

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT KONE

Teräsrakenteiden laboratorio

DIPLOMITYÖ

JÄNNITYSSUHTEEN VAIKUTUS ULTRALUJAN TERÄKSEN HITS AUSLIITOKSEN VÄSYMISLU- JUUTEEN

**Tarkastajat: Professori Timo Björk (TkT)
 Yliassistentti Timo Nykänen (TkT)**

**Espoo, 17.5.2012.
Joni Kukkonen**

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT Kone

Teräsrakenteiden laboratorio

Joni Kukkonen

Jännityssuhteen vaikutus ultralujan teräksen hitsausliitoksen väsymislujuuteen

Diplomityö

2012

76 sivua, 20 kuvaa, 11 taulukkoa, 6 kaavaa, 4 liitettä.

Työn tarkastajat: Professori Timo Björk
 Yliassistentti Timo Nykänen

Aiempien ultralujia teräksiä koskevien tutkimusten jatkoksi tässä diplomityössä keskityttiin jännityssuhteen varioinnin tuomien ilmiöiden esille tuomiseen koesauvojen väsytyскоestuksessa. Pohjana diplomityölle ovat mm. Timo Björkin tutkimustulokset ULTRASTEEL-hankkeesta sekä Tuomas Skrikon kandidaatintyöhönsä koostamat väsytyскоetulokset.

Testattujen 12 koesauvan väsytyскоetulosten perusteella jännityssuhteen kasvattaminen alentaa hitsattujen ultralujien teräsrakenteiden FAT-luokitusta. FAT-luokkien ja jännityssuhteen välillä on havaittu säännönmukaisuutta ja huomattavaa FAT-luokituksen lasku on jännityssuhteen 0.35 jälkeen.

Jälkikäsiteltyjen koesauvojen FAT-luokat ovat jälkikäsittelemättömiä parempia. Myös käsittelemättömillä sauvoilla päästään mekanisoidussa MAG-hitsauksessa keskimääräisen konepajalaadun FAT = 100 MPa yläpuolelle.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

LUT Mechanical Engineering

Laboratory of Steel Structures

Joni Kukkonen

The Effect of Stress Ratio on the Fatigue Strength of a Welded Joint on Ultra High Strength Steels

Master's Thesis

2012

76 pages, 20 figures, 11 tables, 6 formulas, 4 appendices.

Examiners: Professor Timo Björk
Senior Assistant Timo Nykänen

In this thesis I focus on extending the previous researches on ultra high strength steels and their weldability especially considering the stress ratio and its effects on the fatigue strength of welded joints. Basis for this Master's Thesis is formed by the research results of ULTRASTEEL-project conducted by Professor Timo Björk at Lappeenranta University of Technology and Bachelor's Thesis of Tuomas Skriko.

In this research I tested non-load-carrying cruciform fillet welded joints (12 specimen) under constant amplitude tensile loading and came into a conclusion that increasing the stress ratio decreases the average FAT-values. The connection between stress ratio and FAT-results is clear and the decrease of FAT-values is especially notable after stress ratio values of 0.35 and higher.

The FAT-values of post-treated welded joints were better than non-post-treated. With non-post-treated joints it also possible to reach the average workshop FAT-value of 100 MPa and above it with mechanized MAG-welding.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Rautaruukki Oy:n toimeksiantamana ja se kuuluu TeOS 2011–hankkeeseen. Diplomityö pohjautuu Tuomas Skrikon vuonna 2010 julkaisemaan kandidaatin-työhön ”Ultralujan teräksen MAG-hitsauksen laatu”. Diplomityön tarkastajat ovat Lappeenrannan teknillisen yliopiston LUT Koneen teräsrakenteiden professori TkT Timo Björk sekä yliassistentti TkT Timo Nykänen.

Tässä diplomityössä perehdytään Rautaruukin Optim 960 QC–teräksestä hitsattujen vakioitujen sauvojen väsymiskäyttäytymiseen erilaisten kuormitustilanteissa. Koesauvojen suunnittelu, hitsaus, koneistus ja väsytykokeet tapahtuivat Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla.

SISÄLLYS

OSA I: ESIVALMISTELUT

SISÄLLYS	5
KÄYTETYT MERKINNÄT	7
KÄYTETYT LYHENTEET	9

OSA I: ESIVALMISTELUT

1 JOHDANTO	10
2 MATERIAALIT JA MENETELMÄT	11
2.1 S960-TERÄS	11
2.2 KOESAUVOJEN HITSAUS	12
2.3 HITSUKSEN JÄLKEISET YLEISET TOIMENPITEET	14
2.3.1 SAUVOJEN VERIFIOINTI KOESTUSTA VARTEN	15
2.4 YKSILÖLLISET JÄLKIKÄSITTELYT	17
2.4.1 UIT-KÄSITTELY	19
2.4.2 TIG-käsittely	20

OSA II: VALMISTELUT VÄSYTYKSEKÄITÄ VARTEN

3 VÄSYMISLUJUUS – YLEINEN TEORIA	22
3.1 VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	22
3.1.1 Prosessitekniset seikat	22
3.1.2 Metallurgiset seikat	23
3.1.3 Hitsin geometria	27
3.1.4 Jännitystilat (jännösjännitykset)	27

