteen aseman siirto jopa 4 mm kappaleen sisäpuolelle vaikuttaa positiivisesti tunkeuman syvyyteen. Teräksillä taas polttopisteen aseman vaikutukset hitsin tunkeumaan lakkaavat jo noin 2 mm kappaleen sisäpuolella, riippuen tietenkin hitsattavan materiaalin paksuudesta ja muista hitsaus parametreista. (Weberpals et al., 2011, s. 9.; Vollertsen & Thomy, 2005, s. 260.)



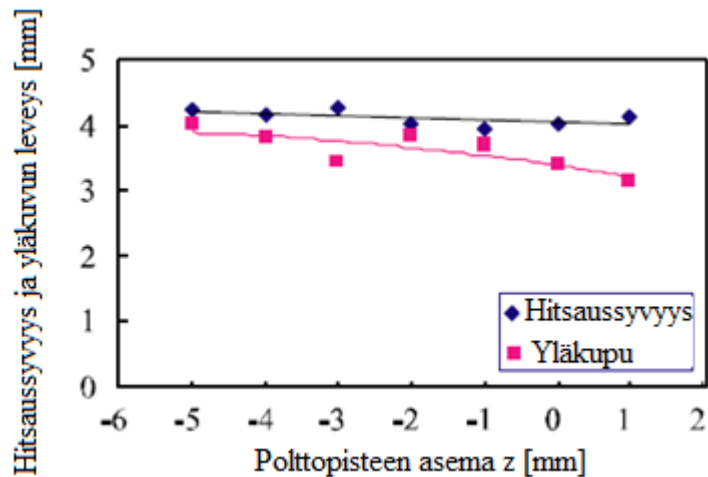
Kuva 12. Tunkeuman syvyyden suhde polttopisteen asemaan (Vollertsen & Thomy, 2005, s. 260.).

Lisäksi jos käytettävän säteen divergenssikulma on hyvin pieni, eivät polttopisteen aseman muutokset vaikuta radikaalisti säteen halkaisijaan hitsattavan kappaleen pinnalla. Esimerkiksi kuvan 13 hitsauksissa käytettävän säteen divergenssi oli varsin pieni, eikä suurelleen polttopisteen aseman vaihtelut tällöin vaikuta tehotiheyteen kappaleen pinnalla ja myös tunkeuma pysyy lähes vakiona. Hitsauskokeessa käytettiin IPG Photonics YLR-2000 kuitulasera 2 kW teholla. Hitsattava materiaali oli 780 MPa suurlujuusterästä. (Liu et al., 2006, s. 564.)



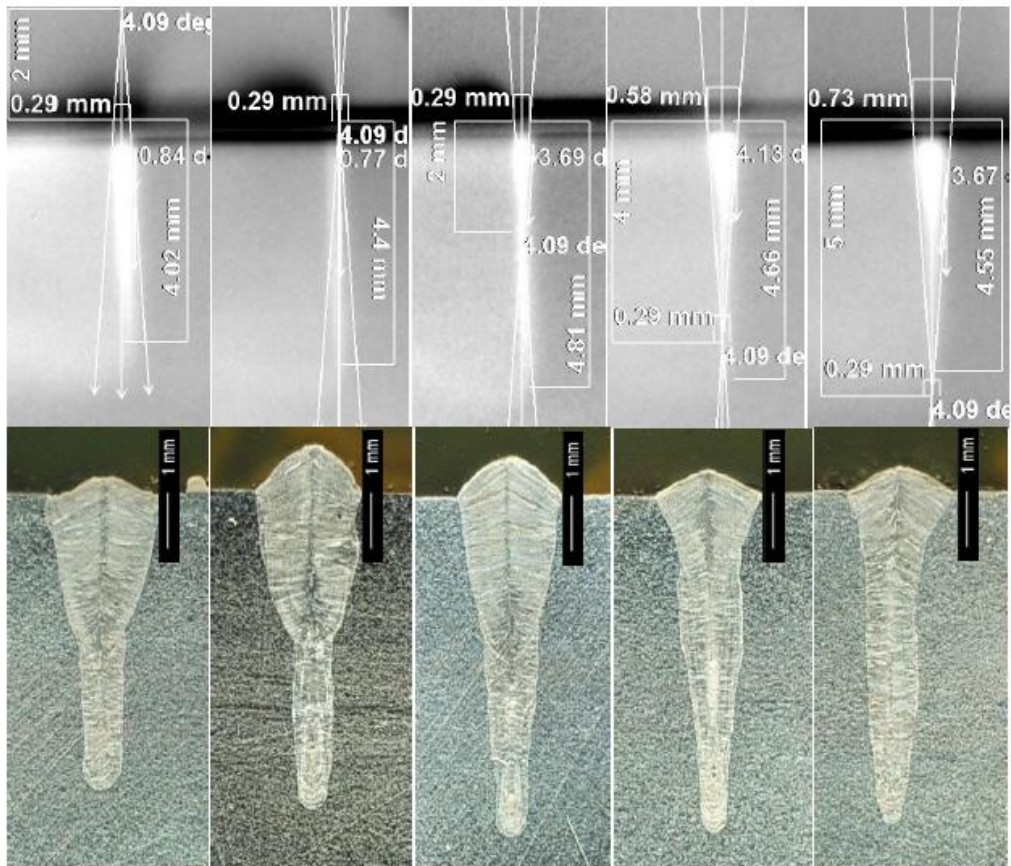
Kuva 13. Hitsin poikkileikkauksen muoto ja hitsin kupu eri polttopisteen asemilla (Liu et al., 2006, s.564).

Kuva 14 kokoaa Liu et al. hitsauskokeen tulokset tunkeuman ja polttopisteen aseman suhteen. Tulosten tarkempi analysoiminen kuvaajan avulla näyttää vain pientä tunkeuman kasvamista negatiivisilla polttopisteen asemilla. (Liu et al., 2006, s.565.)



Kuva 14. Tunkeuman syvyyden, kuvun leveyden ja polttopisteen aseman suhde (Liu et al., 2006, s.565).

Polttopisteen geometria käsittää muutakin kuin avaimenreiän kaltevuuden ja tunkeuman. Polttopisteen asema vaikuttaa pinnan tehotiheyden lisäksi myös säteen muotoon kappaleen sisällä, joka taas vaikuttaa hitsin muotoon. Kuvassa 15 on esitetty Vänskä et al. (2013, s. 1-10) hitsauskokeiden röntgenkuvat ja valmiin hitsin poikkileikkaukset. Kyseisessä tutkimuksessa röntgenkuvaus suoritettiin jatkuvana kuvauksena hitsauksen aikana. Kuvassa 16 esitetyt röntgenkuvat ovat pysäytyskuvia täysin muodostuneista avaimenreistä. Kuvan 16 hitsit on hitsattu kuitulaserilla, 5 kW laserteholla, 2 m/min hitsausnopeudella ja säteen divergenssikulma oli 4.07 astetta. Hitsauskokeissa käytettiin kiekkolaseria ja hitsattava materiaali oli laserleikattua austeniittista ruostumatonta terästä. Hitsauksissa polttopisteen asemaa varioitiin asemasta +2 asemaan -5. Kuten huomaamme ensimmäisestä ja kolmannelta kuvan 16 hitsistä, on hitsin geometria hyvin erilainen polttopisteen asemilla +2 ja -2, vaikka polttopisteen halkaisija kappaleen pinnalla on molemmissa tapauksissa sama. Polttopisteen asemalla +2 on säteen muoto kappaleen sisäpuolella laajeneva, kun taas polttopisteen asemalla -2 se on suppeneva. Säteen suunnan muutoksen vaikutus kappaleen sisäpuolella on nähtävissä hitsien poikkileikkauksissa. Polttopisteen asemalla +2 hitsauksen yläosa on ensin leveämpi ja kapenee huomattavasti noin 2 mm syvyydellä. Polttopisteen aseman ollessa -2 hitsi kapenee tasaisesti hitsaussyvyyden kasvaessa. Tässä tapauksessa polttopisteen asema -2 tuottaa myös suurimman tunkeuman. (Vänskä et al., 2013. s.1-10.)



Kuva 15. Polttopisteen paikan vaikutus hitsin poikkileikkausgeometriaan (Vänskä et al., 2013, s.6).

Polttopisteen asema määrittää säteen koon ja sitä kautta tehotiheyden kappaleen pinnalla, sekä avaimenreiän etuseinässä. Hitsauksen alkuvaiheessa ennen avaimenreiän muodostumista, on tehotiheyden yllettävä materiaalin höyrystymistä vaativalle tasolle kappaleen pinnalla. Myöhemmin avaimenreiän jo muodostuttua on oleellisempaa millainen tehotiheys ja säteen muoto ovat avaimenreiän etuseinässä, johon säde tällöin kohdistuu, kuin tehotiheys kappaleen pinnalla. Kappaleeseen vaikuttavan tehotiheyden lisäksi polttopisteen asema vaikuttaa kappaleeseen vaikuttavan säteen muotoon ja sitä kautta avaimenreiän ja hitsin geometriaan. Avaimenreiän geometria taas vaikuttaa avaimenreiässä sulan ja metallihöyryn dynamiikkaan, sekä lopulta niiden yhteysvaikutuksista syntyviin roiskeisiin. (Zhang et al., 2013, s.1-9; Jin et al., 2012, s.1-9; Vänskä et al., 2013. s.1-10.)

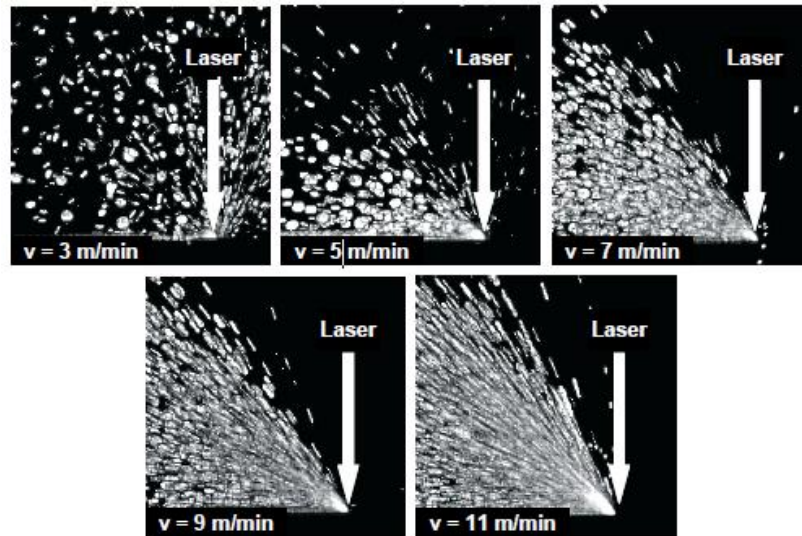
6.3 Polttopisteen aseman vaikutus roiskeiden syntyyn

Avaimenreiän ja sulan välisen dynamiikan hallinta optimaalisen hitsaustuloksen saavuttamiseksi on vaikeaa. Eräs tekijä roiskeiden syntymiseen on avaimenreiässä

syntyvien metallihöyryjen ylösvirtaus yhdessä aerodynaamisen vastuksen ja kitkan kanssa. Lisäksi avaimenreiän etuseinän kaltevuus, sekä avaimenreiän syvyys näyttelevät omaa rooliaan roiskeiden syntymekanismeissa. Edellä tutkittiin polttopisteen aseman vaikutusta avaimenreiän geometriaan. Tässä kappaleessa selvitetään kuinka avaimenreiän geometria vaikuttaa roiskeiden syntymekanismiin ja kuinka roiskeiden syntyyn voidaan vaikuttaa polttopisteen asemaa muuttamalla. Tässä työssä selvitetään ensin roiskeiden syntymekanismi, jonka jälkeen voidaan tarkastella polttopisteen aseman vaikutusta roiskeiden syntyyn. Hitsauksessa käytettävä polttopisteen asema vaikuttaa näihin ilmiöihin joko suoraan tai välillisesti. Polttopisteen asemaa muuttamalla voidaan vähentää roiskeisuutta ja parantaa syntyneen hitsin laatua. (Weberpals & Dausinger, 2008, s.364.; Weberpals et al., 2011, s. 1.)

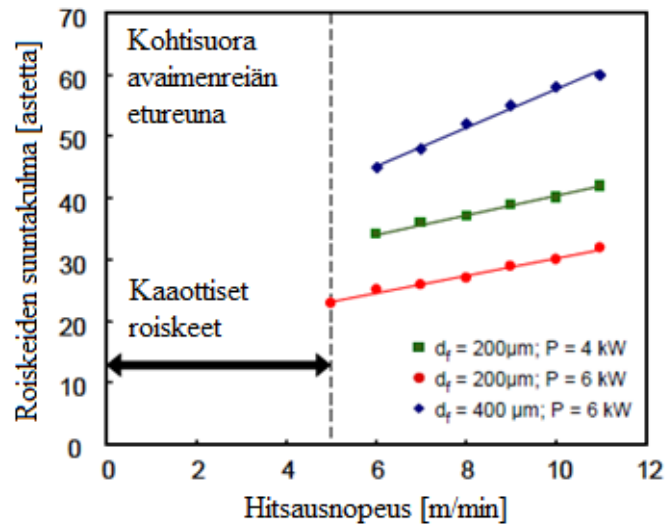
6.3.1 Roiskeiden syntymekanismi vajaa- ja läpituokeumahitsauksessa

Avaimenreiän kaltevuuden määrittäminen on vajaatuokeumahitsauksessa vaikeaa. Sen muoto ja suhde hitsausparametreihin pystytään kuitenkin määrittämään laskennallisesti, tai käyttämällä hitsaustapahtuman röntgenkuvausta. Tuloksista pystytään huomaamaan, että avaimenreiän etureunan kaltevuuden suhde hitsausparametreihin on lähes samanlainen sekä vajaa- että läpituokeumahitsauksessa. Tutkimuksien mukaan avaimenreiän etuseinän kaltevuuteen vaikuttaa hitsausnopeus ja kappaleen pinnalla vaikuttava tehotiheys. Tehotiheyden puolestaan voidaan vaikuttaa sekä käytettävällä teholla, että polttopisteen halkaisijalla. Polttopisteen halkaisijan kasvattaminen kasvattaa avaimenreiän etuseinän kaltevuutta ja lasertehon lisääminen pyrkii suoristamaan avaimenreiän etuseinää. Hitsausnopeuden kasvattaminen taas kasvattaa avaimenreiän kaltevuutta lineaarisesti. Hitsausnopeuden vaikutus roiskeiden määrään on nähtävissä kuvassa 16, mistä hitsausnopeuden mukaan lisääntyvät roiskeet ovat helposti havaittavissa. (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368; Vänskä et al., 2013, s. 1-10.)



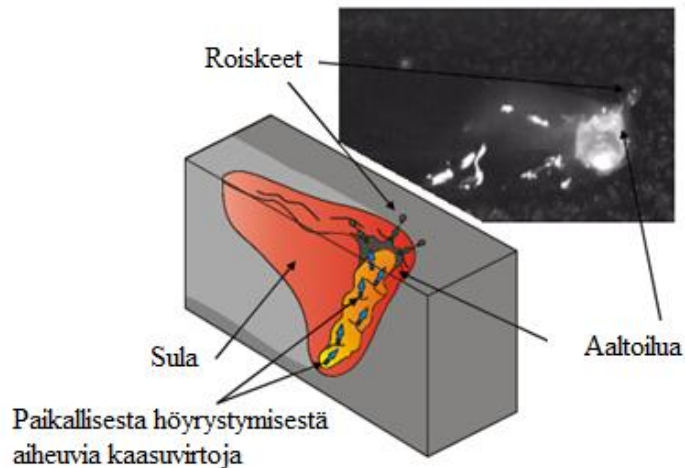
Kuva 16. Roiskeiden suhde hitsausnopeuteen (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368).

