



Matalan muutoslämpötilan hitsilisäaineiden vaikutus hitsiliitosten väsymisominaisuuksiin

Effect of LTT weld metal to weld joint fatigue strength

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

Jasper Tulonen

Tarkastaja(t): TkT Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Jasper Tulonen

Matalan muutoslämpötilan hitsilisäaineiden vaikutus hitsiliitosten väsymisominaisuuksiin

Konetekniikan kandidaatintyö

2024

35 sivua, 13 kuvaa, 2 taulukkoa ja 0 liitettä

Tarkastaja(t): Tutkijatohtori Antti Ahola

Avainsanat: LTT, väsymislujuus, väsymisominaisuus

Tämän kirjallisuustyön aiheena on tutkia matalan muutoslämpötilan hitsilisäaineiden vaikutusta eri hitsiliitoksien väsymisominaisuuksiin. Matalan muutoslämpötilan hitsilisäaineita käytetään hitsiliitosten väsymisominaisuuksien parantamiseen. Vertailu tapahtuu keräämällä systemaattisesti dataa yksittäisistä väsymiskoetuloksista ja yhdistelemällä niistä uusia kuvia. Lisäksi datasta muodostettiin kuvaajaan S-N käyrät vertailun helpottamiseksi nimellisen jännityksen menetelmällä. Tarkastelun alla oli neljä liitostyyppiä: Päittäisliitos, yksipuolinen pitkittäinen jäykiste, kaksipuolinen pitkittäinen jäykiste ja T-liitos. Tarkastelu on rajattu liitostyyppien vertailuun. Työssä havaittiin, että matalan muutoslämpötilan hitsilisäaineilla oli parantava vaikutus kaikkiin liitostyypeihin. Parantava vaikutus korostui erityisesti liitostyypeissä, joissa syntyy hitsiliitosgeometrian takia luontaisesti suuria jäännös-jännityksiä. Päittäisliitoksen kaltaisissa liitoksissa vaikutus oli rajallinen, mutta tarkastelu on rajattu vain pieniin koekappaleisiin, joten etenkin korkeilla syklimäärillä isoissa hitsatuissa rakenteissa päittäisliitokset voivat hyötyä matalan muutoslämpötilan hitsilisäaineen käytöstä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical engineering

Jasper Tulonen

Effect of LTT weld metal to weld joint fatigue strength

Bachelor's thesis

Year of completion of the thesis

35 pages, 13 figures, 2 tables and 0 appendices

Examiners: Post-Doctoral researcher Antti Ahola

Keywords: LTT, Fatigue strength, Fatigue properties

The subject of this thesis is to study how low transformation temperature welding consumables affect the fatigue strength properties of different weld joints. Low transformation temperature welding consumables are used in welded joints to improve the fatigue strength of weld joints. The comparisons are done by systematically collecting data from individual fatigue tests and combining them into new charts. Also, nominal strength method was used to form S-N curves into the charts to improve the comparability of results. The four different weld joints were compared: butt joint, longitudinal stiffener, two-faced longitudinal stiffener and T-joint. The comparison was limited to examining the welded joints in question. Results of the thesis show that low transformation temperature weld additive has an improving effect on all four weld joints. The improving effect was highlighted especially in the weld joints whose weld geometry forms naturally high residual stresses after welding. In weld joints like butt joint the effect was limited, but the examination was only limited to small scale test subjects, so in real world welded structures even butt joints can benefit from the use of low transformation temperature weld additives especially in high amount cycles.

KIITOKSET/ ACKNOWLEDGEMENTS

Haluaisin kiittää ohjaajaani Antti Aholaa aktiivisesta ja kannustavasta ohjauksesta.

Symboliluettelo

$\Delta\sigma$	Jännitysvaihtelu [N/mm^2]
C	Jännityskapasiteetti
m	S-N käyrän kulmakerroin
N_f	Sykli
n	Datapisteiden määrä
R	Jännityssuhde

Lyhenneluettelo

A	Aksiaalinen (Axial)
B	Taivutus (Bending)
CA	Vakioamplitudinen (Constant amplitude)
GMAW	Metallikaasukaarihitsaus (Gas Metal Arc Welding)
LTT	Matala muutoslämpötila (Low transformation temperature)
SMAW	Puikkohitsaus (Shielded Metal Arc Welding)
VA	Vaihtuva-amplitudinen (Variable amplitude)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
1.1	Tausta.....	6
1.2	Aikaisempien tutkimuksien tulokset.....	7
1.3	Tutkimuksen tavoite, tutkimuskysymykset ja rajaukset.....	7
2	Teoria.....	8
2.1	Jäännösjännitykset ja väsymislujuus	8
2.1.1	Nimellisen jännityksen menetelmä.....	10
2.1.2	S-N käyrän määrittäminen väsymisdatasta	11
2.2	Matalan muutoslämpötilan hitsilisäaineen ominaisuudet.....	13
3	Matalan muutoslämpötilan hitsiliitosten väsymislujuus	14
3.1	Tutkimusmenetelmät	14
3.2	Hitsiliitosten väsymislujuus.....	15
3.2.1	Hitsilisäaineiden lujuus-, testi ja materiaalitiedot.....	15
3.2.2	Liitostyyppit.....	18
3.2.3	Pitkittäinen jäykiste.....	19
3.2.4	Kaksipuolinen pitkittäinen jäykiste	22
3.2.5	Päittäisliitos.....	24
3.2.6	T-liitos.....	27
4	Tulosten pohdinta	29
4.1	Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin.....	29
4.2	Virhetarkastelu.....	29
4.3	Keskeiset johtopäätökset.....	30
4.4	Tulosten hyödynnettävyys ja yleistettävyys	31
4.5	Jatkotutkimusaiheet	32
5	Johtopäätökset	33
	Lähteet	34

1 Johdanto

Työssä tutkitaan matalan lämpötilan hitsilisäaineiden vaikutusta hitsiliitosten väsymisominaisuuksiin. Tämä tehdään suorittamalla systemaattinen väsytydatankeruu yksittäisistä väsymiskoetuloksista. Tässä luvussa taustoitetaan sekä käsitellään tämän työn merkitystä. Lisäksi esitellään aiempien tutkimuksien puutteita.

1.1 Tausta

Väsymismitoitus on olennaisessa osassa metallirakenteiden suunnittelua. On arvioitu, että 80% mekaanisesta vaurioitumisesta liittyy väsymiseen (Igwemenzie et al. 2022, 1). Tähän vaikuttaa väsymisvaurion taipumus esiintyä kohdista, joissa lokaali jännitys on suuri. Hitsatuissa rakenteissa syntyy runsaasti lokaaleja jännityksiä, koska niissä on liitoksien aiheuttamia lovia ja rakenteellisia epäjatkuvuuksia. Hitsiin syntyy lähtökohtaisesti vetojännitystä, mutta myös puristusjännityksiä voi ilmetä. Väsymislujuuden näkökulmasta kuormituksessa olevat teräsrakenteet kestävät yleensä paljon heikommin vetoa kuin puristusta. Siispä vetojännityksen suuruuden vähentäminen on olennaista väsymiskeston parantamiseksi. Matalan muutoslämpötilan (LTT) hitseillä vetojännitystä voidaan vähentää ja muuttaa se parhaimmillaan puristavaksi jännitykseksi (Igwemenzie et al. 2022, 15). Käytössä olevien teräksien lujuus nousee myös alati, jolloin myös hitsien tulee kestää suurempia jännityksiä. Tässä työssä tarkastellaan useita eri väsymiskoetuloksia ja pyritään selvittämään kuinka suuri hyöty LTT:llä voidaan saavuttaa ja mitkä parametrit mahdollisesta vaikuttavat siihen. Lisäksi LTT:n teoriaa taustoitetaan hieman.

1.2 Aikaisempien tutkimuksien tulokset

Igwemenzie (et al. 2022) toteaa tutkielmassaan, jossa vertailtiin useita eri tutkimuksia LTT:hen liittyen, että LTT:llä on havaittu positiivinen vaikutus hitsiliitoksen väsymiskestävyyteen. Keskeisiksi ominaisuuksiksi havaittiin, että mitä matalammassa lämpötilassa mikrorakenteen muutos austeniittisesta martensiittiseksi tapahtuu sitä parempi (Igwemenzie et al. 2022, 2). Dixneit (et al. 2017, 6) tukee tätä havaintoa toteamalla, että jäännösjännitykset aiheutuivat pitkälti faasimuutoksesta matalassa lämpötilassa. LTT:n vaikutus ei myöskään näyttäisi olevan rajattu tiettyyn liitostyyppiin tai geometriaan (Harati et al. 2018, 8). Konsensus viittaa siihen, että LTT:llä on positiivinen vaikutus hitsiliitoksen väsymiseen. Eri tutkimukset tekevät kuitenkin yksittäisiä havaintoja liittyen tiettyyn tilanteeseen.