OSA III: KOESTUS

4 KOESTUKSEN SUORITUS	31
4.1 HYPOTEESI	31
4.2 R-TEORIA	32

4.2.1 Särönkasvunopeuden yhteys jännityssuhteeseen R	32
4.2.2 Pehmeneminen ja σ_{\max} :n yhteys	33
4.3.3 Maksimijännityksen ja nimellisen jännityksen suhde myötölujuuteen	35
5 VÄSYTYKSEHÄ	36
6 KOESTUSKENTÄN HAHMOTTELU R :N VAIKUTUKSEN TUTKIMISEKSI	37
6.1 Laskennalliset koestusarvot.....	37
OSA IV: KOETULOSTEN KOONTI	
7 TULOKSET	41
7.1 POIKKEAVAT KOESAUVAT	42
7.2 FAT-LUOKAT	42
7.2.1 Hitsatussa tilassa olevat koesauvat.....	42
7.2.2 Jälkikäsitellyt koesauvat.....	43
7.2.3 Murtumismekaaninen tarkastelu	43
7.2.4 Jäännösjännitykset ja kriittiset rajaviivat.....	45
OSA V: ANALYYSI	
8 ANALYYSINTI.....	47
8.1 Hypoteesi	49
9 HUOMIOT, JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET.....	49
10 YHTEENVETO	50
LÄHTEET	51

KÄYTETYT MERKINNÄT

A	Virta	[A]
A_5	Murtovenymä	[%]
a	Pienahitsin a-mitta	[mm]
a	Särön koko	[mm]
b	Koesauvan leveys	[mm]
C_0	Murtumismekaaninen särönkasvuparametri	[ei vakio]
E	Kimmomoduuli	[MPa]
F	Voima	[N]
FAT	Väsymiskestävyysluokka	[MPa]
f_y	Myötölujuus	[MPa]
ΔK	Jännitysintensiteettikertoimen vaihteluväli	[MPa \sqrt{m}]
K_c	Murtumissitkeys (kriittinen jännitysintensiteettikerroin)	[MPa \sqrt{m}]
ΔK_{th}	Jännitysintensiteettikertoimen raja-arvo, ei särönkasvua	[MPa \sqrt{m}]
k	Venymäliuskan k-arvo	[-]
m	Murtumismekaaninen särönkasvuparametri	[-]
N_f	Väsymiskestoikä, kuormitus syklien lukumäärä	[kpl]
Q	Lämmöntuonti	[kJ/mm]
R_m	Murtolujuus	[MPa]
$R_{p0.2}$	Myötölujuus	[MPa]
R	$\frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} =$ Jännityssuhde	[-]

r	Rajaviivan pyöristyssäde	[mm]
t	Materiaalivahvuus	[mm]
V	Jännite	[V]
$\Delta\varepsilon$	Venymäliuskan venymämuutos	[mm]
ε_{\max}	Kehällä käytettäviä koestusvoimia vastaava venymäliuskan venymä	[μstr]
σ_{\max}	Maksimijännitys	[MPa]
σ_{\min}	Minimijännitys	[MPa]
$\Delta\sigma_{\text{hs}}$	Rakenteellinen jännitysvaihtelu	[MPa]

KÄYTETYT LYHENTEET

AW	As Welded. Jälkikäsittelemättömän hitsin perustila.
HAZ	Heat Affected Zone. Hitsin lämpövyöhyke
IIW	International Institute of Welding. Kansainvälinen hitsausasinatuntijajärjestö.
LUT	Lappeenranta University of Technology. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
MAG	Metal Active Gas Welding. Kaarihitsausmenetelmä.
SLM	Structured Light Method. (Laser)valoskannaukseen perustuva menetelmä esimerkiksi pinnanmuotojen jäljeltämiseen.
TIG	Tungsten Inert Gas Arc Welding. Kaasukaarihitsausprosessi.
UIT	Ultrasonic Impact Treatment. Ultraäänivasarointi.

OSA I: ESIVALMISTELUT

1 JOHDANTO

UKRA/ULTRA-hankkeessa määritettiin ultralujasta teräksestä tehtyjen liitosten väsymisominaisuuksia hitsatussa tilassa ja jälkikäsiteltyinä. Koekappaleet väsyttiin vakioamplitudisella $R = 0.1$ ja muuttuva-amplitudisella $R = -1$ kuormituksella. Nämä tulokset voivat olla kuitenkin osittain liian optimistisia ja tässä tutkimusosiossa on tarkoitus saada varmennettua tietoa suunnittelijoille ensisijaisesti hitsin väsymisominaisuuksista vakiolaatuisina ja parannusmenetelmistä ankaramman globaalisen jäännösjännitystilän vaikuttaessa liitoksessa.

Aiempien yksittäisten koetulosten perusteella maksimijännityksen tasoa ei voida hitsauksen aiheuttaman materiaalin pehmenemisen vuoksi nostaa myötörajan tasolle, vaan on pysyteltävä korkeintaan noin 70 % tasolla nimellisestä perusaineen myötörajasta. Tuloksin analysoinnissa käytettiin ensisijaisesti rakenteellisen jännityksen menetelmää ja tutkitaan sen soveltuvuutta S960 teräksille. Muutamia kokeita tehtiin myös UIT- ja TIG- jälkikäsitellyille hitseille. Koesauvat hitsattiin mekanisoidusti/robotisoidusti mahdollisimman tasalaatuisen ja hyvän rajaviivageometrian tuottavilla hitsausparametreilla.

