



**HFMI-jälkikäsittelyn hyödyntäminen putkilaippaliitoksissa**  
**Application of HFMI Post-Treatment in Pipe Flange Joints**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2025

Antti Tanskanen

Tarkastajat: TkT Kalle Lipiäinen

TkT Antti Ahola

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT energijärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Antti Tanskanen

### **HFMI-jälkikäsittelyn hyödyntäminen putkilaippaliitoksissa**

Konetekniikan kandidaatintyö

2025

42 sivua, 16 kuvaa ja 5 taulukkoa

Tarkastajat: TkT Kalle Lipiäinen ja TkT Antti Ahola

Avainsanat: HFMI, ruostumaton teräs, jäännösjännitys, jälkikäsittely

HFMI-jälkikäsittelymenetelmää on tutkittu laajasti, mutta sen soveltuvuudesta ruostumattomille teräksille ei tunneta tarpeeksi hyvin. Tiettyjen ruostumattomien terästen väsyminen hitsatussa tilassa on kriittinen ongelma, jota on pyritty parantamaan erilaisilla jälkikäsittelymenetelmillä.

Kandidaatintutkielmassa tutkittiin HFMI-jälkikäsittelyn vaikutusta hitsin rajaviivan paikalliseen muotoon, jäännösjännityksiin ja alkuvikoihin. Työn tavoitteena on selvittää HFMI-menetelmän vaikutuksia rajaviivaan eri prosessiparametreilla ja arvioida menetelmän vaikutusta väsymiskestävyyteen. Työ sisältää kirjallisuuskatsauksen ruostumattomista teräksistä ja niiden hitsaamisesta, väsymisestä ja jälkikäsittelymenetelmistä. Näiden lisäksi työ sisältää kokeellisen osuuden. Työssä ei suoritettu väsytyiskoetta ajan rajallisuuden vuoksi.

Kokeellista osuutta varten LUT-yliopistolle toimitettiin putkilaippaliitokset, jotka on valmistettu 316 L-, 904 L-, 2205- ja 2507-ruostumattomista teräksistä. HFMI-jälkikäsittely suoritettiin 4 mm työkalupäälle ja prosessiparametreilla 3, 6 ja 10. Jälkikäsittelyn jälkeen koekappaleille suoritettiin jäännösjännitysmittaus röntgendiffraktiolaitteella. Mittausten jälkeen koekappaleista leikattiin paloja ja mikrorakennetta tutkittiin elektronimikroskoopilla.

Tuloksissa huomattiin, että jälkikäsittelyllä saatiin muodostettua puristavia jäännösjännityksiä rajaviivalle, mutta materiaalien välillä oli merkittäviä eroa prosessiparametrien vaikutuksessa jäännösjännityksiin. Elektronimikroskooppikuvissa huomattiin merkittäviä alkuvikoja, jotka vaikuttavat väsymiskestävyyteen.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Antti Tanskanen

### **Application of HFMI Post-Treatment in Pipe Flange Joints**

Bachelor's thesis

2025

42 pages, 16 figures and 5 tables

Examiners: D.Sc. (Tech.) Kalle Lipiäinen and D.Sc. (Tech.) Antti Ahola

Keywords: HFMI, Stainless Steel, Residual Stress, Post Weld Treatment

The HFMI post-weld-treatment has been extensively studied, but its application to stainless steels is not yet well understood. Fatigue in welded joints of certain stainless steels is a critical issue that has been addressed through various post-weld-treatment methods.

This bachelor's thesis examined the effect of HFMI post-weld-treatment on the local geometry of the weld toe, residual stresses, and initial defects. The objective was to investigate the impact of HFMI parameters on the weld toe under different process settings and evaluate the method's effect on fatigue resistance. The thesis includes a literature review on stainless steels, their welding, fatigue, and post-weld-treatment methods. In addition, the thesis contains an experimental section. Fatigue testing was not carried out due to time constraints.

For the experimental part, pipe flange joints were delivered to LUT University, made of 316 L, 904 L, 2205 and 2507 stainless steels. HFMI treatment was applied using a 4 mm tool with process parameters of 3, 6 and 10. After the treatment, residual stresses were measured using an X-ray diffraction device. Samples were cut from the specimens and their microstructures were examined with a Scanning Electron Microscope.

The results showed that compressive residual stresses were successfully introduced at the weld toe with HFMI post-weld-treatment. However, significant variation was observed in the residual stresses between different materials and process parameters. The SEM images also revealed notable initial defects, which may influence fatigue performance.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Symboliluettelo

$\sigma$	jännitys	[MPa]
mm	millimetri	
$\mu\text{m}$	mikrometri	
°	aste	

### Lyhenteet

ASS	Austenitic Stainless Steels
ASW	As Welded
DSS	Duplex Stainless Steels
FSS	Ferritic Stainless Steels
HFMI	High Frequency Mechanical Impact
IIW	International Institute of Welding
MSS	Martensitic Stainless Steels
SDSS	Super-Duplex Stainless Steels
SEM	Scanning Electron Microscopy
FWHM	Full Width at Half Maximum

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	7
1.1	Työn tausta.....	7
1.2	Tutkimusongelma ja työn tavoite .....	8
2	Kirjallisuuskatsaus.....	9
2.1	Ruostumaton teräs.....	9
2.1.1	Martensiittiset ruostumattomat teräokset.....	10
2.1.2	Ferriittiset ruostumattomat teräokset .....	10
2.1.3	Austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräokset (Duplex).....	11
2.1.4	Austeniittiset ruostumattomat teräokset.....	12
2.2	Ruostumattoman teräoksen hitsattavuus.....	14
2.3	Hitsiliitokset ja niiden väsyminen.....	16
2.4	Jälkikäsitteily .....	18
2.4.1	HFMI-jälkikäsitteily ja ruostumattomat teräokset.....	19
3	Kokeellinen osuus .....	21
3.1	Kokeellinen järjestely .....	21
3.2	Koekappaleet .....	22
3.3	Jälkikäsitteily .....	22
3.4	Jäännösjännitykset .....	25
3.5	SEM-tutkimus.....	29
4	Tulokset .....	31
4.1	Jäännösjännitykset .....	31
4.2	Rajaviivan paikallinen geometria ja alkuviat.....	32
4.3	Prosessiparametrien vaikutus rajaviivaan.....	33
5	Pohdinta.....	36
5.1	Vertailua aiempiin tutkimuksiin .....	38
5.2	Virhetarkastelu, reliabiliteetti ja validiteetti .....	38

5.3	Tulosten yleistettävyys, hyödynnettävyys ja jatkotutkimukset .....	39
6	Yhteenveto.....	40
7	Lähteet .....	41

# 1 Johdanto

Mekaanisten ominaisuuksien ansiosta ruostumattomien terästen käyttö on yleistynyt. Näillä teräksillä on hyvä korroosionkestävyys ja ne ovat lujia sekä kilpailukykyisiä tavallisille hii-  
literäksille. Teräsrakenteiden suurin huolenaihe on jo pitkään ollut väsymisilmiö, joka johtuu  
muun muassa vaihtuvasta kuormituksesta. Väsymisestä aiheutuneet säröt havaitaan usein  
liian myöhään, minkä vuoksi rakenteiden väsymislujuutta on pyrittävä parantamaan. Yhtenä  
ratkaisuna tähän on hitsisaumojen jälkikäsittely. Käsittelemällä teräsrakenteiden hitsi-  
saumojä väsymiskestävyyttä on voitu kasvattaa merkittävästi. Ruostumattomilla teräksillä  
on kaikista jälkikäsittelymenetelmistä ei kuitenkaan ole vielä saatu tarpeeksi tietoa. Tämän  
vuoksi niiden potentiaalia ei ole voitu hyödyntää rakenteiden väsymiskestävyyden paranta-  
miseksi. HFMI-jälkikäsittelymenetelmä on verrattain uusi menetelmä ja täten tärkeä tutkit-  
tava aihe.

## 1.1 Työn tausta

Tämän tutkimuksen tuloksia tarvitaan merkittävästi teollisuudessa, kun halutaan valmistaa  
vahvoja ruostumattoman teräksen rakenteita. Tutkimuksen avulla voidaan myös arvioida  
HFMI-jälkikäsittelyn hyötyjä ja vaikutuksia ruostumattomilla teräksillä sekä jälkikäsittelyn  
vaikutusta väsymiskestävyyteen. Työn tulosten avulla voidaan valmistaa optimaalisemmin  
mitoitettuja rakenteita, joka kustannustehokkuuden lisäksi on ympäristöystävällisempää.  
Tulokset auttavat ymmärtämään, missä tilanteissa jälkikäsittelyä on kannattavaa käyttää ja  
milloin siitä voi aiheutua haittaa. Tämä tutkimus on jatkoa Teemu Ärilän vuonna 2024 teke-  
mälle diplomityölle, jossa tutkittiin akselin ja laipan hitsiliitoksen väsymiskestävyyttä. Äri-  
län työssä todettiin muun muassa, että hitsin rajaviivan tasainen vaihtuminen perusmateriaa-  
liin on keskeisessä roolissa rajaviivan kestävyuden kannalta. Ärilä esitti myös, että HFMI-  
käsittely voisi olla hyödyllinen jälkikäsittelymenetelmä hitsin rajaviivan väsymiskestävyy-  
den parantamiseen.

## 1.2 Tutkimusongelma ja työn tavoite

Tietyillä ruostumattoman teräksen seoksilla väsyminen hitsatussa tilassa (ASW) on kriittinen ongelma rakenteen kestävyuden kannalta. Tätä voidaan parantaa jälkikäsittelyllä. HFMI-jälkikäsittely kehittyy jatkuvasti ja on tarve selvittää sen soveltuvuutta eri kokoisille sekä eri ruostumattoman teräksistä valmistetuille pienahitsuille putkilaippaliitoksille. Jälkikäsittelyn vaikutuksia ei tunneta vielä tarpeeksi hyvin ruostumattomilla teräksillä, mikä rajoittaa jälkikäsittelyn käyttöä ja mahdollisten hyötyjen saavuttamista.

Tässä työssä käsiteltävästä ongelmasta johdetaan seuraavat kysymykset:

- Miten prosessiparametrit vaikuttavat paikalliseen geometriaan ja pintavikoihin eri teräslaaduilla?
- Miten HFMI-käsittely vaikuttaa jäännösjännityksiin erilaisilla teräslaaduilla?
- Millaisia alkuvikoja HFMI-jälkikäsittely voi aiheuttaa liitoksiin erilaisilla teräslaaduilla?
- Miten eri materiaalien HFMI-käsiteltävyys poikkeaa putkilaippaliitoksilla?

Työn tavoitteena on selvittää ja parantaa ymmärrystä, miten HFMI-jälkikäsittely ja sen prosessiparametrit vaikuttavat ruostumattomista teräksistä valmistettujen putkilaippaliitosten jälkikäsiteltävyyteen sekä väsymiskestävyuteen. HFMI-jälkikäsittelymenetelmää on tutkittu ja hyödynnetty hiiliteräksillä, mutta ruostumattomilla teräksillä kyseinen menetelmä on suhteellisen uusi.

Tämä työ sisältää kirjallisuuskatsauksen ja laboratoriotutkimukset, jossa tutkitaan kolmen eri prosessiparametrin vaikutusta hitsatun ruostumattoman teräksen jäännösjännityksiin, alkuvikoihin ja paikalliseen geometriaan putkilaippaliitoksilla. Se ei sisällä väsytyiskoetta tutkimuksen sekä ja rajallisuuden vuoksi.

## 2 Kirjallisuuskatsaus

Ruostumattomien terästen käyttö on yleistynyt vuosikymmenien saatossa niiden ominaisuuksien ansiosta. Tässä luvussa esitetään kirjallisuuskatsaus, jossa käsitellään aiempia tutkimuksia ja kirjallisuutta liittyen ruostumattomien terästen ominaisuuksiin ja hitsattavuuteen. Lisäksi esitellään tutkimuksessa käytettyjen ruostumattomien terästen luokkia ja lajeja. Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään myös hitsiliitosten väsymiseen liittyviä seikkoja ja hitsin rajaviivan jälkikäsittelemenetelmiä, joiden avulla voidaan mahdollisesti parantaa hitsiliitoksen väsymiskestävyyttä.

Lähteiden etsimisessä on käytetty LUT Primo, Scopus ja Google Scholar -tietokantoja lähteiden löytämiseen. Lisäksi työssä on hyödynnetty satunnaisesti ChatGPT -tekoälyä lähteiden kääntämiseen ja kielenhuoltoon. Tekoälyä käytettiin myös englanninkielisessä tiivistelmässä.