Kuvasta 16 voidaan havaita, että roiskeiden muodostuminen hitsausnopeudella 5 m/min tai sen alle, on hyvin kaottista. Hitsausnopeuden kasvaessa roiskeet suuntautuvat yhä enemmän taaksepäin ja pisaroiden koko pienenee. Kuvasta voidaan myös havaita roiskeiden maksimilähtökulman kasvavan hitsausnopeuden kasvaessa. Kuvan hitsauksessa käytettiin TruDisk6002 kiekkolaseria, 400 μm polttopisteen halkaisijaa ja 6 kW lasertehoa. Koe toistettiin myös muilla tehoarvoilla ja eri polttopisteen halkaisijoilla, eikä suhteessa havaittu muutosta. Kuvassa 17 on esitetty roiskeiden maksimilähtökulman suhde tehoon, hitsausnopeuteen ja polttopisteen halkaisijaan. Tästä voidaan havaita maksimilähtökulman kasvavan polttopisteen halkaisijan kasvaessa ja pienentyvän tehon kasvaessa. (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368.)



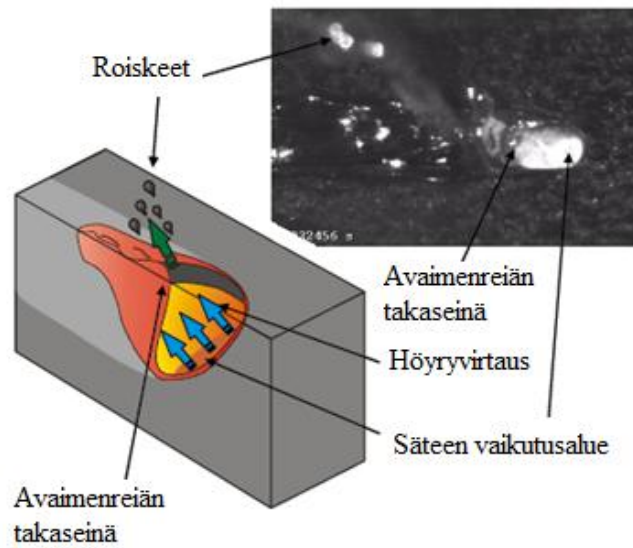
Kuva 17. Roiskeiden lähtökulman suhde tehoon ja polttopisteen halkaisijaan (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368).

Pienillä alle 5 m/min, hitsausnopeuksilla muodostuu avaimenreiän eteen suuri sula. Suuren sulan saa aikaan avaimenreiän ympärillä virtaavan sulan kaaottinen pyörteily, josta virtauksen suunnan havaitseminen on vaikeaa. Pyörteilystä huolimatta avaimenreikä pysyy kohtuullisen symmetrisenä. Hitsattaessa pienillä hitsausnopeuksilla avaimenreiän etureuna on lähes kohtisuora, minkä ansiosta lasersäde pääsee vaikuttamaan syvälle kappaleeseen mahdollistaen syvän tunkeuman. Kuten kuvasta 18 voidaan havaita, on tällainen avaimenreikä altis sulavirtauksen vaihteluille ja avaimenreiän aaltoilulle. Aaltoileva avaimenreikä aiheuttaa säteen epäsäännöllisen absorboitumisen, jonka seurauksena on epäsäännöllinen metallihöyryn virtaus avaimenreikästä. Kaaottiset roiskeet aiheutuvat pyörteilevästä ja epäsäännöllisesti virtaavasta metallihöyrystä. Nopeasti virtaavan metallihöyryn ja sulan välinen kitka vetää sulaa ulos avaimenreikästä aiheuttaen kaaottiset roiskeet. (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368.)



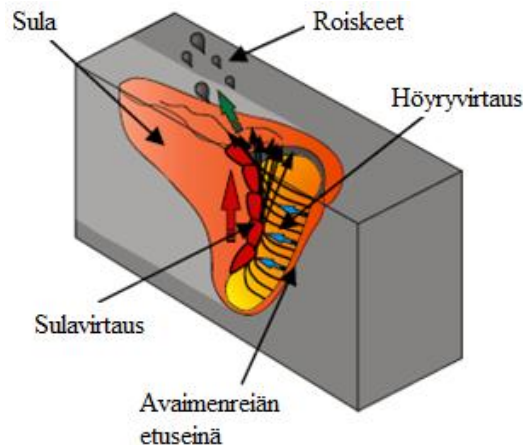
Kuva 18. Avaimenreiän ja sulan muoto pienillä alle 5 m/min hitsausnopeuksilla (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368).

Kun hitsausnopeutta kasvatetaan, kaartuu avaimenreiän takaseinä taaksepäin. Avaimenreiästä nouseva metallihöyry nostaa avaimenreiän takaseinän yläosaan suuren sula-aallon, joka on esitelty kuvassa 19. Aalto oskilloi hitsauksen kulkusuunnan mukaisesti pyrkien liikkeessään eteenpäin sulkemaan avaimenreiän. Nyt roiskeet syntyvät ainoastaan avaimenreiän yläosan sula-aallosta. Kuten aiemmin todettiin, lisääntyy avaimenreiän etureunan kaltevuus hitsausnopeuden kasvaessa. Etureunan kallistuksen kasvaessa kasvaa myös säteen absorptio pinta-ala, jonka ansiosta metallihöyryn dynaaminen paine avaimenreiässä kasvaa. Suurempi dynaaminen paine saa aikaan enemmän roiskeita, jotka suuntautuvat säännöllisemmin samaan suuntaan, höyryvirtauksen mukaan. (Weberpals & Dausinger, 2008, s.370.)



Kuva 19. Avaimenreiän ja sulan muoto 6 – 8 m/min hitsausnopeuksilla (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368).

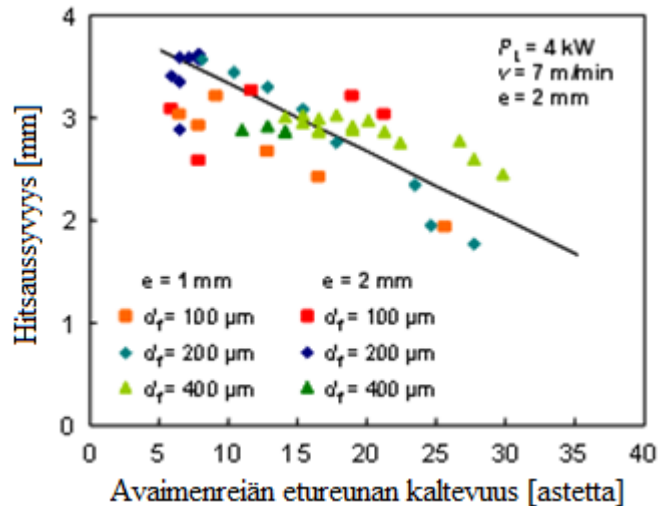
Kun hitsausnopeutta kasvatetaan lisää, kasvaa avaimenreiän etureunan kallistuminen, absorption pinta-ala ja höyryn dynaaminen paine. Tästä johtuen roiskeiden määrä kasvaa nopeuden kasvaessa, ja niiden suunta muuttuu avaimenreiän etureunan kallistuksen muuttuessa. Roiskeiden suunta ei kuitenkaan määräydy pelkästään metallihöyryn suunnan mukaan. Nouseva metallihöyry saa sulan virtaamaan avaimenreiän takaosassa kuvan 20 mukaisesti, jolloin syntyvien roiskeiden suunta määräytyy sekä sulan, että höyryn virtaussuunnan yhteisvaikutuksesta. (Weberpals & Dausinger, 2008, s.370.)



Kuva 20. Roiskeiden suunnan syntymekanismi (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368).

6.3.2 Roiskeisiin vaikuttaminen polttopisteen asemaa muuttamalla

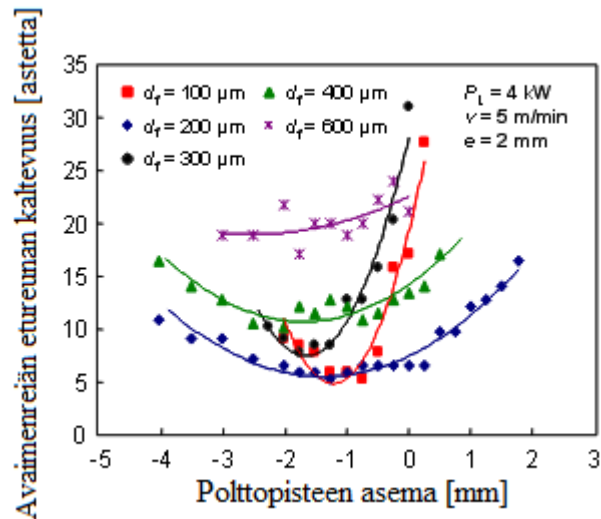
Weberpals et al. tutkimusten perusteella on huomattu, että tunkeuman ollessa maksimissaan roiskeiden lähtökulma ja määrä on pienimmillään. Kuten kuvasta 21 voidaan todeta, saavutetaan suurin tunkema, kun avaimenreiän etuseinä on mahdollisimman vähän kallistunut. (Weberpals et al., 2011, s. 7.)



Kuva 21. Hitsaussyvyuden riippuvuus avaimenreiän etuseunan kaltevuudesta (Weberpals et al., 2011, s. 7).

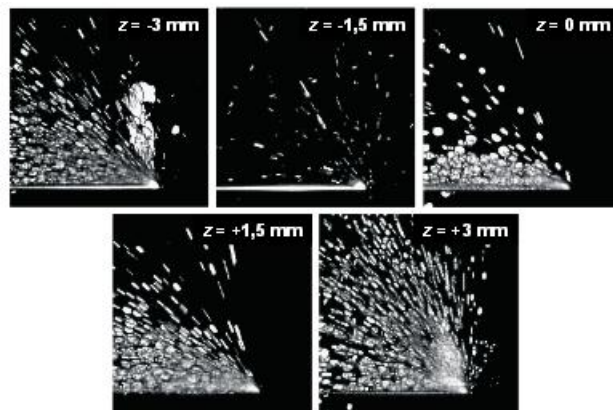
Kuten aiemmin todettiin, avaimenreiän etuseunan kallistumiseen vaikuttaa teho, hitsausnopeus ja fokusointiparametrit. Pidettäessä teho ja hitsausnopeus vakiona voidaan tarkastella fokusointiparametrien vaikutusta avaimenreiän etuseunan kallistumiseen. Kuvassa 22 on esitetty avaimenreiän etuseunan kallistuminen eri säteen halkaisijoilla ja kuinka etuseunan kallistus muuttuu polttopisteen aseman suhteen. Voimme huomata, että Weberpals et al., (2011) tutkimuksissa etuseunan kaltevuuden minimi löytyy polttopisteen aseman ollessa 1.25–1.75 mm kappaleen pinnan alapuolella. Pienin etuseunan kallistus saavutetaan säteen halkaisijan ollessa 100 μm ja lisäksi voidaan huomata kallistuksen kasvavan säteen halkaisijan kasvaessa. Käytettäessä säteen halkaisijoita 100 μm ja 300 μm, avaimenreiän etuseunan kaltevuus muuttuu nopeammin polttopisteen aseman muuttuessa kuin muilla säteen halkaisijoilla. Tämä johtuu siitä, että säteen halkaisijoilla 100 ja 300 μm käytetty säteen fokusointikulma on suurempi kuin säteen halkaisijoilla 200, 400 ja 600 μm. Tutkimuksessa huomattiin, että polttopisteen aseman vaikutus on kriittisempi suurilla fokusointikulmilla, jolloin säteen rayleigh -pituus pienenee ja polttopisteen aseman

poikkeutus vaikuttaa nopeammin säteen halkaisijaan kappaleen pinnalla. (Weberpals et al., 2011, s. 7.)



Kuva 22. Polttopisteen aseman ja avaimenreiän etureunan kaltevuuden suhde eri säteen halkaisijoilla (Weberpals et al., 2011, s. 7).

Kuvassa 23 on esitetty polttopisteen aseman vaikutusta roiskeisiin. Kuvan hitsauskokeessa käytettiin TruDisk6002 kiekkolaseria, 6 kW tehoa, 7 m/min hitsausnopeutta ja 200 μm säteen halkaisijaa. Kuvasta havaitaan, että polttopisteen asemalla -1.5 roiskeita ei juuri esiinny ja polttopisteen asemilla -3 ja +3 roiskeiden määrä on huomattava. (Weberpals et al., 2011, s. 7.)



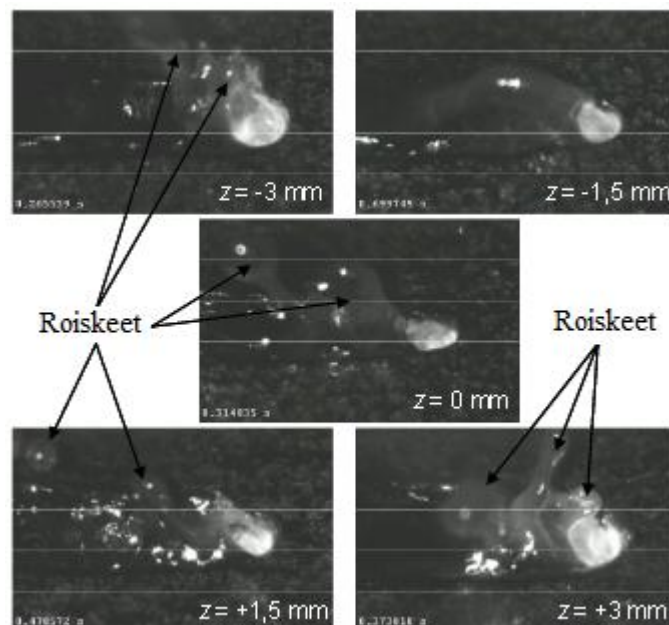
Kuva 23. Polttopisteen aseman vaikutus roiskeisiin (Weberpals et al., 2011, s. 3).

6.3.3 Polttopiste hitsattavan kappaleen pinnalla ($z = 0$ mm)

Polttopisteen aseman ollessa kappaleen pinnalla, työntyy avaimenreiän takaseinä voimakkaasti taaksepäin, aiheuttaen suuren sula-aallon avaimenreiän takaseinän yläosaan. Höyrystyvä metalli aiheuttaa sula-aallon edestakaisen liikkeen joka pyrkii sulkemaan avaimenreiän aallon liikkeessa hitsaussuuntaan. Sulan liikkeessa eteenpäin se törmää avaimenreistä nousevaan metallihöyrystyskuun. Höyrystyskuun törmäävä sula lentää höyrystyskuun suuntaisesti, aiheuttaen ajoittaiset roiskeet. (Weberpals et al., 2011, s. 8.)

6.3.4 Polttopiste hitsattavan kappaleen pinnan yläpuolella ($z > 0$ mm)

Kun polttopisteen asema nostetaan kappaleen pinnan yläpuolelle, kallistuu avaimenreiän etureuna enemmän ja saavutettava tunkeuma pienenee. Lisäksi avaimenreiän yläpää avautuu suuremmaksi. Näin ollen avaimenreistä nouseva metallihöyry pääsee vaikuttamaan suurempaan pinta-alaan avaimenreiän takaseinällä. Tämä puolestaan aiheuttaa enemmän aaltoilua sekä avaimenreiän etu-, että takareunassa. Lisääntynyt aaltoilu lisää sulan roiskekäyttäytymistä. Avaimenreiän avautuminen ja lisääntyneet roiskeet voidaan havaita kuvasta 24. (Weberpals et al., 2011, s. 8.)



