

Silja Heikkilä

LASIN LASERHITSAUS

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Silja Heikkilä: Lasin laserhitsaus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2022

Lasi on fyysisten ja fysikaalisten ominaisuuksiensa, kuten suuren sulamispisteen, lujuuden, vähäisen kemiallisen reaktiivisuuden sekä pienien sähkön ja lämmön johtamiskykyensä, takia monipuolisesti ja laajasti käytetty materiaali. Lasi on kuitenkin samanaikaisesti haurasta ja helposti rikkoutuvaa, mikä vaikeuttaa sen muokattavuutta. Laserteknologian viimeaikainen kehitys on mahdollistanut laserhitsauksen käyttämisen lasin liitännään. Mikrotason kokoluokka, tarkkuus, ja liittämisaineista luopuminen ovat eräitä laserhitsauksen etuja, jotka ovat tärkeitä varsinkin elektroniikassa, lääketieteessä ja optiikassa.

Tässä työssä perehdytään lasin laserhitsaukseen kirjallisuustutkimuksen muodossa. Työn tavoitteena on perehtyä lasin laserhitsaukseen ja sen osa-alueisiin pääasiassa USP-lasereiden (ultrashort pulse, ultralyhyt pulssi) näkökulmasta. Työssä käsitellään lasin laserhitsauksen toimintaprosessia: kuinka hitsaus suoritetaan, minkälainen hitsausjälki materiaaliin syntyy, miten kyseistä hitsausjälkeä voidaan matemaattisesti mallintaa ja onko kyseinen matemaattinen mallinnus yhtenevä kokeellisten tulosten kanssa. Hitsauksessa mahdollisesti esiintyvien säröjen muodostumista tarkastellaan hitsausparametrien, -asetelman ja optisen kontaktin muodostamisen näkökulmista. Optisen kontaktin roolia lasin laserhitsauksessa käsitellään myös läpi työn. Hitsausseaman murtolujuutta, leikkausvoimaa ja taivutuslujuutta ja näiden suhdetta hitsaus geometriaan, -parametreihin, sulalammikkoon ja optiseen kontaktiin tarkastellaan. Laserhitsauksen toteuttamista kahden lasilevyn välillä niin raottomasti kuin raollisesti käsitellään. Lasin laserhitsausta eri lasimateriaalien kesken, kuin myös muiden materiaalien kanssa, tarkastellaan vielä työn lopussa pintapuolisesti.

Työ havainnollistaa lasin laserhitsauksen olevan monipuolinen ja lupaava teknologia valmistusteknologia-alalla. Laserhitsauksella on mahdollista saavuttaa hitsaamattoman materiaalin kanssa vertailtavissa olevia tuloksia ja hitsausmenetelmien kehitys osoittaa potentiaalia teknologian sovellettavuuteen myös teollisessa käytössä.

Avainsanat: Lasin laserhitsaus, USP-laserit, USP-laserhitsaus

ALKUSANAT

Tämän työn aihe oli minulle alussa uusi, mutta työtä tehdessäni ymmärrykseni aiheesta ja mielenkiintoni sitä kohtaan syveni. Työn teko oli paikoin haastavaa, mutta opin sitä tehdessäni paljon niin työstä kuin itsestäniikin.

Haluaisin kiittää kaikkia minua tukeneita ihmisiä tämän työprosessin varrelta. Erityiskiitokset haluan kuitenkin antaa työnohjaajalleni Jorma Vihiselle ja perheelleni.

Kiitos.

Tampereella, 4.12.2022

Silja Heikkilä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LASERHITSAUKSEN KULKU.....	3
2.1 Laserhitsausprosessin toiminta	3
2.2 Hitsauksen muoto	4
3. MATEMAATTINEN MALLINNUS	6
3.1 Termisen johtumisen malli ei-lineaarille absorptiolle	6
3.2 Isotermisen rajan simuloiminen	6
3.3 Mallien todenmukaisuus.....	7
4. SÄRÖT	9
4.1 Parametrit ja sulalammikko	9
4.2 Halkeamien synty kahden lasilevyn välissä.....	10
4.3 Optinen kontakti.....	10
5. HITSAUSSAUMAN ANALYSOINTI.....	12
5.1 Sulalammikko ja hitsausgeometria	12
5.2 Leikkausvoima ja optinen kontakti.....	12
5.3 Hitsausparametrit.....	13
6. RAOLLINEN HITSAAMINEN	15
6.1 Raon kuroutumisen teoria	15
6.2 Kokeellisia tuloksia.....	16
7. MONIMATERIAALINEN HITSAUS.....	18
7.1 Lasimateriaalien välinen hitsaus.....	18
7.2 Metallit ja puolimetallit	19
8. YHTEENVETO.....	22
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A_{cal}	Ei-lineaarinen absorptio
α	Termisen diffuusion aste
c	Ominaislämpö
f	Pulssintoistotaajuus
HAZ	Heat Affected Zone, lämmönvaikutusalue
K	Terminen johtuminen
l	Absorptioalueen pituus
Q_0	Laserpulssin energia
ρ	Tiheys
T_0	Alkulämpötila
$T(x, y, z)$	Lämpötila kohdassa x, y, z
USP	Ultrashort pulse, ultralyhyt pulssi
v	Nopeus
W	Pulssienergia
$w(z)$	Lämmönsiirto

1. JOHDANTO

Lasi on laajasti käytetty materiaali, sen käytännöllisten ominaisuuksien vuoksi. Näihin ominaisuuksiin lukeutuvat muun muassa suuri sulamispiste, vähäinen kemiallinen reaktiivisuus, homogeenisyys, lujuus, pieni terminen ja sähköinen johtamiskyky ja muokattavissa oleva taitekerroin. Ominaisuuksiensa ansiosta lasi soveltuu hyvin käytettäväksi niin elektroniikassa, optiikassa, lääketieteessä kuin mikrosysteemeissäkin. Kuitenkin nämä samat hyödylliset ominaisuudet vaikeuttavat lasin työstöä. (Lawrence, J. R. et al. 2010, s. 23–24)

Laserteknologian kehitys USP-lasereilla (ultrashort pulse) on mahdollistanut uusia kehitysaskelleita lasin laserhitsauksessa. USP-lasereiksi ryhmitellään femto- ja pikosekuntilaserit, joiden laserpulssien pituudet ovat näitä kokoluokkia. USP-lasereiden etuina ovat muun muassa niiden pienet lämmönvaikutusalueet (HAZ, heat affected zone), jotka mahdollistavat paremman hitsaustarkkuuden, ja lyhyiden pulssiaikojen aikaansaamat suuret laservoiman intensiteetit yksittäisiä pulsseja kohden. Suuret yksittäiset pulssienergiat mahdollistavat ei-lineaarisen absorption, joka toimii lasin laserhitsauksen perustana. (Sugioka, K. & Cheng, Y. 2014)

Tämän työn tavoitteena on antaa yleinen kuva lasin laserhitsauksesta, sen toiminnasta, haasteista ja tuloksista. Pääasiallisena tarkastelun kohteena on kahden lasilevyn välinen USP-hitsaus, jonka tukena tarkastellaan myös muun muassa yksittäisen lasilevyn, nanosekuntilaserin ja lasin monimateriaalisen hitsauksen näkökulmista.