### 2.1 Ruostumaton teräs

Ruostumaton teräs on rautapohjainen seos (Fe), johon lisätty muun muassa kromia (Cr). Kromin osuus massasta on oltava EN 10088-1 standardin mukaan vähintään 10.5 massaprosenttiyksikköä. Lisäksi hiilen osuus saa olla standardin mukaan korkeintaan 1.2 massaprosenttiyksikköä. Kromia lisätään, jotta teräksen päälle muodostuu ruostumista estävä kromioksidikalvo. Seokseen voidaan lisätä myös muita alkuaineita kuten nikkeliä, molybdeeniä, kuparia, titaania, niobiumia ja typpeä parantamaan korroosionkestävyyttä, lämmönkestävyyttä, lujuutta sekä työstettävyyttä.

On kuitenkin huomioitava, että kaikkien lisäaineiden osuus, kromi mukaan lukien, on oltava vähemmän kuin 50 massaprosenttiyksikköä. Tärkeimpiä lisäaineita ruostumattoman teräksen metallurgisen rakenteen, korroosionkestävyyden sekä lujuuden kannalta ovat nikkelin ja kromin pitoisuudet. (Niinomi, 2019, 7.) Ruostumattomat teräkset jaetaan kiderakenteensa mukaan neljään eri pääluokkaan:

- Martensiittiset ruostumattomat teräkset (MSS)
- Ferriittiset ruostumattomat teräkset (FSS)

- Austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräkset (Duplex) (DSS)
- Austeniittiset ruostumattomat teräkset (ASS)

Näillä luokilla on toisistaan poikkeavat mekaaniset ominaisuutensa. Austeniittiset ovat sitkeitä, mutta lujuus on alhainen, kun taas martensiittiset ruostumattomat teräkset ovat lujia, mutta hauraita (Rowe, 2012, 47–48.)

### 2.1.1 Martensiittiset ruostumattomat teräkset

Martensiittisten ruostumattomien terästen (MSS) seosaineena käytetään pääosin kromia, jonka massaprosentti on noin 11.5–18. Lisäksi seokseen lisätään hiiltä, jonka pitoisuus on noin 1.2 prosenttia. Tämä tekee MSS-teräksestä hiilirikkaimman ruostumattoman teräksen verrattuna. Korkea hiilipitoisuus mahdollistaa materiaalin lujittamisen lämpökäsittelyllä. Kovuutta ja lujuutta voidaan kasvattaa karkaisulla. Martensiittiset teräkset ovat kovempia sekä lujempia kuin muut teräs laadut, mutta ne ovat melko hauraita. Niiden koneistettavuus on hyvä, kun seokseen lisätään rikkiä, mutta tämä vähentää materiaalin ruostumattomuutta. (Guide, 2013; Singh, 2020a, 80–81.)

Karkaisulla ja päästöllä MSS-teräksen myötölujuus voidaan saada 2000 MPa:han. Yleisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi suihkumoottorien turbiinilavat, jotka altistuvat korkeille lämpötiloille. Käytännönläheisempiä käyttökohteita ovat partaterät ja ruokailuaterimet. (Rana, 2021a, 466.) Taulukossa 1 esitetään tiivistetysti MSS-teräsluokan mekaaniset ominaisuudet sekä käyttökohteet.

### 2.1.2 Ferriittiset ruostumattomat teräkset

Ferriittiset ruostumattomat teräkset (FSS) ovat pääosin raudan ja kromin seoksia, joissa kromin massapitoisuus on 10.5–30 %. Hiilen pitoisuus on hyvin matala, yleensä 0.1 % molemmiin puolin, mikä heikentää sen lämpökäsittelyä ja kovuuden kasvattamista. Kovuutta ja lujuutta voidaan kuitenkin kasvattaa maltillisella kylmämuovauksella, mutta se samalla heikentää sitkeyttä. Hehkutetussa tilassa FSS-teräkset ovat noin puoltoista kertaa lujempia kuin tavalliset hiiliteräkset. FSS-terästen lujuus ja korroosiokestävyys kasvaa hehkutetussa tilassa, mutta pitkäaikainen hehkuttaminen noin 400–510°C lämpötilassa voi haurastuttaa ja

heikentää rakenteen iskusitkeyttä. FSS-terästen myötölujuus vaihtelee yleensä 240–380 MPa välillä. (Amuda ja Mridha, 2011; Rana, 2021b, 464-465; Singh, 2020b, 81-82.).

FSS-teräkset ovat edullisempia verrattuna muihin ruostumattomiin teräksiin koska niihin ei lisätä juurikaan muita seosaineita (Rana, 2021, 464-465). Käyttökohteet ovat usein samanlaisia kuin austeniittisten ruostumattomien terästen, kuten elintarvike- ja kemianteollisuudessa. Rikki- ja kloridipitoisissa ympäristöissä FSS-teräkset ovat austeniittisiä ruostumattomia teräksiä parempia, sillä ne kestävät paremmin jännityskorroosiota. Tämä johtuu korkeasta kromipitoisuudesta ja matalasta nikkelpitoisuudesta (Weman, 2012, 202-203.) Taulukossa 1 esitetään tiivistetysti FSS-teräsluokan mekaaniset ominaisuudet sekä käyttökohteet.

### 2.1.3 Austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräkset (Duplex)

Austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräkset (duplex, DSS) kehitettiin taloudelliseksi vaihtoehdoksi jännityskorroosiohalkeilun hallintaan, mikä yleensä on ratkaistu korkean nikkelpitoisuuden sisältävien seosten käytöllä (Kutz, 2002, 83-84). DSS-teräkset sisältävät yleisesti noin 20–30 % kromia ja 5–8 % nikkeliä. Nimi *duplex* viittaa kiderakenteeseen, jossa austeniittia ja ferriittiä on yhtä paljon. Austeniitti parantaa korroosionkestävyyttä ja sitkeyttä matalissa lämpötiloissa, kun taas ferriitti kasvattaa lujuutta ja vähentää jännityskorroosiosta aiheutuvaa halkeilua (Afzali et al., 2024, 2). DSS-teräkset sisältävät vähän hiiltä, jonka lisäksi seokseen lisätään molybdeenia, volframia, kuparia ja typpeä.

DSS-teräkset jaetaan neljään luokkaan lean duplex, standard duplex, super duplex ja hyperduplex. Jokainen näistä on kehitetty täyttämään tavoitellut vaatimukset niin hitsattavuuden kuin valmistuksen kannalta. Austeniitin ja ferriittin tasapainon säilyttäminen edellyttää esikäsittelyä. DSS-terästen myötölujuus ja jännityskorroosiokestävyys on yleisesti korkeampi kuin esimerkiksi austeniittisillä ruostumattomilla teräksillä. Myötölujuus vaihtelee noin 550–690 MPa välillä (Rana, 2021, 467; Singh, 2020, 83-84). Singh, 2020, mukaan DSS-teräs ei saisi altistua pitkäaikaisessa käytössä yli 300°C, sillä ferriittinen rakenne on altis mekaanisen lujuuden heikkenemiselle, joka aiheuttaa rakenteen haurastumista. Rana, 2021, mukaan alin käyttölämpötila DSS-teräkselle on -40°C, jonka alapuolella rakenteen iskulujuus heikkenee.

Duplex-terästen luokittelu perustuu niiden seosainepitoisuuksiin, jotka määrittävät esimerkiksi materiaalin mekaaniset ominaisuudet ja korroosionkestävyyden. Lean duplex-teräksillä nikkeli ja molybdeeni pitoisuudet ovat muita DSS-teräksiä matalampia. Näitä korvata typpellä sekä mangaanilla. Vaikka mangaani heikentää paikallista korroosionkestävyyttä, se on tärkeä ainesosa typen liukoisuuden parantamiseksi. Typpi edistää austeniitin uudelleenmuodostumista hitsatessa Lean-duplexia ja ehkäisee ferriitin liiallista muodostumista, mikä parantaa hitsin korroosionkestävyyttä. Lisäksi typpi kasvattaa rakenteen myötölujuutta. (Liljas et al., 2008, 466-472.)

DSS ja Super duplex (SDSS) teräksillä austeniitti-ferriittirakenteet ovat samanlaiset, mutta erona näillä on niiden seosaineet. SDSS-teräkset sisältävät enemmän kromia, molybdeenia sekä typpeä, mikä parantaa korroosionkestävyyttä. Ne ovat yleensä kovempia sekä lujempia kuin DSS-teräkset. (Pereira et al., 2019, 2; Raj et al., 2020, 955-959.) Hyper duplex -teräkset (HDSS) tarjoavat paremman pistekorroosionkestävyyden. Tämä johtuu seokseen lisätyistä volframista ja molybdeenistä, mutta nämä heikentävät iskukestävyyttä (Raj et al., 2020, 957). DSS-teräksiä käytetään esimerkiksi kemianteollisuudessa ja paineistettujen tilojen osissa (Singh, 2020, 268-269). Taulukossa 1 esitetään tiivistetysti DSS-teräsluokan mekaaniset ominaisuudet sekä käyttökohteet.

#### 2.1.4 Austeniittiset ruostumattomat teräkset

Austeniittiset ruostumattomat teräkset (ASS) ovat yleisimmin käytettyjä ruostumattomia teräksiä, sillä ne muodostavat 70 prosenttia maailman ruostumattoman teräksen tuotannosta. ASS-teräksillä kromin massaprosentti vaihtelee noin 16–25 % välillä ja nikkelpitoisuus 1–22 % välillä, riippuen teräslajista. Kromin ja nikkelin lisäksi hiilipitoisuus on alle 0.08 %. ASS-teräksiin voidaan seostaa myös titaania sekä niobia parantamaan niiden lujuutta (Rana, 2021, 465.)

ASS-terästen laaja käyttö perustuu niiden mekaanisiin ominaisuuksiin, sillä ne ovat sitkeitä, lujia, korroosionkestäviä sekä hitsattavuudeltaan ja muokattavuudeltaan erinomaisia. Myötölujuus pienempi seoksisilla ASS-teräksillä on noin 210–280 MPa, kun rakenne hehkutetaan. Typen avulla voidaan kasvattaa seoksen myötölujuutta. ASS-terästen lujuutta voidaan

myös kasvattaa kylmämuovauksella, varsinkin kun kyseessä ovat korkeaseosteiset ASS-teräkset. Muovauksen aikana rakenteeseen voi muodostua martensiittia, joka voi lisätä ASS-teräksen vetyhaurautta. Kyseisen teräksen valmistusprosessin aikana rakenteeseen voi syntyä jäännösjännityksiä, jotka kasvattavat riskiä jännityskorroosiosta aiheutuville haurastumisille sekä säröille. ASS-teräksiä käytetään muun muassa rakenteellisissa osissa energiantuotantolaitoksissa sekä kemianteollisuudessa (Shirzadi et al., 2014, 130-132.; Singh, 2020, 254-255.)

Taulukko 1. Yhteenveto ruostumattomien terästen luokista ja niiden ominaisuuksista

Luokka	Sitkeä / hauras	Pehmeä / kova	Lujuus	Käyttökohteet
MSS	Hauras	Kova	Jopa 2000 MPa	Turbiinimoottorien lavat ja parta-terät
FSS	Sitkeä	Pehmeä	230–380 MPa	Elintarvike- ja kemianteollisuus
DSS	Sitkeä	Kova	550–690 MPa	kemianteollisuus, paineistetut rakenteet
ASS	Sitkeä	Riippuu seoksesta	Hehkutettuna 210–280 MPa	Kemianteollisuus ja rakenteelliset osat energiantuotantolaitoksissa

Tässä työssä tutkittavia ruostumattoman teräksen luokkia ovat:

- EN 1.4404, 316 L (ASS)
- EN 1.4539, 904 L (ASS)
- EN 1.4462, 2205 (DSS)
- EN 1.4410, 2507 (SDSS)

Outokumpu Oyj on suomalainen metalliteollisuuden yritys, joka käyttää terästen valmistamisessa SFS-EN 10088 standardia. Outokummun internetsivun mukaan 316 L on heidän yleisimmin käytetty ASS-teräs. 316 L-teräksen koneistaminen on Outokummun mukaan haastavampaa kuin tavallisten hiiliterästen, mutta verrattain helpompaa kuin muiden

korkeaseosteisten ruostumattomien terästen. 316 L-teräs sopii heidän mukaansa käyttökohteisiin, joissa vaaditaan hyvää korroosiokestävyyttä. Muita tyypillisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi laipat sekä venttiilit. 904 L-teräs sopii Outokummun mukaan olosuhteisiin, joissa teräs altistuu korroosiolle sekä rikkihapolle (Outokumpu.fi, 2025.)

