

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

TIG-JÄLKIKÄSITELTYJEN HITSILIITOSTEN JÄÄNNÖSJÄNNITYSTEN  
KARAKTERISOINTI

CHARACTERIZATION OF RESIDUAL STRESSES IN TIG-DRESSED WELDED  
JOINTS

Lappeenrannassa 6.5.2021

Sami Simola

Tarkastaja Antti Ahola, TkT

## **TIIVISTELMÄ**

LUT-YLIOPISTO  
LUT School of Energy Systems  
LUT Kone

Sami Simola

### **TIG-jälkikäsiteltyjen hitsiliitosten jäännösjännitysten karakterisointi**

Kandidaatintyö

2021

22 sivua, 6 kuvaa, 0 yhtälöä, 4 taulukkoa, 0 liitettä

Tarkastaja: Antti Ahola, TkT

Ohjaaja: Antti Ahola, TkT

Hakusanat: 4R-menetelmä, TIG-jälkikäsitely, jäännösjännitys, väsymiskestävyys

Kandidaatintyö tehdään LUT-yliopiston teräsrakenteiden laboratoriolle. Työn tavoitteena on karakterisoida TIG-jälkikäsitelyn vaikutusta hiili-mangaaniteräksille tehtyjen hitsattujen liitosten jäännösjännityksiin väsymiskestävyuden tarkempaa määrittämistä varten. Työ suoritetaan kirjallisuustutkielmana hyödyntäen aihealueen kirjallisuutta jota on käytettävissä muun muassa SCOPUS tietokannan välityksellä.

Aihealueeseen liittyviä testikohtaisia tietoja kuten materiaaliominaisuudet, TIG-jälkikäsitelyllä saavutettu rajaviivan pyörityssäteen muutos ja mitatut jäännösjännitykset ennen ja jälkeen TIG-jälkikäsitelyn taulukoidaan. Lisäksi yritetään tunnistaa jäännösjännitysten suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ja muita tapauskohtaisesti oleellisia tietoja.

Jäännösjännitysten havaittiin olevan suurempia materiaaleilla, joilla on suurempi myötölujuus ja hitsatun kappaleen geometrian todettiin olevan merkitsevin tekijä jäännösjännitysten syntymisessä. Lisäksi jännitysten jakautuminen oli epätasaisempaa jälkikäsitellyn alueen lähellä ja jännitysten suuruus oli kasvanut hitsin jälkeiseen tilaan nähtynä kaikilla paitsi yhdellä testikappaleen geometrialla. Tutkielmaan löytyneiden tietojen vähäisyys johtuu suurelta vajaanaisesta testikappaleiden mittauksesta ja tietojen ilmoituksesta. Lisäksi havaittiin että jäännösjännitysten tutkintaa jälkikäsiteltyjen hitsisaumojen läheisyydessä on edistettävä.

## **ABSTRACT**

LUT University  
LUT School of Energy Systems  
LUT Mechanical Engineering

Sami Simola

### **Characterization of residual stresses in TIG-dressed welded joints**

Bachelor's thesis

2021

22 pages, 6 figures, 0 equations, 4 tables, 0 appendices

Examiner: Antti Ahola, D. Sc. (Tech.)

Keywords: TIG-dressing, residual stress, 4R method, fatigue strength

The bachelor's thesis is made for the Laboratory of Steel Structures at LUT University. The aim of this thesis is to characterize residual stresses of TIG-dressed welded joints on carbon-manganese steel for use in better determining fatigue strength. The thesis is carried out as a literature study using relevant literature which is available as an example through SCOPUS database.

Applicable information on a case-by-case basis from tests such as material properties, achieved increase of weld toe radius using TIG-dressing and measured residual stresses after TIG-dressing are collected. Additionally, attempts are made to identify any major contributors to scale of residual stresses and other notable information of tests.

Residual stresses were observed to be higher on materials with higher yield strength and geometry of welded sample was found to be the major contributing factor to formation of residual stress. The distribution of stresses was also less homogenous after dressing and the stress levels had risen compared to as welded state on all except one test geometry. Lack of different test cases is largely due to lack of research with applicable or complete data due to unmeasured or unpublished properties of samples. It was also found that increased measuring of residual stresses near the TIG-dressed area has to be carried out.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>TIIVISTELMÄ .....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>SISÄLLYSLUETTELO .....</b>	<b>4</b>
<b>SYMBOLI- ja lyhenneLUETTELO.....</b>	<b>5</b>
<b>1 JOHDANTO.....</b>	<b>6</b>
<b>2 TIG-JÄLKIKÄSITTELY .....</b>	<b>8</b>
2.1 Hitsin valmistelu .....	8
2.2 Materiaalikohtaiset välineet .....	9
2.3 Saavutettu parannus .....	9
<b>3 JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET .....</b>	<b>10</b>
3.1 Hitsausmuodonmuutosten vaikutus väsymiseen .....	10
3.2 Jäännösjännitysten merkitys väsymisessä .....	11
3.3 Tulokset .....	11
3.4 Tulosten tarkastelu.....	16
<b>4 POHDINTA.....</b>	<b>18</b>
<b>5 JOHTOPÄÄTÖKSET.....</b>	<b>19</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>20</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$a$	a-mitta [mm]
$f_y, R_{p,0.2}$	Myötölujuus [MPa]
$\sigma_{res}$	Jäännösjännitys [MPa]
$m$	S-N käyrän kaltevuus jännityssykleille
$R$	Jännityssuhde
$R_m$	Materiaalin lujuus
$r$	Hitsin rajaviivan pyöristyssäde
$t$	Levyn paksuus [mm]
4R	Uusi lovijännitysmenetelmä: $R, R_m, \sigma_{res}, r$
ASW	As welded (hitsauksen jälkeinen tila)
FAT	Väsymisloukka
HFMI	High frequency mechanical impact
HiFIT	Hight frequency impact treatment
IIW	International Institute of Welding
LG	Longitudinal Gusset (Pituussuuntainen vahvike)
NLCT	Non-load-carrying T-joint (Kuormaa kantamaton T-liitos)
NLCX	Non-load-carrying X-joint (Kuormaa kantamaton X-liitos)
TIG	Tungsten-inert-gas (TIG-hitsaus)