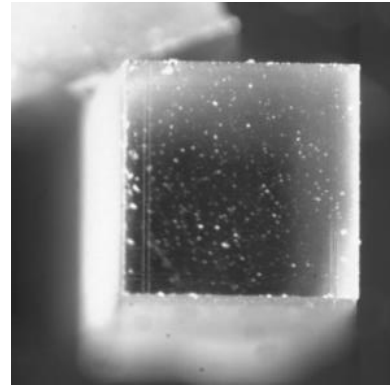
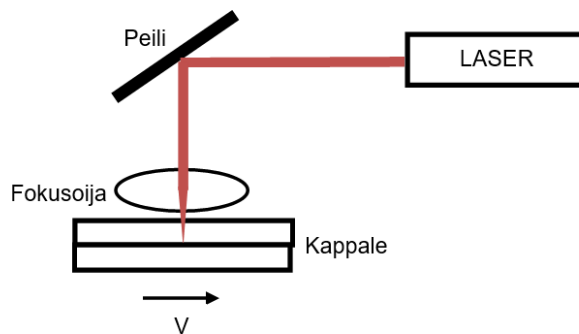
Työn luvussa 2 tarkastellaan laserhitsausprosessin kulkua ja hitsausjäljen syntymistä. Luvussa 3 käsitellään hitsausjäljen matemaattista mallinnusta ja tämän todenmukaisuutta. Säröihin perehdytään luvussa 4 ja niitä tarkastellaan hitsausparametrien, hitsaustilanteen ja optisen kontaktin näkökulmista. Hitsausaamaa analysoidaan sulalammikon, leikkausvoiman, optisen kontaktin, hitsausgeometrian ja -parametrien näkökulmista luvussa 5. Luvussa 6 tarkastellaan raollisen hitsauksen toimintamallia, sekä sen kokeellisia tuloksia. Luvussa 7 käsitellään lasin monimateriaalista hitsausta eri lasimateriaalien kuin myös muiden

materiaalien välillä. Työn lopussa luvussa 8 käsitellään tämän työn keskeiset tulokset, alan seuraavat mahdolliset suuntautumispainotteet ja arvioidaan opin-
näytetyön onnistuneisuutta.

2. LASERHITSAUKSEN KULKU

2.1 Laserhitsausprosessin toiminta

Laserhitsausprosessi alkaa lasersäteen tähtäämisellä tarkentavan linssin läpi hitsausmateriaaliin. Prosessin aikana lasersäde ja hitsausmateriaali ovat toisiinsa nähden liikkeessä nopeudella v . Lasin laserhitsauksessa käytetään laserille aallonpituutta, jolle hitsattava lasi on läpinäkyvä. Kuva 1 havainnollistaa yleistä laserhitsauksen järjestelmää.



Kuva 1. Lasin laserhitsaus skemaattisesti, muokattu lähteestä (Cvecek, K. et al. 2019, s. 2) ja kuva lasin laserhitsauksen näytteestä (Hansen, A. et al. 2010)

Hitsauksessa energia välittyy ei-lineaarisen absorptioita kautta. Lasimateriaalin sisällä sijaitsevan laserin keskittämispisteen läheisyydessä laserenergia vapauttaa elektroneita, jotka puolestaan luovuttavat kineettisen energiansa lasihilalle. Tämä johtaa materiaalin lämpenemiseen ja plasma-alueen syntyyn laserin keskittämispisteen ympäristössä.

Vapaiden elektronien, eli plasman, määrään vaikuttavat sekä multifotoni-ionisaatio kuin myös vyörymäionisaatio. Laserenergian ollessa tarpeeksi suuri se synnyttää multifotoni-ionisaation. Multifotoni-ionisaatiossa vapautuneet elektronit voivat puolestaan laukaista vyörymäionisaation lisäten vapaiden elektronien määrää. (Cvecek, K. et al. 2019)

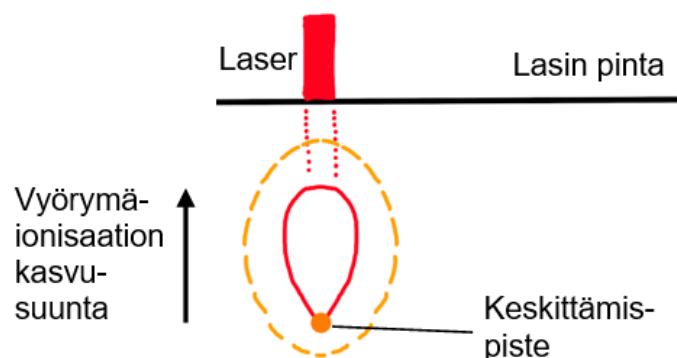
Vyörymäionisaatio vaikuttaa olevan suuremmassa roolissa energian absorptiossa kuin multifotoni-ionisaatio. Vyörymäionisaation on havaittu vapauttavan jopa 100–1 000-kertaisesti elektroneja verrattuna multifotoni-ionisaatioon, kun

lasersäde on tarkennettu veteen. Vaikka vyörymäionisaation panos lasimateriaalin sulattamiselle vaikuttaakin olevan suurempi, multifotoni-ionisaatiota tarvitaan sen aloittamiseksi. (Miyamoto, I. et al. 2013b)

2.2 Hitsauksen muoto

Plasma on erittäin hyvä absorboija, mikä johtaa laserenergian epätasaiseen jakautumiseen hitsauspisteessä. Jos lasi ei ole ehtinyt jäähtymään laserpulssien välissä, uusi laserpulssi aiheuttaa lämmön kertymistä plasma-alueella. Plasma ei kuitenkaan absorboi energiaa tasaisesti, vaan energia alkaa kertymään plasma-alueen yläosaan, lasersäteen tulosuuntaan. Pulssien jatkuessa energian kertyminen plasma-alueen yläosaan jatkuu aiheuttaen plasma-alueen alapuolisen alueen osittaista suojaamista. Tämä johtaa kyynelmäiseen rakenteeseen. (Cvecek, K. et al. 2019)

Syntyneen kyynelmäiseen rakenteen voi jakaa kahteen alueeseen. Alue 1 on laserin keskittämispisteen ympärillä oleva alue, jota hitsausprosessissa syntynyt plasma suojaa. Tänä suojaus johtaa pienempään energian absorptioon alueellisesti. Alue 2 on plasman alue, joka ajan kuluessa absorboi energiaa, suurenee ja ”liikkuu” ylöspäin kohti laserin tulosuuntaa. Plasman kasvulla on sama suunta kuin vyörymäionisaation liikkeellä. Kuvassa 2 nähdään hitsausjäljen rakenne ja vyörymäionisaation kasvusuunta. (Kaiser, E. 2016)