Outokummun valmistama DSS-teräs 2205 on heidän yleisin DSS-teräksensä markkinoilla. 2205-teräs on luja ja omaa hyvän korroosion- ja jännityskorroosiokestävyyden. Sitä käytetään muun muassa öljy- ja kaasuteollisuuden laipoissa ja putkissa. Outokummun 2507 SDSS-teräksellä on 2205 teräkseen verrattuna korroosiokestävyys sekä lujuus. Käyttökohteiksi Outokumpu mainitsee 2507 teräkselle öljy- ja kaasuteollisuuden putket ja laipat. Lisäksi 2507 teräksiä voidaan käyttää merenalaisissa putkissa (Outokumpu.fi, 2025)

## 2.2 Ruostumattoman teräksen hitsattavuus

SFS-EN 3052:2020-standardin mukaan hitsaus on liitosmenetelmä, jossa osia liitetään toisiinsa lisäaineen avulla tai ilman sitä. Lämpöä ja/tai puristusta käytetään siten, että osien välille muodostuu pysyvä liitos. Materiaalin hitsattavuus viittaa sen ominaisuuksiin ja käyttäytymiseen ASW-tilassa. Hitsattavuus kattaa esimerkiksi materiaalin fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet sekä materiaalin kyvyn säilyttää metallurginen eheys. Yksinkertaistetusti hitsattavuudella tarkoitetaan sitä, kuinka helposti ja laadukkaasti materiaali voidaan liittää toisiinsa (Böllinghaus ja Herold, 2005, 271-272.) Taulukossa 2 on tiivistetysti ruostumattomien terästen hitsaamisesta ja siihen liittyvistä asioista.

Yksi yleisimmistä ruostumattomien terästen hitsausmenetelmistä on kaarihitsaus. Siihen sisältyy muun muassa kaasukaarihitsaus eli MIG, MAG ja TIG-hitsausmenetelmät (Singh, 2020, 252-253). Ruostumattomien terästen hitsaaminen voi olla haasteellista, sillä niiden sulamispisteet ovat korkeammat kuin hiiliterästen. Tämän vuoksi lämpötilan tarkka hallinta on tärkeää jotta saavutetaan tasainen ja kestävä hitsisauma. Ruostumattomat teräkset sisältävät nikkeliä sekä kromia, jotka voivat hitsauksen aikana edistää sementtiitin muodostumista. Sementtiitti hidastaa hitsin jäähtymistä, mikä heikentää hitsin laatua ja sen mekaanisia ominaisuuksia (Hitsausinfo.fi, 2024.)

ASS-terästen hitsaamiseen soveltuu kaikki SFS-EN 1011-1 standardin mukaiset kaarihitsausprosessit. SFS-EN 1011-3 -standardissa suositellaan matalaa lämmöntuontia,

jotta voidaan välttää muodonmuutokset, kuumahalkeilu sekä metallien välisten yhdisteiden erkaneminen. ASS-teräksiä voidaan hitsata käyttäen lisäainetta tai ilman. Lisäaine valitaan valmistajan mukaan tai esimerkiksi EN ISO 3581 standardin mukaisesti. TIG-hitsausproses- sissa käytettävät suojakaasut ovat esimerkiksi argon, argon-vety, argon-helium tai näiden seoksia. Kuumahalkeilua voi syntyä jähmettymis- ja sulamisvaiheessa, sekä epäpuhtauk- sista, jotka kiteytyvät raerajoille (SFS-EN 1011:2018, 3.)

FSS-teräkset ovat alttiita rakeenkasvulle ja haurastumiselle, jolloin lämmön- tuonti on pidettävänä alhaisena. Yleisimpiä hitsausmenetelmiä ovat Puikko-, MIG-, MAG-, TIG-, ja plasmahitsaaminen. FSS-teräksiä voidaan esilämmittää noin 200–300°C hitsatessa FSS-MSS-teräksiä. Lisäaineena suositetaan lähtökohtaisesti austeniittisia lisäaineita niiden paremman sitkeyden vuoksi. Mikäli hitsisaumalta vaaditaan samanlaisia ominaisuuksia ku- ten lämpölaajenemista, väriyhtäläisyyttä tai nikkelitömyyttä, käytetään hitsauksessa ferriit- tisiä ruostumattomia lisäaineita. Suojakaasujen tulisi olla argonpohjaisia eivätkä ne saisi si- sältää hiilidioksidia, vetyä ja typpeä. Nämä voivat aiheuttaa kylmähalkeilua tai vety- haurautta. Valitessa austeniittinen tai ferriittinen lisäaine, myötö- ja murtolujuuden pitää olla samanlaiset verrattuna perusaineeseen (SFS-EN 1011:2018, 3.)

DSS-teräkset soveltuvat kaikille EN-1011-standardin kaarihitsausprosesseille. DSS-terästen hitsattavuutta on parannettu optimoimalla austeniitin ja ferriitin suhdetta seok- sessa sekä lisäämällä typpeä austeniitin muodostumisen edistämiseksi. Lämmöntuonti on hallittava tarkasti. Liian vähäinen lämmöntuonti kasvattaa ferriittipitoisuutta, kun taas liial- linen lämmöntuonti voi aiheuttaa metallien välisten yhdisteiden erkanemista. DSS-terästen muodonmuutokset ovat ASS-teräksiä alhaisempia, mutta niiden oikominen on hankalampaa korkean myötölujuuden vuoksi. Lisäaineina käytetään yliseostettuja, nikkelpitoisia aineita, jotka hidastavat jäähtymistä ja vähentävät ferriitin määrää hitsissä. Suojakaasut valitaan EN ISO 14175 standardin mukaisesti. Standardin mukaan tulisi välttää vetyä sisältäviä kaasuja, jotta vältetään vetyhalkeilulta. Hitsaus heikentää mekaanisia ominaisuuksia ja korroosion- kestävyyttä korkeaseosteisilla DSS-teräksillä. DSS-teräksillä hitsin iskutkeys on alhai- sempi kuin perusaineen. Tähän vaikuttavaa esimerkiksi ferriittipitoisuus hitsiaineessa, hit- sausprosessi sekä lisäaine. (SFS-EN 1011:2018, 3.)

MSS-terästen hitsauksessa käytetään yleisimmin TIG- ja puikkohitsausta, mutta erikoistilanteissa myös MIG-, MAG- ja jauhekaarihitsausta ovat mahdollisia. MSS- teräkset vaativat usein esilämmitystä, jos hiilipitoisuus ylittää 0.1 %. Esilämmittämisen

tarpeeseen liittyy myös kappaleen ainepaksuus ja jännitystila. Hitsauksen jälkeinen hehkus vaaditaan, jos hiilipitoisuus on yli 0.2 prosenttia. Mikäli tavoitellaan lujaa hitsiä, voidaan käyttää perusaineeseen verrattavaa lisäainetta, mutta austeniittisen lisäaineen käyttö on myös mahdollista. MSS-teräksillä on taipumus kylmähalkeiluun erityisesti korkean hiilipitoisuuden ja vedyn läsnäolon vuoksi. MSS-teräksillä muodonmuutokset ovat yleensä pieniä koska niillä on suurempi lämmönjohtamiskyky sekä matalampi lämpölaajeneminen kuin ASS-teräksillä (SFS-EN 1011:2018, 3.)

Taulukko 2. Yhteenveto Ruostumattomien terästen hitsaamisesta sekä hitsaamisen vaikutuksista

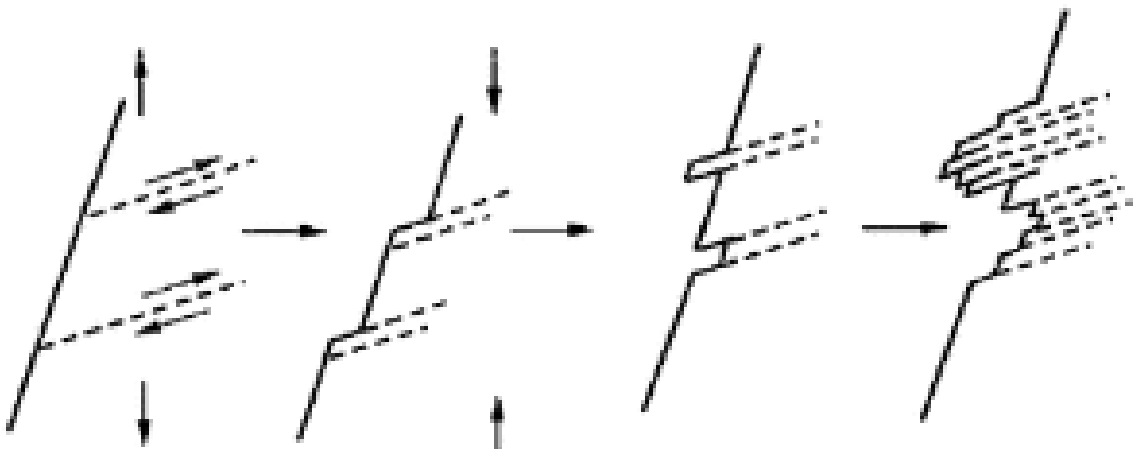
Teräs	Hitsausprosessi	Suojakaasu	Lisäaine	Hitsauksen vaikutukset
ASS	Kaarihitsaus (EN-1011)	Argon Argon-vety Argon-helium	Valmistajan tai EN ISO 3851 mukaan	Muodonmuutokset Kuumahalkeilu
FSS	Puikkohitsaus MIG / MAG TIG Plasmahitsaus	Argonpohjaisia	Austeniittinen, Ferriittinen tai ilman	Haurastuminen Vetyhauraus Kylmähalkeilu
DSS	Kaarihitsaus (EN-1011)	Argon Argon-helium Argon-typpi	Yliseostettu nikkelillä	Iskusitkeyden laskeminen hitsissä Mahdollisten muodonmuutosten vaikea oikominen
MSS	Puikkohitsaus TIG (MIG / MAG ja jauhekaarihitsaus)	-	Austeniittinen tai perusainetta vastaava	Kylmähalkeilu

### 2.3 Hitsiliitokset ja niiden väsyminen

Yleisin syy liitoksen rikkoutumiselle syntyy toistuvasta kuormituksen vaihtelusta rakenteessa. Tätä ilmiötä kutsutaan väsymiseksi. Väsymistä ja väsymiskestävyyttä on tutkittu ja kehitetty pitkään sen haastavuuden sekä monialaisuuden takia. Joidenkin lähteiden mukaan

yli puolet tai jopa 90 prosenttia rakenteen vaurioista johtuu väsymisestä (Stephens, Fuchs ja Stephens, 2000, 1–10).

Syklinen kuormitus voi luoda rakenteeseen epäelastisia muodonmuutoksia, mikä jatkueksaan saavuttaa syklisen stabiiliuden. Jatkuvan muodonmuutoksen seurauksena metalli kovettuu tai pehmenee. Jotkin metallit ovat syklisesti stabiileja alusta alkaen, jolloin pehmenemistä tai kovettumista ei tapahdu. Sitkeillä metalleilla dislokaatiot voivat liikkua vapaammin, jolloin metalli pehmenee. Kovat metallit ovat hauraita ja siksi dislokaatioiden liikkuvuus on rajallisempi sekä säröjen muodostuminen on nopeampaa kuin pehmeillä. Kovettumista ja pehmenemistä voi tapahtua kokonaisissa rakenteissa tai paikallisesti, eli jännityskeskittyminä, säröinä tai metallurgisina epäjatkuvuuksina. Väsymisilmiö perustuu säröihin ja niistä aiheutuviin jännityskeskittymiin. Mikäli vaihteleva kuormitus jatkuu, särö jatkaa kasvamistaan ja aiheuttaa materiaalin murtumisen (Bathias ja Pineau, 2010, 69–70; Stephens, Fuchs ja Stephens, 2000, 43–45.)



Kuva 1. Dislokaatioiden muodostuminen (Stephens, Fuchs ja Stephens, 2000, 46.)

Hitsatuilla rakenteilla väsymisilmiö on yksi huomioitavista asioista. Hitsauksesta syntyvät jäännösjännitykset ja hitsin mikrorakenteelliset virheet vaikuttavat väsymiskestävyyteen (Stephens, Fuchs ja Stephens, 2000, 401–404). Jäännösjännitykset syntyvät usein hitsauksen lämmöntonnan ja jäähtymisen takia. Jännityksien suuruudet voivat olla jopa yhtä suuret kuin perusmateriaalin myötölujuus. Jäännösjännitykset ovat usein vetojäännösjännityksiä ja muodostuvat usein hitsisauman rajaviilalle. Kun rakenteeseen kohdistuu ensimmäinen

kuormitus, se superponoituu jäännösjännitysten kanssa. Tällöin kuormitus ylittää myötörajan ja jäännösjännitykset relaxoituvat osittain. Jäännösjännitykset aiheuttavat voimaliitoksessa pääaineen paksuussuunnassa rasiutusta, mikä lisää riskiä lamellirepeilylle. Jäännösjännityksillä on myös tapana aiheuttaa haitallisia muodonmuutoksia rakenteeseen, esimerkiksi kulmavetäytymää, jolla on merkittävä vaikutus väsymiskestävyyteen (MacDonald, 2011, 126–127; Stephens, Fuchs ja Stephens, 2000, 405–406).