Kuva 24. Roiskekäyttäytyminen eri polttopisteen asemilla (Weberpals et al., 2011, s. 9).

6.3.5 Polttopiste hitsattavan kappaleen pinnan alapuolella ($z < 0$ mm)

Polttopisteen aseman siirtyessä hitsattavan kappaleen pinnan alapuolelle, tunkeuman syvyys kasvaa kunnes polttopisteen asema saavuttaa tietyn aseman. Tässä kyseisessä tutkimuksessa polttopisteen aseman raja-arvo oli $z = -1.5$ mm ja myös avaimenreiän etureunan kaltevuus pienentyi kyseiseen raja-arvoon asti. Tämä vähentää sulan aaltoilua ja avaimenreikä muotoutuu lähes symmetriseksi ympyräksi. Höyrystyvän metallin aiheuttama kitkavoima on edelleen olemassa, mutta sulamassa jakautuu nyt tasaisesti avaimenreiän ympärille eikä roiskeita juurikaan esiinny. (Weberpals et al., 2011, s. 9.)

Polttopisteen aseman siirtyessä syvemmälle kappaleeseen ($z < -1.5$ mm) pienenee saavutettava tunkeuma ja avaimenreiän etureuna alkaa kallistua lisää. Etureunan kallistuminen aiheuttaa aaltoilua sulassa ja avaimenreiän muoto alkaa näyttää samanlaiselta kuin polttopisteen ollessa kappaleen pinnalla tai sen yläpuolella. Tällöin prosessista tulee epävakaampi ja roiskeiden määrä kasvaa. (Weberpals et al., 2011, s. 9.)

6.3.6 Pohdintaa

Tekstissä käsitellään pääsääntöisesti roiskeiden syntymekanismeja ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Suurimmassa osassa hitsejä ei roiskeisuus muodostu ongelmaksi, kuitenkin työssä pyrittiin selvittämään roiskeiden syitä ja niihin vaikuttavia tekijöitä silloin kun roiskeita esiintyy. (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368; Weberpals et al., 2011, s. 9.)

Weberpals et al. (2011) ja Vänskä et al. (2013) tutkimuksista huomattiin, että polttopisteen asema vaikuttaa avaimenreiän muotoon ja tunkeumaan, riippuen säteen fokuosoinnista. Avaimenreiän muodon muutokset taas aiheuttavat muutoksia sekä metallihöyryn että sulan dynamiikassa. Näiden tekijöiden roolit roiskeiden syntymekanismissa ovat ilmeisiä. Polttopisteen aseman raja-arvot ovat riippuvaisia laser- ja hitsausparametrien lisäksi hitsattavasta materiaalista ja materiaalin paksuudesta. Tästä syystä tutkimuksissa todettuja polttopisteen aseman raja-arvoja ei sellaisenaan pysty sellaisenaan soveltamaan muihin hitsauskohteisiin. Tutkimuksista havaitut raja-arvot antavat kuitenkin suuntaa hitsauksessa syntyvien roiskeiden ja polttopisteen aseman suhteesta. (Weberpals & Dausinger, 2008, s.368; Weberpals et al., 2011, s. 9.)

7 HITSAUSKOKEET

Tämän työn hitsauskokeet suoritettiin osana suurempaa hitsauskoesarjaa. Hitsauskokeissa hitsattiin S355 rakenneterästä 10 kW kuitulaserilla, varioiden lasertehoa, hitsausnopeutta, polttopisteen asemaa, suojakaasua ja plasmapuhallusta. Hitsauskoesarjassa hitsattiin hitsejä päittäisliitoksina ja päällehitsauksina. Kokeista poimittiin tähän työhön sopivia hitsejä, joissa ainoana muuttuvana parametrina on polttopisteen asema. Kaikki työhön valitut hitsit hitsattiin ilman suojakaasua ja prosessiin stabiloimiseksi kokeissa käytettiin plasmapuhallusta, jonka kaasuna oli paineilma. Tässä työssä polttopisteen aseman vaikutusta hitsiin arvioitiin sekä silmämääräisesti, että makrohieiden ja makroskooppikuvien perusteella. Tutkittavina kohteina olivat hitsin geometria, lämpövaikutukset, tunkeuma ja roiskeet.

7.1 Koejärjestelyt

Tässä kappaleessa esitellään tämän työn hitsauskoejärjestelyt, käytettävä laitteisto ja hitsattava materiaali. Kappaleessa esitellään myös hitseille tehdyt jatkotoimenpiteet ja tutkimusmenetelmät.

7.1.1 Hitsauskoejärjestelyt

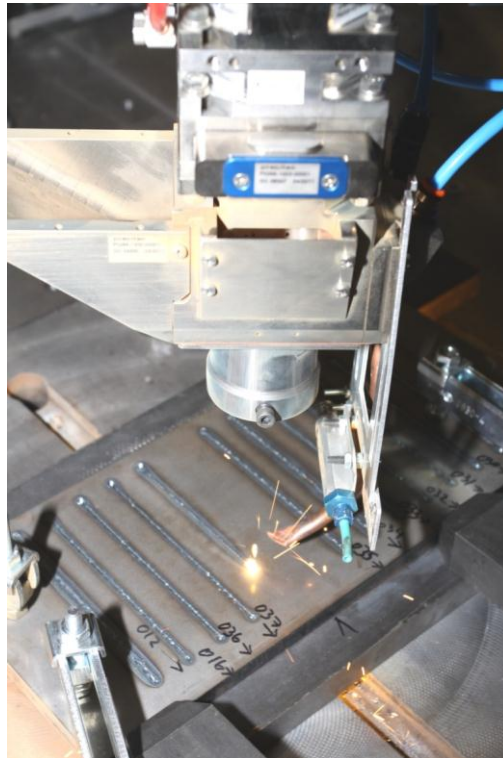
Tämän työn hitsauskokeissa hitsattavana materiaalina oli S355 (EN-10025-2) rakenneteräs. Materiaalin tarkemmat ominaisuudet ja seostus on esitelty taulukossa 1. Hitsauskokeet suoritettiin ainepaksuuksille 8, 10 ja 12 mm päällehitsauksena. Hitsauskokeissa käytettiin hitsauslaitteistona IPG Photonics YLS 10000 kuitulaseria ja Precitec YW 30 hitsauspäättä.

Taulukko 1. Hitsattavan materiaalin seostus, hiiliequivivalentti (CEV), halkeiluherkkyys (UCS, HCS) ja mekaaniset ominaisuudet (Ruukki, 2013).

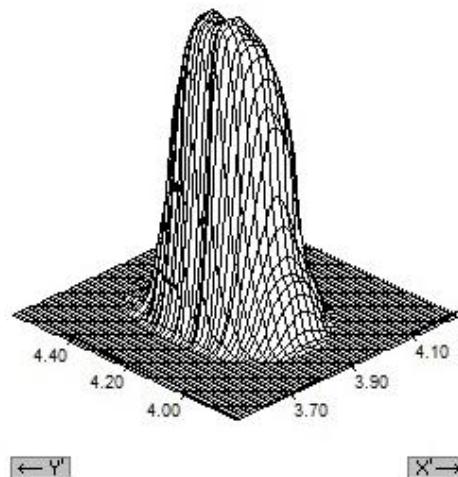
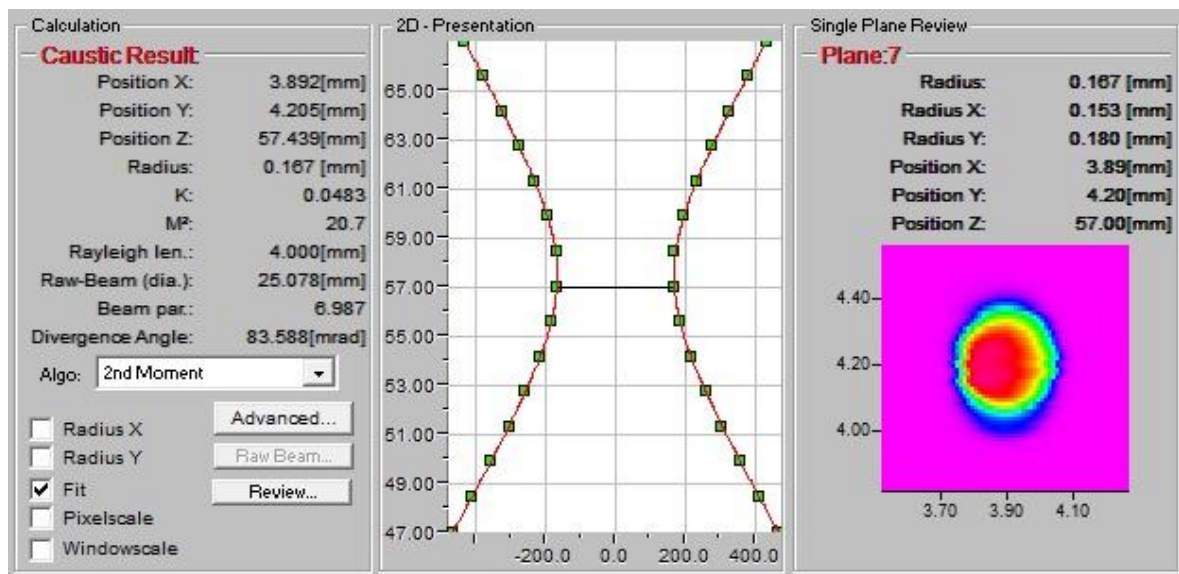
C, max	Si	Mn	S, max	P, max	Cu, max	N, max	CEV max.	Myötölujuus [MPa]	Murtolujuus [MPa]	HCS
0,20 – 0,24	0,55	1,60	0,025 – 0,035	0,025 – 0,035	0,55	0,012	0,45	345 – 355	470 – 630	15 – 19,1

Hitsauspää sisälsi 200 mm kollimointilinssin ja 300 mm fokusointilinssin. Hitsauspään tuottaman polttopisteen halkaisija oli 334 µm ja säteen BPP oli 7 mm*mrاد. Hitsauspää oli

kiinnitettynä Motoman hitsausrobottiin ja hitsauspään alapuolelle oli kiinnitetty paineilma suutin plasmanpoistoa varten. Hitsattavia kappaleita myös jäähdytettiin paineilmalla hitsien välissä, testien keskinäisten lämpövaikutusten minimoimiseksi. Hitsauskokeissa ei käytetty suojakaasuja. Kuvassa 25 on esitelty päällehitsausten hitsauskoejärjestelyt ja kuvassa 26 on esitelty käytettävän säteen tehojakauma ja sädeanalyysi. Hitsauskokeissa ei huomioitu optiikan mahdollista lämpenemistä ja sen vaikutusta säteeseen.



Kuva 25. Hitsauskoejärjestelyt.



Kuva 26. Sädeanalyysi ja säteen tehojakauma polttopisteessä.

Tässä työssä käytettyjen hitsausten parametrit on esitelty taulukossa 2. Kyseiset hitsit valittiin kolmesta eri materiaalivahvuudesta. Hitsit valittiin hitsausparametrien perusteella siten, että hitsin muut parametrit ovat valitussa sarjassa vakiot ja ainoastaan polttopisteen asema muuttuu. Tällöin hitsissä tapahtuvia muutoksia pystytään analysoimaan suhteessa polttopisteen asemaan.

Taulukko 2. Valittujen hitsaussarjojen hitsausparametrit ja hitsien numerot.

	fpp	paksuus	teho	nopeus
nro	[mm]	[mm]	[kW]	[m/min]
181	0	8	6	1
155	-2	8	6	1
194	-4	8	6	1
197	-6	8	6	1
142	0	10	10	2,5
137	-2	10	10	2,5
149	-4	10	10	2,5
268	0	12	8	1,57
272	-2	12	8	1,57
247	-3	12	8	1,57
246	-5	12	8	1,57

7.1.2 Hitsien jatkojalostus tutkimusta varten

Hitseistä tehtiin makrohieet, hitsin pituuden puolivälistä, Lappeenrannan teknillisen yliopiston metallurgian laboratoriossa. Tämän jälkeen hiotut poikkileikkaukset kuvattiin makroskoopin avulla, hitsin geometrian ja lämpövaikutusten tutkimista varten. Hitsien tarkempaan analysointiin käytettiin apuna Carl Zeiss Axiovision kuvananalysointiohjelmaa, sekä Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelmaa. Kuvista mitattiin hitsien leveydet sekä kuvasta että juuresta kuvapisteinä Axiovision ohjelman avulla. Hitsin pinta-ala ja lämpövaikutusalueen (HAZ engl. Heat Affected Zone) pinta-ala mitattiin kuvapisteinä. Kuvapisteeet muutettiin millimetreiksi ja neliömillimetreiksi kuvan referenssimittan ja Excel taulukkolaskentaohjelman avulla. Roiskeita ja sulan stabiliteettia arvioitiin silmämääräisesti koekappaleista. Roiskeiden määrää arvioitiin vertaamalla kyseisen sarjan kappaleita toisiinsa. Kappaleista harjattiin teräsharjalla irtonaiset roiskeet ennen hitsien arviointia. Kaikki kuvat hitseistä mittoineen löytyvät liitteistä I ja II.

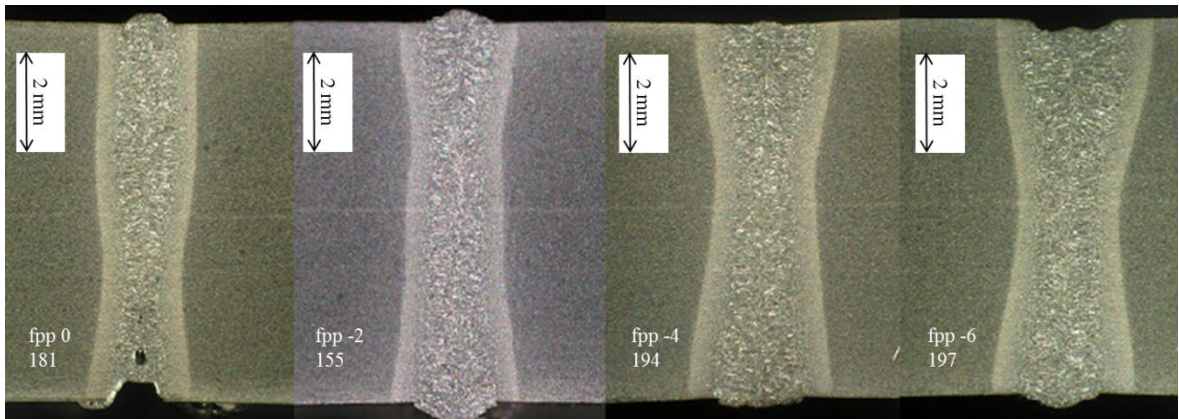
8 TULOKSET

Hitsauskoesarjat on jaettu kolmeen osaan materiaalipaksuuden mukaan. Koska materiaalinpaksuus voidaan myös nähdä yhtenä parametrina, arvioidaan eri materiaalinpaksuuksia erikseen. Tällöin polttopisteen asema on ainoa muuttuva parametri ja sen vaikutusten arviointi helpottuu.