Kuva 2. Hitsausjäljen rakenne skemaattisesti kuvattuna, muokattu lähteestä (Miyamoto I. et al. 2013a, s. 197)

Kyynelmäisen rakenteen lisäksi hitsausjäljessä voidaan havaita myös toinen kaksiosainen rakenne: kyynel ja ellipsi. Kyynel syntyy suoranaisesti laserenergian absorptiosta, kun taas ellipsin muotoinen alue syntyy lämmön johtumisesta kyynelmäisestä alueesta sitä ympäröivään materiaaliin. Lämmönjohtuminen on siis osallisena USP-hitsauksessa, mutta sen rooli on ei-lineaariseen absorptioon verrattuna pieni. (Miyamoto I. et al. 2007)

3. MATEMAATTINEN MALLINNUS

Hitsausprosessin lämmönjohtumista lasissa on mallinnettu monella tavalla, joista käytetyimmät mallit tullaan esittelemään seuraavissa alaluvuissa. Lämmönjohtumisen matemaattinen mallintaminen antaa syvemmän ymmärryksen hitsausprosessista ja mahdollistaa tulosten paremman analysoimisen.

3.1 Termisen johtumisen malli ei-lineaarille absorptiolle

Laserhitsausprosessin toiminnan kannalta absorboidun laserenergian määrän mallintaminen on tärkeitä. Tähän käytetyimmän mallin perustana on viivamainen lämmönlähde, jolla on jatkuva lämmönsiirto $w(z)$ kohdassa $x=y=0$ alueella $0 < z < l$. Tässä x , y ja z ovat koordinaattiakseleita ja l on absorptioalueen pituus. Mallissa käytettävä materiaali mallinnetaan äärettömäksi ja sen alkulämpötilaa merkitään T_0 . Kun lämmönlähde liikkuu vakionopeudella v materiaalissa x -aske-
lin mukaisesti, lämpötilaa kohdassa x , y , z voidaan kuvata kaavalla:

$$T(x, y, z) = \frac{1}{4\pi K} \int_0^l \frac{w(z')}{s} \exp\left\{-\frac{v}{2\alpha}(x+s)\right\} dz' + T_0, \quad (1)$$

Kaavassa $s^2 = x^2 + y^2 + (z - z')^2$, termisen johtuminen on K ja termisen dif-
fuusion aste on α . Termisen diffuusion aste saadaan kaavasta $\frac{K}{c\rho}$, missä c on ominaislämpö ja ρ on tiheys. Yksinkertaisuuden vuoksi on oletettu, että materi-
aalin lämpötilaominaisuudet ovat riippumattomia materiaalin lämpötilasta. (Miyamoto I. et al. 2011b)

3.2 Isotermisen rajan simuloiminen

Miyamoto I. et al. (2011b) esittävät jatkuvan lämmönsiirron viivamaisen mallin, jonka avulla voidaan simuloida sulamisalueen rajoja. Laserenergian lämmön-
siirto $w(z)$ saadaan lisäämällä suurimman sykliilämmön lämpökäyrä kohdassa (y, z) kokeellisesti saadun sulamisalueen ääriiviivalle. Jaksonlämmön lämpö-
käyrä (y, z) :ssa saavutettiin kohdassa x , jossa $\frac{dT}{dx} = 0$ on seuraavan kaavan mu-
kainen:

$$\int_0^l \frac{w(z')}{s} \exp\left\{-\frac{v}{2\alpha}(x+s)\right\} \cdot \left\{\frac{x}{r^3} - \frac{v}{2\alpha}\left(\frac{x}{r} - 1\right)\right\} dz' = 0. \quad (2)$$

Tämän jälkeen ei-lineaarinen absorptio A_{cal} saadaan funktiosta

$$A_{cal} = \frac{1}{fQ_0} \int_0^l w(z) dz, \quad (3)$$

missä l on absorptioalueen pituus ja Q_0 on laserpulssin energia. Monotoninen funktio

$$w(z) = az^m + b, \quad (4)$$

jossa a , m ja b ovat kaikki positiivisia vakioita, on havaittu olevan sopivin funktion muoto $w(z)$:lle. Ei-lineaarisen absorption kaava voidaan saattaa tämän avulla muotoon

$$A_{cal} = \frac{1}{fQ_0} \left(\frac{a}{m+1} l^{m+1} + bl \right), \quad (5)$$

jolla voidaan simuloida hitsauksen isothermisiä viivoja.

3.3 Mallien todenmukaisuus

Isotermisten viivojen kokeellisten ja simuloitujen tulosten vertailussa on selvinnyt, että saadut tulokset ovat olleet yhteneviä keskenään. Miyamoto I. et al. (2011b) simuloivat isothermisiä viivoja käyttäen taajuuksia 50 kHz ja 500 KHz. Simuloinnissa käytettiin muutamaa eri m :n arvoa. Funktion muut arvot valittiin olettaen, että $T_0 = 25 \text{ C}^\circ$. Simuloinnista huomattiin, että m :n sopivin arvo oli 1, sillä sen avulla saatiin yhtenevät sisäisen ja ulkoisen rakenteen ääriviivat simuloinnin ja kokeellisten tulosten välille.

Simuloinnin tuloksissa taajuudella 50 kHz huomattiin suurempaa heittoa verrattuna kokeellisiin tuloksiin. Eroavaisuus on havaittavissa sisärakenteessa laserin keskittymispisteen ympärillä. Kokeellisesti saaduissa tuloksissa sulalammikko ylittyi $z=0$ akselin alapuolelle. Tämä eroavaisuus selittyy laserin itsefokusoitumisella ja defokusointumisella, joita simulointi ei ota huomioon. Ulkorakenteen rajan tulokset olivat lähellä toisiaan: simuloinnin ja kokeellisten tulosten välinen virhemarginaali oli vain $\pm 3 \%$.

Samanlaisiin tuloksiin päädyttiin myös Miyamoto, I. et al. (2013b) tutkimuksessa. Kokeellisesti huomattiin, että alle 100 kHz taajuuksilla rakennetta, jossa olisi havaittavissa niin kyynel kuin ellipsi, ei syntynyt kunnollisesti. Tällöin simuloitujen tulokset heittivät verrattuna kokeellisiin tuloksiin. Kuitenkin 100 kHz suurimmilla taajuuksilla kyynel-ellipsi-rakenne syntyi ja simuloitujen tulokset olivat yhteneviä kokeellisten kanssa.

4. SÄRÖT

Laserhitsauksen onnistumisen kannalta säröjen ehkäiseminen on tärkeätä, sillä nämä heikentävät tai jopa pilaavat hitsaussauman laadun. Jotta säröjen esiintymistä voitaisiin minimoida, niiden muodostumissyitä pitää ymmärtää. Oikeanlainen hitsausparametrien käyttö on tärkeässä roolissa onnistunutta hitsausta. Hitsaus kahden lasilevyn välissä voidaan toteuttaa raottomasti tai raollisesti ja säröt syntyvät näissä hitsaustavoissa eri lailla.