## 2.4 Jälkikäsitteily

Hitsiliitosten väsymiskestävyyden parantamiseksi on kehitetty jälkikäsitteilymenetelmiä, joilla pyritään ehkäisemään ja vähentämään rakenteelle epäedullisia jäännösjännityksiä sekä vaurioita (Jármai, Pahlke ja Farkas, 2014, 692). Jälkikäsitteilymenetelmät voidaan Hobbacher (2024, 83) mukaan jakaa kolmeen eri luokkaan menetelmällä tavoiteltujen hyötyjen perusteella:

- Hitsiprofiilin parantaminen
- Ympäristöolosuhteiden parantaminen.
- Jäännösjännitysten parantaminen.

Profiilia voidaan hioa tai koneistaa jotta rajaviivan siirtymä hitsistä perusaineeseen olisi mahdollisimman sulava. Hionnalla ja koneistuksella voidaan ehkäistä säröjen syntyä, jotka voivat muodostua esimerkiksi alileikkauksista tai halkeaman kaltaisista epätasaisuuksista rajaviivassa. Profiilia sekä hitsin epäkohtia voidaan myös parantaa sulattamalla TIG:llä rajaviivaa. Ruostumattomilla teräksillä korroosionkestävyys voi kuitenkin laskea käytettäessä TIG:ä, sillä ruostumattoman teräksen kemiallinen koostumus voi muuttua käsittelyn aikana (Hobbacher ja Baumgartner, 2024, 84–89; Jármai, Pahlke ja Farkas, 2014, 692.)

Toinen menetelmä rajaviivan väsymiskestävyyden parantamiseksi on prosessi, jossa mekaanisilla laitteilla tehdään ura hitsin rajaviivaan. Tätä kutsutaan HFMI-jälkikäsitteilymenetelmäksi (High-Frequency Mechanical Impact). HFMI-käsittelylle käytetään myös monia muita nimiä, kuten HiFit (High Frequency Impact Treatment) ja UP (Ultrasonic Peening). HFMI-käsittelyllä vasaroidaan hitsin rajaviivaa. Sen vaikutuksella voidaan vähentää lovijännitystä rajaviivassa ja puristavan vaikutuksen ansiosta luodaan edullisia jäännösjännityksiä (Hobbacher ja Baumgartner, 2024, 91–92.)

#### 2.4.1 HFMI-jälkikäsittely ja ruostumattomat teräkset

HFMI-jälkikäsittely on vuosien saatossa yleistynyt sen käyttäjäystävällisyyden sekä tehokkuuden ansiosta teräs- ja alumiinirakenteilla. Menetelmää on tutkittu laajasti ja IIW (International Institution of Welding) on laatinut HFMI-jälkikäsittelylle suosituksen. Suositus ei kuitenkaan anna suoranaista ohjetta ruostumattomien terästen HFMI-jälkikäsittelylle. IIW:n ohjeistuksen mukaan prosessiparametrit - kuten laitteen kulma suhteessa rajaviivaan sekä kuljettamisnopeus - ovat riippuvaisia materiaalista sekä laitevalmistajasta (Marquis, Barsoum ja SpringerLink (Online service), 2016, 1–3.)



Kuva 2. Hitsatun tilan sekä HFMI-jälkikäsittelyn kappaleen uran muoto (mukailtu (Marquis, Barsoum ja SpringerLink (Online service), 2016, 5)

Nimensä mukaisesti HFMI-jälkikäsittelyllä vasaroidaan hitsin rajaviivaa. Sitä vasaroidaan noin 90 Hz taajuudella, rajaviivaa pitkin. Jälkikäsittelyn hyöty perustuu laitteen työkalupäädyn osumien välittämään energiaan, joka aiheuttaa plastisen muodonmuutoksen rajaviivassa. Iskut aiheuttavat muutoksia materiaalin mikrorakenteeseen ja paikalliseen geometriaan, tämä voidaan käytännössä nähdä kuvan 2 urana rajaviivassa (Marquis, Barsoum ja SpringerLink (Online service), 2016)

Björk et al. (2018) tekemässä elektronimikroskooppisessa tutkimuksessa huomattiin, että 2507 SDSS ja 2205 DSS-terästen HFMI-jälkikäsittelystä voi aiheutua säröjä sekä geometrisia epäjatkuvuuksia urassa, jonka jälkikäsittely aiheuttaa. Säröjä löydettiin läheltä hitsin ja perusmateriaalin siirtymäaluetta ja ne olivat tyypillisesti  $45^\circ$  kulmassa pintaan nähden. Tutkimuksessa havaittiin myös, että säröjä esiintyi myös satunnaisesti HFMI:n urissa. Björkin mukaan säröjen syntymisen saattoi aiheuttaa HFMI-jälkikäsittelystä aiheutuva suuri muodonmuutos sekä materiaalin korkea lujuus. Näiden lisäksi Björk mainitsee, että materiaalin kaksifaasinen mikrorakenne voi olla yksi syy säröjen syntymiselle. Björkin mukaan mainitut asiat voivat laskea rakenteen venymisen kestävyyttä. Tutkimuksen lopussa Björk mainitsee, että HFMI-käsittelyn prosessiparametrit tarvitsevat lisää tutkimusta DSS- ja SDSS-teräksillä, sillä jälkikäsittelystä aiheutuneiden säröjen takia 2205 DSS- ja 2507 SDSS-terästen väsymiskestävyys ei parantunut (Björk et al., 2018.)

### 3 Kokeellinen osuus

Ruostumattomista teräksistä valmistettujen putkilaippaliitosten HFMI-jälkikäsiteltävyyttä testataan käsittelemällä koekappaleet kolmella eri prosessiparametrillä ja yhdellä työkalupäällä. Jälkikäsitteilyn jälkeen hitsisaumojen rajaviivoista mitataan röntgendiffraktiolaitteella jäännösjännitykset jälkikäsitellyistä kohdista. Jäännösjännitysmittausten jälkeen koekappaleista leikataan näytteitä, joista tutkitaan elektronimikroskoopilla mahdollisia alkuvikoja. Koekappaleet on valmistettu toisen yrityksen toimesta ja toimitettu LUT-yliopistolle, jossa koekappaleiden tutkimukset suoritetaan Teräsrakenteiden laboratoriotiloissa.

#### 3.1 Kokeellinen järjestely

Putkilaippaliitosten HFMI-jälkikäsiteltävyyttä ja sen vaikutuksia tutkitaan kokeellisesti neljällä eri ruostumattoman teräksen luokalla käyttäen yhtä työkalupäätä sekä kolmea eri prosessiparametriä. Kokeellista tutkimusta varten Teräsrakenteiden laboratoriolle on toimitettu yksi putkilaippaliitos jokaiselle tutkittavalle ruostumattoman teräksen laadulle. Koekappaleisiin rajataan kolme aluetta, jotka käsitellään kolmella eri prosessiparametrillä. Kokeen luotettavuutta parantaa näytteiden määrä, sillä jokaisesta ruostumattoman teräksen laadusta saadaan kolme näytekappaletta. Nämä voidaan leikata vielä pienempiin osiin mikroskooppisia tutkimuksia varten.

Koekappaleiden jälkikäsitteilyn jälkeen hitsin rajaviivalta mitataan jäännösjännitykset röntgendiffraktiolaitteella. Jokaiselle tutkittavalle materiaalille suoritetaan kolme hitsin rajaviivan jäännösjännitysmittausta, sillä koekappaleisiin suoritetaan jälkikäsitteily kolmella eri prosessiparametrillä.

Hitsin rajaviivan alkuvikojen, säröjen ja paikallisen geometrian SEM-tutkimus suoritetaan jäännösjännitysmittauksen jälkeen. Koekappaleista leikataan näytekappaleita, joita tutkitaan elektronimikroskoopilla. Elektronimikroskooppisten kuvien perusteella voidaan verrata jälkikäsitteilyn prosessiparametrien vaikutusta hitsin rajaviivaan ja näin arvioida ruostumattomien terästen HFMI-jälkikäsiteltävyyttä putkilaippaliitoksilla.

### 3.2 Koekappaleet

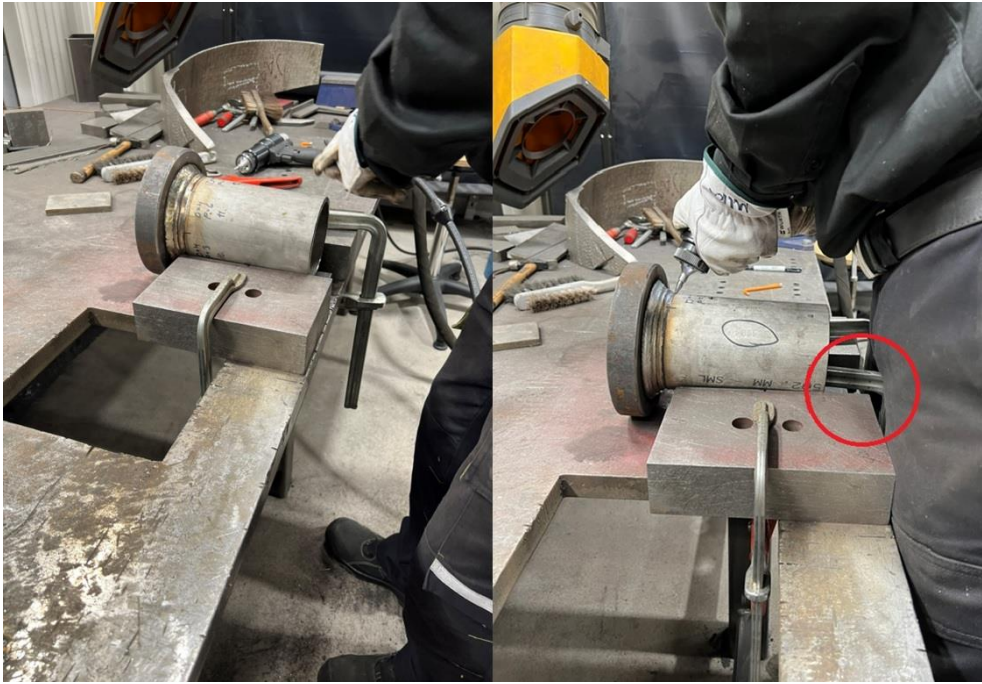
Koekappaleet muodostuvat laipasta ja putkesta, jotka on pienahitsattu yhteen. Laipan materiaali on kaikissa koekappaleissa rakenneterästä S355, joka on halkaisijaltaan 180 mm ja paksuudeltaan 30 mm. Kaikki ovat 200 mm pitkiä. Eroina koekappaleiden välillä ovat putken materiaalit sekä paksuudet, nämä esitetään taulukossa 3. Hitsauksen lisäaine on valittu putken materiaalin mukaan.

Taulukko 3. Koekappaleiden materiaalit sekä mitat

Materiaali	Halkaisija (mm)	Paksuus (mm)
S355	114,3	10
316 L	114,3	8,56
2205	114,3	6
2507	114,3	6
904 L	114,3	6,35

### 3.3 Jälkikäsittely

Hitsin rajaviivan HFMI-jälkikäsittely suoritetaan Teräsrakenteiden laboratorion HiFiT HFM 21R1-S-laitteella. Laitetta ohjataan käsikäyttöisesti hitsin rajaviivaa pitkin noin 7 senttimetrin matka. Hitsin rajaviiva käsitellään valitulla prosessiparametrillä vain yhden kerran. Jokaisessa käsittelyssä käytetään 4 mm kokoista työkalupäätä, joka on laitevalmistajan valmistama. Laitteen tehoa voidaan säätää 0 ja 10 välillä, jossa 0 on pienin ja 10 suurin teho. Taulukon 3 koekappaleet käsitellään tehoilla 3, 6 ja 10. Koekappaleet kiinnitetään kuvien 3. ja 4. mukaisesti. Putkea tuetaan raskailla elementeillä, jotka ovat puristimilla kiinni pöydässä. Elementtien lisäksi putki puristetaan aukinaisesta päästä elementtejä vasten.



