Laserhitsauskäsikirja

Mikko Hietala, Markku Keskitalo, Tero Jokelainen ja Kari Mäntyjärvi





Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä

Mikko Hietala, Markku Keskitalo, Tero Jokelainen & Kari Mäntyjärvi

Laserhitsauskäsikirja

OULUN YLIOPISTO Kerttu Saalasti Instituutin julkaisuja Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä

ISBN 978-952-62-2020-8 (painettu) ISBN 978-952-62-2021-5 (elektroninen)

ISSN 2489-3501 (painettu)

Mikko Hietala, Markku Keskitalo, Tero Jokelainen & Kari Mäntyjärvi Laserhitsaus käsikirja

Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutti, Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä

Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin julkaisuja 7/2018 Nivala

Tiivistelmä

Laserhitsauskäsikirjassa annetaan ohjeita laserhitsaus limiliitoshitsien suunnitteluun. Laserhitsattuja limiliitoshitsejä tutkittiin Kevyet ja kestävät rakenteet (KeKeRa) -hankkeessa, jonka tulosten perusteella käsikirja on tehty. Käsikirjassa on esitetty esimerkkejä limiliitoshitsien leikkausvoimakokeista sekä väsytyskokeista.

Käsikirjan alussa on kerrottu lyhyesti laserhitsauksesta sekä laserhitsausmuodoista. Myös laserhitsauslaitteistot on esitelty lyhyesti. Laserhitsaus liitostyypeistä on esitelty limiliitos, päittäisliitos, pienaliitos sekä kolo-tappi hitsausliitos. Käsikirjassa on myös esitetty tietoa laserhitsausparametreista sekä hitsien metallurgiasta. Erilaisten terästen laserhitsausta on myös käsitelty.

Käsikirja antaa tietoa laserhitsattujen limiliitoshitsien kestävyydestä rakenneteräksillä ja ultralujilla teräksillä. Käsikirjassa annetaan tietoa hitsien määrästä ja hitsausenergian vaikutuksesta hitsien ominaisuuksiin erilaisilla teräksillä. Käsikirjassa esitellään Kevyet ja kestävät rakenteet hankkeessa kehitetyn laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen ominaisuudet. Lisäksi käsikirjassa annetaan yleisiä ohjeita FE-analyysin tekemiseen limiliitos laserhitsatulle rakenteelle.

Tämä käsikirja perustuu Kevyet ja kestävät rakenteet (KeKeRa) -hankkeessa tehtyyn tutkimukseen. KeKeRa-hanke on Euroopan aluekehitysrahaston EAKR-hanke ja sen on myöntänyt Pohjois-Pohjanmaan liitto. Hankkeen kuntarahoittajina ovat toimineet Nivala-Haapajärven seutukunta NIHAK r.y., Nivalan Teollisuuskylä Oy ja Ylivieskan seutukunta r.y. Hankkeen yksityisrahoittajina ovat olleet Wärtsilä Finland Oy, SSAB Europe Oy, HT Laser Oy, Miilux Oy ja Randax Oy.

Asiasanat: laserhitsaus, limiliitos, väsyminen, päittäisliitos, HAZ, ultraluja teräs, kulutusteräs

Mikko Hietala, Markku Keskitalo, Tero Jokelainen & Kari Mäntyjärvi Laser welding handbook

University of Oulu, Kerttu Saalasti Institute, Future Manufacturing Technologies (FMT) research group

Publication of Kerttu Saalasti Institute of the University of Oulu 7/2018 Nivala, Finland

Abstract

This laser welding handbook contains instructions on how to design structures containing laser welded lap joints. These laser welded lap joints were investigated in the "Robust and Lightweight Structures" or "KeKeRa" project. This handbook was written based on the results from the mentioned project. It contains examples of shear strength tests and fatigue tests made to laser welded lap joints.

The laser welding and laser welded joint types are explained in the beginning of the handbook. The laser welding equipment are also presented briefly. Some of the types laser welded joints are also introduced in this handbook, such as the lap joint, butt joint, corner joint and hole-plug joint. There is also information regarding the laser welding parameters and welding metallurgy of the laser welds.

The handbook contains information on the strength properties of laser welded lap joints with structural steels and ultra-high strength steels. It also contains information on the number of weld seams needed to make a good joint. The findings on welding heat input and its effects on the welding properties of different steels are presented. A new joint combining a laser weld and a two-sided tape, which was developed in the project, is exhibited in this book. An FE-analysis to lap joint laser welded structures are included as well.

The handbook is based on the research made in the "Robust and Lightweight Structures" project. The authors would like to acknowledge the financial support received from the European Union (European regional development fund) and Council of Oulu Region, Nivala industrial park Ltd, Nitek registered association and The Association of the Ylivieska Sub region. The industrial companies Wärtsilä Finland Oy, SSAB Europe Oy, HT Laser Oy, Miilux Oy, Randax Oy have participated in this research work.

Keywords: laser welding, lap joint, fatigue, butt joint, HAZ, ultra-high strength steel, abrasion resistant steel

Lyhenteet

HAZ	heat affected zone
LCF	low cycle fatigue
HCF	high cycle fatigue
Yb:YAG	ytterbium-doped yttrium aluminum garnet Y ₃ Al ₅ O ₁₂
MAG	metal active gas welding
TIG	tungsten inert gas arc welding
MMAW	manual metal arc welding
BPP	beam parameter product
HV	vickers kovuus
HBW	brinel kovuus
FEM	finite element method

Sisällys

Ly	henteet	6
1	Johdanto	13
2	Laserhitsaus	14
	2.1 Avaimenreikähitsaus	14
	2.2 Sulattava hitsaus	15
	2.3 Laserhitsauksen edut	16
	2.4 Laserhitsauslaitteet	17
	2.5 Yb:YAG kiekkolaser	18
	2.6 Kuitulaser	19
	2.7 Hiilidioksidilaser	19
	2.8 Hitsausoptiikat	20
3	Laserhitsauksen teoria	21
	3.1 Laserhitsauksen liitostyypit	21
	3.1.1 Limiliitos	22
	3.1.2 Päittäisliitos	23
	3.1.3 Railon sivusta laserhitsattu pienaliitos	25
	3.1.4 Muotosulkeinen kolo-tappi hitsausliitos	26
	3.2 Laserhitsausparametrit	27
	3.2.1 Teho	28
	3.2.2 Hitsausnopeus	29
	3.3 Laserhitsauksen metallurgia	29
	3.4 Laserhitsin tunkeuma	31
	3.5 Laserhitsin väsyminen	32
	3.5.1 Ultralujien terästen väsyminen	33
	3.6 Terästen laserhitsattavuus	33
	3.6.1 Muovattavien terästen ja rakenneterästen laserhitsaus	33
	3.6.2 Ultralujien ja kulutus terästen laserhitsaus	34
	3.6.3 Ruostumattomien terästen laserhitsaus	34
4	Laserhitsattujen limiliitosten ominaisuudet	37
	4.1 Laserhitsin leveys ja pinta-ala	37
	4.2 Esimerkkitapauksissa käytetyt koemateriaalit, laitteistot, koesauvat,	
	hitsausparametrit ja hitsien leveydet	37
	4.2.1 Koemateriaalit	37
	4.2.2 Kokeissa käytetyt laitteistot	38
	4.2.3 Laserhitsausparametrit	38
	4.2.4 Koesauvat	39
	4.2.5 Kokeissa käytettyjen laserhitsien leveydet	42
	4.3 Leikkausvoiman suuntainen kuormitus laserhitsi limiliitoksessa	43
	4.3.1 Hitsien määrä leikkauslujuuden kannalta limiliitoksissa	43

	4.3.2	Esimerkki laserhitsien leikkausvoimakokeesta symmetrisellä	11
	Koesauva		44
	4.3.3 koesauva	Esimerkki rakenneteräs 355 MC leikkausvoimakoe epäsymmetrinen	44
	434	Raex 400 kulutusteräs leikkausvoimakokeet enäsymmetrisellä	
	koesauva	alla	47
	4.4 Las	erhitsien kovuus	49
	4.5 Las	erhitsin tunkeuma limiliitoksessa	51
	4.6 Las	erhitsin normaalivoiman suuntainen lujuus limiliitoksessa	52
	4.6.1	Esimerkki laserhitsien normaalivoiman suuntaisesta vetokokeesta	52
	4.7 Las	erhitsin väsymiskestävyys	55
	4.7.1	Esimerkki laserhitsien väsytyskokeet symmetrinen koesauva	55
	4.7.2	Esimerkki laserhitsien väsytyskokeet epäsymmetrinen koesauva	61
	4.7.3	Epäsymmetrisen väsytyskokeen tulosten vertailu aikaisemmin	
	julkaistu	un väsymisjulkaisuun	62
	4.8 Las	erhitsi kaksipuolinen teippi liitos	63
	4.8.1	Esimerkki laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksesta	63
	4.9 Suo	jakaasun käyttö laserhitsauksessa	66
	4.9.1	Esimerkki suojakaasun vaikutus kulutusteräksen laserhitsauksessa	66
	4.9.2	Esimerkki suojakaasun vaikutus ruostumattoman EN1.4310	
	jousiterä	ksen laserhitsauksessa	67
	4.10 Las	erhitsien FE-analyysi	70
	4.10.1	Esimerkki laserhitsien FE-analyysista Abaqus-ohjelmalla	71
	4.10.2	Raex 400 kulutusteräs staattinen normaalivoima	72
	4.10.3	Raex 400 kulutusteräs staattinen leikkausvoima	73
	4.10.4	DC01 teräksen staattinen leikkausvoima	74
	4.10.5	DC01 teräksen staattinen normaalivoima	75
5	Yhteenv	eto	77
Kiit	okset		78
Läh	deluettel	0	.79

obottiin.
14
menreiän hitsin15
16
17
18
18
19
20

Kuva 9. a) Yleisimmät laserhitsausliitokset, b) Limiliitoksella on useita eri käyttötapoja ja kuvassa esitetty muutamia esimerkkejä, c) Päittäisliitoksen mahdollisia käyttötapoja laserhitsauksessa
Kuva 11. Limiliitos, jossa kaksi 2 mm levyä hitsattu yhteen laserhitsillä23 Kuva 12. Päittäisliitos. Kaksi 6 mm paksuista levyä liitetty päittäisliitos laserhitsillä.
Kuva 13. a) Pienaliitos, joka on hitsattu sädekulmalla 25°. Kuvasta nähdään, että levyt eivät ole hitsautuneet hyvin yhteen. b) Pienaliitos, joka on hitsattu sädekulmalla 5°. Kuvasta nähdään, että levyt ovat hitsautuneet hyvin yhteen
Kuva 15. Laserhitsatut kolo-tappi liitokset. Kuvassa 8 mm paksuiset levyt on liitetty 6 mm paksuiseen levyyn kolo-tappi liitoksilla. Liitospinnat on laserleikattu
Kuva 20. Kuvassa vasemmalla puolella läpi tunkeutunut laserhitsi ja oikealla osittain tunkeutunut laserhitsi. Läpi tunkeutuneen hitsin aiheuttama muodonmuutos hitsattavassa kappaleessa on pienempi kuin osittain tunkeutuneen hitsin aiheuttaman muodonmuutos 32
Kuva 21. FMT-ryhmän tutkimustuloksia, jossa on verrattu ultralujan 960 QC teräksen laserhitsiä lähes saman lujuusluokan kulutusteräksen HBW 400 MAG- hitsiin. Jännityssuhde R=-1
Kuva 22. Ferriittisen EN 1.4521 ruostumattoman teräksen laserhitsin mikrorakenne. Kuvasta nähdään, että muutosvyöhykkeellä ei ole tapahtunut rakeenkasvua
levyä. Hitsin leveys on suurempi ylimmän ja keskimmäisen levyn välillä kuin alimman ja keskimmäisen levyn välillä. Hitsin leveys on ylimmän ja keskimmäisen levyn välillä 1,52 mm ja keskimmäisen ja alimman levyn välillä 0,98 mm
Kuva 29. a) Leikkausvoimakoe Raex 400, 355 MC ja DC01 b) Leikkausvoimakoe Raex 400 ja 355 MC
hitsin lujuus verrattuna kahteen 225 J/mm hitsiin

Kuva 32. 355 MC leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva. Kuvassa kahden, kolmen sekä neljän rinnakkaisen 40 J/mm energiantuonnin hitsin leikkausvoimakoe.
Kuva 34. Raex 400 leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva. Eri energiantuonneilla ja hitsien määrällä tehty leikkausvoimakoe
energiantuonneilla hitsattujen hitsien kovuusprofiilit
Kuva 36. Raex 400 kulutusteräs kovuusprofiili 133 J/mm energiantuonnin hitsille.49 Kuva 37. DC01 muovattava teräs kovuusprofiili 40 J/mm energiantuonnin hitsille.50 Kuva 38. Raex 400 kulutusteräs kovuusprofiilit 40 J/mm ja 225 J/mm
energiantuonnin hitseille
Kuva 40. Osittain tunkeutunut limiliitos laserhitsi
Kuva 41. Lapitunkeutunut limilitos läsernitsi
Kuva 43. Normaalivoiman suuntainen vetokoe Raex 400 ja DC01 40 J/mm energiantuonnin laserhitseille
Kuva 44. Raex 400 40 J/mm energiantuonnin laserhitsin murtuma sula-alueelta54
Kuva 45. Raex 400 kulutusteräs ja 355 MC rakenneteräs väsytyskoe symmetrisellä koesauvalla 40 J/mm energiantuonnin laserhitseille koelevyn jännityksen mukaan.56 Kuva 46. Raex 400 kulutusteräs ja 355 MC rakenneteräs väsytyskoe symmetrisellä koesauvalla 40 J/mm energiatuonnin laserhitseillä hitsin jännityksen mukaan
symmetrisellä koesauvalla 225 J/mm energiantuonnin laserhitseillä
ja 225 J/mm energiantuonnin laserhitseille
Kuva 49. 355 MC rakenneteräksen väsytyskoe symmetrisellä koesauvalla 40 J/mm ja 225 J/mm energiantuonnin laserhitseille
Kuva 50. Raex 400 kulutusteräksen väsymismurtuma symmetrinen koesauva 40 J/mm energiantuonnin laserhitsillä
Kuva 51. a) 40 J/mm hitsi, joka on murtunut hitsin poikki eli levyn pinnan suuntaisesti. b) 225 J/mm hitsi, joka on murtunut hitsin suuntaisesti. c) ja d) 255
Jinni hitsi, joka on mutunut hitsin poikki.Systema 52. Väsytyskoe hitsillä 40 J/mm vaihtokuormituksella (R = -1) javetotykytyksellä (R = 0).60
Kuva 53. Raex 400 kulutusteräs ja 355 MC rakenneteräs väsytyskoe epäsymmetrinen koesauva kahdella 40 J/mm energiantuonnin laserhitsillä
100 J/mm energiantuonnilla verrattuna kahteen hitsiin 40 J/mm energiantuonnilla.62

Kuva 55. Artikkelissa Fracture mechanics parameter for the fatigue resistance of laser
welds esitetyt väsytyskoetulokset verrattuna Raex 400 ja 355 MC 40 J/mm
laserhitseihin (Wang 1995)63
Kuva 56. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen leikkausvoimakoe symmetrinen koesauva Raex 400 kulutusteräs
Kuva 57. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen väsytyskoe symmetrinen koesauva
Raex 400 kulutusteräs
Kuva 58. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva Raex 400 kulutusteräs
Kuva 59. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitos väsytyskoe epäsymmetrinen koesauva Raex 400 kulutusteräs
Kuva 60. Väsytyskoetulokset kulutusteräs suojakaasuton hitsi sekä suojakaasun kanssa hitsattu hitsi
Kuva 61. Ohuen 0,5 mm paksun ruostumattoman EN 1.4310 teräksen hitsien yläpinnan poikkileikkaukset. Vasemmalla kuvassa olevan hitsin hitsauksessa on käytetty suojakaasua ja hitsillä on selkeä kupu. Oikealla kuvassa oleva hitsi on hitsattu ilman suojakaasua ja hitsistä on poistunut materiaalia ja hitsin yläpinta on selvästi kuopalla
Kuva 62. Suojakaasulla hitsatun ja ilman suojakaasua hitsatun koesauvan erot
vetokokeessa. Oikealla kuvassa kuopalla oleva ilman suojakaasua hitsattu hitsi taipuu
huomattavasti enemmän kuin kuvullinen hitsi vasemmalla kuvassa
Kuva 63. Suojakaasun kanssa hitsatun ja ilman suojakaasua hitsatun hitsisauman erot. Vasemmalla suojakaasun kanssa hitsattu ja oikealla ilman suojakaasua hitsattu
sauma. Suojakaasun kanssa hitsattu sauma on kirkas ja roiskeeton. Ilman suojakaasua hitsattu sauma on tumma ja kuvassa näkyy paljon roiskeita
Kuva 64. EN 1.4310 ruostumattoman jousiteräksen vetokoe. Tulokset
perusmateriaalille sekä suojakaasulla ja ilman suojakaasua hitsatuille limiliitos
koesauvoille
Kuva 65. Laserhitsin jännitysjakauma FE-analyysissa71
Kuva 66. Normaalivoiman suuntainen kuormitus71
Kuva 67. Leikkausvoiman suuntainen kuormitus
Kuva 68. Maksimisolmuvoima ja sen paikka sekä solmujen sijainnit hitsisaumassa.73
Kuva 69. Maksimisolmuvoimat leikkaukselle ja niiden paikat pituussuunnassa74
Kuva 70. DC01 solmuvoimat ja niiden paikka
Kuva 71. DC01 solmuvoimat normaalisuuntaisessa kuormituksessa ja niiden paikat.

Taulukko 1. Päittäisliitoshitsattujen laserhitsien vetokoetulokset verrattuna			
perusaineen ve	etokoetuloksiin (FMT-ryhmä)	.25	
Taulukko 2.	Teräsvalmistajan ilmoittamat koemateriaalien ominaisuudet ja mi	tatut	
materiaalin on	ninaisuudet	.38	
Taulukko 3.	Käytetyt laserhitsausparametrit	.38	
Taulukko 4.	355 MC koemateriaalin hitsausparametrit ja hitsien leveydet	.39	
Taulukko 5.	Raex 400 hitsausparametrit ja hitsien leveydet	.39	
Taulukko 6.	Laserhitsien mitatut leveydet materiaaleilla Raex 400 ja 355 MC	.42	
Taulukko 7.	355 MC hitsausenergiat ja mitatut hitsien leveydet	.43	

Taulukko 8.Raex 400 hitsausenergiat ja mitatut hitsien leveydet43

1 Johdanto

"Miten valohoidolla hitsataan?" kysyi Kevyet ja kestävät rakenteet (KeKeRa) -hankkeeseen osallistuvan yrityksen edustaja ennen kuin hän oli tarkemmin tutustunut laserhitsaukseen. Laserhitsaus ei ole uusi keksintö, mutta sen hyödyntäminen ei ole yleistynyt kaikkiin teollisuuden sovelluksiin, joihin se olisi käyttökelpoinen. Laserhitsaus mahdollistaa rakenteiden keventämisen, koska haastavia rakenteita pystytään hitsaamaan ohutlevyistä pienellä energiantuonnilla. Pienen energiantuonnin ansiosta hitsauksen lämpövaikutukset ovat vähäiset eikä hitsattavissa kappaleissa tapahdu suuria muodonmuutoksia.