2 MATERIAALIT JA MENETELMÄT

2.1 S960-TERÄS

Diplomityön väsytykskoeksissa käytettyjen sauvojen materiaalina on ainevahvuudeltaan 6 mm suorasammutettu ultraluja Ruukin Optim 960 QC-teräs, jonka myötölujuus on vähintään 960 MPa. Toimitustilaltaan karkaistun ja kylmämuokattavissa olevan teräksen kemiallinen koostumus ja mekaanisia ominaisuuksia on esitetty taulukoissa 1 ja 2.

Taulukko 1. Ruukin Optim 960 QC:n kemiallinen koostumus.

	Pitoisuus enintään, % (sulatusanalyysi)						
	C	Si	Mn	P	S	P+S	Ti
Optim 960 QC	0.11	0.25	1.20	0.020	0.010	0.030	0.07

Taulukko 2. Ruukin Optim 960 QC: Mekaaniset ominaisuudet ja paksuusalueet.[11]

	Paksuusalue [mm]	Myötölujuus $R_{p0.2}$ vähintään [MPa]	Murtolujuus R_m vähintään [MPa]	Murtovenymä A_5 vähintään [%]	Iskusitkeys pitkittäin [C]	Charpy V vähintään [J/cm^2]
Optim 960 QC	2.5 - 8	960	1000	7	-40	34

Myötölujuus ja murtolujuus testataan pitkittäin valssaussuuntaan nähden, mutta taataan sekä pitkittäin että poikittain.

Murtovenymä testataan pitkittäin valssaussuuntaan nähden.

Iskusitkeys testataan standardin EN 10045-1 mukaisesti Charpy V -iskukokeella.

Iskusitkeysarvo $34 J/cm^2$ vastaa arvoa 27 J testattaessa 10 x 10 mm yleiskoesauvoilla.

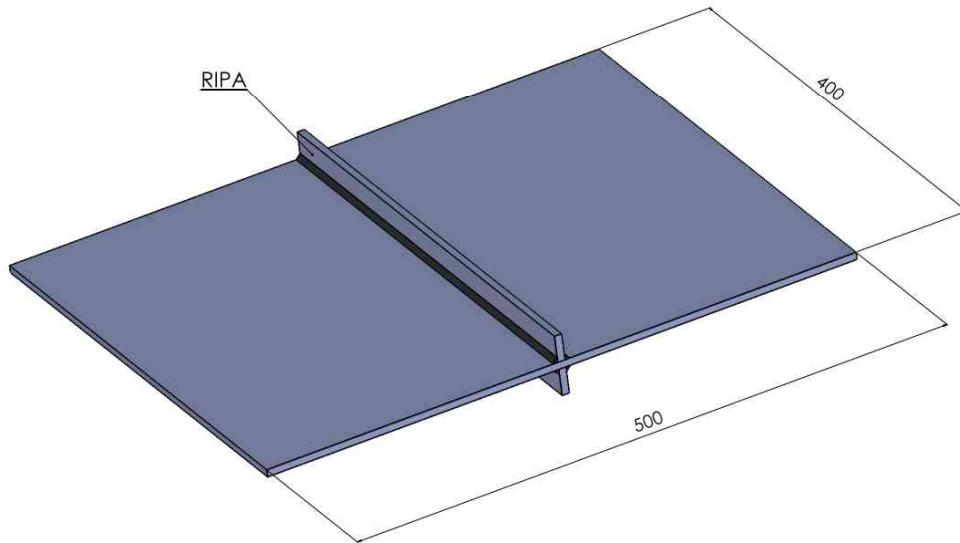
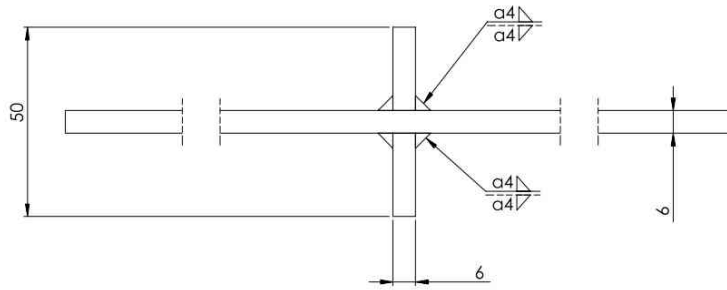
Alle 6 mm paksuuksille ei iskukoetta tehdä.

2.2 KOESAUVOJEN HITSAUS

Koesauvojen suunnittelun lähtökohtana oli mahdollisimman tasalaatuisten hitsien aikaansaaminen kaikille sauvoille. Koesauvat hitsattiin kuvien 1 ja 2 mukaisista levyistä siten, että mitoiltaan 400x500 mm laserleikattuun levyyn hitsattiin rivat molemmin puolin. Täten liitosmuodoksi tuli a-mitaltaan 4 mm:n pienahitsattu X-liitos, jossa hitsit eivät kannu kuormaa. Lisäksi rajaviivojen lovivaikutus ei ole suuri eikä merkittäviä rakenteellisia jännityskeskittymiä ilmene ilman hitsauksesta aiheutuvia kulmavetäymiä ja pientä Poissonin efektistä aiheutuvaa leveyssuuntaista vetäymää. [1]