Kuva 3. Koekappaleen asettelu elementtien väliin (vas.)  
ja kiinnitys elementtejä vasten käsittelyn ajaksi (oik.)



Kuva 4. HiFiT HFM 21R1-S 4 mm työkalupäällä



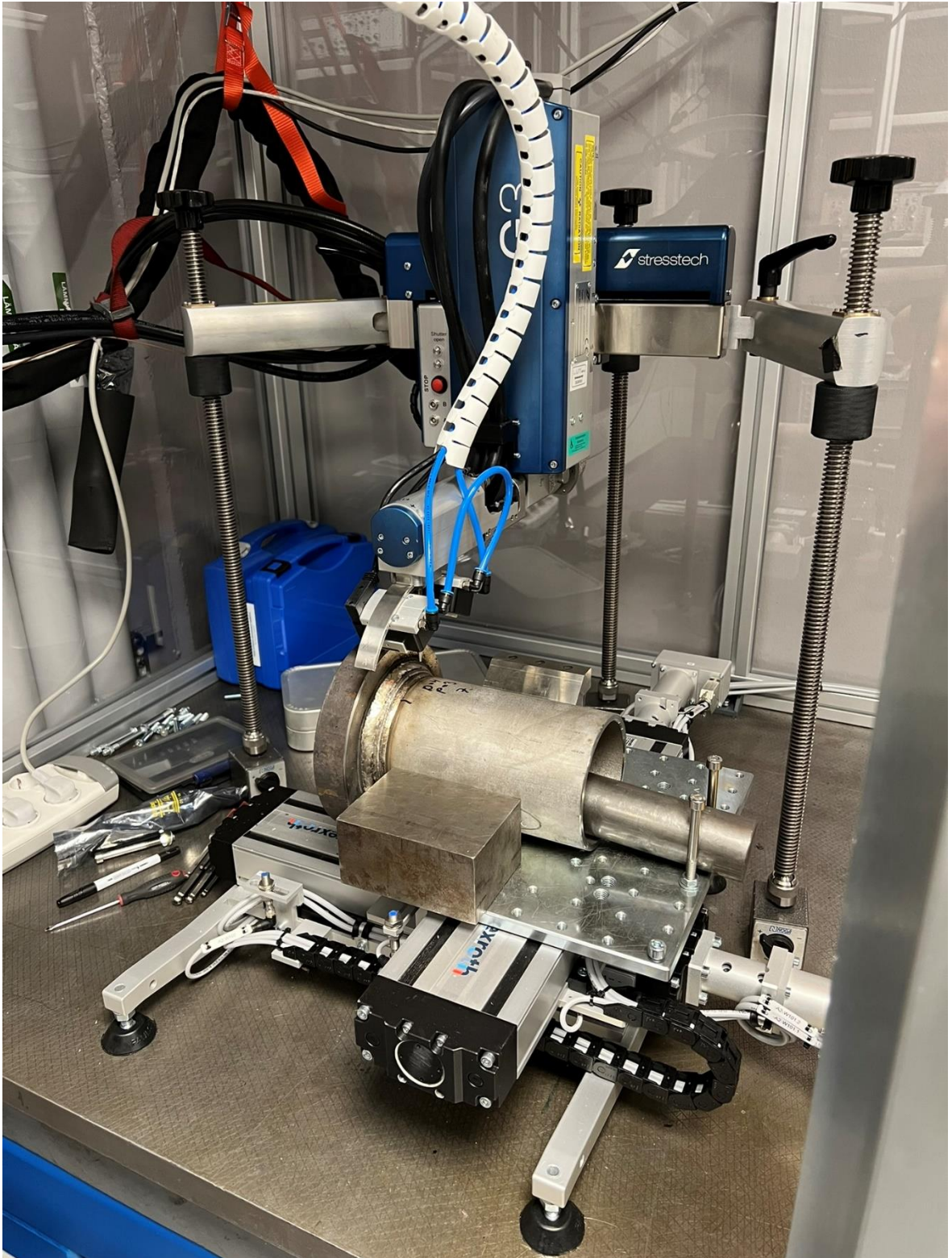
Kuva 5. Koekappale 316 L HFMI-jälkikäsitellyssä teholla 10

### 3.4 Jännösjännitykset

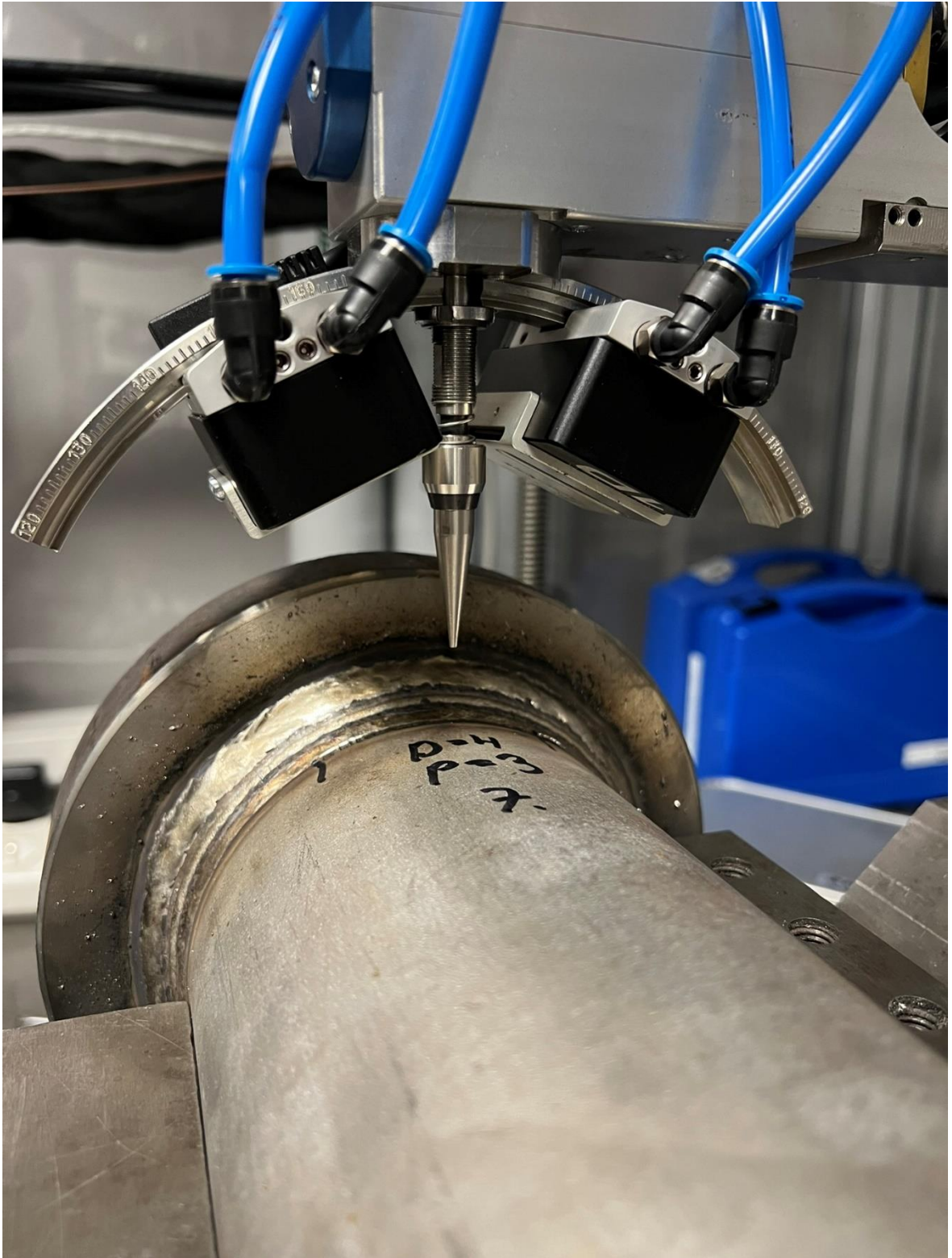
Jännösjännitykset mitataan Teräsrakenteiden laboratorion Xstress G3 röntgendiffraktiolaitteella (Kuva 6). Koekappaleista mitataan neljä eri kohtaa, joista kolme on jälkikäsiteltyjä kohtia ja yksi jälkikäsittelemätön. Tällöin voidaan verrata jälkikäsitteilyn vaikutusta hitsin rajaviivan jännösjännityksiin. Röntgendiffraktiolaite lähettää röntgensäteilyä tutkittavaan kohtaan ja mittaa Braggin lain mukaan sironneen säteilyn. Kuvan 6. röntgendiffraktiolaite mittaa jännösjännityksiä noin yhden neliömillimetrin alueelta ja se kohdistetaan HFMI-jälkikäsitteystä syntyneen uran pohjalle. Taulukossa 4. esitetään tässä tutkimuksessa käytetyt mittaussparametrit sekä röntgenputken materiaali.

Taulukko 4. Röntgendiffraktiolaitteen mittaussparametrit jännösjännitysten mittaamiselle

Selite	Arvo tai materiaali
Säteen syöttöaika	10 sekuntia
Kallistusten määrä (oikealle / vasemmalle)	5 / 5
Kallistuskulma	-30°/30°
Kallistusoskillaatio	+1°
Putken materiaali	Magnesium



Kuva 6. Xstress G3 röntgendiffraktioliitteessa 904 L koekappale jäännösännitysmittauksessa.



Kuva 7. Keskellä putki, josta röntgensäteet suunnataan jälkikäsittelystä aiheutuneeseen uraan. Mustat osat vastaanottavat diffraktoituneet röntgensäteet.

Jäännösjännitysten mittaus aloitetaan HFMI-jälkikäsittelystä syntyneen uran pohjalta ja se merkitään pisteenä nolla. Nollapistestä edetään laipasta pois päin kohti putken aukinaista päätä 1 mm välein. Nollapisteen lisäksi otetaan viisi mittauspistettä, näin mittauspisteitä on yhteensä kuusi. Kuvassa 8 Nähdään nuoli, joka osoittaa mittauspisteiden suunnan.



Kuva 8. Sininen nuoli osoittaa suunnan, josta mittaukset otetaan.

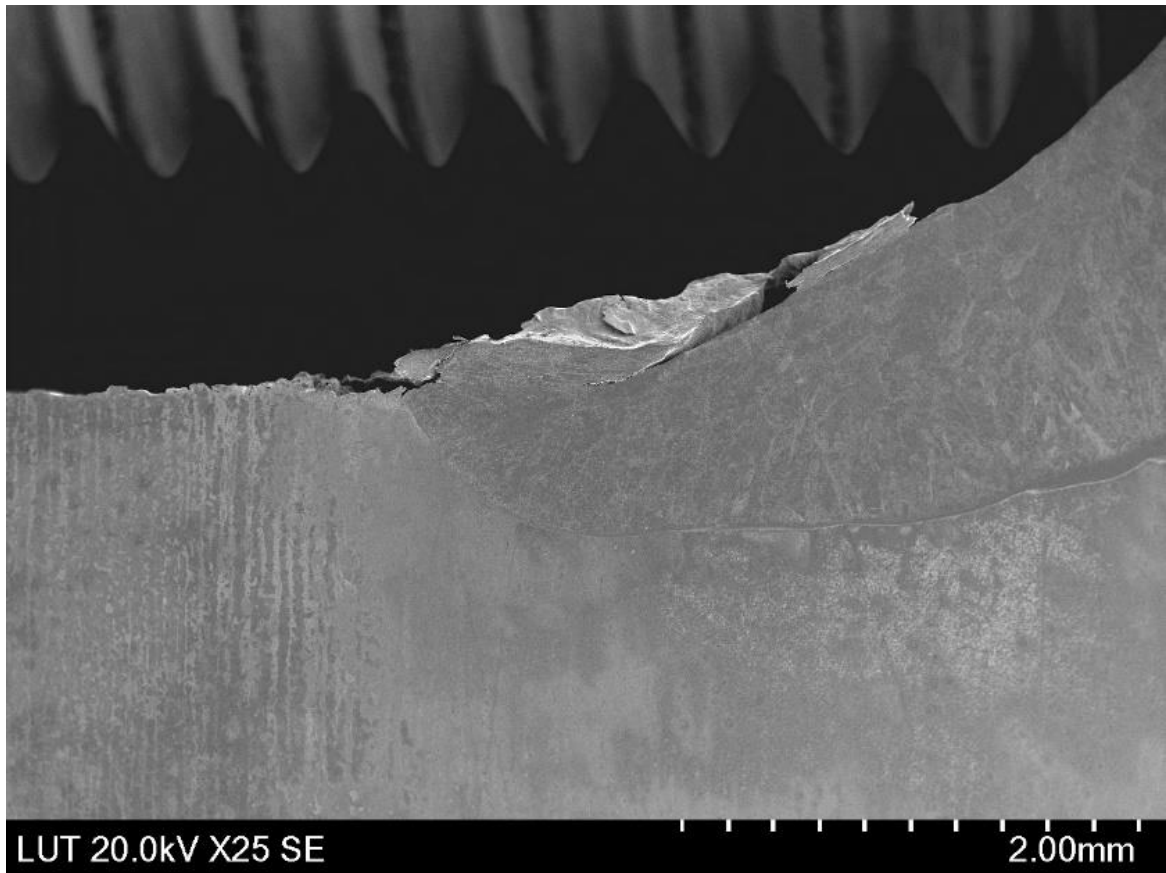
### 3.5 SEM-tutkimus

Hitsin rajaviivan alkuvikojen tutkimiseen käytetään SEM-menetelmää (Scanning Electron Microscopy). Mikroskooppikuvan muodostuminen perustuu laitteen lähettämään elektroni-suihkuun. Elektronit osuvat materiaaliin ja muuttavat suuntaa, tästä syntyy laitteelle erilaisia signaaleja. SEM-menetelmää käytetään laajasti kuvantamaan eri materiaalien mikroraken-netta. (Na et al., 2021., 1–2.)