Perinteisillä hitsausmenetelmillä hitsattuja rakenteita ei voi yleensä hitsata laserilla vaan rakenne pitää suunnitella aina uudelleen laserhitsattavaksi. Laserhitsausta entuudestaan tuntemattomien kanssa laserhitsauksesta keskusteltaessa nousee esiin kysymys, jos vanha rakenne hitsataan laserilla, niin paljonko hinta putoaa? Jos asiakas on valmis siihen, että rakenne suunnitellaan uudelleen laserhitsaukselle sopivaksi, niin tällöin valmistuskustannukset yleensä laskevat.

Käsikirjassa keskitytään hankkeessa tutkittuihin limiliitoshitseihin. Käsikirjassa käsitellään yleisellä tasolla laserhitsauksen perusteita ja annetaan ohjeita hitsauksen suorittamiseen. Materiaalien osalta keskitytään pääosin kulutusteräksiin ja rakenneteräksiin, joita Kevyet ja kestävät rakenteet hankkeessa tutkittiin. Myös laserhitsauslaitteistot ja niiden rakenne on käsitelty lyhyesti. Käsikirjan tarkoituksena on antaa laserhitsattujen rakenteiden suunnittelijoille tietoa laserhitsien ominaisuuksista ja miten limiliitos laserhitsi pitäisi mitoittaa. Käsikirjassa kerrotaan myös miten ultralujien terästen ja kulutusterästen laserhitsiliitokset eroavat tavallisten rakenneteräksien laserhitsiliitoksista.

Laserhitsauksen osalta täytyy huomioida, että laserhitsaus voidaan suorittaa hyvinkin erilaisilla laitteistoilla, kuten esim. kuitulaserilla, hiilidioksidilaserilla tai Yb:YAG kiekkolaserilla. Eri laitteistoilla tehdyt laserhitsit voivat poiketa suuresti toisistaan, vaikka käytettäisiin esim. samaa hitsausnopeutta ja tehoa. Tämän vuoksi esim. hitsausparametrien osalta ei voida antaa yksiselitteisiä yleispäteviä ohjeita eri laserlaitteistoille. Laitteistojen erilaisuuden vuoksi laserhitsausparametrien optimoiminen on turhaa, jos lähtökohtana on antaa yleispäteviä laserhitsausohjeita. Myös eri materiaaleja ja materiaalin paksuuksia hitsattaessa teorian soveltamisen tuloksena voi olla huomattavasti erilainen laserhitsi, kuin teoria antaisi olettaa. Tämän vuoksi on suositeltavaa tutkia kokeellisesti hitsit tuotteista, joissa on mitoituksen kannalta kriittisiä laserhitsejä.

Käsikirjan lukujen 2 ja 3 tieto on yleistä tietoa ja on muokattu yleisesti saatavilla olevasta laserhitsauskirjallisuudesta yms. lähteistä. Tieto on koottu tähän käsikirjaan vain helpottamaan laserhitsauksen ymmärtämistä, jos lukijalla ei ole aikaisempaa tietoa laserlaitteista tai laserhitsauksesta. Kehotamme laserhitsauksen teoriasta kiinnostuneita hankkimaan syventävää tietoa alan kirjallisuudesta ja perehtymään teoriaan tarkemmin niiden avulla. Laserhitsaukseen jo aikaisemmin tutustuneet lukijat voivat siirtyä suoraan lukuun 4.

2 Laserhitsaus

Laserhitsauksessa lasersäde sulattaa hitsattavan kohdan ja liittää hitsattavat kappaleet yhteen. Lasersäde on monokromaattista valoa eli vain yhtä aallonpituutta sisältävää valoa. Säde fokusoidaan hitsattavaan kappaleeseen hitsausoptiikan avulla, jota voidaan liikuttaa esim. robotilla. Hitsausoptiikka on yleensä suhteellisen etäällä (yleensä n. 200 – 600 mm) hitsattavasta kohdasta, eikä kontaktia kappaleeseen vaadita (Kuvassa 1 laserhitsausta robotilla). Laserhitsi muodostuu hitsattavien kappaleiden sulaneesta metallista ja laserhitsauksessa ei tarvita lisäainetta. Laserhitsauksen tärkein etu perinteisiin hitsausmenetelmiin nähden on erittäin pieni hitsausenergiantuonti, jonka ansiosta muodonmuutokset hitsattavassa kappaleessa ovat pienet. Pienet muodonmuutokset mahdollistavat ohuiden levyjen hitsaamisen, mikä on tärkeää esim. osien keventämisen kannalta. Laserhitsaus mahdollistaa myös hyvän laadun, koska laserhitsausprosessin hallittavuus on hyvä.



Kuva 1. Laserhitsaus robotilla. Kuvassa laserhitsausoptiikka kiinnitettynä robottiin. Hitsausoptiikan polttoväli 300 mm.

2.1 Avaimenreikähitsaus

Teollisuudessa tapahtuva laserhitsaus on yleensä avaimenreikähitsausta. Avaimenreikähitsauksessa tehotiheydeltään suuri lasersäde fokusoidaan hitsattavan kappaleen pintaan. Suuren tehotiheyden vuoksi hitsattavaan kappaleeseen höyrystyy reikä, jota kutsutaan avaimenreiäksi (Kuva 2). Syntyneen reiän syvyys riippuu käytettävistä parametreista. Höyrystyneen materiaalin paine pakottaa syntyneen sulan reiän reunoille. Jotta höyrystyminen tapahtuisi, on kappaleen pinnalle osuvan säteen tehotiheys oltava vähintään 10⁶ W/cm². Polttopisteen ollessa liian korkealla tai alhaalla ei riittävää tehotiheyttä synny ja reikää ei muodostu. (Kujanpää et al. 2005, Ion 2005, Svenungsson et al. 2015)

Hitsattaessa kappaleen läpi, osa hitsausenergiasta menee levyn alla olevaan ympäristöön, jolloin lämmöntuonnin suhde energiantuontiin on pienempi kuin läpäisemättömällä avaimenreikähitsauksella hitsattaessa. Avaimenreiän halkaisija on minimissään suurempi tai suunnilleen yhtä suuri kuin lasersäteen halkaisija hitsattavan kappaleen pinnassa. (Eriksson et al. 2011, Stanciu et al. 2010, Du et al. 2000)

Avaimenreikähitsaus tapahtuu kuljettamalla lasersädettä työstettävän kappaleen pinnalla tai liikuttamalla hitsattavaa kappaletta. Hitsaussuuntaan liikkuessa avaimenreiän etupuolella oleva sula virtaa avaimenreiän reunoja pitkin avaimenreiän taakse. Taakse virrannut sula materiaali jähmettyy nopeasti samalla muodostaen hitsin. (Kujanpää et al. 2005, Steen 2003)



Kuva 2. Avaimenreikähitsaus. Sula virtaa avaimenreiän reunoja pitkin avaimenreiän taakse ja virrannut sula materiaali jähmettyy nopeasti samalla muodostaen hitsin.

2.2 Sulattava hitsaus

Laserhitsausta voidaan tehdä myös pienemmällä tehotiheydellä kuin avaimenreikähitsaus ja tällöin hitsausta kutsutaan sulattavaksi (kuvassa 3 sulattavan hitsauksen periaate). Tapahtuva hitsaus näin ei ole lävistävää hitsausta vaan materiaalit sulavat yhteen. Sulattavassa hitsauksessa käytetään yleensä defokusoitua sädettä tai pienitehoista fokusoitua sädettä. Tällöin säteen tehotiheys ei riitä ylläpitämään avaimenreikää. Sulattavassa hitsauksessa hitsi on matalampi ja hitsin leveys suurempi kuin avaimenreikähitsauksessa. (Kujanpää et al. 2005)

Sulattavaa hitsausta voidaan käyttää, kun liitospinnat ovat sopimattomat avaimenreikähitsaukseen ja halutaan esim. kaasu- tai nestetiivis liitos. Sulattavaa hitsausta voidaan käyttää myös hitsaussauman paremman visuaalisen ulkonäön vuoksi. FMT-tutkimusryhmän tekemissä käytännön kokeissa on todettu, että sulattavaa laserhitsausta voidaan tehdä myös pulssittamalla ja sädettä pulssittamalla saadaan parannettua sulanhallintaa. Pulssittamalla sulalammikko ei kasva liian suureksi. Pulssittava hitsaus muistuttaa paljon TIG-hitsauksen pulssitusta.

Kennorakenteissa kannattaa välttää sulattavaa hitsausta, koska muodonmuutoksen hitsattavassa kappaleessa voivat olla hieman suurempia suuremman hitsausenergian tuonnin vuoksi. Jos sulattavaa hitsausta on tarpeellista käyttää, niin menetelmää kannattaa käyttää vasta rakenteen hitsausprosessin loppuvaiheessa. On kuitenkin huomattava, että sulattavan laserhitsauksen energiantuonti on merkittävästi pienempää kuin esim. TIG-hitsauksessa ja muodonmuutokset jäävät huomattavasti pienemmiksi.



Kuva 3. Sulattava laserhitsaus.

2.3 Laserhitsauksen edut

Laserhitsauksella saavutetaan monia etuja verrattuna perinteisiin hitsausmenetelmiin. Laserhitsauksessa muodostuu pieni lämpövyöhyke eli HAZ, mistä on monia etuja perinteisiin hitsausmenetelmiin verrattuna. Pienestä lämmöntuonnista johtuen hitsattavan perusaineen raekoon kasvu on maltillista, jolloin hitsattavan materiaalin mekaaniset ominaisuudet säilyvät hyvänä. Laserhitsauksessa esiintyy vähemmän lämmöstä johtuvia muodonmuutoksia ja jännityksiä minkä vuoksi tuotteen mitat eivät muutu hitsauksen jälkeen ja oikomista ei tarvita. Laserhitsauksen etuna on myös hyvä hitsin visuaalinen laatu. Yksi laserhitsauksen eduista on myös hitsausnopeus, joka mahdollistaa esim. paljon hitsausta vaativien kennorakenteiden kustannustehokkaan valmistamisen.

Laserhitsauksen etuja:

- Laserhitsauksen etuja tuotannossa:
 - Suuri hitsausnopeus verrattuna perinteisiin hitsausmenetelmiin
 - Hyvä laatu ja hyvä toistettavuus
 - Voidaan hitsata paksuja levyjä yhdeltä puolelta (teho rajoittaa tunkeumaa)
 - Mahdollisuus käyttää I-railoa (railon toleranssi vaatimukset ovat kuitenkin suuret)
 - Voidaan käyttää limiliitoshitsiä, jolloin hitsin paikoitustarkkuuden vaatimuksen ovat pienet
 - Vähän tai ei ollenkaan jälkityöstön tarvetta
 - Soveltuu useimmille materiaaleille
- Pienen energiantuonnin etuja:
 - Pienet muodonmuutokset hitsattavissa kappaleissa (pienempi tarve oikomisille)
 - Pieni HAZ ja pieni lämmöntuonti, mistä johtuen pieni rakeenkasvu ja pieni lämpövyöhykkeen leveys
 - Pienet jäännösjännitykset hitsattavassa kappaleessa

- Hitsi voidaan tehdä lähelle lämpöherkkiä komponentteja
- Laserhitsaus avaa uusia suunnittelumahdollisuuksia:
 - Hitsaus on mahdollista kohteissa, joita on mahdollista hitsata vain toiselta puolelta, tai joissa liitos sijaitsee esimerkiksi kapean raon pohjalla
 - Limiliitoshitsien hyödyntäminen, jolloin toleranssi vaatimuksia voidaan kasvattaa
 - Vapauttaa hitsien sijoittelua ja mahdollistaa sekaliitokset
 - Työjärjestyksessä laserhitsaus voidaan jättää viimeiseksi työvaiheeksi
- Hitsausprosessin hyvä hallittavuus:
 - Hitsausenergian siirtymistä kappaleeseen voidaan hallita erittäin tarkasti, koska laserin tehoa on helppo säätää. Täytyy huomioida kuitenkin esim. hitsattavan kappaleen pinnan absorptio.
 - Laserhitsin tunkeuman säätäminen on helppoa

Laserhitsauksen heikkouksia ja rajoituksia:

- Päittäishitsattaville kappaleille tiukat toleranssit railonvalmistuksen (liitettävien levyjen reunojen pinnanlaadun ja suoruuden) suhteen. Päittäisliitoksessa on suositeltavaa käyttää laserleikattuja tai koneistettuja kappaleita.
- Lasersäteen korkea paikoitustarkkuusvaatimus päittäisliitoksissa
- Limiliitoshitsauksessa liitettävien pintojen pitää olla tasomaiset ja liitettävien levyjen välisen ilmaraon pitää olla pieni
- Kuitu- ja kiekkolasereissa lasersäde on hyvin vaarallista silmille ja hitsausympäristön pitää yleensä olla suljettu tila.

(Kujanpää et al. 2005, Ionix)

2.4 Laserhitsauslaitteet

Laserhitsauslaitteistoon kuuluvat laser, hitsauksessa käytettävä työasema sekä oheislaitteet. Esimerkiksi robottilaserhitsaussolussa tarvitaan laserlaite, robotti, valokuidut, hitsausoptiikka, hitsauspöydät, kiinnittimet, suojakaasun syöttölaite jne. Kuvassa 4 on esitetty robotti laserhitsaus laitteisto ja kuvassa 5 laserlaite sekä hitsausoptiikka. Ohutlevytuotteiden laserhitsaukseen teollisuudessa käytetään yleensä kuitu-, kiekko-, tai hiilidioksidi CO₂-lasereita.



Kuva 4. Robottilaserhitsauslaitteisto.



Kuva 5. Kiekkolaser säteenlähde sekä hitsausoptiikka (Trumpf, Precitec).

2.5 Yb:YAG kiekkolaser

Yb:YAG kiekkolaser (disc laser) on kidelaser, missä käytetään laseroivana väliaineena ohutta kiekkomaista ytterbium kidettä. Yb:YAG laserin lasersäteen aallonpituus on 1030 nm. Yb:YAG laserin säteenlaatu on yleensä 2–12 mm*mrad. Kiekko on kiinnitetty jäähdytyselementtiin ja lasersäteen tekemisessä syntyvä hukkalämpö johtuu suoraan kiekon läpi jäähdytyselementtiin. Kide on pinnoitettu takapuoleltaan niin, että se ei heijasta pumppauslaserin aallonpituutta. Jäähdytyselementin puolelta kide on pinnoitettu erittäin heijastavaksi, jolloin pumppauslaserin säde saadaan heijastumaan takaisin. Takaisin heijastunut laserin säde ohjataan parabolisen peilin ja heijastavien prismojen avulla uudelleen useita kertoja kiekon pintaan, säde heijastuu pinnasta ja se ohjataan osumaan kiteen pintaan useita kertoja (Kuva 6). Laseroivaa väliainetta saadaan pumpattua useammin ja laserin kokonaisteho saadaan näin kasvatettua. Kiekkolaserin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 6. (Kujanpää et al. 2005)



Kuva 6. Kiekkolaserin toimintaperiaate.

2.6 Kuitulaser

Kuitulaserissa lasersäde synnytetään optisen kuidun sisään ja resonaattorina toimii optinen kuitu, jossa laseroivana väliaineena on usein ytterbium, mutta myös erbium ja thulium väliaineita käytetään. Ytterbium väliaineella saavutetaan parempi hyötysuhde. Kuitulaserin aallonpituus on ytterbium väliaineella 1 070 nm. Kuitulaserissa pumppausenergiana käytetään diodilaserin valoa. Kuitulasereissa käytetään kahta eri tekniikkaa ja pumppausenergia voidaan tuoda kahdella eri tavalla resonaattorikuidun sisemmälle pinnoitekerrokselle. Pumppausenergia voidaan tuoda kuituun joko kuidun päästä peilien ja linssien avulla tai optisen kuidun avulla useasta diodilaserista. Kuitulaser koostuu yleensä useista moduuleista. Jokainen yksittäinen moduuli tuottaa tehoa, joka on yleensä joitakin satoja watteja kohti yksittäistä modulia. Moduleita yhdistämällä voidaan kasvattaa kuitulaserin kokonaistehoa. Kuitulaserin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 7. (Kujanpää et al. 2005)

Kuitulaserin ydin voidaan tehdä pieneksi, minkä ansiosta syntyneen säteen halkaisija on pieni ja se on säteenlaadultaan erittäin hyvä. Resonaattorikuidun rakenteeseen on tehty rakoja, jotka toimivat peilien tavoin. Kuidun mittasuhteet määräytyvät syöttövalodiodien aallonpituuden perusteella. Kuidun pituuden mukaan määräytyy absorboituvan valon suuruus ja kuidun paksuus on riippuvainen syöttövalon tehosta. (Kujanpää et al. 2005)



Kuva 7. Kuitulaserin toimintaperiaate.

2.7 Hiilidioksidilaser

Hiilidioksidilaser (CO₂ -laser) on kaasulaser, jonka laseroivana väliaineena toimii kaasuseos. Kaasuseos riippuu käytettävästä resonaattorista ja yleensä kaasuseos koostuu hiilidioksidista 1–10 %, heliumista 60–85 % ja typestä 10–35 %. Hiilidioksidi toimii laseroivana kaasuna, typpi avustaa hiilidioksidimolekyylien virittymisessä ja helium toimii kaasuseoksen jäähdyttäjänä. Hiilidioksidilaserin aallonpituus on 10 600 nm tai 9 600 nm. Hiilidioksidilaserin säteen siirtoon käytetään peilejä. Hiilidioksidilaseria käytetään yleensä tasolaserina.

2.8 Hitsausoptiikat

Eri polttovälin hitsaus optiikoilla on ominainen säteenhalkaisija ja syvyysterävyys. Lyhyemmän polttovälin optiikalla saadaan pienempi polttopisteen halkaisija ja näin myös suurempi tehotiheys vakio teholla. Toisaalta syvyysterävyys pienenee myös polttovälin lyhentyessä, joten säteen kuljettaminen vaatii enemmän tarkkuutta säteen suunnassa.