1.3 Tutkimuksen tavoite, tutkimuskysymykset ja rajaukset

Tämän työn tavoitteena on suorittaa systemaattinen väsytydatankeruu ja vertailla eri tutkimuksien väsymiskoetuloksia graafisesti ja laskennallisesti. Tämä tehdään siksi, että aiheesta puuttuu systemaattinen datankeruu, jolloin aiheesta ei löydy kattavaa kokonaisnäkemystä. Työssä pyritään vastaamaan miksi ja milloin LTT:tä kannattaa käyttää? Kuinka suuri on siitä saatava hyöty sekä rajautuuko hyöty tietyille liitostyypille? Työ rajataan väsymiskokeiden datankeruuseen. LTT:en teoriasta löytyy jo hyvin tietoa, joten siihen ei ole järkevää syventyä. Lisäksi väsymisdatan tarkastelu tehdään nimellisen jännityksen menetelmällä, joten ei oteta huomioon mahdollisia vaikuttavia tekijöitä testausolosuhteissa tai liitosgeometrioissa.

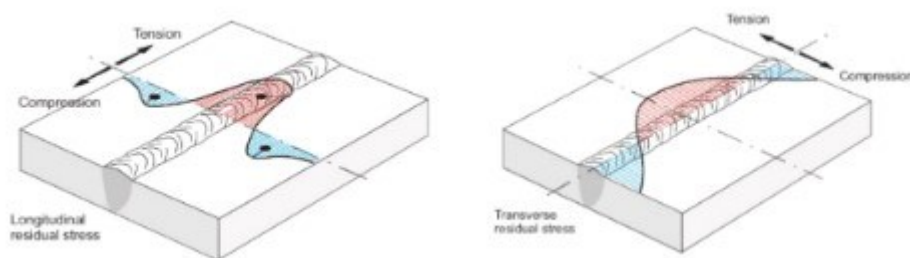
2 Teoria

Tässä luvussa käsitellään LTT hitsilisäaineiden ominaisuuksia ja niiden vaikutusta jäännös-jännityksiin ja väsymislujuuteen. Jäännös-jännityksien ja väsymislajuuden teoria käydään yksinkertaisesti läpi. Luvussa myös esitellään nimellisen jännityksen menetelmän käyttöä.

2.1 Jäännös-jännitykset ja väsymislajuus

Jäännös-jännitykset ovat voimakkaasti kytköksissä väsymislajuuteen. Jäännös-jännitys synnyttää lokaaleja jännityksiä, joille hauras sekä väsyttävän kuormituksen murtuma ovat alttiita. Teräsrakenteet väsyvät, kun niiden mikrorakenteeseen on muodostunut pysyvää syklistä muodonmuutosta (Beier et al., 2018). Rakenteeseen alkaa siis syntyä halkeamia. Näiden muodostumiseen vaikuttaa muun muassa valmistusvirheet sekä kappaleen mitoitus. Väsymismurtuman elinkaaren vaiheet ovat siis karkeasti ydintyminen, jonka jälkeen seuraa särönkasvu, josta seuraa murtuma. Kuorman amplitudi ja syklien määrällä on myös merkitystä väsymislajuuden kannalta.

Kuvassa 1 havainnollistettuna kyseistä jäännös-jännityksen käyttäytymistä hitsiliitoksen kohdalla.



Kuva 1. Havainnollistava kuva jäännös-jännitysten mahdollisista suuntautumisista. (Ig-wemenzie 2022)

Jäännösjännityksiä syntyy hitsatessa kappaletta toiseen, jolloin hitsisula pyrkii laajenemaan ja kutistumaan. Kun tämä volyyminvaihtelu estetään alkaa rakenteeseen syntyä jäännösjännitystä. Jäännösjännityksistä yleisimmät ovat puristava- ja vetojännitys. Lähtökohtaisesti liitokseen syntyy vetoa. Vetojännitys on näistä huomattavasti haitallisempi. (Igwemenzie et al. 2022, 1) Kuvasta 1 nähdään, että hitsin kohdille syntyy hyvin korkea jännityspiikki. Väsyttävässä kuormituksessa murtuma alkaisi siis muodostua hitsin kohdalle.

Jäännösjännityksiä voidaan pienentää jälkikäsittelymenetelmillä. Niiden tavoitteena on parantaa väsymislujuutta pienentämällä hitsin jäännösjännityksiä.

Tyypillisimpiä jäännösjännityksen jälkikäsittelymenetelmiä:

- Mekaaniset
 - Neula iskusutus
 - Ultraääni-iskutus
 - Vasaraiskusutus
 - Kuulapuhallus
- Termodynaamiset
 - Jännityksenpoistohehkutus

Monesti rakenteissa ei voida välttää jäännösjännityksien syntymistä, jolloin pitää kiinnittää huomiota hitsigeometrian parantamiseen ja kappaleen mitoittamiseen, mikäli mahdollista, sillä jälkikäsittelymenetelmät lisäävät tuotteen hintaa. Mikäli mahdollista lovimaisia muotoja olisi hyvä välttää. Hitsigeometriaa voidaan parantaa esimerkiksi koneistus- ja uudelleen sulatus menetelmillä (TIG dressing).

2.1.1 Nimellisen jännityksen menetelmä

Nimellisen jännityksen menetelmä on yksinkertaistettu malli, joka soveltuu kappaleen väsymislujuuden laskemiseen halutussa pisteessä (Grové et al., 2007, 2). Tätä voidaan hyödyntää väsymisiän laskemiseen. Menetelmässä kappaleen poikkileikkaus yksinkertaistetaan eikä siinä oteta esimerkiksi huomioon lokaaleja jännityksiä tai kappaleen muotoa. Menetelmä tarvitsee vain kappaleen kokeman jännityksen ja syklit tietyllä hetkellä. Väsytykskokeissa datapisteitä tulee runsaasti, jolloin nimellisen jännityksen menetelmällä voidaan saada lineaarinen S-N käyrä, joka osoittaa keskimääräisen jännityksen, jonka kappale kokee hajanaisten datapisteiden sijasta. Menetelmä on yksi yleisimmistä alalla, jotenka soveltuu hyvin tämän työn tarkoitukseen. (Grové et al., 2007, 2)

2.1.2 S-N käyrän määrittäminen väsymisdatasta

Tässä luvussa esitellään S-N käyrän määrittäminen numeerisesti nimellisen jännityksen menetelmällä

Nimellisen jännityksen menetelmä voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\Delta\sigma^m N_f = C, \quad (1)$$

missä N_f on sykli, $\Delta\sigma$ on jännitysvaihtelu, m on kulmakerroin ja C väsymiskapasiteetti

Tehdään logaritminen muutos S-N käyrälle

$$\log(\Delta\sigma^m N_f) = \log C \quad (2)$$

Lasketaan sulut auki

$$m \log(\Delta\sigma) + \log(N_f) = \log C \quad (3)$$

Jätetään vain $\log(N_f)$ vasemmalle

$$\log(N_f) = \log C - m \log(\Delta\sigma) \quad (4)$$

Suoran yhtälö voidaan kuvata seuraavasti

$$y = A + Bx \quad (5)$$

Nimellisen jännityksen arvo lasketaan siis seuraavasti:

$$x_i = \log(\Delta\sigma_i), \quad (6)$$

missä alaindeksi i kuvaa yksittäistä datapistettä

$$y_i = \log(N_f) \quad (7)$$

Arvoa B käytetään myöhemmin kulmakertoimen laskemiseen

$$B = \frac{n \sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum(x_i^2) - (\sum x_i)^2}, \quad (8)$$

missä n on datapisteiden kokonaismäärä

$$A = \frac{\sum y_i}{n} - B \frac{\sum x_i}{n} \quad (9)$$

Lasketaan S-N käyrän kulmakerroin m

$$m = -B \quad (10)$$

Lasketaan väsymiskapasiteetti C

$$C = 10^A \quad (11)$$

Lasketaan S-N käyrä 50 % selviytymistodennäköisyydellä

$$\Delta\sigma_{c,50\%} = \sqrt[m]{\frac{C}{2000000}} \quad (12)$$

Nyt voidaan laskea nimellinen jännitys halutussa kohdassa x . Arvo x voi olla esimerkiksi 100 000 ja 1 000 000 sykliä.

$$y = \left(\frac{2000000}{x}\right)^{\frac{1}{m}\Delta\sigma_{c,50\%}} \quad (13)$$

2.2 Matalan muutoslämpötilan hitsilisäaineen ominaisuudet

Keskeisin ja tärkein ominaisuus LTT-lisäaineilla on sen faasimuutos matalassa lämpötilassa hitsin jäähtyessä. Perinteiset hitsilisäaineet alkavat muuttamaan faasiaan noin 450 °C kun taas LTT:llä prosessi alkaa karkeasti 200-400 °C lämpötilassa. Muutos tapahtuu faasimuutoksen takia austeniittisestä martensiittiseksi (Franks et al. 2022, 2). Hitsin jäähtymisen alkaessa 200 °C asteessa hitsi laajenee faasimuutoksen seurauksena, kunnes se saavuttaa ympäröivän lämpötilan. Tällöin syntyy hitsille edullisia puristavia jäännösjännityksiä. Muutoslämpötilan suuruus riippuu olennaisesti materiaalissa käytetyistä metalleista. Etenkin nikkeli, kromi ja hiili ovat keskeisessä osassa LTT:n tehokkuudessa (Franks et al. 2022,2). Tätä pitää painottaa sillä lämpötila, jossa martensiittinen muutos tapahtuu, on kriittistä jäännösjännitysten muodostumiselle (Igwemenzie et al. 2022, 2).