Poikkileikkauksen kuvantamiseen putkilaippaliitoksesta leikataan muutaman senttimetrin pituiset palat. Jokaisesta putkilaippaliitoksesta leikataan kolme palaa eli yksi pala per jälkikäsittelyteholuokka. Tämän jälkeen palojen leikkauspinnat koneistetaan tasai-siksi hiontaa ja kiillotusta varten. Pinnat hiotaan ja kiillotetaan, jotta poikkileikkaukuvat olisivat tasalaatuisia ja mahdollisten hitsin rajaviivan alkuvikojen paikantaminen helpottuisi. Kiillotetut palat asetetaan elektronimikroskooppiin, jonka elektronisuihkun parametrejä sää-detään tarkkojen mikroskooppikuvien saavuttamiseksi. Taulukossa 5. on esimerkki kuvan-tamisparametrejä, joilla saadaan kuvan 9. kaltainen kuvatarkkuus.

Taulukko 5. SEM-laitteen kuvantamisparametrit kuvalle 10.

Parametrin nimi	Parametrin suuruus
Kiihdytysjännite	20 000 V
Työskentelyetäisyys (WD)	16.42 mm
Suurennus	25



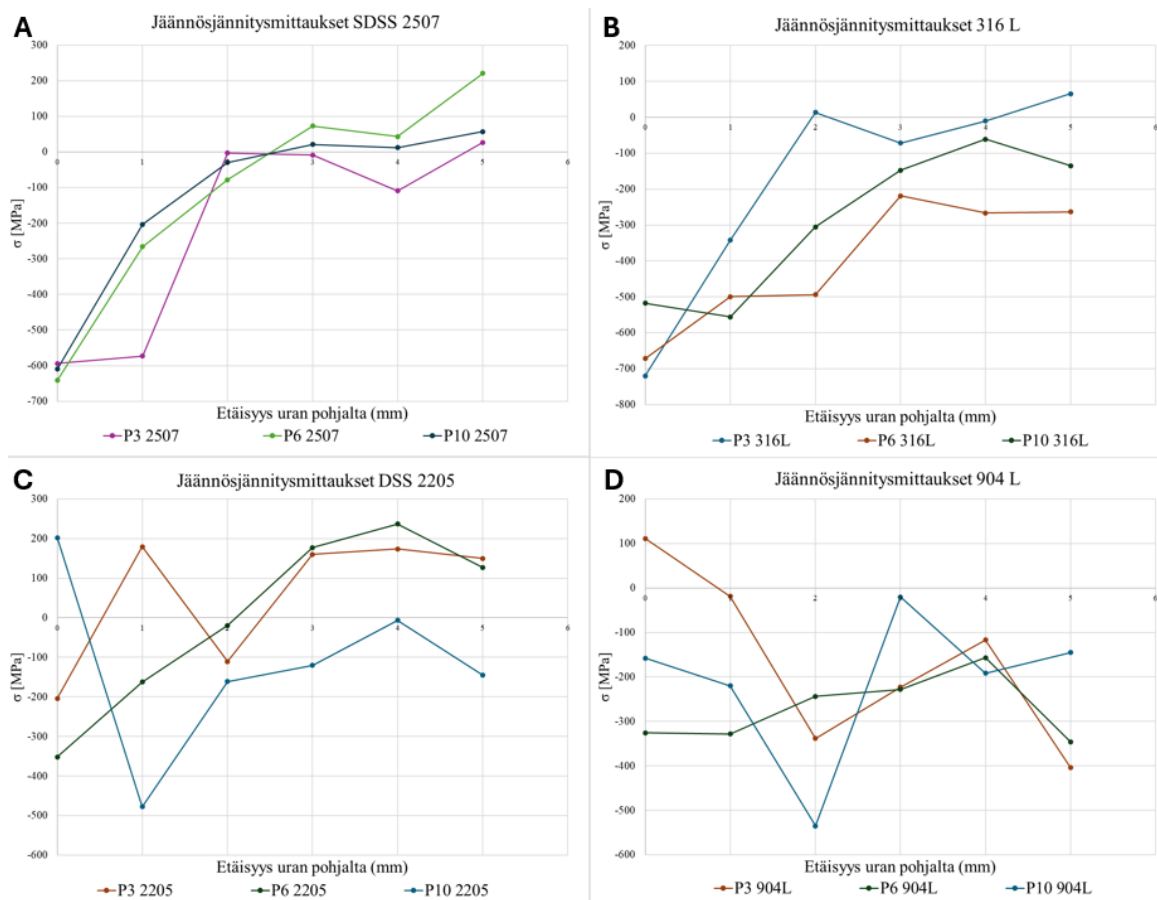
Kuva 9. SDSS 2507 SEM-kuva taulukon 5 kuvantamisparametreillä

## 4 Tulokset

Tässä luvussa esitellään mittauksista saatuja tuloksia hitsin rajaviivan paikalliselle muodolle, jäännösjännityksille sekä poikkileikkauksille.

### 4.1 Jäännösjännitykset

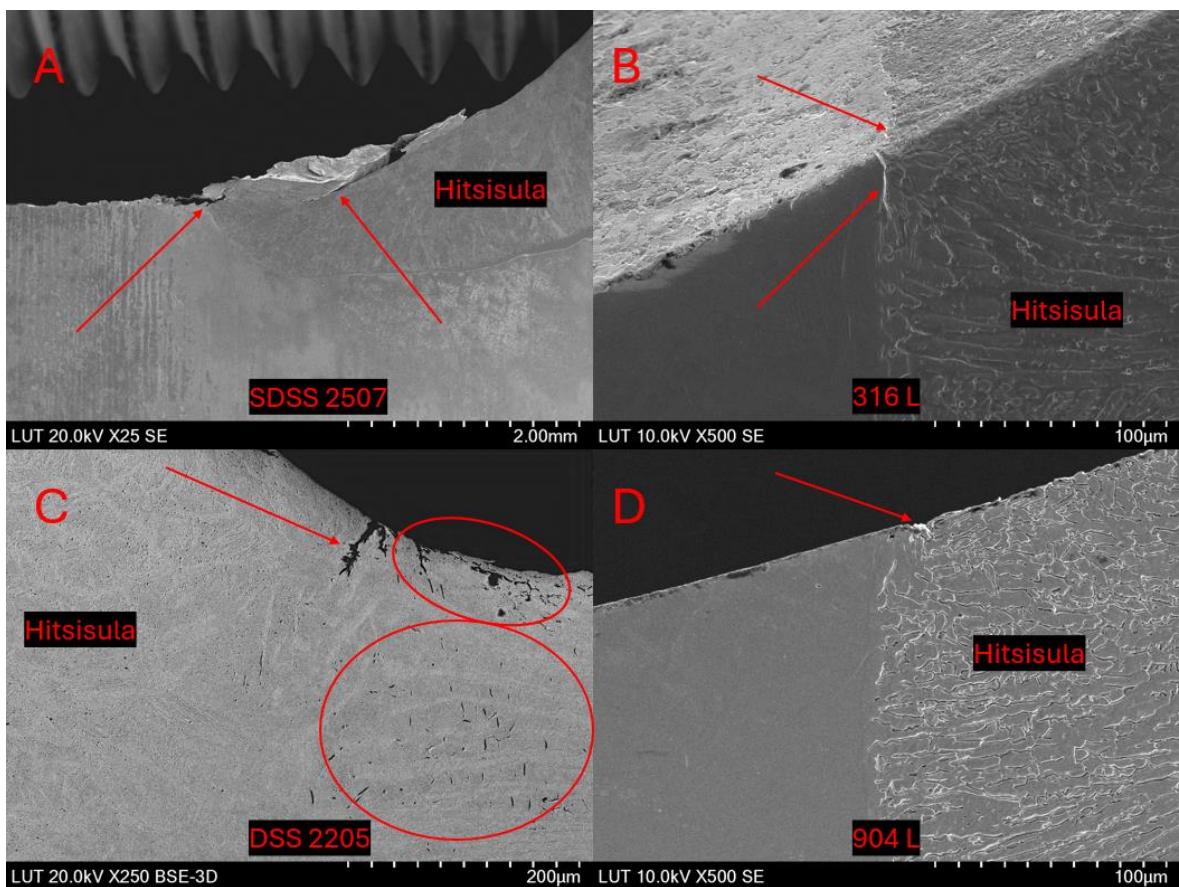
Koekappaleiden jäännösjännitykset mitattiin jälkikäsitteilyiden jälkeen. Jokaiselle jälkikäsitteilyn parametrille suoritettiin yksi mittaus jossa mitattiin nollapisteen lisäksi viisi mittapistettä yhden millimetrin välein. Röntgendiffraktiomittauksista saaduista jäännösjännityksistä mielenkiinnon kohtina olivat jäännösjännitysten huippuarvot. Jäännösjännitysten voidaan olettaa syntyvän jälkikäsitteilyn kannalta rakenteen kriittisimpään kohtaan eli hitsin rajaviivalle. Toinen mielenkiinnon kohta oli jäännösjännitysten jakauma materiaalissa.



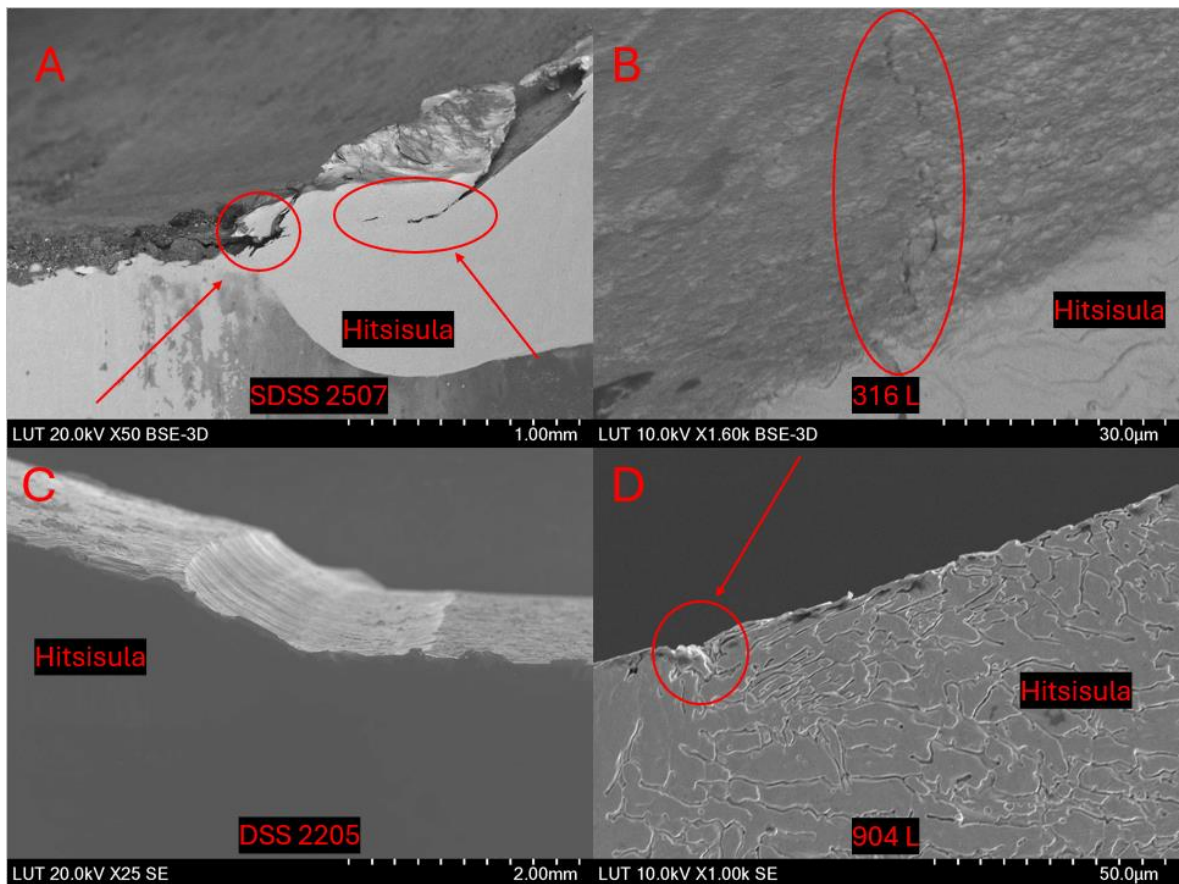
Kuva 10. Jäännösjännitysmittausten tulokset, joissa P = prosessiparametri.