4.1 Parametrit ja sulalammikko

Laserhitsauksessa tärkeimpiä hitsauksen laatuun vaikuttavia parametrejä ovat laserin skannausnopeus v , pulssintoistotaajuus f ja pulssienergia W . Näiden parametrien suhteilla voidaan muuntaa hitsauksen tuloksia.

Pulssintoistotaajuus kuvaa tiheyttä, jolla peräkkäiset laserpulssit esiintyvät. Tämän avulla voidaan kontrolloida materiaalin jäähtymistä pulssien välissä. Pulssintoistotaajuuden kasvaessa sulalammikko kasvaa energian kasaantumisen takia. (Richter, S. et al. 2011) Sulalammikon kasvaessa kaksiosaisen ellipsi-kyynele-rakenteen esiintyminen yleistyy ja säröjen esiintyminen vähenee. Onnistuneessa hitsauksessa voidaankin aina havaita tämä kaksiosainen rakenne. (Miyamoto, I. et al. 2013b)

Merkittävänä vaikuttajana hitsauksen laatuun on myös pulssienergia, jonka kasvaessa yksittäinen laserpulssi luovuttaa enemmän energiaa johtaen sulalammikon kasvuun. (Richter, S et al. 2016) Liian suuri pulssienergia voi kuitenkin johtaa hitsauksen epäonnistumiseen. Pulssienergia voi materiaaliin luomansa jyrkän lämpögradientin ja lasiin törmäämisvoimansa takia aiheuttaa säröjä lasimateriaaliin hitsauksen alussa. Kuitenkin hitsausprosessin jatkuessa osa näistä säröistä voi tulla absorboituksi sulalammikkoon, näin häviten. Sulalammikon vaikutus voi olla myös negatiivinen, sillä se voi tietyissä olosuhteissa käyttäytyä kuin kiila ja synnyttää halkeamia (Cvecek, K. et al. 2019 ja Miyamoto, I. et al. 2013b)

4.2 Halkeamien synty kahden lasilevyn välissä

Hitsausprosessin aikana lasersäteen energia aiheuttaa termistä laajenemista sulalammikossa ja sen ympäristössä. Jos lasilevyjen välissä on rako, sula materiaali karkaa lasilevyjen väliin. Karannut materiaali mukautuu rakoon, eikä se koe puristusjännitystä sen pienen viskositeetin takia. Lasersäteen liikkuessa eteenpäin sula lasiaines alkaa jäähtymään, joka johtaa materiaalin kutistumiseen. Tämä synnyttää vetojännityksen materiaalin. Hitsausseamaan jääneen vetojännityksen ollessa suurempi kuin lasin kestävyys johtaa säröilyyn.

Jos lasikappaleiden välissä ei ole rakoja, terminen laajeneminen aiheuttaa puristusjännityksen materiaaliin, joka on aikaisemmin mainitun vetojännityksen kanssa samansuuruisen. Lasimateriaali ei kuitenkaan säröile sillä se kestää 20 kertaisen puristusjännityksen vetojännitykseen verrattuna, kun sulalammikko ei ole liian suuri. Kuten raollisessakin hitsauksessa laserin edetessä materiaali alkaa jäähtymään ja kutistumaan. Tämä johtaa laajentumisesta syntyneen puristusjännityksen kumoutumiseen. Uudelleen jähmettyneeseen materiaaliin jää saman kokoluokan jännitteet kuin käsittelemättömässäkin lasissa. (Cvecek, K. et al. 2019 ja Cvecek, K. et al. 2015)

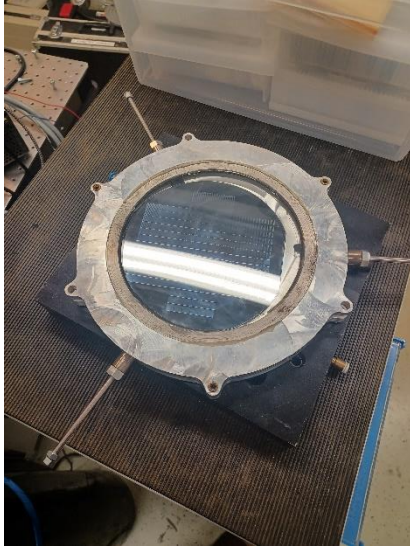
Lasin yllä esitetty elastinen käyttäytyminen sulalammikon ollessa upotettuna lasimateriaalin sisälle on todettu olevan avainasemassa säröjen minimisoinnissa Miyamoto, I. et al. (2013b) mukaan. Tämän takia, raon minimalisointi on erittäin luotettava tekniikka hitsauksen onnistumisen takaamiseksi.

4.3 Optinen kontakti

Yksi käytetyimmistä tavoista yhdistää lasit ennen hitsausta on optinen kontakti. Optinen kontakti muodostuu kahden pinnan välille, kun ne ovat niin lähellä toisiinsa, että Van der Waals voima syntyy. Näin voi käydä vain muutaman sadan nanometrin etäisyyksillä.

Puristimia voidaan käyttää tarvittavan kontaktin muodostamisessa, mutta niiden käyttö luo myös ongelmia. Puristimet ovat yleensä kooltaan kömpelöitä ja voivat myös pahimmassa tapauksessa aiheuttaa säröjä epätasaisen paineen takia.

Puristimien käyttö lisää myös kuluja, joka niiden kömpelön koon kanssa ovat hitsausprosessin teollistamisen hidasteena.



Kuva 3. Hitsauksessa käytetty alipaineipuristin. (Hansen, A et al. 2010)

Optisen kontaktin muodostaminen voi olla myös ongelma, sillä lasipinnan laatu pitää täyttää tarkat vaatimukset. Pinnanlaadun vaatimuksena on: pinnankarheus $< 0.5 \text{ nm}$, totaalisen paksuuden variaation $< 5 \text{ }\mu\text{m}$, ja tasaisuus $< 30 \text{ }\mu\text{m}$. Optisen kontaktin muodostaminen näitä suuremmilla arvoilla on mahdollista, mutta se ei silloin välttämättä kata koko pinnanaluetta. Näiden lisävaatimusten saavuttaminen vaatii lisäresursseja, hankaloittaen lasin laserhitsauksen teollistamista. (Ham, S., 2019).

5. HITSAUSSAUMAN ANALYSOINTI

Lasin laserhitsauksen laatuun vaikuttaa mm. kappaleessa 5.3 mainitut parametrit, lasilevyjen pinnanlaatu, hitsausgeometria ja käytetyn lasimateriaalin ominaisuudet. (Miyamoto, I et al. 2011a). Lasin hitsausta on analysoitu monenlaisilla mittausten menetelmillä, joiden tavoitteena on ollut selvittää muun muassa hitsauksen leikkausjännityksiä, liitosvoimia ja rikkoutumislujuutta. Saatuja tuloksia on usein verrattu hitsaamattomaan materiaaliin.