Yksi mielenkiintoinen ominaisuus on se, että LTT:n parantava vaikutus ei ole yhtä merkittävä vaihtuva-amplitudisessa kuormituksessa verrattuna vakioamplitudiseen kuormitukseen. Yksi merkittävä syy on jäännösjännitysten relaxoituminen vaihtelevan amplitudin kuormissa. (Barsoum et al. 2009, 1)

LTT:n muita ominaisuuksia ovat sen kovuus ja hauraus. Martensiittinen tila on kovaa, mutta hitsilisäaineen tyypillinen korkea hiilipitoisuus tekee siitä haurasta. Sitkeyttä voidaan kuitenkin lisätä antamalla ylimääräisten hiilien saostua karbideiksi. Toisaalta hiilen väheneminen johtaa mahdollisesti kovuuden heikkenemiseen. (Igwemenzie et al. 2022, 3) Hitsilisäaineen metallurgiaa pitääkin säätää tapauskohtaisesti riippuen minkälaisia ominaisuuksia haetaan.

3 Matalan muutoslämpötilan hitsiliitosten väsymislujuus

Tässä luvussa esitellään väsymiskoetuloksia yksittäin sekä hitsiliitoksittain. Kokeissa käytettyjen hitsilisäaineiden lujuusominaisuudet, testitiedot ja koostumukset ovat esitetty taulukoissa. Jokaisen hitsiliitoksen parantava vaikutus esitellään verrattuna perinteiseen hitsiliitokseen ja hitsiliitostyyppit, joista löytyy useampia väsymiskokeita, esitellään kootusti yhdessä kuvaajassa, johon on sovitettu S-N käyrä. Kuvaajissa suluisia kirjaimet kertovat kuormituksen tyyppiä, eli A tarkoittaa aksiaalista ja B taivutusta. Lisäksi kappaleessa kerrotaan tämän työn tutkimusmenetelmistä.

3.1 Tutkimusmenetelmät

Työssä suoritetaan systemaattinen väsymisdatankeruu, joka tapahtuu etsimällä LTT:stä tehtyjä väsymiskoetuloksia. Tulokset ovat tyypillisesti esitettynä kuvina, joista data voidaan määrittää hyödyntämällä WebPlotDigitizer sovellusta, jolla kuvaan voi asettaa koordinaatiston ja merkitä datapisteitä. Nämä datasarjat siirretään Excel-ohjelmistoon, jossa niistä luodaan omat kuvaajat. Liitostyyppit, joista löytyy useampi väsymispistetuloksia, yhdistetään kootusti ja niihin sovitetaan S-N käyrä, josta voidaan nähdä keskimääräisen väsymiskestävyyden.

3.2 Hitsiliitosten väsymislujuus

Tässä alaluvussa on taulukoitu hitsilisäaineiden lujuus-, testi ja materiaalitiedot.

3.2.1 Hitsilisäaineiden lujuus-, testi ja materiaalitiedot

Taulukossa 1 esitettynä tutkitut hitsilisäaineet, niiden väsymis- ja murtolujuus, käytetyt hitsausprosessit ja kuormitustyyppi sekä R suhde. R kuvastaa jännityssuhdetta, joka saadaan jakamalla minimijännitys maksimijännityksellä. Taulukko 2 puolestaan esittää hitsilisäaineiden kemiallisen koostumuksen

Taulukko 1. Hitsilisäaineiden väsymistietoja ja testiparametreja

Lähde	Hitsilisäaine	F_y	F_u	LTT?	Hitsausprosessi	Kuormitus	R
Hensel et al., 2020	G 4Si1	530	612	Ei	MAG	A	0.1
Hensel et al., 2020	Fe-Cr-Ni	944	1121	Kyllä	MAG	A	0.1
Harati et al., 2015	LTT	736	1127	Kyllä	GMAW	A	0.1
Harati et al., 2015	OK Tubrod 14.03	760	840	Ei	GMAW	A	0.1
Ota et al., 2000	10Cr-10Ni	708	N/A	Kyllä	N/A	N/A	0
Ota et al., 2000	KC60	579	N/A	Ei	N/A	N/A	0
Ota et al., 2000	KM80	760	N/A	Ei	N/A	N/A	0
Eckerlid et al., 2003	OK Autrod 12.51	470	560	Ei	GMAW	A	0
Eckerlid et al., 2003	Filarc PZ6119	690	770- 940	Kyllä	GMAW	A	0
Eckerlid et al., 2003	B206	780- 850	950- 1050	Kyllä	GMAW	A	0
Eckerlid et al., 2003	13Cr/LC35	680	1050	Kyllä	SMAW	A	0
Barsoum et al., 2009	OK Tubrod 15.55	N/A	N/A	Ei	MAG	A	0
Barsoum et al., 2009	OK Autrod 12.51	N/A	N/A	Ei	MAG	A	0
Harati et al., 2020	Coreweld 89	910	965	Ei	GMAW	B	N/A
Harati et al., 2020	LTT	736	1127	Kyllä	GMAW	B	N/A

Taulukko 1 jatkuu. Hitsilisäaineiden väsymistietoja ja testiparametreja.

Lähde	Hitsilisäaine	F _y	F _u	LTT?	Hitsausprosessi	Kuormitus	R
Harati et al., 2020	OK Tubrod 14.11	320	555	Ei	GMAW	B	N/A
Harati et al., 2017	LTTA	500	1150	Kyllä	GMAW	A	0.1
Harati et al., 2017	LTTB	890	1000	Kyllä	GMAW	A	0.1
Harati et al., 2017	LTTM	740	1130	Kyllä	GMAW	A	0.1
Harati et al., 2017	LTTS	300	880	Kyllä	GMAW	A	0.1
Harati et al., 2017	OK Tubrod 14.03	760	840	Ei	GMAW	A	0.1
Harati et al., 2017	OK Tubrod 15.3	335	515	Ei	GMAW	A	0.1
Harati et al., 2017	OK Aris-totrod 89	920	1000	Ei	GMAW	A	0.1
Harati et al., 2017	OK Aut-rod 12.51	470	560	Ei	GMAW	A	0.1
Hanji et al., 2019	LTT	760	811	Kyllä	GMAW	B	0
Hanji et al., 2019	Conventional	478	572	Ei	GMAW	B	0
Lixing et al., 2004	LTTE	N/A	N/A	Kyllä	N/A	A	0.1

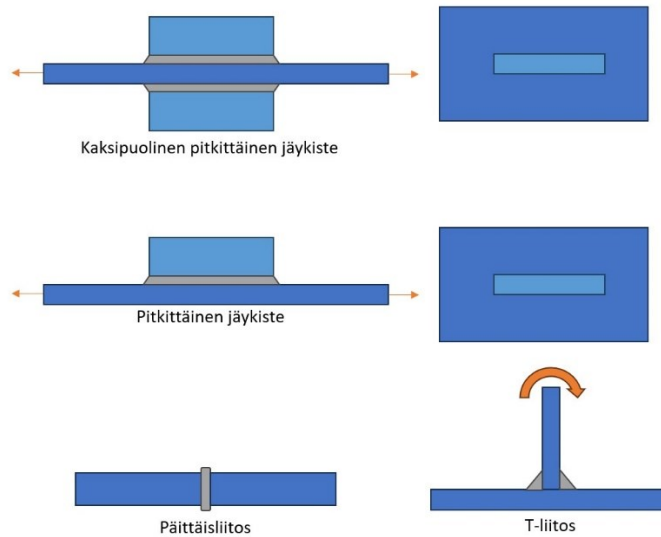
Taulukko 2. Hitsilisäaineiden materiaalikoostumus.

Lähde	Hitsilisäaine	C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si
Hensel et al., 2020	G 4Si1	0.07	1.33	0.03	0.02	0.01	0.82
Hensel et al., 2020	Fe-Cr-Ni	0.04	0.75	12	4.7	0.03	0.41
Harati et al., 2015	LTT	0.02	1.3	12.8	6.2	0.1	0.7
Harati et al., 2015	OK Tubrod 14.03	0.07	1.7	N/A	2.3	0.6	0.6
Ota et al., 2000	10Cr-10Ni	0.025	0.7	10	10	0.13	0.32
Ota et al., 2000	KC60	0.07	0.96	N/A	N/A	0.42	0.49
Ota et al., 2000	KM80	0.06	1.21	0.8	2.66	0.48	0.2
Eckerlid et al., 2003	OK Autrod 12.51	0.1	1.1	N/A	N/A	N/A	0.7
Eckerlid et al., 2003	Filarc PZ6119	0.06	1.1	N/A	2.9	0.3	0.4
Eckerlid et al., 2003	B206	0.01	1.8	12.5	6.7	2.5	0.4
Eckerlid et al., 2003	13Cr/LC35	0.04	0.8	12.3	7.3	2.2	0.5
Barsoum et al., 2009	OK Tubrod 15.55	0.1	1.1	N/A	N/A	N/A	0.7
Barsoum et al., 2009	OK Autrod 12.51	0.01	1.8	12.5	6.7	2.5	0.4
Harati et al., 2020	Coreweld 89	0.08	1.3	0.5	2.6	0.7	0.6
Harati et al., 2020	LTT	0.01	1.5	13	6.0	0.01	0.7
Harati et al., 2020	OK Tubrod 14.11	0.03	1.5	0.04	0.01	N/A	0.8
Harati et al., 2017	LTTA	0.02	1.25	8.5	8.9	0.03	0.28
Harati et al., 2017	LTTB	0.04	0.55	1.0	12.5	0.4	0.6
Harati et al., 2017	LTTM	0.01	1.5	13	6	N/A	0.7
Harati et al., 2017	LTTTS	0.01	1.7	16	7.5	N/A	0.7
Harati et al., 2017	OK Tubrod 14.03	0.07	1.7	N/A	2.3	0.6	0.6
Harati et al., 2017	OK Tubrod 15.3	0.02	1.3	19	19	N/A	0.7
Harati et al., 2017	OK Aristotrod 89	0.08	1.8	0.4	2.2	0.55	0.8
Harati et al., 2017	OK Autrod 12.51	0.1	1.5	0.1	0.03	0.2	0.9
Hanji et al., 2019	LTT	0.03	4.6	0.02	0.01	0.01	0.42
Hanji et al., 2019	Conventional	0.03	1.53	0.02	0.01	<0.01	0.47
Lixing et al., 2004	LTTE	0.07	1.25	9.1	8.46	0.05	0.23

3.2.2 Liitostyypit

Tässä luvussa esiteltyinä tässä työssä tarkastelun alla olevat liitostyypit.

Kuvasta 1 ilmenee tarkastelun alla olevien liitoksien geometriat.

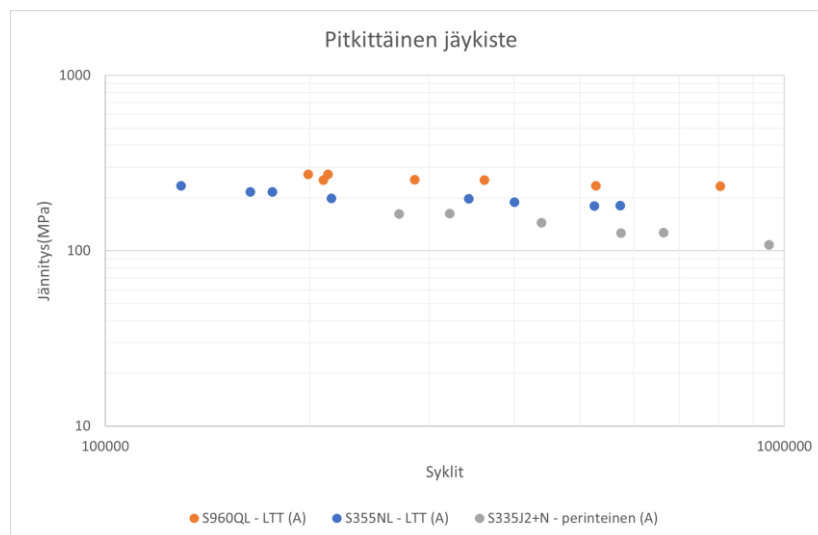


Kuva 1. Tarkasteltavat liitostyypit ja niiden kuormitukset.

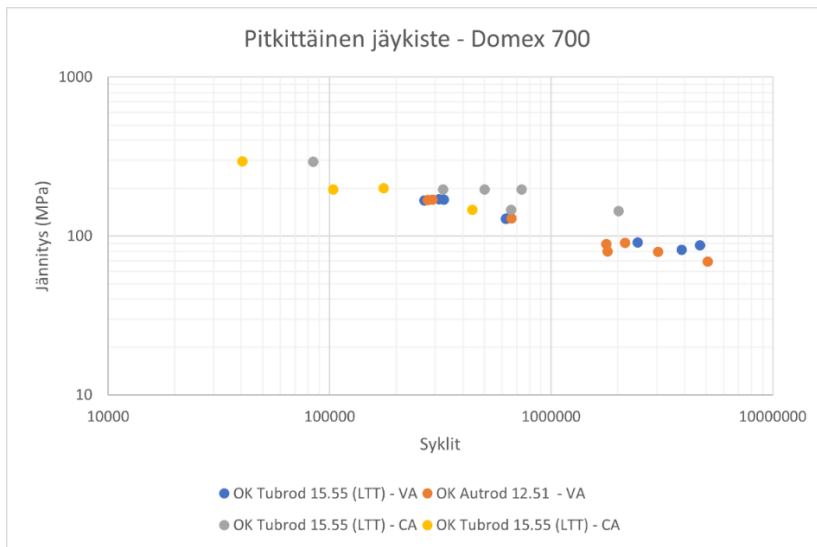
3.2.3 Pitkittäinen jäykiste

Tässä luvussa esiteltyinä pitkittäisten jäykisteiden tulokset.

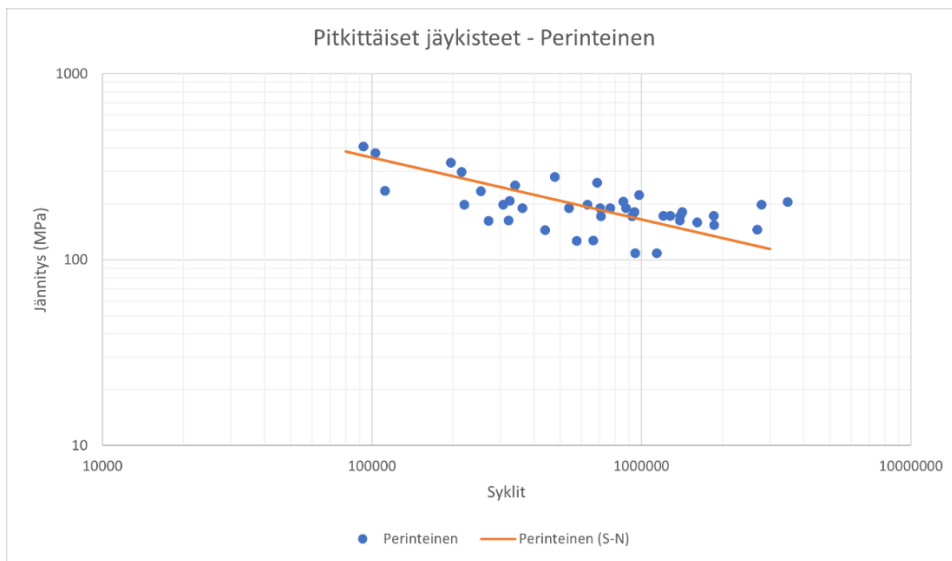
Kuvassa 2 vertaillaan perinteisiä hitsilisäaineita LTT:hen verrattuna pitkittäisessä jäykisteessä. Kuvassa 3 esiteltyinä vakioamplitudisen ja vaihteleva-amplitudisen kuormituksen vaikutus hitsiliitoksen väsymisominaisuuksiin. Kuvasta nähdään, että vaihteleva-amplitudisessa kuormituksessa hitsiliitos kestää huomattavasti väsymistä. Kuvassa 4 on esiteltyinä koottu perinteisten hitsilisäaineiden väsymiskoetulokset ja sen muodostama S-N käyrä. Kuvassa 5 on koottu LTT hitsilisäaineiden väsymiskoetulokset, jossa on myös S-N käyrät sekä perinteiselle että LTT hitsilisäaineille. Kuvan S-N käyrästä nähdään, että LTT:llä on hieman parempi väsymislujuus kuin perinteisillä hitsilisäaineilla



Kuva 2. Pitkittäisen jäykisteen väsytyiskoetulokset (Hensel et al., 2020)

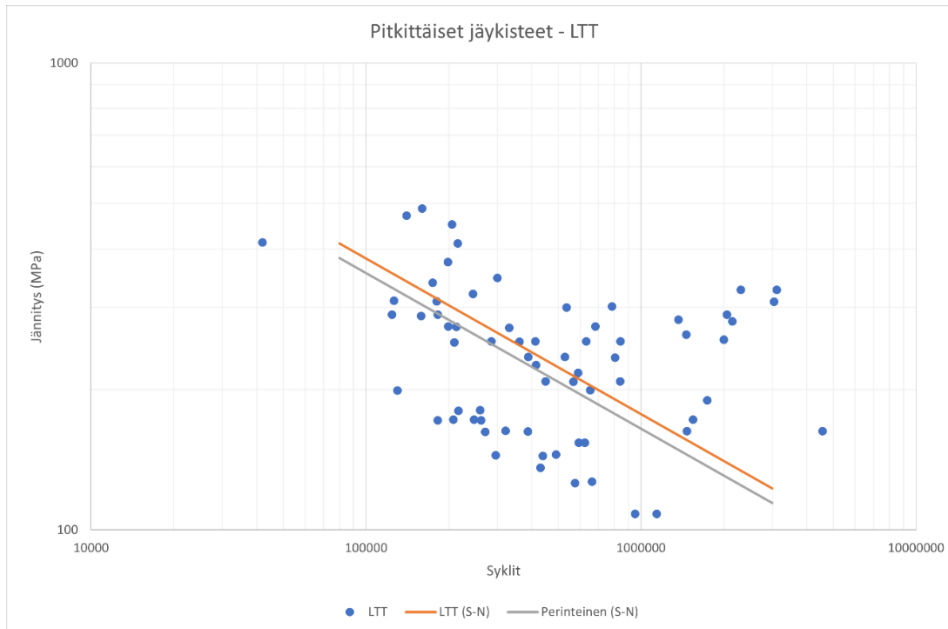


Kuva 3. Väsytyскоetus, jossa vertaillaan vaihtelevaa ja tasaista amplitudia. (Barsoum et al., 2019)



Kuva 4. Pitkittäisten jäykisteiden perinteisten hitsilisäaineiden yhdistetyt väsytyскоetusloket. (Harati et al., 2017; Hensel et al., 2020; Lixing et al., 2004)

Kuvassa 5 kulmakertoimet LTT:n ja perinteisen hitsilisäaineen S-N käyrälle asetettu $m = 3$, koska datapisteissä on hajontaa, joka aiheutti liian jyrkän kulman suoralle. Tämä haittaa tulosten vertailua toisiinsa.

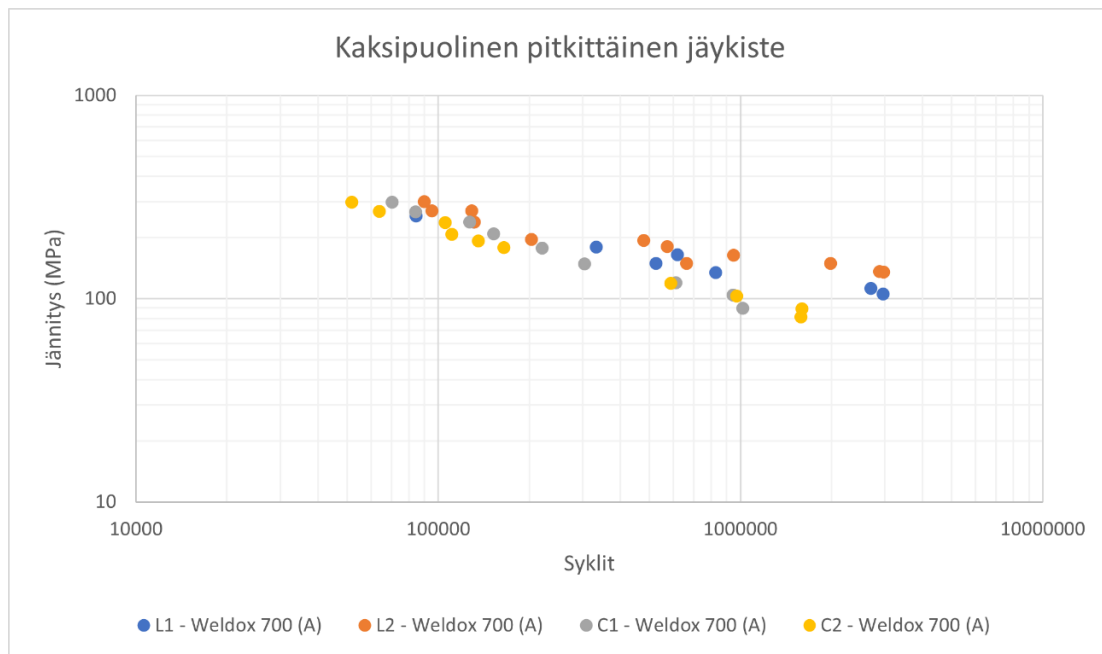


Kuva 5. Pitkittäisten jäykisteiden LTT väsytyiskoetulokset, jossa perinteisen ja LTT:n S-N käyrä. (Harati et al., 2017; Hensel et al., 2020; Lixing et al., 2004)

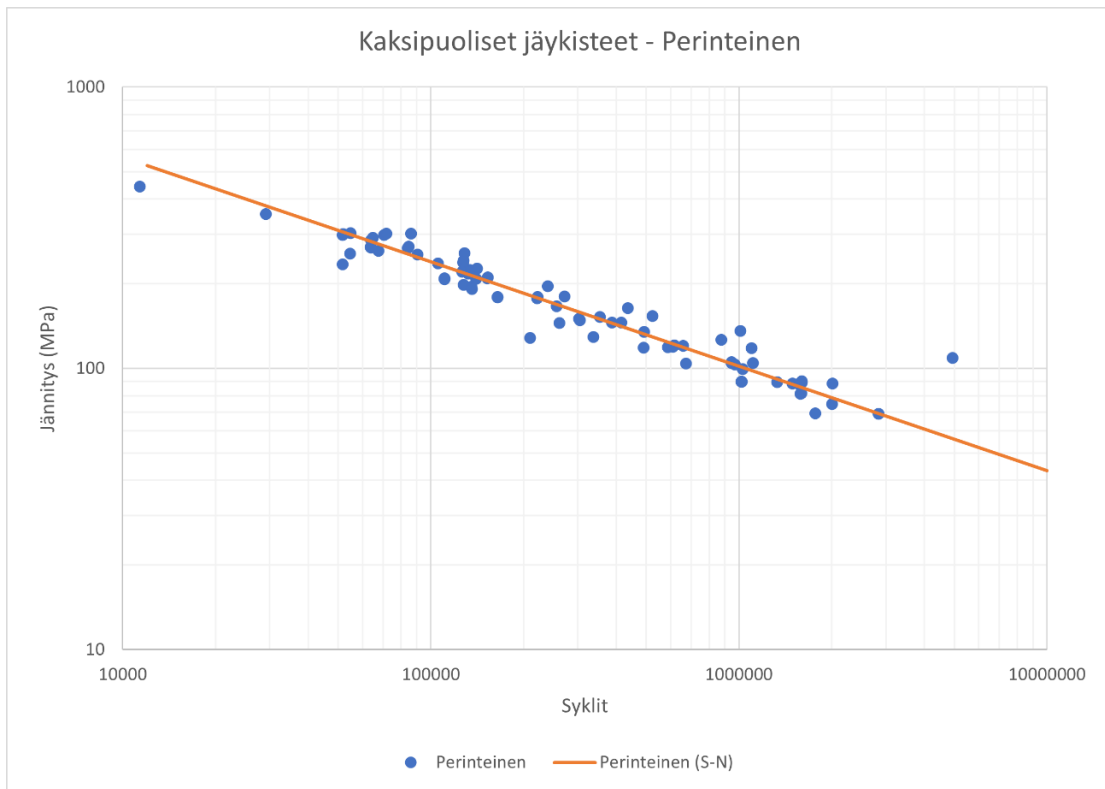
3.2.4 Kaksipuolinen pitkittäinen jäykiste

Tässä luvussa esitellään kaksipuolisten pitkittäisten jäykisteiden väsymiskoetuloksia.

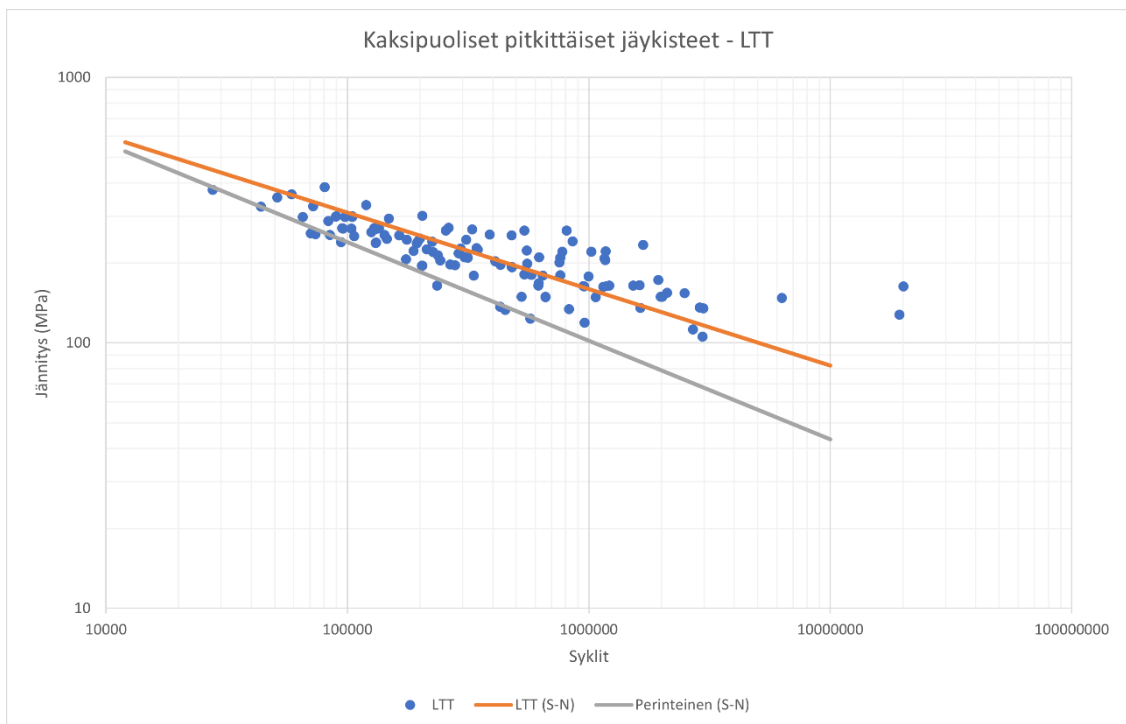
Kuvassa 6 näkyy yksittäisen väsymiskokeen tulokset, jossa perinteisiä ja LTT hitsilisäaineita. Kuvassa 7 on koottu perinteisten hitsilisäaineiden tulokset ja muodostettu S-N käyrä. Kuvassa 8 kuvattuna LTT hitsilisäaineiden väsymiskoetulokset, joihin sovitettu S-N käyrät sekä perinteisille että LTT hitsilisäaineille. Kuvasta voidaan myös havaita S-N käyrän perusteella, että LTT:llä on parempi väsymislujuus.



Kuva 6. Väsytyiskoetulokset verrattuna perinteisiin hitsilisäaineisiin. (Harati et al., 2015)



Kuva 8. Kaksipuolisten jäykisteiden väsytykkoetulokset perinteisellä lisäaineella, jossa S-N käyrä. (Eckerlid et al., 2003; Harati et al., 2017; Harati et al., 2015; Ota et al., 2000)

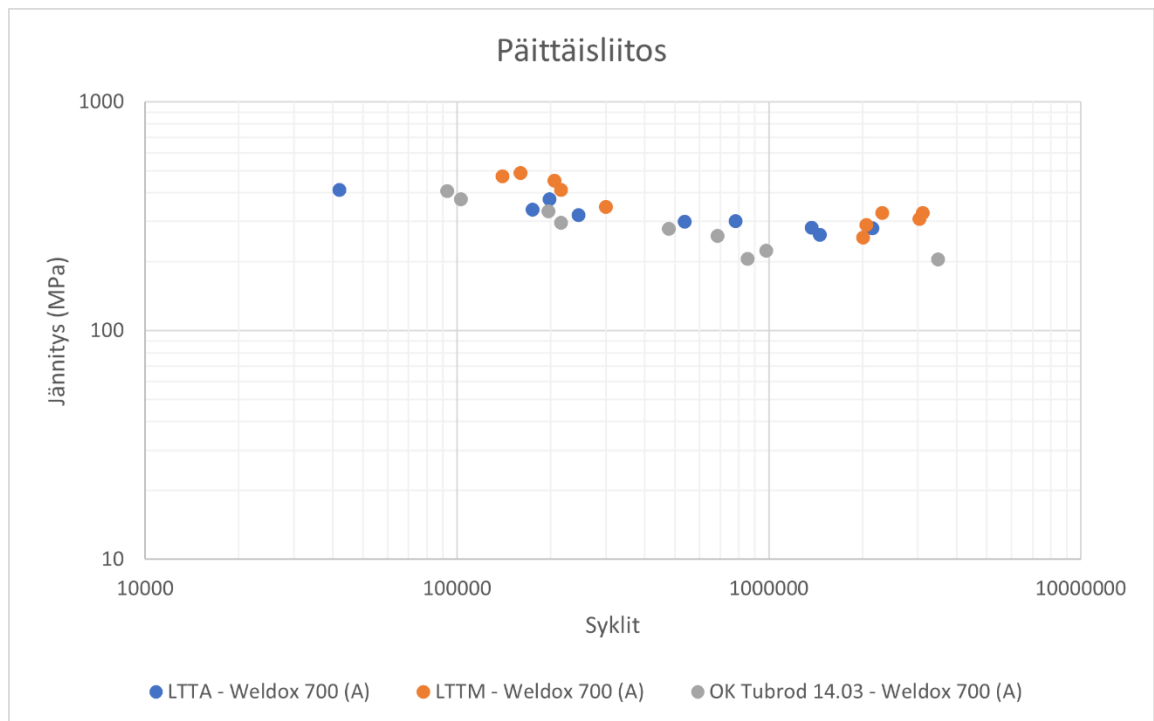


Kuva 7. Kaksipuolisten jäykisteiden yhdistetyt LTT väsytykkoetulokset. (Eckerlid et al., 2003; Harati et al., 2017; Harati et al., 2015; Ota et al., 2000)

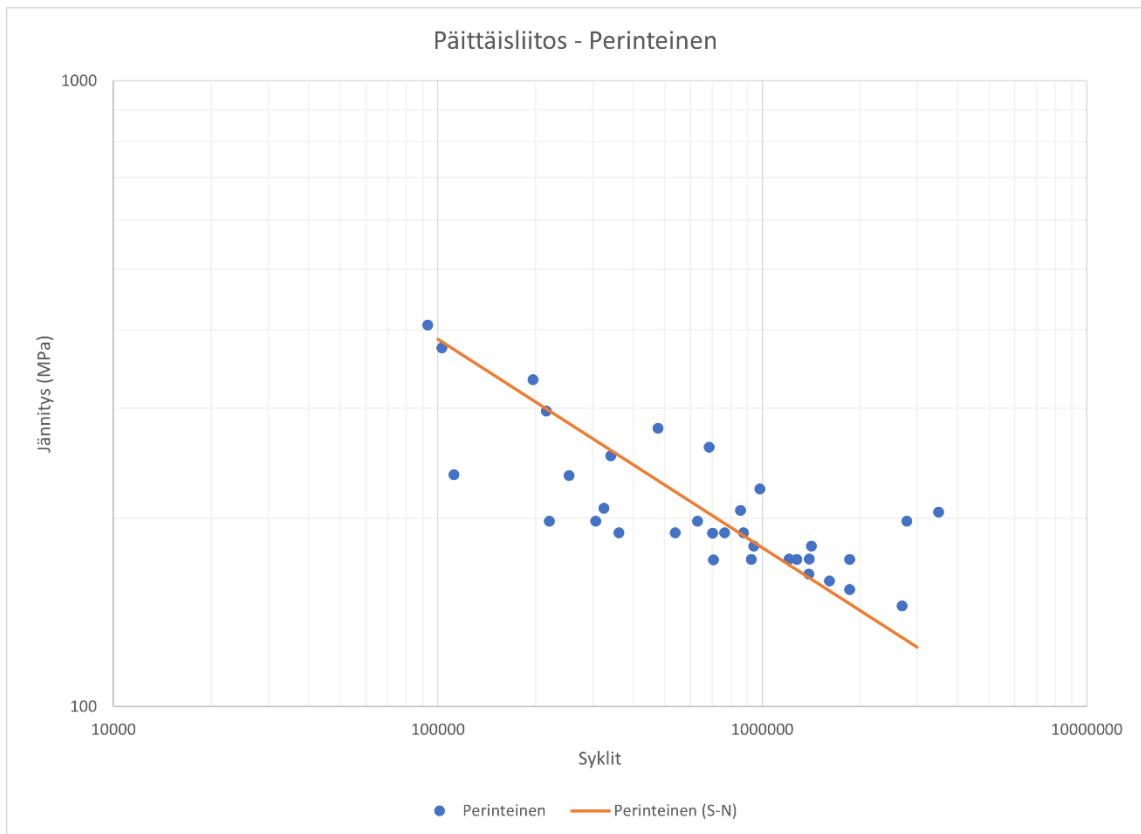
3.2.5 Päittäisliitos

Tässä luvussa esiteltyinä päittäisliitoksen väsymiskoetulokset.

Kuvassa 9 esiteltyinä yksittäinen väsymiskoetulos, jossa on sekä perinteistä että LTT hitsilisäainetta. Kuvassa 10 on koottu perinteisten hitsilisäaineiden väsymiskoetulokset ja sovitettu S-N käyrä. Kuvassa 11 on koottu LTT hitsilisäaineiden väsytyiskoetulokset ja sovitettu perinteisen ja LTT hitsilisäaineiden S-N käyrät. Kuvasta nähdään, että LTT:llä oli merkityksellön vaikutus väsymislujuuden paranemiseen.

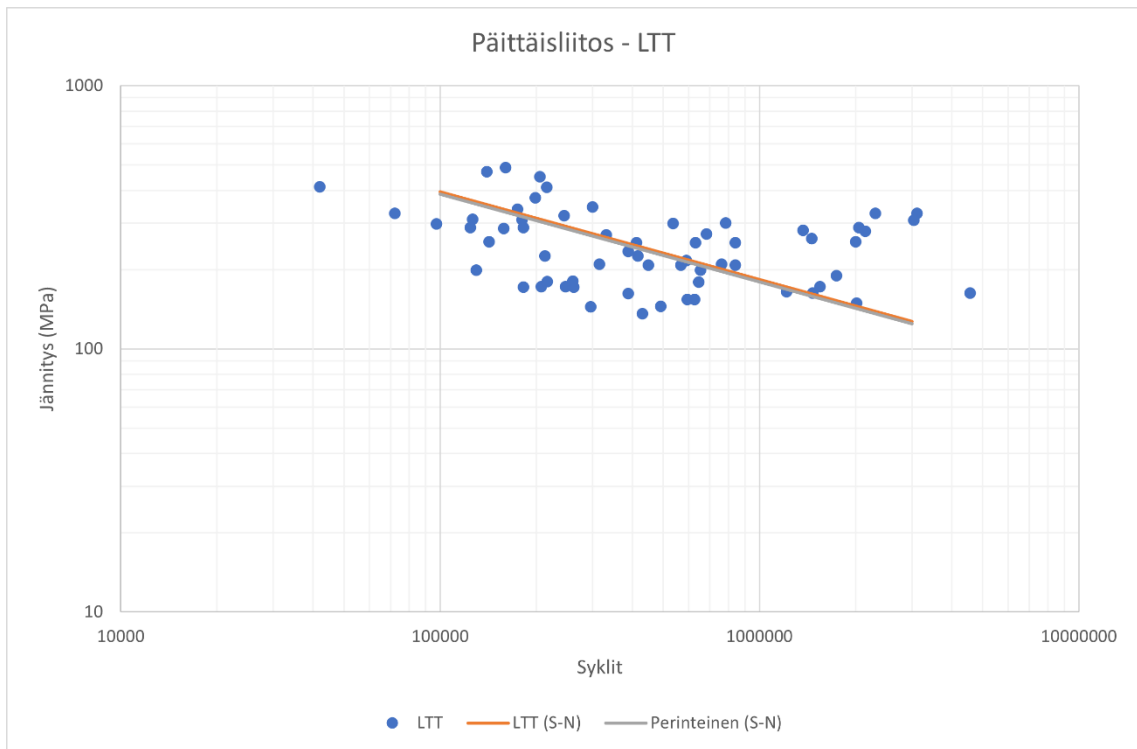


Kuva 9. Päittäisliitoksen väsytyiskoetulokset (Harati et al., 2017)



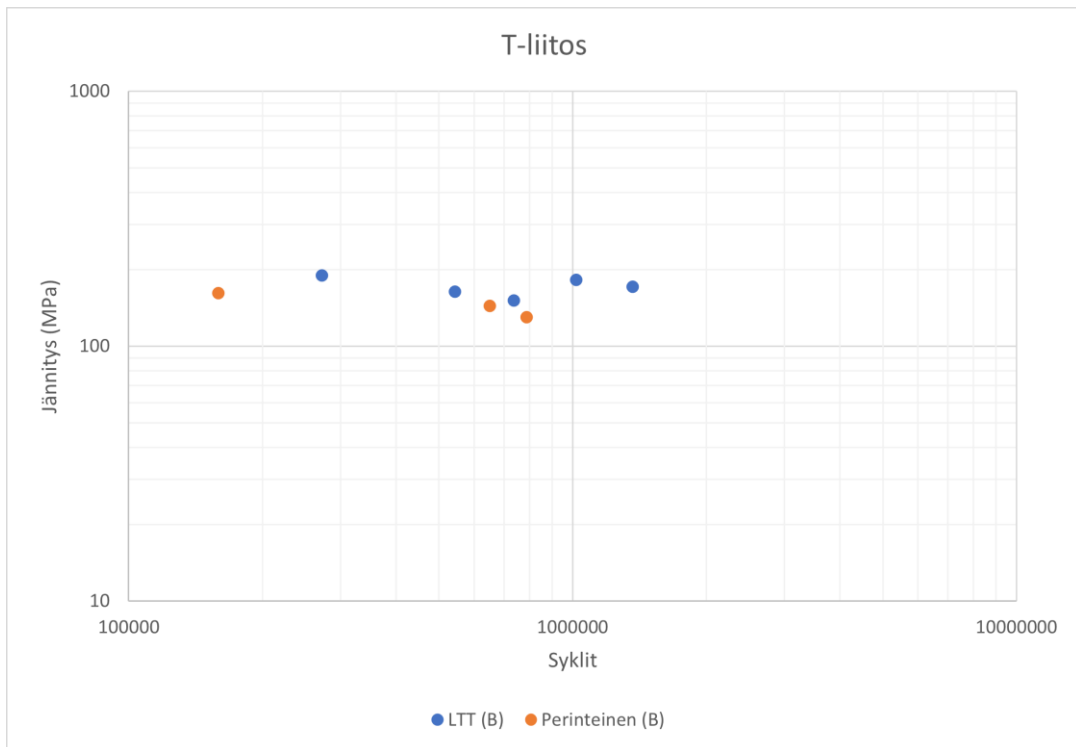
Kuva 10. Päittäisliitosten perinteisten lisäaineiden yhdistetyt väsytyiskoetulokset, johon sovitettu S-N käyrä. (Harati et al., 2017; Hensel et al., 2020; Lixing et al., 2004)

Edellä mainitusta syystä kulmakerroin m asetettu 3.



Kuva 11. Päittäisliitosten yhdistetyt LTT väsytyскоетulokset, jossa S-N käyrät LTT:lle ja perinteiselle lisäaineelle. (Harati et al., 2017; Hensel et al., 2020; Lixing et al., 2004)

Edellä mainitusta syystä kulmakerroin m asetettu 3.



Kuva 13. T-liitoksen väsymiskoetulokset taivuttavassa väsymisessä. (Hanji et al. 2019)

4 Tulosten pohdinta

Tässä luvussa analysoidaan saatuja tuloksia, verrataan niitä aikaisempiin havaintoihin, tehdään virhetarkastelu ja esitellään keskeiset johtopäätökset. Lisäksi pohditaan myös tulosten yleistettävyyttä sekä hyödynnettävyyttä ja esitellään mahdollisia jatkotutkimusaiheita.

4.1 Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin

Analysoidut väsytyскоetulokset ovat selkeästi linjassa aikaisempien väsytyскоeiden havaintojen kanssa. Hitsiliitoksen tyypillä ei siis näyttäisi olevan merkitystä LTT:n parantavaan vaikutukseen, mikäli hitsiliitoksessa ilmenee suuria määriä jäännösjännityksiä. Koska tässä työssä liitoksia tarkastellaan nimellisen jännityksen menetelmällä, ei voida ottaa varmuudella kantaa mitkä parametrit vaikuttivat eniten parantavaan vaikutukseen. Aikaisemmat työt ovat ehdottaneet syiksi sulamislämpötilan alhaisuutta, seoksen koostumusta.

4.2 Virhetarkastelu

Työssä virheitä voi syntyä, kun datapisteitä asetetaan WebPlotDigitizer ohjelmassa. Koska kuvien laatu vaihtelee pisteet eivät asetu täysin samaan kohtaan kuin mitä ne todellisuudessa olisi. Tähän tarvittaisiin alkuperäiset väsytyскоetulokset, joista saataisiin tarkka data. Tarkkuus on kuitenkin riittävän hyvä, sillä tuloksiin ei synny merkittävää virhettä, jos syklien tarkkuus heittää esimerkiksi muutamalla tuhannella. Toinen mahdollinen virhe syntyy, jos datan hajonta on suuri. Tällöin voidaan nimellisen jännityksen menetelmässä joutua pakottamaan kulmakertoimella viiva sopivaksi. Näin tehtiin pitkittäisenjäykisteen sekä päittäisliitosten tuloksien kohdalla. Tällöin erot tuloksien välillä ovat pienemmät kuin todellisuudessa. Datapisteiden määrä vaikuttaa myös tuloksien luotettavuuteen. Erot LTT:n ja perinteisen hitsilisäaineen välillä ovat kuitenkin niin selkeät, että voidaan tehdä varsin paikkansapitäviä johtopäätöksiä LTT:n hyödyistä.

4.3 Keskeiset johtopäätökset

Kuvista 5 ja 7 on selkeästi nähtävissä, että LTT:llä oli positiivinen vaikutus hitsiliitoksen väsymislujuuteen. Sekä yksi- että kaksipuoliset jäykisteet ovat hyviä indikaattoreita jäännösjännitysten käyttäytymisestä. Tämä johtuu siitä, että hitsit eivät pääse kyseissä hitsiliitoksissa laajenemaan vapaasti. Varsinkin kuvan 7 kaksipuolisissa jäykisteissä ero oli varsin suuri verrattuna kuvan 5 tuloksiin. Yksipuolisen pitkittäisen jäykisteen tuloksissa LTT ei ole hirveästi parempi, kuin perinteinen, mutta tämä selittyy kulmakertoimen pakottamisella arvoon 3. Datan hajontaa esiintyi sen verran, että S-N käyrä asettui melko jyrkkään kulmaan, jolloin se piti pakottaa arvoon $m = 3$. Mikäli kulmakerroin saisi olla yhtälön määrittelemä, niin erot olisivat jonkin verran suurempia.

Keskeiset johtopäätökset:

- Voidaan todeta, että LTT paransi väsymislujuutta kaikissa liitostyypeissä
 - Päittäisliitoksissa ja T-liitoksissa parannus ei todennäköisesti ole LTT:n hinnan arvoinen
 - Tarkastelu on kuitenkin rajattu vain pieniin koekappaleisiin. Todellisissa hitsatuissa rakenteissa myös edellä mainitut liitokset voivat hyötyä LTT:stä, mikäli niiden laajeneminen on estetty.
 - Yksi- ja kaksipuoleisissa pitkittäisissä jäykisteissä havaittavissa merkittävää parannusta väsymislujuuteen
 - Datapisteitä kaksipuolisissa pitkittäisissä jäykisteissä LTT:llä oli 118 ja yksipuolisella 67. Tuloksien varmuutta voidaan siis pitää melko hyvänä.
- Korkeassa jäännösjännitystilassa LTT:stä on hyötyä
- Vakio amplitudisessa väsytyksessä LTT on huomattavasti vahvempi kuin vaihtelevassa amplitudissa

4.4 Tulosten hyödynnettävyys ja yleistettävyys

Pitkittäisistä jäykisteistä löytyy ennestään runsaasti tietoa, eli tulokset ovat hyödynnettävissä mihin tahansa liitostyyppiin, jossa on korkea jäännösjännitystila hitsatussa tilassa. Pitkittäiset jäykisteet ovat hyviä indikaattoreita jäännösjännityksen käyttäytymisestä. Tuloksia voitoin hyödyntää ainoastaan nimellisen jännityksen menetelmälle. Menetelmä on kuitenkin yksi käytetyimmistä ja sillä voidaan tarkastella parannusvaikutusta perustasolla. Tulokset luovat myös lähtökohdan insinöörisuunnittelulle ja standardoinnille.

4.5 Jatkotutkimusaiheet

Jatkotutkimusaiheita, joita voisi olla hyvä selvittää on muutamia. Työtä tehdessä ilmeni etenkin LTT:n standardoinnin puute. LTT:stä ei näyttäisi löytyvän minkäänlaista mitoitusohjetta tai muuta ohjetta. Myös hitsilisäaineen nimeämisessä voisi olla standardointia. Monissa väsytykskoikeissa LTT:tä on vain kuvattu esimerkiksi nimellä ”LTT-A”. Perinteisissä hitsilisäaineissa on yleensä varsin selkeät nimet standardoinnin takia. Ideana olisi siis standardiomainen nimeämistapa. Tällöin olisi paljon helpompi huomata eri testien välillä onko samaa hitsilisäainetta käytetty.

Toinen mielenkiintoinen tutkimusaihe olisi LTT:n hyödyntäminen pinnoittamisessa. Hensel (2020, 8) toteaa, että sitä voitaisiin hyödyntää pinnoitteena. Pinnoitus ei välttämättä paranna kovuutta, mutta voisi tuoda huomattavaa parannusta väsymislujuuteen. Aiheesta ei juurikaan löydy väsymiskoedataa, jotenka aihe voisi olla selvittämisen arvoinen. LTT on hitsilisäaineena kalliimpaa, jonka takia olisi hyvä selvittää onko jo pelkkä pinnoitus sillä kannattavaa.

Kolmantena aiheena voisi olla pienahitsattujen T-liitosten väsytykskoikeiden tekeminen enemmissä määrin. Tässä työssä löytyi vain kaksi lähdetä kyseisestä liitoksesta, ja datamäärä oli niin puutteellinen, ettei niistä voinut tehdä kovin hyviä johtopäätöksiä.

5 Johtopäätökset

Tutkimuksen voidaan sanoa vastanneen varsin hyvin sille asetettuihin tavoitteisiin. Tavoitteina oli selvittää vaikuttiko liitostyyppi LTT:n parantavaan vaikutukseen ja milloin LTT:tä kannattaa käyttää. Työ rajattiin vain liitostyyppien tarkasteluun nimellisen jännityksen menetelmällä. Tuloksia voi siis soveltaa vain nimellisen jännityksen menetelmälle. Se on kuitenkin yleisimpiä menetelmiä ja antaa jo aika hyvän arvion hyödystä.

Systemaattinen datankeruu onnistui ja varsinkin yksi- ja kaksipuolisista pitkittäisistä jäykisteistä sekä päittäisliitoksista löytyi hyvin dataa. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että LTT:llä on parantava vaikutus kaikkiin liitostyyppeihin, mutta hinnan takia sitä kannattaa lähinnä käyttää liitoksissa, joissa on korkeat jäännösjäännitystilat. Päittäisliitoksen kaltaisissa liitoksissa hyöty on rajattu. Tarkastelu tehtiin kuitenkin vain pienille koekappaleille, joten todellisissa hitsatuissa rakenteissa edellä mainittu liitos voi hyötyä LTT:stä etenkin korkeilla syklimäärillä, mikäli hitsatessa sen laajeneminen rakenteessa on estetty. Tulokset ovat linjassa yksittäisten tutkimuksien kanssa sen suhteen, että LTT parantaa hitsiliitoksen väsymislujuutta, kun hitsissä ilmenee huomattavia jäännösjäännityksiä.

Tuloksien perusteella havaittiin, että LTT:n materiaalia ja mitoituksen standardointia olisi hyvä tutkia. Lisäksi LTT:llä pinnoittamisen tehokkuutta olisi hyvä selvittää, sillä LTT on kalliimpaa kuin perinteiset hitsilisäaineet.

Tämä tutkimus luo pohjan mahdolliselle insinöörisuunnittelulle, kuten aiemmin mainitulle mitoituksen standardoinnille.

Lähteet

Barsoum, Z. & Gustafsson, M. 2009. Fatigue of high strength steel joints welded with low temperature transformation consumables. *Engineering failure analysis*. S. 2-9

Beier, H.Th. & Madia, M. & Vormwald, M. & Zerbst, U. 2018. Fatigue strength and fracture mechanics – A general perspective. S. 2-3

Eckerlid, J. & Nilsson, T. & Karlsson, L. 2003. Fatigue properties of longitudinal attachments welded using low transformation temperature filler. *Science and technology of welding and joining*. S. 2-6

Grové, A. P. & Van tonder, F. & Heyns, P. S. 2007. A critical investigation of techniques for stress determination and equivalent static analysis in fatigue life estimation. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, 2007-11, Vol.30 (11), p.1030-1043. S. 2

Hanji, T. & Kazuo, T. & Suguru, K. & Masaru, S. & Tadahisa, T. & Toshio, T. 2020. Fatigue strength of transverse attachment steel joints with single-sided arc weld using low transformation temperature welding consumable. *Welding in the world*. S. 2.

Harati, E. & Svensson, L.E. & Karlsson, L. 2020. Comparison of effect of shot-peening with HFMI treatment or use of LTT consumables on fatigue strength of 1300 MPa yield strength steel weldments. *Welding in the World* (2020). S. 1-7

Harati, E. & Leif, K. & Svensson, L.E. & Dalaei, K. 2017. Applicability of low transformation temperature welding consumables to increase fatigue strength of welded high strength steels. Department of Engineering Science, University West, Trollhättan, Ruotsi. *International Journal of Fatigue*. S.

Harati, E. & Leif, K. & Svensson, L.E. & Dalaei, K. 2015. The relative effects of residual stresses and weld toe geometry on fatigue life of weldments. Department of Engineering Science, University West, Trollhättan, Ruotsi. *International Journal of Fatigue*.

Hensel, J. & Braunschweig & Kromm, A. & Berlin & Nitschke-Pagel, T. & Braunschweig & Dixneit, J & Dilger, K. 2020. Capability of martensitic low transformation temperature

welding consumables for increasing the fatigue strength of high strength steel joints. TU Braunschweig, Institute of Joining and Welding, Berliini, Saksa. S. 2-8

Igwemenzie, V. & Shamir, M. & Mehmanparast, A. & Ganguly, S. 2022. A review of LTT welding alloys for structural steels: Design, application and results. Journal of Advanced Joining Processes. 1-2, 15

Lixing, H. & Dongpo, H. & Wenxian, W. & Yufeng, Z. 2004. Ultrasoni peening and low transformation temperature electrodes used for improving the fatigue strength of welded joints. Tianjin University, Kiina. S. 2-4

Ota, A. & Shiga, C. & Maeda, Y. & Suzuki, N. 2000. Fatigue strength of improvement of box-welded joints using low transformation temperature welding material. Welding International