TIG-hitsausmenetelmällä silloitettujen ripojen hitsaus pohjalevyyn tapahtui mekanisoidusti MAG:lla kuvan 3 mukaisilla järjestelyillä siten, että maksimi hitsausenergia pysyi LUT:lla aiemmin suoritettujen S960-kokeiden mukaisesti n. 0.89 – 0.90 kJ/mm. Koesauvat (12 kpl) hitsattiin tasalujalla X96-lisäaineella. Hitsaus tapahtui työntävällä poltinkulmalla, jolla työssä saavutetaan riittävä tunkeuma ja liittymisgeometria rajaviivalle. [1]

Sauvojen suunnittelussa kiinnitettiin huomiota väsytyiskoelaitteiston reunaehtojen mukaisesti sauvan kavennetun osan ja kiinnityskohdan suhteeseen kehäkiinnityksen onnistumiseksi ja takaamiseksi (nyt noin 1.8 - 1.9, suurempi parempi). Sauvojen mitat tarkastettiin koneistuksen jälkeen yksilöllisesti. Valmiit koesauvat olivat kuvien 3 ja 4 mukaisia.



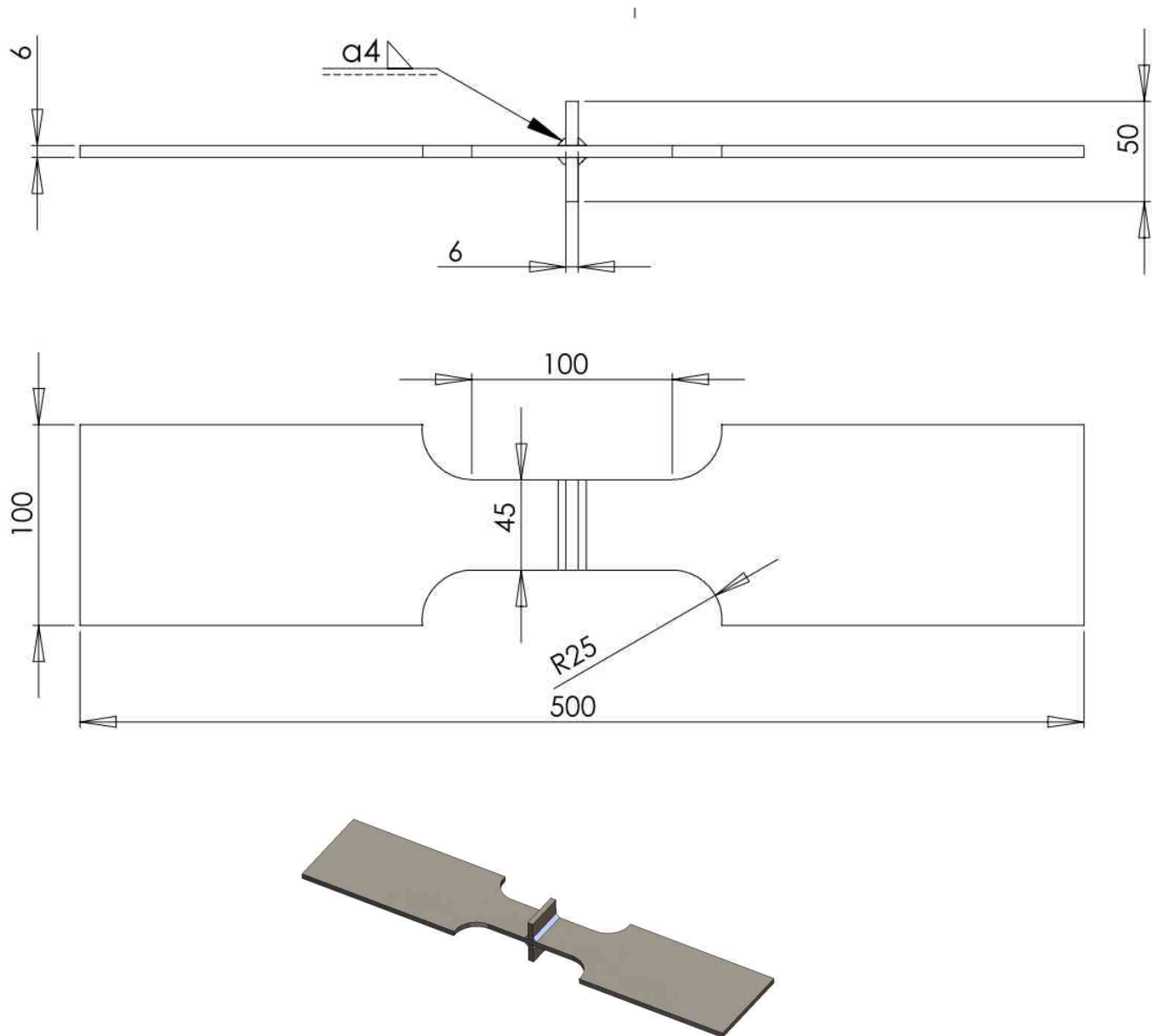
Kuva 1. Koesauvojen hitsattu aihio.



Kuva 2. Mekanisoidun hitsauksen kojärjestelyt LUT:n hitsaustekniikan laboratoriossa.

2.3 HITSUKSEN JÄLKEISET YLEISET TOIMENPITEET

Hitsauksen jälkeen sauvat koneistettiin muotoonsa mekaanisesti. Valmiit koesauvat olivat kuvan 3 mukaisia.



