

LUT-YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Matias Tourula

PAALIPIHDIN VÄSYMISTARKASTELU

Tarkastaja(t) Professori Timo Björk
DI Jari Virtanen

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Matias Tourula

Paalipihdin väsymistarkastelu

Diplomityö

2019

49 sivua, 31 kuvaa, 2 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastaja: Prof. Timo Björk, DI Jari Virtanen

Hakusanat: Väsyminen, TIG-käsittely, HFMI-käsittely, Hionta, Hotspot, ENS, 4R-menetelmä

Tämän diplomityön aihe saatiin Auramo Oy:ltä ja siinä tutkittiin paalipihdin johdeosan ja leukaosan välisen hitsausliitoksen väsymisominaisuuksia sekä eri jälkikäsittelyiden vaikutusta liitoksen väsymiskestävyyteen. Lisäksi arvioitiin eritavoin jälkikäsitellyille hitseille väsymislakat, joita voidaan hyödyntää tulevaisuudessa väsymislaskennassa, esimerkiksi tilauskohtaisen laskentamenetelmän yhteydessä.

Tutkimus tehtiin laboratorionkokein, joissa eri tavoin jälkikäsitellyt hitsiliitokset väsyttiin. Koetuloksia verrattiin Hot Spot-, ENS-, ja 4R-menetelmällä laskettuihin kestoikäarvioihin. Tutkitut jälkikäsitelymenetelmät olivat hionta, HFMI-käsittely ja TIG-käsittely.

ABSTRACT

LUT-University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Matias Tourula

Fatigue assessment of bale clamp

Master's thesis

2019

49 pages, 31 figures, 2 tables and 4 appendices

Examiner: Professor Timo Björk, M.Sc. (Tech.) Jari Virtanen

Keywords: Fatigue, TIG-dressing, HFMI-treatment, Grinding, Hotspot-method, ENS-method, 4R-method

The topic for this master's thesis came from Auramo Oy. The research included fatigue assessment of the welded joint in the bale clamp structure as well as the effect of different post processing methods on the fatigue lifetime of the weld. Fatigue classes for differently post processed welds were evaluated, which can be used in future fatigue calculations or other applications.

The research was performed by laboratory tests, where differently post processed weld joints were fatigue loaded and broken. The results were then compared with analytical calculations, which included Hot Spot-, ENS-, and 4R-method. The studied post processing methods were grinding, HFMI-treatment and TIG-dressing.

ALKUSANAT

Kiitos kaikille, jotka olivat mukana tämän diplomityön tekemisessä tavalla tai toisella. Eri-tyisesti haluan kiittää Auramo Oy:n Jaria ja Jarmoa, jotka jo alusta alkaen olivat 100-prosenttisesti hommassa mukana. Haluan kiittää myös Timo Björkin asiantuntevaa ohjausta, sekä Matti Koskimäkeä ja muuta laboratorion henkilökuntaa mukavasta yhteistyöstä.

Erityiskiitos kuuluu myös hikiluolan kaveriporukalle, jonka seurasta olen saanut tämän työn aikana nauttia.

Matias Tourula

Matias Tourula

Lappeenrannassa 26.2.2019

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	8
1.1	Työn tausta.....	8
1.2	Tutkimusongelma, tavoitteet ja tutkimuskysymykset	9
1.3	Tutkimuksen rajaus.....	10
1.4	Tutkimusmenetelmät	11
2	VÄSYMISKESTOIAN LASKENTAMENETELMÄT	13
2.1	Johteessa esiintyvän nimellisen normaalijännityksen määrittäminen.....	13
2.2	Hot Spot –menetelmä.....	14
2.3	ENS-menetelmä	16
2.4	4R-menetelmä	16
3	KOEKAPPALEET	18
3.1	Koekappale	18
3.1.1	Väsymispaikan varmentaminen.....	19
3.1.2	Koekappaleiden välisen ruuviliitoksen mitoitustapa.....	19
3.2	Tutkittavassa liitoksessa käytetyt jälkikäsittelymenetelmät	20
3.2.1	Hitsatussa tilassa	21
3.2.2	Hionta.....	21
3.2.3	Hionta pitkittäin	22
3.2.4	HFMI-vasarointi	23
3.2.5	TIG-käsittely	24
3.2.6	Ylirasituskäsittely	25
4	VÄSYMISLASKENTA	26
4.1	Hot Spot –laskenta pintaa pitkin.....	26
4.2	Hot Spot –laskenta paksuuden yli.....	28
4.3	ENS-laskenta	29

4.3.1	Rajaviivan pyöristyssäde 1 mm	31
4.3.2	Todellinen rajaviivan pyöristyssäde	32
4.4	4R-laskenta	32
4.5	FAT-luokan määrittäminen.....	32
5	VÄSYTYSKOKEET	34
5.1	Mittaus suunnitelma ja mittaukset	34
5.2	3D-skannaus.....	36
5.3	jäännösännitysmittaukset	37
5.4	Koejärjestelyt.....	38
6	TULOKSET	40
6.1	Väsytyiskoetulokset	40
6.2	Teoreettiset väsymisanalyysit	42
6.3	Väsymislukat	43
7	POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET	44
7.1	Teoreettinen väsymislaskenta	44
7.2	Tulosten soveltaminen varsinaisiin paalipihteihin ja niiden tuotantoon.....	44
7.3	Virhetarkastelu.....	45
7.4	Jatkotutkimustarve	45
8	YHTEENVETO	47
	LÄHTEET	48

LIITE I: Liitos- ja koteloliitoshitsin väsymisvertailu

LIITE II: Ruuviliitoksen laskenta

LIITE III: Hot Spot -laskenta pintaa pitkin

LIITE IV: Hot Spot -laskenta paksuuden yli

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	Poikkipinta-ala [mm ²]
FAT	Väsymislukka [MPa]
$F_{t,Ed,ser}$	Ruuviin vaikuttava vetovoima [N]
$F_{p,C}$	Ruuvin esijännitysvoima [N]
$F_{s,Rd}$	Ruuviliitoksen kestävyys [N]
I_z	Jäyhyys [mm ⁴]
k_s	Reiän muotokerroin
M_t	Taivutusmomentti [Nmm]
m	Väsymiskäyrän kulmakerroin
N	Kestoikä [sykliä]
N_R	Suunniteltu käyttöikä [sykliä]
n	Kitkapintojen määrä
y	Etäisyys neutraaliakselista [mm]
σ_{hs}	Hot Spot –jännitys [MPa]
σ_x	Pituussuuntainen normaalijännitys [MPa]
$\Delta\sigma$	Jännitysvaihteluväli [MPa]
$\Delta\sigma_C$	Väsymislukuuden referenssiarvo (2 milj. sykliä) [MPa]
$\Delta\sigma_R$	Jännitysvaihteluväli [MPa]
$\gamma_{M3,ser}$	Osavarmuuskerroin
γ_{Mf}	Materiaaliosavarmuuskerroin
μ	Kitkakerroin
ENS	Effective Notch Stress, tehollinen lovijännitys
FEM	Finite Element Method
HFMI	High Frequency Mechanical Impact
TIG	Tungsten Inert Gas

1 JOHDANTO

Tämän diplomityön aihe saatiin Auramo Oy:ltä, joka valmistaa trukkilisälaitteita eri teollisuuden aloille, kuten metsä- ja paperiteollisuuteen. Vuonna 1956 perustettu Auramo on omalla alallaan Euroopan markkinajohtaja. Auramo Oy on osa maailmanlaajuista Bolzoni-konsernia, jolla on teollisuutta Euroopan lisäksi USA:ssa ja Kiinassa. Suomessa tuotanto keskittyy pääasiassa metsä- ja paperiteollisuuden tarpeisiin. (Bolzonigroup 2018.)

Työ keskittyy paperiteollisuudessa käytettävien paalipihtien väsymiseen, joka useimmissa tapauksissa on mitoittava tekijä paalipihtien suunnittelussa. Asiakkaan kannalta olennainen asia laadun ja väsymiskestävyyden ohella on lisälaitteen paino, joka suoraan vähentää trukilla siirrettävän hyötykuorman painoa. Siten lisälaitteen, tässä tapauksessa paalipihtin, painon optimointi on olennaista. Räätelöimällä paalipihti asiakkaan käyttötärpeen mukaiseksi voidaan ylirajoitus välttää ja siten säästää laitteen painossa, käytettävyyttä ja kestoikää huonontamatta. Tähän pyritään hyödyntämällä tulevaisuudessa laskentamenetelmää, joka mahdollistaa tehokkaan mitoitusprosessin erilaisiin käyttötärpeisiin perustuen.

1.1 Työn tausta

Auramo Oy:n tulevaisuuden tavoitteena on kehittää paalipihtien mitoitusprosessia varten tilauskohtaiseen suunnitteluun soveltuva laskentamenetelmä, jota varten paalipihtien mitoitusprosessia on selvitettävä. Käytön aiheuttamat kuormitukset, hitsilaadun vaikutus ja erityisesti paalileuan ja siihen hitsatun johteen liitoshitsin mitoitus ovat keskeisiä väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi tuotannon ja laadun optimoimiseksi on tarpeellista tutkia paalileukojen ja johteiden välisten hitsiliitosten jälkikäsitteilytarvetta ja laatueroja, sekä jälkikäsitteilyistä saatuja hyötyjä verrattuna käsittelemättömään hitsiin. Näitä tietoja voidaan tulevaisuudessa soveltaa paalipihtien suunnittelussa ja saavuttaa entistä tarkempia kestoikäennusteita ja paremmin optimoituja pihtirakenteita. Kuvassa 1 on esitetty hitsaamalla toteutettu paalipihti. Vaihtoehtoisesti johteen ja leuan välinen liitos muissa pihtimalleissa voidaan toteuttaa ruuviliitoksella.



Kuva 1. BA-100 –mallin paalipihti (Auramo 2018).

1.2 Tutkimusongelma, tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkimusongelma on se, ettei paalipihtien käytöstä aiheutuvista rasituksista ole tarkkaa tietoa, minkä takia paalipihtien suunnittelussa käytetyt kuormitusarvot saattavat erota todellisista arvoista. Todellista suuremmat suunnittelukuormat johtavat ylimitoitukseen ja sitä kautta korkeampaan painoon sekä hintaan. Jos mitoituskuorma on ollut liian pieni, saattaa lopputuloksena olla liian aikainen vaurio ja käytön keskeytyminen.

Edellisessä kappaleessa mainitun tilauskohtaisen laskentamenetelmän avulla pystytään käyttäjän tarpeet havainnoimalla mitoittamaan paalipihti yksilöllisesti sopivaksi, ottamalla huomioon esimerkiksi käsiteltävän kuorman koko, paino ja esimerkiksi käyttöympäristö tai käyttötyyli. Laskentamenetelmän toimintaa varten paalileuan ja johteen välisen hitsin väsymistarkastelua halutaan yksinkertaistaa. Tähän asti väsymisanalyysi on suoritettu ENS (Effective Notch Stress) –menetelmällä, joka vaatii yksityiskohtaisen FEM-mallin (Finite Element Method) jokaiselle eri tapaukselle. Tämän tutkimuksen tavoitteena on määrittää tarkasteltavalle hitsiliitokselle nimellisen jännityksen mukainen väsymisluokka (FAT-luokka), jolloin jatkossa väsymiskestoaian määrittäminen kyseiselle hitsille voidaan suorittaa nopeasti analyttisillä laskukaavoilla ottamalla huomioon leukojen ja johdepalkin mitat, sekä käyttökohte, joka määrittää pihdin puristusvoiman.

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena on siten selvittää väsytykokeiden avulla edellä mainitun hitsiliitoksen nimellinen väsymisluokka, sekä samalla verifioida käytettyjen FEM-mallien vastaavuus todellisten väsytykokeissa ilmenevien jännitysten ja muodonmuutosten kanssa. Lisäksi tavoitteena on selvittää erilaisten jälkikäsitteilyvaihtoehtojen vaikutus väsymiskestoikään, sekä tutkia 4R-menetelmän sekä muiden väsymislaskentamenetelmien toimivuutta väsymislaskennassa. Tulosten perusteella on myös tarkoitus määrittää laatuksittait hitsille tuotantoa varten. Tutkimuskysymykset voidaan siten muotoilla:

- Mikä on tarkasteltavan hitsiliitoksen nimellisen jännityksen mukainen väsymisluokka?
- Vastaavatko ENS- ja Hot Spot -malleissa käytetyt kuormat ja reunaehdot sekä niitä käyttäen lasketut kestoikatulokset väsytykokeita?
- Miten erilaiset jälkikäsitteilymenetelmät vaikuttavat tarkasteltavan hitsiliitoksen väsymiskestävyteen?

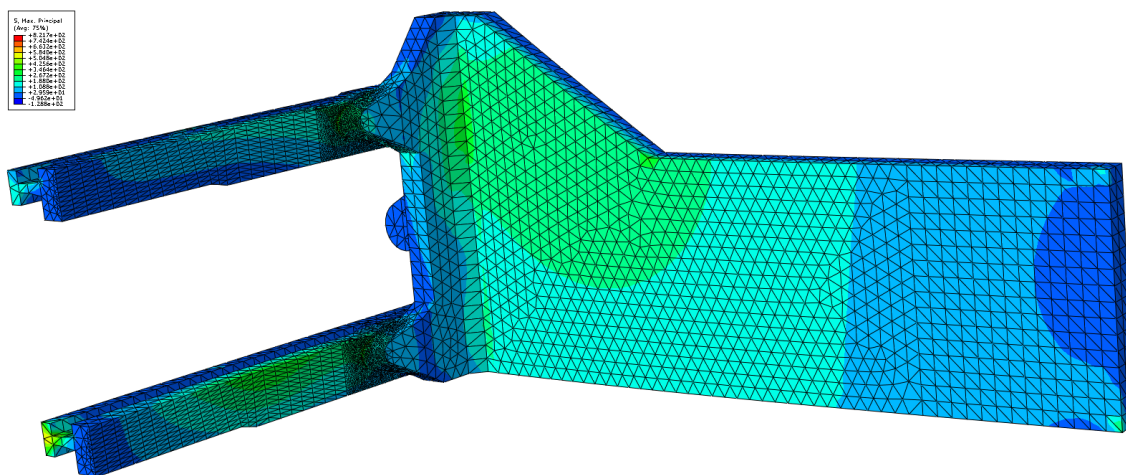
1.3 Tutkimuksen rajaus

Tutkimus on rajattu paalileuan ja johteen väliseen hitsausliitokseen, jonka nimellisen jännityksen mukainen väsymisluokka pyritään selvittämään. Hitsin muodoksi on rajattu kaareva hitsin rajaviiva (kuva 2), joka ENS-laskennan perusteella osoittautui väsymisominaisuuksiltaan parhaimmaksi. Vastaava hitsimuoto on käytössä Auramo Oy:n tuotannossa.