8.1 Hitsauskoesarja 8 mm rakenneteräkselle

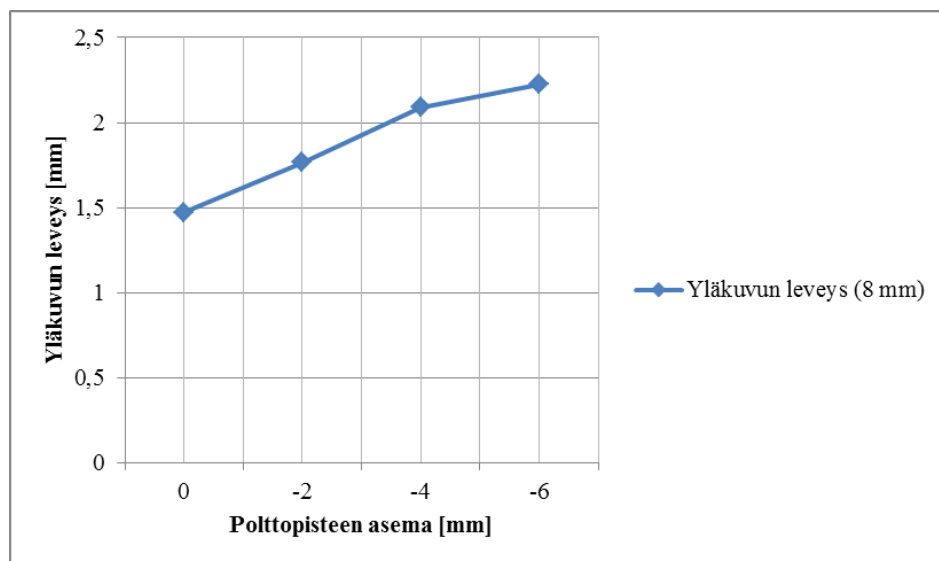
Hitsauskoesarja, joka suoritettiin 8 mm rakenneteräkselle, on aineenpaksuudeltaan koko koesarjan ohuin. Kyseisessä hitsaussarjassa polttopisteen aseman arvoina käytettiin 0, -2, -4 ja -6 mm, muiden parametrien pysyessä vakiona. Teho oli 6 kW ja hitsausnopeus 1 m/min. Kyseisessä koesarjassa kaikki hitsit olivat läpätunkeumahitsejä, jolloin polttopisteen aseman vaikutusta tunkeuman syvyyteen ei pystytä arviomaan. Tämän sarjan tutkimus keskitettiin hitsin geometriaan ja roiskeisiin.

Kuvasta 27 voidaan selvästi havaita säteen muotoa mukaileva hitsin poikkileikkauksen muoto, etenkin polttopisteen asemilla -2, -4 ja -6 mm. Säde suppeni näillä polttopisteen asemilla kappaleen pinnan ja polttopisteen aseman välillä. Siirrettäessä polttopisteen asemaa syvemmälle kappaleen sisäpuolelle, huomataan hitsin poikkileikkauksen kartiomaisen muodon siirtyvän myös alaspäin. Polttopisteen alapuolella hitsin geometria mukailee edelleen säteen muotoa. Polttopisteen alapuolella säde laajenee ja se on havaittavissa myös hitsin geometriassa. Poikkeuksena on polttopisteen asema 0 mm, millä säteen muotoa pysty ei hitsistä selvästi havaitsemaan. Lisäksi polttopisteen asemalla 0 mm jää hitsi juuren puolelta vajaaksi, mikä voi johtua avaimenreiän hetkellisestä romahtamisesta.



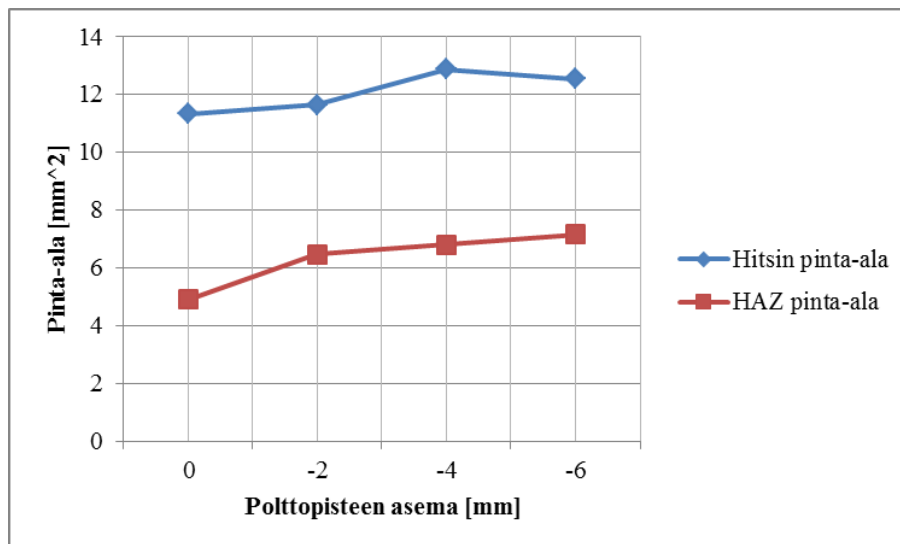
Kuva 27. Hitsauskoesarja 8 mm rakenneteräkselle polttopisteen asemilla 0, -2, -4 ja -6 mm (vasemmalta oikealle).

Kuten aiemmin todettiin, muuttuu säteen poikkileikkauksen halkaisija kappaleen pinnalla polttopisteen aseman muuttuessa. Polttopisteen aseman ollessa asetettuna kappaleen pinnalle on polttopisteen halkaisija kappaleen pinnalla pienin mahdollinen. Kuvassa 28 on esitetty hitsin kuvun leveys suhteessa polttopisteen asemaan. Säteen halkaisijan suurentuessa kappaleen pinnalla tulisi myös kuvun leventyä, lähes samassa suhteessa. Kuten kuvaajasta voidaan havaita, käyttäytyy hitsin kuvun leveys oletetulla tavalla. Tässä hitsauskoesarjassa polttopisteen asemaa muutetaan tasaisesti 2 mm askelluksella ja tästä syystä voidaan havaita kuvun leveyden kasvavan lähes lineaarisesti.



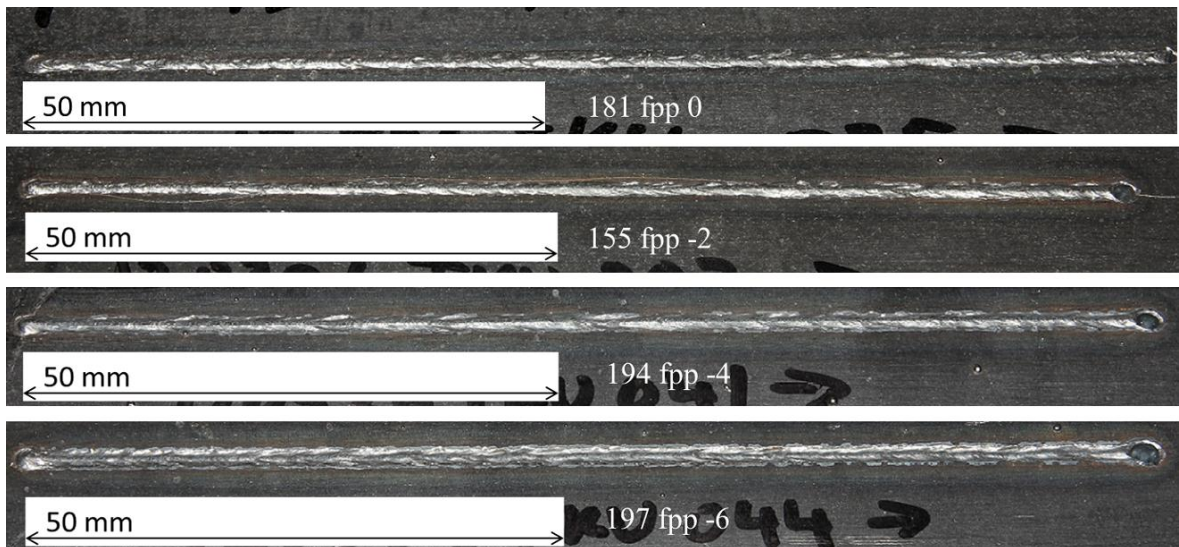
Kuva 28. Kuvun leveys suhteessa polttopisteen asemaan.

Tarkastelemalla hitsin pinta-alaa ja HAZ pinta-alaa, voidaan arvioida kuinka polttopisteen asema vaikuttaa syvemmällä hitsin kokoon. Lisäksi nähdään vaikuttaako polttopisteen asema kappaleeseen kohdistuviin lämpövaikutuksiin. Kuvassa 29 on esitelty kyseiset pinta-alat suhteessa polttopisteen asemaan. Kuvasta voidaan havaita hitsin pinta-alan ensin pysyvän lähes vakiona. Kun polttopisteen asema siirretään syvemmälle kappaleen sisäpuolelle, kasvaa hitsin pinta-ala aluksi ja sitten taas pienenee. Muutokset hitsin pinta-alaissa ovat kuitenkin varsin pieniä. Hitsaussarjan suurimman ja pienimmän pinta-alan välinen erotus on noin $1,5 \text{ mm}^2$, eli hitsin pinta-ala kasvaa noin 13,7 %. HAZ pinta-ala kasvaa lähes lineaarisesti suhteessa polttopisteen asemaan. Polttopisteen aseman ansiosta HAZ pinta-ala kasvaa tässä koesarjassa noin 30 %.



Kuva 29. Hitsin- ja HAZ pinta-ala suhteessa polttopisteen asemaan.

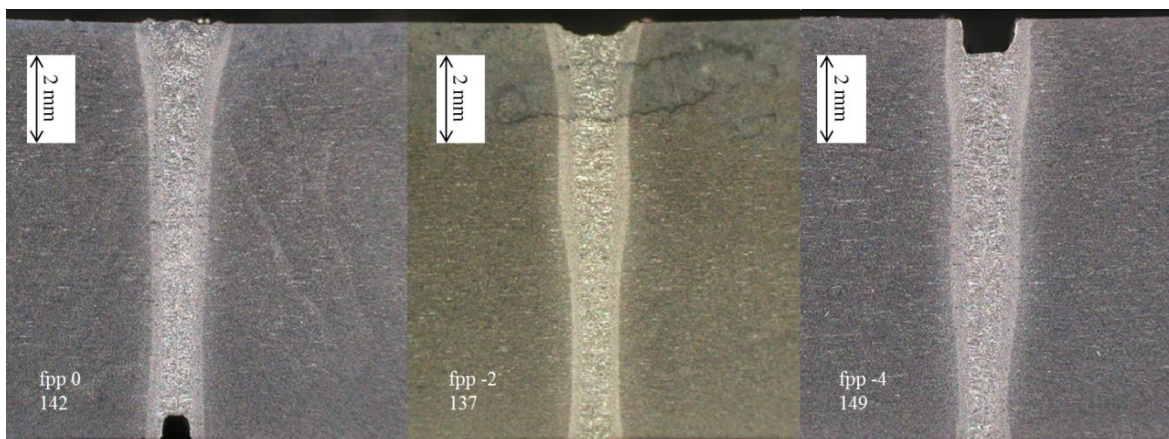
Kuvassa 30 on esitelty 8 mm hitsauskoesarjan kuvat ja roiskeet. Kuvasta havaitaan, ettei hitseissä esiinny juurikaan roiskeita millään polttopisteen asemalla. Ainostaan polttopisteen asemilla -4 ja -6 mm on havaittavissa muutama yksittäinen roiske. Kupujen silmämääräisen tarkastelun perusteella hitsit näyttävät hyviltä. Kupu on tasainen eikä siinä näy juurikaan aaltoilua, ainoa muutos hitsien välillä on kuvun madaltuminen. Hitsien kupujen rauhallinen käyttäytyminen, kertoo sulan olleen melko stabiili hitsauksen aikana. Tarkemmat kuvat hitsien kuvuista löytyy liitteestä II.



Kuva 30. Hitsien kuvat ja roiskeet eri polttopisteen asemilla 0, -2, -4 ja -6 mm (ylhäältä alas).

8.2 Hitsauskoesarja 10 mm rakenneteräkselle

Muista hitsauskoesarjoista poiketen 10 mm ainepaksuuden sarjassa on vain kolme hitsiä. Koesarjassa polttopisteen asema sai arvot 0, -2 ja -4 mm. Teho oli asetettu arvoon 10 kW ja hitsausnopeus 2,5 m/min. Myös kaikki tämän koesarjan hitsit olivat läpätunkeumahitsauksia. Hitsaussarjan hitsien poikkileikkaukset on esitelty kuvassa 31. Hitsin poikkileikkauksen geometria näyttää noudattavan jälleen säteen muotoa, kuten 8 mm ainepaksuuden hitseissä. Poikkeuksena on jälleen polttopisteen asema 0 mm, missä hitsin geometria on hitsin yläosasta lähes suorakaiteen muotoinen, eikä säteen divergenssiä ole havaittavissa. Kyseissä hitsauskoesarjassa käytettävä laserteho on koko hitsauskoesarjan suurin, jolloin kyseisessä hitsauskoesarjassa optiikan lämpeneminen on voinut aiheuttaa polttopisteen aseman siirtymisen ylöspäin, aiheuttaen poikkeuksellisen hitsin geometrian polttopisteen ollessa asetettuna kappaleen pinnalle. Koska optiikasta tehty sädeanalyysi ei ota huomioon optiikan lämpenemistä, ei epätavallista hitsin geometriaa voida varmuudella laittaa optiikan lämpenemisen syyksi.

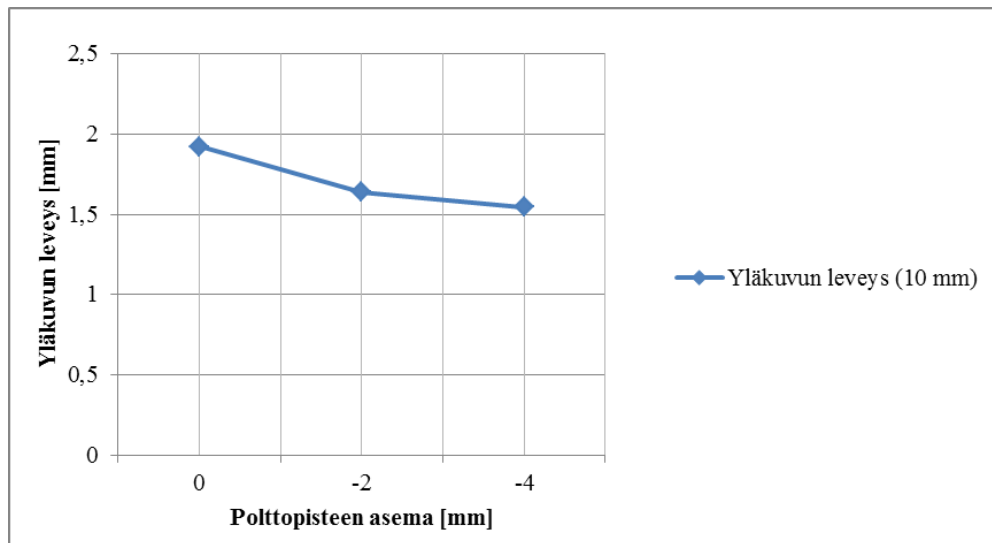


Kuva 31. Hitsauskoesarja 10 mm rakenneteräkselle polttopisteen asemilla 0, -2 ja -4 mm (vasemmalta oikealle).