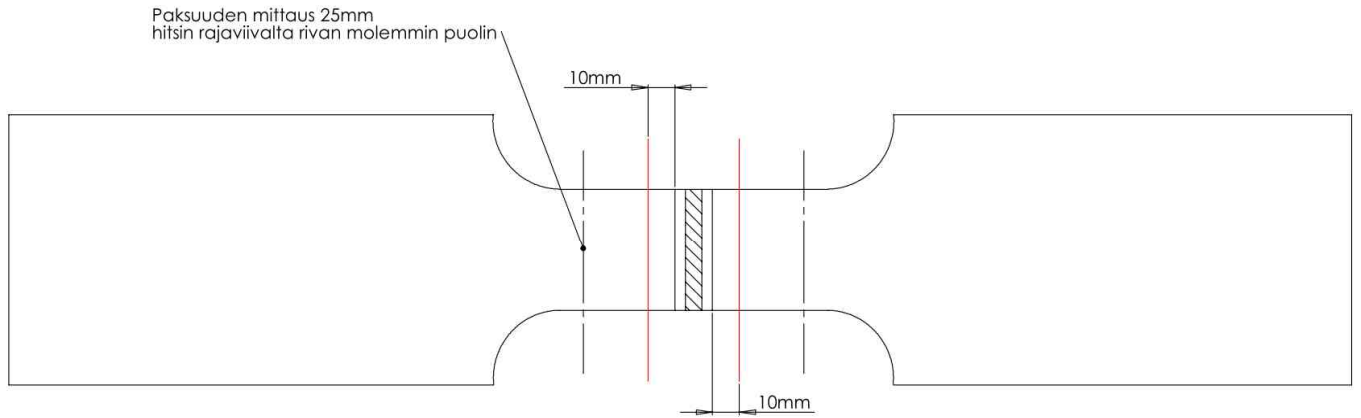
Kuva 3. Valmis koneistettu koesauva mittoineen.



Kuva 4. Koesauva JK_R8 odottamassa jälkikäsittelyä (TIG).

2.3.1 SAUVOJEN VERIFIOINTI KOESTUSTA VARTEN

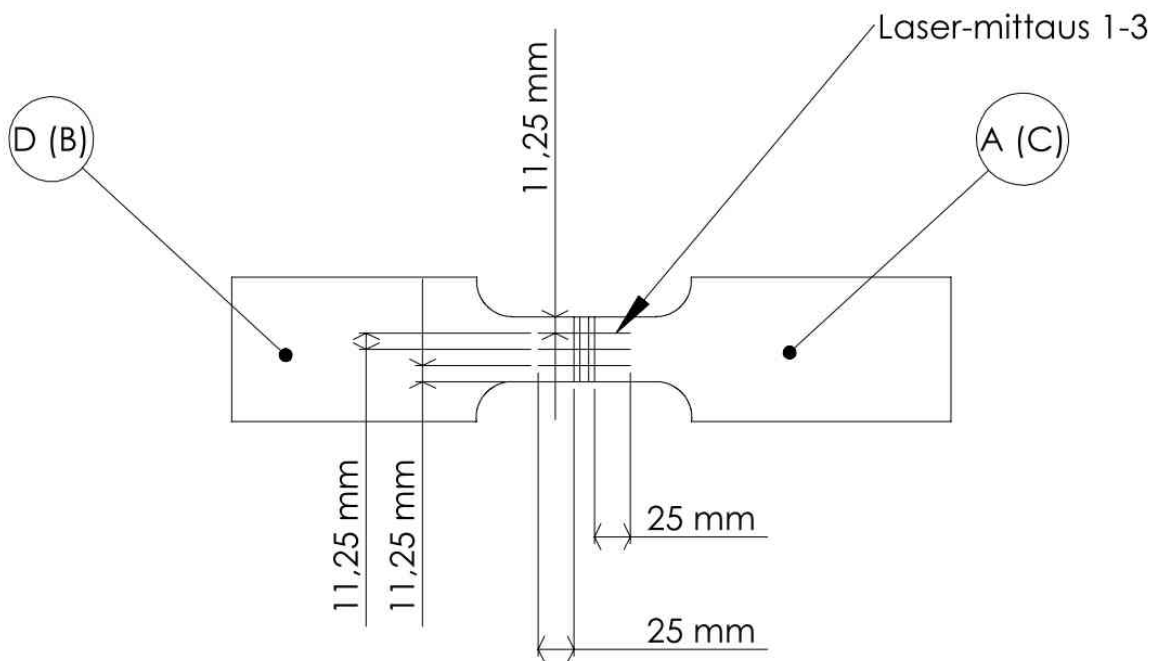
Valmiiden sauvojen nimeäminen tapahtui taulukon 5 mukaisesti siten, että kussakin koesauvassa on hitsausjärjestyksen perusteella neljä sivua A-D. Sauvojen suunnittelussa kiinnitettiin huomiota mahdollisimman tukevan kehäkiinnityksen saavuttamiseksi. Huomioiden käytetyn väsytyshän kiinnitysleukojen rajoitukset on sauvan levennetyn osan suhde kavennettuun uumaan noin 1.8 – 1.9. Mitä suurempi sauvan leveän osan suhde on uumaan sitä tukevampi ja luotettavampi kiinnitys on mahdollista. Kaikkien koesauvojen mitat (leveys, pituus ja myös paksuus) tarkastettiin koneistuksen jälkeen yksilöllisesti kuvan 5 mukaisesti, jotta voitiin laskea koestuksessa käytettävät jännitysarvot mahdollisimman tarkasti.