Kuva 2. Kaarevan rajaviivan hitsimuoto (Virtanen 2018).

ENS-laskennassa paalileuka mallinnettiin 1 mm:n rajaviivan pyörityssäteellä. Kuormitukset ja reunaehdot asetettiin Auramo Oy:n laskentaperusteiden mukaisesti. Vaihtoehtoisia hitsimuotoja verrattiin eri rasiustapauksissa, joiden perusteella paras hitsimuoto voitiin valita. Kuvassa 3 on esitetty paalileuan FEM-malli.



Kuva 3. Paalileuan FEM-malli.

Valintaan vaikutti myös kaarevarajaviivaisen hitsin käyttö tämänhetkisessä tuotannossa, jolloin tutkimuksen tulokset ovat suoraan sovellettavissa tällä hetkellä tuotannossa oleviin paalipihteihin.

Jälkikäsittelymenetelmistä työhön sisällytettiin hionta, pituussuuntainen hionta, HFMI-käsittely (High Frequency Mechanical Impact), TIG-käsittely (Tungsten Inert Gas) ja yllirasiustuskäsittely.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelminä käytettiin väsytykskoikeita sekä teoreettista laskentaa Hot Spot -menetelmällä, ENS-menetelmällä ja 4R-menetelmällä. ENS-laskenta suoritettiin Dassault Systemes Abaqus 6.14 –ohjelmistolla. Laboratoriossa suoritettavat mittaukset olivat 3D-skannaus, jäännösjännitysmittaukset sekä väsytykskoeket. Väsytykskokeiden yhteydessä suoritettiin myös staattiset mittaukset, joiden tuloksia hyödynnettiin tarkasteltavan hitsin väsymisluokan määrittämisessä.

Mittauksista saatua dataa hyödynnettiin lisäksi ENS- ja 4R-laskennassa sekä eri jälkikäsitelyvaihtoehtojen vertaamiseen. Lisäksi teoreettisessa laskennassa käytettiin hyväksi asiaan liittyvää kirjallisuutta, standardeja sekä suosituksia.

2 VÄSYMISKESTOIAN LASKENTAMENETELMÄT

Tässä luvussa esitetään käytetyt väsymislaskentamenetelmät. Menetelminä käytettiin Hot Spot –, ENS- sekä 4R-menetelmää. Lisäksi selvitetään johteessa vaikuttavan pituussuuntaisen normaalijännityksen laskentaperusteet, jonka avulla nimellinen väsymisluokka voidaan selvittää. Väsymisluokan ollessa tiedossa voidaan väsymiskestoikä vastaavalle hitsityypille määrittää jatkossa analyttisin menetelmin. Vertailun vuoksi normaalijännitys määritetään myös venymäliuskamittauksin.

2.1 Johteessa esiintyvän nimellisen normaalijännityksen määrittäminen

Momentin palkille (tässä tapauksessa johde) aiheuttama pituussuuntainen normaalijännitys σ_x voidaan laskea kaavalla

$$\sigma_x = \frac{M_t}{I_z} * y \quad (1)$$

Jossa M_t on palkissa vaikuttava taivutusmomentti, I_z palkin taivutusjäyhyys ja y tarkastelupisteen etäisyys neutraaliakselista. (Outinen & Vulli 1979, s. 155.)

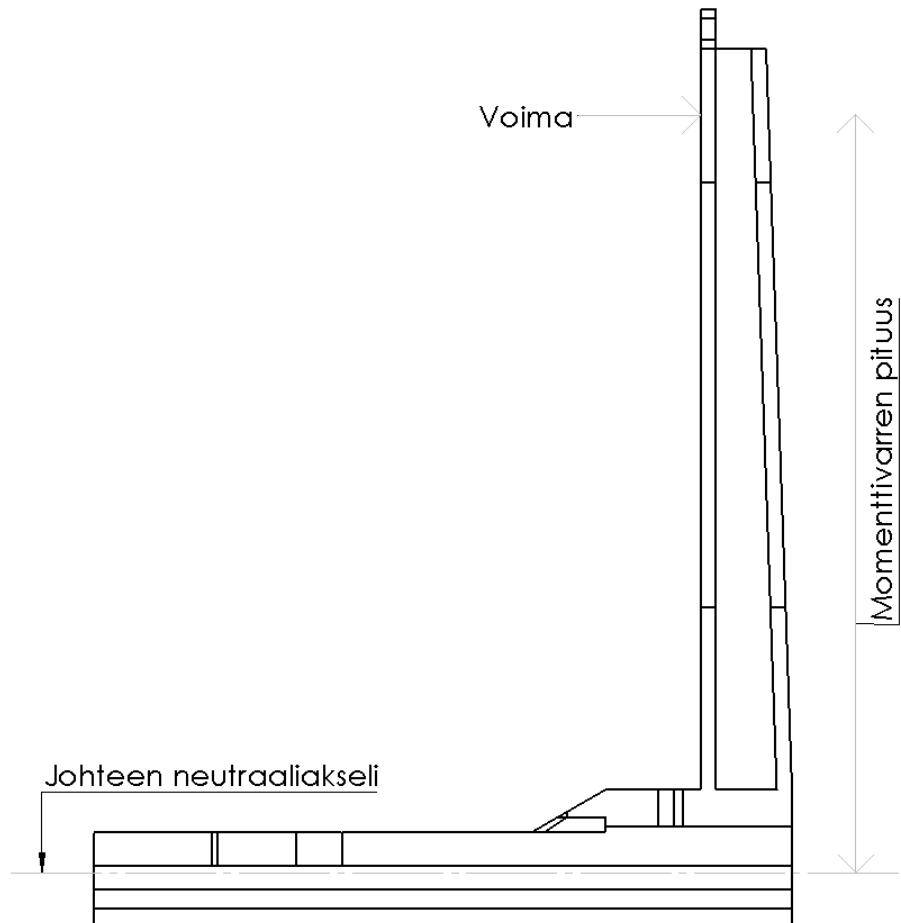
Johteessa vaikuttava momentti M_t lasketaan kaavalla

$$M_t = F * l \quad (2)$$

Jossa F on leukaan vaikuttava voima ja l on voiman vaikutuspisteen kohtisuora etäisyys johteen neutraaliakselista.

Johteessa vaikuttava momentti määräytyy leuan mittojen ja kuorman kosketuspisteen mukaan (kuva 4). Tarkastelupisteen etäisyyttä varten neutraaliakselin paikka pitää määrittää. Paikka määräytyy johteen materiaalien ja poikkipintageometrian perusteella. Johteen ollessa materiaaliltaan homogeeninen ja symmetrinen taivutusakselia kohtisuoran akselin suhteen, voidaan neutraaliakselin paikka määrittää palkin poikkileikkauksen pintakeskiönä. Tällöin

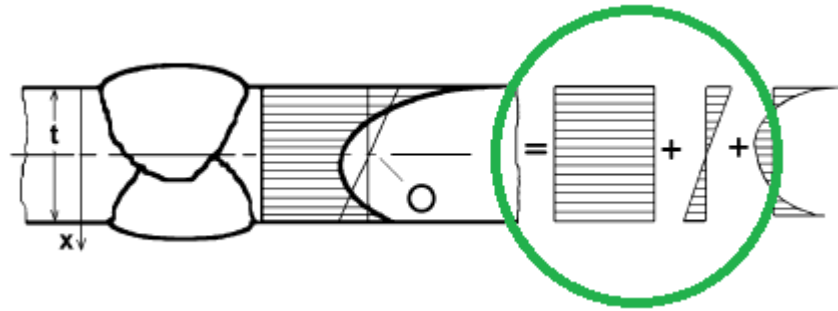
oletuksena on myös, että kuormitustaso on pääakselin suuntainen. (Outinen & Vulli 1979, s. 154-155.)



Kuva 4. Johteessa vaikuttavan momentin laskenta.

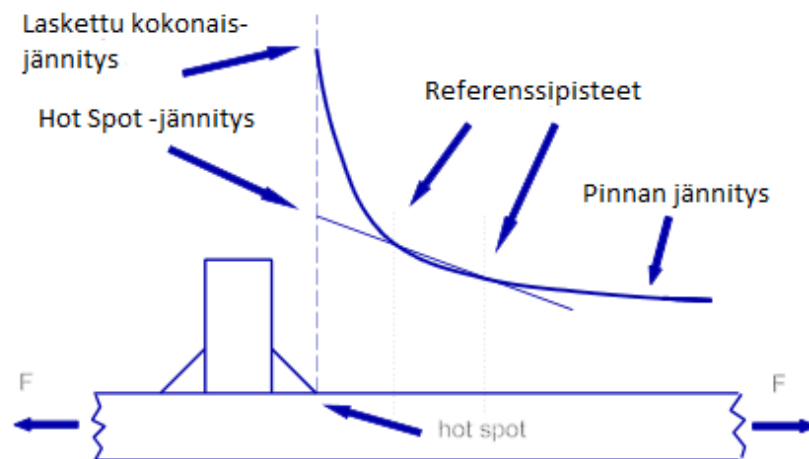
2.2 Hot Spot –menetelmä

Hot Spot –menetelmässä tarkastellaan rakenteellisen epäjatkuvuuden aiheuttamaa jännityskonsentraatiota, johon ei kuitenkaan oteta huomioon hitsin lovivaikutuksesta aiheutuvaa epälineaarista jännityspiikkiä. Hitsin rajaviivan geometrian vaikutus oletetaan vakioksi, joten sen vaikutusta kestoikään ennustemalli ei ota tapauskohtaisesti huomioon. Menetelmässä huomioon otetut jännityskomponentit, nimellinen jännitys ja rakenteellisen epäjatkuvuuden aiheuttama sekundäärinen taivutusjännitys on esitetty kuvassa 5. Kuvan 5 tapauksessa rakenteellinen epäjatkuvuus aiheuttaa kappaleeseen taivutusjännityskomponentin. Laskentamallissa huomioon otetut komponentit on ympyröity.



Kuva 5. Hot Spot –menetelmässä huomioidut jännityskomponentit (muok. Niemi & Kemppi 1993, s. 235).

Hot Spot –jännitys tarkasteltavassa paikassa voidaan määrittää ekstrapoloimalla tietyistä mittauspisteistä saadut jännitykset joko FEM-mallin avulla tai mittaamalla tutkittavasta rakenteesta. Ekstrapolaatio voidaan tehdä paksuuden yli tai pintaa pitkin, riippuen sovelluskohteesta. Mittaamisen periaate pintaa pitkin on esitetty kuvassa 6. (Hobbacher 2013, s. 19-21.)



Kuva 6. Hot Spot-menetelmän ekstrapolaatio (muok. Hobbacher 2013, s. 20).

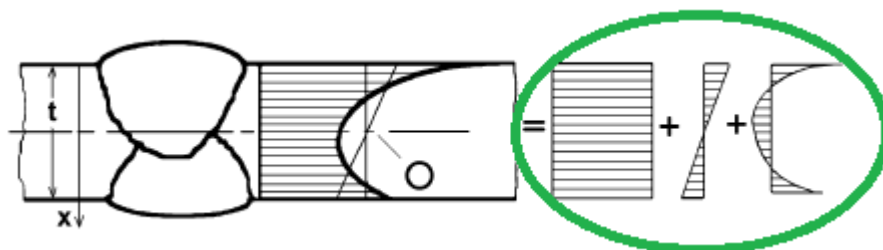
Kun vertailujännitys (tässä tapauksessa Hot Spot -jännitys) on määritetty, sijoitetaan se väsymiskestoian laskentayhtälöön, jonka tuloksena saadaan laskennallinen väsymiskestoikä. (Hobbacher 2013, s. 36.)

$$N = \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma} \right)^m * 2 * 10^6 \quad (3)$$

Yhtälössä N on väsymiskestoikä, FAT on väsymisluokka, $\Delta\sigma$ on jännitysvaihteluväli ja m on väsymiskäyrän kulmakerroin.

2.3 ENS-menetelmä

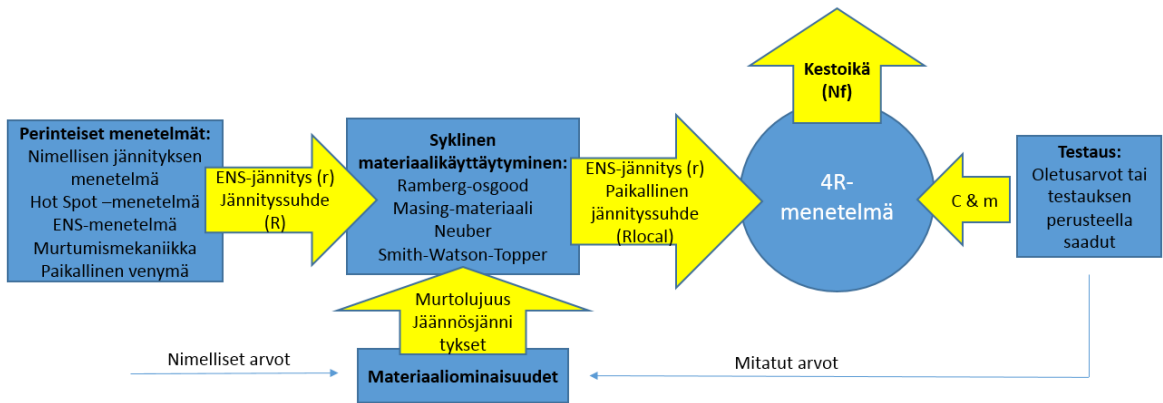
ENS-menetelmässä otetaan huomioon kaikki kuvaan 7 merkatut jännityskomponentit, jotka ovat kalvojännityksen, sekundäärisen taivutusjännityksen sekä lovijännityksen komponentit. Huomioon ottaminen tapahtuu siten, että tarkasteltavasta alueesta, esimerkiksi hitsiliitoksesta mallinnetaan ENS-malli, jossa tarkasteltava lovi on mallinnettu yhden millimetrin pyöristyssäteellä. Vaihtoehtoisesti mallinnus voidaan tehdä pyöristyssäteellä yksi millimetri lisätynä todelliseen tiedossa olevaan pyöristyssäteeseen, jolloin myös tulokset ovat tarkemmat. Väsymiskestoian laskennassa käytetty jännitys on suurin loven pohjalla vallitseva pääjännitys tai Von Mises –jännitys. Laskennassa käytetty vertailujännitys määrää käytettävän FAT-luokan, Von Mises:n yhteydessä 200 MPa ja pääjännitysten yhteydessä 225 MPa (Hobbacher 2013, s. 29, Radaj et al. 2006, s. 96-97, Sonsino et al. 2010, s. 4).



Kuva 7. ENS-menetelmässä huomioidut jännityskomponentit (muok. Niemi & Kemppi 1993, s. 235).

2.4 4R-menetelmä

4R-menetelmässä laskenta perustuu ENS-menetelmään, mutta 4R-menetelmässä käytetty S-N-käyrä yksilöidään eri tilanteiden mukaan ottamalla huomioon tarkemmin materiaali, jäännösjännitykset sekä jännityssuhde. Materiaaliarvoina käytetään materiaalin murtolujuutta R_m , joka jäännösjännityksen σ_{res} ja jännityssuhteen R kanssa mahdollistaa SWT-parametria (Smith Watson Topper) käyttäen paikallisen jännityssuhteen R_{local} laskennan. Lopputuloksena saadaan perinteisestä kaksijakoisesta väsymiskäyrästä poikkeava jatkuva S-N-käyrä, joka mahdollistaa tarkemman väsymiskestoikäarvion. 4R-menetelmän periaate on esitetty kuvassa 8. (Nykänen et al. 2016, s. 179-180.)



Kuva 8. 4R-menetelmän periaatekuva.

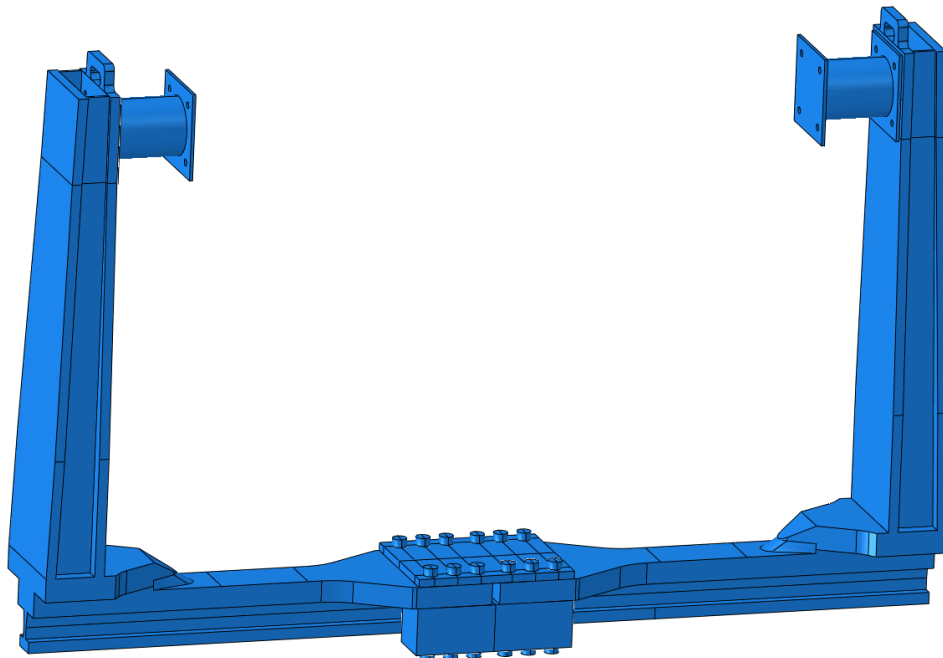
4R-menetelmän laskennassa käytetään todellisella hitsin rajaviivan pyöristyksellä määritettyä ENS-jännitystä, joka sijoitetaan 4R-laskentapohjaan muiden edellä kerrottujen alkuarvojen kanssa.

3 KOEKAPPALEET

Väsytykskoikeita varten paalipihti yksinkertaistettiin yhden johdeosan ja leukaosan välisen hitsin sisältäväksi koekappaleeksi. Hitsi sekä kappaleen johdeosa vastaavat varsinaista paalipihtiä, jolloin johteen ja pihtiosan väliselle hitsiliitokselle määritettävä väsymisluokka soveltuu myös todellisen pihtirakenteen väsymislaskentaan. Leukaosien rakennetta lujitettiin tuotannossa oleviin pihteihin verrattuna, jotta niiden väsyminen ei vaikuttaisi tarkasteltavan hitsin väsymistarkasteluun.

3.1 Koekappale

Kuvassa 9 esitetty koejärjestely on pysty akselin suhteen symmetrinen. Leukarakenteen puolikkaat on mahdollista irrottaa ja vaihtaa, jolloin saman väsytykskokeen aikana voidaan testata kahta erilaista koetapausta. Väsymisvaurion ilmetessä vaurioitunut puolikas vaihdetaan kunnossa olevaan, jolloin myös toisen puolikkaan väsymiskapasiteetti saadaan selville. Leukojen päissä käytetään jatkokappaleita kuormitussylinterin asentamiseksi.



Kuva 9. Väsytykskoikeissa käytetty koejärjestely.

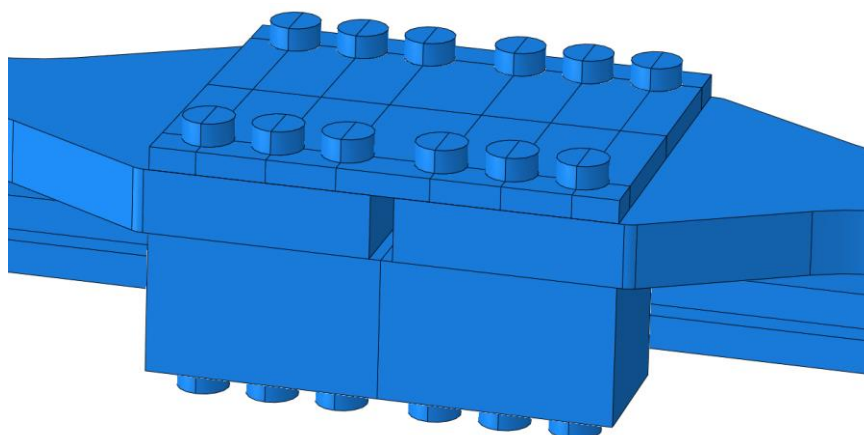
Koekappaleiden hitsimuotona käytettiin ENS-laskennan perusteella parhaaseen väsymiskeskitoikään johtanutta hitsimuotoa.

3.1.1 Väsymispaikan varmentaminen

Väsytykskoikeita varten väsymisvaurio haluttiin saada aikaan tarkasteltavan hitsin rajaviivalle. Sitä varten leukarakenne suunniteltiin kotelomaiseksi, jolloin sen muodonmuutosta saatiin pienennettyä sekä mahdollisen leuan alueen väsymisen riski minimoitua suuremman jäyhyyden ja sitä kautta pienempien pintajännitysten ansiosta. Toinen mahdollinen väsymispaikka tarkasteltavan hitsin rajaviivan lisäksi oli kotelorakenteen tyvessä oleva liitoshitsi. Sen väsymistä verrattiin tarkasteltavan hitsin väsymiseen ENS-analyysin avulla, jossa sekä hitsin rajaviiva että kotelon liitoshitsi mallinnettiin 1 mm säteisellä pyörityksellä. Laskennan perusteella leukakoteloiden uumalevyjen paksuutta pienennettiin 8 mm:iin, jolloin jännityskeskittymiä uumien kohdalle saatiin vähennettyä. Laskenta on esitetty liitteessä I. Kolmas mahdollinen väsymispaikka oli koekappaleiden välisen ruuviliitoksen alueella. Ruuviliitoksen mitoitusta käsitellään seuraavassa kappaleessa.

3.1.2 Koekappaleiden välisen ruuviliitoksen mitoitus

Kahden leukapuolikkaan välisen ruuviliitoksen suunnittelussa (kuva 10) tavoitteena oli saada liitos kestävämmän väsytykskoikeiden väsyttävä kuormitus ja estää ylimääräinen liike, joka vähentäisi muodonmuutosmittauksen tarkkuutta. Liitos mitoitettiin kiinnitysluokka B:n mukaisesti käyttörajatilassa liukumisen estäväksi kiinnitykseksi. Tällöin ruuvien kiritysvoiman aikaansaama kitka kantaa liitosta kuormittavan ruuveja vastaan kohtisuoran kuorman, jolloin ruuveissa ei esiinny leikkausjännitystä. Liitoksessa käytettiin leuat yhdistävää päälilevyä, joka lujitti liitosta ja teki siitä kaksileikkeisen, jolloin liitoksen kestävyys kasvoi. Esikiristysvoimana käytettiin standardin mukaista 24 millimetrin 10.9 lujuusluokan ruuville määritettyä taulukkoarvoa 247 kN. (SFS EN 1090-2 2012, s. 57.)



Kuva 10. Koekappaleiden välinen kiinnitysliitos.

Liitoksen staattinen kestävyys laskettiin standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaisesti kaavalla

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s * n * \mu}{\gamma_{M3,ser}} * (F_{p,C} - 0.8 * F_{t,Ed,ser}) \quad (4)$$

jossa k_s on reiän muotokerroin, n on kitkapintojen lukumäärä, μ on kitkakerroin, γ_{M3} on ruuviliitoksen osavarmuuskerroin, $F_{p,C}$ on ruuvin esijännitysvoima ja $F_{t,Ed,ser}$ on ruuviin vaikuttava liitosta ”avaava” vetovoima. Laskennassa käytettiin k_s arvoa 0.85 (ylisuuret reiät), kitkakertoimena arvoa 0.2, varmuuslukuna arvoa 1.1 ja vetovoimana FEM:llä määritettyä korkeinta ruuvin aksiaalista vetovoimaa, josta on vähennetty ruuvin esikiristysvoima. Vetovoima määritettiin laskemalla voima suurimmasta ruuveissa esiintyvistä vetojännityksestä ja olettamalle sen vaikuttavan jokaisessa ruuvissa, vaikka todellisuudessa muissa ruuveissa jännitys on pienempi. Siten tulos on turvallisella puolella. FEM-mallissa kuormitusvoima vastasi kokeissa käytettyä voimaa.

Kiinnitysruuvien väsyminen laskettiin standardin SFS-EN 1993-1-9 mukaisesti käyttämällä jännitysarvona FEM:llä saatua suurinta ruuvissa esiintyvää ruuvinsuuntaista normaalijännitysvaihteluvälin arvoa, joka oli 30 MPa. Sijoittamalla arvo kaavaan

$$N = \left(\frac{FAT}{\gamma_{Mf} \Delta\sigma} \right)^m * 2 * 10^6 \quad (5)$$

Jossa FAT on ruuvin väsymisluokka, tässä tapauksessa standardin tapaus numero 14 mukaan 50 MPa, γ_{Mf} on aineosavarmuusluku, tässä tapauksessa 1.35 (varman kestämisen periaate), $\Delta\sigma$ on jännitysvaihteluväli ja m on väsymiskäyrän kulmakerroin, tässä tapauksessa 3. Arvot sijoitettuna saadaan väsymiskestoiksi 3.8 milj. sykliä. Ruuviliitoksen laskenta on esitetty liitteessä II. (SFS-EN 1993-1-9 2008, s. 20.)

3.2 Tutkittavassa liitoksessa käytetyt jälkikäsittelymenetelmät

Väsytykskokeilla verrattiin hitsatussa tilassa olevan hitsin sekä muilla tunnetuilla jälkikäsittelymenetelmillä käsiteltyjen hitsien väsymiskestoikää. Käytetyt menetelmät olivat hionta, HFMI-käsittely, TIG-käsittely ja yllirasituskäsittely. Jälkikäsittelyillä pyritään pienentämään

liitoksessa olevia alkuvikoja, vähentämään lovivaikutusta tai vaikuttamaan liitoksen alueen jäännösjännitykseen.

3.2.1 Hitsatussa tilassa

Hitsatussa tilassa oleva hitsi on jälkikäsittelemätön liitos, jota käytetään vertailutapauksena muihin jäljempänä esiteltyihin jälkikäsittelymenetelmiin verrattuna. Hitsatussa tilassa oleva liitos on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Hitsatussa tilassa oleva liitos.

3.2.2 Hionta

Hionnan tarkoituksena on tehdä hitsin ja perusaineen liitoskohdasta eli rajaviivasta jouhevampi sekä poistaa mahdolliset alkusäröt. Rajaviivalla sekä muualla hitsissä esiintyvät epätasaisuudet ja pienet alkusäröt hiotaan pois, jolloin rajaviivalle muodostuva lovijännitys jää pienemmäksi verrattuna käsittelemättömään hitsiin. Näin ollen väsymiskestävyys paranee. Hionta ei merkittävästi vaikuta rajaviivalla esiintyviin jäännösjännityksiin, joilla voi olla myös suuri vaikutus väsymiskestoikään. Hiottu liitos on esitetty kuvassa 12. Hiontasuunta on poikittainen kuormitussuuntaan nähden ja se ulottuu koko hitsatulle alueelle, jolla saa-

daan koko hitsin alueen alkuviaat poistettua. Tästä hiontatavasta jäävät rasisuuntaan nähdessä poikittaiset hiontajäljet saattavat kuitenkin vaikuttaa negatiivisesti väsymiskestoikään. (Smith & Hirth 1985, s. 166-183.)



Kuva 12. Hiottu hitsiliitos.

3.2.3 Hionta pitkittäin

Hionta pitkittäin tehtiin valmiiksi hiotulle hitsille käyttämällä paineilmakäyttöistä hiontalaitetta. Hionnan jälkeen pinnanlaatu vastasi 150-luokan hiomapaperin jälkeä. Etuna tällä hiontatavalla aiempaan esitettyyn poikittaissuuntaiseen hiontaan verrattuna on parempi pinnanlaatu, sekä pituussuuntainen hiontajälki, joka ei oletettavasti ole yhtä altis väsymiselle. Pitkittäin hiontaa voi soveltaa myös osaan hitsiä, esimerkiksi alimpiin hitsipiеноihin. Pituussuuntaisesti hiottu liitos on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Pituussuuntaisesti hiottu hitsi.

3.2.4 HFMI-vasarointi

HFMI-vasaroinnissa hitsin rajaviiva vasaroidaan paineilmakäyttöisellä HFMI-vasaralla, jolloin vasaroidulle alueella muodostuu väsymiskestoian kannalta edullisia puristusjäännösjännityksiä, jotka pienentävät tehollisen jännitysvaihtelun suuruutta ja alentavat keskijännitystasoa. Tällöin väsymiskestävyys paranee. Lisäksi vasarointi muokkaa rajaviivan geometriaa väsymisen kannalta paremmaksi. Varsinkin lujilla teräksillä väsymiskestoikä voi moninkertaistua. (Booth 1977.)

Vasarointi tehtiin 2 mm säteisellä kärjellä, jolloin rajaviivan pyöristyssäteeksi saatiin 2-2.5 mm. Suurentunut pyöristyssäde verrattuna kärjen pyöristyssäteeseen johtuu siitä, että vasaroinnin aikana työkalun kärki ei pysy täysin samalla linjalla. Vasarointi tehtiin hakemalla ohjaus hitsin rajaviivalta. HFMI-käsitelty rajaviiva on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. HFMI-vasaroitu rajaviiva.

3.2.5 TIG-käsittely

TIG-käsittelyssä hitsin rajaviiva uudelleen sulatetaan TIG-hitsauslaitteiston avulla (ilman lisäainetta), jolloin sen väsymisominaisuudet paranevat. Syynä tähän on parantunut rajaviivan geometria, mahdollinen kuonan poistuminen ja kovuuden kasvu lämpövaikutusalueella. Vaikutus väsymiskapasiteettiin on samankaltainen hionnan kanssa. TIG-käsittelyn etu on sen nopeus, joka tässä tapauksessa oli alle minuutti yhtä liitosta kohden. TIG-käsittely liitos on esitetty kuvassa 15. (Haagensen 1985.)



Kuva 15. TIG-käsitelty rajaviiva.

3.2.6 Ylirasituskäsittely

Ylirasituskäsittelyssä rakennetta ylikuormitetaan (vetojännityksen puolelle) ennen varsinaista käyttöä, jolloin kriittiset alueet paikallisesti plastisoituvat, kuitenkin siten, ettei globaaliin rakenteeseen jää pysyvää muodonmuutosta. Paikallisesti plastisoituneet alueet jäävät puristusjännitystilaan globaalin rakenteen palautuessa ennalleen. Kuten HFMI-käsittelyn seurauksena, puristusjäännösjännitys laskee ulkoisen syklisen kuorman aiheuttamaa keskijännitystä, jolloin väsymiskestoikä pitenee. Ylirasittamisen hyödyt eivät todennäköisesti ole yhtä suuria kuin HFMI- tai TIG-käsittelyillä. (Booth 1991.)

4 VÄSYMISLASKENTA

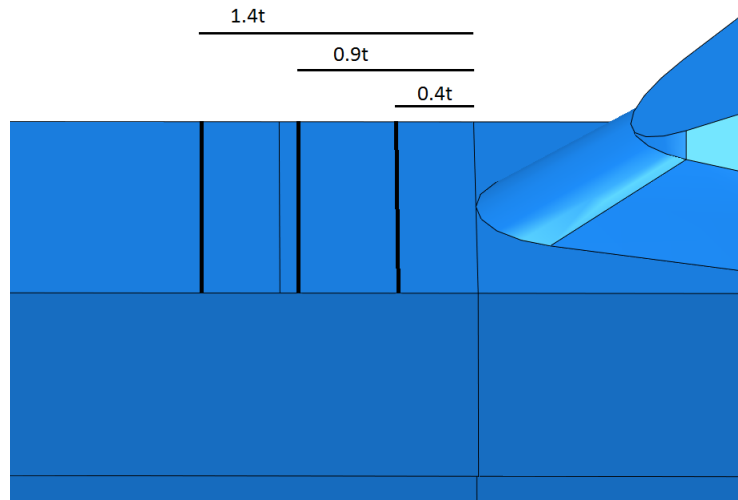
Koekappaleen teoreettinen väsymiskestoikä laskettiin Hot Spot -menetelmällä, ENS-menetelmällä ja 4R-menetelmällä. Hot Spot -laskenta pystyttiin tekemään ilman mittauksia varsinaisista koekappaleista, mutta ENS-menetelmää ja 4R-menetelmää varten koekappaleista mitattiin tarkasteltavan hitsin rajaviivan pyöristyssäde sekä jäännösjännitys. Hot Spot -jännitysten määrittäminen tehtiin sekä pintaa pitkin, että paksuuden yli. ENS-laskenta tehtiin 1 mm teoreettisella pyöristyssäteellä sekä mitatuilla todellisilla pyöristyssäteillä.

4.1 Hot Spot –laskenta pintaa pitkin

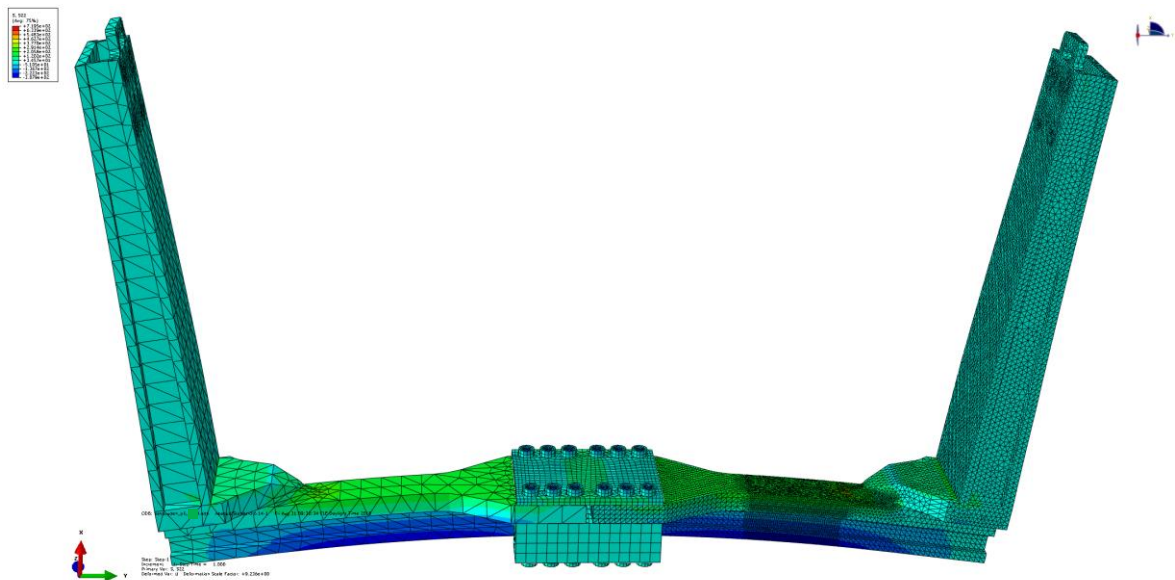
Hot Spot –jännitys paalipihdin hitsausliitokselle määritettiin FEM-mallin perusteella, sekä venymäliuskamittauksilla koekappaleen pinnasta. FEM-mallissa käytettiin kolmea mittapistettä etäisyyksillä $0.4t$, $0.9t$ ja $1.4t$ hitsin rajaviivasta, joiden avulla rajaviivalla vaikuttava Hot Spot –jännitys laskettiin kaavalla (Hobbacher 2013, s. 24.):

$$\sigma_{hs} = 2.52 * \sigma_{0.4t} - 2.24 * \sigma_{0.9t} + 0.72 * \sigma_{1.4t} \quad (6)$$

jossa σ_{hs} on Hot Spot –jännitys ja σ -arvot ovat eri mittauspisteissä olevia normaalijännitysarvoja. Hot Spot mittaetäisyydet on esitetty kuvassa 16 ja laskettu FEM-malli kuvassa 17. Jännitykset poimittiin keskeltä kappaleen yläpintaa merkatuilta etäisyyksiltä. Paksuutena t käytettiin ylemmän laipan paksuutta. FEM-mallin elementtityyppinä käytettiin 10 solmuisia tetraelementtejä sekä korotuspaloissa 8 solmuisia heksaelementtejä. Elementtikoko määritettiin siten, että solmukohdat osuivat Hot Spot –jännityksen mittapistisiin.

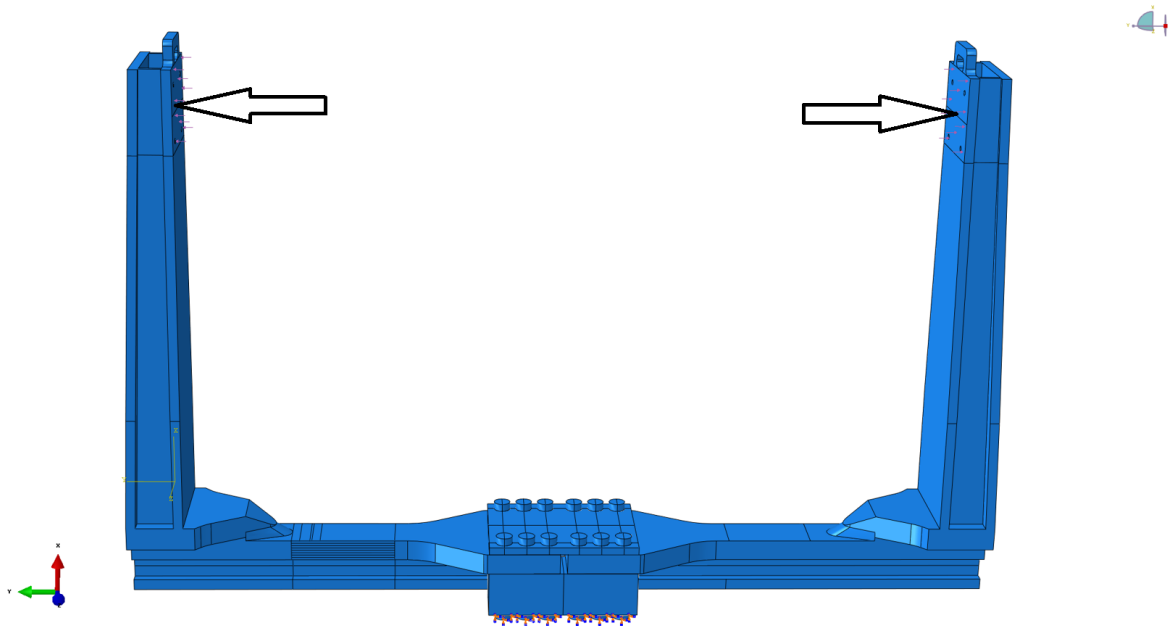


Kuva 16. Hot Spot –mittausetäisyydet $0.4t$, $0.9t$ ja $1.4t$ hitsin rajaviivasta mitattuna.



Kuva 17. Hot Spot –FEM-malli (skaalattu siirtymä).

Hot Spot –mallissa reunaehdot asetettiin kiinnitysruuvien alareunaan simuloimaan koetilanteen kiinnitystä T-urapöytään. Ruuvien alareunoilta estettiin siirtymät ja kiertymät kaikkien akselien suhteen. Testivoiman vaikutusalueet leukapalkkien yläreunassa on esitetty kuvassa 18. Tarkempi vaikutuspaikka on esitetty ENS-laskennan yhteydessä kappaleessa 4.3.



Kuva 18. Hot Spot –mallin reunaehdot ja voiman vaikutuspaikka.

FEM-mallista poimitut jännitykset olivat $\sigma_{0.4t}=233$ MPa, $\sigma_{0.9t}=205$ MPa ja $\sigma_{1.4t}=195$ MPa. Sijoittamalla arvot kaavaan 6 saatiin Hot Spot –jännitykseksi $\sigma_{hs}=268$ MPa. FAT-luokan valinta ei ollut yksikäsitteistä, koska täysin vastaavaa ennakkotapausta ei ole. Taulukkotapaus numero 3 vastaa kuitenkin liitos- ja vauriotyypiltään tutkittua liitosta, joten FAT-luokaksi valittiin 100 MPa. (Hobbacher 2013, s. 77.)

Sijoittamalla arvot väsymiskestojen yhtälöön 4 (ilman aineosavarmuuskerrointa) saatiin karakteristiseksi kestoiksi 103500 sykliä. Mahdollisia paksuuskorjauskertoimia ei laskennassa huomioitu. Laskenta on esitetty liitteessä III.

4.2 Hot Spot –laskenta paksuuden yli

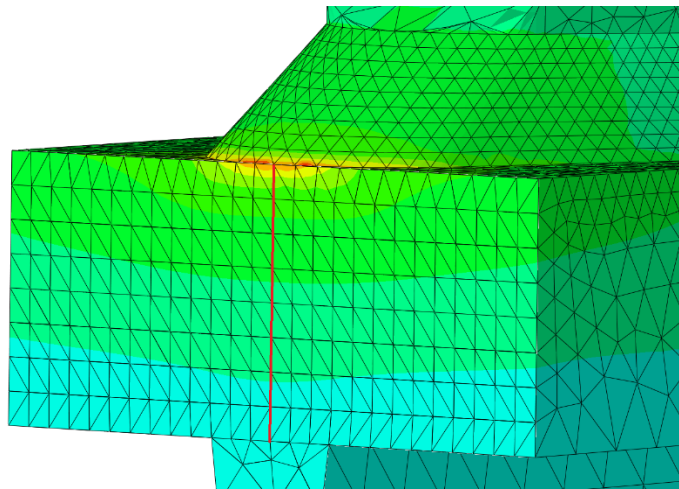
Paksuuden yli –menetelmällä laskettaessa tarkastellaan taivutustasossa esiintyviä normaali-jännityksiä, joiden avulla rajaviivalla esiintyvä Hot Spot –jännitys voidaan määrittää. Jännitys määritetään eristämällä FEM:llä määritetystä jännitysjakaumasta kalvojännityksen ja sekundäärisen taivutusjännityksen osuus käyttämällä integrointikaavoja: (Hobbacher 2013, s. 24.)

$$\sigma_m = \frac{1}{t} * \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) * dx \quad (7)$$

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} * \int_{x=0}^{x=t} (\sigma(x) - \sigma_m) * \left(\frac{t}{2} - x\right) * dx \quad (8)$$

Kun kalvojännityksen ja taivutusjännityksen osuudet ovat tiedossa, voidaan ne summaamalla määrittää tutkittavassa pisteessä vaikuttava Hot Spot –jännitys.

Jännitys jakauma määritettiin FEM-mallin perusteella poimimalla jännitysarvot kappaleen keskilinjalta rajaviivan alapuolelta. Kuvaan 19 on merkitty punainen linja, jolla olevilta solmuilta jännitykset poimittiin. Käyttämällä kuvan 19 mukaista verkotusta mittapisteitä oli 17 kappaletta, joiden perusteella jännitys jakauma määritettiin.



Kuva 19. Hot Spot –jännitysten poimintalinja paksuuden yli –menetelmässä.

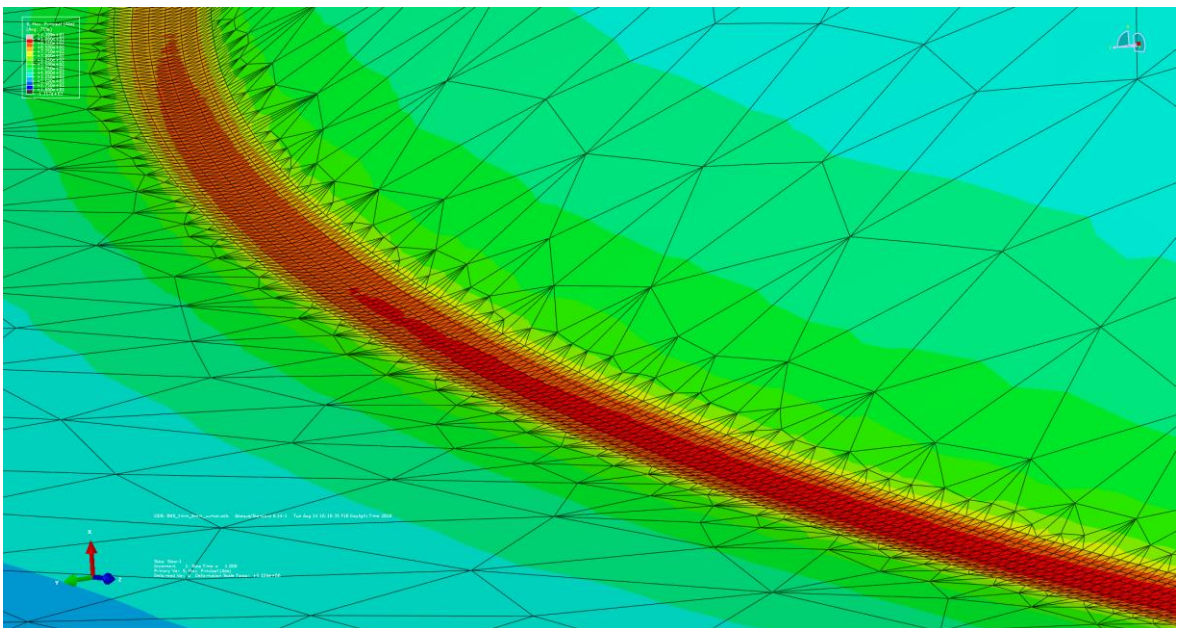
Hot Spot –jännitykseksi saatiin 295 MPa ja sitä vastaavaksi väsymiskestoksi FAT-arvolla 100 MPa saatiin 78200 sykliä. Laskenta on esitetty liitteessä IV.

4.3 ENS-laskenta

ENS-menetelmän mukainen väsymiskestoikä laskettiin molemmilla, 1 mm rajaviivan pyörityksellä ja todellisella rajaviivan pyörityksellä. Kuvassa 20 on esitetty analysoitu ENS-malli. Mallin yleinen verkkokokoo on 15 mm, pienentyen rajaviivalle kokoon 0.1 mm. Elementtityypeinä käytettiin leukarakenteessa 10 solmuisia tetraelementtejä, sekä korotuspa-loissa 8 solmuisia heksaelementtejä. Mallissa käytettiin symmetriaa hyväksi korvaamalla toinen leukarakenne jäljempänä esitetyillä reunaehdoilla. Tarkempi rajaviivan verkotus on esitetty kuvassa 21.



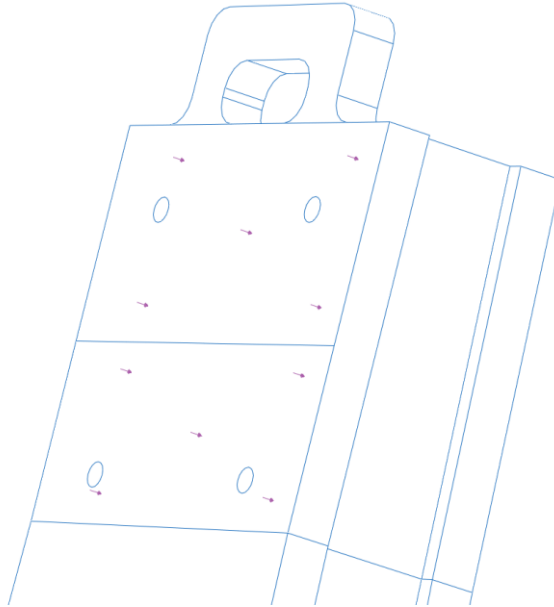
Kuva 20. ENS-malli.



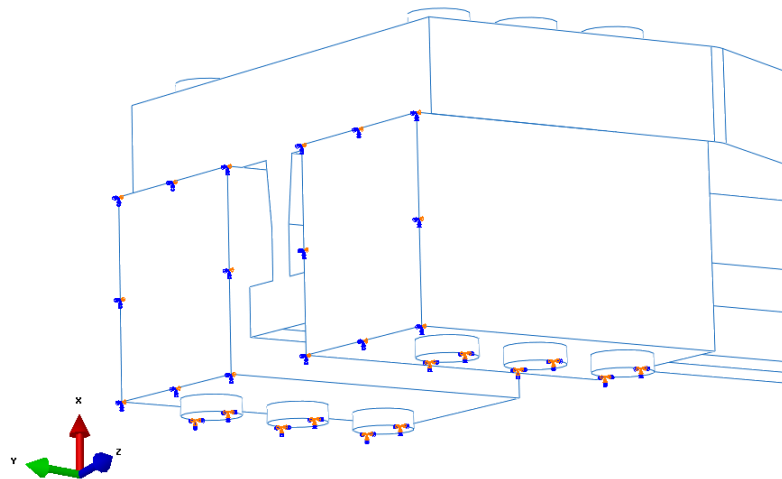
Kuva 21. Rajaviivan verkotus.

Voima asetettiin vaikuttamaan leuan yläpäässä olevalle pinnalle, kuvan 22 mukaisesti. Voima on merkattu kuvaan nuolilla vaikutussuunnan mukaisesti. Käytetyt reunaehdot on merkattu kuvaan 23. Kiinnitysruuvien alareunoista on estetty kaikki siirtymät ja kiertymät,

sekä korotuspalojen päästä y-suuntainen siirtymä ja kiertymät x- ja z-akselien ympäri. Reunaehdot simuloivat kappaleen kiinnitystä T-urapöytään.



Kuva 22. Voiman vaikutuspaikka.



Kuva 23. Reunaehtojen vaikutuspaikat.

4.3.1 Rajaviivan pyöristyssäde 1 mm

Laskennan tuloksena suurimmaksi 1 millimetrin säteisen rajaviivan pääjännitykseksi saatiin 971 MPa. Sijoittamalla saatu jännitysarvo kaavaan 3 saadaan karakteristiseksi kestoiksi 24900 sykliä. FAT-luokkana käytettiin pääjännityksillä laskettaessa 225 MPa ja m -arvona 3.

4.3.2 Todellinen rajaviivan pyöristyssäde

Mallinnusperusteet todellista rajaviivan pyöristyssädettä käytettäessä olivat samat kuin 1 mm rajaviivan tapauksessa siten, että rajaviivan elementtikoko oli aina pienempi kuin yksi neljäsosa rajaviivan pyöristyssäteestä (Hobbacher 2013, s. 30). Rajaviivan pyöristyssäteet mallinnettiin mitatun arvon mukaan, lisättynä yhdellä millimetrillä.

4.4 4R-laskenta

4R-laskentaa varten koekappalaista mitattiin rajaviivalla vaikuttava jäännösjäännitys, jonka lisäksi laskennassa käytettiin todellisella rajaviivan pyöristyksellä määritettyjä ENS-jännityksiä. Materiaaliarvoina käytettiin murtolujuutta 500 MPa sekä kimmokerrointa 200 GPa. Jännityssuhde R oli nolla.

4.5 FAT-luokan määrittäminen

Tarkasteltavan liitoksen FAT-luokka määritettiin väsytykskokeen tuloksen ja johteessa vaikuttavan nimellisen taivutusnormaalijännityksen perusteella. Eritavoin käsitellyille hitsiliitoksille määritettiin kullekin oma väsymisluokkansa, joita voidaan myöhemmin käyttää suunnittelutarkoituksiin.

Väsymislujuus lasketaan vakioamplitudisen jännitysvaihtelun tapauksessa seuraavan kaavan mukaisesti (SFS EN-ISO 1993-1-9 2005, s. 14):

$$\Delta\sigma_R^m * N_R = \Delta\sigma_C^m * 2 * 10^6 \quad (9)$$

Jossa $\Delta\sigma_C$ vastaa FAT-luokkaa, N_R väsymiskestoikää kuormitusyhteisissä ja $\Delta\sigma_R$ jännitysvaihteluväliä. Tällöin kaava voidaan muuttaa muotoon:

$$\Delta\sigma^m * N = FAT^m * 2 * 10^6 \quad (10)$$

Jossa $\Delta\sigma$ on jännitysvaihteluväli, N väsymiskestoikä, FAT väsymisluokka ja m väsymiskäyrän kulmakerroin. Tästä selvittämällä FAT-luokka saadaan:

$$FAT = \Delta\sigma * \left(\frac{N}{2 * 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (11)$$

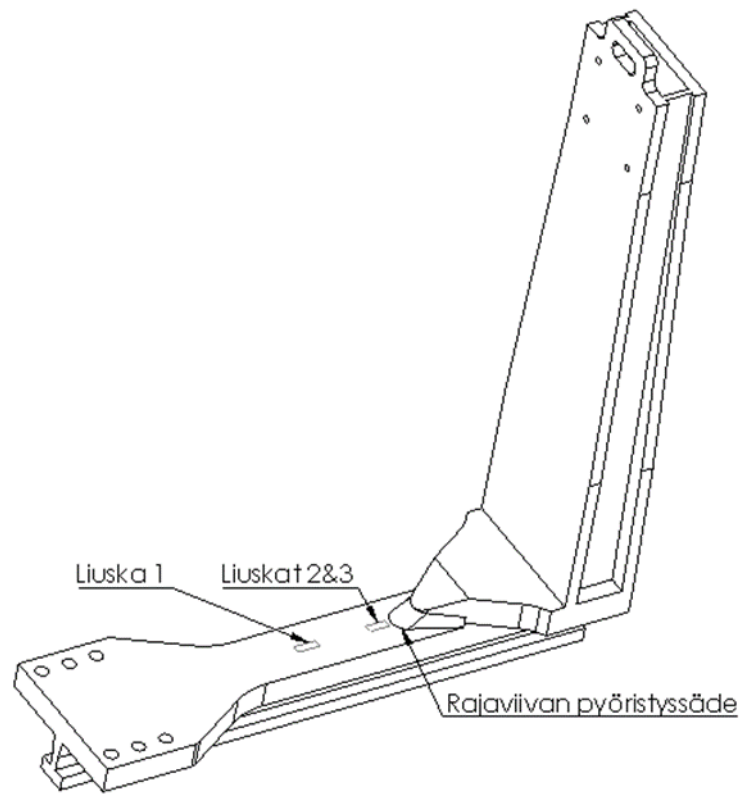
Koska tarkasteltavan hitsin oletettu väsymiskestoikä $N < 5$ milj. sykliä voidaan olettaa väsymiskäyrän kulmakertoimen arvoksi $m = 3$ (SFS EN-ISO 1993-1-9 2005, s. 14).

5 VÄSYTYSKOKEET

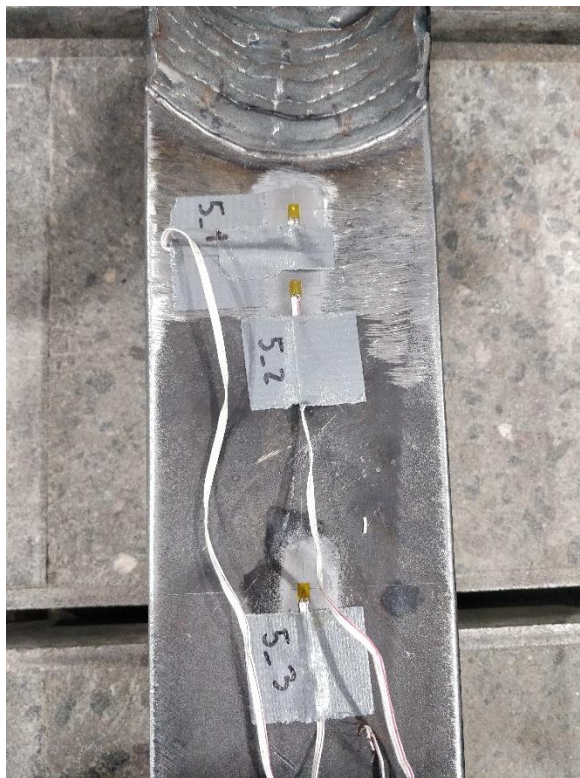
Laboratoriossa suoritettujen väsytykskokeiden tarkoitus on tutkia eri hitsilaatujen ja jälkikäsitteilyiden vaikutusta väsymiskestoikään sekä verrata teoreettisen väsymislaskennan tuloksia todellisiin tuloksiin. Väsyttävä jännitysvaihteluväli pidettiin mahdollisimman tasaisena käyttämällä voimaohjattua kuormitus sylinteriä, jolloin mahdollisesta leukarakenteen myötäämisestä huolimatta jännitysvaihtelu liitoshitsissä pysyi vakiona. Tällöin ekvivalentin jännitysvaihteluvälin määrittäminen on myös yksinkertaista.

5.1 Mittaussuunnitelma ja mittaukset

Ennen väsytykskokeiden suorittamista kappaleista mitattiin tarkastellun liitoshitsin jäännösjännitykset sekä hitsin rajaviivan pyöristyssäde, joiden lisäksi hitsin geometria 3D-skannattiin. Väsytykskokeen aikana kappaleesta mitattiin nimellinen taivutusnormaalijännitys kappaleen pinnasta epäjatkuvuusvaikutusten ulkopuolella (liuska 1), sekä Hot Spot -jännitystä, jonka mittapisteet olivat $0.4t$ ja $1.0t$ etäisyydellä hitsin rajaviivasta (Liuska 2 ja liuska 3). Liuskojen sijainnit sekä mitattava rajaviiva on esitetty kuvissa 24 ja 25. Liuskan 1 avulla voitiin myös verrata koekappaleen jännitystilaa FEM-malliin, ja tarvittaessa säätää FEM-malli vastaamaan koetilannetta. Reaaliaikaisten liuskavenymien seurannalla myös väsymisröt havaittiin ennen kuin ne näkyivät paljaalla silmällä.