Muilla polttopisteen asemilla voidaan hitseistä havaita polttopisteen aseman läheisyyteen muodostuva tiimalasimainen muoto. Muoto siirtyy polttopisteen aseman mukana alaspäin, mikä näkyy selvästi vertaillen polttopisteen asemia -2 ja -4 mm. Lisäksi kuvasta 31 havaitaan hitsin juuren jäävän vajaaksi polttopisteen asemalla 0 mm, ja toisaalta kuvat jäävät vajaiksi polttopisteen asemilla -2 ja -4 mm. Polttopisteen asemalla -4 mm havaittava kuvun vajoitus voi johtua avaimenreiän hetkellisestä romahtamisesta, koska hitsin kupu ei koko matkalta ollut vajaa, kuten voidaan havaita hitsien kuvuista kuvassa 31.

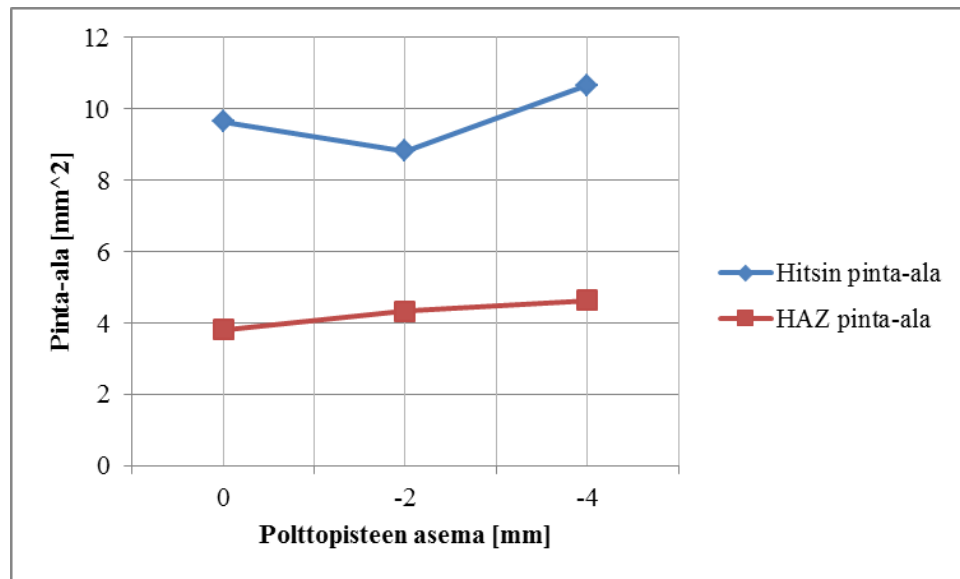
Polttopisteen asemalla -2 hitseissä havaitaan hieman roiskeita ja sulan aaltoilua, joka voi olla syynä vajaan kupuun. Polttopisteen asemalla 0 mm esiintyvän juuren vajoituksen syy on tuntematon.

Tutkittaessa hitsien kupujen leveyttä, huomataan tässä koesarjassa jotain muista koesarjoista poikkeavaa. Kun polttopisteen asemaa siirretään kappaleen sisälle, pitäisi kappaleen pintaan osuvan säteen halkaisijan ja hitsin kuvun leveyden kasvaa. Tässä koesarjassa tapahtuu kuitenkin jotain päinvastaista. Kuten kuvasta 32 voimme havaita, pienenee hitsin kuvun leveys, kun polttopisteen asemaa siirretään kappaleen sisäpuolelle. Siirrettäessä polttopisteen asema kappaleen pinnalta asemaan -4 mm, pienenee kuvun leveys 19,5%. Syytä tähän poikkeavaan käyttäytymiseen ei tiedetä.



Kuva 32. Kuvun leveys suhteessa polttopisteen asemaan.

Tarkasteltaessa hitsin pinta-alaa, sekä HAZ-pinta-alaa huomataan jälleen jotakin poikkeavaa. Kuvassa 33 on esitelty nämä pinta-alat, joista voidaan huomata HAZ-pinta-alan noudattavan odotettua nousevaa trendiä. HAZ-pinta-alan muutos näyttää tässä koesarjassa olevan lähes lineaarinen. Tämän koesarjan minimi ja maksimi HAZ-pinta-ala arvon prosentuaalinen muutos on noin 21 %. Tarkasteltaessa taas hitsin pinta-alaa huomaamme sen ensin pienevän, kun polttopisteen asemaa siirretään kappaleen sisäpuolelle ja sitten taas kasvavan. Pinta-alan pieneneminen voi johtua absorptio paranemisesta polttopisteen aseman siirtyessä kappaleen sisäpuolelle. Siirrettäessä polttopisteen asemaa edelleen asemaan -4 mm näyttää sula jälleen kasvavan, mikä voi johtua prosessiin tehokkuuden heikkenemisestä ja höyrystymisen pienentymisestä. Poikkeavan hitsin geometrian syyn selvittäminen vaatisi kuitenkin lisätutkimuksia ja esimerkiksi tarkempaa sädeanalyysiä, joka huomioisi myös optiikan lämpenemisen. Syy poikkeaviin tuloksiin voi löytyä myös muualta.



Kuva 33. Hitsin- ja HAZ pinta-ala suhteessa polttopisteen asemaan.

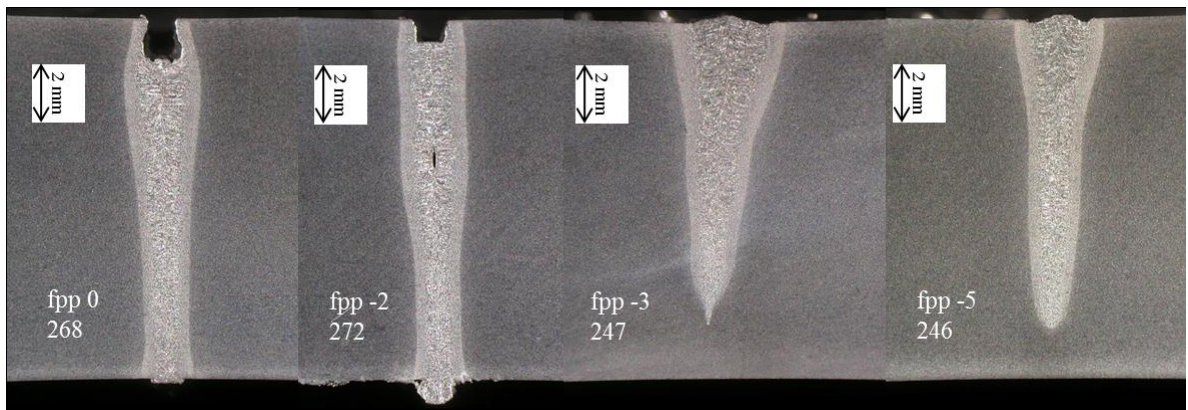
Kuvassa 34 on esitelty 10 mm hitsauskoesarjan kuvat ja roiskeet. Kuvasta havaitaan, ettei polttopisteen asemalla 0 mm esiinny ollenkaan roiskeita. Polttopisteen asemilla -2 mm ja -4 mm, roiskeita esiintyy vähän. Kuvien tarkemman tarkastelun perusteella nähdään polttopisteen asemalla -2 mm esiintyvän roiskeita tässä sarjassa eniten. Samalla polttopisteen asemalla esiintyy myös muihin hitseihin verrattuna enemmän sulan aaltoilua. Tarkemmat kuvat hitsien kuvuista löytyvät liitteestä II.



Kuva 34. Hitsien kuvat ja roiskeet eri polttopisteen asemilla 0, -2 ja -4 mm (ylhäältä alas).

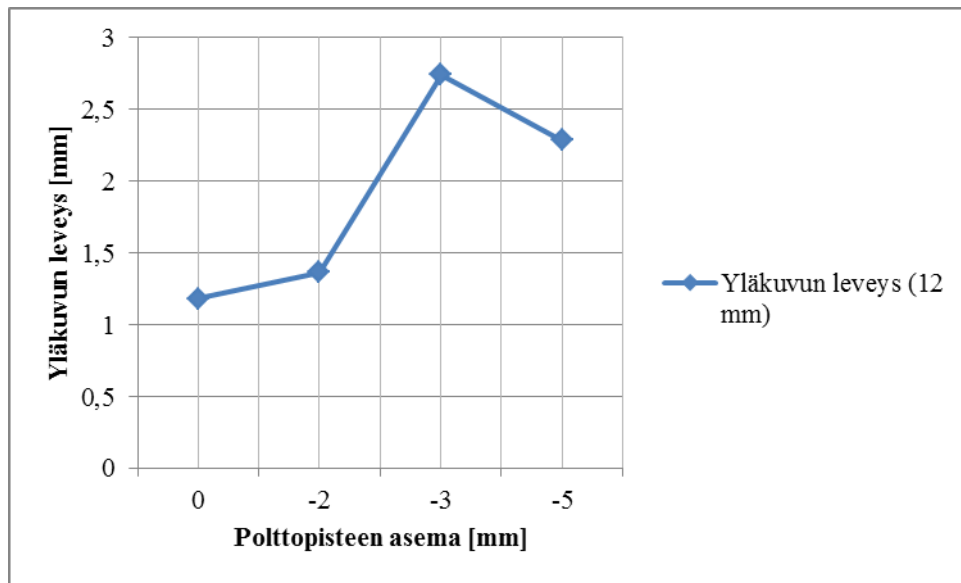
8.3 Hitsauskoesarja 12 mm rakenneteräkselle

Hitsauskoesarja 12 mm teräkselle oli tämän tutkimuksen ainoa koesarja missä kaikki hitsit eivät olleet läpitukeymahitsejä. Tämän ansiosta myös hitsien tunkeumaa suhteessa polttopisteen asemaan pystyttiin arvioimaan. Koesarjassa käytetyt polttopisteen aseman arvot olivat 0, -2, -3 ja -5 mm. Lasertehto oli asetettu arvoon 8 kW ja hitsausnopeus 1.57 m/min. Hitsaussarjan hitsit on esitelty kuvassa 35. Kuvasta havaitaan jälleen säteen muotoa seuraileva hitsin geometria. Kuten kuvasta havaitaan, tunkeuma jää vajaaksi polttopisteen asemalla -3 mm. Hitsauskoesarjasta huomataan kuinka pienellä polttopisteen aseman muutoksella hitsauksen lopputulos voi muuttua radikaalisti. Yhden millimetrin muutos polttopisteen asemassa aikaansaa hitsiin vajaan tunkeuman.. Suppeneva kartiomainen säde kappaleen yläpinnalla on jälleen selvästi havaittavissa polttopisteen asemilla -3 ja -5 mm.



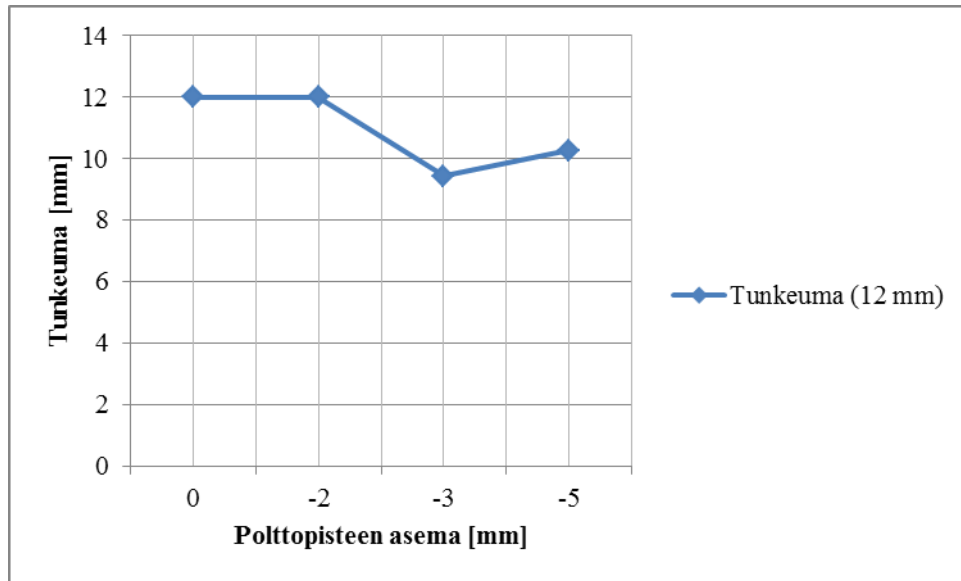
Kuva 35. Hitsauskoesarja 12 mm rakenneteräkselle, polttopisteen asemilla 0, -2, -3 ja -5 (vasemmalta oikealle).

Tarkasteltaessa jälleen hitsin kupua kuvasta 36, voimme havaita sen leveyden kasvavan polttopisteen aseman suhteen muita koesarjoja radikaalimmin. Siirrettäessä polttopisteen asemaa arvosta 0 mm arvoon -3 mm, kasvaa kuvun leveys 128 %, eli yli kaksinkertaiseksi. Suurin kuvun leveyden muutos tapahtuu polttopisteen aseman muuttuessa arvosta -2 mm arvoon -3 mm. Tällä välillä myös hitsi muuttuu läpitukeymahitsauksesta vajaatunkeuma hitsaukseen. Tällä muutoksella havaitaan olevan selkeästi vaikutusta hitsin poikkileikkauksen geometriaan. Hitsin muuttuessa vajaatunkeumahitsaukseksi ei sula pääse mahdollisesti poistumaan hitsistä juuren puolelta, mikä osaltaan selittää suurentunutta kupua.



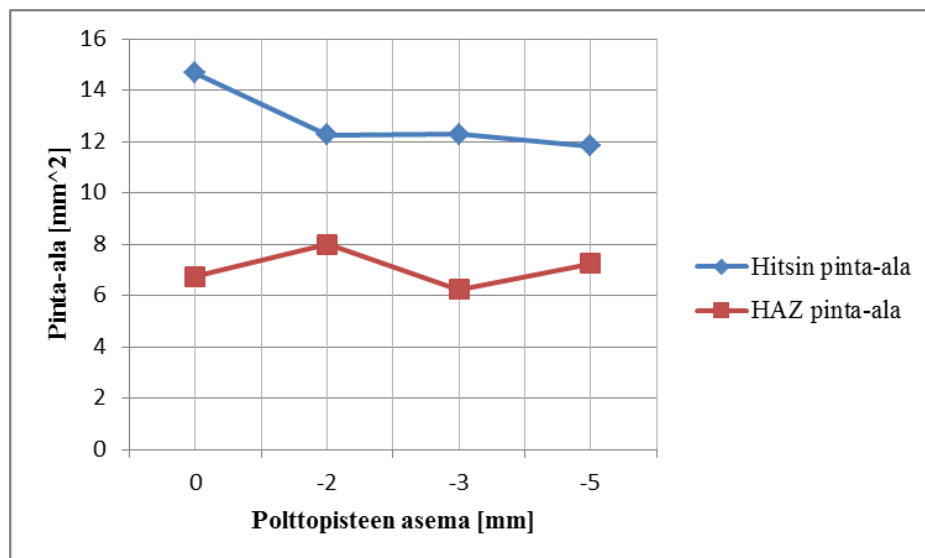
Kuva 36. Kuvun leveys suhteessa polttopisteen asemaan.