PUNAINEN VIIVA = KOESAUVAN LEVEYDEN MITTAUSLINJA

Kuva 5. Koneistettujen koesauvojen dimensioiden mittaus.

Kaikkien koesauvojen hitsien viereiset pinnat määritettiin lasermittauksella kuvan 6 mukaisesti muodonmuutosten ja kulmavirheidensä selvittämiseksi. Yhdelle pilottikappaleelle mittaus suoritettiin koesauvan leveydellä kolmesta eri kohdasta sauvan molemmin puolin ja lopuissa kappaleissa arvioitiin riittäväksi mittaus molemmin puolin sauvan keskeltä.



Kuva 6. Koesauvojen lasermittaus.

2.4 YKSILÖLLISET JÄLKIKÄSITTELYT

Hitsien jälkikäsitteilyiden tarkoituksena on väsymiskestävyyden parantaminen hitsin paikalliskeometriaa muokkaamalla sekä hitsauksen jälkeisiin jännitystiloihin vaikuttamalla. Yleisimpiä jälkikäsitteilymenetelmiä ovat mm. hitsin hionta, rajaviivojen TIG- ja UIT-vasarrus. [7]

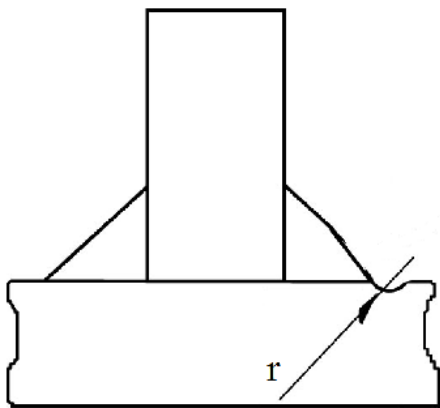
Koesauvoille suoritettiin yksilöllisiä jälkikäsitteilytoimenpiteitä taulukon 3 mukaisesti. Työssä käytettäviksi valitut jälkikäsitteilymenetelmät ovat UIT- ja TIG-käsittely. Sauvat JK_R1...JK_R7 ja JK_R9 sekä JK_R12 koestettiin hitsatussa tilassa (AW). JK_R8 ja JK_R10 rajaviivoja käsitellään ultraäänivasarruksella jäännösjännitysten manipuloimiseksi, JK_R11 käsitellään vastaavasti TIG:llä.

Taulukko 3. Valmiit koesauvat (yht. 12 kpl) ennen väsytykskoikeita.

ID	Hitsin tila	Huomioita
JK_R1	AW	-
JK_R2	AW	-
JK_R3	AW	-
JK_R4	AW	-
JK_R5	AW	-
JK_R6	AW	-
JK_R7	AW	-
JK_R8	UIT	Käsitellään kaikki rajaviivat (4 kpl)
JK_R9	AW	-
JK_R10	UIT	Jäännösjännitysten perusteella käsitellään rajaviiva A ultraäänivasartaen.
JK_R11	TIG	Käsitellään kaikki rajaviivat (4 kpl)
JK_R12	AW	-

2.4.1 UIT-KÄSITTELY

Ultraäänivasarrus eli UIT on hitsin rajaviivageometriaa muokkaava jälkikäsittelymenetelmä, jolla pyritään hitsauksen jälkeisten jännitystilojen muuttamiseen edullisemmiksi puristusjännitystiloiksi ja rajaviivageometrian optimointiin väsymiskestävyyden parantamiseksi [10]. Kuvassa 7 esitetyn periaatteen mukaisesti UIT-käsittelyn etuja ovat mm. väsymiskestävyyden kannalta edullisempi hitsin rajaviivageometria (käsitellyn rajaviivan suurempi säde r) sekä hitsauksen jälkeisten jännitystilojen muokkaaminen (puristusjännitystilan luominen) ja mahdollisen alkusärön tuhoaminen:



Kuva 7. UIT-käsitelty pienahitsi. [10]

2.4.2 TIG-käsittely

Perinteisen TIG-hitsauslaitteiston avulla ilman lisäainetta suoritettava hitsin rajaviivan uudelleensulattaminen TIG-elektrodin avulla mahdollistaa rajaviivageometrian parantamisen ja väsymiskestävyyden kasvattamisen. Käsittelyn onnistuminen määräytyy suuresti käytetyistä parametreista (mm. virta, polttimen kuljetusnopeus ja suojakaasun virtausnopeus), elektrodin kunnosta sekä erityisesti polttimen asemoinnista käsiteltävään rajaviivaan nähden. Näiden lisäksi käsiteltävän rajaviivan alueen puhtaus vaikuttaa käsittelyn onnistumiseen.

Kuvassa 8 esitetyllä tavalla poltinta kuljetetaan noin 60 - 90 asteen kulmassa ja väsymiskestävyydeltään optimaalisen rajaviivageometrian saavuttamiseksi tulee polttimen etäisyys käsiteltävästä rajaviivalta olla noin 0.5 – 1.5 mm. Valokaaren kohdistaminen liian lähelle rajaviivaa aiheuttaa epäedullisia jyrkkiä rajaviivan liittymiä. Käsittelynopeus on noin 2 – 5 m/min. Kuva 9 havainnollistaa TIG-käsittelyä käytännössä.