#### 4.2 Rajaviivan paikallinen geometria ja alkuviat

Työn ja ajan rajallisuuden vuoksi SEM-tutkimus suoritettiin vain jälkikäsittelyteholuokka 10 näytteille. Kuvantamisella tutkittiin hitsin rajaviivan paikallista geometriaa ja mahdollisia alkuvikoja. SEM-tutkimus suoritettiin säätämällä elektronimikroskoopin parametrejä, jotta voitiin saada tarkkoja kuvia jälkikäsittelyn vaikutuksista hitsin rajaviivaan. Kuvien kiinnostavimmat asiat olivat säröt hitsisulassa ja hitsin rajaviivassa, sillä epäedulliset muodonmuutokset ovat tärkeä osa liitoksen väsymiskestävyyden arviointia.



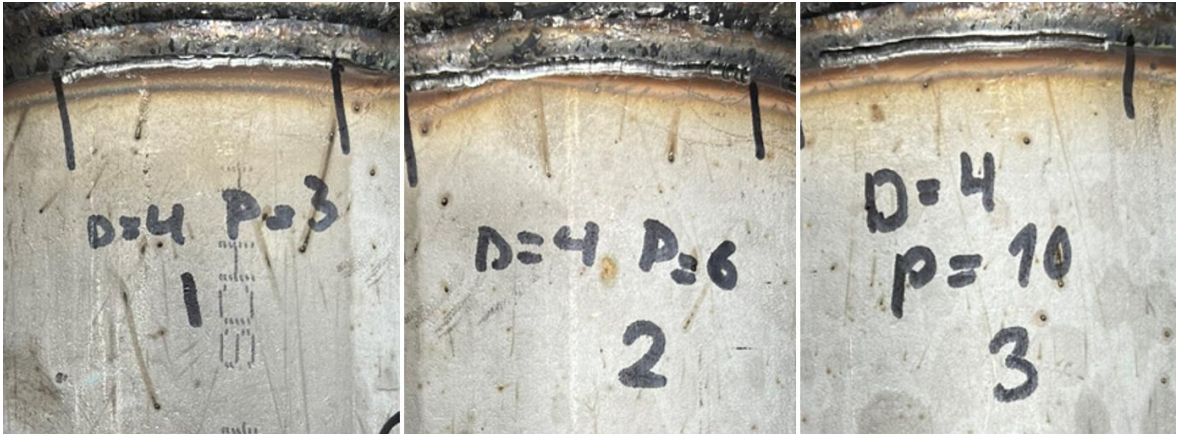
Kuva 11. SEM-kuvat materiaalien rajaviivalta. Nuolet ja ympyrät osoittavat alkuviat.



Kuva 12. SEM-kuvat lähempää ja kallistettuna. Kuva 12C on otettu kauempaa paikallisen muodon ja pinnan tarkastelua varten.

#### 4.3 Prosessiparametrien vaikutus rajaviivaan

Putkilaippaliitokset jälkikäsiteltiin kolmella eri teholuokalla ja yhdellä neulan päällä. Teholuokkien ja materiaalien välillä oli eroavaisuuksia, mikä huomattiin käsiteltäessä hitsin rajaviivaa pienimmällä teholla ( $P = 3$ ). Eri tehoilla oli myös eroavaisuuksia jälkikäsitteilylaitteen käyttäjän näkökulmasta.



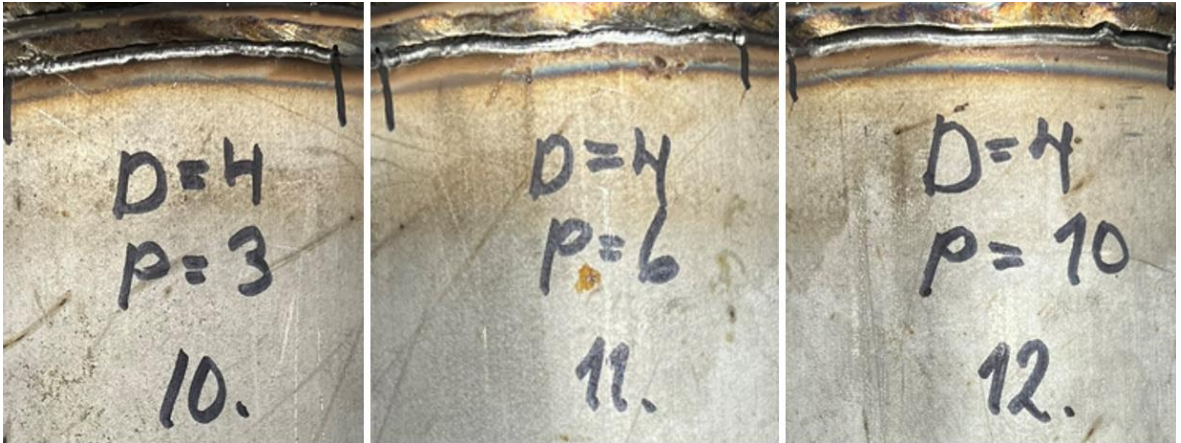
Kuva 13. Jälkikäsitteilyn vaikutus rajaviivaan eri prosessiparametreillä SDSS 2507-teräksellä.



Kuva 14. Jälkikäsitteilyn vaikutus rajaviivaan eri prosessiparametreillä 316 L-teräksellä



Kuva 15. Jälkikäsitteilyn vaikutus rajaviivaan eri prosessiparametreillä 904 L-teräksellä



Kuva 16. Jälkikäsittelyn vaikutus rajaviivaan eri prosessiparametreillä DSS 2205-teräksellä

## 5 Pohdinta

Kokeellisen osuuden jäännösjännitysmittauksissa havaittiin yhtäläisyyksiä sekä eroavaisuuksia materiaalien välillä. SDSS 2507 -teräksellä jäännösjännitysten huippuarvot olivat lähes yhtä suuria jokaisella prosessiparametrillä (Kuva 10A). Jäännösjännitysjakaumilla oli lähes samanlaiset trendit. Niissä jännitysten relaxoituminen tapahtui noin 2,5 mm kohdalla. Prosessiparametrien 6 ja 10 vaikutukset jäännösjännityksiin olivat jotakuinkin samat, mutta parametrillä 6 puristavat jännitykset olivat 2,5 millimetriin asti suuremmat kuin parametrin 10. Relaxoitumiskohdan jälkeen parametrillä 6 havaittiin rakenteessa olevan noin 200 MPa suuruinen vetäväjännitys. Parametrillä 3 rakenteeseen muodostui hieman muita parametrejä pienempi huippuarvo, mutta jännitysjakauma poikkesi muista parametreistä 0–2 mm välillä. Kokonaisuudessaan SDSS 2507-teräksellä jäännösjännitysjakaumat noudattivat yhtäläistä trendiä.

316 L -teräksen jäännösjännitysjakauma muistuttaa SDSS 2507-teräksen trendiä (Kuva 10B), mutta parametrien tuottamien puristavien jäännösjännitysten välillä oli enemmän eroavaisuutta. Huippuarvojen välillä oli pientä eroavaisuutta, mutta kaikki ovat yli -500 MPa. Parametrin 3 jäännösjännitysjakauma on SDSS 2507 -teräksen kanssa suhteellisen samanlainen, sillä rakenne saavuttaa relaxoitumispisteen 2 mm kohdalla ja jännitykset jäävät lähelle nollaa. Parametrit 6 ja 10 ovat keskenään jakaumiltaan samankaltaiset, mutta SDSS 2507 -teräkseen verrattuna 316 L:n rakenne ei relaxoidu 0–5 mm välisellä matkalla.

Mittauksissa havaittiin DSS 2205 -teräksen urassa olevien jännitysten välillä merkittäviä eroavaisuuksia verrattuna muihin teräslaatuihin. Parametreillä 3 ja 6 rajaviivalle saatiin tuotettua puristavaa jännitystä, mutta parametrillä 10 urassa olevat jännitykset olivat vetäviä (Kuva 10C). Jäännösjännitykset muuttuivat nopeasti parametrillä 10 heti 1 mm kohdalla puristaviksi ja muistuttavat siitä eteenpäin kuvien 10A ja 10B kaltaista jännitysjakaumaa. Parametreillä 3 ja 6 uran jäännösjännitykset olivat puristavia, mutta muuttuivat 2–2,5 mm jälkeen vetäviksi.

904 L:n jännitysjakauma poikkesi muiden terästen jännitysjakaumista. Uran ja 1 mm välillä puristavat jännitykset kasvavat eli kuvaaja menee alaspäin (Kuva 10D). Parametreillä 3 ja 10 puristavat jäännösjännitykset kasvavat aina 2 millimetriin saakka, jossa parametrillä 10

saavutettiin huippuarvo. 2 millimetristä eteenpäin kaikilla parametreilla havaittiin puristavien jännitysten vähenemistä nousevana suorana, mutta parametrin 10 jännitysten vaihteluväli on suurempi. 4 mm jälkeen parametreilla 3 ja 6 puristavajännitys kasvoi. 904 L kohdalla rakenteeseen jäi puristavia jäännösjännityksiä.

SDSS 2507 ja 316 L -teräkset muistuttivat trendeiltään toisiansa, huippuarvot saavutettiin uran pohjalla. Puristavat jännitykset laskivat etäisyyden kasvaessa uraan ja täten tasalaatuisuuden kannalta ne olivat parhaimpia materiaaleja mittaustuloksissa. DSS 2205 -teräksellä parametreilla 3 ja 6 puristavat jäännösjännitykset muuttuivat vetäviksi 2–2,5 mm jälkeen. 904 L-teräs poikkesi muista eniten, sillä rakenteeseen muodostunutta puristavaa jännitystä oli vielä 5 mm etäisyydellä uran pohjalta. 904 L ja DSS 2205 -terästen jäännösjännitykset eivät siis käyttäyty yhtä loogisesti kuin 316 L ja SDSS 2507 -teräkset kun jälkikäsitteilytehoa kasvatetaan. Syyn selvittämiseksi tarvitaan lisätutkimuksia.

SEM-kuvissa havaittiin merkittäviä alkuvikoja väsymiskestävyuden kannalta. SDSS 2507 -teräksellä hitsisulasta löydettiin hieman yli 2 mm pituinen särö ja sularajasta löydettiin kuopan kaltainen muodonmuutos jossa oli mikrosärö (Kuva 11A ja Kuva 12A). 316 L-teräksen sularajalta löydettiin noin 200 µm pituinen särö, joka jatkui eteenpäin kohtisuorassa kappaleen reunaa kohden (Kuva 11B ja Kuva 12B). DSS 2205-teräksen SEM-tutkimuksista löydettiin merkittävän kokoinen mikrosärö hitsisulan rajalta, joka oli ydintynyt kohtisuorassa pintaan nähden. Pinta oli myös rosoista ja syvemmillä pinnasta havaittiin pientä huokoisuutta (Kuva 11C). DSS 2205-teräksen jälkikäsitteilyurassa havaittiin myös epätasaisuutta kauttaaltaan (Kuva 12C). 904 L poikkesi muista teräsluokista, sillä siirtymä hitsisulasta perusmateriaaliin oli tasainen eikä kuvassa ollut havaittavissa merkittäviä mikrosäröjä tai huokoisuutta (Kuva 11D). Hitsisulan rajan läheisyydestä löydettiin kuitenkin pieni muodonmuutos suurennetulla kuvalla (Kuva 12D). Vaikka 904 L oli muihin teräksiin verrattuna tasalaatuinen, ei voida varmasti sanoa etteikö muualla näytekappaleen hitsisulassa olisi ollut epäjatkuvuuksia tai mikrosäröjä. SEM-tutkimus suoritettiin vain näytteille, joissa HFMI-laitetta oli käytetty prosessiparametrilla 10. SEM-kuvien vähäinen määrä johtui ajan rajallisuudesta.