## 1 JOHDANTO

Kirjallisuustutkielman tehtävänä on määrittää tungsten-inert-gas (TIG)-jälkikäsittelyn aiheuttamia jäännösjännityksiä hitsattuihin liitoksiin niiden väsymiskestävyyden määrittämistä varten muun muassa 4R-menetelmää käyttäen. Selvityksen rajauksina ovat materiaalina hiili-mangaaniteräket ja niihin tehtyjen hitsausliitosten ja TIG-jälkikäsittelyjen jäännösjännitykset ja jäännösjännitykset hitsin rajaviivalla. Työ toteutetaan kirjallisuustutkielmana.

Tutkielmassa käytettyjä hakusanoja ovat muun muassa TIG-dressing, TIG-jälkikäsittely ja jäännösjännitys. Tutkielman aihealueeseen liittyviä hakusanoja käytetään tietokantahaussa kuten SCOPUS ja löytyneitä artikkeleita, joiden sisältö on aihealueeseen kuuluvaa, käytetään tietojen keräämiseen. Lisäksi työn teettäjät tarjoaa joitakin aihealueeseen kuuluvia artikkeleita. Tutkimusta ohjaavia kysymyksiä ovat miten TIG-jälkikäsittely vaikuttaa jäännösjännityksiin, onko perusmateriaalilla merkitystä jäännösjännitysten muodostumiseen, mikä ohjaa jäännösjännitysten muodostumista ja voiko jäännösjännitysten muodostumiseen vaikuttaa.

TIG-jälkikäsittelyllä pyritään parantamaan hitsin rajaviivan geometriaa, joten sen aiheuttamien jäännösjännitysten tutkiminen on ollut suhteellisen vähäistä verrattuna muihin menetelmiin, joissa väsymiskestävyyttä pyritään parantamaan poistamalla jäännösjännityksiä hitsin rajaviivan alueelta tai tuottamalla puristusjännitystä rajaviivan alueelle. Hitsin rajaviivan TIG-jälkikäsittely kuitenkin muuttaa myös rakenteen jäännösjännityksiä, ja jäännösjännitysten suuruudella on oleellista merkitystä rakenteen väsymislujouden ja kuormituskäyttäytymisen arvioinnissa.

Tutkimuksissa, joissa käsittelynjälkeinen jäännösjännitys on mitattu, on mukana TIG-jälkikäsittelyn lisäksi usein High frequency impact treatment (HiFIT) -jälkikäsittely, joka kuuluu High frequency mechanical impact (HFMI)-menetelmiin. HiFIT jälkikäsittelyssä pyritään tuottamaan hitsin rajaviivan alueelle puristusta ja samalla poistamaan pieniä rajaviivan virheitä ja luomaan juohevampi geometria hitsin ja perusmateriaalin väliselle

liittymälle. HiFIT-käsittelyn jäännösjännitysten kartoitus on mahdollisesti siten johtanut myös samassa tutkimuksessa tehtävien TIG-käsittelyjen jäännösjännitysten kartoitukseen.

Molemmille jälkikäsittelytyypeille ja niille hyväksytyille väsymiskestävyysluokkien parannuksille on annettu ohjeita International Institute of Welding (IIW):n ohjeistuksissa. Tässä tutkielmassa kerättyjen tulosten tarkoituksena on helpottaa TIG-jälkikäsittelyn aiheuttamien jäännösjännitysten laajempaa kartoitusta ja edesauttaa 4R-menetelmässä käytetyn tiedon kerryttämistä.

4R-menetelmä on Lappeenrannan teknillisen yliopiston Teräsrakenteiden laboratoriossa kehitetty loviännitysmenetelmä, jolla määritetään hitsattujen liitosten väsymiskestävyyttä. Menetelmässä huomioidaan hitsin rajaviivan pyöristyssäde  $r$ , materiaalin lujuus  $R_m$ , jäännösjännitys  $\sigma_{res}$  ja jännityssuhde  $R$  [1, s. 1285-1300].

## 2 TIG-JÄLKIKÄSITTELY

TIG-jälkikäsitteilyn tarkoituksena on uudelleensulattaa materiaalia hitsin rajaviivalta. Tällöin rajaviivan virheitä poistetaan ja saadaan aikaan juohevampi liittymä hitsin pinnasta perusmateriaaliin vähentäen rajaviivan paikallista jännityskeskittymää. Jännityskeskittymän pieneneminen johtaa parempaan rakenteen väsymiskestävyyteen [2, s. 13-20].