Tässä hitsauskoesarjassa pystyttiin tutkimaan myös polttopisteen aseman vaikutusta tunkeumaan. Kuvassa 37 on esitetty tunkeuman suhde polttopisteen asemaan, mistä havaitaan hitsauksen olevan läpätunkeumahitsausta polttopisteen asemilla 0 mm ja -2 mm. Siirrettäessä polttopisteen asema syvemmälle kappaleeseen ei laserin teho enää riitä läpätunkeumahitsaukseen. Siirrettäessä polttopisteen asema edelleen syvemmälle kappaleen sisälle, kasvaa hitsin tunkeuma jälleen. Tunkeuman havaitaan käyttäytyvän osittain työn teoriaosiossa havaitulla tavalla. Kuitenkin hitsauksen muuttuminen vajaatunkeumahitsaukseksi kesken hitsaussarjan vaikeuttaa tulosten analysointia. Lisäksi myös tässä koesarjassa on havaittavissa viitteitä optiikan lämpenemisestä. Tarkastellessa juurikuvia (liite III) polttopisteen asemilla -3 ja -5, havaitaan hitsien olevan ensin läpätunkeumahitsausta ja muuttuvan myöhemmin vajaatunkeumahitsaukseksi. On siis mahdollista, että polttopisteen asema muuttuu hitsauksen aikana.



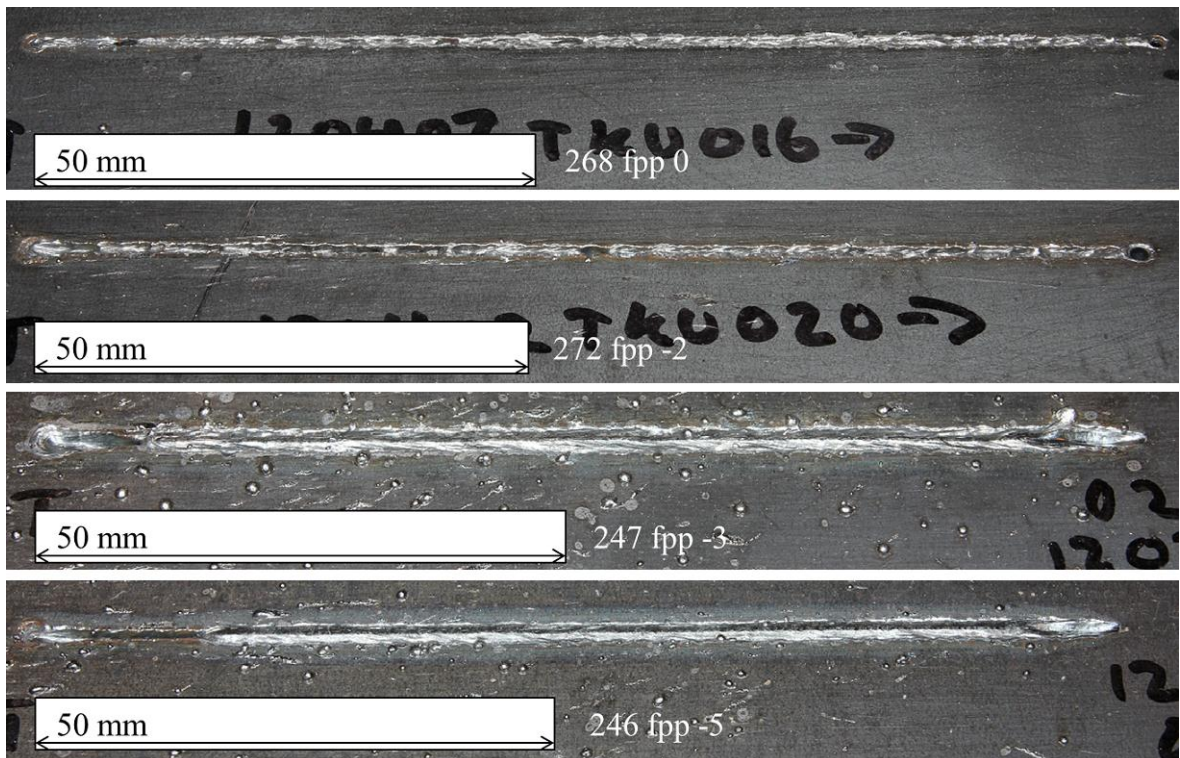
Kuva 37. Tunkeuman suhde polttopisteen asemaan.

Tarkasteltaessa hitsin pinta-alaa sekä HAZ-pinta-alaa kuvasta 38, huomataan pinta-alan pienentyvän polttopisteen aseman suhteessa. HAZ-pinta-alasta erottuu kaksi erillistä nousevaa trendiä. HAZ-pinta-ala kehittyy ensin nousevasti polttopisteen aseman muuttuessa asemasta 0 mm asemaan -2 mm. Hitsauksen muuttuessa vajaatunkeumahitsaukseksi polttopisteen asemalla -3 mm, pienenee HAZ voimakkaasti ja kasvaa taas polttopisteen asemalla -5 mm. Jälleen hitsauksen muuttuminen vajaatunkeumahitsaukseksi kesken koesarjan, aiheuttaa tulosten poikkeamisen muista koesarjoista.



Kuva 38. Hitsin- ja HAZ pinta-ala suhteessa polttopisteen asemaan.

Kuvassa 39 on esitelty 12 mm hitsauskoesarjan kuvat ja roiskeet. Kuvasta havaitaan, ettei polttopisteen asemilla 0 ja -2 mm esiintynyt kappaleeseen kiinnittyneitä roiskeita ollenkaan. Polttopisteen asemilla -3 mm ja -5 mm roiskeita taas esiintyy erittäin runsaasti. Roiskeiden määrän äkillinen lisääntyminen polttopisteen asemaa siirrettäessä asemasta -2 mm asemaan -3 mm johtuu hitsauksen muuttumisesta vajaatunkeuma hitsaukseksi. Siirtämällä polttopisteen asemaa edelleen arvoon -5 mm vähenevät roiskeet hieman. Läpätunkeumahitsauksessa sulan poistuminen juuren puolelta aiheuttaa suuria muutoksia myös sulan dynamiikkaan ja näin ollen roiskeisiin. Tarkasteltaessa hitsien kupuja, huomataan niiden olevan hieman vajaat polttopisteen aseman ollessa 0 ja -2 mm. Polttopisteen asemilla -3 ja -5 mm kupu näyttää silmämääräisesti hyvältä, eikä kuvassa ole havaittavissa juurikaan aaltoilua. Tarkemmat kuvat hitsien kuvuista löytyvät liitteestä II.



Kuva 39. Hitsien kuvat ja roiskeet eri polttopisteen asemilla 0, -2, -3 ja -4 mm (ylhäältä alas), 12 mm rakenneteräs.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä osiossa pohditaan hitsauskokeista saatuja tuloksia. Hitsauskokeista tarkasteltiin lähinnä hitsien poikkileikkauksen geometriaa, kuvun leveyden ja hitsin pinta-alan avulla. Lisäksi kappaleeseen kohdistuvia lämpövaikutuksia tarkasteltiin HAZ-pinta-alan avulla. Lopuksi tarkasteltiin hitsien kupuja ja hitseissä esiintyneitä roiskeita. Työn tässä osiossa pohditaan polttopisteen aseman vaikutusta edellä mainittuihin ilmiöihin, sekä pyritään kokoamaan joitakin johtopäätöksiä kaikkien työssä analysoidujen hitsauskokeiden perusteella.

9.1 Hitsin geometria ja HAZ pinta-ala

Analysoitujen hitsauskokeiden perusteella voidaan sanoa hitsin geometrian mukailevan käytettävän säteen muotoa. Riippuen polttopisteen asemasta on säteen divergenssi kappaleen sisäpuolella joko suppeneva, laajeneva tai molempia. Polttopisteen aseman ollessa asetettuna kappaleen pinnalle säde leviää mennessä eteenpäin ja säteen muoto kappaleen yläpinnassa laajenevan kartion muotoinen. Polttopisteen aseman ollessa asetettuna syvemmälle kappaleeseen on säteen muoto ensin suppenevan kartion muotoinen aina polttopisteen asemaan asti. Polttopisteen aseman alapuolella säde muuttuu jälleen laajenevaksi. Polttopisteen aseman ylä- ja alapuolta tarkastellessa havaitaan säteen muodon olevan tiimalasin muotoinen. Säteen tiimalasimainen muoto oli havaittavissa lähes kaikissa hitsauskokeissa joissa polttopisteen asema oli asetettu kappaleen sisäpuolelle. Kuitenkin pelkkä laajeneva säde hitsin geometriassa oli havaittavissa ainoastaan 12 mm hitsauskoesarjassa, polttopisteen asemalla 0 mm. Muissa koesarjoissa polttopisteen asema 0 mm tuotti poikkeavia tuloksia, eikä säteen muotoa voitu selvästi havaita hitsin geometriasta.

Kuvun leveyteen oletettiin ensisijaisesti vaikuttavan polttopisteen halkaisija hitsattavan kappaleen yläpinnalla, mikä taas määräytyy käytettävän säteen fokusointikulmasta ja polttopisteen asemasta. Hitsauskokeista 8 mm koesarja oli ainoa joka noudatti polttopisteen asemasta riippuvan polttopisteen halkaisijan mukaista suhdetta. Kyseisessä koesarjassa kuvun leveys kasvoi lähes lineaarisesti, kun polttopisteen asemaa siirrettiin syvemmälle kappaleen sisäpuolelle. Tarkasteltaessa 10 mm hitsauskoesarjaa huomataan

kuvun leveyden käyttäytyvän päinvastaisesti, mikä voi osittain olla selitettävissä mahdollisella optiikan lämpenemisellä. Myös 12 mm hitsauskoesarjassa hitsin kuvun leveys kasvoi suhteessa säteen halkaisijaan kappaleen pinnalla, mutta tässä hitsauskoesarjassa huomattiin myös hitsauksen muuttumisen vajaatunkeumahitsaukseksi vaikuttavan kuvun leveyteen. Vajaatunkeuma estää sulan poistumisen hitsin juuren puolelta, jonka havaittiin kasvattavan hitsisulaa ja sitä kautta myös kupua lähes kaksinkertaiseksi. Hitsauskokeiden perusteella voidaan sanoa, että kuvun leveys ei riipu pelkästään säteen halkaisijasta kappaleen pinnalla, vaan myös sulan dynamiikan ja vakauden havaittiin vaikuttavat siihen oleellisesti.

Polttopisteen aseman vaikutuksesta HAZ-pinta-alaan on hieman vaikeampi tehdä johtopäätöksiä. HAZ pinta-ala käyttäytyy polttopisteen aseman suhteen varsin maltillisesti, eikä maksimiarvojen välillä ole havaittavissa radikaaleja muutoksia. Yleisesti HAZ pinta-ala näyttää noudattavan lievästi nousevaa trendiä polttopisteen aseman suhteen. Poikkeuksena tässä on 12 mm ainepaksuus, jossa HAZ pinta-alassa on havaittavissa kaksi selkeää huippua. HAZ pinta-alan äkillinen pieneneminen näyttää johtuvan hitsauksen muuttumiseen läpätunkeumahitsauksesta vajaatunkeumahitsaukseksi. HAZ-pinta-alan muutokset kertovat kuitenkin yleisesti kappaleeseen kohdistuvista lämpövaikutuksista. HAZ-pinta-alan kasvaminen johtuu kappaleeseen siirtyvän lämmön lisääntymisestä. Suurentunut lämmön siirtyminen voi johtua esimerkiksi absorption muuttumisesta.

9.2 Roiskeet

Roiskeiden suhteen kyseinen koesarja antaa hyvin niukasti informaatioita. Hitsit harjattiin puhtaaksi irtoroiskeista ennen kupujen kuvausta ja jäljelle jääneiden roiskeiden määrää oli kaikissa koesarjoissa varsin vaatimatonta. Kuitenkin 12 mm koesarjan kahdessa viimeisessä hitsissä, roiskeita esiintyi varsin runsaasti. Oleellinen ero näissä kahdessa hitsissä roiskeiden suhteen oli jälleen hitsin muuttuminen vajaatunkeumahitsaukseksi. Yleisesti kyseisissä hitsauskoesarjoissa polttopisteen asemaa muuttamalla ei esiintynyt huomattavaa eroa roiskeiden suhteen.

Hitsien kupujen tarkastelu sulastabiliteetin suhteen tuotti myös melko niukasti havaintoja polttopisteen aseman ja sulan välisestä suhteesta. Yleisesti sulan havaittiin käyttäytyvän maltillisesti, eikä selvää trendiä suhteessa polttopisteen asemaan ollut havaittavissa.

Poikkeuksena on kuitenkin polttopisteen asema 0 mm, jolla hitsit jäivät vajaiksi 8 ja 10 mm aineenpaksuuden hitsauskoesarjoissa. Tämä viestii sulan metallin poistumisesta juuren puolelta, johtuen epävakaasta sulasta. Kuten Weberpals et al. (2008, 2011) tutkimuksista havaittiin, vaikuttaa polttopisteen asema sulan stabiliteettiin ja siksi laajempien johtopäätösten aikaan saamiseksi tulisi näitä ilmiöitä tutkia vielä tarkemmin.

9.3 Tunkeuma

Tässä työssä analysoidut hitsauskoesarjat olivat kahta hitsiä lukuun ottamatta kaikki läpätunkeumahitsauksia, joten tunkeuman tarkastelu hitseistä oli mahdotonta. 12 mm hitsauskoesarja kuitenkin antaa suuntaa tunkeuman käyttäytymisestä polttopisteen aseman suhteen. Kuten Vollertsen & Thomy (2005, s. 260) tutkimuksista huomattiin, saadaan syvin tunkeuma polttopisteen aseman ollessa asetettuna hieman hitsattavan kappaleen pinnan alapuolelle. Samoin myös 12 mm koesarjassa saavutettiin syvin tunkeuma polttopisteen asemilla 0 mm ja -2 mm. Siirrettäessä polttopisteen asema syvemmälle kappaleen sisäpuolelle pieneni saavutettu tunkeuma ja hitsaus muuttui vajaatunkeumahitsaukseksi. Polttopisteen asemalla -3 mm hitsaus oli hitsin alussa läpätunkeumahitsausta, mutta muuttui noin 20 mm matkan jälkeen vajaatunkeumahitsaukseksi. Sama ilmiö oli havaittavissa polttopisteen asemalla -5 mm. Ilmiö saattaa johtua esimerkiksi optiikan lämpenemisestä ja sen aiheuttamasta polttopisteen aseman muutoksesta. Hitsauskokeiden perusteella voidaan kuitenkin sanoa, että polttopisteen asemalla voi olla suurikin vaikutus saavutettavaan tunkeumaan. Varsinkin tietyn raja-arvon jälkeen, jolloin polttopisteen aseman muutos aiheuttaa hitsin muuttumisen läpätunkeumahitsauksessa vajaatunkeumahitsaukseksi.

9.4 Pohdintaa

Polttopisteen asemalla ja käytettävän säteen muodolla on selkeä vaikutus hitsin geometriaan. Käytettävän säteen muoto ei ollut niin selvästi havaittavissa tässä työssä suoritetuissa hitsauskokeissa, kuin esimerkiksi Vänskä et al. (2013) tutkimuksessa, missä myös hajaantuva säde oli selvästi havaittavissa hitsin muodossa. Tämän työn hitsauskokeissa tämä ilmiö pystyttiin selkeästi havaitsemaan vain yhdestä hitsistä, mutta viitteitä siitä oli havaittavissa kaikissa koesarjoissa.