Polttopisteen koko vaikuttaa yhdessä tehon kanssa saavutettavaan tehotiheyteen polttopisteessä. Mitä pienempi polttopisteen koko on, sitä suurempi tehotiheys saavutetaan. Suuri tehotiheys mahdollistaa myös paremman hitsattavuuden heijastaville materiaaleille. Korkean tehotiheyden tarvitsevia materiaaleja on esim. alumiini. Polttopisteen koko vaikuttaa myös hitsauksessa lasersäteen kohdistustarkkuuteen. Kun polttopisteen koko on pieni, vaaditaan polttopisteeltä suurta kohdistustarkkuutta, koska hitsausradan ohjelmointivaiheessa polttopiste on paikoitettava tarkasti haluttuun kohtaan. Pieni polttopiste edellyttää suurta paikoitustarkkuutta. Polttopisteen halkaisijaa voidaan kasvattaa käyttämällä hitsausoptiikassa lyhyttä kollimointipituutta ja pitkää polttoväliä (hitsausoptiikan periaate kuvassa 8). Tämä vaatii optisten komponenttien vaihtamista hitsausoptiikassa. Kappaleen pintaan kohdistuvan lasersäteen halkaisijaa voidaan kasvattaa myös siirtämällä hitsausoptiikkaa lähemmäksi tai kauemmaksi hitsattavasta kappaleesta. Tällöin lasersäteen vaikutusalue suurenee hitsattavan kappaleen pinnalla, mikä huonontaa samalla tehotiheyttä. Suurempi kappaleen pintaan kohdistuvan säteen halkaisija lieventää samalla lasersäteen paikoitustarkkuutta. Optiikan puhtaudesta pitää huolehtia määräajoin, jotta teho häviöitä ei pääse syntymään. (Kujanpää et al. 2005, Steen 2005)



Kuva 8. Hitsausoptiikan periaate.

3 Laserhitsauksen teoria

3.1 Laserhitsauksen liitostyypit

Hitsausliitostyypin valintaan vaikuttaa mm. kokoonpanohitsauksen helppous, hitsattavan kappaleen esityöstö tarpeet, hitsaustoleranssit ja hitsattavan kappaleen kiinnityksen vaatimukset. Yleisimmät liitosmuodot laserhitsauksessa ovat limi-, päittäis- ja Tliitokset. Liitosmuodoista löytyy myös useita eri variaatioita, kuten kuvista 9 a, b, ja c voidaan nähdä. Kennorakenteiden hitsauksessa käyttökelpoisin liitostapa on limiliitos, johtuen siitä, että se mahdollistaa suurempien toleranssien käytön. (Kujanpää et al. 2005)



Kuva 9. a) Yleisimmät laserhitsausliitokset, b) Limiliitoksella on useita eri käyttötapoja ja kuvassa esitetty muutamia esimerkkejä, c) Päittäisliitoksen mahdollisia käyttötapoja laserhitsauksessa.

3.1.1 Limiliitos

Limiliitoksella (lap joint) tarkoitetaan liitostapaa (Kuva 10), jossa kahden levyn pinnat asetetaan toistensa päälle ja liitetään toisiinsa hitsaamalla levyt yhteen. Limiliitoshitsin esimerkki kuvassa 11, missä kaksi 2 mm paksuista levyä on liitetty toisiinsa limiliitoshitsillä.

Limiliitos on hyvä liitosmuoto ohuiden materiaalien hitsauksessa, koska se on hitsattavan tuotteen kannalta joustavin liitosmuoto. Paksuja levyjä hitsattaessa limiliitoksen leveys on suhteessa pieni levyn paksuuteen nähden. Limiliitos hitsaaminen on helppo hallita myös tuotannollisissa olosuhteissa, koska kyseinen liitosmuoto sallii lievemmät railotoleranssit, mikä helpottaa lasersäteen paikoitusta. Limiliitoksessa hitsin kohdistamistarkkuus riippuu sivusuunnassa levyjen limitysalueen suuruudesta. Suurin sallittu ilmarako hitsattavien levyjen välillä on noin 10 % levyn paksuudesta. Käytännön kokemus ohutlevyjen laserhitsauksesta on osoittanut, että yli 3 mm paksuisia levyjä hitsattaessa noin 0,3 mm ilmarako levyjen välillä on suurin ilmarako, jolla hitsi onnistuu hyvin. Tämän vuoksi hitsattavien levyjen kiinnittämisestä pitää huolehtia siten, että levyjen väli saadaan mahdollisimman pieneksi. Levyjen ohentuessa limiliitoksen hitsaaminen hankaloituu johtuen hitsien lämpömuodonmuutoksien aiheuttamasta tasomaisuuden heikkenemisestä. (Kujanpää et al. 2005)

Limiliitos vaatii suuremman lämmöntuonnin kuin päittäisliitos, koska haluttu hitsi syntyy vasta sitten, kun lasersäteen synnyttämä sula ja avaimenreikä saavuttavat hitsauksessa alimmaisena olevan kappaleen. Tästä syystä pitäisi pyrkiä tilanteeseen, jossa hitsattaisiin ohuemman levyn puolelta mahdollisimman suurella hitsausnopeudella, jotta lämmöntuonti pystytään minimoimaan. Lisäksi riittävän tunkeuman arviointi visuaalisesti on vaikeaa, jos hitsi ei ulotu kaikkien hitsattavien levyjen läpi. (Ion 2005)



Kuva 10. Limiliitos laserhitsaus.



Kuva 11. Limiliitos, jossa kaksi 2 mm levyä hitsattu yhteen laserhitsillä.

3.1.2 Päittäisliitos

Päittäisliitosta (butt joint) (Kuva 10) voidaan käyttää tarkkojen pintojen liitoksena ja päittäisliitokselle on ominaista tiukat railotoleranssit. Päittäisliitoksen hitsaaminen on vaativampaa tiukkojen railotoleranssien vuoksi kuin esim. limiliitoksen. Päittäisliitoksen etuna ovat tasainen jännitysjakauma sekä hitsattavan kappaleen vähäinen lämpeneminen ja näin ollen vähäiset muodonmuutokset kappaleeseen. (Kujanpää et al. 2005)

Laserhitsaus päittäisliitoksessa käytetään I-railoa, mikä mahdollistaa hitsien sijoittelun esim. ahtaisiin paikkoihin. Syntyvän hitsin aiheuttama jännitysjakauma on tasainen, mikä vähentää hitsattavaan kappaleeseen syntyviä muodonmuutoksia. Lisäksi hitsit ovat vahvempia verrattuna muihin liitostyyppeihin, koska kuormituksen aikana voimat kohdistuvat koko hitsin matkalle. Liitoksen tiiveyden kannalta päittäisliitos on myös parempi verrattuna muihin liitostyyppeihin (Kujanpää et al. 2005)

Päittäisliitoksen suurin ilmarako on noin 0,15 x levynpaksuus, mutta kuitenkin maksimissaan 0,2 mm. Sallittu ilmarako riippuu kuitenkin myös laserin säteen halkaisijasta kappaleen pinnalla siten, että säde ei saa mennä kokonaan ilmaraosta läpi. Levyleikkurilla leikatun kappaleen reuna ei yleensä ole muodoltaan ja tarkkuudeltaan riittävä päittäisliitos laserhitsaukseen. Hitsauksen kannalta riittäviin reunan tarkkuuksiin päästään esim. laserleikkauksella ja koneistuksella. Päittäisliitoksessa liitettävien pintojen pinnanlaatu on liitoksen onnistumisen kannalta tärkeässä asemassa. Käytännön hitsaustilanteissa on huomattu, että hyvä laatuinen laserleikattu pinta on jopa parempi kuin koneistettu pinta. Päittäisliitoksen kannalta on erittäin tärkeää poistaa liitettäviltä pinnoilta oksidikerros ennen hitsausta esim. hiomapaperilla tai puhdistuslaikalla. Liitettävien levyjen oksidikerroksen poistamisessa kannattaa muistaa puhdistaa myös levyn pinta hitsin välittömästä läheisyydestä. Jos oksidikerrosta ei poisteta, niin liitos ei yleensä onnistu hyvin. (Steen 2005, Keskitalo 2014)

Päittäisliitoksen hitsauksessa on tärkeää käyttää hyviä kiinnikkeitä, jotta liitettävät pinnat pysyvät tiiviisti vastakkain. Hitsatessa liitospinnat pyrkivät erkanemaan toisistaan hitsauksen aiheuttaman lämmöstä aiheutuvan muodonmuutoksen takia. Liitettävät levyt voidaan myös silloittaa ("hepata") laserilla tai muilla hitsaus menetelmillä riippuen levyn paksuudesta.



Kuva 12. Päittäisliitos. Kaksi 6 mm paksuista levyä liitetty päittäisliitos laserhitsillä.

Vaikka lisäainetta ei käytetä, päittäisliitos saadaan "kuvulliseksi" kun railopinnat ovat riittävän hyviä ja levyjen ollessa kiinnitettynä tiiviisti ja lujasti toisiaan vasten hitsauksen ajaksi (Kuva 12). Kuvun lisäaine tulee levymateriaalin kutistumasta hitsauksessa. Suojakaasun lisääminen hitsin jälkipuolelle parantaa hitsin kuvun muotoa.

Päittäisliitos laserhitsatut levyt murtuvat vetokokeessa karkaisemattomilla rakenneteräksillä yleensä itse levystä, koska hitsi on lujempi kuin perusmateriaali. Ultralujilla teräksillä päittäisliitos hitsatut levyt murtuvat vetokokeessa laserhitsin muutosvyöhykkeeltä, koska hitsin HAZ:ssa on pehmennyt alue.

Päittäisliitosten vetokokeissa materiaaleilla, joiden myötölujuus on noin 1000 MPa, hitsin lujuus on vielä lähes perusmateriaalin lujuutta vastaava. Vasta noin 1500 MPa lujuusluokan myötörajan teräksillä päittäisliitos on heikompi kuin perusaine. (Shi 2008)

Taulukosta 1 nähdään, että ultralujalla rakenneteräksellä S960 QC laserhitsin lujuus ylittää valmistajan antaman perusaineen minimivaatimuksen (myötölujuus ≥960 MPa ja murtolujuus ≥1000 MPa) ja on lähellä perusaineesta mitattuja lujuuksia. Vastaavasti kulutusteräksellä HBW 500 laserhitsin myötölujuus täyttää valmistajan antaman minimivaatimuksen (≥1250 MPa), mutta murtolujuus jää hieman alle minimivaatimuksesta (≥1600 MPa). Muokkauslujitetuilla ruostumattomilla teräksillä EN 1.4318 ja EN 1.4372 laserhitsin myötölujuus on vain 1 % pienempi kuin perusaineen myötölujuus ja murtolujuus 6 % pienempi kuin perusaineen murtolujuus. Jos verrataan laserhitsausta kaarihitsausmenetelmiin, niin kaarihitsausmenetelmillä hitsattujen ultralujien terästen hitsien lujuudet ovat suuresta lämpövaikutuksesta johtuen merkittävästi pienempiä. (FMT-ryhmä)

	Päittäisliitos laserhitsi		Perusaineen lujuus	
	Myötölujuus	Murtolujuus	Myötölujuus	Murtolujuus
	MPa	MPa	MPa	MPa
S960 QC	1038	1121	1055	1141
HBW 500	1298	1534	1350	1687
EN 1.4318 2H	629	907	631	948
EN 1.4372 2H	677	811	694	871

Taulukko 1. Päittäisliitoshitsattujen laserhitsien vetokoetulokset verrattuna perusaineen vetokoetuloksiin (FMT-ryhmä)

Väsytyskokeessa karkaisemattomilla rakenneteräksillä päittäishitsatun liitoksen vaurio voi tapahtua joko perusmateriaalista tai hitsistä riippuen siitä onko hitsissä reunahaava. Lujilla teräksillä päittäisliitoksen väsytyksessä vaurio tapahtuu hitsin muutosvyöhykkeeltä alkaen mahdollisesta reunahaavasta tai hitsauskuvun tyvestä.

3.1.3 Railon sivusta laserhitsattu pienaliitos

Pienaliitoksessa hitsataan kulmaliitos lasersäteellä railon sivusta. Näin joudutaan tekemään, kun ei ole mahdollista hitsata railon suuntaisesti. Pienaliitoksen hitsaus vaatii tarkkaa kohdistusta, ettei sula-alue osu ohi liitospinnasta. Koska hitsataan kulmassa, niin laserin polttopistettä ei kohdisteta liitettävien levyjen railoon levyjen pintaan, vaan hieman sivulle railosta (tätä kutsutaan sanalla ennakko). Pyritään, että säde kohtaa levyjen keskikohdalla railon. Paksuilla levyillä säde pitää kohdistaa kauemmaksi railon pinnasta. Sädekulma (α) (Kuva 13 a) kannattaa pitää mahdollisimman pienenä, siten säde on mahdollisimman paljon liitoksen suuntainen. Sädekulma määräytyy usein hitsausoptiikan ja hitsattavan kohteen minimietäisyydestä. Ahtaassa ja syvässä hitsauskohteessa kannattaa käyttää pitkän polttovälin optiikkaa, minkä vuoksi voidaan käyttää pienempää sädekulmaa. Kuvasta 13 a) nähdään sädekulma (α) ja ennakko (E). Kuvassa 13 a) sädekulma (25°) on selvästi liian suuri, minkä vuoksi 6 mm levy ei ole hitsautunut kiinni kokonaan. Kuvassa 13 b) vastaavan liitoksessa sädekulma on (5°) ja ennakko 0,75 mm ja liitos on hitsautunut hyvin. Ennakko asetetaan siten, että säde kulkee levyn paksuussuunnassa railon keskipisteen kautta. Suunnittelijan pitää suunnitella rakenne niin, että pienaliitos voidaan hitsata levyn sivusta riittävän pienessä kulmassa. Tällöin pitää olla tiedossa hitsauksessa käytettävän laitteiston hitsauspään ulkomitat ja optiikan polttovälit.



Kuva 13. a) Pienaliitos, joka on hitsattu sädekulmalla 25°. Kuvasta nähdään, että levyt eivät ole hitsautuneet hyvin yhteen. b) Pienaliitos, joka on hitsattu sädekulmalla 5°. Kuvasta nähdään, että levyt ovat hitsautuneet hyvin yhteen.

3.1.4 Muotosulkeinen kolo-tappi hitsausliitos

Kolo-tappiliitosta käytetään (Kuva 14), kun halutaan paikoittaa hitsattavat kappaleet muotosulkeisilla liitoksilla. Liitoksen hitsauksessa ei välttämättä tarvita kiinnittimiä, vaan hitsattava kappale voidaan koota valmiiksi ja hitsauspaikat on helppo määrittää, kun osat on leikattu tarkasti esim. laserleikkauksella. Tämän vuoksi kolojen pitää olla riittävän tiukkoja tai hitsaus pitää suorittaa suuremmalla säteellä. Kolojen välystark-kuus riippuu levyn paksuustoleransseista, jolloin esim. kuumavalssatulla levyllä ei aina voida saavuttaa välyksetöntä kolotappiliitosta. Liitoksen muotolukitteisuudella saavutetaan tietty liitoslujuus ja laserhitsillä varmistetaan liitoksen kiinnitys (laserhitsattu kolo-tappiliitos kuvassa 15).



Kuva 14. Laserleikatut osat, joista kootaan kolo-tappi liitoksella laserhitsattava osa.



Kuva 15. Laserhitsatut kolo-tappi liitokset. Kuvassa 8 mm paksuiset levyt on liitetty 6 mm paksuiseen levyyn kolo-tappi liitoksilla. Liitospinnat on laserleikattu.

3.2 Laserhitsausparametrit

Laserhitsausparametrit voidaan jaotella säde- ja prosessiparametreihin sekä hitsattavan materiaalin parametreihin. Sädeparametrit riippuvat käytettävästä laserlaitteistosta sekä hitsausoptiikan ominaisuuksista, kuten lasersäteen moodista, aallonpituudesta ja säteen halkaisijasta. Prosessiparametreja ovat mm. teho, hitsausnopeus, säteen fokus, hitsausoptiikan polttoväli sekä suojakaasun virtaama. Prosessiparametreja voidaan säätää ja ne valitaan hitsattavan kappaleen mukaan. Hitsattavan materiaalin parametreja ovat mm. levyn paksuus, kemiallinen koostumus, hiiliekvivalentti ja hitsattavan kappaleen pinnanlaatu. (Kujanpää et al. 2005, Steen 2003)

Laserhitsauksessa on tärkeää ottaa huomioon hitsin aloitus ja lopetuskohdat. Teho ja hitsausnopeus on synkronoitava hitsauksen aloituksessa ja lopetuksessa. Aloitus ja lopetus on hallittava niin, että saavutetaan tasalaatuinen hitsi eikä tehdä hitsausvirheitä. Hitsauksen hallinta voidaan tehdä esim. säätämällä tehoa ns. "rampilla" hitsauksen alussa ja lopussa.

Hitsausparametreilla voidaan vaikuttaa esim. hitsin leveyteen ja tunkeuman syvyyteen. Samalla vaikutetaan myös hitsin lujuusominaisuuksiin. Erityisesti muokkauslujitetuilla ja karkaistuilla teräksillä hitsausparametrien vaikutus on suuri ja hitsausenergian lisääntyessä hitsin kovuus ja lujuus pienenevät, muutosvyöhyke levenee ja hitsin minimikovuus pienenee. Hitsausparametrien valinta on tällöin tärkeää, koska tulee ottaa huomioon hitsin muutosvyöhykkeen pehmeneminen.

Rakenneteräksillä hitsausparametrien valinta riippuu limiliitoshitseissä halutusta hitsin leveydestä, koska hitsissä ei ole muutosvyöhykkeen pehmenemistä. Kuitenkin liiallista hitsausenergiantuontia pitää välttää.

Hitsausparametrien valinnassa on tärkeää huomioida rakenteeseen hitsauksessa syntyvät muodonmuutokset ja valita parametrit niin, että ylimääräisiä muodonmuutoksia tapahdu. Hitsaus kannattaa yleensä suorittaa käyttämällä mahdollisimman suurta hitsausnopeutta ja tehoa, koska se on kustannustehokasta. Limiliitoshitsauksessa lasersäteen fokuksen on hyvä olla hitsattavan materiaalin paksuudesta ja hitsausoptiikasta riippuen, joko hitsattavan materiaalin pinnassa tai hieman pinnan alla.

Hitsausenergiantuonti riippuu hitsausparametreista. Hitsausenergiantuonnin suuruudella voidaan vaikuttaa hitsausliitoksen lujuusominaisuuksiin ja vaikuttaa hitsattavaan kappaleeseen tulevaan lämmöntuontiin ja sen kautta hitsin muutosvyöhykkeeseen. Ultralujilla teräksillä muutosvyöhykkeen pehmeän alueen koko kasvaa suurella hitsausenergialla ja pehmenneen alueen suuri koko heikentää liitoksen lujuutta. Pienellä energiantuonnilla hitsausliitokselle on mahdollista saada suurin myötö- ja murtolujuus, koska liitoksen pehmeä alue on kapeampi kuin suurella energiantuonnilla.

3.2.1 Teho

Laserin tehon suhde polttopisteen kokoon määrittelee käytettävän tehotiheyden. Tehotiheys määrää onko laserhitsaus avaimenreikähitsausta vai sulattavaa hitsausta. Hitsin tunkeuma kasvaa, jos tehoa nostetaan. Myös hitsin leveys ja muoto muuttuu, kun hitsausnopeus on vakio ja tehoa muutetaan (Kuva 16). Tunkeuman ei riipu pelkästään tehosta vaan myös muista tekijöistä, kuten muista prosessi- ja sädeparametreista sekä hitsattavan materiaalin ominaisuuksista. Suurempaa tehoa käyttämällä on mahdollista kasvattaa hitsausnopeutta. Hitsaustehon valinnassa tärkein kysymys on, kuinka paljon tehoa tarvitaan hyvän hitsin saavuttamiseksi. Liian pieni teho voi aiheuttaa vajaan tunkeuman, jolloin esimerkiksi päittäisliitoksessa liitospinnan alapuoli jää vajaaksi. Liian suuri teho taas aiheuttaa avaimenreiän romahtamisen, jolloin sula materiaali valahtaa hitsausrailon läpi eikä hitsiä synny. (Steen et al. 2003; Kujanpää et al. 2005; Ion 2005)



Kuva 16. Tehon vaikutus laserhitsin leveyteen ja muotoon, kun hitsausnopeus on vakio. a) Teho 1800 W b) Teho 2500 W c) Teho 3000 W.