5.1 Sulalammikko ja hitsausgeometria

Sulalammikon kasvu johtaa murtolujuuden kasvuun. Richter, S. et al. (2016) havaitsivat murtolujuuden kasvavan ensin jyrkästi, jonka jälkeen murtolujuuden kasvu loiveni. Murtolujuuden voidaan havaita lähestyvän ääriarvoaan, joka on riippuvainen käytetystä hitsausgeometriasta.

Richter, S, et al. (2016) saavuttivat erilaisilla hitsausgeometrioilla murtolujuudelle arvon, joka oli joko 40 % tai 75 % verrattuna hitsaamattomaan materiaaliin. Ero hitsausgeometrioiden välillä johtuu toisen hitsauskuvion synnyttämästä suuremmasta pinnanvoimasta, joka vaikuttaa positiivisesti kokonaismurtolujuuteen.

5.2 Leikkausvoima ja optinen kontakti

Leikkausvoiman mittaamista hitsaussaumassa vaikeuttaa optisen kontaktin käyttö. Jotta puhtaasti hitsauksesta syntynyt leikkausvoima saataisiin selville, on optisen kontaktin suuruus selvitettävä. Optisen kontaktin selvittämiseksi leikkausvoimamittaukset suoritetaan optisesti kontaktoiduille näytteille, joita ei olla vielä hitsattu. (Okamoto, Y. 2013).

Miyamoto, I. et al. (2010) tutkivat hitsauksen aiheuttamaa leikkausvoimaa. Leikkausvoiman laskemiseksi he vähensivät mittaamastaan hitsauksen

murtovoimasta optisen kontaktin synnyttämän voiman ja jakoivat tuloksen hitsauksessa käytettyjen hitsauspisteiden määrällä. Tätä menetelmää käyttäen he saivat yksittäisen hitsauspisteen aiheuttaman leikkausvoiman arvoksi 200 kertaisen voiman optiseen kontaktiin verrattuna. Kuitenkin Miyamoto et al. huomasivat, että hitsauspisteiden määrän kasvaessa mitattu leikkausvoima pieneni. Tämän johtuu kasvavan hitsauspisteiden määrän aiheuttamasta epätasaisesti jakautuneesta jänniterasituksesta.

Hitsaussauman on havaittu synnyttävän yleisesti suuremman voiman kuin pelkkä optinen kontakti. Okamoto, Y. (2013) tutki hitsaussauman leikkausvoimaa ja optisen kontaktin suuruuden vaikutusta siihen vertailemalla näytteitä, joista osa oli liitetty vain optisella kontaktilla ja osa oli liitetty optisella kontaktilla ja hitsaussaumalla. Tutkimuksessa havaittiin hitsaussauman aiheuttavan suuremman leikkausvoiman kuin pelkkä optinen kontakti kaikilla paitsi suurimmalla optisen kontaktin arvolla. Optisen kontaktin alueen kasvaessa liitoksen rikkoutumiseen tarvittava leikkauskuorma kasvoi molemmille liitostyypeille. Hitsatuille liitoksille leikkauskuorman kasvu pysähtyi kuitenkin ääriarvoon, jota ei tapahtunut vain optisella kontaktilla liitetyillä näytteillä. Tämän takia optisella kontaktilla pystyttiin saavuttamaan suurempi leikkausvoima kuin hitsaussaumalla.

Hitsaussauman leikkausvoiman kasvu, optisen kontaktialueen kasvun myötä, johtuu optisen kontaktin tarjoamasta paremmasta kontaktista lasilevyjen välissä Okamoto, Y. (2013) mukaan. Optinen kontakti voi siis parantaa hitsaussauman leikkausvoimaa tiettyyn pisteeseen saakka.

5.3 Hitsausparametrit

Kolmen pisteen taivutuskoetta on käytetty taivutuslujuuden selvittämiseksi. Taivutuslujuuden arvioinnissa hitsaus on usein suoritettu yksittäiselle lasilevyille kahden lasilevyn liitoksen sijasta. Taivutuslujuuden selvittämiseksi lasilevy on halkaistu, jotta hitsauksen laajin kohta paljastuu, ja kiillotettu.

Miyamoto, I. et al. (2011a) tutkivat eri pulssitaajuuksien ja skannausnopeuksien vaikutusta mekaaniseen vahvuuteen. Hitsaamattoman lasimateriaalin vahvuuden keskiarvo oli noin 152 MPa kun taas kaikkien hitsattujen koekappaleiden

keskiarvo vahvuus oli 145 MPa. Hitsausnaama saavutti siis melkein yhtä suuren vahvuuden kuin hitsaamaton materiaali. Hitsausparametrit vaikuttivat saavutettuihin tuloksiin: pienimmällä käytetyllä skannausnopeuden ja pulssintaajuuden arvoilla saavutettu vahvuus oli noin 30 MPa pienempi hitsaamattoman materiaalin arvoon verrattuna. Pienestä mittausdatan hajonnasta huolimatta, oli selvää, että skannausnopeuksien kasvu johti vahvuuden kasvuun.

Okamoto, Y. (2013) havaitsi samalaisessa mittausasetelmassa kuin Miyamoto, I. et al. (2011a), että hitsaamattoman materiaalin kanssa samanarvoisia tuloksia voitiin saavuttaa monella pulssinopeuden arvolla. Hän kuitenkin havaitsi skannausnopeuden kasvaessa pulssintoistotaajuuksien laajuuden, jolla hitsaamattoman materiaalin kanssa vertailtaviin tuloksiin päästiin, pienenevän. Skannausnopeuden havaittiin vaikuttavan enemmän tulosten laatuun kuin pulssinopeus.

6. RAOLLINEN HITSAAMINEN

Raon minimointi muun muassa optisen kontaktin avulla on todettu olevan luotettava keino varmistaa laadukas hitsaustulos. Hitsaaminen ilman optista kontaktia, esimerkiksi alaluvun 3.3 esittämien haasteiden takia, on kiinnostanut tutkijoita. Raollinen hitsaaminen on eräs esitetty ratkaisu näiden ongelmien ohittamiseen.

6.1 Raon kuroutumisen teoria

Raollisessa hitsauksessa lasersäde keskitetään kahdesta lasilevystä alemman lasilevyn pinnan lähelle, jolloin pinnasta tulee muokkautuvaa. Materiaalin absorboima energia aiheuttaa myös materiaalin laajenemista, mikä voidaan havaita pinnan sileänä pullistumisena. Pullistuma on sileä, kun lämpötila ei nouse liian korkeaksi. Jos kuitenkin sulan materiaalin lämpötila kasvaa liian korkeaksi pintajännitys ei pysty estämään sulan lasin karkaamista lasilevyjen väliin tai rosoisen pullistuman muodostumista.