Käsiteltäessä DSS 2205 -terästä huomattiin vaikeuksia putkilaippaliitoksen käsiteltävyydessä. Koekappaleen ollessa kiinnitettynä pöytään, käyttäjä joutui itse seuraamaan hitsin rajaviivaa. HFMI-laitetta piti kuljettaa kaarevaa ylämäkeä pitkin säilyttäen tukeva asento hitsin olkapäätä vasten. Ongelmia tuotti myös hitsin olkapään mataluus. Hyppimisen takia

laitetta oli haastavaa kuljettaa rajaviivaa pitkin, jolloin uraan muodostui jaksoittaisia aloitus- ja lopetuspisteitä (Kuva 14). Jälkikäsitteilyn haastavuus huomattiin erityisesti, kun jälkikäsitteilylaitteen teho oli 3. Kaikki ruostumattomat teräkset olivat kovia, mikä aiheutti laitteen hallinnan ja koekappaleiden muodon kannalta haasteita. Jouhevamman uran saavuttamiseksi koekappaleet tulisi asettaa laitteeseen, joka pyörittää putkilaippaliitosta vakionopeudella. Tällöin jälkikäsitteily olisi vaivattomampaa käsittelijän näkökulmasta.

### 5.1 Vertailua aiempiin tutkimuksiin

Jälkikäsitteilymenetelmänä HFMI-jälkikäsitteily on suhteellisen uusi, mutta tutkimukset siihen liittyen ovat suurimmaksi osaksi koskeneet hiili- ja suurlujuusteräksiä. Näissä tutkimuksissa on myös suoritettu konkreettinen väsytysoe, jolla on voitu mitata rakenteen todellinen väsymiskestävyys. HFMI-jälkikäsitteilyn hyödynnettävyyttä ruostumattomilla teräksillä on tutkittu suhteessa vähemmän ja niihin on lisätty väsytysoe. Muissa ruostumattomien terästen HFMI-jälkikäsitteilytutkimuksissa on käytetty vain yhtä prosessiparametriä, teho 10, mikä tekee tästä tutkimuksesta samankaltaisen SEM-kuvien osalta.

Tämä tutkimus eroaa muista ruostumattoman teräksen HFMI-jälkikäsitteilytutkimuksista tutkien prosessiparametrien vaikutusta hitsin rajaviivan alkuvikoihin sekä jäännösjännityksiin. Tutkimuksessa oli myös erilaisia ruostumattoman teräksen laatuja, joiden jälkikäsitteilytutkimuksia tutkittiin. Koekappaleiden muoto oli myös muihin tutkimuksiin verrattuna erilainen.

### 5.2 Virhetarkastelu, reliabiliteetti ja validiteetti

Mahdollisiin tulosten virheellisyyksiin vaikuttavat erityisesti koekappaleiden jälkikäsitteily. Koekappaleet oli kiinnitetty paikalleen pöytään jälkikäsitteilyn ajaksi, jolloin hitsin rajaviivojen käsitteily aiheutti käyttäjälle vaikeuksia tuottaa laitteella jouheva ura koekappaleeseen. Epätasainen ura voi vaikuttaa röntgendifraktiomittauksiin, sillä joissakin kohdissa uraa mikrorakenne ei kokenut suurta plastista muutosta. Ennen röntgendifraktiokoetta urista kohdat, joissa ura oli mahdollisimman tasalaatuinen tarkempien ja luotettavampien

jäännösjännitysmittausten saavuttamiseksi. SEM-kuvantamisessa kuvantamisparametrejä säädettiin tilanteen mukaan, jotta kuvista saatiin tarkkoja analysointia varten.

Tutkimuksen validiteetti on vahva, sillä käytetyt menetelmät ovat tieteellisesti todennettuja menetelmiä. HFMI-jälkikäsitelyn keskeisimmät vaikutukset ovat puristavat jäännösjännitykset ja hitsin rajaviivan paikallinen jouhevoittaminen (Marquis, Barsoum ja SpringerLink (Online service), 2016, 4). Röntgendiffraktiokoe on perinteinen tapa mitata rakenteen jäännösjännityksiä ilman, että rakennetta leikataan tai muokataan (Lin et al., 2017., 1). SEM-kuvantamismenetelmää käytetään yhä enemmän kuvantamaan esimerkiksi materiaalien kiderakennetta mikrometrin mittakaavassa (Na et al., 2021., 387).

Tutkimuksessa on kehityskohtia reliabiliteetin osalta, sillä jälkikäsitelyn laatu oli ajoittain vaillinaista käsiteltävien kappaleiden muodon takia. Vaikka kirjallisuuskatsaus tukee SEM-kuvien analysointia luotettavuutta heikentää se, että SEM-tutkimus suoritettiin ainoastaan yhdellä jälkikäsitelyteholla käsitellyistä näytteistä. Näin ollen SEM-tutkimuksen perusteella voitiin tehdä alustavia havaintoja HFMI-jälkikäsitelymenetelmän soveltuvuudesta ruostumattoman teräksen putkilaippaliitoksilla.

### 5.3 Tulosten yleistettävyys, hyödynnettävyys ja jatkotutkimukset

Tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää suuntaa antavina lähtökohtina tuleville tutkimuksille ja jälkikäsitelyille. Tuloksia ja havaintoja voidaan hyödyntää myös tulevien tutkimusten kokeellisissa osuuksissa laadullisten asioiden huomioimisessa.

Tulevien jatkotutkimuksien kannalta koekappaleet tulisi asettaa putkea pyörivään laitteeseen, jotta jälkikäsitelyä ja sen laatua voitaisiin mahdollisesti parantaa käyttäjän näkökulmasta. Aihetta voisi myös rajata eri prosessiparametrien ja laitteiden välille, sillä aiemmissa tutkimuksissa on käytetty vain prosessiparametrejä 1 ja 10. Muita työkalupäitä olisi myös hyvä tutkia ruostumattomilla teräksillä niiden välisten erojen selvittämiseksi. 904 L ja DSS 2205 -teräksiä olisi syytä myös tutkia, sillä niillä ei ollut loogista käyttäytymistä kasvatettaessa jälkikäsitelytehoa.

## 6 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin HFMI-jälkikäsittelyn vaikutuksia putkilaippaliitoksiin, jotka oli valmistettu neljästä eri ruostumattomasta teräksestä. Työssä tarkasteltiin prosessiparametrien vaikutuksia hitsin rajaviivan jäännösjännityksiin, alkuvikoihin sekä paikalliseen geometriaan. Kokeellisen tutkimuksen tuloksista saatiin tärkeää tietoa jälkikäsittelyn vaikutuksista.

Useimpien materiaalien rajaviivoille saatiin tuotettua puristavia jäännösjännityksiä, mistä nousi positiivisessa valossa esiin 316 L- ja SDSS 2507 -teräkset. Näillä jäännösjännitykset käyttäytyivät loogisesti suhteessa prosessiparametrien kasvuun. Vastaavasti 904 L- ja DSS 2205 -terästen kohdalla jäännösjännityksissä oli epälineaarisuutta ja hajontaa prosessiparametrien välillä, mikä viittaa näiden terästen tarvitsevan lisätutkimuksia jälkikäsittelyn vaikutuksista. SEM-kuvissa havaittiin alkuvikoja monella materiaalilla, mutta 904 L erottui muista vähäisten alkuvikojen ja tasalaatuisuuden ansiosta.

- HFMI-jälkikäsittelyllä saatiin tuotettua putkilaippaliitoksiin puristavia jäännösjännityksiä
- 316 L ja SDSS 2507 noudattivat loogista jäännösjännitysjakaumaa.
- DSS 2205 ja 904 L vaativat lisätutkimuksia epälineaarisen jäännösjännitysjakauman vuoksi.
- SEM-tutkimuksessa materiaalien rajaviivoilta löydettiin merkittäviä alkuvikoja, joilla voi olla vaikutusta rakenteen väsymiskestävyYTEEN.

## 7 Lähdeet

- Afzali, N., Jabour, G., Stranghöner, N., & Langenberg, P. 2024. A comparative study into the fracture toughness properties of duplex stainless steels. *Journal of Constructional Steel Research* 212: 108283.
- Amuda, MOH. & Mridha, S. 2011. An Overview of Sensitization Dynamics in Ferritic Stainless Steel Welds. *International Journal of Corrosion* 2011(1): 305793.
- Bathias, C., & Pineau, A. 2010. *Fatigue of Materials and Structures*. London: ISTE.
- Björk, T., Mettänen, H., Ahola, A., Lindgren, M. ja Terva, J. 2018. Fatigue strength assessment of duplex and super-duplex stainless steels by 4R method. *Welding in the World* 62(6): 1285–1300.
- Böllinghaus, T. & Herold, H. 2005. *Hot Cracking Phenomena in Welds*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Guide SD. 2013. Structural Stainless Steel. *American Institute of Steel Construction: Chicago, IL, USA*.
- Hitsausinfo.fi. 2024 *Ruostumattoman Teräksen Hitsaus: Parhaat Käytännöt Ja Työkalut*. [Saatavissa: <https://hitsausinfo.fi/ruostumattoman-teraksen-hitsaus-parhaat-kaytannot-ja-tyokalut/>]. [Viitattu 3.3.2025]
- Hobbacher, A. F. & Baumgartner, J. 2024. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Jármai, K., Pahlke, H. & Farkas, J. 2014. Cost savings using different post-welding treatments on an I-beam subject to fatigue load. *Welding in the World* 58(5): 691–698.
- Kutz, M. 2002. *Handbook of Materials Selection*. New York: John Wiley & Sons.
- Liljas, M., Johansson, P., Liu, H. & Olsson, C. A. 2008. Development of a Lean Duplex Stainless Steel. *Steel Research International* 79(6): 466–473.
- Lin, J., Ma, N., Lei, Y. & Murakawa, H. 2017. Measurement of residual stress in arc welded lap joints by  $\cos\alpha$  X-ray diffraction method. *Journal of Materials Processing Technology* 243: 387–394.
- MacDonald, K. A. 2011. *Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures*. Oxford ;; Woodhead Pub.
- Marquis, G. & Barsoum, Z. 2016. *IIW Recommendations for the HFMI Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints*. Singapore: Springer Singapore.
- Na, J., Kim, G., Kang, S., Kim, S. & Lee, S. 2021. Deep learning-based discriminative re-focusing of scanning electron microscopy images for materials science. *Acta Materialia* 214: 116987.

Niinomi, M. 2019. *Metals for Biomedical Devices*. Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing.

Outokumpu.fi. 2025 *Outokumpu Steel Finder*. [Saatavissa: <https://www.outokumpu.com/fi-fi/products/steel-finder>]. [Viitattu 7.3.2025].

Pereira, H. B., Panossian, Z., Baptista, I. P. & De Farias Azevedo, C. R. 2019. Investigation of stress corrosion cracking of austenitic, duplex and super duplex stainless steels under drop evaporation test using synthetic seawater. *Materials Research* 22(2).

Raj, P. N., Navaneethkrishnan, P. K., Sekar, K. & Joseph, M. A. 2020. Comparative study of mechanical, corrosion and erosion—corrosion properties of cast hyper-duplex and super-duplex stainless steels. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 27(7): 954–961.

Rana, R. 2021. *High-Performance Ferrous Alloys*. Cham, Switzerland: Springer.

Rowe. 2012. *Advanced metal-forming technologies for automotive applications*. Teoksessa: Toim. Anonymous United Kingdom: Elsevier Science & Technology.

SFS-EN 10088:2024. *Ruostumattomat teräkset. Ruostumattomien terästen luettelo*. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1011-1:2009. *Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituksset. Osa 1: Yleisohjeet kaarihitsaukselle*. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1011-3:2018. *Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuosituksset. Osa 3: Ruostumattomien terästen kaarihitsaus*. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS 3052:2020. *Hitsaussanasto. Yleistermi*. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Shirzadi, A., Jackson, S., Jackson, S. & Shirzadi, A. 2014. *Structural Alloys for Power Plants - Operational Challenges and High-Temperature Materials*. Chantilly: Elsevier.

Singh, R. 2020. *Applied Welding Engineering - Processes, Codes, and Standards (3rd Edition)*. Chantilly: Elsevier.

Stephens, R. I., Fuchs, H. O. & Stephens, R. R. 2000. *Metal Fatigue in Engineering*. Place of publication not identified: Wiley Interscience Imprint.

Weman, K. 2012. *Welding Processes Handbook (2nd Edition)*. Chantilly: Woodhead Publishing.