### 2.1 Hitsin valmistelu

TIG-jälkikäsitteily on herkkä yleisille epäpuhtauksille ja hitsi tulee siksi ensin puhdistaa kuonasta kuten kuvassa 1, harjata perusteellisesti teräsharjalla kuvassa 2 a esitetyllä tavalla ja tarvittaessa hioa kuten kuvassa 2 b. Hitsin voi puhdistaa myös siihen tarkoitetuilla kemiallisilla puhdistusmenetelmillä. Epäpuhtaudet TIG-jälkikäsitteilyssä johtavat monesti huokoisuuteen, joka heikentää hitsin väsymiskestävyyttä merkittävästi ja voi johtaa ennenaikaiseen rakenteen hajoamiseen tai jopa alentaa kestävyyttä hitsauksen jälkeiseen tilaan verrattuna [2, s. 14].



**Kuva 1.** Hitsisauma kuonanpoistoa ennen (alla) ja jälkeen. [3]





**Kuvat 2 a ja b.** Vasemmalla hitsatun sauman harjaus kulmahiomakoneen harjatyökälulla [4] ja oikealla sauman hionta kulmahiomakoneella. [5]

## 2.2 Materiaalikohtaiset välineet

Käsittelyssä käytettävät välineet ovat samat kuin TIG-hitsauksessa materiaalille yleisesti. Ruostumattomille duplex-teräksille suositellaan kuitenkin suojakaasuseokseen lisättäväksi 1 tai 2 % typpeä austeniitti-ferriittitasapainon huonolaatuisten muutosten ehkäisemiseksi [2, s. 14].

## 2.3 Saavutettu parannus

Hitsattujen liitosten väsymiskestävyys ei lähtökohtaisesti määräydy materiaalin lujuudesta niiden hitsatussa tilassa yleisesti hyväksytyyn tulkinnan mukaan. Jälkikäsittelyjen tuoman väsymiskestävyuden parannus voi kuitenkin olla riippuvaista materiaalista. TIG-jälkikäsittelyn on havaittu nostavan FAT-luokkaa eli standardoitua väsymiskestävyysluokkaa pitkittäissuuntaisilla vahvikkeilla jopa kolmen väsymisluokan verran. Lisäksi käsittely muuttaa S-N käyrän kulmaa otollisemmaksi mahdollistaen suuremman kuormitusten kestävyuden rajallisella kuormitusyökkien määrällä. Saavutettu kulman parannus on hitsatun tilan  $m = 3$  arvosta TIG-jälkikäsittelyn tilan  $m = 4$  arvoon [6, s. 411].

### 3 JÄÄNNÖSJÄNNITYKSET

Teräksen plastinen ja terminen muokkaaminen aiheuttaa materiaaliin sisäisiä jäännösjännityksiä, jotka jäävät pysyviksi ulkoisten kuormien poistamisen jälkeen. Esimerkkejä tällaisista prosesseista ovat kylmämuovaus, valssaus, hitsaus ja karkaisu.

Nopea jäähtyminen korkeista lämpötiloista tai epätasaisesti jakaantunut lämpötila aiheuttavat jäännösjännityksiä estämällä materiaalin vapaata sisäistä muodonmuutosta. Jäännösjännityksiä voidaan vähentää saattamalla materiaali päästölämpötilaan, jolloin alentunut myötölujuus sallii myötörajan ylittävien jännitysten relaxoitumisen. Uusien jännitysten syntymistä päästön jälkeen voidaan vähentää hidastamalla materiaalin jäähtymistä takaisin normaalitilaan. Hitsaamisen ja TIG-jälkikäsittelyn yhteydessä syntyviä jäännösjännityksiä voidaan vähentää myös nostamalla materiaalin lämpötilaa ennen prosessia.

#### 3.1 Hitsausmuodonmuutosten vaikutus väsymiseen

Hitsisulan jäähtymisestä aiheutuvat kutistusvoimat muuttavat rakenteen geometriaa ja johtavat suunnitellusta poikkeaviin kuormitustilanteisiin ja voimien jakautumiseen, mikä voi johtaa rakenteen ennen aikaiseen väsymiseen ja rakenteen pettämiseen. Geometrisia muodonmuutoksia voidaan kompensoida aiheuttamalla symmetrisiä kutistusvoimia kuten NLCX liitoksissa, joissa vastapuolen hitsit oikaisevat muotoaan muuttanutta rakenneta. Syntyviä muodonmuutoksia voidaan myös kompensoida ennakoimalla; esimerkiksi asettamalla NLCT kappaleen peruslevy lievään kulmaan vastakkaisessa suunnassa nähtynä hitsauksesta syntyvästä kokonaismuodonmuutoksesta. Estyvät ja estetyt geometriset muodonmuutokset hitsin kutistevuimista tuottavat jäännösjännityksiä.

TIG-jälkikäsittely aiheuttaa rakenteeseen muodonmuutoksia hitseistä aiheutuvien muodonmuutosten lisäksi, mikä korostuu epäsymmetrisillä hitsausrakenteilla kuten NLCT liitoksilla. Nämä kasvaneet muodonmuutokset aiheuttavat edellä kuvattuja poikkeavia jännitystilajoja, joiden vaikutuksia on tarkasteltu Ahola, Skriko ja Björk artikkelissa [7, s. 7].

### 3.2 Jäännösjännitysten merkitys väsymisessä

Jäännösjännityksillä voi olla sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia rakenteen kestävyydelle erityisesti väsyttävän kuormituksen tilanteissa. Puristusta aiheuttavat jäännösjännitykset liitosten alueella edesauttavat rakenteen korkeaa väsymiskestävyyttä vähentämällä kuormituksen tehollisen vetojännitysvaihtelun suuruutta. Täten vedolla olevat jäännösjännitykset heikentävät väsymiskestävyyttä kasvattamalla ulkoisten jännitysvaihteluiden tehollisuutta.