Lasimateriaali mukautuu ylemmän lasimateriaalin pintaan, jos hitsauksen aikana syntynyt pullistuma on tarpeeksi suuri kuromaan lasilevyjen välisen raon ja lasimateriaali on vielä muokattavissa. Mukautuneen materiaalin voidaan olettaa olevan niin lähellä ylemmän lasin alapintaa, että Van der Waals-voimat syntyvät näiden välille. Jos pinnat ovat riittävän lähellä toisiaan, tarpeeksi suurissa lämpötiloissa ja materiaalit ovat kosketuksessa tarpeeksi kauan, lasipinnat voivat sekoittua toisiinsa.

Kuten alakappaleessa 4.2 todettiin, lasin kokema lämpölaajeneminen peruuntuu lämpökutistumisen myötä. Tilanteessa, joissa lasilevyt eivät sekoittuneet toisiinsa, pullistumalla ei ole mahdollisuutta vapauttaa sen sisäisiä jännityksiä, sillä pullistuman pintajännitys estää pinnan rikkoutumisen. Syntyneiden Van der Waals-voimien takia kutistuminen aiheuttaa alkuperäisen raon kuroutumisen umpeen, kun pienentyvä pullistuma aiheuttaa vetävän voiman lasipintaan. Kuroutumisen on havaittu tapahtuvan myös tilanteissa, missä lasilevyillä ei ole

ollut hyvää pinnan laatua, mikä on myös eräs etu optiseen kontaktiin verrattuna. (Cvecek, K. et al. (2015))

6.2 Kokeellisia tuloksia

Cvecek, K. et al. (2015) tutkivat raon kuroutumista eri lasimateriaaleilla. Tutkittavina lasimateriaaleina olivat soda lime, D263, Fused Silica, BF33 ja NBK7. Lasi-levyt tuotiin lähelle toisiaan muodostamalla optinen kontakti lasilevyparin eräaseen osa-alueeseen. Hitsauskokeilu suoritettiin tämän jälkeen optisesti kontaktittomalla raon omaavalla alueella. Raon kuroutuminen onnistui kaikille laseille lukuun ottamatta NBK7-näytettä. Onnistuneiden hitsauksien sidosenergiat olivat kokoluokaltaan suurempia, kuin optisen kontaktin aiheuttamat energiat. Tulokset osoittavat, että raollisella hitsauksella voidaan muodostaa niin Van der Waals-voimia kuin myös aitoja kemiallisia sidoksia lasikappaleiden välille.

Edellä esitetyt tulokset ovat saaneet myös kritiikkiä. Richter, S. et al. (2015) kommentoivat Cvecek, K. et al. (2015) tuloksia ja huomauttavat että heidän saavuttama lasin pullistuma oli erittäin pientä, kokoluokaltaan 100 nm, ja saatuja tuloksia saattoi vääristää koekappaleiden osittain yhdistäminen optisella kontaktilla.

Richter, S. et al. (2015) varmistavat omassa tutkimuksessaan, ettei optinen kontakti voinut vaikuttaa positiivisesti testituloksiin. Richter, S. et al. käyttivät 1 mm paksuisia laseja, joista toiseen oli uurrettu erikokoisia askelmia. Nämä askelmat mahdollistivat raon kuroutumisen testaamisen eri etäisyyksille 1 μm -3.5 μm väliltä. Richter et al. käyttivät myös monta erilaista laserin keskittämispisteen etäisyyttä.

Raon kuroutuminen saavutettiin käytetyillä parametreilla lukuun ottamatta suurinta raon leveyttä ja muutamaa keskittämisetäisyyttä. Tuloksista saatiin selville, että keskittämispisteellä oli 400 μm alue, jossa hitsaus onnistuu ja vain suurimmille raon leveyksille keskittämispisteen sijainti vaikutti tuloksiin huomattavasti. Tulosten analysoinnissa todettiin, että onnistunut hitsaussauma saavutettiin niin kutistuvan materiaalin luoman vetovoiman kuin myös sulalammikosta karanteen materiaalin avulla.

Richter, S. et al. (2015) testasivat raon ylitystä myös 6,35 mm paksuisille lasilevyille, joiden välissä oli 3 μm rako ja joiden välille ei ollut optista kontaktia. Kapaleiden hitsaus onnistui ja niiden analysointi näytti, että suurin saavutettu murtolujuus oli noin 85 % hitsaamattoman materiaalin murtolujuudesta. Samanlainen hitsaus suoritettiin myös optisesti kontaktoiduille näytteille ja suurin saavutettu murtolujuus oli noin 90 % hitsaamattomasta materiaalista. Nämä tulokset osoittavat, että hitsaus ilman optista kontaktia voi saavuttaa niin optisen kontaktin tasoisia tuloksia, kuin myös olla vertailukelpoinen hitsaamattoman materiaalin kanssa.

7. MONIMATERIAALINEN HITSAUS

Erilaisten lasimateriaalien keskeinen hitsaaminen kuin myös lasin hitsaus muiden materiaalien kanssa on eräs lasihitsauksen osa-alue. Hitsaus erilaisten materiaalien välillä laajentaa lasin laserhitsauksen käyttökohteiden määrää. USP-hitsauksen mahdollistama mikrotason kokoluokka on hyödyllinen varsinkin elektroniikassa, elektromekaniikassa ja lääketieteen soveltuvuuskohteissa. (Watanabe, W. et al. 2006)

7.1 Lasimateriaalien välinen hitsaus

Erilaisten lasimateriaalien välinen hitsaaminen on mahdollista, mutta hitsauksen hitsauslujuus jää saman lasimateriaalin hitsauksen tuloksien alapuolelle vaihtelevin tuloksin. Richter, S et al. (2016) huomasivat onnistuneissa monimateriaalisissa lasin hitsauksissa kyynel-ellipsi-rakenteen syntyvän eri lasimateriaalien välille. Rakenteen isotermiset viivat eivät kuitenkaan olleet jatkuvia kuten saman lasimateriaalin hitsauksissa. Lasimateriaalien rajalla havaittiin myös suuria sulalammikon koon muutoksia.