3.2.2 Hitsausnopeus

Laserhitsauksessa käytettävät hitsausnopeudet ovat huomattavasti suurempia kuin perinteisillä hitsausmenetelmillä. Hitsausnopeus riippuu hitsattavan kappaleen paksuudesta, jos teho on vakio. Hitsattavan kappaleen paksuuden kasvaessa hitsausnopeus pienenee. Hitsausnopeus riippuu kuitenkin myös mm. tehosta, tunkeumasta ja polttopisteen koosta. (Kujanpää et al. 2005, Steen 2003)

Suurella hitsausnopeudella sula on kapea ja hitsin tunkeuma on pieni. Liian suuri hitsausnopeus aiheuttaa sulan suuren virtauman hitsin keskilinjalle. Tällöin hitsin reunat voivat vajota. Hitaalla hitsausnopeudella sulalammikko on suuri ja leveä. Liian hidas hitsausnopeus saattaa aiheuttaa sulan tippumisen. Tämän vuoksi hitsiin voi syntyä reikä tai hitsi voi vajota. (Steen 2003)

3.3 Laserhitsauksen metallurgia

Laserhitsistä voidaan erottaa kaksi aluetta HAZ (Heat Affected Zone) eli muutosvyöhyke ja sulavyöhyke. HAZ syntyy perusaineeseen hitsauksessa syntyneen lämmön vaikutuksesta. Sulavyöhyke on jähmettynyttä hitsisulaa. Muutosvyöhykkeestä voidaan erottaa pienempiä erillisiä alueita, joiden koko riippuu hitsauksen aikana saavutetusta maksimilämpötilasta ja hitsattavan perusaineen koostumuksesta. Kuvassa 17 voidaan nähdä laserhitsauksessa syntyvät vyöhykkeet ja missä lämpötilassa ne muodostuvat. (Ion 2005, Stanciu 2010)



Kuva 17. Laserhitsin vyöhykkeet (lon 2005).

Verrattuna muihin perinteisiin hitsausmenetelmiin, laserhitsauksessa muutosvyöhyke pysyy pienenä ja voimakasta rakeenkasvua ei pääse tapahtumaan. Laserhitsauksessa ei synny karkearakeista vyöhykettä, mikä on edullista liitoksen iskusitkeyden kannalta.

Laserhitsin ominaisuudet riippuvat hitsattavasta materiaalista. Muokkauslujitetulla ruostumattomalla teräksellä sula-alueen ja muutosvyöhykkeen kovuudet ovat matalampia kuin perusaineen. Karkaistulla teräksellä sula-alue ja osittain muutosvyöhykekin karkenee uudelleen siten, että muutosvyöhykkeen karjenneen alueen reunalla on kovin kohta, joka on pienillä hitsausenergioilla jonkin verran perusainetta kovempi johtuen erittäin nopeasta jäähtymisnopeudesta. Rakenneteräksellä hitsialue ja muutosvyöhyke ovat kovempia kuin perusaine.



Kuva 18. Raex 400 kulutusteräksen laserhitsin kovuus ja HAZ.

Kuvassa 18 on esitetty kulutusteräksen Raex 400 HAZ:in vyöhykkeet. Sula-alue on jähmettynyt ja karjennut suoraan martensiitiksi. Sula-alueen jähmettymisrakenne hienonee jähmettymisnopeuden noustessa. Sula-alueen kovuus riippuu suoraan jähmettymisnopeudesta ja siten käänteisesti hitsin lämmöntuonnista. Uudelleen karjennut alue on käynyt austeniittina (800 - 900 °C) ja karjennut nopean jäähdytyksen ansiosta martensiitiksi.

Päässeen alueen (300 - 800 °C) mikrorakenne on päässyttä martensiittia, mistä johtuen sen kovuus on huomattavasti perusainetta pienempi. Jäähtymisen nopeutuessa päässeen alueen minimikovuus nousee. Yleisesti alueiden leveys pienenee lämmöntuonnin pienentyessä ja hitsausnopeuden suurentuessa.

Limiliitoksissa jännitys kohdistuu sula-alueelle mistä johtuen sen lujuudella on merkitystä limiliitoksen lujuuteen. Päittäishitsauksessa hitsin lujuuden määrää HAZ:in minimilujuus.



Kuva 19. Muokkauslujitetun austeniittisen ruostumattoman teräksen laserhitsin kovuusprofiili ja mikrorakenne.

Kuvassa 19 esitetään muokkauslujitetun austeniittisen ruostumattoman teräksen laserhitsin kovuusprofiili. Kuvasta nähdään, että kovuus pienenee perusaineen kovuudesta 310 HV kovuuteen n. 250 HV hitsin kohdalla. Hitsin muutosvyöhykkeellä perusaineen vieressä olevalla vyöhykkeellä muokkausmartensiitti on päässyt, mistä johtuen kovuus on pienentynyt. Liitosalueen vieressä olevassa HAZ:ssa muokkautunut rakenne on uudelleen kiteytynyt ja rakeenkasvua on tapahtunut vähän. Uudelleen kiteytyneen vyöhykkeen raekoko on merkittävästi pienentynyt perusaineen raekoosta. Johtuen muokkausrakenteen runsaista rakeen ydintymispaikoista uudelleenkiteytymisessä.

3.4 Laserhitsin tunkeuma

Laserhitsin tunkeuman määrää suurimmilta osin teho ja hitsausnopeus, mutta myös muut hitsausparametrit. Jos laserhitsin tunkeuma ei riitä limiliitoshitsauksessa menemään hitsattavista levyistä kokonaan läpi, niin yhteen hitsattaviin levyihin tulee hieman suurempia muodonmuutoksia kuin läpihitsattuihin levyihin. Hitsattavat levyt pyrkivät taittumaan osittaisella tunkeumalla hitsattuna hieman kieroon hitsaussauman kohdalta, koska levyihin jää jännitystiloja. Jos laserhitsi tunkeutuu levyjen läpi, niin levyjen suoruus säilyy paremmin (Kuva 20). Levyn taittuminen tuottaa ongelmia erityisesti pitkiä levyjä tai rakenteita hitsattaessa. Osittain tunkeutunutta hitsiä voidaan hyödyntää esim. silloin, kun hitsi ei saa näkyä levyjen pintapuolella visuaalisten syiden takia.



Kuva 20. Kuvassa vasemmalla puolella läpi tunkeutunut laserhitsi ja oikealla osittain tunkeutunut laserhitsi. Läpi tunkeutuneen hitsin aiheuttama muodonmuutos hitsattavassa kappaleessa on pienempi kuin osittain tunkeutuneen hitsin aiheuttaman muodonmuutos.

3.5 Laserhitsin väsyminen

Väsyminen pitää huomioida hitsatuissa rakenteissa, jos niihin kohdistuu dynaamista kuormitusta. Väsymisen huomioiminen on tärkeää jo tuotteen tai rakenteen suunnitteluvaiheessa. Jos laserhitsattuun rakenteeseen kohdistuu väsyttävää kuormitusta, on kiinnitettävä erityistä huomiota hitsien sijoitteluun, mitoitukseen sekä hitsien laatuun. Laserhitsien ominaisuudet ovat erilaiset kuin perinteisillä menetelmillä tehtyjen hitsien ja esim. hitsin geometria ja mikrorakenne poikkeaa perinteisistä hitseistä. Tässä käsikirjassa käsitellyt laserhitsatut limiliitoshitsit ovat geometrialtaan huonoja väsymisen kannalta ja hitsi muodostaa epäjatkuvuuskohdan rakenteeseen.

Laserhitsien väsymiseen vaikuttavat esim. geometriset jännityskeskittymät, metallurgiset muutokset, hitsin aiheuttamat epäjatkuvuuskohdat rakenteessa sekä hitsauksessa syntyneet jäännösjännitykset. Yleensä laserhitsin jäännösjännitykset johtuvat lämpöjännityksistä, joita syntyy hitsauskohdan nopean lämpiämisen ja jäähtymisen seurauksena. Jäännösjännitysten jakauma laserhitsin ympärillä on monimutkainen ja riippuu mm. materiaalin seostuksesta, hitsattavan levyn paksuudesta ja hitsaussuunnasta valssaussuuntaan nähden. Kun väsyttävä kuormitus kohdistuu laserhitsiin, jossa on jäännösjännityksiä, niin väsyttävä kuormitus ja jäännösjännitykset yhdistyvät ja vaikuttavat liitoksen väsymiskestävyyteen. (Cho 2004)

3.5.1 Ultralujien terästen väsyminen

Ultralujien terästen määrittely on tässä käsikirjassa yli 900 MPa myötörajan teräkset. Ultralujien teräsrakenteiden hitsausliitosten väsymiskestävyyden kannalta keskeisin tekijä on niiden sijoittelu kuormitusten kannalta kohtiin, joissa kuormitus on mahdollisimman pieni ja kuormanvaihtokertoja tulee rakenteen käyttöikään nähden mahdollisimman vähän. Ultralujat teräkset menettävät omaisuuksiaan hitsauksen lämmön vaikutuksesta, joten turhaa lämmöntuontia tulee rajoittaa. Ultralujan teräksen suuresta lujuudesta ei ole hyötyä väsymiskestävyyden kannalta, jos laserhitsin lovivaikutuksen vaikutuksesta väsymislujuus on sama kuin alhaisemman lujuuden teräksellä, koska särönkasvu on suunnilleen yhtä nopeaa kaikilla teräksillä. (Keskitalo 2014)

Kuvassa 21 nähdään, että laserhitsin on suuremmilla jännitysamplitudeilla huomattavasti parempi kuin MAG-hitsi. Laserhitsin hitsausenergiantuonti on ollut 133 J/mm ja MAG-hitsin hitsausenergiantuonti 2110 J/mm.



Kuva 21. FMT-ryhmän tutkimustuloksia, jossa on verrattu ultralujan 960 QC teräksen laserhitsiä lähes saman lujuusluokan kulutusteräksen HBW 400 MAG-hitsiin. Jännityssuhde R=-1.

3.6 Terästen laserhitsattavuus

3.6.1 Muovattavien terästen ja rakenneterästen laserhitsaus

Kylmävalssatut kylmämuovattavat ohutlevyteräkset ovat standardin SFS-EN 10130 mukaisia teräksiä, joiden käyttö perustuu niiden hyvään muovattavuuteen. Muovattavilla teräksillä kannattaa muistaa, että teräksen vanhenemisilmiön vuoksi teräksen lujuus ominaisuudet muuttuvat vanhetessaan. DC01 myötölujuus on <280 MPa ja suunnittelussa käytetään myötölujuuden alarajan arvona 140 MPa. Laserhitsi on muovattavilla teräksillä perusainetta kovempi ja hitsi kestää sekä staattisessa, että dynaamisessa kuormituksessa perusainetta paremmin.

Rakenneterästen hitsattavuus on hyvä, eikä hitsausenergian tuonnissa tarvita yleensä rajoituksia. Laserhitsi on yleensä rakenneteräksillä jonkin verran perusainetta

kovempi ja hitsi ei yleensä aseta rajoituksia hitsatun rakenteen kestolle staattisessa kuormituksessa.

3.6.2 Ultralujien ja kulutus terästen laserhitsaus

Ultralujaksi teräkseksi määritellään tässä käsikirjassa yli 900 MPa myötörajan teräkset. Ultralujissa rakenneteräksissä lujuus on usein saatu nopealla jäähdyttämisellä, jolloin perusmateriaalina on martensiittinen tai bainiittismartensiittinen rakenne. Laserhitsin sula-alueen kovuus voi olla hitsausparametreista riippuen joko suurempi tai pienempi kuin perusmateriaalin kovuus. Muutosvyöhykkeelle muodostuu aina pehmennyt päässyt alue.

Ultralujista teräksistä valmistettavien rakenteiden suunnittelu eroaa perinteisistä rakenneteräksistä esimerkiksi materiaalin muovattavuudessa ja hitsattavuudessa. Ultralujien terästen suurempi lujuus mahdollistaa ohuempien materiaalivahvuuksien käytön, mutta normaaleja rakenneteräksiä hankalampi muovattavuus, hitsattavuus ja työstettävyys on huomioitava jo suunnittelu vaiheessa. Ultralujilla teräksillä on rakenneteräksiä pienempi murtovenymä. Ultralujan teräksen muovaaminen vaatii enemmän voimaa esim. särmäyksessä. Laserhitsausliitosten suunnittelussa pitää ottaa huomioon erityisesti hitsien sijoittelu sekä mahdollisimman pieni hitsausenergiantuonti. Ultralujista teräksistä valmistetulla rakenteella on mahdollista saavuttaa jopa kymmenien prosenttien etu paino- ja kustannussäästöjen kautta, joita ovat elinkaarikustannusten ja rakenteiden omapainon pienentyminen. Ultralujia teräksiä käytettäessä suunnittelijan pitää tietää materiaalin ominaisuuksien erot rakenneteräksiin esim. hitsauksessa. (Lämsä et al. 2012)

Kulutusteräkset on ymmärretty niin, että niillä on suuri pintakovuus ja ne ovat pääsääntöisesti tarkoitettu murskaimiin, kauhoihin, teriin jne. Kuitenkin kulutusteräksissä suureen kovuuteen yhdistyvät myös lujuus ja sitkeys sekä ne ovat suhteellisen helppoja särmättäviä. Erot ultralujien rakenneterästen ja kulutusterästen välillä eivät ole suuret, mutta niillä on omat käyttökohteensa. Kulutusteräksiä voidaan kuitenkin käyttää myös erilaisissa kohteissa kuin mihin ne on alun perin tarkoitettu. Näissä kohteissa pyritään hyödyntämään kulutusterästen suuri lujuus, mutta ei välttämättä tarvita kulutusterästen tarjoamaa hyvää kulumiskestävyyttä. Kulutusterästä voidaankin tarkastella ultralujana rakenneteräksenä, jolla on hyvä kulutuskestävyys. Kulutusterästen laserhitsattavuudessa pätevät saman periaatteet kuin ultralujien terästen laserhitsauksessa. (Lämsä et al. 2012)

3.6.3 Ruostumattomien terästen laserhitsaus

Austeniittisella ruostumattomalla teräksellä hitsattavuus on yleensä hyvä johtuen kiderakenteesta. Joissakin tapauksissa kromiekvivalentti/nikkeliekvivalenttisuhteen (Crekv/Niekv) pienentyessä austeniittisten terästen terästen hitsin mikrorakenne voi muuttua suurilla jäähtymisnopeuksilla puhtaasti austeniittiseksi aiheuttaen kuumahalkeamaa. Yleensä austeniittisten terästen kromiekvivalentti/nikkeliekvivalentti suhde on yli 1,5, jolloin ei ole vaaraa kulmahalkeamasta. Austeniittisen teräksen suuremmasta lämpölaajenemiskertoimesta johtuen tasomaisuuden hallinta voi olla hankalaa ohuilla ja paljon hitsiä sisältävillä rakenteilla. Muokkauslujittamattomilla ruostumattomilla teräksillä laserhitsin lujuus on suurempi kuin perusaineen lujuus. (Kyröläinen et al. 1999) Muokkauslujitetuilla austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä lujuus on saatu mikrorakenteen dislokaatioiden ja muokkausmartensiitin avulla. Laserhitsauksessa hitsi ja muutosvyöhyke pehmenevät uuden jähmettymisrakenteen ja muutosvyöhykkeen rekristallisaation ja reversion vuoksi. Pienellä hitsausenergialla hitsatuilla hitseillä muutosvyöhyke on kapea, joten hitsin lujuuteen vaikuttaa lähinnä sula-alueen lujuus.

Ferriittisiä ruostumattomia teräksiä kannattaa käyttää austeniitisten sijasta, kun käyttöympäristössä on mahdollisuus jännityskorroosioon tai materiaalilta vaaditaan parempaa lämmönjohtavuutta. Lisäksi ferriitisellä ruostumattomalla teräksellä hitsin aiheuttamat muodonmuutokset ovat merkittävästi pienempiä kuin austeniittisella teräksellä. Ferriittisellä ruostumattomalla teräksellä laserhitsin muutosvyöhykkeellä rakeenkasvua ei tapahdu (Kuva 22). Tästä johtuen muutosvyöhykkeen sitkeys on riittävä. Yleisesti kannattaa käyttää moderneja titaani/niobi-stabilisoituja teräksiä, joiden mikrorakenne on kaikissa lämpötiloissa ferriittinen ja hitsattavuus suhteellisen hyvä (Kyröläinen et al. 1999). Sen sijaan näissäkin teräksissä riittämättömällä suojakaasulla hitsattaessa sula-alueen sitkeys heikkenee ratkaisevasti. Tämän vuoksi hitsi kannattaa suojata argonilla varsinkin säteen takapuolelta mahdollisimman hyvin. Juurikaasuakin kannattaa käyttää, mikäli mahdollista, mutta tärkeintä on käyttää hitsin jättöpuolella riittävän pitkää kaasukenkää niin, että hitsistä tulee kirkas.



Kuva 22. Ferriittisen EN 1.4521 ruostumattoman teräksen laserhitsin mikrorakenne. Kuvasta nähdään, että muutosvyöhykkeellä ei ole tapahtunut rakeenkasvua.

Duplex-teräksessä hyödynnetään sekä austeniittisen, että ferriittisen faasin hyviä ominaisuuksia. Ferriitti antaa teräkselle jännityskorroosion kestävyyden, austeniitti sitkeyden ja nämä yhdessä kaksifaasirakenteena lujuuden. Duplex teräksillä hitsattavuus on tyydyttävä. Laserhitsauksessa haitallista on liian nopea jäähtymisnopeus, jolloin hitsin austeniitipitoisuus jää reilusti alle tavoitellun 50 % (Kuva 23). Tämän vuoksi kannattaa käyttää mahdollisuuksien mukaan hitaampia hitsausnopeuksia. Lisäksi käytettäessä typpeä suojakaasuna saadaan austeniittipitoisuutta lisättyä jonkin verran, jopa lähelle 30 %, jolloin sitkeys ei vielä merkittävästi huonone. (Westin et al. 2007, Westin et al. 2012, Keskitalo et al. 2015)


Kuva 23. LDX 2101 duplex ruostumattoman teräksen päittäisliitoksen sula-alueen mikrorakenne, missä valkoinen on austeniittia ja tummempi on ferriitiä.