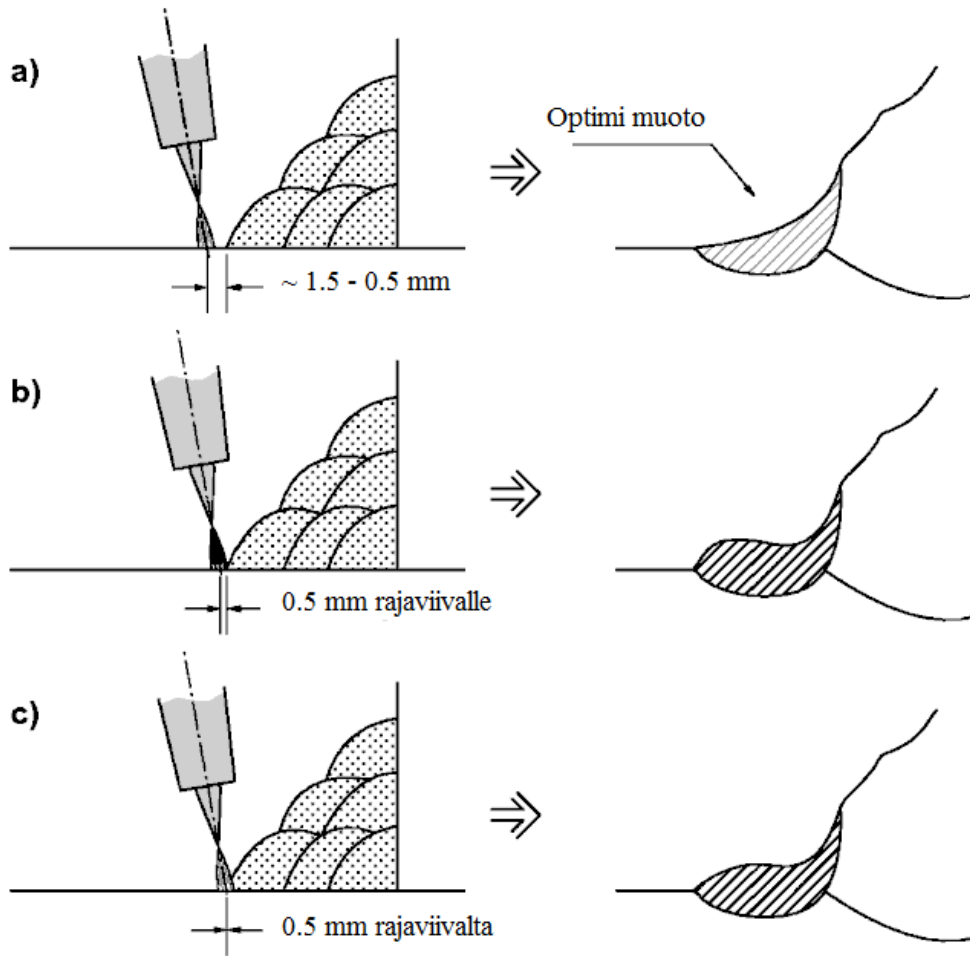
TIG-käsittelyn tuomia etuja hitsin väsymiskestävyyteen ovat mm:

A) Geometriatekijät

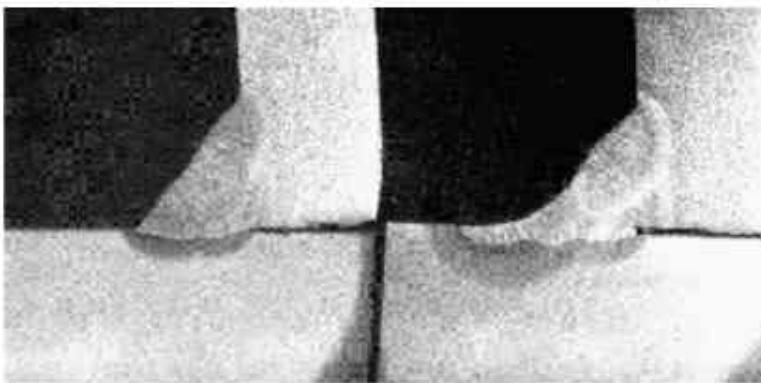
- a. Mahdolliset epäjatkuvuudet sulautuvat pois
- b. Käsitellyn rajaviivan suurempi pyöristyssäde

B) Jännösännitysmuutokset

- a. Sulatuksen jälkeen materiaalin jähmettyessä uudelleen jännitykset jakautuvat väsymiskestävyyden kannalta edullisemmin



Kuva 8. Polttimen asemointi ja saavutettava rajaviivageometria TIG-käsittelyssä. [10]



Kuva 9. TIG-käsitelty rajaviiva. [3]

OSA II: VALMISTELUT VÄSYTYSKEHÄÄ VARTEN

3 VÄSYMISLUJUUS – YLEINEN TEORIA

3.1 VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Väsymislujuus määrittyy mahdollisesta särön ydintymisvaiheesta ja sen kasvusta ja se tapahtuu hitsin rajaviivalta tai juuren puolelta alkaen. Väsymiskestävyyteen vaikuttavat rakenteessa mahdollisesti olevat viat ja ulkoiset jännitysvaihtelut, jotka määräytyvät kuormitustilanteesta sekä rakenteen ja hitsin geometriasta.