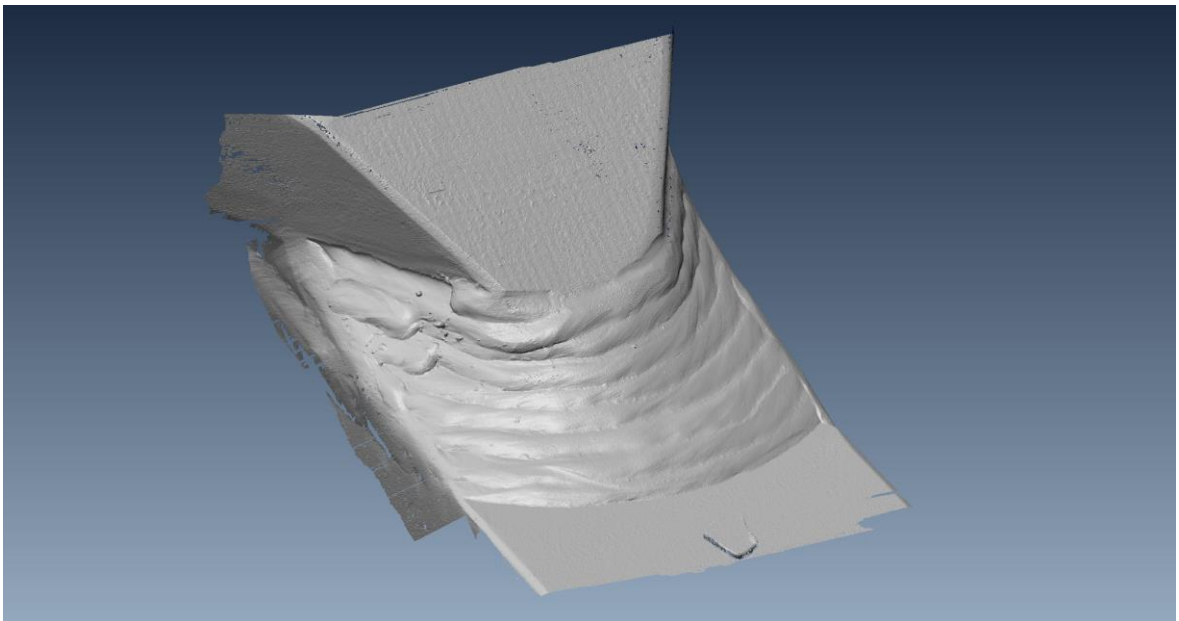
Kuva 24. Venymäliuskojen paikat ja rajaviivan pyörityssäteen mittaussäde.



Kuva 25. Venymäliuskojen sijoitus.

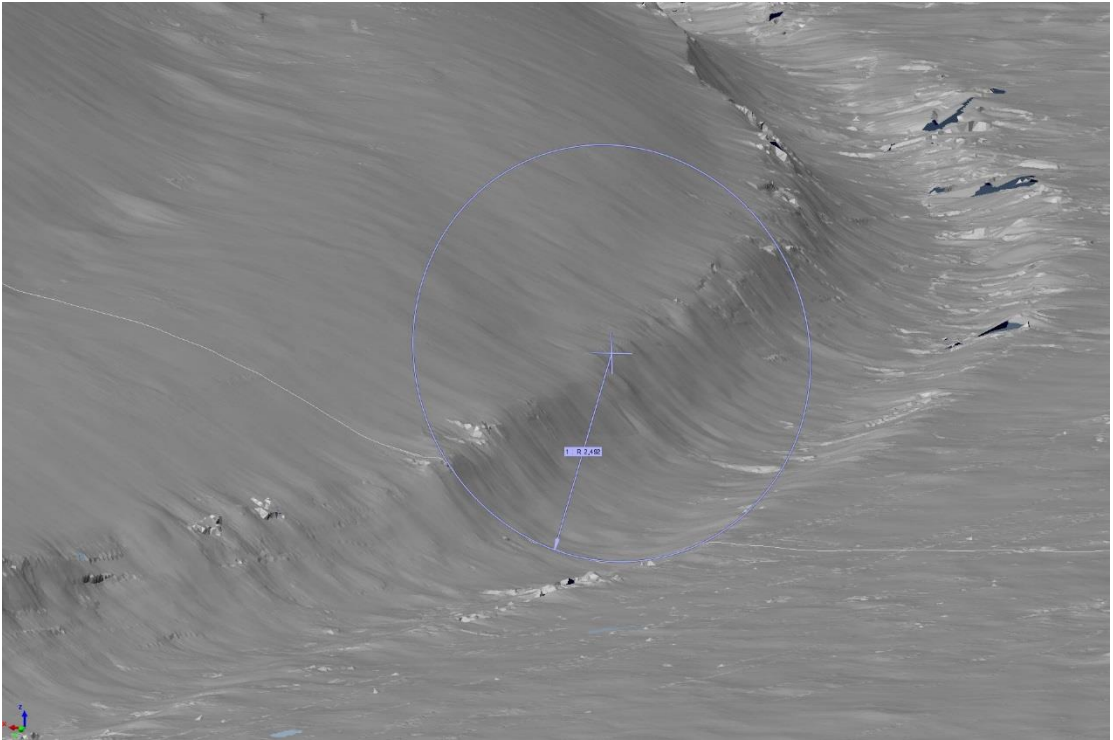
5.2 3D-skannaus

3D-skannauksen etu 2D-skannaukseen verrattuna on liitoksen täydellisen geometrian säilyminen yksittäisen tarkasteluviivan sijaan, jolloin esimerkiksi rajaviivan pyöristyssäde voidaan määrittää mielivaltaisesta kohdasta senkin jälkeen, kun liitos on hajonnut. Kaikki käsitellyssä olleet koekappaleet skannattiin tarkastellun liitoshitsin alueelta, sekä yksi kappale myös kotelon ja johteen liitoshitsin alueelta. Skannaus suoritettiin Hexagon HP-L-20.8 laser-skannerilla liitettynä Romer Absolute Arm –käsivarteen. 3D-skannauksen tuottaman malli on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. 3D-skannauksella tuotettu malli käsittelemättömästä hitsistä.

Johteen pinnalle asetettiin magneetti, jotta keskikohdan löytäminen rajaviivan pyöristyssädettä määritettäessä helpottuisi (näkyvä kuvassa 26). Pyöristyssäteen määrittäminen HFMI-käsitellyn hitsin skannausdatasta on esitetty kuvassa 27. Pyöristykseen on sovitettu ympyrä, joka vastaa pyöristystä.



Kuva 27. Rajaviivan pyöristyssäteen määrittäminen HFMI-käsitellystä hitsistä. Vasaroinnin jättämä ura on selkeästi näkyvissä.

5.3 jäännösjännitysmittaukset

Jäännösjännitykset mitattiin Stresstech: XSTRESS 3000 –röntgendiffraktiometrillä. Jäännösjännitysdatan avulla saadaan tieto mittapisteissä vaikuttavasta jännitystilasta ennen ulkoisten voimien vaikutusta, jota hyödynnetään 4R-menetelmässä väsymiskestävyyden määrittämiseen. Jäännösjännitykset mitattiin jokaisesta kappaleesta tarkasteltavan hitsin rajaviivalta sekä Hot Spot –pisteestä. Jäännösjännitysmittaus on esitetty kuvassa 28.

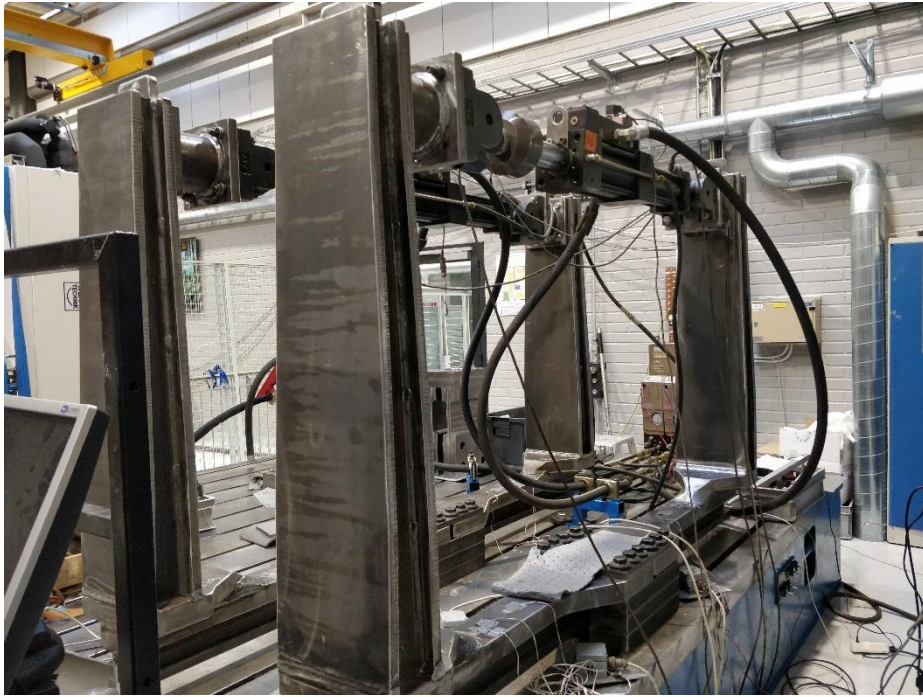


Kuva 28. Jännösjännityksen mittaus pitkittäin hiotun kappaleen rajaviivalta.

Jännösjännitysmittausten tuloksia ei kuitenkaan voida pitää kovin tarkkoina, vaan ne kertovat summittaisen jännitystilän mitatussa pisteessä. Epätarkkuus johtuu pinnanlaadun vaikutuksesta ja suhteellisen matalasta mittaussyvyydestä (7 mikrometriä). Esimerkiksi TIG-käsitellyn rajaviivan pinnanlaatu on haastava jännösjännitysmittaukselle. Tuloksista selviää kuitenkin jännösjännityksen luonne, eli onko jännösjännitys puristusta vai vetoa, sekä sen suuruusluokka.

5.4 Koejärjestelyt

Väsytykset suoritettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteiden laboratoriossa. Koejärjestely on esitetty kuvassa 29, josta nähdään neljä samanaikaisesti testattavaa koekappaletta, sekä niitä kuormittavat MTS-sylinterit ja niiden kiinnitys.



Kuva 29. Koejärjestely.

6 TULOKSET

Tässä kappaleessa käsitellään väsytykskoekkeiden ja väsymisanalyysien tulokset.

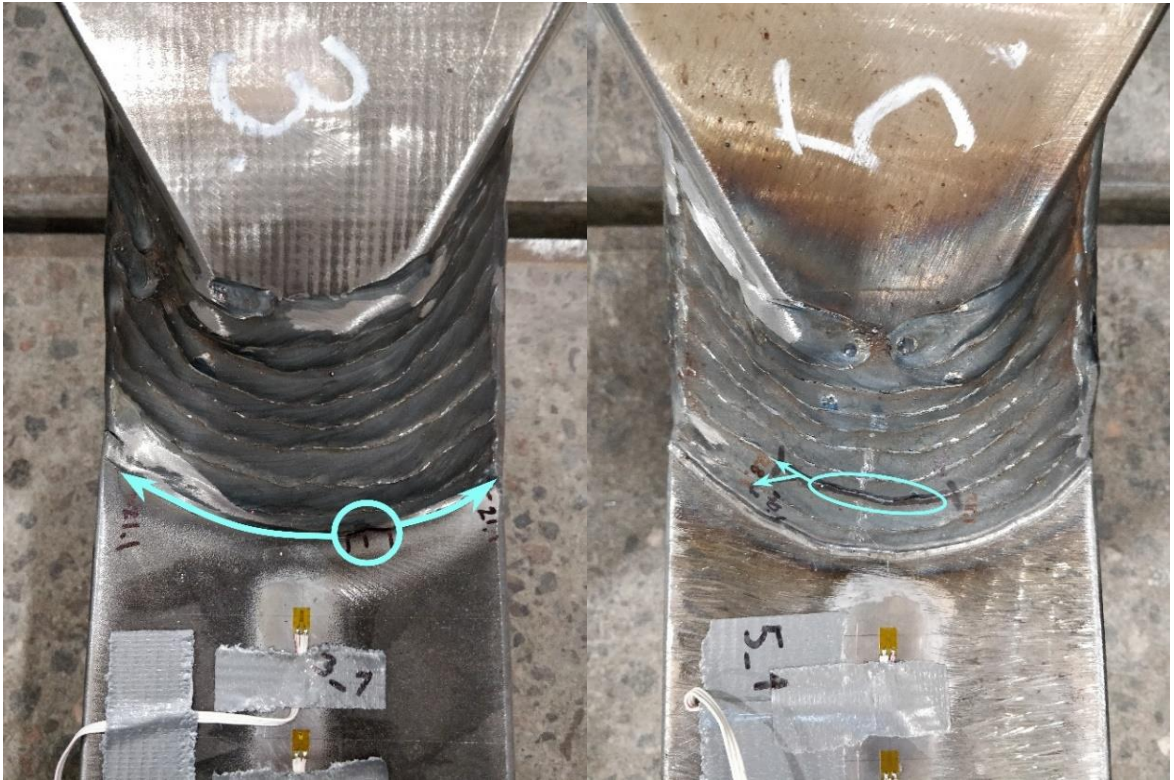
6.1 Väsytykskoetulokset

Väsytykskoekkeiden tulokset on esitetty taulukossa 1. Väsytykskoekkeissa kappale laskettiin hajonneeksi, kun väsymissärö huomattiin ensimmäisen kerran. Tällöin paalipihdin kuormankantokyky ei ole vielä heikentynyt, joten vaurio ei vielä käytössä näy. Jälkikäsitteilyjen välisen vertailun kannalta hitsi voidaan kuitenkin tällöin jo laskea hajonneeksi. Taulukossa 1 on esitettyä koekappaleiden tilaa kuvaavat termit ja vastaavat jäännösjännitykset, ulkoisen voiman (testisylinterin) aiheuttama jännityssuhde, venymäliuskalla mitatut normaalijännitykset sekä Hot Spot -jännitykset. Liuskojen venymäarvot muunnettiin jännityksiksi oletta- malla liuskan ympäristön rasitustilan vastaavan aksiaalista jännitystilaa ja käyttäen kimmo- moduulia 210000 MPa.

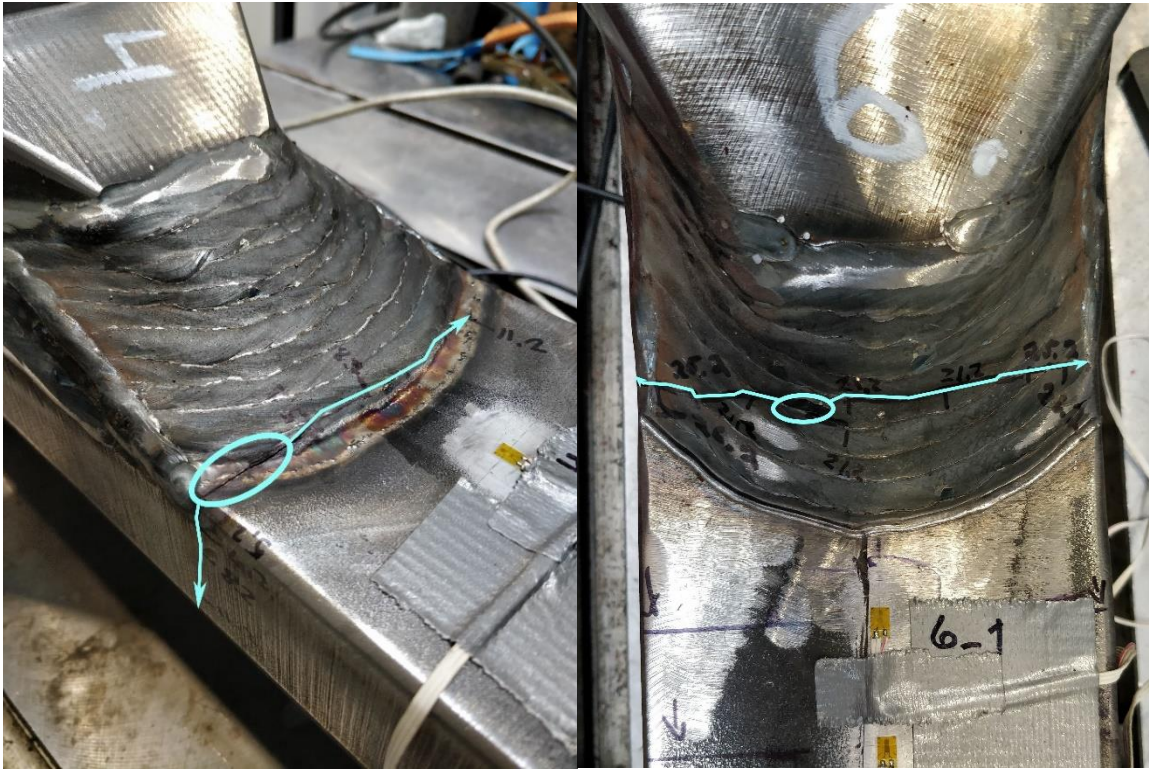
Taulukko 1: Väsytykskoekkeiden tulokset.

KOETAPPAUS	σ_{res} [MPa]	R	σ_{180mm} [MPa]	HS 0.4t [MPa]	HS 1.0t [MPa]
ASW	-123	0	191	227	204
Hiottu	-159	0	192	225	205
HFMI 1	-349	0	193	237	210
TIG	326	0	190	223	202
Hiottu (pitk.)	99	0	194	223	205
HFMI 2	-269	0	189	231	205

Hitsatussa tilassa olevaan liitokseen muodostui väsymissärö hitsin rajaviivalle ja kasvoi rajaviivaa pitkin kohti johteen ylälaipan reunoja. Särön ydintymispaikassa oli selkeästi erot- tuva ”notko” rajaviivalla, josta särö lähti liikkeelle. HFMI-käsitelty hitsi väsyi toisen ja kol- mannen hitsipalon väliseltä rajaviivalta ja kasvoi kohti alemmaa rajaviivaa. Toinen HFMI- kappale väsyi myös ylemmistä rajaviivoista, mutta kestoikä oli pidempi. TIG-käsiteltyyn hitsiin väsymissärö ydintyi hitsin rajaviivan reunaan, josta se kasvoi rajaviivaa pitkin, sekä myös johteen reunaan pitkin alaspäin (särönkasvureitit on esitetty kuvissa 30 ja 31).



Kuva 30. Hitsatussa tilassa olevan hitsin (vasen) ja HFMI(1)-käsittelyn hitsin (oikea) särönkasvu.



Kuva 31. TIG-käsitellyn (vasen) ja toisen HFMI(2)-käsitellyn (oikea) kappaleen särönkasvu.

Normaalijännitysarvot johteen pinnasta mitattuna 180 mm etäisyydeltä rajaviivasta olivat noin 190 MPa. Vastaava jännitys FEM-mallissa oli 188 MPa, joten malli vastaa hyvin koe-tilannetta.

6.2 Teoreettiset väsymisanalyysit

Taulukossa 2 on esitetty ENS- ja Hot Spot -väsymisanalyysit. ENS-analyysi tehtiin 1 millimetrin rajaviivan pyörityssäteellä, joka kuvastaa huonointa mahdollista tilannetta, jolloin pyörityssäde hitsissä ajatellaan olevan nolla. Hot Spot -analyysi tehtiin pintaa pitkin ja paksuuden yli. ENS-analyysin tulokseksi saatiin noin 25000 sykliä ja Hot Spot -analyysin tuloksiksi noin 78000 (paksuuden yli) ja 104000 (pintaa pitkin) sykliä. Paksuuden yli -menetelmän voidaan ajatella olevan tarkempi, koska tällöin Hot Spot -jännitys lasketaan koko paksuuden jännitys jakauman mukaan, kun pintaa pitkin -menetelmässä käytetään kahta tai kolmea tarkastelupistettä, joista Hot Spot -jännitys ekstrapoloidaan.

Taulukko 2: Väsymisanalyysien tulokset.

MENETELMÄ	FAT	Kestoikä
ENS 1mm	225	24 900
Hot Spot (pinta)	100	103 500
Hot Spot (paksuus)	100	78 200

Todellisella rajaviivan pyöristyksillä lasketuissa ENS-analyyseissä käytettiin todellisten kappaleiden 3D-skannaamalla tuotetuista malleista mitattuja rajaviivan pyöristyssäteitä, joiden mukaan tarkemmat ENS-mallit luotiin. FEM-malleissa rajaviivan pyöristyksenä käytettiin teorian mukaista 1 mm + mitattu pyöristyssäde -arvoa. Tällöin eri koekappaleiden välille saadaan selkeä hajonta väsymiskestojen suhteen.

6.3 Väsymisluokat

Väsymisluokat määritettiin väsytykseen tuloksen ja analyttisesti lasketun nimellisen johteessa vaikuttavan taivutusnormaalijännityksen suhteen. Johteen neutraaliakselin paikka määritettiin CAD-sovelluksen avulla.

7 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Jälkikäsitteilyiden vaikutus väsymiskestoikään on tämän tutkimuksen perusteella selkeä. Jälkikäsitteilyjen tehokkuutta väsymiskestoian kasvattamisessa ei voi kuitenkaan suoraan arvioida väsymiskestoian perusteella, koska saavutettu kestoikä suhteessa jälkikäsitteilyyn käytettyyn aikaan eroaa menetelmien välillä. Siten vaikka jollain menetelmällä saavutettaisiin pidempi kestoikä muihin menetelmiin verrattuna, saattaa käyttökohteen mukaan olla perusteltua käyttää nopeampaa ja kustannustehokkaampaa jälkikäsitteilymenetelmää, vaikkei yhtä pitkään väsymiskestoikään päästäisikään.

7.1 Teoreettinen väsymislaskenta

Väsytykskokeiden tulokset olivat suhteellisen hyvin teoreettisten väsymislaskentatulosten mukaiset. Varsinkin 4R-laskenta vaikuttaisi tuottavan todenmukaisia kestoikäarvioita mikä selittyy sillä, että muista menetelmistä poiketen 4R-menetelmä ottaa huomioon rajaviivan geometrian sekä jäännösjännityksen. ENS-menetelmä 1 millimetrin rajaviivanpyöristyksellä toimii käsittelemättömälle hitsille, mutta jälkikäsitellyt hitsit olivat väsymiskestävyydeltään laskennallista parempia. Todellisella rajaviivalla lasketut ENS-kestoajat olivat tarkempia. Hot Spot -menetelmän tulokset ovat samansuuntaiset hitsatussa tilassa olleen liitoksen väsytykskokeiden kanssa, mutta muut koetapaukset ylsivät merkittävästi pidempään väsymiskestoikään. Hot Spot menetelmässä ei kuitenkaan oteta kantaa hitsiliitoksen paikalliseen geometriaan, eikä se siten ota huomioon jälkikäsitteilyjen aikaansaamia etuja. Siten menetelmän soveltuvuus käsiteltyihin hitseihin on melko huono.

7.2 Tulosten soveltaminen varsinaisiin paalipihteihin ja niiden tuotantoon

Väsytykskokeiden tulokset eivät ole täysin verrattavissa varsinaisiin paalipihteihin. Väsytykskokeissa käytetty voima vastaa paalipihtien suunnitteluarvoja, mutta todellisuudessa rasitus jakaantuu kahdelle hitsille, väsytykskokeissa käytetyn yhden hitsin sijaan. Siten varsinaisen paalipihtin väsymiskestoikä on pidempi. Väsytykskokeissa ei kuitenkaan otettu huomioon siirrettävän kuorman massasta syntyviä testivoiman suhteen kohtisuoria voimia, joilla saattaa olla vaikutusta väsymiseen. Kuorma saattaa myös olla kauempana johteesta, jolloin momenttivarsi pitenee ja jännitykset kasvavat. Oletettavasti testijärjestelyssä syntyneet rasitukset ovat kuitenkin normaalia käyttöä suuremmat, joten tulokset ovat turvallisella puolella.

Leuan ja johteen väliselle liitoshitsille määritettyä nimellistä väsymisluokkaa voidaan soveltaa suoraan varsinaisten paalipihtien väsymisanalyysiin ottamalla kuitenkin huomioon, että pienen koe-erän perusteella määritetty FAT-luokka saattaa erota todellisesta. Tätä riskiä voidaan kompensoida muuntamalla absoluuttinen keskiarvo-FAT -luokka karakteristiseksi jakamalla se normaalijakauman mukaisesti 1.37:lla. Väsymisluokka on suhteutettu johdeosassa vaikuttavaan normaalijännitykseen, joten sitä voi soveltaa yleisesti johdehitsien väsymislaskennassa. Hitsimuodon, kuten liitoskulmien, täytyy kuitenkin pysyä samanlaisina. Mahdollisia paksuuskorjauskertoimia voidaan myös soveltaa nimellisen taivutusjännityksen laskennassa, joita IIW-dokumenteissa on esitetty.

7.3 Virhetarkastelu

Otantakoolla on suuri merkitys tutkimuksen tarkkuuteen, koska väsymiskestóiät teoreettisesti samanlaisten koekappaleiden välillä voivat vaihdella. Tässä tutkimuksessa otanta oli pieni, yksi tai kaksi kappaletta tietyllä tavalla jälkikäsiteltyä hitsiä, joten kestoikätulokset suuremman otannan kokeessa saattavat erota tämän tutkimuksen tuloksista. Suurempi otanta vähentää myös mittauksista johtuvaa virhettä, esimerkiksi jäännösjännitysmittauksissa tai rajaviivan pyöristyksen määrittämisessä.

Väsytykskokeessa virhettä saattoi aiheuttaa kuormitustilan ero normaaliin käyttöön verrattuna, koska siirrettävän kuorman pihtirakenteeseen vaikuttavaa pystyvoimaa ei ole testeissä otettu huomioon. Pystyvoima aiheuttaa johdeosaan vinon taivutuksen, joka lisää jännitystä liitoshitsin reunoilla. Siten myös siellä täytyy hitsin laatuun kiinnittää huomiota. Lisäksi testissä voima välittyi yhden hitsin kautta, kun todellisessa rakenteessa yhtä leukaa kantaa kaksi johdetta ja kaksi hitsiliitosta. Virhettä saattoi tulla myös liuskamittausten ja sylintereiden voima-anturoinnin kautta, mutta niiden riski on suhteellisen pieni, eikä merkittävästi vaikuta tämän tutkimuksen tuloksiin. Myös tutkimukseen sisältyvä mekaaninen laskenta saattaa sisältää virheitä.

7.4 Jatkotutkimustarve

Liitoshitsin tuotantokriteerien perusteellinen määrittäminen vaatii oman tutkimuksensa, jossa esimerkiksi pienemmän mittakaavan koekappaleilla kokeillaan eri tekijöiden vaikutusta hitsin kestokykyyn. Pienen mittakaavan koekappaleet mahdollistavat suuren kappalemäärän, jolloin tulokset ovat luotettavampia pieneen otantaan verrattuna. Lisäksi on mahdollista testata

sellaisia jälkikäsitteilyvariaatioita, joita tässä tutkimuksessa ei testattu, kuten esimerkiksi pelkästään kahden tai kolmen alimman hitsipalon hiontaa, jolloin työmäärä vähenee merkittävästi, mutta väsymiskapasiteetin parannus saattaa olla suuri.

Paalipihtien mahdollisia väärinkäyttötilanteilta ja niiden aiheuttamia rasituksia ja vaikutusta väsymiskestoikään tulee myös tutkia. Esimerkiksi pihdin avausliikkeen käyttäminen kuorman työntämiseen, jolloin pihti rasittuu suunniteltua kuormaa päinvastaiseen suuntaan, saattaa lyhentää väsymiskestoikää. Pihtien todelliset käytönaikaiset rasitukset on tarpeellista selvittää, jotta suunnitteluperusteita voidaan tarkentaa. Tämä voidaan toteuttaa esimerkiksi jatkuvilla teollisuudessa toteutettavilla venymäliuskamittauksilla.

8 YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoitteena oli selvittää Auramo Oy:n valmistaman paalipihdin johdeosan ja leukaosan välisen hitsiliitoksen nimellinen väsymisluokka, sekä selvittää eri jälkikäsitelymenetelmien vaikutus väsymiskestoikään verrattuna hitsatussa tilassa olevaan hitsiin. Lisäksi selvitettiin eri väsymislaskentamenetelmien toimivuus tutkittavan hitsiliitoksen väsymiskestoiän laskennassa, sekä teoreettisen mallin kuormien ja reunaehtojen paikkansapitävyys verrattuna väsytysokeisiin. Käytetyt jälkikäsitelymenetelmät olivat hionta, TIG-käsittely, HFMI-käsittely sekä ylirasituskäsittely. Lisäksi tutkittiin hionnan hiontasuunnan vaikutusta erillisellä pitkittäin hiotulla hitsillä. Ylirasituskappaleiden väsymiskapasiteettia ei saatu tässä tutkimuksessa selvitettyä.

Voidaan todeta, että tutkimuksen alussa asetettuihin tutkimuskysymyksiin vastattiin ja tavoitteisiin päästiin. Liitoshitsin väsymisluokka määritettiin erikseen jokaiselle jälkikäsitelymenetelmälle, mikä samalla kertoo jälkikäsitelymenetelmän vaikutuksen väsymiskestoikään verrattuna käsittelemättömään hitsiliitokseen. Teoreettisen mallin vastaavuus väsytysokeiden kanssa verifioitiin vertaamalla teoreettisen mallin jännitystilaa väsytysoekappaleisiin ja todettiin niiden olevan yhtenevät. Kuten jatkotutkimustarveluvussa todettiin, hitsin tuotantokriteerien määrittäminen vaatii erillisen testin, jossa voidaan testata suuremmalla kappalemäärällä eri tekijöiden vaikutusta väsymiskestoikään. Varsinaisia tuotantokriteerejä erilaisten jälkikäsitelyjen lisäksi ei tässä tutkimuksessa määritetty.

LÄHTEET

Auramo. 2018. Verkkosivusto. [Viitattu 1.7.2018]. Saatavissa: <https://en.bolzonigroup.com/prodotto.php?p=52>

Booth, G. S. 1977. The effect of mean stress on the fatigue lives of ground or peened fillet welded steel joints. Welding Institute Report 34/1977/E.

Booth, G. S. 1991. A Review of Fatigue Strength Improvement Techniques, Improving the Fatigue Strength of Welded Joints, luku 2. Yhdistyneet Kuningaskunnat: The Welding Institute.

Bolzonigroup. 2018. Verkkosivusto. [Viitattu 1.7.2018]. Saatavissa: <https://fi.bolzonigroup.com/index.php>

Haagensen, P. J. 1985. Improving the strength of welded joints, Fatigue Handbook, Edited A. Almar-Naess, Tapir, Trondheim.

Hobbacher, A. 2013. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document XIII-2460-13/XV-1440-13. 158 s.

Hobbacher, A. 2014. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document XIII-2460-13/XV-1440-13. 164 s.

Niemi, E. & Kemppi, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. 1. painos. Helsinki: Painatuskeskus. 337 s.

Nykänen, T., Mettänen, H., Ahola, A., Skriko, T., Hämäläinen, O-P & Björk, T. 2016. 3R-menetelmän käyttö vaihtuva-amplitudisesti kuormitettujen hitsausliitosten väsymisanalysoinnissa. Rakenteiden Mekaniikka, 49: 4. S. 176-201.

Outinen, H. & Vulli, P. 1979 Lujusopin perusteet. Tampere: Kustannusyhtymä. 368 s.

Radaj, D, Sonsino C.M & Fricke, W. 2006. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. 2. Painos. Cambridge: Woodhead publishing limited. 346 s.

SFS EN-1090-2. 2012. Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. 2012. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 199 s.

SFS EN-ISO-1993-1-9. 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen. 2008. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 41 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä. Korjattu 2008.

Smith, I. F. C., Hirth, M. A. 1985. A review of fatigue strength improvement methods. Canadian Journal Of Civil Engineering 12. S. 166-183.

Sonsino, C. M., Fricke, W., de Bruyne, F., Hoppe, A., Ahmadi, A. & Zhang, G. 2010. Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints – Background and applications. International Journal of Fatigue, 34: 1. S. 2-1

Virtanen, J. 2018. Auramo Paalileuan analysointi [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Matias Tourula. Lähetetty 2.3.2018. Liitetiedostot: 180130_FEM_Paalileuka_1.zip

LIITTEET

Liite I

$$\text{FAT} := 225$$

$$m := 3$$

$$\text{SIGMA} := 971$$

$$\text{SIGMA2} := 842$$

$$N := \left(\frac{\text{FAT}}{\text{SIGMA}} \right)^m \cdot 2 \cdot 10^6 = 2.488 \times 10^4$$

$$N2 := \left(\frac{\text{FAT}}{\text{SIGMA2}} \right)^m \cdot 2 \cdot 10^6 = 3.816 \times 10^4$$

$$\text{ERO} := N2 - N = 1.328 \times 10^4$$

Esikiristys

$$k_m := 0.2$$

$$d := 24\text{mm}$$

$$F_p := 247 \times 10^3 \text{N}$$

$$T_{\text{www}} := k_m \cdot d \cdot F_p = 1.186 \times 10^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$A_s := 353\text{mm}^2$$

Esikiristysvoiman aiheuttama
normaalijännitys ruuveissa

$$\frac{247000\text{N}}{\pi \cdot (10.6\text{mm})^2} = 699.738 \cdot \text{MPa}$$

$$0.8 \cdot 800 = 640$$

Esijännitysvoima ja momentti

$$F_{\text{esi}} := 0.7 \cdot 1000\text{MPa} \cdot A_s = 247.1 \cdot \text{kN}$$

Ruuviin vaikuttava vetovoima (suurimmasta
jännityksestä laskettuna, esijännitys vähen.)

Ruviliitoksen kestävyys kiinnitysluokka B

$$F_{\text{veto}} := 30\text{MPa} \cdot 353\text{mm}^2 = 1.059 \times 10^4 \text{N}$$

$$k_s := 0.85 \quad n := 2 \quad \text{Gamma}_{M3} := 1.1 \quad \text{myy} := 0.2 \quad \text{määrä} := 6$$

$$F_s := \frac{\text{määrä} \cdot [k_s \cdot n \cdot \text{myy} \cdot (F_p - 0.8 \cdot F_{\text{veto}})]}{\text{Gamma}_{M3}} = 442.361 \cdot \text{kN} \quad (\text{standardi } 1993-1-8 \text{ s.33})$$

Ruviliitoksen väsymiskestävyys

$$\text{FAT} := 50 \quad \text{gamma}_{Mf} := 1.35 \quad \text{DSigma} := 730 - 700 = 30 \quad \frac{m}{\text{www}} := 3$$

Ruuvin väsymiskestävyys

$$N_f := \left(\frac{\text{FAT}}{\text{gamma}_{Mf} \cdot \text{DSigma}} \right)^m \cdot 2 \cdot 10^6 = 3.763 \times 10^6$$

Ruuvin nettohalkaisija

730 MPa on ruuvista löytyvä suurin
normaalijännitys
kannan vaikutusalueen ulkopuolella
(taivutusvaikutus mukana, ollaan siis turvallisella
puolella)

$$\pi \cdot 10.6^2 = 352.989$$

$$r := \sqrt{\frac{(353\text{mm}^2)}{\pi}} = 10.6 \cdot \text{mm}$$

HotSpot laskenta

$$\text{FAT} := 100\text{MPa}$$

$$\sigma_{0,4} := 233\text{MPa}$$

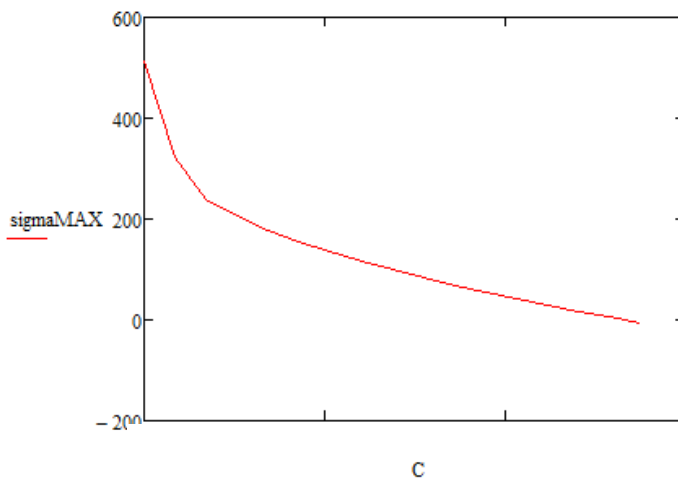
$$\sigma_{0,9} := 205\text{MPa}$$

$$\sigma_{1,4} := 195\text{MPa}$$

$$\sigma_{\text{hs}} := 2.52 \cdot \sigma_{0,4} - 2.24 \cdot \sigma_{0,9} + 0.72 \cdot \sigma_{1,4} = 268.36\text{MPa}$$

$$N_f := \left(\frac{\text{FAT}}{\sigma_{\text{hs}}} \right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 1.035 \times 10^5$$

$C :=$	0 3.4375 6.875 10.3125 13.75 17.1875 20.625 24.0625 27.5 30.9375 34.375 37.8125 41.25 44.6875 48.125 51.5625 55	$\text{sigmaMAX} :=$	513.1343384 321.2731628 237.8940125 207.3446655 177.2598572 155.4463348 134.2781677 116.5072784 99.44502258 83.91772461 68.91259003 55.07656479 41.5278511 29.01529694 17.01695061 5.716413498 -5.183544159	$\text{vsMAX} := \text{cspline}(C, \text{sigmaMAX}) =$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><th></th><th>0</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>13.569</td></tr> <tr><td>4</td><td>9.181</td></tr> <tr><td>5</td><td>4.792</td></tr> <tr><td>6</td><td>-1.525</td></tr> <tr><td>7</td><td>1.543</td></tr> <tr><td>8</td><td>-0.446</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.57</td></tr> <tr><td>10</td><td>-0.11</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.231</td></tr> <tr><td>12</td><td>-0.033</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.167</td></tr> <tr><td>14</td><td>-0.04</td></tr> <tr><td>15</td><td>...</td></tr> </table>		0	0	0	1	3	2	2	3	13.569	4	9.181	5	4.792	6	-1.525	7	1.543	8	-0.446	9	0.57	10	-0.11	11	0.231	12	-0.033	13	0.167	14	-0.04	15	...
	0																																						
0	0																																						
1	3																																						
2	2																																						
3	13.569																																						
4	9.181																																						
5	4.792																																						
6	-1.525																																						
7	1.543																																						
8	-0.446																																						
9	0.57																																						
10	-0.11																																						
11	0.231																																						
12	-0.033																																						
13	0.167																																						
14	-0.04																																						
15	...																																						



$$\sigma(x) := \text{interp}(\text{vsMAX}, C, \text{sigmaMAX}, x)$$

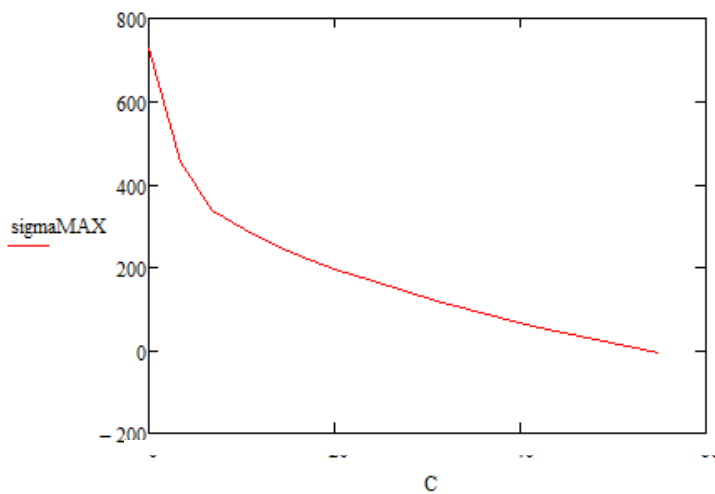
$$\sigma_{m_max} := \left(\frac{1}{t}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) \, dx = 123.972 \quad \sigma_{b_max} := \left(\frac{6}{t^2}\right) \cdot \int_0^t (\sigma(x) - \sigma_{m_max}) \cdot \left[\left(\frac{t}{2}\right) - x\right] \, dx = 170.654$$

$$\Delta\sigma_{hs} := |\sigma_{m_max}| + |\sigma_{b_max}| = 294.626$$

$$\text{FAT} := 100$$

$$N_{\text{hs}} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_{hs}}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 7.82 \times 10^4$$

$C :=$	$\sigma_{MAX} :=$	$vsMAX := cspline(C, \sigma_{MAX}) =$																																		
0 3.4375 6.875 10.3125 13.75 17.1875 20.625 24.0625 27.5 30.9375 34.375 37.8125 41.25 44.6875 48.125 51.5625 55	726.9373169 455.1351624 337.0151672 293.7370911 251.1170959 220.2147064 190.2265625 165.0512085 140.8797455 118.8828049 97.62558746 78.02459717 58.83063507 41.10455704 24.10694504 8.097908974 -7.343646049	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td></td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>3</td><td>19.222</td></tr> <tr><td>4</td><td>13.006</td></tr> <tr><td>5</td><td>6.789</td></tr> <tr><td>6</td><td>-2.16</td></tr> <tr><td>7</td><td>2.186</td></tr> <tr><td>8</td><td>-0.632</td></tr> <tr><td>9</td><td>0.808</td></tr> <tr><td>10</td><td>-0.156</td></tr> <tr><td>11</td><td>0.327</td></tr> <tr><td>12</td><td>-0.047</td></tr> <tr><td>13</td><td>0.236</td></tr> <tr><td>14</td><td>-0.056</td></tr> <tr><td>15</td><td>...</td></tr> </table>		0	0	0	1	3	2	2	3	19.222	4	13.006	5	6.789	6	-2.16	7	2.186	8	-0.632	9	0.808	10	-0.156	11	0.327	12	-0.047	13	0.236	14	-0.056	15	...
	0																																			
0	0																																			
1	3																																			
2	2																																			
3	19.222																																			
4	13.006																																			
5	6.789																																			
6	-2.16																																			
7	2.186																																			
8	-0.632																																			
9	0.808																																			
10	-0.156																																			
11	0.327																																			
12	-0.047																																			
13	0.236																																			
14	-0.056																																			
15	...																																			



$$\sigma(x) := \text{interp}(vsMAX, C, \sigma_{MAX}, x)$$

$$\sigma_{m_max} := \left(\frac{1}{t}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) \, dx = 175.626 \quad \sigma_{b_max} := \left(\frac{6}{t^2}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) \cdot \left[\left(\frac{t}{2}\right) - x\right] \, dx = 241.759$$

$$\Delta\sigma_{hs} := |\sigma_{m_max}| + |\sigma_{b_max}| = 417.385$$

$$FAT := 100$$

$$N_{\text{www}} := \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma_{hs}}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 2.751 \times 10^4$$