4 Laserhitsattujen limiliitosten ominaisuudet

Laserhitsattujen limiliitosten ominaisuuksia esitellään tässä luvussa erilaisten esimerkkien avulla. Esimerkkien tuloksia tarkasteltaessa täytyy huomioida, että kaikki koetulokset ovat saatu limiliitoksista, joissa liitettävien levyjen paksuus on ollut 2 mm.

4.1 Laserhitsin leveys ja pinta-ala

Laserhitsaus liitoksen lujuusteknisen mitoituksen kannalta laserhitsien leveys on tärkeässä osassa. Hitsin leveys ja pituus määrittävät liitoksen pinta-alan, mikä on ratkaisevaa liitoksen suunnittelun kannalta. Hitsattava materiaali määrittelee paljonko pintaalaa limiliitoksessa pitää olla, koska materiaalin ominaisuudet määrittelevät hitsin lujuuden suhteessa perusmateriaalin lujuuteen.

Laserhitsattavien rakenteiden suunnittelijalla ei ole usein käytännön kokemusta laserhitsauksesta, joten hitsausparametrien määrittäminen on silloin laserhitsauksen suorittavan tahon tehtävä. Laserhitsin leveyden muutosta on vaikea tietää tarkasti, jos hitsausparametreja muutetaan. Käytännössä leveyden määrittämiseen tulee aina tehdä parametri ja materiaalikohtaiset poikkileikkaushieet, joista hitsin leveys voidaan määrittää. Laserhitsin leveyteen vaikuttavat hitsausparametrit sekä myös hitsattavan materiaalin ominaisuudet, kuten paksuus ja pinnan absorptio.

Laserhitsin leveyttä voidaan tutkia kokeellisesti esim. tekemällä poikkileikkaushie hitsistä. Helpoimmillaan hitsin minimi leveys voidaan päätellä avaimenreikähitsauksessa käytettävän lasersäteen polttopisteen halkaisijan avulla. Laserhitsi on avaimenreikähitsauksessa leveydeltään vähintään yhtä leveä kuin hitsauksessa käytetyn laserin polttopisteen halkaisija. Hitsin leveyteen vaikuttaa moni tekijä kuten teho, hitsausnopeus, hitsattava materiaali, polttopisteen koko jne.

4.2 Esimerkkitapauksissa käytetyt koemateriaalit, laitteistot, koesauvat, hitsausparametrit ja hitsien leveydet

Seuraavissa kappaleissa on esitetty tiedot koemateriaaleista, koelaitteistoista sekä koesauvoista. Nämä tiedot ovat tarpeen käsikirjan esimerkkikokeiden tulosten ymmärtämiseksi. Kaikki esimerkkitapaukset ovat Kevyet ja kestävät rakenteet hankkeen aikana tehdyistä kokeista.

4.2.1 Koemateriaalit

Koemateriaalit olivat kulutusteräs Raex 400, muovattava teräs DC01 ja rakenneteräs 355 MC. Kaikki koemateriaalit olivat 2 mm paksuisia. Koemateriaaleille tehtiin vetokokeet, joissa mitattiin perusmateriaalin myötö- ja murtolujuus (Taulukko 2). Myös koemateriaalien perusmateriaalin kovuudet mitattiin.

Materiaali	Myötölujuus Rp 0,2 % (Mpa)	Murtolujuus Rm (Mpa)	Murtovenymä A %	Kovuus (HV)	Hiiliekvivalentti CEV
Raex 400	1000	1250	10		0,46
Mitattu	1233	1353	4,4	430	
DC01	<280	270 - 410	34		0,22
Mitattu	196	322	45	105	
355 MC	355	430 - 550	23		0,17
Mitattu	431	498	26	195	

Taulukko 2. Teräsvalmistajan ilmoittamat koemateriaalien ominaisuudet ja mitatut materiaalin ominaisuudet.

4.2.2 Kokeissa käytetyt laitteistot

Hitsauslaitteistona oli Trumpf HLD 4002 diodipumpattu Yb:YAG kiekkolaser. Laserlaitteen sädeparametritulo (BPP) on 8 mm*mrad. Säde kulkee halkaisijaltaan 200 µm valokuitua pitkin laserhitsaus optiikkaan, mitä liikutetaan Motoman nivelrobotilla. Laserlaitteen suurin teho kappaleen pinnalla on 4 kW. Tutkimuksessa käytettiin polttoväliltään 300 mm optiikkaa, jolloin polttopisteessä säteen halkaisija oli 0,3 mm.

Väsytyskokeet tehtiin Instron 8802 veto-, puristus-, väsytyskoneella. Suurten syklimäärien (high cycle alueen) väsytyskokeet tehtiin Zwick Viprophore 100 pulsaattoriväsytyskokeella. Väsytyskokeissa käytettiin jännityssuhdetta R=0.

Veto ja puristuskokeet tehtiin Instron 8802 veto-, puristus-, väsytyskoneella.

Laserhitsien ja perusmateriaalin kovuusmittaukset tehtiin Shimdazu mikrokovuus testilaitteistolla, jolla näytteistä mitattiin Vickers-kovuus 200 g painolla. Laserhitseistä tehdyt hieet tutkittiin Keyence VHX200 järjestelmämikroskoopilla

4.2.3 Laserhitsausparametrit

Kokeissa muutettiin laserhitsausparametreista vain hitsausnopeutta ja tehoa, joilla saatiin säädettyä haluttu hitsausenergiantuonti. Käytetyt laserhitsausparametrit taulukossa 3. Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty 355 MC ja Raex 400 hitsausparametrit ja hitsien leveydet.

	i onus	Hitsausspotin halkaisija	Hitsausenergia
m/min	mm	mm	J/mm
4,5	-1	0,3	40
3,6	-1	0,3	50
3	-1	0,3	60
2,57	-1	0,3	70
1,8	-1	0,3	100
1,8	-1	0,3	133
0,8	-1	0,3	225
	m/min 4,5 3,6 3 2,57 1,8 1,8 1,8 0,8	m/min mm 4,5 -1 3,6 -1 3 -1 2,57 -1 1,8 -1 0,8 -1	m/minmm4,5-10,33,6-10,33-10,32,57-10,31,8-10,31,8-10,30,8-10,3

Taulukko 3. Käytetyt laserhitsausparametrit

Hitsausteho	Hitsausnopeus	Fokus	Hitsausspotin halkaisija	Hitsausenergia	Hitsin leveys
kW	m/min	mm	mm	J/mm	mm
3	4,5	-1	0,3	40	0,43
3	3,6	-1	0,3	50	0,54
3	3	-1	0,3	60	0,6
3	2,57	-1	0,3	70	0,66
3	1,8	-1	0,3	100	0,95
4	1,8	-1	0,3	133	ei mit.
3	0,8	-1	0,3	225	0,95 ala-keski

Taulukko 4. 355 MC koemateriaalin hitsausparametrit ja hitsien leveydet

Taulukko 5. Raex 400 hitsausparametrit ja hitsien leveydet

Hitsausteho	Hitsausnopeus	Fokus	Hitsausspotin halkaisija	Hitsausenergia	Hitsin leveys
kW	m/min	mm	mm	J/mm	mm
3	4,5	-1	0,3	40	0,48
3	1,8	-1	0,3	100	0,8
4	1,8	-1	0,3	133	ei mit.
3	0,8	-1	0,3	225	0,98 ala-keski

4.2.4 Koesauvat

Laserhitsauskokeissa koesauvoista poistettiin kevyesti hiomalla oksidikerros hitsattavien koelevyjen välisiltä liitospinnoilta, mutta ei pinnalta, johon lasersäde kohdistettiin. Koelevyt leikattiin aina poikittain levyn valssaussuuntaan nähden. Koesauvat koneistettiin hitsin kohdalta koesauvan reunoista.

Symmetrinen koesauva on laserhitsattu kuvan 26 mukaisesti. Kokeissa käytettyjen koesauvojen kaltaisia koesauvoja on käytetty mm. julkaisussa Static and fatigue strength of laser-welded lap joints in thin steel sheet (Ono et al. 1997). Symmetrisellä koesauvalla pyrittiin saamaan puhdas leikkausjännitys laserhitsiin. Levyjä hitsattiin kolme päällekkäin, kuten kuvasta 26 voidaan nähdä. 40 J/mm energiantuonnin hitsit hitsattiin molemmilta puolin koelevyjä vastakkain, koska 40 J/mm hitsi ei läpäise kolmea levyä. Suuremmilla energiantuonneilla hitsit läpäisivät kolme levyä ja koesauvat hitsattiin vain yhdellä hitsillä yhdeltä puolelta. Vain yhdeltä puolelta hitsattujen symmetristen koesauvojen ongelmana on hitsin eri leveys koesauvan liitospinnoilla. Ylimmän ja keskimmäisen levyn liitoskohta on leveämpi kuin keskimmäisen ja alimman levyn liitoskohta, kuten kuvasta 27. voidaan nähdä.



Kuva 24. Koejärjestely symmetrisellä koesauvalla.



Kuva 25. Vetokoe Instron 8802 veto-, puristus-, väsytyskoneella.



Kuva 26. Symmetrinen koesauva leikkausvoima- ja väsytyskokeita varten.



Kuva 27. Symmetrinen koesauva Raex 400 hitsi 225 J/mm. Hitsi on lävistänyt kolme levyä. Hitsin leveys on suurempi ylimmän ja keskimmäisen levyn välillä kuin alimman ja keskimmäisen levyn välillä. Hitsin leveys on ylimmän ja keskimmäisen levyn välillä 1,52 mm ja keskimmäisen ja alimman levyn välillä 0,98 mm.

Epäsymmetrinen koesauva on kuvan 28 mukainen. Kaksi levyä laserhitsattiin 50 mm limityksellä kiinni toisiinsa. Epäsymmetrisen koesauvan veto- ja väsytyskokeissa hitsiin kohdistuu leikkausjännityksen lisäksi myös momentti.



Kuva 28. Epäsymmetrinen koesauva.

4.2.5 Kokeissa käytettyjen laserhitsien leveydet

Koehitsien leveydet on mitattu tehdyistä poikkileikkaushieistä 15 mittauksen keskiarvona. Leveys on mitattu levyjen liitoskohdasta kuten kuvasta 27 voidaan nähdä.

Tuloksia on tarkasteltu kuvaajissa koesauvan jännitysamplitudin sekä symmetrisellä koesauvalla myös hitsin jännitysamplitudin mukaan. Koesauvan jännitysamplitudi määräytyy kuormitusvoiman ja koelevyn poikkipinta-alan mukaan. Hitsin jännitysamplitudi määräytyy voiman ja hitsin mitatun poikkipinta-alan mukaan.

Laserhitsien leveyteen vaikuttaa osaltaan myös hitsattavan levyn pinnan absorptio. Koemateriaalien pinnat olivat hyvin erilaisia ja Raex 400 teräksen hyvin tumman pinnan absorbtio kyky oli parempi kuin 355 MC teräksen kiiltävämmän pinnan. Raex 400 laserhitsien leveydet verrattuna 355 MC teräksen hitsien leveyksiin taulukossa 6. Taulukoissa 7 ja 8 esitetty kaikki 355 MC ja Raex 400 koemateriaalien mitatut hitsien leveydet.

Taulukko 6.	Laserhitsien	mitatut	leveydet	materiaaleilla	Raex 40	00 ja 355 MC
-------------	--------------	---------	----------	----------------	---------	--------------

		•	
Hitsausenergia	Raex 400 hitsin leveys	355 MC hitsin leveys	Koesauva
J/mm	mm	mm	
40	0,48	0,43	epäsymmetrinen
100	0,8	0,95	epäsymmetrinen
225 (ylimmän ja keskimmäisen levyn liitos)	1,52	1,48	symmetrinen
225 (alimman ja keskimmäisen levyn liitos)	0,98	0,95	symmetrinen

Hitsausenergia	Hitsin leveys
J/mm	mm
40	0,43
50	0,54
60	0,6
70	0,66
100	0,95
133	ei mit.
225	0,95 (alimman-keskimmäisen levyn liitos)
225	1,48 (ylimmän-keskimmäisen levyn liitos)

Taulukko 7. 355 MC hitsausenergiat ja mitatut hitsien leveydet

Taulukko 8. Raex 400 hitsausenergiat ja mitatut hitsien leveydet

Hitsausenergia	Hitsin leveys
J/mm	mm
40	0,48
100	0,8
225	0,98 (alimman-keskimmäisen levyn liitos) (kuva 27)
225	1,52 (ylimmän-keskimmäisen levyn liitos) (kuva 27)

4.3 Leikkausvoiman suuntainen kuormitus laserhitsi limiliitoksessa

Ultralujien terästen limiliitoksissa joudutaan käyttämään usein useampia hitsejä kuin matalamman lujuuden teräksissä, jos halutaan hyödyntää ultralujan teräksen ominaisuudet. Tällöin voidaan mitoittaa ultralujista teräksistä tehdyt rakenteet suuremmille jännityksille. Ultralujilla teräksillä laserhitsien pinta-alan tulee olla suurempi kuin perusmateriaalin poikkipinta-alan. Käytännössä ultralujilla teräksillä limiliitoshitseillä ei yleensä voida saavuttaa täysin perusaineen lujuista liitosta. Laserhitsin pinta-ala on tässä yhteydessä hitsin leveys kertaa hitsin pituus.

Yleisiä ohjeita limiliitoshitsien leikkauslujuudesta on vaikea antaa, koska hitsattavan levyn paksuuden muutos vaikuttaa liitoshitsin poikkipinta-alan ja levyn poikkipinta-alan suhteeseen.

Yleensä, mitä kapeampi laserhitsi on, sitä lujempi se on suhteessa hitsin pintaalaan, jos on käytetty järkeviä hitsausparametreja. Tämä johtuu siitä, että sula-alue on yleensä lujempi kapeammalla hitsillä, koska hitsausenergiantuonti on ollut pienempi. Täytyy kuitenkin muistaa, että leveämpi hitsi on kuitenkin **liitoksena** parempi. Suosituksena on käyttää juuri ja juuri liitettävien levyjen läpi tunkeutuvaa hitsiä, jolloin hitsin leveys ja tunkeuma ovat optimaaliset limiliitosta ajatellen.

4.3.1 Hitsien määrä leikkauslujuuden kannalta limiliitoksissa

Laserhitsi on rakenneteräksillä lujempi kuin perusaine. Rakenneteräksillä perusaine on karkenematon ja laserhitsin lujuus on hitsin suuresta jäähtymisnopeudesta johtuen aina suurempi kuin perusaineen lujuus.

Ultralujilla karkaistuilla teräksillä laserhitsin sula-alueen lujuus on lähellä perusaineen lujuutta riippuen kuitenkin hitsausparametreista ja niin edelleen jäähtymisnopeudesta. Tästä johtuen ultralujia teräksiä käytettäessä pitää hitsata useampi laserhitsi, jotta liitoksen pinta-ala on suurempi, kun halutaan hitsien kestävän yhtä hyvin suhteessa rakenteen lujuuteen.

Rakenneteräksillä voidaan karkeasti sanoa, että hitsien pinta-alan pitää olla yhtä suuri kuin liitettävän levyn poikkipinta-ala, jos halutaan hitsiliitoksen olevan levyn perusmateriaalin lujuutta vastaava. Levyn perusmateriaalin lujuutta vastaava liitos voidaan rakenneteräksillä saavuttaa myös hitsattavan levyn poikkipinta-alaa pienemmällä hitsin pinta-alalla, jos hitsin kovuus on merkittävästi suurempi kuin perusaineella (katso kuva 33 hitsin 40 J/mm kovuus). Ultralujilla teräksillä hitsien pinta-alan tulee olla hitsattavan levyn poikkipinta-alaan nähden merkittävästi suurempi. Ultralujilla teräksillä hitsien erilaiset muutosvyöhykkeet vaikuttavat merkittävästi liitoksen lujuuteen, joten liitoksen lujuus ei korreloi suoraan hitsien pinta-alaan.

4.3.2 Esimerkki laserhitsien leikkausvoimakokeesta symmetrisellä koesauvalla

Leikkausvoimakokeet tehtiin 40 J/mm hitsausenergiantuonnilla 2 mm paksuisille Raex 400, 355MC ja DC01 koemateriaaleille. Laserhitsatuille symmetrisille koesauvoille suoritettiin vetokoe, jossa kuormitus laserhitsiin oli lähes puhdas leikkausjännitys.



Kuva 29. a) Leikkausvoimakoe Raex 400, 355 MC ja DC01 b) Leikkausvoimakoe Raex 400 ja 355 MC.

Kuvasta 29 a) voidaan nähdä, että Raex 400 materiaalilla hitsin lujuus on ollut suurin koesauvan jännityksen mukaan noin 420 MPa. 355 MC teräksellä hitsin lujuus on noin 300 MPa. 355 MC hitsin lujuus on parempi suhteessa materiaalin myötörajaan kuin Raex 400 hitsillä. Tämä johtuu siitä, että 355 MC hitsin kovuus on suurempi suhteessa perusaineen kovuuteen, kuin Raex 400 materiaalilla (vertaa kuvia 33 ja 35). DC01 teräksen perusmateriaali on myötänyt ennen kuin hitsi on leikkautunut ja hitsi on ollut lujempi kuin perusmateriaali.

Kuvan 29 b) perusteella hitsausenergiantuonnilla 225 J/mm 355 MC koemateriaalilla hitsi ei ole leikkautunut vaan koesauva on alkanut myötämään perusmateriaalista, minkä perusteella hitsi on lujempi kuin perusmateriaali. Raex 400 kulutusteräksellä hitsin lujuus on ollut noin 950 MPa koesauvan jännityksen mukaan.

4.3.3 Esimerkki rakenneteräs 355 MC leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva

Suoritettiin leikkausvoimakokeet, jossa 355 MC rakenneteräs koelevyt limiliitos hitsattiin yhteen hitsausenergialla 225 J/mm. Yhden 225 J/mm hitsin pinta-ala oli noin 74 mm² (pituus 50 mm * leveys 1,48 mm). Koelevyjen paksuus oli 2 mm ja koelevyn poikkipinta-ala oli 100 mm².



Kuva 30. 355 MC leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva. Yhden 225 J/mm hitsin lujuus verrattuna kahteen 225 J/mm hitsiin.

Kuvasta 30 voidaan nähdä, että yhdellä 225 J/mm hitsillä hitsattu koesauva murtuu hitsistä. Kahdella 225 J/mm hitsillä hitsattu koelevy alkaa myötämään, koska jännitys koelevyssä ylittää materiaalin myötörajan ja hitsit eivät leikkaudu.



Kuva 31. 355 MC leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva. Kahden rinnakkaisen saman energiantuonnin hitsiliitosten lujuuksia eri energiantuonneilla.

Kuvassa 31 on hitsattu kaksi hitsiä kullakin energiantuonnilla 355 MC koesauvoihin. Kahdella 100 J/mm hitsausenergiantuonnin hitsillä, joiden pinta-ala on noin 95 mm²

(2 * pituus 50 mm * leveys 0,95 mm), saavutetaan liitos, joka on lujuudeltaan lähes sama kuin perusaineen lujuus, koska levy on jo myötänyt ennen hitsin leikkautumista.



Kuva 32. 355 MC leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva. Kuvassa kahden, kolmen sekä neljän rinnakkaisen 40 J/mm energiantuonnin hitsin leikkausvoimakoe.

Kuvassa 32 leikkausvoimakoe 355 MC koesauvoilla 40 J/mm hitseille. Yhden 40 J/mm hitsin pinta-ala 355 MC koemateriaalilla on noin 21,5 mm² (pituus 50 mm* leveys 0,43 mm). 355 MC kolmella 40 J/mm hitsillä saavutetaan lähes perusaineen lujuus (myötöraja noin 420 MPa), jonka jälkeen ei ole perusteltua hitsata lisää hitsejä. Neljännellä 40 J/mm hitsillä ei saavuteta enää hyötyä liitoksen leikkauslujuuden kannalta.



Kuva 33. 355 MC hitsien kovuuksia. Kuvassa 40 J/mm, 100 J/mm ja 225 J/mm energiantuontien hitsien kovuusprofiilit.

Kuvassa 33 on esitetty 355 MC rakenneteräksen eri hitsausenergiantuonnin laserhitsien kovuusmittauksia. 355 MC materiaalilla hitsi, mikä on tehty pienellä energiantuonnilla 40 J/mm on huomattavasti kovempi kuin perusaine. 355 MC perusaineen kovuus on 195 HV, kun 40 J/mm hitsin kovuus oli maksimissaan noin 310 HV. 100 J/mm energiantuonnin hitsin kovuus oli maksimissaan noin 250 HV. Erittäin suurella energiantuonnilla 225 J/mm tehdyn hitsin kovuus 220 HV oli vain hieman perusaineen kovuutta 195 HV suurempi. 355 MC materiaalilla ei huomattu pehmeää vyöhykettä hitsien HAZ:ssa, koska 355 MC teräs ei ole karkaistu kuten esim. Raex 400. Koska 355 MC hitseissä ei ole pehmeää vyöhykettä, niin 355 MC limiliitoshitsit ovat suhteessa parempia leikkauslujuudeltaan kuin materiaaleilla, joiden HAZ:ssa on pehmennyt vyöhyke (vertaa kuvia 33 ja 35).

4.3.4 Raex 400 kulutusteräs leikkausvoimakokeet epäsymmetrisellä koesauvalla

Kulutusteräs Raex 400:lle tehtiin leikkausvoimakokeita, joissa koelevyihin hitsattiin hitsausenergialla 40 J/mm, 100 J/mm sekä 225 J/mm hitsejä (Kuva 34). Kokeissa hitsattiin yhteen levyt, joiden paksuus oli 2 mm ja poikkipinta-ala oli 100 mm².



Kuva 34. Raex 400 leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva. Eri energiantuonneilla ja hitsien määrällä tehty leikkausvoimakoe.

Kuvassa 34 Raex 400 koemateriaalilla yhden 225 J/mm energiantuonnin pinta-ala on noin 76 mm² (pituus 50 mm * leveys 1,52 mm). Kokeissa huomattiin, että kahdella 225 J/mm hitsillä hitsattu koelevy leikkautuu hitseistä. Kolmella hitsillä hitsattu koelevy murtui levystä hitsin muutosvyöhykkeen pehmeältä alueelta. Tämän vuoksi energiantuonnilla 225 J/mm ei saavuteta lujempaa liitosta, vaikka hitsien määrää lisättäisiin.

Kuvassa 34 yhden 40 J/mm hitsin pinta-ala on noin 24 mm² (pituus 50 mm * 0,48 mm). Energiantuonnilla 40 J/mm hitsi ei läpäise koelevyjä kokonaan, eli hitsin tunkeuma on alle 4 mm. Kokeissa huomattiin, että Raex 400 teräksellä 40 J/mm hitsien määrän kasvattaminen ei ole järkevää, koska maksimaalisen liitoksen saavuttamiseen tarvittaisiin liian monta hitsiä. Ongelmaksi muodostuu myös se, että 40 J/mm hitsi ei läpäise koelevyjä ja näin ollen hitsattaviin levyihin tulee vääntymistä. Vääntyminen pahentuu lisää hitsejä hitsattaessa.

Kuvassa 34 yhden 100 J/mm hitsin pinta-ala on noin 40 mm² (pituus 50 mm * leveys 0,8 mm) Kokeissa leikkauslujuudeltaan paras liitos saatiin hitsaamalla koelevyt neljällä 100 J/mm hitsillä, jolloin hitsien pinta-ala oli noin 160 mm² verrattuna koelevyn pinta-alaan 100 mm². Tällöin saavutettiin liitoksen lujuus, joka oli noin 1214 MPa. Liitoksen lujuus on hyvin lähellä perusmateriaalin myötörajaa, mikä on noin 1220 MPa. Neljällä hitsillä 100 J/mm hitsausenergialla hitsatuista vetosauvoista osa murtui hitsistä levyn pinnan suuntaisesti ja osa hitsistä muutosvyöhykkeeltä levyn poikki.

Kokeiden perusteella liitoksen leikkauslujuuden kannalta hitsausenergian kannattaa valita niin, että hitsi on mahdollisimman kapea ja juuri läpäisee hitsattavat levyt sekä hitsausenergia on mahdollisimman pieni, jolloin hitsin HAZ:n pehmennyt vyöhyke on mahdollisimman kapea. Lisäksi hitsien pinta-alan tulee olla riittävän suuri, jolloin ultralujalle teräkselle joudutaan hitsaamaan useampi hitsi.



Kuva 35. Raex 400 hitsien kovuuksia. Kuvassa 40 J/mm, 100 J/mm ja 225 J/mm energiantuonneilla hitsattujen hitsien kovuusprofiilit.

Kuvassa 35 on esitetty Raex 400 eri hitsausenergiantuonnin hitsien kovuusprofiilit. Raex 400 kulutusteräksen kovuusmittauksista huomataan, että laserhitsin HAZ:ssa on pehmenyt alue. Kuvassa 35 nähdään, että 40 J/mm hitsausenergialla Raex 400 kulutusteräksellä pehmenneen vyöhykkeen minimikovuus on 330 HV ja 225 J/mm hitsatun hitsin vastaavan kohdan minimikovuus on 290 HV. Hitsin leveys muutosvyöhykkeineen on 40 J/mm hitsillä noin 1,8 mm ja 225 J/mm hitsillä noin 5 mm (ei näy tässä kuvassa). Hitsin 40 J/mm sula-alueen kovuus on noin 465 HV ja uudelleen karenneen alueen kovuus on jopa 480 HV. Hitsin 225 J/mm sula-alueen kovuus on noin 400 HV, mikä on hieman perusaineen kovuutta pienempi ja uudelleen karenneen alueen kovuus on noin 420 HV.

4.4 Laserhitsien kovuus

Laserhitsin kovuusprofiiliin vaikuttaa hitsattavan materiaalin koostumus, käsittelytila ja hitsausparametrit. Kuvassa 36 133 J/mm hitsausenergiantuonnilla Raex 400 teräkseen hitsatun hitsin kovuusprofiilista voidaan nähdä, että karkaistussa tilassa olevalla Raex 400 teräksellä hitsin sula-alue jähmettyy ja karkenee, sulan lähellä oleva jähmeä alue karkenee uudelleen. Heti karenneen alueen vieressä tapahtuu jyrkkä kovuuden lasku johtuen nopeasta perusaineen mikrorakenteen pääsemisestä (pehmenemisestä). Tästä perusaineeseen päin kovuus nousee lineaarisesti päästöasteen pienentyessä. Pehmeän alueen leveys ja kovuus vaikuttavat edelleen hitsatun levyn lujuuteen.

Muovattavalla DC01 teräksellä perusaineen suuri raerakenne pienenee hitsissä, mikä osaltaan nostaa hitsin kovuutta. Lisäksi ainakin suurimmilla jäähtymisnopeuksilla, kuten kuvassa 37. 40 J/mm hitsausenergiantuonnin hitsi karkenee, mikä osaltaan lisää hitsin kovuutta. Vähähiilisellä materiaalilla, kuten DC01:lla karennut hitsi on perusainetta lujemmasta rakenteesta huolimatta sitkeä.

Kuvassa 36 on esitetty kulutusteräksen Raex 400 ja kuvasta 37 DC01 muovattavan teräksen hitsausenergiantuontien vaikutus hitsin kovuuteen ja hitsin muutosvyöhykkeen leveyteen.



Kuva 36. Raex 400 kulutusteräs kovuusprofiili 133 J/mm energiantuonnin hitsille.



Kuva 37. DC01 muovattava teräs kovuusprofiili 40 J/mm energiantuonnin hitsille.



Kuva 38. Raex 400 kulutusteräs kovuusprofiilit 40 J/mm ja 225 J/mm energiantuonnin hitseille.

Kuvassa 38 nähdään, että 40 J/mm hitsausenergialla Raex 400 kulutusteräksellä pehmenneen vyöhykkeen minimikovuus on 330 HV ja 225 J/mm hitsatun hitsin vastaavan kohdan minimikovuus on 290 HV. Hitsin leveys muutosvyöhykkeineen on 40 J/mm hitsillä noin 1,8 mm ja 225 J/mm hitsillä noin 5 mm. Hitsin 40 J/mm sula-alueen kovuus on noin 465 HV ja uudelleen karenneen alueen kovuus on jopa 480 HV. Hitsin 225 J/mm sula-alueen kovuus on noin 400 HV, mikä on hieman perusaineen kovuutta pienempi ja uudelleen karenneen alueen kovuus on noin 420 HV.



Kuva 39. DC01 muovattava teräs kovuusprofiilit 40 J/mm ja 225 J/mm energiantuonnin hitseille.

Kuvasta 39 nähdään, että DC01 teräksellä 40 J/mm sula-alueen kovuus on noin 300 HV, mikä on huomattavasti suurempi verrattuna perusaineen kovuuteen 107 HV. DC01 hitsin 225 J/mm maksimi kovuus on noin 160 HV.

4.5 Laserhitsin tunkeuma limiliitoksessa

Hyvä hitsi saadaan aikaan silloin, kun laserhitsi tunkeutuu juuri läpi hitsattavien levyjen. Silloin hitsistä tulee I-muotoinen ja hitsin aiheuttamat muodonmuutokset levyyn ovat pienet. Hitsausenergian tulee olla kuitenkin niin suuri, ettei hitsi "vajoa" ja hitsin juuren puolesta tulee hyvä laatuinen. Osittain tunkeutuvaa hitsiä voidaan käyttää, mutta silloin tulee ottaa huomioon suuremmat muodonmuutokset.



Kuva 40. Osittain tunkeutunut limiliitos laserhitsi.



Kuva 41. Läpitunkeutunut limiliitos laserhitsi.

Kuvassa 40. osittain tunkeutunut hitsi, mikä on hitsattu hitsausenergiantuonnilla 40 J/mm ja liitettävien levyjen paksuus on ollut 2 mm. Kuvassa 41. on liitettävien levyjen läpi tunkeutunut I-muotoinen hitsi, mikä on hitsattu hitsausenergiantuonnilla 100 J/mm ja liitettävien levyjen paksuus on ollut 2 mm.

4.6 Laserhitsin normaalivoiman suuntainen lujuus limiliitoksessa

Normaalivoiman suuntaisessa kuormituksessa laserhitsi murtuu sula-alueelta kuten kuvasta 44 nähdään. Kokeellisesti on todettu, että ohutlevyillä mitatut hitsin murtojännitykset ovat suuria, jopa kaksinkertaisia verrattuna vastaaviin hitsin leikkausvoiman suuntaisiin jännityksiin. Kokeellisesti on myös todettu, että murtojännitykset ovat hitsin kovuuksiinkin verrattuna suuret. Normaalinsuuntaista kuormitusta on esim. kennorakenteissa mm. läpivientien ja nurkkien kohdalla. Hitsien kuormitus on melkein aina yhdistelmä normaalinsuuntaisesta ja leikkaussuuntaisesta kuormituksesta. Normaalivoiman suuntaisen kuormituksen lujuusmitoitus rakenneteräksille voidaan tehdä oletuksella, että hitsi on lujuudeltaan vähintään perusaineen luokkaa.

4.6.1 Esimerkki laserhitsien normaalivoiman suuntaisesta vetokokeesta

Kokeet tehtiin 2 mm paksuisille kulutusteräkselle Raex 400 ja muovattavalle teräkselle DC01 samalla 40 J/mm hitsausenergialla. Koejärjestelyssä levyt kiinnitetään 15 mm paksuisiin runkokappaleisiin laserhitsaamalla yhteensä neljällä limiliitoshitsillä siten, että sisempien hitsien väli on 6 mm (kuva 42 a). Runkokappaleissa on 3 mm rako, jonka läpi varsinainen tutkittava laserhitsi voidaan hitsata. Laserhitsi hitsataan keskelle rakoa kuvan 42 b mukaisesti. Tämän jälkeen rakoon hitsataan MAG hitsillä 3 mm paksuisesta teräksestä kiinnityslevyt vetokoneen leukoihin kiinnitystä varten kuvan 42 c

mukaan. Kiinnityslevyjä hitsattaessa koelevyn lämpötila pidettiin alle 100 °C asteessa. Kuvista 42 a-d nähdään koekappaleen valmistusjärjestys.



Kuva 42. a) koelevy hitsataan neljällä laserhitsillä runkokappaleeseen b) varsinainen koehitsi hitsataan runkokappaleissa olevan uran kohdalta c) runkokappaleet hitsataan MAG-hitsaamalla kiinnityslevyihin, jotka tulevat vetokoneen leukoihin d) valmis koesauva.



Kuva 43. Normaalivoiman suuntainen vetokoe Raex 400 ja DC01 40 J/mm energiantuonnin laserhitseille.



Kuva 44. Raex 400 40 J/mm energiantuonnin laserhitsin murtuma sula-alueelta.

Kuvasta 43 voidaan nähdä, että Raex 400 ja DC01 laserhitsien normaalivoiman suuntaiset lujuudet ovat suurempia kuin perusmateriaalien lujuudet. Raex 400 normaalivoiman suuntainen vetolujuus oli noin 1800 MPa, mikä on merkittävästi suurempi verrattuna perusmateriaalin myötölujuuteen 1230 MPa.

DC01 normaalivoiman suuntainen vetolujuus oli noin 1300 MPa, kun perusmateriaalin myötölujuus on noin 200 MPa. Kuvasta 43 nähdään DC01 teräksen vetokäyrästä, että noin 700 MPa kohdalla alkaa myötäminen, mutta myötäminen ei todennäköisesti ala hitsiaineen myötörajalta vaan koelevy taipuu perusaineesta.

DC01 materiaalilla hitsin normaalivoiman suuntainen lujuus johtuu siitä, että DC01 teräksellä hitsialueen raekoko pienenee merkittävästi samalla kun tapahtuu täydellinen karkeneminen. Matalahiilisellä pienirakeisella mikrorakenteella on paremmat staattiset ja dynaamiset lujuusominaisuudet verrattuna DC01 teräksen perusaineeseen. Myös Raex 400 teräksellä laserhitsi karkenee lujemmaksi kuin perusaine. Sula-alueen kovuudet olivat kokeissa käytetyllä 40 J/mm hitsausenergiantuonnin hitsillä Raex 400

teräksellä 470 HV (Raex perusaineen kovuus noin 430 HV) ja DC01 teräksellä 300 HV (DC01 perusaineen kovuus 105 HV).

4.7 Laserhitsin väsymiskestävyys

Väsymiskestävyyden kannalta hitsin pinta-alan kasvattaminen parantaa väsymiskestävyyttä etenkin matalilla syklimäärillä ja suurilla jännitysamplitudeilla, mutta myös kun jännitysamplitudit ovat pieniä korkean syklimäärän alueella. Ultralujilla teräksillä hitsin pinta-alan kasvattaminen parantaa väsymiskestävyyttä matalan syklimäärän alueella merkittävästi. Korkean syklimäärän alueella hitsin pinta-alan kasvaessa ultralujan teräksen laserhitsin väsymiskestävyys ei parane enää merkittävästi. Ultralujan teräksen käyttö ei paranna pienillä jännitysamplitudeilla limiliitos laserhitsillä väsymiskestävyyttä suhteessa rakenneteräksiin vaan väsymiskestävyys voi olla jopa huonompi kuin rakenneteräksillä.

Laserhitsattujen rakenteiden suunnittelussa pitää ottaa huomioon laserhitsin väsymisominaisuudet, jos rakenteeseen kohdistuu värähtelevää dynaamista kuormitusta. Ultralujia teräksiä kannattaa käyttää, kun rakenteen pitää kestää hetkellisiä kuormitushuippuja ja sille sallitaan kimmoista taipumaa. Etenkin ultralujia teräksiä käytettäessä rakenteissa, joihin kohdistuu korkean syklimäärän väsymistä, pitää limiliitos laserhitsien pinta-alan olla riittävä ja hitsit pitäisi sijoittaa paikkoihin, jotka eivät ole lujuuden kannalta kriittisiä.

Laserhitsien väsytyskokeissa on huomattu, että väsyttävän kuormitusvaihtelun ollessa suurta ja pienillä syklimäärillä teräksen lujuudesta on hyötyä. Toisaalta kuormitusvaihteluiden (väsytysamplitudi) ollessa matalia ja korkeasyklisiä, kuten korkea taajuuksinen tärinä, teräksen lujuudesta ei ole hyötyä. Tämän vuoksi on tärkeää ottaa huomioon rakenteen ominaistaajuudet suhteessa ympäristön herätteisiin.

4.7.1 Esimerkki laserhitsien väsytyskokeet symmetrinen koesauva

Pienellä 40 J/mm hitsausenergiantuonnilla hitsattiin koehitsejä koemateriaaleille Raex 400 ja 355 MC. Koesauva oli symmetrinen ja väsytyksessä hitsiin kohdistui lähes puhdas leikkausvoima. Hitsin leveys oli Raex 400 teräksellä 0,48 mm ja 355 MC teräksellä 0,43 mm. Vastaavasti hitsien (kaksi hitsiä vastakkain) pinta-alat Raex 400 teräksellä 48 mm² (2* pituus 50 mm * leveys 0,48 mm) ja 355 MC teräksellä 0,43 mm² (2* pituus 50 mm * leveys 0,48 mm) ja 355 MC teräksellä 0,43 mm² (2* pituus 50 mm * leveys 0,48 mm) ja koesauvan poikkipinta-ala oli 100 mm².



Kuva 45. Raex 400 kulutusteräs ja 355 MC rakenneteräs väsytyskoe symmetrisellä koesauvalla 40 J/mm energiantuonnin laserhitseille koelevyn jännityksen mukaan.



Kuva 46. Raex 400 kulutusteräs ja 355 MC rakenneteräs väsytyskoe symmetrisellä koesauvalla 40 J/mm energiatuonnin laserhitseillä hitsin jännityksen mukaan.

Kuvista 45 ja 46 nähdään 40 J/mm energiantuonnin laserhitsien väsytyskoetulokset symmetrisen koesauvan väsytyksessä. Tulosten perusteella Raex 400 hitsi 40 J/mm on väsytyskestävyydeltään parempi kuin 355 MC vastaava hitsi levyn jännitysamplitudin ja hitsin jännitysamplitudin perusteella. Kokeiden perusteella suuremmilla jännitysamplitudeilla Raex 400 teräksen suuremmasta myötölujuudesta on enemmän hyötyä, jolloin Raex 400 hitsi on selvemmin parempi väsymiskestävyydeltään. Jännitysamplitudin pienentyessä ja väsytyssyklien määrän kasvaessa koemateriaalien väsytyskestävyyden erot pienentyvät.



Kuva 47. Raex 400 kulutusteräksen ja 355 MC rakenneteräksen väsytyskoe symmetrisellä koesauvalla 225 J/mm energiantuonnin laserhitseillä.

Kuvasta 47 voidaan nähdä, että energiantuonnin 225 J/mm hitsillä Raex 400 on parempi väsymiskestävyydeltään noin 150 MPa jännitysamplitudiin saakka koelevyn jännityksen mukaan. Jännitysamplitudin ollessa pienempi kuin n. 150 MPa 355 MC koemateriaali on väsytyskestävyydeltään parempi.



Kuva 48. Raex 400 kulutusteräksen väsytyskoe symmetrisellä koesauvalla 40 J/mm ja 225 J/mm energiantuonnin laserhitseille.

Kuvassa 48 on vertailtu Raex 400 40 J/mm ja 225 J/mm hitsausenergiantuonnin laserhitsien väsymiskestävyyttä symmetrisellä koesauvalla. Tuloksista nähdään, että hitsi 225 J/mm on ollut väsymiskestävyydeltään parempi kuin 40 J/mm hitsi. Erityisesti

suurilla jännitysamplitudeilla 225 J/mm hitsi on ollut väsymiskestävyydeltään merkittävästi parempi.



Kuva 49. 355 MC rakenneteräksen väsytyskoe symmetrisellä koesauvalla 40 J/mm ja 225 J/mm energiantuonnin laserhitseille.

Kuvassa 49 on vertailtu 355 MC 40 J/mm ja 225 J/mm laserhitsien väsymiskestävyyttä. Tulosten perusteella 225 J/mm hitsi on parempi väsymiskestävyydeltään. 355 MC rakenneteräksellä 255 J/mm hitsi on suhteessa parempi kuin 40 J/mm hitsi verrattuna Raex 400 samoilla hitsausenergiantuonneilla tehtyihin hitseihin symmetrisellä koesauvalla. Tämä johtuu osaltaan HAZ:en eroista koemateriaalien välillä, Raex 400 HAZ:ssa on pehmennyt vyöhyke.



Kuva 50. Raex 400 kulutusteräksen väsymismurtuma symmetrinen koesauva 40 J/mm energiantuonnin laserhitsillä.

Raex 400 materiaalilla 40 J/mm hitseillä symmetrisellä koesauvalla pienillä jännitysamplitudeilla murtuma on edennyt hitsin suuntaisesti ja murtuma on näin tapahtunut levyn poikki hitsin suuntaisesti (kuva 50). 355 MC 40 J/mm hitsillä symmetrisellä koesauvalla kaikki hitsit murtuivat hitsin poikki levyn pinnan suuntaisesti, kuten kuvassa 51 a.



Kuva 51. a) 40 J/mm hitsi, joka on murtunut hitsin poikki eli levyn pinnan suuntaisesti. b) 225 J/mm hitsi, joka on murtunut hitsin suuntaisesti. c) ja d) 255 J/mm hitsi, joka on murtunut hitsin poikki.

Tutkittiin hitsien väsymislujuutta vaihtokuormituksella (R = -1). Kokeet tehtiin hitsillä 40 J/mm koemateriaaleille Raex 400 ja 355 MC. Käytettäessä vaihtokuormitusta maksimijännitys on vain puolet verrattuna vetotykytykseen (R = 0) samalla jännitysamplitudilla. Vaihtokuormitus tarkoittaa kuormitusvaihtelua, jossa jännitys vaihtaa suuntaansa jakson aikana. Normaalijännityksen tapauksessa esiintyy siis sekä veto että puristusjännityksiä. Vaihtokuormitus ymmärretään tapaukseksi, jossa keskijännitys $\sigma_m = 0$ ja jännityssuhde R on minimijännityksen suhde maksimijännityksen.



Kuva 52. Väsytyskoe hitsillä 40 J/mm vaihtokuormituksella (R = -1) ja vetotykytyksellä (R = 0).

Kokeiden perusteella voidaan huomata (Kuva 52), että väsytyksessä vetotykytyksen huippujännityksellä ei ole niin merkittävä väsymiskestävyyden kannalta, vaan jännity-samplitudi merkitsee enemmän. Huippujännityksellä on kuitenkin suuri merkitys silloin, kun jännitys on lähellä materiaalin myötörajaa.

Johtopäätöksiä symmetristen koesauvojen väsytyskokeista

- Raex 400 lujuus korostuu väsytyskokeissa low-cycle fatigue (LCF) (pieni syklimäärä) puolella, koska Raex 400 hitsien staattinen lujuus on suurempi kuin 355 MC lujuus. Väsytyksessä myötörajan ja huippujännityksen erotus on suurempi.
- Kun siirrytään LCF → HCF (high-cycle fatigue, suuri syklimäärä), 355 MC on suhteessa parempi väsymiskestävyydeltään, koska HAZ:ssa ei ole pehmentynyttä vyöhykettä
- 40 J/mm hitsin suhteellinen väsymiskestävyys parempi kuin 225 J/mm, koska pienemmän lämmöntuonnin ansiosta hienompi mikrorakenne ja kapea HAZ (kuva 33 ja 35).
- 225 J/mm hitsin absoluuttinen väsymiskestävyys parempi kuin 40 J/mm, koska hitsin pinta-ala on suurempi, mikä kompensoi epäedullisempaa mikro-rakennetta ja leveää HAZ:ia (kuva 33 ja 35).

4.7.2 Esimerkki laserhitsien väsytyskokeet epäsymmetrinen koesauva



Kuva 53. Raex 400 kulutusteräs ja 355 MC rakenneteräs väsytyskoe epäsymmetrinen koesauva kahdella 40 J/mm energiantuonnin laserhitsillä.

Kuvasta 53 voidaan nähdä, että toisin kuin symmetrisellä koesauvalla puhtaan leikkauksen väsytyskokeissa Raex 400 kahden 40 J/mm hitsien väsymiskestävyys on lähes sama kuin 355 MC hitsien. Tulosten perusteella 355 MC teräs kestää hitseillä 40 J/mm perusaineen lujuuteen nähden hyvin "repivää" väsytyskuormitusta varsinkin pienillä jännitysamplitudeilla verrattuna Raex 400 teräkseen. Tämä johtunee 355 MC teräksen perusainetta lujemmasta hitsistä. Raex 400 teräksellä muutosvyöhykkeen lujuuserot ovat suuret, mikä vaikuttaa negatiivisesti väsymiskestävyyteen.

355 MC kahdella 40 J/mm hitsillä väsymismurtuma epäsymmetrisellä koesauvalla etenee n. 40 - 60 MPa pienemmillä jännitysamplitudeilla etenee hitsin suuntaisesti levyn poikki. Raex 400 kahden 40 J/mm hitsin väsymismurtuma epäsymmetrisellä koesauvalla tapahtuu kaikilla jännitysamplitudeilla hitsin suuntaisesti levyn poikki.



Kuva 54. Raex 400 kulutusteräs väsytyskoe epäsymmetrinen koesauva kolme hitsiä 100 J/mm energiantuonnilla verrattuna kahteen hitsiin 40 J/mm energiantuonnilla.

Kuvassa 54 väsytyskoetulokset Raex 400 koemateriaalille kolmella 100 J/mm hitsillä epäsymmetrisellä koesauvalla verrattuna kahteen 40 J/mm hitsiin. Kolmen 100 J/mm hitsin pinta-ala on 120 mm² (3 * pituus 50 mm * leveys 0,8 mm) ja kahden 40 J/mm hitsin pinta-ala on 48 mm² (2 * pituus 50 mm * 0,48 mm). Tulosten perusteella kolme 100 J/mm väsymiskestävyys suurilla jännitysamplitudeilla on hyvä, mikä oli odotetta-vissa liitoksen hyvä leikkauslujuuden vuoksi. Myös pienillä jännitysamplitudeilla suuren syklimäärän alueella väsymiskestävyys kolmella 100 J/mm hitsillä oli parempi kuin kahdella 40 J/mm hitsillä.

4.7.3 Epäsymmetrisen väsytyskokeen tulosten vertailu aikaisemmin julkaistuun väsymisjulkaisuun

Väsytyskoe tuloksia verrattiin julkaisuun, jossa käytetyt materiaalit ja koejärjestelyt ovat lähes vastaavat käsikirjassa esitettyihin esimerkkitapauksiin. Epäsymmetrisellä koesauvalla tehtyjä väsytyskoetuloksia verrattiin julkaisuun Fracture mechanics parameter for the fatigue resistance of laser welds (Wang 1995). Julkaisussa limiliitos laserhitsit oli tehty CO₂-laserilla. Koemateriaali oli 1,78 mm paksua SAE 1005 terästä, jonka myötölujuus noin 260 MPa ja murtolujuus noin 330 MPa. Hitsisauman leveys oli 1,2 mm ja pituus 25,4 mm.

Julkaisussa oli tutkittu limiliitoshitsin leveyden, pituuden, levyn paksuuden ja levyjen välisen raon vaikutusta väsymiskestävyyteen. Väsytyskokeet on tehty jännityssuhteella R=0. Julkaisussa kuormitus on esitetty jännitysvaihteluna (ΔP kN), joka muunnetaan levyn jännitykseksi jakamalla ΔP levyn pinta-alalla (45,2 mm²), joka on laskettu levynpaksuuden (1,78 mm) ja hitsin pituuden (25,4 mm) perusteella. Jännitysvaihtelu jaetaan kahdella, jolloin saadaan amplitudi. Julkaisussa väsytyskokeet oli tehty pienillä jännitysamplitudeilla ja high-cycle alueella. Kuvasta 55 nähdään, että artikkelin väsytyskoetulokset vastaavat FMT-ryhmän tuloksia, vaikka kokeissa oli eroavaisuuksia.



Kuva 55. Artikkelissa Fracture mechanics parameter for the fatigue resistance of laser welds esitetyt väsytyskoetulokset verrattuna Raex 400 ja 355 MC 40 J/mm laserhitseihin (Wang 1995).

4.8 Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitos

Kaksipuolista ohutta (<0,2 mm) teippiä voidaan käyttää limiliitoksen hitsauksessa pitimenä ja samalla liitoksen lujittajana sekä tiivisteenä. Teipin paksuutta rajaa se, että limiliitoksessa levyjen välinen ilmarako ei saa olla liian suuri. Teippi toimii erillisten kiinnittimien korvaajana joissain hitsaustilanteissa ja näin nopeuttaa ja helpottaa hitsausta. Kokeellisesti on havaittu, että limiliitoksessa teippiliitoksen lujuus riittää pitämään levyt yhdessä hitsauksen ajan. Tämän vuoksi kaksipuolista teippiä käyttämällä on mahdollista päästä eroon levyjen silloituksesta tai muista kiinnittimistä.

4.8.1 Esimerkki laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksesta

Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksella saavutetaan parempi liitoksen veto- ja väsytyslujuus (kuva 56 ja 57). Kaksipuoleinen teippi toimii myös värähtelyjen vaimentajana.



Kuva 56. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen leikkausvoimakoe symmetrinen koesauva Raex 400 kulutusteräs.

Kuvasta 56 nähdään, että teipin pinta-alaltaan 4000 mm² ja laserhitsin liitoksen leikkauslujuus on keskiarvoltaan noin 506 MPa ja 2000 mm² pinta-alan teipillä ja laserhitsillä noin 499 MPa. Tulosten perusteella teipin pinta-alan kasvattaminen kaksinkertaiseksi lisäsi liitoksen leikkauslujuutta vain noin 7 MPa. Yksittäinen 40 J/mm energiantuonnin laserhitsi leikkautui, kun leikkausjännitys levyssä oli noin 418 MPa. Pelkän teippiliitoksen leikkauslujuus oli noin 30 MPa. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen pinta-alaltaan 4000 mm² ja yksittäisen laserhitsin leikkauslujuuksien ero oli noin 88 MPa.



Kuva 57. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen väsytyskoe symmetrinen koesauva Raex 400 kulutusteräs.

Kuvasta 57 nähdään laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen leikkausväsytyslujuus verrattuna pelkkään hitsiliitokseen. Kokeiden perusteella voidaan todeta, että väsytyskokeissa liitoksen väsytyslujuus parani merkittävästi laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksella verrattuna yksittäisen hitsin kestävyyteen. Samalla syklimäärällä liitosta voitiin kuormittaa noin 10 - 15 MPa suuremmalla jännitysamplitudilla. Kuvasta 57 voidaan huomata myös, että tulosten hajonta pieneni teippi-hitsiliitoksella.



Kuva 58. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitoksen leikkausvoimakoe epäsymmetrinen koesauva Raex 400 kulutusteräs.

Kuvassa 58 on tutkittu epäsymmetrisellä koesauvalla vetokokeilla teippi-laserhitsiliitoksen leikkauslujuutta. Kuvasta 58 voidaan nähdä teippi-hitsiliitoksen leikkauslujuus epäsymmetrisessä leikkausvoimakokeessa verrattuna pelkkään hitsiliitokseen. Teipin pinta-alaltaan 2000 mm² ja kahden 40 J/mm laserhitsin liitoksen leikkauslujuus on keskiarvoltaan noin 456 MPa. Kaksi 40 J/mm laserhitsiä leikkautui, kun leikkausjännitys levyssä oli noin 377 MPa. Tulosten perusteella myös epäsymmetrisissä vetokokeissa teippi-laserhitsiliitos osoittautui selvästi paremmaksi kuin pelkkä laserhitsiliitos.



Kuva 59. Laserhitsi kaksipuolinen teippi liitos väsytyskoe epäsymmetrinen koesauva Raex 400 kulutusteräs.

Kuvassa 59 on tutkittu myös laserhitsi-kaksipuolinen teippi liitoksen väsymiskestävyyttä epäsymmetrisellä koesauvalla. Kuvan 59 perusteella voidaan nähdä, että väsytyskokeissa liitoksen väsytyslujuus parani merkittävästi laserhitsi-kaksipuolinen teippi liitoksella verrattuna hitsi liitoksen kestävyyteen yli 40 MPa jännitysamplitudeilla. Pienillä jännitysamplitudeilla nähdään kuitenkin, että teippi-laserhitsiliitoksen väsytyskestävyys on lähes sama kuin pelkän laserhitsin väsymiskestävyys. Voidaan huomata, että myös epäsymmetrisillä koesauvoilla tulosten hajonta pienentyi teippiä käytettäessä.

4.9 Suojakaasun käyttö laserhitsauksessa

Rakenne- ja kulutusteräksien hitsauksessa suojakaasun käyttäminen ei ole välttämätöntä. Ruostumattoman ferriittisen teräksen hitsauksessa suojakaasua on ehdottomasti käytettävä. Päittäisliitoksissa hitsauskuvun muodon jouhevuus parantuu suojakaasukenkää käytettäessä, mikä parantaa liitoksen väsymiskestävyyttä.

4.9.1 Esimerkki suojakaasun vaikutus kulutusteräksen laserhitsauksessa

Kokeet tehtiin Raex 400 kulutusteräkselle ja levyn paksuus oli 2 mm. Argon suojakaasun virtaama oli 30 l/min ja suojakaasu tuotiin hitsin jälkipuolelle kaasukengällä. Kuvassa 60 on esitetty kulutusteräkselle tehdyn 40 J/mm hitsausenergiantuonnin limiliitoshitsin väsytyskoetulokset epäsymmetrisellä koesauvalla, kun hitsi on tehty ilman suojakaasua ja suojakaasun kanssa. Hitsien väsymiskestävyydessä ei ole nähtävissä merkittävää eroa. Suojakaasun käyttäminen limiliitoksessa muuttaa hieman hitsin muotoa, mikä voi selittää hieman paremman väsymiskestävyyden suojakaasua käytettäessä. Koesauvoilla tehtiin myös leikkausvoimakokeet ja liitoksen leikkauslujuudessa ei ollut eroja ilman suojakaasua hitsattujen ja suojakaasun kanssa hitsattujen liitosten välillä.



Kuva 60. Väsytyskoetulokset kulutusteräs suojakaasuton hitsi sekä suojakaasun kanssa hitsattu hitsi.

4.9.2 Esimerkki suojakaasun vaikutus ruostumattoman EN1.4310 jousiteräksen laserhitsauksessa

Kokeessa tutkittiin, miten argon suojakaasun käyttäminen vaikuttaa ruostumattoman EN 1.4310 jousiteräksen limiliitoshitseissä. Koelevyjen paksuus oli 0,5 mm. Hitsausnopeus oli 18 m/min ja teho 3 kW. Hitsausenergiantuonti oli 10 J/mm. Suojakaasu tuotiin hitsin jälkipuolelle kaasukengällä ja argon suojakaasun virtaama oli 30 l/min.

Laserhitsauksessa ei käytetä lisäainetta ja laserhitsi muodostuu hitsattavasta materiaalista. Erittäin ohuita teräksiä hitsattaessa ongelmana on usein se, että hitsi jää vajaaksi, koska hitsisulasta poistuu roiskeina materiaalia (Kuva 61). Ohuilla teräksillä vaajaa hitsi on suhteellisesti suurempi, mitä paksummilla materiaaleilla. Ohuita teräksiä (≤0,5 mm) laserilla hitsattaessa ja suojakaasukenkää käytettäessä materiaalin hukka pienenee ja on mahdollista saada aikaan kuvullinen hitsi. Suojakaasun käyttö mahdollistaa kuvullisen hitsin ja jos liitettävien levyjen välissä on pieni ilmarako, niin levyjen välillä oleva materiaalivajaus ei aiheuta vajaata hitsiä. Suojakaasun oikea virtaus on tärkeää, jotta edellä mainitut hyödyt saavutetaan.



Kuva 61. Ohuen 0,5 mm paksun ruostumattoman EN 1.4310 teräksen hitsien yläpinnan poikkileikkaukset. Vasemmalla kuvassa olevan hitsin hitsauksessa on käytetty suojakaasua ja hitsillä on selkeä kupu. Oikealla kuvassa oleva hitsi on hitsattu ilman suojakaasua ja hitsistä on poistunut materiaalia ja hitsin yläpinta on selvästi kuopalla.

Kokeissa selvisi, että suojakaasun käyttäminen mahdollisti kuvullisen hitsin syntymisen EN 1.4310 ruostumattomalle teräkselle. Myös roiskeiden määrä väheni, kuten kuvasta 63 voidaan nähdä. Kuvullinen hitsi toimii "lisäaineena", jos hitsattavien levyjen väliin jää pieni rako



Kuva 62. Suojakaasulla hitsatun ja ilman suojakaasua hitsatun koesauvan erot vetokokeessa. Oikealla kuvassa kuopalla oleva ilman suojakaasua hitsattu hitsi taipuu huomattavasti enemmän kuin kuvullinen hitsi vasemmalla kuvassa.