Jäännösjännitys vaihtelee suuruudeltaan ja suunnaltaan materiaalin pinnalla ja myös sisällä, joten rikkomattomien ja helppokäyttöisten mittausmenetelmien vajavaisuudesta johtuen ja suunnittelutyön parantamiseksi turvaudutaan taulukoitaviin lukuisiin testeihin perustuviin menetelmiin. Tapauskohtainen hajonta jännityksillä on kuitenkin suurta sekä jännitysten suuruuden ja sijainnin kohdalla, joten luotettavien tulosten aikaansaaminen on työlästä ja hidasta. Tästä johtuen IIW:n hyväksymä väsymiskestävyys (FAT)-luokan parannus on FAT 90 luokan tai alemmissa tilanteissa TIG-käsittelyn jälkeen ja voi olla suuruudeltaan vain kahden luokan verran hitsauksenjälkeisestä tilasta [2, s. 19].

### 3.3 Tulokset

Taulukoissa on esitetty kirjallisuustutkimuksen kootut tulokset. Taulukon 4 tulokset ovat samasta lähteestä ja niiden tarkoituksena on tuoda esille samassa kappaleessa esiintyvien jäännösjännitysten ja muiden muuttujien vaihteluväliä. Taulukoiden 1, 2 ja 3 kappaleet ovat joko longitudinal gusset (LG) tai non-load-carrying T-joint (NLCT) tyyppisiä ja taulukon 4 kappale on non-load-carrying X-joint (NLCX) tyyppiä. Liitostyyppit on havainnollistettu kuvissa 3, 4 ja 5.

**Taulukko 1.** Lähteistä [8], [9] ja [10] kootut tiedot hitsatuille ja TIG-jälkikäsitellyille LG ja NLCT kappaleille.

Lähde	[8]	[9]	[10]	[10]
<b>Materiaali</b>	St 52-3	St 52-3	S355N	S960QL
<b><math>f_y</math> tai <math>R_{p,0.2}</math> [MPa]</b>	400	384	-	-
<b>Sauma</b>	-	Piena	Piena	Piena
<b>Liitostyyppi</b>	NLCT	NLCT	LG	LG

*Taulukko 1 jatkuu. Lähteistä [8], [9] ja [10] kootut tiedot hitsatuille ja TIG-jälkikäsitellyille LG ja NLCT kappaleille.*

<b>t [mm]</b>	12.5	12.5	12	12
<b>a [mm]</b>	-	-	-	-
<b><math>\sigma_{res,min}</math> ASW [MPa]</b>	-	-	-	-
<b><math>\sigma_{res,max}</math> ASW [MPa]</b>	-	-	-	-
<b><math>\sigma_{res,avg}</math> ASW [MPa]</b>	-90	-100	100	-5
<b><math>\sigma_{res,min}</math> TIG [MPa]</b>	-	-80	-	-
<b><math>\sigma_{res,max}</math> TIG [MPa]</b>	-	-15	-	-
<b><math>\sigma_{res,avg}</math> TIG [MPa]</b>	-80	-48	5	145
<b>Tunkeuma [mm]</b>	~1.62	-	-	-
<b>Lämmöntuonti [KJ/mm]</b>	1.93	-	-	-
<b>TIG Jännite [V]</b>	-	19	-	-
<b>TIG Virta [A]</b>	-	110	-	-
<b>TIG Nopeus [mm/s]</b>	-	1.08	-	-
<b>Rajaviivan pyöristyssäde (ennen/jälkeen) [mm]</b>	4.11/ 6.25 - 12	4.11/6.25	0.6/5 - 10	0.6/5 - 10

*Taulukko 2. Lähteistä [6], [7], [11], [12] ja [13] kootut tiedot hitsatuille ja TIG-jälkikäsitellyille LG ja NLCT kappaleille.*

<b>Lähde</b>	[7]	[6]	[11]	[12] ja [13]
<b>Materiaali</b>	S1100	-	SM570	Strenx® 1100 Plus
<b><math>f_y</math> tai <math>R_{p,0.2}</math> [MPa]</b>	1100	615	555	1100
<b>Sauma</b>	Piena	Piena	Piena	Piena
<b>Liitostyyppi</b>	NLCT	LG	LG	NLCT
<b>t [mm]</b>	8	12	16 ja 12	8
<b>a [mm]</b>	5	-	-	4.59
<b><math>\sigma_{res,min}</math> ASW [MPa]</b>	-	-	-23	-396
<b><math>\sigma_{res,max}</math> ASW [MPa]</b>	42	-	213	42
<b><math>\sigma_{res,avg}</math> ASW [MPa]</b>	-171	600	95	-171

*Taulukko 2 jatkuu. Lähteistä [6], [7], [11], [12] ja [13] kootut tiedot hitsatuille ja TIG-jälkikäsitellyille LG ja NLCT kappaleille.*