Kuten Weberpals et al. (2011) tutkimuksista havaittiin riippuu roiskeiden syntyminen monesta eri muuttujasta. Polttopisteen asema vaikuttaa osaltaan avaimenreiän geometriaan ja sitä kautta metallihöyryn ja sulan dynamiikkaan, jotka ovat tärkeimmät tekijät roiskeiden syntymekanismissa. Tässä työssä roiskeita analysoitiin koekappaleiden pinnalta silmämääräisesti. Jatkotutkimuksissa hitsauksen havainnoimisesta ja sulan käyttäytymisestä hitsauksen aikana voisi saada arvokasta tietoa johtopäätösten tueksi. Myös roiskeiden määrään arviointi hitsausprosessin aikana olisi helpompaa. Nyt roiskeita pystyttiin arvioimaan pelkästään levyn pinnalle tarttuneiden roiskeiden perusteella. Lisäksi hitsit olivat hitsauskokeissa lähellä toisiaan ja on mahdollista, että roiskeita on lentänyt arvioitavan hitsin läheisyyteen myös muista hitseistä. Tällöin roiskeiden alkuperän määrittäminen on mahdotonta.

Jatkotutkimuksia ajatellen tulisi kaikki hitsauskokeet suorittaa päittäisliitoksina, sekä vajaatunkeumahitsauksina. Vajaatunkeumahitsauksista polttopisteen vaikutusta tunkeuman syvyyteen pystyttäisiin helpommin tutkimaan. Hitsauskokeet olisi hyvä suorittaa yhdelle levyn paksuudelle ja hitsauskokeiden määrää tulisi kasvattaa johtopäätösten helpottamiseksi. Lisäksi hitsauksia joissa polttopisteen asema asetetaan yhä syvemmälle kappaleen sisäpuolelle tai kappaleen yläpuolelle tulisi lisätä. Myös optiikan lämpenemisestä johtuva polttopisteen aseman muutos tulisi huomioida hitsauskokeissa tarkempien tulosten aikaansaamiseksi.

LÄHTEET

Chmelickova, H. & Sebestova, H. 2012. Pulsed Laser Welding. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa http://cdn.intechopen.com/pdfs/31438/InTech-Pulsed_laser_welding.pdf

Coherent. 2009. An Introduction to Diode Lasers for Materials Processing. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa http://www.coherent.com/downloads/HPDDLBackground%20Whitepaper_Final.pdf

Eagle-Group. 2014. Laser Welding. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.1.2014]. Saatavissa <http://www.eagle-group.eu/en/laser-welding>

Gula, N. 2013. Laser Welding Comes of Age. [verkkojulkaisu]. [viitattu 6.1.2014]. Saatavissa <http://www.canadianmetalworking.com/features/laser-welding-comes-of-age-100441.html>

Jin, X. & Cheng, Y. & Zeng, Y. & Zou, Y. & Zhang, H. 2012. Multiple Reflections and Fresnel Absorption of Gaussian Laser Beam in an Actual 3D Keyhole during Deep-Penetration Laser Welding. International Journal of Optics. Volume 2012. Hindawi Publishing Corporation.

Khan, A. & Hilton, P. 2010. Yb-Fibre Laser Single Sided Tube Cutting for Nuclear Decommissioning Applications. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.1.2014]. Saatavissa <http://www.twi.co.uk/technical-knowledge/published-papers/yb-fibre-laser-single-sided-tube-cutting-for-nuclear-decommissioning-applications/>

Kujanpää, V. & Salminen, A. & Vihinen, J. 2005. Lasertyöstö. Tampere, Tammer-paino Oy. 373 s.

Laser Focus World. 2014. Fiber lasers: The state of the art. [verkkojulkaisu]. [viitattu 9.4.2014]. Saatavissa <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-04/features/the-state-of-the-art.html>

Liu, Z. & Kutsuna, M. & Xu, G. 2006. Fiber Laser Welding of 780 MPa High Strength Steel. Konferenssimateriaali. Proc. 25th Int. Conf on Lasers and Electro Optics ICALEO 2006, Scottsdale, Arizona, October 30-November 2, Laser Institute of America s. 562–568.

Optics. 2012. IPG Set to Ship 100 kW Laser. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa <http://optics.org/news/3/10/44>

Optique Ingenieur. 2012. Physical Properties of Gaussian Beams. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_ang_M01_C03/co/Contenu_08.html

Optoskand. 2013. Beam Parameter Product. [verkkojulkaisu]. [viitattu 5.1.2014]. Saatavissa <http://www.optoskand.se/technology/beam-parameter-product/>

ORC. 2013. How Fibre Lasers Work. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa <http://www.orc.soton.ac.uk/61.html>

Photonics Spectra. 2004. Disk Lasers Enable Application Advancements. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=17863>

RP Photonics. 2012a. CO₂ Lasers [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa http://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html

RP Photonics. 2012b. Thin-disk Lasers. [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa http://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.html?s=ak

Ruukki. 2013. Ainestodistukset. [verkkojulkaisu]. [viitattu 19.1.2014]. Saatavissa <http://www.ruukki.com/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20terakset%20tilaus%20ja%20toimitus/Ruukki-Kuumavalssatut-terakset-Ainestodistukset.ashx>

Salminen, A. 2009. Työstölaserteknologian kehitys tuottaa uusia valmistusprosesseja. [verkkajulkaisu]. [viitattu 17.1.2014]. Saatavissa http://www.ohutlevy.com/pdf/Ohutlevy109_s10-13.pdf

Schubert, E. & Zerner, I. & Sepold, G. 1998. New Possibilities for Joining by Using High Power Diode Lasers. Konferenssimateriaali. Proc. 24th Int. Conf on Lasers and Electro Optics ICALEO2005, Miami, Florida, June 23-November 3, Laser Institute of America. Laser Material Processing G111.

Sintec Optronics. 2013. Focused Beam diameter with Focusing Lens. [verkkajulkaisu]. [viitattu 5.1.2013]. Saatavissa <http://www.sintecoptronics.com/ref/FocusedBeamDiameter.pdf>

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

Trumpf-laser. 2013a. Laser Welding and Laser Soldering. [verkkajulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa <http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/laser-welding.html>

Trumpf-laser. 2013b. Spot Welding and Seam Welding with lasers. [verkkajulkaisu]. [viitattu 12.8.2013]. Saatavissa <http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/laser-welding/spot-welding-and-seam-welding.html>

Verhaeghe, G. & Hilton, P. 2005. The Effect of Spot Size and Laser Beam Quality on Welding Performance When Using High-power Continuous Wave Solid-state Lasers. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.8.2013] Saatavissa <http://www.twi.co.uk/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/>

Vollertsen, F. & Thomy, C. 2005. Welding With Fiber Lasers From 200 to 17000 W. Konferenssimateriaali. Proceedings of the 24th Int. Conf. On Applications of Lasers and Electro-Optics ICALEO 2005. Oct. 31-Nov.3. 2005, Laser institute of America. Miami, USA s. 254-263.

Vänskä, M. & Abt, F. & Weber, R. & Salminen, A. & Graf, T. 2013 Effects of welding parameters onto keyhole geometry for partial penetration laser welding. Physics Procedia 41 (2013) 199 – 208.

Weberpals, J. & Krueger, P. & Berger, P. & Graf, T. 2011. Understanding the Influence Of the Focal Position In Laser Welding On Spatter Reduction. Konferenssimateriaali. Proc. 30th Int. Conf. on Applications of Lasers and Electro Optics ICALEO2011, Orlando, FL, USA, October 23-27, Laser Institute of America 10 s.

Weberpals, J. & Dausinger, F. 2008. Fundamental Understanding of Spatter Behavior at Laser Welding Of Steel. Konferenssimateriaali. Proc. 27th Int. Conf. on Applications of Lasers and Electro Optics ICALEO2008, Temecula, California, October 20-23, Laser Institute of America. s. 364–373.

Weberpals, J. & Dausinger, F. & Göbel, G. & Brenner, B. 2006. The Role of Strong Focusability On the Welding Process. Konferenssimateriaali. Proc. 25th Int. Conf on Lasers and Electro Optics ICALEO2006, Scottsdale, Arizona, October 30-November 2, Laser Institute of America s. 553–562.

Horn, W. 2009. Welding and Soldering with High Power Diode Lasers. [verkkojulkaisu]. [viitattu 17.1.2014]. Saatavissa http://www.dilas.com/gdresources/downloads/whitepapers/DILAS_IIW_June09.pdf

Thiel, C. & Weber, R. & Johannsen, & J. Graf, T. 2013. Stabilization of a Laser Process Against Focal Shift Effects using Beam Manipulation. Physics Procedia, Volume 41, 2013, Pages 209–215.

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* Volume 53, January 2014, Pages 568–576.

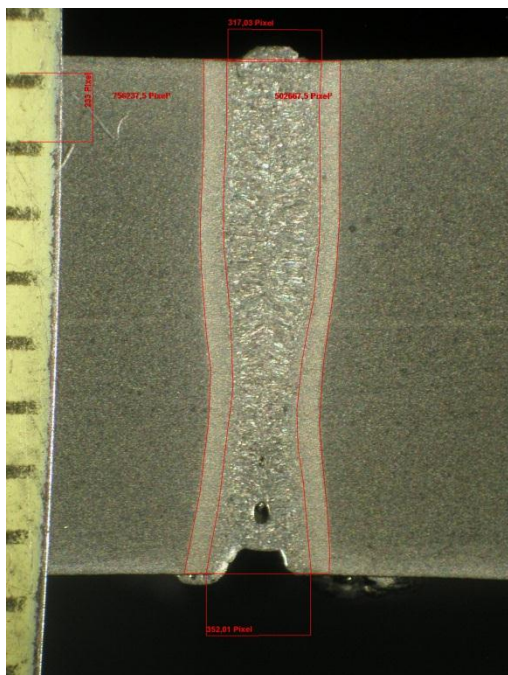
LIITTEET

- Liite I Mikroskooppikuvat hitseistä mittoineen
Liite II Kuvat hitsien kuvuista ja roiskeista
Liite III Hitsien 246 ja 247 juuren puolet

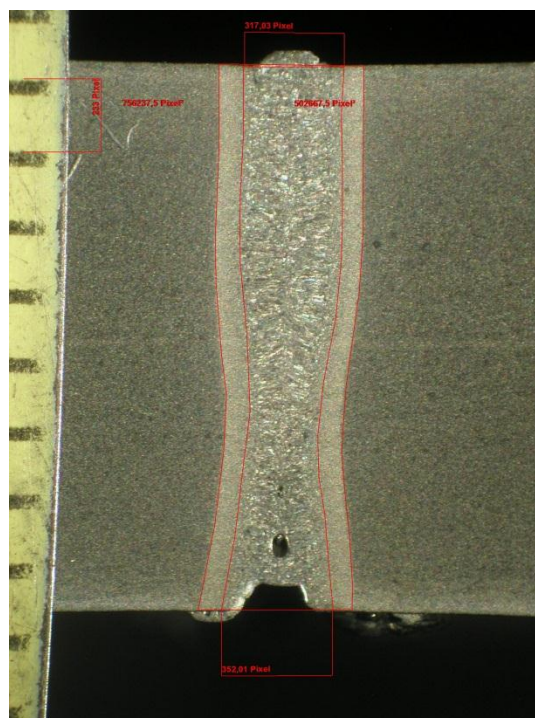
Mikroskooppikuvat hitseistä mittoineen

Hitsauskoesarja 8 mm rakenneteräkselle:

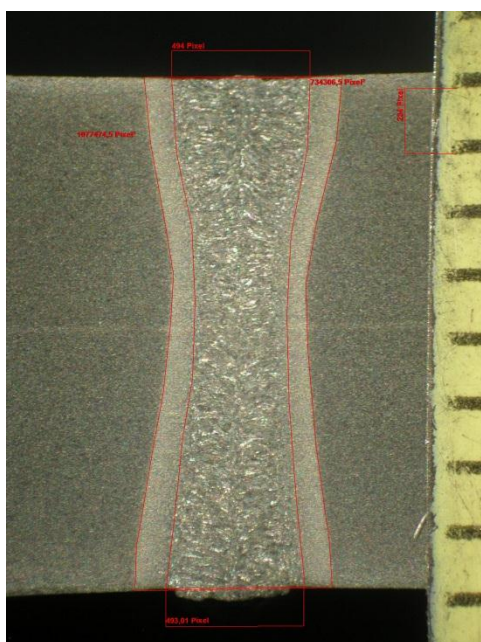
Nro. 181 fpp 0



Nro. 155 fpp -2



Nro. 194 fpp -4

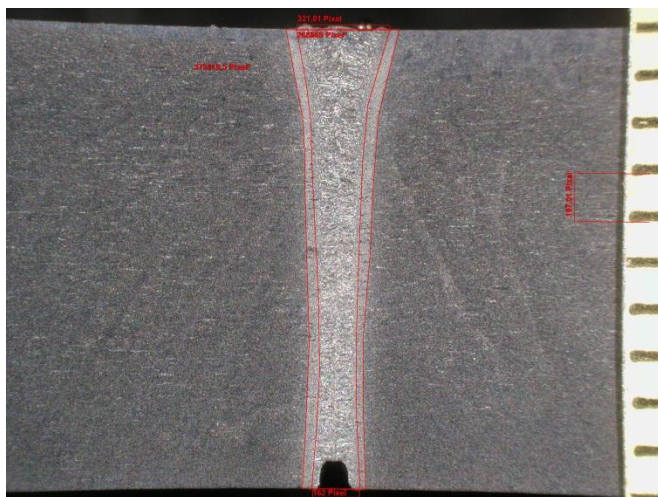


Nro. 197 fpp -6

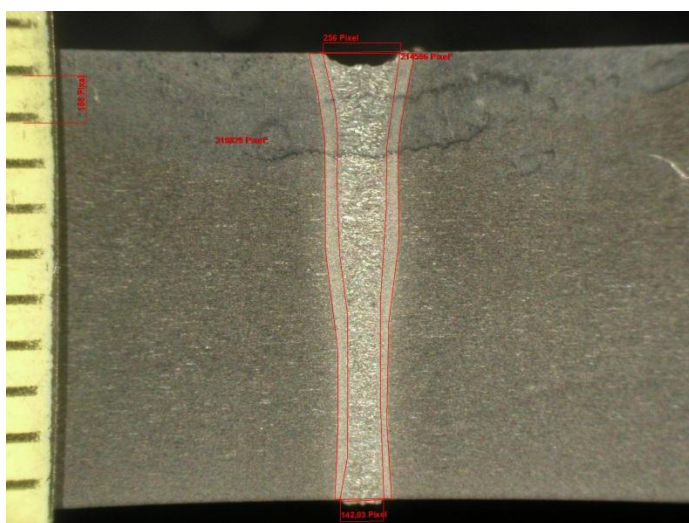


Hitsauskoesarja 10 mm rakenneteräkselle:

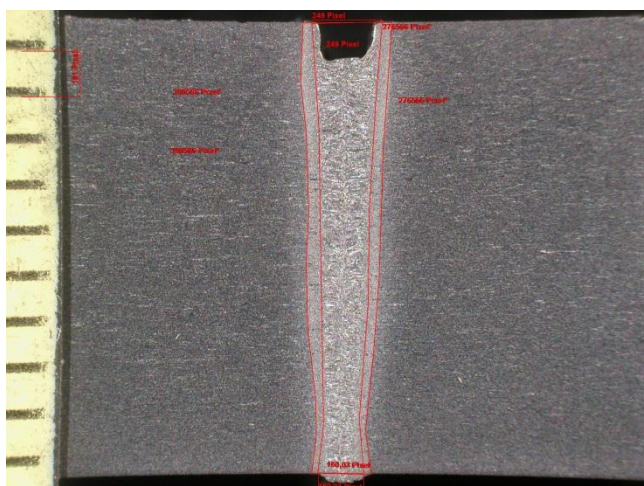
Nro. 142 fpp 0



Nro. 137 fpp -2

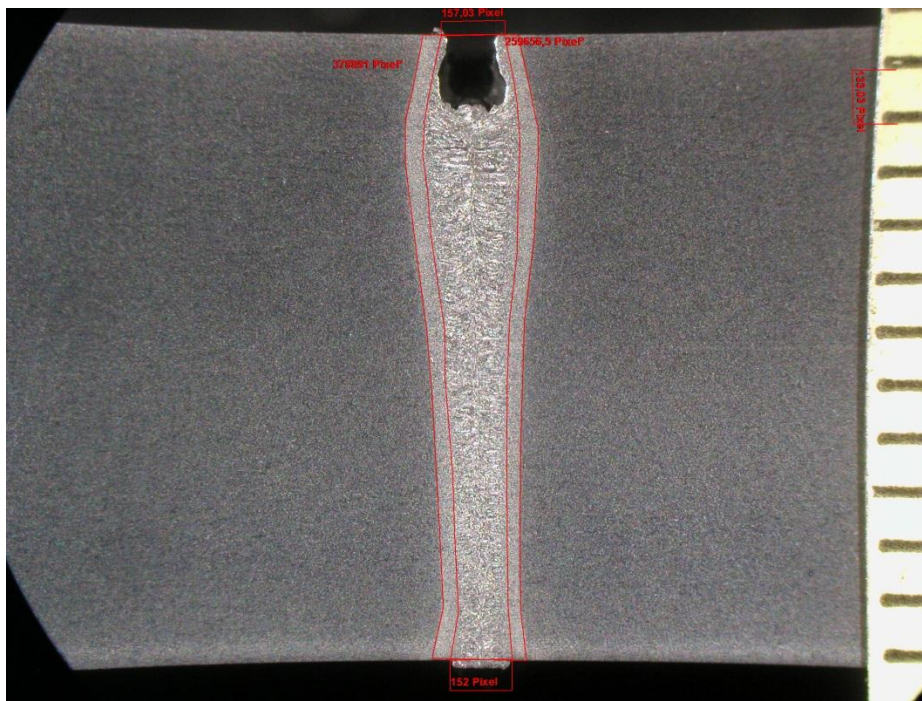


Nro. 149 fpp -4

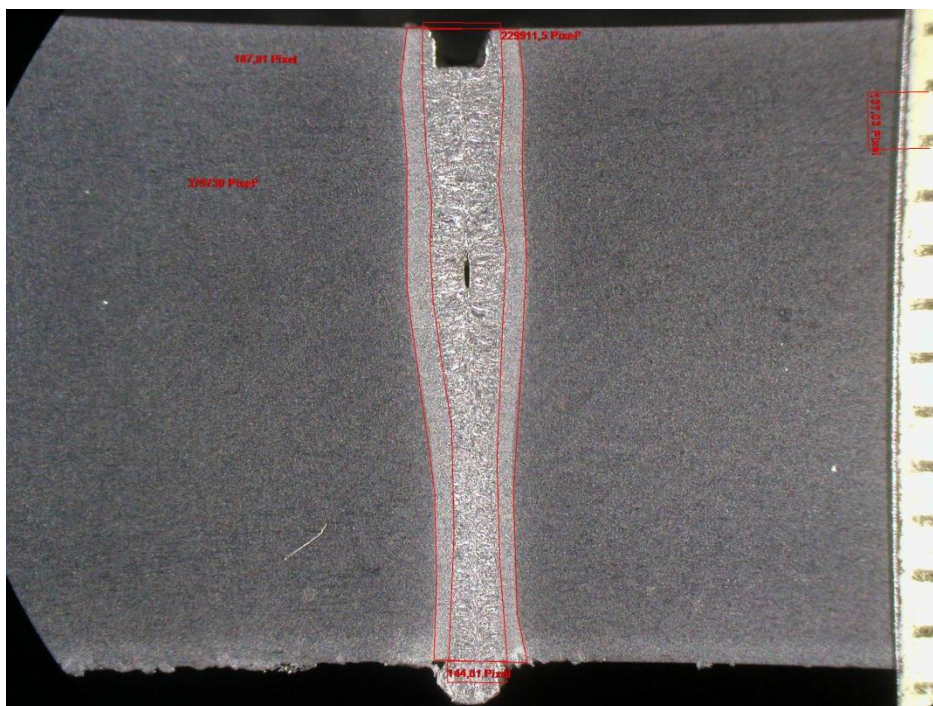


Hitsauskoesarja 10 mm rakenneteräkselle:

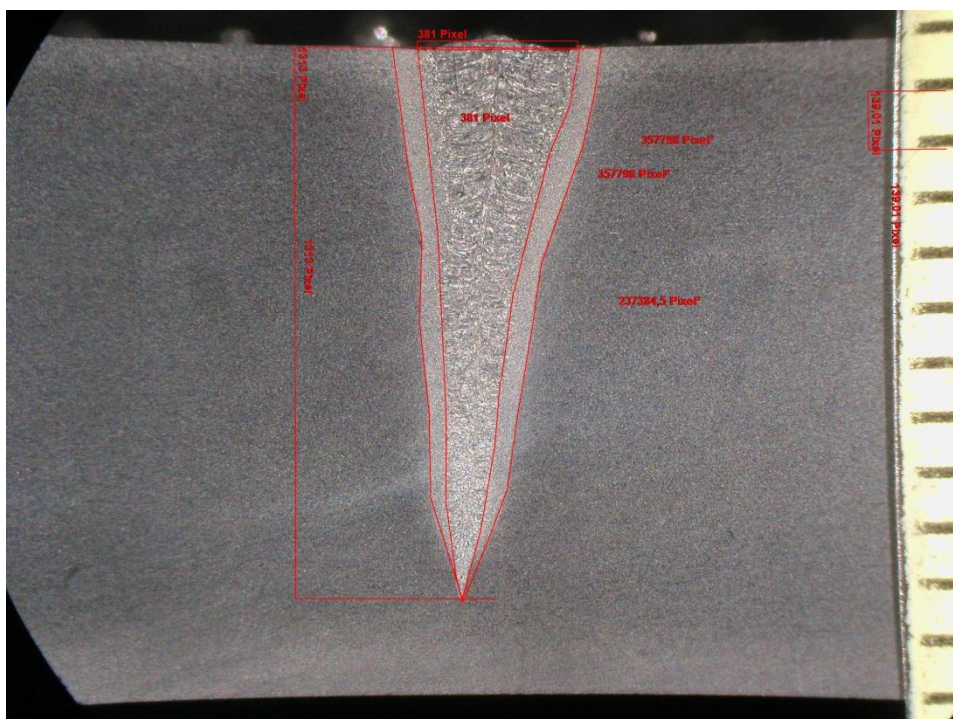
Nro. 268 fpp 0



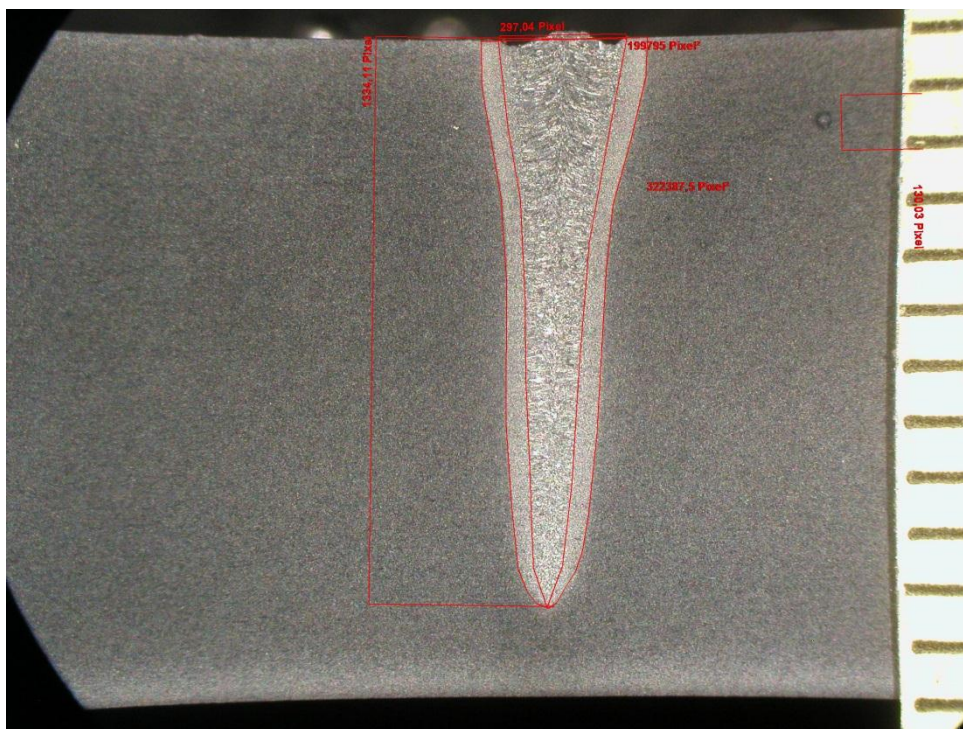
Nro. 272 fpp -2



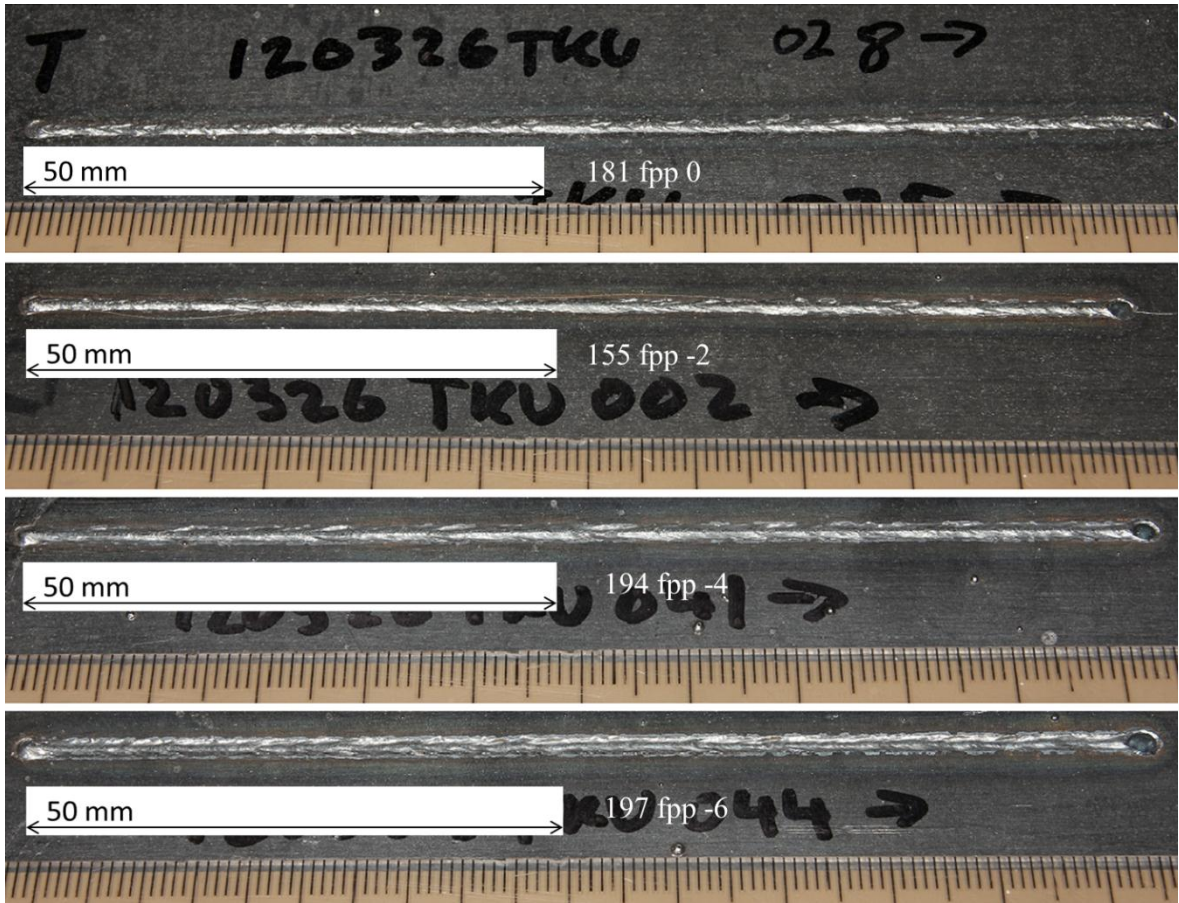
Nro. 247 fpp -3



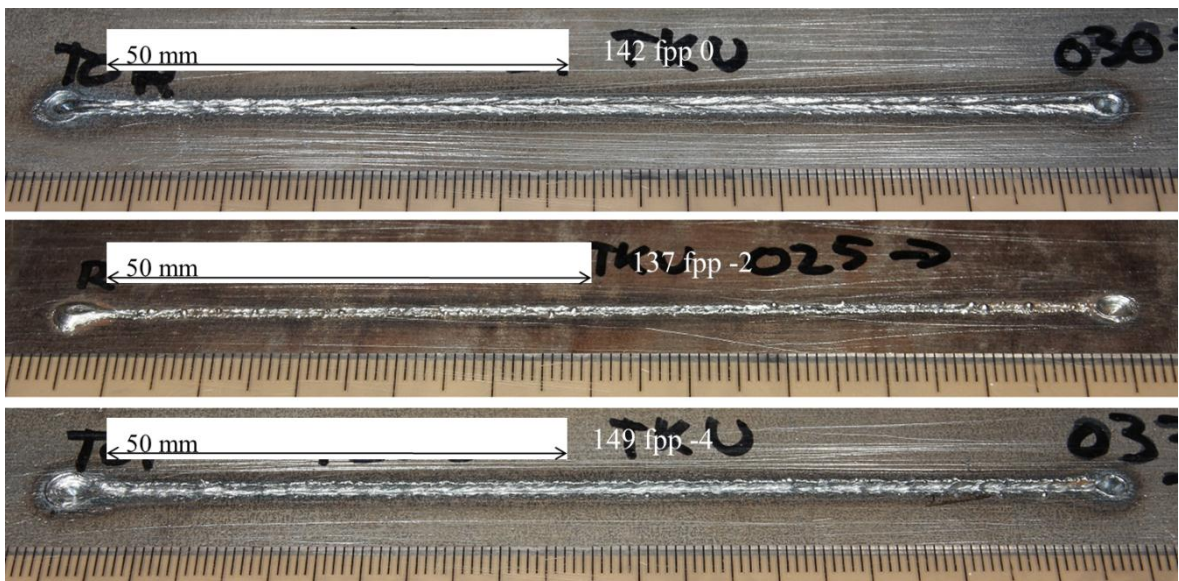
Nro. 246 fpp -5



Hitsien kuvat ja roiskeet eri polttopisteen asemilla (8 mm rakenneteräs):



Hitsien kuvat ja roiskeet eri polttopisteen asemilla (10 mm rakenneteräs):



Hitsien kuvat ja roiskeet eri polttopisteen asemilla (10 mm rakenneteräs):



Hitsien 246 ja 247 juuret:

