



# **HITSATTUJEN ALUMIINIRAKENTEIDEN JÄÄNNÖSJÄNNITYSMITTAUKSET**

## **Residual Stress Measurements of Welded Aluminum Structures**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

Lauri Suhonen

Tarkastaja: DI Juho Havia

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin insinööritieteiden tiedekunta

Konetekniikka

Lauri Suhonen

### **Hitsattujen Alumiinirakenteiden Jäännösjännitysmittaukset**

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

27 sivua, 11 kuvaa, 4 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: DI Juho Havia

Avainsanat: alumiini, hitsaus, jäännösjännitykset, röntgendiffraktio

Tässä kandidaatin työssä tutkitaan hitsattujen alumiinirakenteiden jäännösjännityksiä. Jäännösjännityksillä on merkittävä vaikutus rakenteiden kestävyys, erityisesti väsyttävässä kuormituksessa. Alumiinirakenteet ovat erityisen tärkeitä esimerkiksi liikkuvissa sovelluksissa keveytensä ansiosta. Tämän takia on tärkeää, että hitsattujen alumiinirakenteiden jäännösjännityksistä on varmaa tutkittua tietoa. Tutkimuksia alumiinista on kuitenkin tehty huomattavasti vähemmän kuin teräksestä.

Tutkimuksessa tehtiin mittauksia MIG- ja TIG-hitsattujen alumiinikappaleiden jäännösjännityksistä. Jäännösjännityksiä mitattiin röntgendiffraktiolla, mikä on ainetta rikkomaton menetelmä. Röntgendiffraktion mittaussyvyys on hyvin matala, joten kaikki mittaustulokset ovat kappaleiden pinnasta. Koekappaleina toimivat alumiinisauvat, joilla oli erilaisia materiaalikoostumuksia ja ainepaksuuksia. Mittauksia tehtiin hitsin rajaviivalta poispäin lähtien 5 mm matkalta. Mittauksia vertailtiin muihin tutkimuksiin, luotettavuuden lisäämiseksi.

Mittaustulokset osoittivat, että hitsattuihin alumiinirakenteisiin syntyy jäännösjännityksiä. Mitatuissa koekappaleissa havaittiin veto ja puristus jäännösjännityksiä, molempia noin 150 MPa asti. MIG-hitsatuissa koekappaleissa havaittiin keskimäärin 50 MPa puristus jäännösjännitystä, kun taas TIG-hitsatuissa koekappaleissa jäännösjännitykset olivat suurimmaksi osaksi vetoa noin 20 MPa verran.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Engineering Science

Mechanical Engineering

Lauri Suhonen

### **Residual Stress Measurements of Welded Aluminum Structures**

Bachelor's thesis

2024

27 pages, 11 figures, 4 tables and 2 appendices

Examiners: M. Sc. (tech.) Juho Havia

Keywords: residual stresses, X-ray diffraction, welding, aluminum

In this bachelor's thesis, the residual stresses of welded aluminum structures are studied. Residual stresses have a significant effect on the durability of structures, especially under fatigue loading. Aluminum structures are especially important, in mobile applications, due to their lightness. This is why it is important to have reliable researched information about the residual stresses of welded aluminum structures. However, much less research has been done on aluminum than on steel.

In this work, the residual stresses of MIG- and TIG-welded aluminum pieces were measured. Residual stresses were measured by X-ray diffraction, which is a non-destructive method. The measurement depth of X-ray diffraction is very shallow, so all measurement results are from the surface of the objects. Aluminum specimens with different material compositions and material strengths were studied. Measurements were made from the weld toe of the weld to 5 mm away from the boundary line. The measurements were compared to other studies to increase reliability.

The measurement results showed that residual stresses occur in welded aluminum structures. In the measured residual stresses, both tension and compression were observed, both up to about 150 MPa. The average residual stresses of the MIG-welded pieces were about 50 MPa of compression. In TIG-welded pieces, the stresses are mostly tension of around 20 MPa.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$D$	lisäainelangan halkaisija	mm
$d$	etäisyys	mm
$H$	vapaalangan pituus	mm
$h$	juuren korkeus	mm
$I$	hitsausvirta	A
$L$	ilmarako	mm
$t$	levynpaksuus	mm
$U$	hitsausjännite	V
$v$	hitsausnopeus	mm/s
$w$	lisäainelangan nopeus	m/min
$\alpha$	viisteen kulma	°
$\theta$	diffraktio kulma	°
$\lambda$	aallonpituus	nm
$\sigma$	jännitys	MPa

## Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

<b>1 Johdanto</b> .....	7
1.1 Tutkimuksen tausta .....	7
1.2 Tutkimusongelma .....	7
1.3 Työn tavoitteet, tutkimusmenetelmät ja rajaukset.....	8
1.4 Tieteellinen anti .....	8
<b>2 Jännösjännitykset</b> .....	9
2.1 Jännösjännitysten muodostuminen ja vaikutukset .....	9
2.2 Jännösjännitysten mittaaminen .....	10
2.2.1 Röntgendiffraktio .....	10
<b>3 Tutkimusmenetelmät jännösjännitysten selvittämiseksi</b> .....	11
3.1 Koekappaleet .....	12
3.1.1 Hitsausparametrit .....	14
3.2 Mittauslaitteisto ja mittaussuureet .....	15
3.3 Kirjallisuuskatsaus .....	17
<b>4 Tulokset</b> .....	17
4.1 Mittaustulokset.....	17
4.2 Kirjallisuuskatsauksen tulokset.....	20
<b>5 Pohdinta</b> .....	21
5.1 Mittaustulosten vertailu aiempiin tutkimuksiin .....	21
5.2 Mittausten luotettavuus ja virhetarkastelu .....	22
5.3 Johtopäätökset.....	23
<b>6 Yhteenveto</b> .....	25
<b>Lähteet</b> .....	26

Liitteet

Liite 1. MIG-hitsattujen koekappaleiden jännösjännitysmittaukset

## Liite 2. TIG-hitsattujen koekappaleiden jäännösjännitysmittaukset

# 1 Johdanto

Jäännösjännityksiä syntyy lähes kaikissa materiaalin muotoa tai ominaisuuksia muokkaavissa valmistusprosesseissa, joten Jäännösjännitystilat vaikuttavat jollain tavoin lähes kaikissa rakenteissa. Jäännösjännitykset vaikuttavat huomattavasti rakenteen kestävyteen väsymisen näkökulmasta, joten niiden tutkiminen on tärkeää. (Rossini ym. 2012, s. 572–573)

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Teräksestä on tehty laajasti tutkimusta jäännösjännitysten osalta, mutta alumiiniseosten osalta tutkimus on huomattavasti pinnallisempaa. Alumiinirakenteiden jäännösjännitysten tutkiminen on kuitenkin yhtä merkityksellistä, koska alumiinia käytetään esimerkiksi liikkuvissa sovelluksissa, missä rakenteen kestävyys ja keveys on elintärkeää. Tulevaisuudessa kevyet rakenteet tulevat olemaan entistä tärkeämpiä, johtuen esimerkiksi energiatehokkuusvaatimuksista. Ymmärtämällä paremmin jäännösjännityksiä pystytään rakenteet optimoimaan paremmin, jolloin saadaan turvallisempia tai kevyempiä rakenteita.

## 1.2 Tutkimusongelma

Aikaisemmissa tutkimuksissa hitsattujen alumiinirakenteiden jäännösjännityksistä tuloksista löytyy jossain määrin ristiriitoja. Aikaisempaa tietoa pyritään yhdistämään tähän tutkimukseen vertaamalla mitattuja tuloksia aiempien tutkimusten tuloksiin.

Jäännösjännitysten syntyminen hitsatussa alumiinirakenteessa riippuu mahdollisesti useasta muuttujasta mukaan lukien: materiaalin paksuus, hitsausprosessi ja alumiinilaatu. Näiden tekijöiden vaikutus ei ole yksiselitteisesti selvillä. Muuttujia on useita, mahdollisesti myös tuntemattomia. Mittaustuloksiin voi muodostua virhettä monesta eri tekijästä, jotka on pyrittävä tunnistamaan.

### 1.3 Työn tavoitteet, tutkimusmetodit ja rajaukset

Työn tavoitteena on kerätä dataa jäännösjännityksistä hitsatuissa alumiinirakenteessa, ja tämän datan perusteella analysoida jäännösjännityksiin vaikuttavia tekijöitä. Tavoite saavutetaan vastaamalla tutkimuskysymyksiin: Minkälaisia jäännösjännitystiloja hitsattuun alumiinirakenteeseen muodostuu? Miten liitostyypit, alumiiniseokset tai levynpaksuudet vaikuttavat jäännösjännitysten muodostumiseen?

Työssä tehtävät mittaukset toteutetaan LUT-teräsrakenteiden laboratoriossa laboratoriohenkilökunnan toimesta röntgendiffraktiomittauslaitteella. Mittausdatasta poistetaan selvästi virheelliset mittaukset ja piirretään kuvaajat tuloksista. Kuvaajia verrataan toisiinsa, jolloin voidaan mahdollisesti löytää merkityksellisiä ilmiöitä.

Tässä työssä tutkitaan hitsausprosessien aiheuttamia jäännösjännityksiä, joten muilla keinoin muodostuvien jäännösjännitysten muodostumista testikappaleisiin pyritään välttämään. Koekappaleissa kuitenkin on jo valmiiksi jäännösjännitystila alumiinin valmistusprosessista, joka on otettava huomioon mittaustuloksissa.

### 1.4 Tieteellinen anti

Tämän kandidaatin työn tavoitteena on luoda ymmärrystä jäännösjännitystiloista alumiinin hitsatuissa liitoksissa. Jäännösjännitykset aiheuttavat muodonmuutoksia rakenteessa, tutkimuksista saatuja tuloksia voidaan mahdollisesti hyödyntää näiden muodonmuutosten ennakoimisessa ja ennaltaehkäisemissä (Rossini ym. 2012, s. 572).

Työn tulokset antavat lisää varmuutta rakenteiden mitoittamiseen, jolloin rakenteita ei tarvitse ylimitoitaa kestävyuden varmistamiseksi. Optimoidussa rakenteessa materiaalia käytetään vähemmän, mistä seuraa teknisiä, taloudellisia ja ympäristöllisiä hyötyjä. Kevyestä ja tehokkaasta rakenteesta on hyötyjä rakenteen valmistuksessa, asennuksessa ja muissa käsittelyä vaativissa toimenpiteissä. Kevyempi rakenne aiheuttaa myös taloudellisia hyötyjä, kuten pienentyneet asennuskustannukset. Pienentynyt materiaalin käyttö myös suoraan pienentää raaka-ainekustannuksia ja tuotteen negatiivisia ympäristövaikutuksia.

Jäännösjännitykset vaikuttavat erityisesti rakenteen väsymiskestävyuteen, joten mittauksista saatua dataa voidaan käyttää arvioimaan aikaisempaa tarkemmin hitsatun alumiinirakenteen

kestävyyttä väsyttävässä kuormituksessa (Webster & Ezeilo 2001 s. 375). Lisäksi työllä on merkitystä myös akateemisesti, koska tuloksia voidaan mahdollisesti hyödyntää jatkotutkimuksissa liittyen alumiinirakenteiden jäännösjännityksiin ja uusien väsymislaskentamallien kehitykseen.

Työn ensimmäisessä osassa käsitellään jäännösjännityksiä, niiden muodostumista, vaikutuksia ja mittaamista. Työn toisessa osassa esitellään käytetyt tutkimusmenetelmät: kirjallisuuskatsaus ja mittausjärjestelyt. Tulokset osiossa esitellään mittausten tulokset, ja pohdinta osiossa näitä analysoidaan, verrataan aikaisempiin tutkimuksiin ja tehdään johtopäätöksiä.

## 2 Jäännösjännitykset

Jäännösjännitykset ovat sisäisiä jännityksiä, jotka eivät aiheudu ulkoisesta kuormituksesta, joten ne ovat koko kappaleen tasolla tasapainossa. Suuressa osassa valmistetuissa rakenteissa ja osissa esiintyy jossain määrin jäännösjännityksiä. (Rossini ym. 2012, s. 572–573) Tässä osiossa tehdään kirjallisuuskatsaus jäännösjännityksien muodostumiseen, vaikutuksiin ja mittaamiseen.

### 2.1 Jäännösjännitysten muodostuminen ja vaikutukset

Jäännösjännityksiä rakenteisiin muodostuu valmistusmenetelmistä, jotka aiheuttavat materiaalissa muodonmuutoksia tai lämpötilan vaihtelua. Jäännösjännitysten syntyperät jaotellaan kolmeen kategoriaan: plastinen muodonmuutos, jäähtymisnopeuden vaihtelu materiaalissa ja faasimuutokset. (Rossini ym. 2012, s. 573)

Materiaalin hyvä lämmönjohtokyky vähentää muodostuvien jännitysten määrää, koska materiaali lämpenee ja jäähtyy tasaisemmin. Jos materiaalilla on korkea myötölujuus, on myös siihen muodostuvat jäännösjännitykset suurempia. (Totten ym. 2002, s. 3) Hitsauksessa jäännösjännityksiä syntyy huomattavia määriä johtuen suurista lämpötilaeroista, kun metalli viilenee sulasta kiinteäksi. Viilentyessä metalli kutistuu ja aiheuttaa jännityksiä. Hitsatessa jäännösjännityksiä muodostuu kaikilla kolmella

syntymenetelmällä, millä kaikilla on omat vaikutuksensa jännityksiin. Tästä syystä hitsatun rakenteen jäännösjännitystilat voivat olla monimutkaisia. (Rossini ym. 2012, s. 573)

Hitsin rajaviiva on hyvin otollinen paikka väsymissärön syntymiselle, siksi aivan materiaalin pinnassa olevilla jäännösjännityksillä on suuri vaikutus. Materiaalin pinnassa oleva vetojännitys huonontaa kappaleen väsymiskestävyyttä, kun taas puristava jännitys parantaa sitä. (Webster & Ezeilo 2001, s. 375) Jäännösjännitykset aiheuttavat materiaaliin muodonmuutoksia, mikä voi vaikuttaa osan käytettävyyteen.

## 2.2 Jäännösjännitysten mittaaminen

Jäännösjännityksiä halutaan mitata esimerkiksi laaduntarkkailussa ja tutkimuksissa. Nämä menetelmät jaetaan yleensä ainetta rikkoviin ja rikkomattomiin menetelmiin. Ainetta rikkovat menetelmät voidaan halutessaan vielä jakaa rikkoviin ja puolirikkoviin menetelmiin. (Rossini ym. 2012, s. 573)

Mekaaniset menetelmät eli ainetta rikkovat menetelmät perustuvat materiaalin poistamiseen kontrolloidusti, jolloin vapautuvat jäännösjännitykset voidaan mitata muodonmuutoksista. Joitain ainetta rikkovia menetelmiä kuten reiänporaustekniikkaa voidaan käyttää käyttöön tulevilla osilla, menetelmän vähäisten vaurioiden takia. Useimmiten rikkovia menetelmiä käytetään kuitenkin vain koekappaleille mittausten aiheuttamien vaurioiden takia. (Rossini ym. 2012, s. 574–575)

Yleisimmät ainetta rikkomattomat menetelmät ovat röntgen- ja neutronidiffraktio, ultraäänimenetelmät ja magneettiset menetelmät. Nämä menetelmät perustuvat siihen, että niillä mitataan jotain tiettyä parametria, mikä on verrannollinen jännitykseen. Ainetta rikkomattomat menetelmät ovat erityisen hyviä valmiiden rakenteiden laaduntarkkailuun, koska rakenteelle ei tarvitse erityisemmin tehdä valmisteluita tai muutoksia mittauksen mahdollistamiseksi. (Rossini ym. 2012, s. 573–574)

### 2.2.1 Röntgendiffraktio

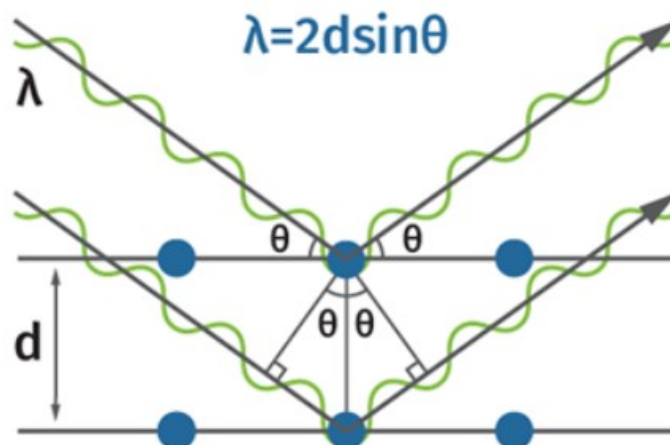
Tässä tutkimuksessa jäännösjännitysten mittaamiseen käytettiin röntgendiffraktiota. Röntgendiffraktiolla voidaan mitata tarkasti jäännösjännityksiä osan pinnassa.

Röntgendiffraktion toiminta perustuu materiaalin elastisen venymän mittaamiseen, materiaalin hilarakenteesta. Kun tiedetään materiaalin atomitasojen etäisyys sen jännittämättömässä tilassa ja materiaalin elastiset ominaisuudet, saadaan jännitys laskettua. (Rossini ym. 2012, s. 579–580)

Röntgendiffraktio laite mittaa hilatasojen etäisyydet Braggin lain mukaisesti:

$$\lambda = 2 d \sin \theta \quad (1)$$

Yhtälössä 1  $\lambda$  on tunnettu röntgensäteiden aallonpituus,  $d$  on hilatasojen välinen etäisyys ja  $\theta$  on diffraktiokulma, jotka ovat esitettynä kuvassa 1. Jännitys voidaan laskea Hooken lain avulla, Kun hilatasojen etäisyys tunnetaan. (Stresstech 2024)



Kuva 1. Braggin laki (stresstech 2024)

Röntgendiffraktion suurimpia heikkouksia ovat mittaus syvyys, joka on joitain kymmeniä mikrometrejä materiaalin pinnasta, ja menetelmän hitaus, kun tehdään perusteellisia mittauksia (Farajian ym. 2011, s. 997; Stresstech 2024). Alhaisen mittaussyvyyden takia pinnanlaadulla on suuri vaikutus mittaustuloksiin (Wang, Q. ym. 2021, s. 797).

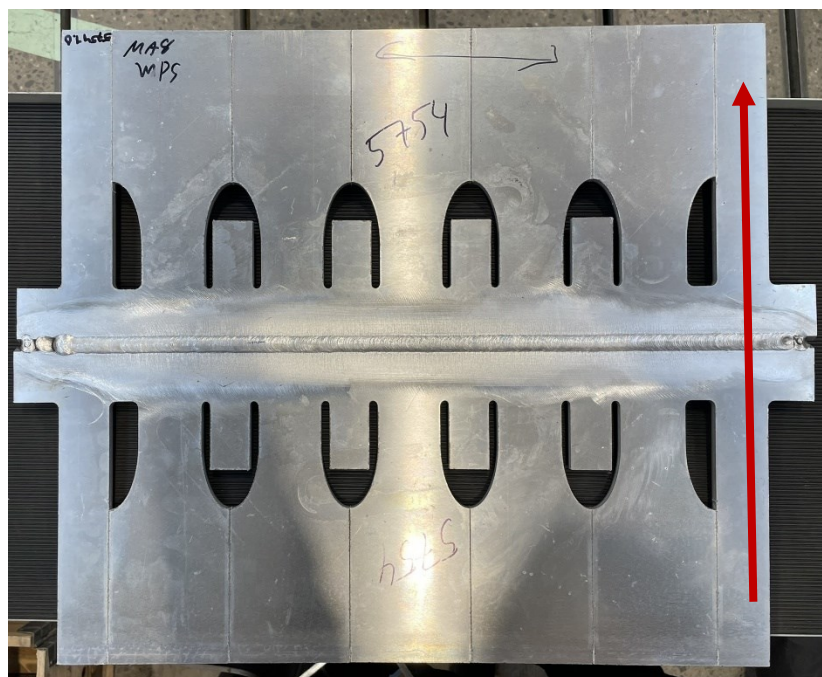
### 3 Tutkimusmenetelmät jäännösjännitysten selvittämiseksi

Tässä kappaleessa käydään läpi tutkimuksessa käytettävät tutkimusmenetelmät. Tutkimuksessa menetelminä käytetään laboratoriomittauksia ja kirjallisuuskatsausta, joiden tuloksia

vertaillaan toisiinsa. Tässä osiossa kerrotaan kaikki tarpeellinen tieto tutkimuksen toistamista varten, kuten koekappaleiden ominaisuudet, valmistus ja käytetty laitteisto.

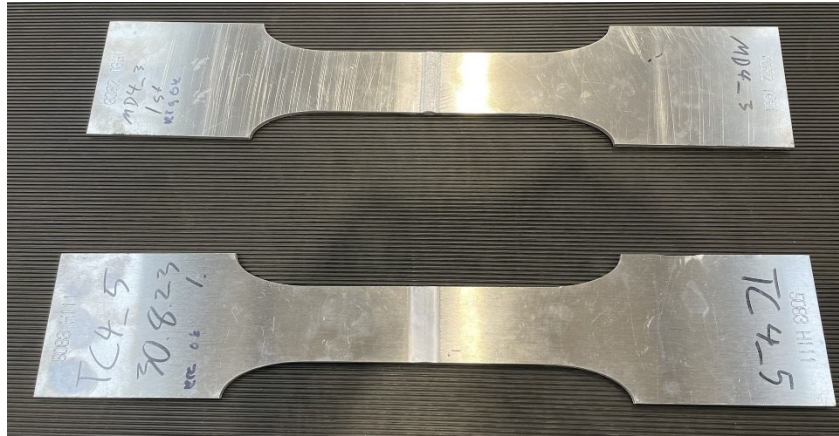
### 3.1 Koekappaleet

Koekappaleet valmistettiin hitsaamalla kaksi identtistä levyaihiota yhteen kuvan 2. mukaisesti. Levyn valssaussuunta on koekappaleiden pituussuunnassa kuvan 2. mukaisesti.

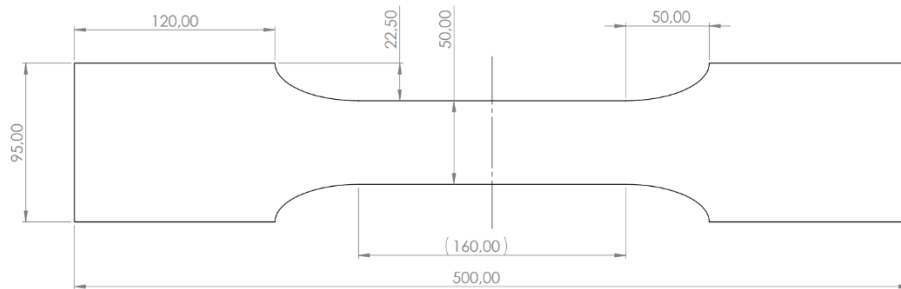


Kuva 2. MIG-hitsatut 8 mm paksuiset koesauvat ennen leikkausta. Valssaussuunta merkattuna punaisella nuolella

Valmistusmenetelmän tavoitteena oli valmistaa tehokkaasti useita tasalaatuisia koesauvoja. Sauvat leikattiin ahiosta kulmahiomakoneella, minkä jälkeen ne viimeisteltiin koneistamalla. Kuvassa 3. nähdään valmis koekappale. Koekappaleen mitat ovat esitettyinä kuvassa 4. Koekappaleita oli ainepaksuuksilla 4 mm ja 8 mm, muuten koekappaleiden mitat ovat samat.



Kuva 3. Kaksi valmista 4 mm paksuista koekappaleita. Kuvassa ylempänä MIG-hitsattu ja alempana TIG-hitsattu kappale, kuvattuna hitsin kuvun puolelta.



Kuva 4. Koekappaleen mittakuva.

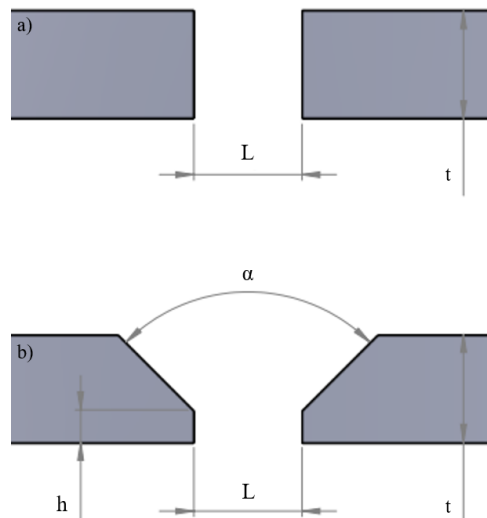
Koekappaleet nimetään tyylillä XXX\_X missä ensimmäinen kirjain kertoo käytetyn hitsausprosessin, M = MIG ja T = TIG. Toinen kirjain kertoo alumiinilaadun, toimitustilan ja käytetyn lisäaineen taulukon 1. mukaisesti. Kolmas kirjain on numero mikä kertoo ainepaksuuden millimetreissä ja alaviivan jälkeinen numero on juokseva numerointi kappaleille.

Taulukko 1. Koekappaleiden nimen materiaalikirjainten merkitykset

Materiaalin kirjain	Seos	Toimitustila	Täyteaine
A	5754	H111	ER5356
B	5754	H22	ER5357
C	5083	H111	ER5358
D	6082	T651	ER4043
E	6082	T652	ER5360

### 3.1.1 Hitsausparametrit

Koekappaleiden kaikki liitosten valmisteluun ja hitsaukseen liittyvät tiedot löytyvät taulukoista 2. ja 3. ja liitoksissa käytettyjen urien mallit löytyvät kuvasta 5.



Kuva 5. Hitsausurien mallit a) I-railo b) V-railo. Mitat löytyvät taulukosta 2.

taulukko 2. Koekappaleiden materiaalit ja liitoksen valmistelun tiedot. t: levynpaksuus, L: ilmarako,  $\alpha$ : viisteen kulma, h: juuren korkeus.

Kappale	materiaali	lisäaine	liitostyyppi	t [mm]	L [mm]	$\alpha$ [°]	h [mm]
TA4	5754 H111	ER5356	I-railo	4	0	–	–
TB4	5754 H22	ER5356	I-railo	4	0	–	–
TC4	5083 H111	ER5356	I- railo	4	0	–	–
TD4	6082 T651	ER4043	I- railo	4	0	–	–
TE4	6082 T651	ER5356	I- railo	4	0	–	–
MA4	5754 H111	ER5356	I- railo	4	2,2	–	–
MB4	5754 H22	ER5356	I- railo	4	2,2	–	–
MC4	5083 H111	ER5356	I- railo	4	2,2	–	–
MD4	6082 T651	ER4043	I- railo	4	2,2	–	–
ME4	6082 T651	ER5356	I- railo	4	2,2	–	–
MA8	5754 H111	ER5356	V- railo	8	2,6	60	1
MB8	5754 H22	ER5356	V- railo	8	2,6	60	1

Taulukko 3. Hitsausparametrit.  $I$ : hitsausvirran keskiarvo,  $U$ : hitsausjännite,  $v$ : hitsausnopeus,  $D$ : lisäainelangan paksuus,  $w$ : lisäainelangan syöttönopeus,  $H$ : vapaalanganpituus.

Kappale	hitsaus prosessi	suoja kaasu	$I$ [A]	$U$ [V]	$v$ [mm/s]	$D$ [mm]	$w$ [m/min]	$H$ [mm]
TA4	TIG	Ar 100%	275	22,8	6,3	1,2	4	16
TB4	TIG	Ar 100%	275	23,3	6,3	1,2	4	16
TC4	TIG	Ar 100%	275	23,8	6,3	1,2	4	16
TD4	TIG	Ar 100%	275	23,5	6,3	1,2	4	16
TE4	TIG	Ar 100%	275	23,5	6,3	1,2	4	16
MA4	MIG	Ar 100%	150	18,5	10	1,2	9,5	16
MB4	MIG	Ar 100%	150	18,5	10	1,2	9,5	16
MC4	MIG	Ar 100%	153	15,5	10	1,2	9,5	16
MD4	MIG	Ar 100%	171	21	10	1,2	8,3	16
ME4	MIG	Ar 100%	145	18,2	10	1,2	9,8	16
MA8	MIG	Ar 100%	199 188	20,3 20,3	9 6	1,2	12	16
MC8	MIG	Ar 100%	195 194	20,2 20,3	9 6	1,2	12	16

TIG-hitsatuille kappaleille oli käytetty prosessina DC+ ja MIG-hitsatuille tupla pulssi prosessia. Käytetyssä tuplapulssi hitsaus prosessissa virta ja langansyöttönopeus vaihteli 4,2 Hz taajuudella.

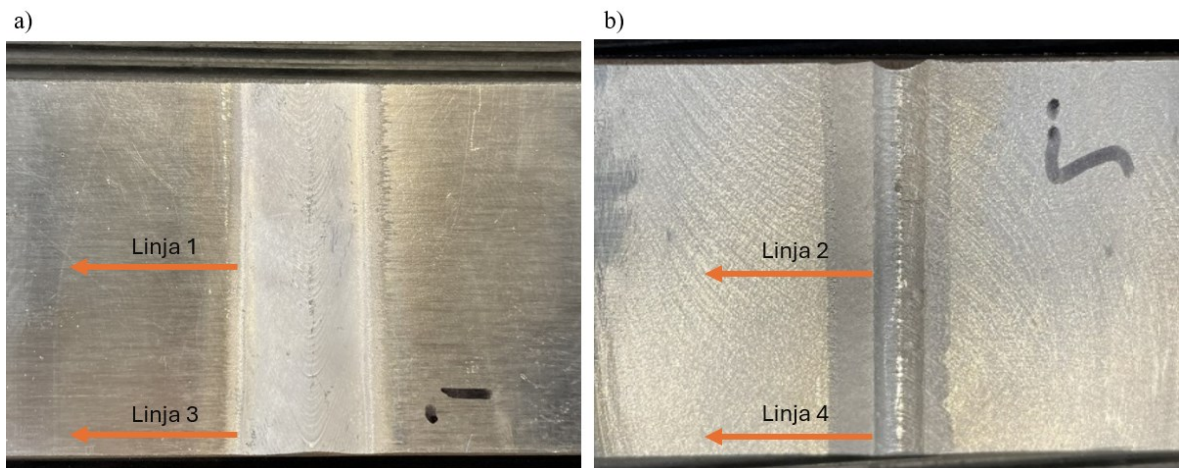
### 3.2 Mittauslaitteisto ja mittausparametrit

Mittauslaitteena käytettiin Stresstech XSTRESS 3000 G3 röntgendiffraktio laitetta. Kuvassa 6. on mittauksissa käytetty laite mittauksen aikana.



Kuva 6. Röntgendiffraktio laitteella mitataan 8 mm paksuista MIG-hitsattua koekappaletta.

Mittauksia otettiin koekappaleista useammasta kohtaa molemmin puolin, mittauslinjat ja niiden numerointi näkyy kuvassa 7.



Kuva 7. a) Mittauslinjat hitsin puolelta ja b) mittauslinjat hitsin juuren puolelta. Kuvat TIG-hitsatusta koekappaleesta.

Mittauksia otettiin hitsin reunaviivasta lähtien 5 mm matkalta. Ensimmäisissä mittauksissa mittauspisteet olivat koko matkan 0,5 mm välein. Lopuissa mittauksista mittauspisteet olivat 0,5 mm välillä 2 mm asti, jonka jälkeen pisteet olivat 1 mm välein 5 mm saakka.

### 3.3 Kirjallisuuskatsaus

Hitsattujen alumiini rakenteiden jäännösjännityksistä pyrittiin löytämään mittausdataa kirjallisuudesta, johon tässä työssä tehtäviä mittauksia voitaisiin verrata. Jotta tuloksia voitaisiin tarkoituksenmukaisesti verrata, täytyisi vähintään mittausmetodien ja koekappaleiden oltava hyvin samanlaiset. Tutkimusta aiheesta on kuitenkin niukasti, jolloin hyvin verrattavia lähteitä ei mahdollisesti löydy.

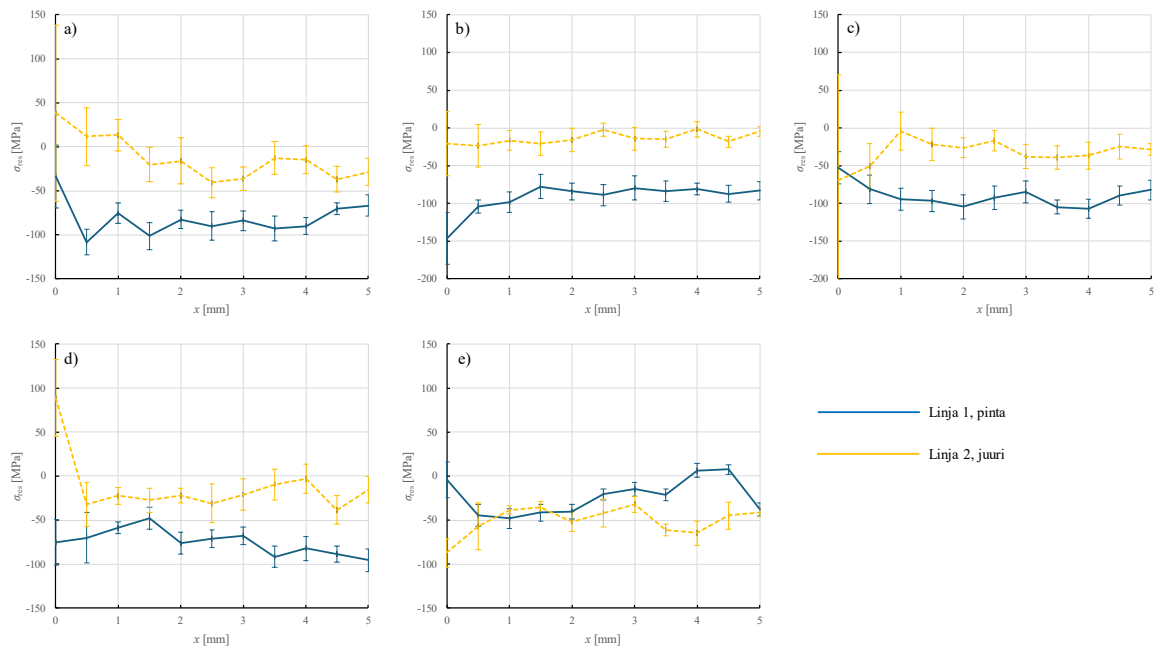
Reliabiliteetin ja validiteetin varmistamiseksi kirjallisuudesta pyritään valitsemaan alle 10 vuotta vanhoja vertaisarvioituja tieteellisiä lähteitä hitsattujen rakenteiden jäännösjännityksistä. Ensisijaisesti etsitään lähteitä, jotka käsittelevät alumiinia ja mahdollisimman lähelle samoja alumiinilaatuja, mutta tuloksia voidaan myös tarpeen vaatiessa verrata vastaaviin tutkimuksiin teräksestä.

## 4 Tulokset

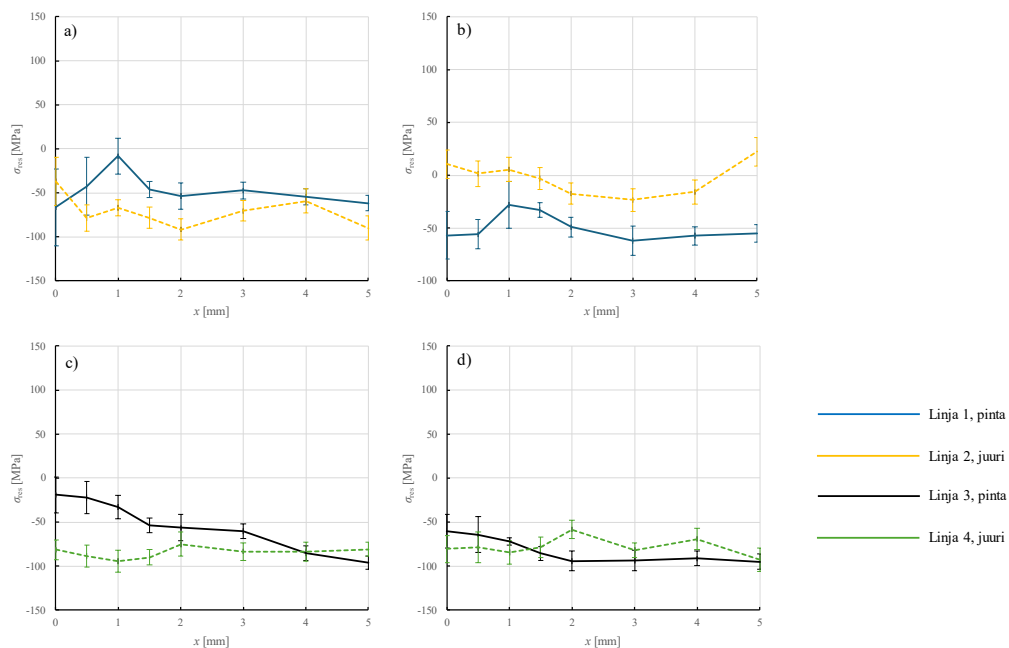
Tässä kappaleessa esitellään mittausten tulokset kaaviomuodossa ja käydään läpi kirjallisuudesta löydetty havainnot. Joitain koekappaleita mitattiin useamman kerran kuin toisia, mutta tässä osiossa on esitetty vain yhden mittaustulokset per koekappale tulosten selkeyttämiseksi. Kaikki numeeriset mittaustulokset ja niiden hajonnat löytyvät liitteistä 1 ja 2.

### 4.1 Mittaustulokset

Kuvassa 8. ja 9. on esitetty jäännösjännitysmittausten tulokset MIG-hitsatuissa koekappaleissa. Kuvassa 8. on 4 mm koekappaleet ja kuvassa 9. on 8 mm koekappaleet. Kuvan 8. Jokaisessa kaaviossa on esitetty koekappaleen mittaustulokset pinnan ja juuren puolelta, linjoilta 1 ja 2. Kaavioissa on myös esitetty hajonnat kaikissa mittauspisteissä hajontaviivoin. Kuvan 9. Kaavioissa a ja b on esitetty koekappaleiden mittaustulokset pinnan ja juuren puolelta, linjoilta 1 ja 2. Kaavioissa c ja d on esitetty koekappaleiden mittaustulokset pinnan ja juuren puolelta, linjoilta 3 ja 4. Kaavioissa on myös esitetty hajonnat kaikissa mittauspisteissä hajontaviivoin.



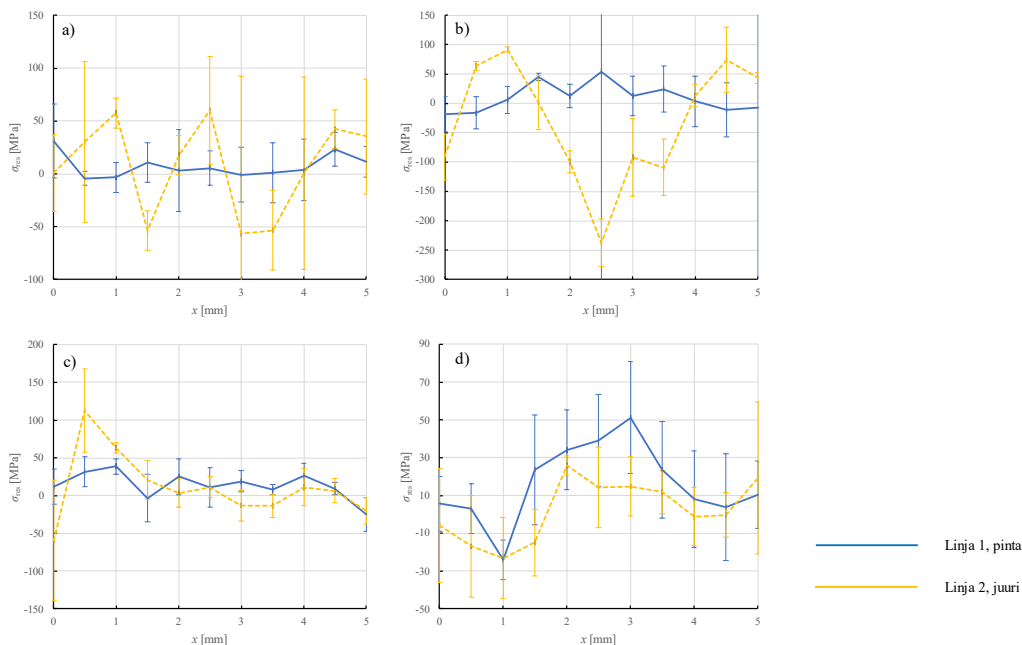
Kuva 8. MIG-hitsattujen koekappaleiden mittaustulokset. Jännösjännitys  $\sigma_{res}$  poikittain hitsin suunnassa suhteessa etäisyyteen  $x$  hitsin rajaviivasta. a) Koekappale MA4, b) Koekappale MB4, c) Koekappale MC4, d) Koekappale MD4, e) Koekappale ME4.



Kuva 9. MIG-hitsattujen koekappaleiden mittaustulokset.  $\sigma_{res}$  poikittain hitsin suunnassa suhteessa etäisyyteen  $x$  hitsin rajaviivasta. a) Koekappale MA8, b) Koekappale MB8, c) Koekappale MA8, d) Koekappale MB8.

MIG-hitsattujen koekappaleiden mitatut jäännösjännitykset sijoittuvat välille -140–100 MPa. Suurin osa mitatuista jännityksistä on kuitenkin negatiivista eli puristusta, jotka sijoittuvat suurimmilta osin välille -100–0 MPa. Juuren puolelta mitatut jännitykset ovat hieman pienempiä.

Kuvassa 10. on esitetty Jäännösjännitysmittausten tulokset TIG-hitsatuissa koekappaleissa. Kuvan 10. Jokaisessa kaaviossa on esitetty koekappaleen mittaustulokset pinnan ja juuren puolelta, linjoilta 1 ja 2. Kaavioissa on myös esitetty hajonnat kaikissa mittauspisteissä hajontaviivoin. Osa hajontaviivoista ei mahdu kaavioihin, nämä hajonnat löytyvät liitteestä 2.



Kuva 10. TIG-hitsattujen koekappaleiden mittaustulokset. Jäännösjännitys  $\sigma_{res}$  poikittain hitsin suunnassa suhteessa etäisyyteen  $x$  hitsin rajaviivasta. a) koekappale TA4, b) koekappale TB4, c) koekappale TC4, d) koekappale TD4.

TIG-hitsattujen koekappaleiden tulokset vaihtelevat välillä -250–150 MPa. Kuten MIG-hitsatuissa koekappaleissa näissäkin on havaittavissa suurta hajontaa, mutta vaihteluväli on suurempi kuin MIG-hitsatuissa kappaleissa. Suurimmilta osin mittaukset sijoittuvat välille -100–100 MPa, Mittausten vaihteluväli on karkeasti kaksinkertainen verrattuna MIG-hitsattuihin koekappaleisiin.

## 4.2 Kirjallisuuskatsauksen tulokset

Kirjallisuudesta tuloksia löytyi neljästä eri lähteestä. Näiden lähteiden tulokset ovat esitetty pääpiirteittäin taulukossa 4. Jokaisen tutkimuksen tuloksista kerrotaan tarkemmin taulukon jälkeen.

Taulukko 4. kirjallisuuskatsauksen tulokset

<b>lähde</b>	<b>hitsausprosessi</b>	<b>materiaali</b>	<b>ainepaksuus [mm]</b>	<b>mittaussyvyys [mm]</b>	<b>Mitatut arvot [MPa]</b>
Zhang ym. (2023, s. 10)	TIG	2219	1	0,1	15
Webster ym. (2002, s. 1422)	TIG	2024	3	1,5	-50-0
James ym. (2009, s. 34)	MIG	5083-H321	8	1	0-50
Owen ym. (2003, s. 164)	TIG	2024	3,2	1,6	0-40

Zhang ym. (2023, s. 10) olivat mitanneet TIG-prosessilla päittäishitsatun 1 mm ainepaksuisen 2219 alumiinilevyn jäännösjännityksiä. Mittaukset oli tehty 0,1 mm syvyydestä röntgendiffraktiolla 25 mm välein. Mittauksista saadut tulokset osoittivat hitsin rajaviivan läheisyydessä puristavaa jännitystä noin 15 MPa verran.

Webster ym. (2002, s. 1422) Olivat mitanneet TIG-prosessilla levyn päälle hitsatun palkohitsin jäännösjännityksiä. He olivat käyttäneet kokeessaan 3 mm paksuista 2024 sarjan alumiinilevyä. Jäännösjännityksiä oli mitattu neutroni diffraktiolla 1,5 mm syvyydestä ja 2 mm välillä hitsin läheisyydessä. Webster ym. (2002, s. 1422) tutkimuksessa hitsin rajaviivan läheisyydestä oli mitattu jäännösjännityksiä välillä -50-0 MPa. Jäännösjännitykset olivat rajaviivan läheisyydessä puristavia, ja liikuttaessa rajaviivalta pois päin jännitykset muuttuvat vedoksi.

James ym. (2009, s. 34) mittasivat MIG-hitsatun 5083-H321 8 mm paksuisen levyn jäännösjännityksiä. Levy oli päittäishitsattu kahdella palolla v-railoon. Mittaukset oli tehty röntgendiffraktiolla 1 mm syvyydestä kummaltakin puolelta levyä 1 mm mittausväleillä. Heidän tutkimuksessa hitsin rajaviivan läheisyydessä mittaustulokset vaihtelivat välillä 0-50 MPa vetoa. Juuripuolen tulokset ovat samankaltaiset, mutta rajaviivan läheisyydessä samoilla mittapisteillä hieman korkeammat.

Owen ym. (2003, s. 164) Tutkivat TIG-hitsatun 3,2 mm paksuisen 2024 alumiinilevyn jäännösjännityksiä. Tutkimus tehtiin päällehitsauksena levyn pinnalle. Jäännösjännitykset mitattiin neutroni diffraktiolla levyn keskeltä, 1,6 mm syvyydestä. Jäännösjännitykset hitsin rajaviivan läheisyydessä olivat noin 0–40 MPa vetoa.

## 5 Pohdinta

Tässä osassa tarkastellaan työn tuloksia luotettavuuden näkökulmasta ja vertaillaan mitattuja tuloksia kirjallisuuteen. Lopuksi tehdään johtopäätökset työn tuloksista, eli pyritään löytämään ilmiöitä ja pohditaan näiden mahdollisia syitä, yleistettävyyttä ja mahdollisten jatkotutkimusten tarvetta.

### 5.1 Mittaustulosten vertailu aiempiin tutkimuksiin

Kirjallisuudesta tähän työhön verrattavia mittaustuloksia löytyi niukasti. Verrattavia tai sovellettavia tuloksia löytyi kuitenkin neljästä tutkimuksesta. Näiden tutkimusten tulokset ovat kuitenkin hieman karkeita verrattuna tähän tutkimukseen, johtuen mittauskohdista ja mittauspisteiden väleistä. Ainoastaan yhdessä tutkimuksessa on mitattu jäännösjännityksiä 0,5 mm välein kuten tässä tutkimuksessa, muissa mittaussvälit ovat muutamasta millistä kymmeneen millieihin. Myös materiaalit, levynpaksuudet, hitsausparametrit, mittaustilasto ja mittaussyvyudet olivat lähes jokaisessa tutkimuksessa erilaiset. Kirjallisuudessa suurin osa lähteistä käsitteli 2XXX-sarjan alumiineja, joita käytetään lento ja avaruusteollisuudessa (Zhang ym. 2023, s. 1).

Kirjallisuudesta löytyneistä tutkimuksista James ym. (2009 s. 34) oli ainut missä oli käytetty jotain samaa alumiinilaatua kuin tässä tutkimuksessa. Kyseessä on 5083 alumiini, joka on sama kuin tämän tutkimuksen C kirjaimella merkityissä kappaleissa, mutta toimitustilat eivät täsmää näissäkään. Mittaustulokset ovat kuitenkin hyvin erilaiset tämän tutkimuksen saman materiaalin MIG-hitsattuihin koekappaleisiin verrattuna. James ym. (2009 s. 34) tutkimuksessa jäännösjännitykset olivat vetoa välillä 0–50 MPa kun taas tämän tutkimuksen mittauksissa puristavia välillä -100–0 MPa. erot mittauksissa todennäköisesti johtuvat erilaisesta mittaussyvyydestä, levynpaksuudesta ja hitsausprosessin eroista.

Kun suuren hajonnan tuloksia ei oteta huomioon, tässä tutkimuksessa TIG-hitsattujen koekappaleiden jäännösjännitykset hitsin rajaviivan läheisyydessä olivat enimmäkseen vetoa ja sijoituivat vaihteluvälille -20–60 MPa. Samankaltaisia tuloksia TIG-hitsatuista kappaleista olivat saaneet Zhang ym. (2023, s. 10) ja Owen ym. (2003, s. 164). Näiden molempien tutkimusten mittaustulokset sattuvat tämän tutkimuksen mittausten vaihteluvälille. Näistä tutkimuksista Zhang ym. (2023, s. 10) tulokset ovat hyviä verrata tähän työhön, koska mittaussyvyys on hyvin samanlainen, eroja koejärjestelyissä on kuitenkin paljon, joten tulosten samankaltaisuus voi olla myös sattumaa. Owen ym. (2003, s. 164) olivat saaneet samanlaisia tuloksia, vaikka mittaukset oli tehty levynpaksuuden puolivälissä. Voisi olettaa, että levynpaksuuden puolivälissä mittaustulokset olisivat huomattavasti erilaisia, mutta tätä voi selittää se, että Owenin ym. (2003, s. 164) tutkimuksessa hitsi oli tehty päällehitsauksena levyn pinnalle.

Websterin ym. (2002, s. 1422) tutkimus on siitä mielenkiintoinen, että siinä on hyvin paljon samankaltaisuuksia Owenin ym. (2003, s. 164) tutkimuksen kanssa, mutta mittaustulokset ovat täysin erilaiset. Owenin ym. (2003, s. 164) mittausten mukaan jäännösjännitystila oli vetoa, kun taas Websterin ym. (2002, s. 1422) hyvin vastaavassa tutkimuksessa jäännösjännitykset olivat puristavia.

Kirjallisuuskatsauksen tulokset eivät olleet parhaita mahdollisia edellä mainittujen syiden takia. Kuitenkin kirjallisuuden tulokset jossain määrin vahvistavat tässä työssä mitattuja tuloksia ja todistavat sen, että tälle tutkimukselle on tarvetta, kun kirjallisuudesta mittaustuloksia löytyy niin niukasti, ja joitain ristiriitojakin löytyy.

## 5.2 Mittausten luotettavuus ja virhetarkastelu

Jäännösjännitysmittaukset Röntgendiffraktiolla ei ole absoluuttisen tarkka prosessi monen muuttujan takia. Siksi onkin tärkeää, että mittauksia suoritetaan tarpeeksi monta, jotta saadaan varmuutta niihin. Tähän työhön mittausten määrä jäi vähäiseksi. Mittausten pienen määrän takia tässä työssä mitattujen eri koekappaleiden välisiä eroja on huono vertailla mittausten epätarkkuuden takia. Mittauksia voidaan kuitenkin käyttää päätelmien tekemiseen yleisesti alumiinin jäännösjännityksistä tai vertailemaan MIG- ja TIG-prosessien eroja, näihin mittausten määrä on riittävä. Yksittäisistä mittauksista voi myös nähdä hyvällä varmuudella trendejä, miten jännitykset muuttuvat mitattavalla alueella.

Mittausten luotettavuutta kuitenkin parantaa röntgendiffraktiolaitteen antama hajonta, tätä hajontaa käyttämällä voidaan poistaa huonoimpia mittapisteitä tuloksista, jolloin voidaan mahdollisesti arvioida esimerkiksi yksittäisten materiaaliarvojen vaikutusta tuloksiin. Nämä ovat kuitenkin vain arvioita ja kaikki näin tehdyt johtopäätökset vaativat lisätutkimuksia niiden varmistamiseksi.

### 5.3 Johtopäätökset

Tässä osiossa esitetyissä mittaustuloksista on poistettu arvot, joiden hajonta yli  $\pm 30$  MPa ja yhdistetty samaan kaavioon mittauksia, joiden avulla voidaan tehdä mahdollisia johtopäätöksiä. Tarkoituksena on saada tuloksia, josta voi helposti nähdä esimerkiksi jonkin tietyn materiaaliominaisuuden tai prosessin vaikutuksen tuloksiin.

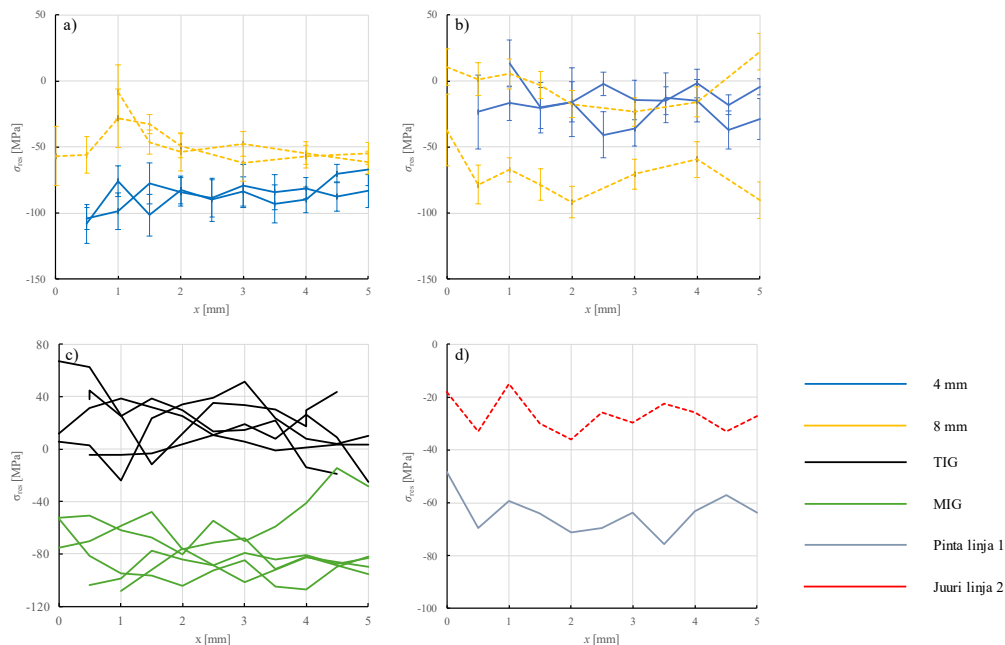
Kuvassa 11 a) nähdään neljän koekappaleen jäännösjännitys jakaumat, kuvasta voidaan nähdä että 4 mm koekappaleiden jäännösjännitykset mitta-alueella ovat suurusluokkaa noin -100-(-70) MPa ja 8 mm koekappaleiden noin -60-(-30) MPa. Koska ainepaksuus on koekappaleiden välillä ainut ero, voidaan todeta, että jäännösjännitysten ero johtuu koekappaleiden ainepaksuudesta. Suurempi ainepaksuus vaikuttaisi pienentävän jäännösjännitystilaa kappaleen pinnassa. Kuvasta 11 b) nähdään, että samaa ilmiötä ei voida näillä mittauksilla todeta kappaleiden juuripuolella.

Ainepaksuuden vaikutus voi johtua esimerkiksi siitä, että lämpötilan muutokset eivät ole paksummassa materiaalissa yhtä äkillisiä, johtuen paremmasta lämmön jakautumisesta. Toinen syy voisi olla jäännösjännitysten tasaisempi jakautumisesta materiaalin poikkipinnan läpi. Kolmas mahdollinen syy on hitsien erot: 8 mm kappaleet hitsattiin kahdella palolla v-uraan, kun 4 mm kappaleet hitsattiin yhdellä palolla I-uraan. Se että ilmiö ei ole nähtävissä juuripuolella voisi viitata siihen, että kyse on hitsauspalkojen määrästä. Todellisen syyn selvittäminen vaatisi jatkotutkimuksia, sekä lisää koekappaleita ja mittausdataa. Mahdollisia jatkotutkimuskohteita olisi jäännösjännitysmittaukset kappaleen koko poikki pinta-alalta ja mahdollisesti lämpötilamittauksia hitsauksen aikana, jotta nähtäisiin lämpötilaerot kappaleiden välillä. Jännitysten mittaaminen koko poikkipinta-alalta vaatisi eri mittausmenetelmää, kuten neutronidiffraktiota tai jotain rikkovaa menetelmää.

Kuvassa 11. c) vertaillaan jäännösjännityksiä hitsausprosessin mukaan ja näiden mittausten perusteella voisi sanoa, että hitsausprosessilla on selvä ero. Kuvassa on vertailtu vain linjan 1 mittauksia johtuen TIG-hitsattujen kappaleiden juuripuolen mittausten suurista hajonnoista. Kuvasta 11. c) nähdään että jäännösjännitykset TIG-hitsatuissa kappaleissa on itseisarvoltaan pienempiä ja suurimmaksi osaksi vedon puolella, kun taas MIG-hitsatuissa kappaleissa jännitykset ovat selvästi puristusta.

Hitsausprosessin aiheuttama ero on mielenkiintoinen, mutta ilmiön syyn selvittäminen vaatisi todennäköisesti syvempää perehtymistä hitsausprosesseihin, joka on tämän työn rajauksen ulkopuolella. Myös juuripuolelta olisi saatava parempia mittauksia, jotta voisi nähdä tapahtuuko ilmiö sielläkin.

Kuvassa 11. d) nähdään MIG-hitsattujen koekappaleiden mittaustulosten keskiarvot. Näistä keskiarvoista voidaan hyvällä varmuudella sanoa, että vastaavissa hitsatuissa alumiinirakenteissa voidaan arvioida olevan puristavia jäännösjännityksiä noin 60 MPa:n verran pinnan puolella ja noin 30 MPa:n verran juuren puolella. Nämä ovat kuitenkin arvioita ja todellisissa jännityksissä hajontaa voi olla runsaastikin.



Kuva 11. a) Koekappaleiden MA4, MB4, MA8 ja MB8 jäännösjännitykset kappaleiden pintapuolella linjalla 1, eriteltynä paksuuden mukaan. b) Koekappaleiden MA4, MB4, MA8 ja MB8 jäännösjännitykset kappaleiden juuripuolella linjalla, eriteltynä paksuuden mukaan. 2. c) Jokaisen koekappaleen parhaat mittaustulokset pintapuolelta linjalta 1, eriteltynä

hitsausprosessin mukaan. d) Jokaisen MIG-hitsatun koekappaleen linjan 1 ja 2 mittausten keskiarvot eriteltyinä linjan mukaan.

Yleisesti ottaen mittaustulokset ovat kohtuullisen hyviä, ja niistä saa arvokasta tietoa hitsattujen alumiinirakenteiden jäännösjännityksistä. Tässä työssä saadut tiedot eivät kuitenkaan ole vielä yleistettävissä vaan tarvitaan vielä hyvin runsaasti jatkotutkimuksia ja mittauksia. Erityisesti mittaustuloksista tehdyt johtopäätökset täytyisi varmistaa lisätutkimuksilla ennen kuin näitä päätelmiä voisi luotettavasti käyttää suunnittelussa.

## 6 Yhteenveto

Tämän kandidaatin työn tarkoituksena oli tutkia jäännösjännityksiä hitsatuissa alumiinirakenteissa, tekemällä mittauksia röntgendiffraktio laitteistolla. Tavoitteena oli selvittää minkälaisia jäännösjännityksiä hitsatessa syntyy, ja miten eri materiaaliparametrit näihin jännityksiin vaikuttavat.

Työssä mitattiin MIG- ja TIG-hitsattuja koekappaleita, joita oli viittä eri alumiiniseosta ja kahta eri ainepaksuutta. Näistä kappaleista mitattiin hitsin rajaviivasta lähtien viiden millin matkalta hitsin poikkisuuntaiset jäännösjännitykset. Mittaussyvyys oli hyvin matala johtuen röntgendiffraktio prosessista.

Mittaustuloksista nähtiin, että hitsatessa muodostuu useanlaisia jäännösjännitystiloja. MIG-hitsattuihin syntyneet jäännösjännitykset olivat enimmäkseen puristavia välillä 20–70 MPa. TIG-hitsatuissa kappaleissa jäännösjännitykset olivat vedolla mutta itseisarvoltaan hieman pienempiä kuin MIG-hitsatuissa kappaleissa.

Mittaustulosten avulla todettiin, että hitsausprosessilla on vaikutusta jännitysten suuruuteen. Tuloksista huomattiin myös suuremman ainepaksuuden pienentävän mitattuja jännityksiä, joskin lisätutkimuksille on tarvetta selvittämään, johtuuko se ainepaksuudesta vai hitsausprosessin eroista. MIG-hitsatuista kappaleista todettiin myös jännitysten olevan pienempiä hitsin juuripuolella verrattuna pinnan puoleen. Nämä johtopäätökset kuitenkin tarvitsevat lisätutkimuksia niiden varmistamiseksi.

## Lähteet

Farajian, M. et al. (2011) Residual stress field determination in welds by means of X-ray, synchrotron and neutron diffraction. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 42 (11), 996–1001.

James, M. N. et al. (2009) Residual stress and strain in MIG butt welds in 5083-H321 aluminium: As-welded and fatigue cycled. *International journal of fatigue*. 31 (1), 28–40.

Owen, R. A. et al. (2003) Neutron and synchrotron measurements of residual strain in TIG welded aluminium alloy 2024. *Materials science & engineering. A, Structural materials : properties, microstructure and processing*. 346 (1), 159–167.

Rossini, N. S. et al. (2012) Methods of measuring residual stresses in components. *Materials in engineering*. 35572–588.

Stresstech, stresstech.com [verkkosivu]. [viitattu 27.3.2024]. saatavissa:

<https://www.stresstech.com/>

Totten, G. E. et al. (2002) *Handbook of residual stress and deformation of steel*. Materials Park, OH: ASM International.

Wang, Q. et al. (2021) Influence of restraint conditions on residual stress and distortion of 2219-T8 aluminum alloy TIG welded joints based on contour method. *Journal of manufacturing processes*. 68796–806.

Webster, G. A. & Ezeilo, A. N. (2001) Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes. *International journal of fatigue*. 23375–383.

Webster, P. J. et al. (2002) Measurement and modelling of residual stresses in a TIG weld. *Applied physics. A, Materials science & processing*. 74s1421–s1423.

Zhang, T. et al. (2023) Study on Residual Stresses of 2219 Aluminum Alloy with TIG Welding and Its Reduction by Shot Peening. *Metals (Basel)*. 13 (9), 1581-.

Liite 1. MIG-hitsattujen koekappaleiden jäännösjännitysmittaukset

LINJA 1		MA4_1		MB4_1		MC4_1		MD4_1		MD4_2		ME4_1		MA8_1		MB8_1	
etäisyys	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	
0	-33,7	35,5	-146,3	34,7	-53	21,2	-75,2	25,6	-52,3	16,9	-4,2	20,3	-66,3	43,7	-56,9	22,5	
0,5	-108,2	14,5	-104	8,5	-81,2	18,7	-70	28,6	-50,7	4,8	-44,6	12,4	-42,6	32,6	-55,9	13,8	
1	-75,6	11,6	-98,5	13,7	-94,7	14,6	-58,6	6,9	-61,8	9,5	-48,1	11,3	-8,3	20,6	-28,1	22	
1,5	-101,4	15,7	-77,5	15,7	-96,7	14,3	-48	12,5	-67,6	12	-41,4	9,5	-46,2	9,2	-32,7	7,1	
2	-82,4	10,6	-84,1	10,8	-104,3	16,2	-76,4	12,5	-80,4	10	-40,1	8,4	-53,6	14,6	-49,1	9,1	
2,5	-89,8	16,4	-88,8	13,9	-92,5	15,4	-71,2	9,9	-54,5	13,6	-20,6	6,1					
3	-83,6	11,2	-79,4	16,4	-84,5	14,7	-67,8	9,8	-70,2	9,3	-14,8	7,8	-47,3	9,4	-62,1	13,9	
3,5	-92,9	14,2	-84,1	13,5	-104,6	9,4	-91,6	12,2	-59,2	7	-21,4	6,9					
4	-89,9	9,6	-81,1	7,9	-107	12,3	-82	13,8	-41,1	6,1	6,3	7,9	-54,5	8,8	-57,2	8,7	
4,5	-70,2	6,9	-87,3	11	-90	12,6	-88,5	9	-14,5	12,8	7,8	5,4					
5	-66,8	12,1	-83,1	12,4	-82,1	13	-95,6	12,7	-28,3	15,7	-38,1	7,4	-61,6	8,5	-54,8	8,2	

LINJA 2		MA4_1		MB4_1		MC4_1		MD4_1		MD4_2		ME4_1		MA8_1		MB8_1	
etäisyys	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	
0	38,2	100,1	-20,8	42,8	-68,9	138,8	88,7	43,4	41,5	27,2	-86,9	16,2	-37	27,3	10,5	13,7	
0,5	11,7	33	-23,4	28,1	-50,6	30,1	-31,8	25	-9,7	23	-56,8	26,7	-78,5	14,7	1,4	12,3	
1	13,3	17,6	-16,6	13	-4,2	24,9	-22,5	9,4	9,2	12,5	-38,3	4,7	-67,1	9,2	5,5	11,3	
1,5	-20,1	19,2	-20,6	15,5	-21,7	20,9	-27,4	13,4	-33,5	14,1	-35	6,2	-78,3	11,9	-3,1	10,1	
2	-15,9	26,1	-15,9	15,2	-26,1	13,5	-22,2	8,6	-46,6	17,1	-51,6	11,4	-91,6	11,9	-17,4	10	
2,5	-40,7	17,3	-2,2	8,9	-16,7	13,3	-31,1	21,9	-22	12,3	-42,1	15,9					
3	-36,2	13,1	-14,3	15	-37,9	15,8	-21	17,7	-3,1	5,5	-31,8	9,1	-70,5	11,5	-23,4	10,7	
3,5	-12,6	18,8	-15	10,5	-39,2	15,7	-9,4	17,4	2,6	13	-61,2	6,6					
4	-14,9	15,8	-1,8	10,6	-36,7	18	-3	16,3	-9,5	10,2	-64,6	13,6	-59,3	13,6	-15,8	11,5	
4,5	-37	14,5	-18	7,3	-24,5	16,5	-38,6	16,1	-34,9	5,4	-44,9	15,4					
5	-28,7	15,4	-4,4	6,3	-28,4	7,4	-15,4	14,7	-32,1	10,4	-40,8	5,3	-90,1	13,7	22,3	13,7	

LINJA 3		MA8_1		MB8_1		LINJA 4		MA8_1		MB8_1	
etäisyys	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	etäisyys	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta	Mpa	hajonta
0	-19	20,3	-60,1	19,3	0	-81,4	11,1	-80,6	15,5		
0,5	-22,2	18,4	-64,2	20,2	0,5	-88,5	12,2	-78,8	17,5		
1	-32,9	13,5	-71,9	4,2	1	-94,4	12,7	-84,6	13,4		
1,5	-53,7	8,5	-85,4	8	1,5	-89,9	8,8	-78,3	11,7		
2	-56,5	15	-94,2	11,1	2	-75,1	13,6	-58,3	10,2		
3	-60,4	8,6	-93,5	11,5	3	-83,2	10	-81,8	8,5		
4	-85,3	8,1	-91,4	8,3	4	-83,5	10,7	-69,1	12,3		
5	-96,1	7,2	-95,1	8,8	5	-80,7	7,7	-92,6	13,1		