$\sigma_{res,min}$ TIG [MPa]	-	-	173	-305
$\sigma_{res,max}$ TIG [MPa]	211	-	193	211
$\sigma_{res,avg}$ TIG [MPa]	52	175	183	52
Tunkeuma [mm]	-	-	-	-
Lämmöntuonti [KJ/mm]	-	-	-	-
TIG Jännite [V]	-	-	14	~27
TIG Virta [A]	-	-	150	~220
TIG Nopeus [mm/s]	-	-	1.33	7.8
Rajaviivan pyörityssäde (ennen/jälkeen) [mm]	0.35/6.4	0.5 - 1.5/ 0.95 - 24	0.8/3.1	0.35/6.44

*Taulukko 3. Lähteistä [14] ja [15] kootut tiedot hitsatuille ja TIG-jälkikäsitellyille LG ja NLCT kappaleille.*

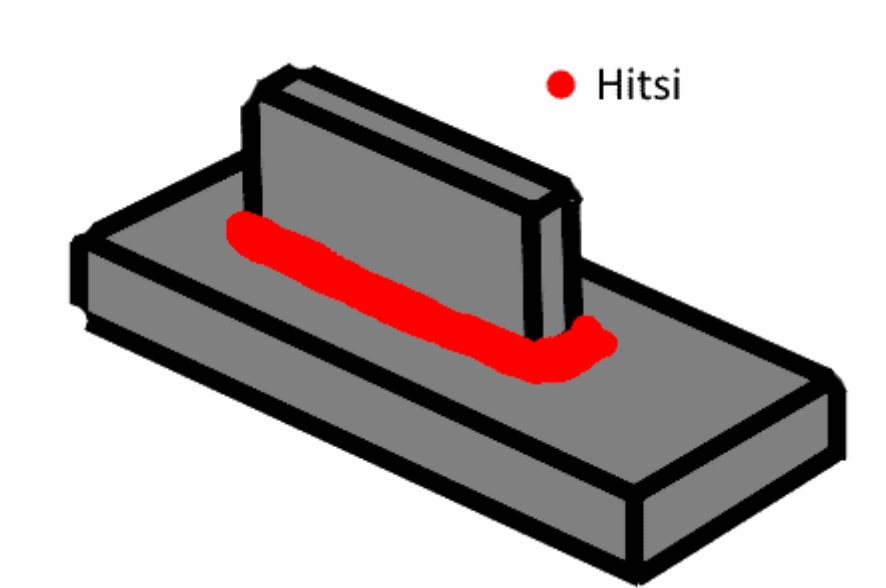
Lähde	[14]	[15]
Materiaali	-	Domex 700 MC
$f_y$ tai $R_{p,0.2}$ [MPa]	615	700
Sauma	Piena	Piena
Liitostyyppi	LG	LG
t [mm]	12	8
a [mm]	-	-
$\sigma_{res,min}$ ASW [MPa]	210	-
$\sigma_{res,max}$ ASW [MPa]	420	-
$\sigma_{res,avg}$ ASW [MPa]	315	320
$\sigma_{res,min}$ TIG [MPa]	190	-
$\sigma_{res,max}$ TIG [MPa]	665	-
$\sigma_{res,avg}$ TIG [MPa]	428	395
Tunkeuma [mm]	-	-

*Taulukko 3 jatkuu. Lähteistä [14] ja [15] kootut tiedot hitsatuille ja TIG-jälkikäsitellyille LG ja NLCT kappaleille.*

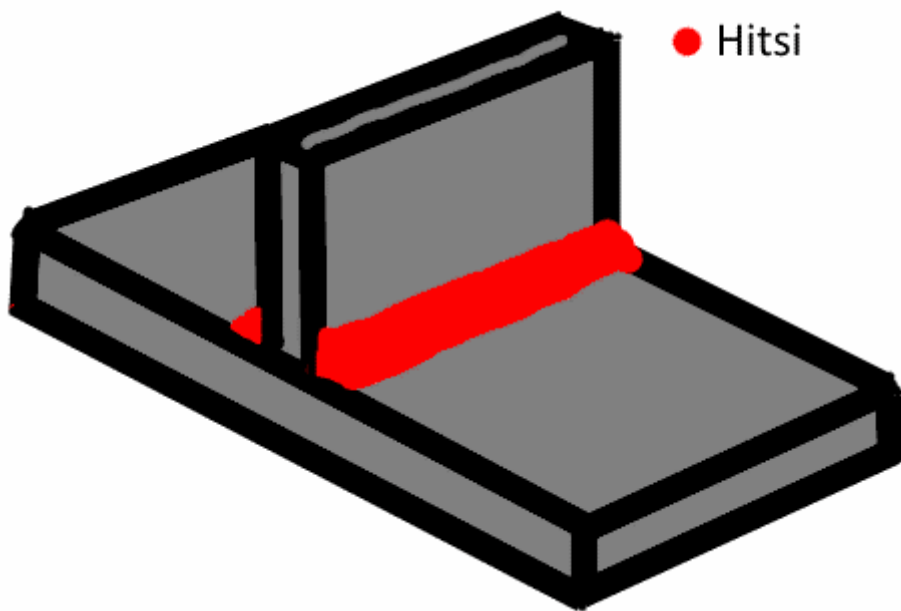
<b>Lämmöntuonti [KJ/mm]</b>	-	1.5
<b>TIG Jännite [V]</b>	-	13.4
<b>TIG Virta [A]</b>	-	170
<b>TIG Nopeus [mm/s]</b>	-	1.5
<b>Rajaviivan pyöristyssäde (ennen/jälkeen) [mm]</b>	-	0.2 – 1.2/ 1.1 – 8.3

*Taulukko 4. Kootut tiedot NLCX kappaleelle [16]*

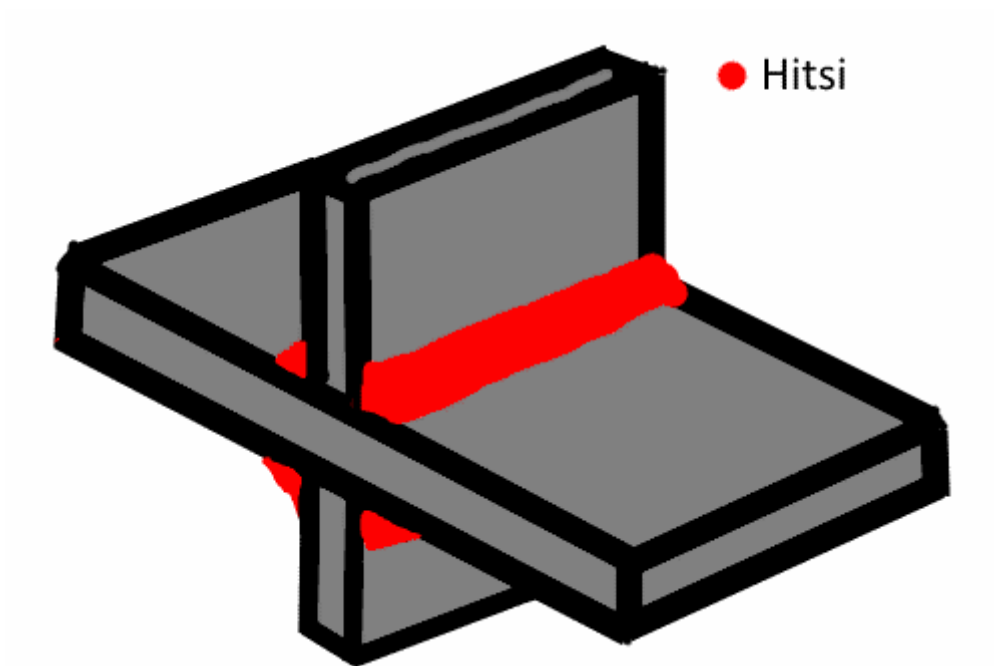
<b>Materiaali</b>	<b>Strenx® 960 MC</b>			
$f_y$ tai $R_{p,0.2}$ [MPa]	960			
<b>Sauma</b>	Piena			
<b>Liitostyyppi</b>	NLCX			
<b>t [mm]</b>	8			
<b>a [mm]</b>	~5			
$\sigma_{res,min}$ ASW [MPa]	-	-	-	-
$\sigma_{res,max}$ ASW [MPa]	-	-	-	-
$\sigma_{res,avg}$ ASW [MPa]	100	200	-200	120
$\sigma_{res,min}$ TIG [MPa]	-	-	-	-
$\sigma_{res,max}$ TIG [MPa]	-	-	-	-
$\sigma_{res,avg}$ TIG [MPa]	-200	-600	-450	-200
<b>Tunkeuma [mm]</b>	-	-	-	-
<b>Lämmöntuonti [KJ/mm]</b>	0.42-0.59			
<b>TIG Jännite [V]</b>	13.2			
<b>TIG Virta [A]</b>	180			
<b>TIG Nopeus [mm/s]</b>	2.4-3.4			
<b>Rajaviivan pyöristyssäde (ennen/jälkeen) [mm]</b>	0.65 – 1.54/ 2.35 – 4.75			



**Kuva 3.** Longitudinal gusset (LG) liitos.



**Kuva 4.** Non-load-carrying T-joint (NLCT) liitos.



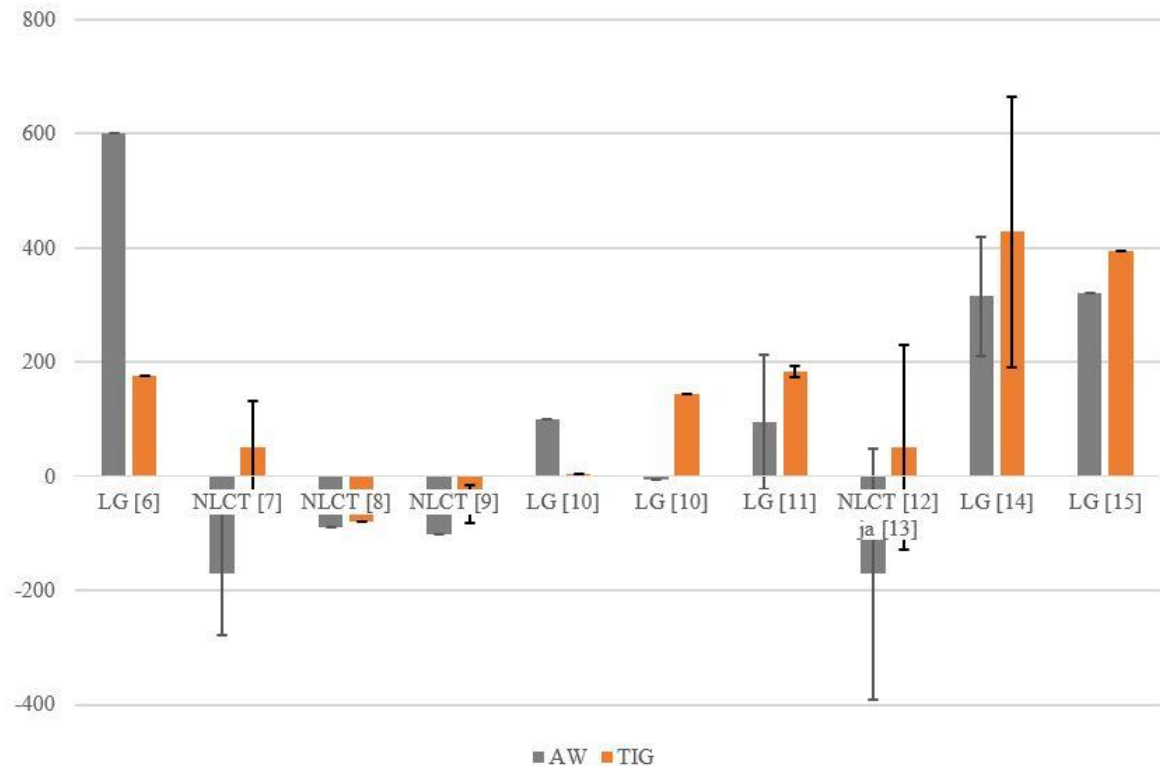
**Kuva 5.** Non-load-carrying X-joint (NLCX) liitos.

### 3.4 Tulosten tarkastelu

Perusmateriaalin suurempi myötölujuus sallii suurempien jäännösännitysten muodostumisen estämällä hitsin kutistumisvoimia aiheuttamasta muodonmuutoksia myötölujuutta pienemmillä voimilla. Jännitykset kasvavat myös vedon puolelle kaikilla paitsi Strenx® 960 MC teräksellä, jolla päinvastaisesti jäännösännitysten suuruus pienenee ja siirtyy paikoin huomattavan määrän puristukselle. Tämä voi tosin johtua NLCX kappaleen symmetrisestä asetelmasta ja hitsisaumoista ja vapaasti tapahtuvista muodonmuutoksista laboratoriokoekappaleissa.

Kuvassa 6 on esitettyä eri lähteiden testikappaleista mitatut keskijännitykset ja niiden hajonta suurimpaan ja pienimpään mitattuun arvoon. Kaikissa lähteissä minimi- ja maksimiarvoja ei ilmoitettu. Graafista käy myös ilmi, että jäännösännitysten suunta (puristus tai veto) on suurelta riippuvaista hitsatun kappaleen asetelmasta. LG kappaleet ovat huomattavasti suuremmalla vedolla ennen ja jälkeen TIG-jälkikäsittelyn.





**Kuva 6.** Lähteistä kootut arvot jäännösjännityksille ennen ja jälkeen TIG-jälkikäsitteilyn.

Suominen, Khurshid ja Parantainen [17, s. 183-186] ilmoittavat artikkelissaan LG kappaleilla, joiden levyaksuus on 8 mm ja perusmateriaaleina S690QL ja S960QL jäännösjännitysten olevan 150 MPa ja 100 MPa ennen käsittelyä ja käsittelyn jälkeen 100 MPa molemmilla materiaaleilla. Vastaavasti pienin jännitysmuutos TIG-jälkikäsitteilyllä on Al-Karawi, Manai ja Al-Emrani [8] artikkelin tuloksissa, joissa St 52-3 teräksestä tehty testikappale levyaksuudella 12.5 mm muuttaa jännitysarvoa -80 MPa:sta -90 MPa:n. Suurin muutos on Yıldırım [6] tuloksilla, joissa 12 mm levyaksuudella ja ilmoittamattomalla teräksellä jäännösjännitys muuttuu 600 MPa:sta 175 MPa:n.

Monissa lähteistä on ilmoitettu jäännösjännitykset rajaviivan läheisyydessä ennen ja jälkeen käsittelyn. Näissä lähteissä jännitysten havaittiin olevan suurimmillaan 1-3mm:n päässä

alkuperäisestä rajaviivasta. Tämän tutkielman tarkoituksena on kuitenkin kartoittaa rajaviivan jäännösjännityksiä, joten jännityksiä rajaviivan läheisyydessä ei ole erikseen huomioitu.

#### 4 POHDINTA

Jälkikäsitellyn aiheuttamille jäännösjännityksille eri lähteistä kootuista tuloksista ei löydy monia selkeitä yhteisiä tekijöitä ja niiden vertailu on haastavaa kappaleiden tyypin, levyvahvuuden ja muiden muuttujien poikkeavuuksien takia. Vertailu olisi mahdollista muun muassa samasta materiaalista tehdyillä yhtäläisillä kappaleilla, joissa ainoa muuttuja on levyn paksuus.

Saavutetut hitsin rajaviivan pyöritykset ovat merkittäviä hitsauksen jälkeiseen tilaan verrattuna ja parannus rajaviivan säteessä on parhailaan lukuisia millimetrejä. Tarkempien saumakohtaisten tietojen vähyys ei kuitenkaan mahdollista sen yksiselitteistä vertausta aiheutuneisiin jäännösjännityksiin esimerkiksi lämmöntuonnin kannalta.

Yksittäisen lähteen tuloksista selkeänä jäännösjännitykseen vaikuttavana tekijänä voidaan nähdä perusmateriaali. Alemman myötölujuuden materiaaleilla jäännösjännitykset ovat arvoltaan pienempiä ja suuremman myötölujuuden materiaaleissa jännitykset ovat sekä suurempia että suuremmalla vaihteluvälillä TIG-jälkikäsitellyn alueen läheisyydessä.

Suuri vaikutus on myös kappaleen geometrialla ja hitsien asettelulla. Suurimmat vetojännitykset ovat LG kappaleilla ja pienimmät NLCX kappaleilla. NLCT liitokset sijoittuvat näiden väliin neutraali-linjan läheisyyteen.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Koottujen arvojen perusteella jäännösjäännityksiä TIG-jälkikäsitellyssä hitsatussa kappaleessa on tutkittava laajemmin empiirisillä menetelmillä selkeiden jatkuvuuksien toteamiseksi. Kirjallisuustutkielman tehtävä karakterisoida jäännösjäännityksiä on kuitenkin saavutettu. Mahdollisia jatkotutkimuksen kohteita ovat levynpaksuuden vaikuttaminen TIG-jälkikäsitellyn hitsatun kappaleen jäännösjäännityksiin samassa materiaalissa ja geometriassa ja tarkempi selvitys jäännösjäännitysten siirtymisestä TIG-jälkikäsitellyn alueen läheisyydessä.

## LÄHTEET

1. Björk, T., Mettänen, H., Ahola, A., Lindgren, M & Terva, J. Fatigue Strength Assessment of Duplex and Super-Duplex Stainless Steels by 4R Method. *Welding in the world*, 2018. Vol. 62: 6. S. 1285-1300.
2. Haagensen, P. & Maddox, S. IIW Recommendations on Post Weld Fatigue Life Improvement of Steel and Aluminium Structures. IIW Doc. XIII-2200r7-07, 2010. Revised 6 July 2010. S. 10-20.
3. Kirk, B. Example of weld slag formed on the weld bead. Viitattu 6.12.2020. Saatavissa: <https://weldingproductivity.com/article/on-the-surface/>
4. Weld cleaning. www-tuotedokumentti. JAZ-ZUBIAURRE S.A. Viitattu 6.12.2020. Saatavissa: <https://www.jazsurface.com/en/applications/weld-cleaning/>
5. Hopkins, R. Wire brushes, grinding wheels, and flap discs, oh my! *The WELDER*, 2016. Viitattu 6.12.2020. Saatavissa: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/cuttingweldprep/wire-brushes-grinding-wheels-and-flap-discs-oh-my->
6. Yıldırım, H. C. Recent results on fatigue strength improvement of high-strength steel welded joints. *International Journal of Fatigue*, 2017. 101(P2). S. 411-413.
7. Ahola, A., Skriko, T. & Björk, T. Fatigue strength assessment of ultra-high-strength steel fillet weld joints using 4R method. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105861> S. 1-7.
8. Al-Karawi, H., Manai, A. & Al-Emrani, M. A Literature review for the state of the art: Fatigue life extension of welded structures by peening and TIG dressing. *LifeExt-Livslängdsförlägnig för befintliga stålbroar*, 2019. 17 s. Saatavissa:

[https://www.researchgate.net/publication/335738826\\_A\\_Literature\\_review\\_on\\_fatigue\\_life\\_extension\\_of\\_welded\\_structures\\_by\\_peening\\_and\\_TIG\\_dressing](https://www.researchgate.net/publication/335738826_A_Literature_review_on_fatigue_life_extension_of_welded_structures_by_peening_and_TIG_dressing)

9. Ramalho, A. L., Ferreira, J. A. & Branco, C. A. Fatigue behaviour of T welded joints rehabilitated by tungsten inert gas and plasma dressing. *Materials and Design*, 2011. 32(10). S. 4705-4709.
10. Hensel, J., Nitschke-Pagel, T. & Dilger, K. Fatigue performance of welded steel longitudinal stiffeners. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2012. 190 s.
11. Anami, K., Miki, C., Tani, H., Yamamoto, H. Improving fatigue strength of welded joints by hammer peening and TIG-dressing, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, 2000, 2010. Vol. 2000: 647. S. 67-78. Saatavissa: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2000/647/2000\\_647\\_67/article/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/2000/647/2000_647_67/article/-char/en)
12. Pirinen, H. Fatigue strength of welded joints made of S1100 structural steel. *Diplomityö*, 2019. Lappeenranta university of technology, school of energy systems, konetekniikka. Lappeenranta. 113 s.
13. Ahola, A., Skriko, T. & Björk, T. Experimental investigation on the fatigue strength of welded joints made of S1100 ultra-high-strength steel in as welded and post-weld treated condition, *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*, 2019; Edited by A. Zingoni, Taylor & Francis Group, London. S. 1258
14. Lopez Martinez, L., Lin, R., Wang, D. & Blom, A.F. Investigation of residual stresses in as-welded and TIG-dressed specimens subjected to static/spectrum loading, *Proceedings of the North European Engineering and Science Conference, (NESCO): "Welded High-Strength Steel Structures"*, Stockholm, 1997; Edited by A.F. Blom, Emas Publishing, London. S. 8-10.

15. Huther, I., Suchier, Y. & Lieurade, H. P. Fatigue behavior of longitudinal non-load-carrying joints improved by burr grinding, TIG dressing. IIW Doc. XIII-2108-06, 2006. S. 2-12
16. Skriko, T., Ghafouri, M. & Björk, T. Fatigue strength of TIG-dressed ultra-high-strength steel fillet weld joints at high stress ratio. *International Journal of Fatigue*, 2017, 94(P1). S. 110-120.
17. Suominen, L., Khurshid, M. & Parantainen, J. Residual stresses in welded components following post-weld treatment methods. *Procedia Engineering*, 2013. 66. S. 183-186.