Borosilicate- ja fused silica-lasien välinen hitsaus on havaittu onnistuvaksi monilla eri hitsausparametrien arvoilla. Lasimateriaalien välinen hitsaus nähtiin onnistuvan materiaalien välisten termomekaanisten jännitteiden vapautumisen ja materiaalien uudelleenkovettumisessa syntyvien uusien sidoksien ansiosta. (Watanabe, W. et al. (2006))

Eri lasimateriaalien välisten hitsauksien ja saman lasimateriaalin hitsauksen tuloksien välillä on eroja. Richter, S. et al. (2016) huomasivat eri lasimateriaalien välisten hitsauksien murtumalujuuksien olevan 50–100 % saman lasimateriaalin hitsauksen murtumalujuudesta. Zerodurin ja ULE:n välisen hitsauksen tulos oli heikoin kaikista testatuista yhdistelmistä: saavutettu murtumalujuus oli 11 MPa, mikä oli vain puolet Zerodurin hitsauksen murtumalujuudesta. ULE:n ja SiO_2 :n välisessä hitsauksessa saavutettiin 53 MPa:n murtumalujuus, mikä oli 1 MPa pienempi kuin ULE:n murtumalujuus ja 0.5 MPa suurempi kuin SiO_2

murtumalajuus. Näiden tulosten lisäksi SiO_2 :n ja Borofloat 33:n välisen hitsauksen murtumalajuus oli 75 MPa, mikä oli 70 % Borofloatin hitsauksen murtolujuudesta. Tämän lasimateriaaliyhdistelmän murtumalajuus oli myös 5 MPa suurempi kuin SiO_2 :n hitsauksen murtumalajuus.

	Zerodur	Zerodur ja ULE	ULE	ULE ja SiO_2	SiO_2	SiO_2 ja Borofloat 33	Borofloat 33
Hitsaamattoman materiaalin murtolujuus (MPa)	160	-	90	-	70	-	133
Hitsauksen murtolujuus (MPa)	19.2	11	54	53	52.5	75	107.35

Taulukko 1. Eri lasimateriaalien välisten hitsauksien murtolujuuksia, muokattu (Richter, S. et al. 2016, s. 65)

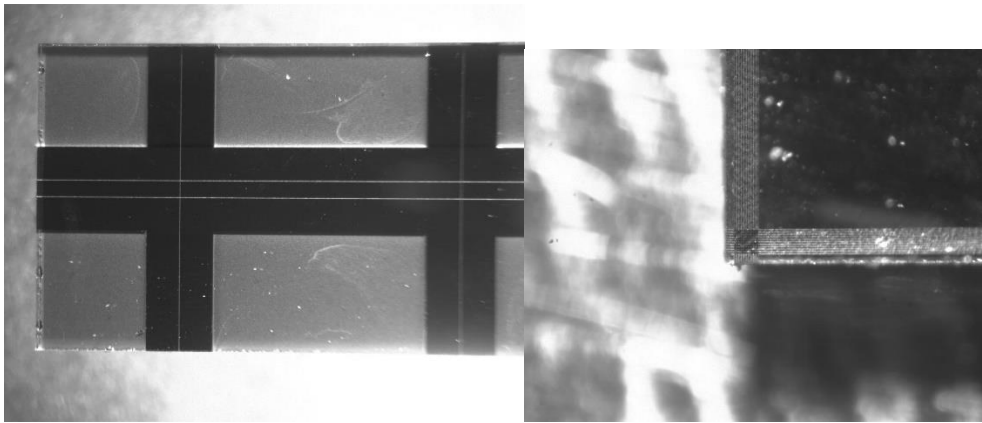
Zerodur-ULE yhdistelmää lukuun ottamatta, lasimateriaalien välisten hitsauksien murtumalajuuksien arvot olivat yli 50 % hitsaamattomien materiaalien murtumalajuuksista. Murtumalajuuksien arvot esitellään taulukossa 1.

7.2 Metallit ja puolimetallit

Laserhitsauksella voidaan yhdistää lasia metallien ja puolimetallien kanssa. Lasin ja näiden materiaalien välinen hitsaus suoritetaan käyttäen samanlaista asetelmaa ja prosessia kuin pelkän lasin hitsauksessa.

Pii

Lasin hitsaus piin kanssa on tuottanut hyviä tuloksia. Horn, A. et al. (2008) havaitsivat lasi hitsaukselle ominaisen kyynel-ellipsi-rakenteen muodostuvan myös lasin hitsauksessa piin kanssa. Laserin keskittämispisteessä, ja samalla myös materiaalien rajapinnalla, voidaan havaita materiaalien sekoittumista. (Richard M. et al. 2014 ja Hansen, A et al. 2010)



Kuva 4. Kuvat lasin ja piin hitsauksen näytteistä. (Hansen, A et al. 2010)

Hansen, A et al. (2010) havaitsivat lisää yhtäläisyyksiä lasihitsauksen ja lasi-pii-hitsauksen välillä. Optisen kontaktin havaittiin vaikuttavan hitsauksen murtumiseen vaadittavan leikkauskuorman suuruuteen huomattavasti, samanlailla kuin lasin hitsauksessa. Hitsauspisteiden määrän kasvaessa leikkausvoima havaittiin pienenevän lasi-pii-hitsauksessa, mukailien jälleen lasin hitsausta. Leikkausjännityksen havaittu kasvu pulssinopeuden kasvaessa oli myös eräs lasi-pii-hitsauksen yhtäläisyys lasihitsauksen kanssa.

Hitsausseaman lujuudelle on saavutettu myös lupaavia arvoja. Miyamoto, I et al. (2015) testasivat lasin ja piin välistä hitsaamista. Hitsausseaman leikkauslujuuden arvoksi saatiin parhaimmillaan 85 MPa, joka on suurempi kuin anodisen sidoksen aiheuttama lujuus.

Metallit

Lasin hitsausta metallien kanssa on myös tutkittu. Richard M. et al. (2014) tutkivat lasin hitsausta alumiinin, kuparin ja ruostumattoman teräksen kanssa.

Metallien tapauksessa hitsaaminen perustuu lineaarinen absorptioon, toisin kuin lasin hitsaus. Lasin ja näiden materiaalien välinen hitsaus onnistui, mutta joidenkin yhdistelmien kanssa oli ongelmia: ruostumattoman teräksen tapauksessa hitsauksessa oli havaittavissa säröilyä ja alumiinin tapauksessa näyte hajosi sen poikkileikkauksen tarkasteluun valmistelun aikana.

Metalleja on käytetty lasin laserhitsauksessa myös energiaa absorboivana väliaineena. Väliaineiden käyttö ei ole ihanteellista, sillä lasin laserhitsauksen suurena etuna on juuri erilaisista väli- ja liitosainesta eroon pääseminen. Metallien käyttö energiaa absorboivana väliaineena voi kuitenkin tukea hitsausprosessia, etenkin nanosekunti lasereiden kohdalla, joita ei lueta USP-lasereiden joukkoon. Nanosekunti lasereiden hyvänä puolena on niiden stabiilisuus ja edullisuus verrattuna USP-lasereihin. Nanosekunti lasereilla hitsaamisessa lämmönjohtuminen on suuremmissa osassa hitsausprosessia kuin USP-hitsauksessa.

Pablos-Martín, A. de, & Höche, T. (2017) käyttivät ohutta titaani levyjä absorboivana väliaineena kahden lasilevyn välissä nanosekunti-laserilla hitsattaessa. Titaanin tarkoituksena oli heijastaa osa laserenergiasta ja nostaa ylemmän lasilevyn lämpötilaa. Titaani levyn toisena tarkoituksena oli yhdistää lasilevyjä, joiden kanssa se oli sekoittunut, jäähdyttyään.