Kuva 63. Suojakaasun kanssa hitsatun ja ilman suojakaasua hitsatun hitsisauman erot. Vasemmalla suojakaasun kanssa hitsattu ja oikealla ilman suojakaasua hitsattu sauma. Suojakaasun kanssa hitsattu sauma on kirkas ja roiskeeton. Ilman suojakaasua hitsattu sauma on tumma ja kuvassa näkyy paljon roiskeita.

Limiliitoshitseille tehtiin vetokokeet ja tulokset ovat nähtävissä kuvassa 64. Tuloksista voidaan nähdä, että ilman suojakaasua hitsattu koesauva on taipunut voimakkaasti (kuva 62) ja katkennut vajaasta hitsistä johtuen. Ilman suojakaasua hitsatun koesauvan lujuus oli huomattavasti pienempi kuin suojakaasulla hitsatun.



Kuva 64. EN 1.4310 ruostumattoman jousiteräksen vetokoe. Tulokset perusmateriaalille sekä suojakaasulla ja ilman suojakaasua hitsatuille limiliitos koesauvoille.

4.10 Laserhitsien FE-analyysi

Laserhitsien FE-analyysilla voidaan selvittää esim. laserhitsin staattisen kuorman kestävyyttä tai liitoksen väsymiskestävyyttä. FE-analyysin avulla saadaan selville esim. jännitysjakauma hitsissä leikkaavassa kuormituksessa.

3D-mallinnuksessa ja FE-laskennassa laserhitsin huomioiminen tapahtuu periaatteessa samoin kuin muidenkin hitsien, tosin oleellinen ero on siinä, että laserhitsaus on yleensä lisäaineetonta. Päittäisliitos ja sen eri versiot, joissa materiaali liittyy koko paksuudeltaan, on mallinnuksessa yksinkertainen ja siinä voi soveltaa FE-mallinnuksessa jäykkää liitosta. Limiliitoksessa rakenteet liittyvät hitsin kautta ja oleellista rakenteen kannalta on hitsin pinta-ala. Laserhitsatun limiliitoksen mitoittaminen pohjautuu tietoon liitoksen staattisista ja dynaamisista ominaisuuksista ja voidaan toteuttaa 3D-mallin pohjalta FEM-ohjelmistolla, tosin käytännössä varsinkaan suurempien rakenteiden kohdalla tämä ei ole täysin ongelmatonta varsinkaan tapauksissa, joissa halutaan laskea suurempaa määrää laserhitsattuja limiliitoksia sisältävää rakennetta FEM-ohjelmistoilla.

Kun pyritään hyödyntämään FE-analyysiä suunnittelussa suhteellisen kevyesti ja nopeasti, pysytään yleensä lineaarisissa laskentamalleissa. Haasteena limiliitoksen kohdalla on se, että useamman toisissaan kiinniolevien levyjen välissä on pieni alue, josta levy ovat jäykästi kytkeytyneet. Tämän mallintaminen siten, että FE-mallin laskenta-aika ei nousisi kovin suureksi voi olla haastavaa. Huomioitavaa tässä on se, että kun limiliitos on mallinnettu 3D-CAD-ohjelmassa siten, että levyillä on tietty limittäinen alue, FEM-ohjelma voi automaattisesti käsitellä tämän alueen liittyneeksi. Tällöin limiliitoksen todelliset jännitykset eivät näy analyysissä ja rakenne on todellisuutta lujempi ja jäykempi. Näin käy tilanteissa, joissa hyödynnetään CAD-ohjelmaan tiiviisti integroitua FEM:iä ja annetaan ohjelman muodostaa liitokset automaattisesti.

Suoranaista yksikäsitteistä ohjeistusta limiliitoksen FE-mallintamiseen on hankala antaa. Kun limiliitosta kuormittavat voimat ovat tiedossa voidaan limiliitoksen mitoitus tehdä osamallilla, jolloin laserhitsin alue liitetään sidoksella, joka sitoo liitospintojen vapausasteet toisiinsa (Bonded connection). Tällöin 3D-malliin tai mallista tehtyyn verkotukseen määritellään alue, jolta hitsi liittyy. Liitosalueella ja sen ympäristössä elementtiverkon koko täytyy olla suhteellisen pieni, mikä tilanteissa, joissa rakenteessa on paljon limiliitosta, tekee laskennasta raskaan. Elementtityypin valinnalla voi laskenta-aikaa monessa tapauksessa pienentää. Joissakin tapauksissa liitoksen toteuttaminen puhtaasti geometrialla voi olla järkevää FE-mallin helpon muodostamisen ansiosta.

Kuvassa 65 on projektissa käytetyn symmetrisen kuormitustapauksen jännitysjakauma Comsol Multiphysics FEM-ohjelmalla mallinnettuna. Mallin geometria on toteutettu parametrisena laskentaohjelman työkaluin siten että hitsi on geometriaa, jolloin sen leveyttä on helppo muuttaa. Mallissa käytetty levyjen väli, joka on sama kuin hitsin "korkeus" on 0,01 mm. Erilaisilla laskennoilla on kokeiltu mm. kitkan vaikutusta koejärjestelyssä.

Kuvassa 66 on mallinnettu limiliitos normaalivoiman suuntaista tarkastelua varten ja kuvassa 67 leikkausvoiman tarkastelua varten. Näissä mallinnus on tehty Abaqus -ohjelmalla. Hitsisauman leveys on 0,4 mm ja pituus on 50 mm, eli kokonaispinta-ala on 20 mm². Laserhitsi on mallinnettu surface-to-surface kontaktilla, jossa pinnat laitetaan yhteen sidosyhtälöillä ja jolloin saadaan laskettua solmuvoimat.



Kuva 65. Laserhitsin jännitysjakauma FE-analyysissa.

4.10.1 Esimerkki laserhitsien FE-analyysista Abaqus-ohjelmalla

Seuraavassa esimerkissä on tutkittu Kevyet ja kestävät rakenteet hankkeessa käytännön kokeissa käytettyjä koesauvoja vastaavia FE-malleja. Laserhitsauksesta on tutkittu FEM-ohjelmalla limiliitoksen staattisen kuorman kestävyyttä. Analyysit on toteutettu Abaqus-ohjelmistolla normaalinsuuntaisella kuormalla sekä leikkaavalla kuormalla seuraavien kuvien mukaisesti.



Kuva 66. Normaalivoiman suuntainen kuormitus.


Kuva 67. Leikkausvoiman suuntainen kuormitus.

Hitsisauman leveys on 0,4 mm ja pituus on 50 mm, näin ollen sen kokonaispinta-ala on 20 mm². Laserhitsit on mallinnettu surface-to-surface kontaktilla, jossa pinnat laitetaan yhteen sidosyhtälöillä ja näin saadaan laskettua solmuvoimat. Materiaalimallina ovat teräksen elastiset materiaaliominaisuudet:

- kimmokerroin on 210000 MPa,
- Poissonin vakio 0,28.

Elementtiverkkona on C3D8I, mikä luokitellaan solidiverkoksi. Tämä mahdollistaa myös solmuvoimien laskemisen globaalikoordinaatistossa. Elementtien koot ovat hitsisaumassa 0,2 mm leveitä ja 1 mm pitkiä. Elementtiverkossa on kolme elementtikerrosta paksuussuunnassa.

4.10.2 Raex 400 kulutusteräs staattinen normaalivoima

Raex 400 laserhitsin normaalivoimasimulaatiossa voimana on 49500 N. Tämä on kohdistettu 3 mm x 50 mm = 150 mm² pinta-alalle (koesauvan poikkipinta-ala), jolloin hitsiin tuleva nimellinen jännitys on 2475 MPa. Voima, jota käytettään analyysissä on saatu vastaavien käytännön kokeiden perusteella. Tuloksissa on luotu polut hitsisauman pituussuunnassa, jolloin siitä saadaan solmuvoimat. Seuraavassa kuvassa nähdään maksimisolmuvoima, sen sijainti sekä hitsin polkujen paikat.



Kuva 68. Maksimisolmuvoima ja sen paikka sekä solmujen sijainnit hitsisaumassa.

Kuvasta 68 nähdään, että maksimisolmuvoima hitsissä on noin 439 N ja se sijaitsee 2 mm levyn reunasta levyn keskelle päin ja sama voima löytyy molemmin puolin levyä. Tässä kohdassa sijaitsee levyn maksimijännitys solmuvoimien ollessa 438.966 N, 161.418 N ja 438.966 N. Tämä tarkoittaa, että hitsisauman kohdalle tuleva maksimijännitys on:

$$\sigma = \frac{F}{A} \to \sigma = \frac{439 \,N + 161.4 \,N + 439 \,N}{0.4 \,mm * 1mm} = 2598.5 \,MPa. \tag{1}$$

4.10.3 Raex 400 kulutusteräs staattinen leikkausvoima

Leikkausvoimana on 40000 N, mikä on saatu käytännönkokeiden perusteella. Tämä kohdistuu kahteen saumaa, jolloin kuormitus puolittuu. Sauman mitat ovat samat kuin normaalivoiman tapauksessa. Yhteen hitsiin tuleva nimellinen jännitys on (40000 N / 2) / (0,4 mm x 50 mm) = 1000 MPa. Simulaatiossa on luotu polut, kuten normaalivoiman kohdalla mutta nyt on otettu leikkaussuuntainen komponentti ja laskettu maksimijännitys. Kuvasta 69 nähdään maksimisolmuvoimat ja niiden paikat pituussuunnassa.



Solmuvoimat leikkaus RAEX 400

Kuva 69. Maksimisolmuvoimat leikkaukselle ja niiden paikat pituussuunnassa.

Solmuvoimat samalla kohdalla eri poluissa ovat 220.171 N (vedonsuunnan vastakkainen puoli hitsistä), 37.7915 N (hitsin keskipolku) sekä 213.542 N (hitsin vedonpuoli). Näin ollen yhden hitsin maksimijännitykseksi tulee:

Näin ollen yhden hitsin maksimijännitykseksi tulee: $\tau = \frac{F}{A} \rightarrow \tau = \frac{220.171 N + 37.7915 N + 213.542 N}{0.4 mm * 1mm} = 1178.76 MPa$ (2)

4.10.4 DC01 teräksen staattinen leikkausvoima

DC01 maksimikuorma leikkaukselle on 23100 N, joka on saatu käytännön vetokoe tuloksesta. Yhteen hitsiin tuleva nimellinen jännitys on (23100 N / 2) / (0,4 mm x 50 mm) = 577,5 MPa. Maksimijännitys tulee 1 mm reunasta, jossa solmuvoimat ovat kuvassa 70.



Solmuvoimat leikkaus DC01

Kuva 70. DC01 solmuvoimat ja niiden paikka.

Maksimisolmuvoimat ovat 124.585 N (hitsin vedon puoli), 121.884 (vedon vastakkainen puoli hitsissä) sekä 28.0299 (hitsin keskellä). Näin ollen maksimijännitykseksi tulee:

$$\tau = \frac{F}{A} \to \tau = \frac{124.585 \, N + 28.0299 \, N + 121.884 \, N}{0.4 \, mm \, *1mm} = 686.25 \, MPa \tag{3}$$

4.10.5 DC01 teräksen staattinen normaalivoima

DC01 staattisen normaalivoiman kokeessa maksimivoimaksi saatiin noin 28000 N, jota on käytetty simulaatiossa. Hitsiin tuleva nimellinen jännitys on 28000 N / (0.4 mm x 50 mm) = 1400 MPa. Solmuvoimien saantia varten on luotu polut, kuten Raex 400:n normaalivoima simulaatioissa. Polkujen solmuvoimat ovat kuvassa 71.



Kuva 71. DC01 solmuvoimat normaalisuuntaisessa kuormituksessa ja niiden paikat.

Kuvaajasta nähdään solmuvoimat, joiden arvot ovat 238.1 N (hitsin molemmissa reunoissa) ja 52.0655 N (hitsin keskellä).

$$\sigma = \frac{F}{A} \to \sigma = \frac{238.1 \, N + 52.0655 \, N + 238.1 \, N}{0.4 \, mm \, *1mm} = 1320.66 \, MPa \tag{4}$$

5 Yhteenveto

Limiliitos laserhitsin ominaisuudet eri teräksillä

- Laserhitsi on rakenneteräksillä yleensä perusainetta kovempi ja muutosvyöhykkeellä ei ole pehmennyttä vyöhykettä.
- Ultralujilla- ja kulutusteräksillä laserhitsi voi olla perusainetta hieman kovempi ja muutosvyöhykkeellä on aina pehmennyt vyöhyke.
- Muokkauslujittamattomilla ruostumattomilla teräksillä laserhitsi on hieman perusainetta kovempi ja muutosvyöhykkeellä ei ole pehmennyttä vyöhykettä
- Muokkauslujitetuilla ruostumattomilla teräksillä laserhitsi ja muutosvyöhyke ovat pehmeämpiä kuin perusaine.

Laserhitsi limiliitoksen leikkausvoiman suuntainen lujuus

- Rakenneteräksillä voidaan karkeasti todeta, että hitsien pinta-alan pitää olla yhtä suuri kuin liitettävän levyn poikkipinta-ala, jos halutaan hitsiliitoksen olevan levyn lujuutta vastaava.
- Rakenneteräksillä perusaineen lujuutta vastaava liitos voidaan saavuttaa myös hitsattavan levyn poikkipinta-alaa pienemmällä hitsin pinta-alalla, jos hitsin tai hitsien kovuus (lujuus) on merkittävästi suurempi kuin perusaineella.
- Ultralujilla teräksillä hitsien pinta-alan tulee olla hitsattavan levyn poikkipintaalaan nähden merkittävästi suurempi. Ultralujilla teräksillä hitsien erilaiset muutosvyöhykkeet vaikuttavat merkittävästi liitoksen lujuuteen, joten liitoksen lujuus ei korreloi suoraan hitsien pinta-alaan.
- Ultralujilla teräksillä hitsin pinta-alan pitää olla suhteessa suurempi, jos halutaan hyödyntää materiaalin lujuutta.
- Mitä kapeampi laserhitsi on, sitä lujempi se on suhteessa hitsin pinta-alaan, jos on käytetty järkeviä hitsausparametreja. Tämä johtuu siitä, että sula-alue on yleensä lujempi kapeammalla hitsillä, koska hitsausenergiantuonti on ollut pienempi.
- Leveämpi hitsi on kuitenkin **liitoksena** parempi, jos on käytetty järkevää hitsausenergiantuontia.

Laserhitsi limiliitoksen väsyttävä kuormitus

- Väsyttävässä kuormituksessa ultralujien- ja kulutusterästen laserhitseillä ei saavuteta hyötyä rakenneterästen laserhitseihin nähden, kun syklimäärä on suuri ja jännitysvaihtelu on pieni eli (HCF) high-cycle fatigue alueella.
- Ultralujat- ja kulutusteräs laserhitsit ovat yleensä parempia väsymiskestävyydeltään suhteessa rakenneteräksien laserhitseihin, kun syklimäärä on pieni ja jännitysvaihtelu suuri eli (LCF) low-cycle fatigue alueella.
- Väsymiskestävyyden kannalta laserhitsin pinta-alan kasvattaminen parantaa väsymiskestävyyttä etenkin pienillä syklimäärillä ja suurella jännitysvaihtelulla (LCF) low-cycle fatigue alueella.
- Rakenneteräksillä laserhitsin pinta-alan kasvattaminen parantaa väsymiskestävyyttä suhteessa enemmän myös (HCF) high-cycle fatigue alueella verrattuna ultralujiin- ja kulutusteräksiin.

Kiitokset

Käsikirjan toteuttanut Oulun yliopiston Kerttu Saalasti Instituutin Tulevaisuuden tuotantoteknologiat (FMT) -tutkimusryhmä kiittää Kevyet ja kestävät rakenteet (KeKeRa) -hankkeeseen osallistuneita yhteistyökumppaneita, jotka mahdollistivat käsikirjan tekemisen.

Lähdeluettelo

- Cho S.K, Yang Y.S, Son K.J, Kim J.Y, Fatigue strength in laser welding of the lap joint. Finite Elements in Analysis and Design Volume 40, Issues 9–10 (2004) 1059-1070
- Du J, Longobardi J, Latham W.P, Kar A, Weld geometry and tensile strength in laser welded thin sheet metals. Science and Technology of Welding and Joining Volume 5 (2000) 304-309

Eriksson I, Powell J, Kaplan A.F.H, Measurements of fluid flow on keyhole front during laser welding. Science and Technology of Welding and Joining, Vol 16 NO 7 (2011)

FMT-ryhmä, FMT-tutkimusryhmän tutkimustuloksia

Ion J.C, Laser processing of engineering materials. Principles, procedure and industrial application. Elsevier (2005)

Ionix, http://www.ionix.fi/fi/teknologiat/lasertyosto/laserhitsaus/

Keskitalo M, Mäntyjärvi K, Sundqvist J, Powell J, Kaplan A.F.H, Laser welding of duplex stainless steel with nitrogen as shielding gas. Journal of Materials Processing Technology Volume 216 (2015) 381-384

Keskitalo M. Laserhitsauskäsikirja. Prolas-projekti. (2014)

Kujanpää V, Salminen A, Vihinen J, Lasertyöstö, Teknologiateollisuuden julkaisuja nro 3/2005

Kyröläinen A, Lukkari J, Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus, Metalliteollisuuden Kustannus Oy (1999)

Lämsä J, Kiuru H, Ultralujat rakenne- ja kulutusteräkset tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle (2012)

Ono M, Kabasawa M, Omura M, Static and fatigue strength of laser-welded lap joints in thin steel sheet, Welding International, 11:6 (1997) 462-467

Precitec, https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yw52/

Shi S, Westgate S, Laser welding of ultra-high strength steels for automotive applications, Picalo 2008 Proceedings (2008)

Stanciu E.M, Pavalache A.C, Dumitru G.M, Dontu O.G, Besneal D, Vasile M, Mechanism of keyhole formation in laser welding. Optics & Mechatronics, No. 38 (2010)

Steen W.M, Laser material processing. 3rd edition, Springer (2003)

Svenungsson J, Choquet I, Kaplan A.F.H, Laser welding process – a review of keyhole welding modelling. Physics Procedia 78 (2015) 182–191

Trumpf, https://www.trumpf.com/en_GB/products/laser/disk-lasers/

Wang P.C, Fracture mechanics parameter for the fatigue resistance of laser welds. International journal of fatigue, Vol. 17, (1995) 25-34

Westin E.M, Keehan E, Ström M, von Brömssen B, Laser welding of a lean duplex stainless steel. ICALEO Congress Proceedings (2007)

Westin E.M, Serrander D, Experience In Welding Stainless Steels For Water Heater Applications. Welding in the world. Volume 56, Issue 5–6, (2012) 14–28 Pajatie 5 85500 Nivala



FUTURE MANUFACTURING TECHNOLOGIES





Council of Oulu Region

POHJOIS-POHJANMAA

ISBN 978-952-62-2020-8 (painettu) ISBN 978-952-62-2021-5 (elektroninen) ISSN 2489-3501