Näytteiden hitsausalue havaittiin olevan sileä ja homogeeninen, lukuun ottamatta yksittäistä säröilevää näytettä. Tämän säröily ymmärretään johtuneen termisestä shokista. Tutkimuksen tulokset osoittavat nanosekuntilasereiden potentiaalia lasin laserhitsaus käytössä.

8. YHTEENVETO

Tämän työ onnistui antamaan kattavan yleiskuvan lasin laserhitsauksesta. Lasin laserhitsauksen toimintaprosessi esiteltiin ja hitsausjäljen mallintamiseen käytetyt matemaattiset mallit käytiin läpi ja todettiin luotettaviksi. Hitsauksessa esiintyvien säröjen muodostumisprosessi esiteltiin ja säröihin vaikuttavia tekijöitä kartoitettiin. Hitsausauman kokeellisia tuloksia käytiin läpi ja todettiin lasin laserhitsauksen olevan liitännämenetelmänä kelvollinen. Lasin laserhitsaus osoitettiin onnistuvaksi niin raottomasti kuin raon kanssa. Lasin hitsaus, niin muiden lasien kuin toisten materiaalien kanssa, todettiin mahdolliseksi ja näiden tulokset todettiin lupaaviksi.

Laserteknologian kehittymisen myötä myös lasin laserhitsaus tulee tulevaisuudessa kehittymään. Alan tulevan tutkimuksen painotteena tulee todennäköisesti olemaan raollinen hitsaaminen ja nanosekunti lasereiden käyttö hitsauksessa niiden teollisen soveltuvuuden takia.

LÄHTEET

Cvecek, K., Odato, R., Dehmel, S., Miyamoto, I., & Schmidt, M. (2015). Gap Bridging in Joining of Glass Using Ultra Short Laser Pulses. *Optics express* Vol.23, No.5, pp. 5681–5693.

Cvecek, K., Dehmel, S., Miyamoto, I., & Schmidt, M. (2019). A Review on Glass Welding by Ultra-Short Laser Pulses. *INTERNATIONAL JOURNAL OF EXTREME MANUFACTURING* 1. No. 4 pp. 42001–.

Ham, S. S., Kim, C. H., Choi, S. H., Lee, J. H., Lee, Y. J., Byeon, C. C., & Lee, H. (2019). Jig-Free Laser Welding of Eagle XG Glasses by Using a Picosecond Pulsed Laser. *Journal of mechanical science and technology* 33, No. 6, pp. 2825–2832.

Horn, A., Mingareev, I., Werth, A., Kachel, M., & Brenk, U. (2008). Investigations on Ultrafast Welding of Glass–glass and Glass–silicon. *Applied physics. A, Materials science & processing* Vol 93, no. 1. pp. 171–175.

Kaiser, E. (2016). Laser Welding of Glass Replaces Glueing Procedure: Glass Welding with a Femtosecond Laser Brings Economic Advantages and New Design Options. *Laser-Technik-Journal* 13, no. 3, pp. 22–25.

Lawrence, J. R. (2010). *Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications*. Cambridge: CRC Press. pp. .23-24

Miyamoto, I. (2007). Local Melting of Glass Material and Its Application to Direct Fusion Welding by Ps-Laser Pulses. *Journal of laser micro nanoengineering* Vol.2, no. 1, pp. 7–14.

Miyamoto, I., Cvecek, K., Okamoto, Y., & Schmidt, M. (2010). Novel Fusion Welding Technology of Glass Using Ultrashort Pulse Lasers. *Physics procedia* Vol. 5, pp. 483–493.

Miyamoto, I., Cvecek, K., Okamoto, Y., Schmidt, M., & Helvajian, H. (2011)a. Characteristics of Laser Absorption and Welding in FOTURAN Glass by Ultrashort Laser Pulses. *Optics express* Vol.19, No.23, pp. 22961–22973.

Miyamoto, I., Cvecek, K., & Schmidt, M. (2011)b. Evaluation of Nonlinear Absorptivity in Internal Modification of Bulk Glass by Ultrashort Laser Pulses. *Optics express* Vol.19, No. 11, pp. 10714–10727.

Hansen, A., Kumpulainen, T., Okamoto, Y. (2010). iiLASE – Si-glass joining project. *Julkaisematon raportti*

Miyamoto, I., Cvecek, K., Okamoto, Y., & Schmidt, M. (2013)a. Internal Modification of Glass by Ultrashort Laser Pulse and Its Application to Microwelding. *Applied physics. A, Materials science & processing* 114, no. 1, pp. 187–208.

Miyamoto, I., Cvecek, K., & Schmidt, M. (2013)b. Crack-Free Conditions in Welding of Glass by Ultrashort Laser Pulse. *Optics express* 21, no. 12, pp. 14291–14302.

Miyamoto, I., Okamoto, Y., Hansen, A., Vihinen, J., Amberla, T., & Kangastupa, J. (2015). High Speed, High Strength Microwelding of Si/glass Using Ps-Laser Pulses. *Optics express* Vol. 23, no. 3, 3427–3439.

Okamoto, Y. (2013). Evaluation of Molten Zone in Micro-welding of Glass by Picosecond Pulsed Laser. *Journal of laser micro nanoengineering*. Vol.8, No.1, pp. 65–69.

Pablos-Martín, A. de, & Höche, T. (2017). Laser Welding of Glasses Using a Nanosecond Pulsed Nd:YAG Laser. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol 90. pp. 1-9.

Richard M. Carter, Jianyong Chen, Jonathan D. Shephard, Ropert R. Thomson, & Duncan P. Hand. (2014). Picosecond laser welding of similar and dissimilar materials. *Applied Optics*. Vol.53, pp. 4233-4238.

Richter, S., Döring, S., Tünnermann, A., & Nolte, S. (2011). Bonding of Glass with Femtosecond Laser Pulses at High Repetition Rates. *Applied physics. A, Materials science & processing* 103, no. 2, pp. 257–261.

Richter, S., Zimmermann, F., Eberhardt, R., Tünnermann, A., & Nolte, S. (2015). Toward Laser Welding of Glasses Without Optical Contacting. *Applied physics. A, Materials science & processing* Vol. 121, no. 1, pp. 1–9.

Richter, S., Zimmermann, F., Tünnermann, A., & Nolte, S. (2016). Laser Welding of Glasses at High Repetition Rates – Fundamentals and Prospects. *Optics and laser technology* Vol. 83, pp. 59–66.

Sugioka, K., & Cheng, Y. (2014). Femtosecond Laser Three-Dimensional Micro- & Nanofabrication. *Applied physics reviews* Vol. 1, no. 4 pp. 41303–.

Watanabe, W., Onda, S., Tamaki, T., Itoh, K., & Nishii, J. (2006). Space-Selective Laser Joining of Dissimilar Transparent Materials Using Femtosecond Laser Pulses. *Applied physics letters* Vol. 89, no. 2