Näitä tarkastelutasoja on useita, kuten hitsin mikrogeometria ja –rakenne, sekä itse hitsattavan rakenteen makrogeometria. Hitsauksen kannalta keskeisiä tekijöitä ovat prosessitekniset seikat (käytetyt hitsausparametrit ja hitsauksen suoritus), metallurgiset seikat (hitsauksen aikaiset mikrorakenteen muutokset), hitsin geometriset tekijät sekä hitsauksen jälkeiset jännitystilat. [2]

3.1.1 Prosessitekniset seikat

Käytetty hitsausmenetelmä vaikuttaa hitsiin mikrotasolla keskeisimmin lämmöntuontinsa kautta vaikuttaen mm. muodostuvaan mikrorakenteeseen. Mikrorakenne puolestaan vaikuttaa hitsin lujuuteen ja sitkeyteen, millä voi olla vaikutusta rakenteen väsymiskestävyyteen. Perinteisten kaarihitsausmenetelmien keskimääräisiä lämmöntuonteja eri hitsausprosesseilla on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Yleisimpien kaarihitsausmenetelmien keskimääräisiä lämmöntuontiarvoja. [6]

Kaarihitsausprosessi	Lämmöntuonti Q [kJ/mm]
MIG/MAG	0.7 – 1.5
TIG	0.5 – 1.2
Puikko	0.7 – 1.5

Koesauvojen levyaihioiden hitsaus suoritettiin taulukon 5 mukaisilla parametreilla. Parametrien perusteella laskennallinen maksimi hitsausenergia pysyy n. 0.89 – 0.90 kJ/mm, mikä on Ruukin esittämien ohjeellisten arvojen sallimissa rajoissa. [11]

Taulukko 5. Käytetyt hitsausparametrit puomilla.

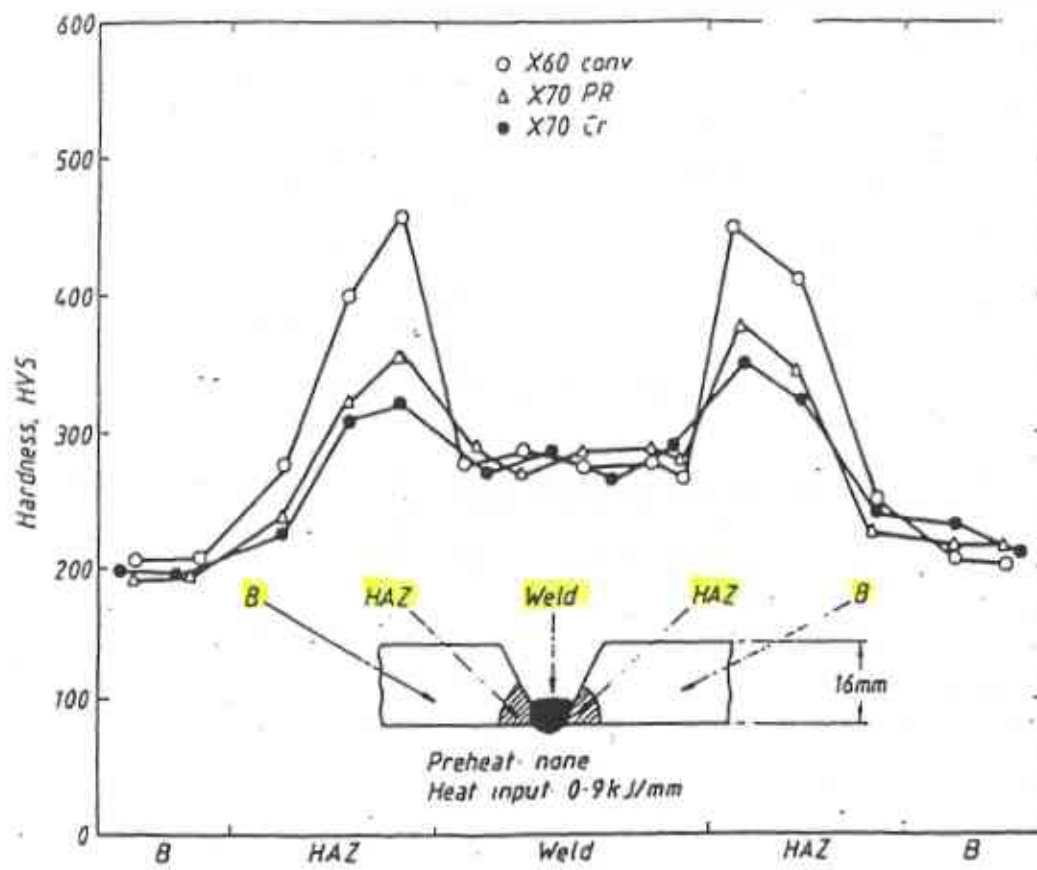
Langansyöttönopeus [m/min]	Hitsausnopeus [cm/min]	Jännite [V]	Virta [A]	Vapaalangan pituus [mm]	Poltinkulma [aste]	Prosessi
11.2	43	28.3	227	15	Työntävä, kallistus 1 aste	Kuumakaari-MAG (puomi)

3.1.2 Metallurgiset seikat

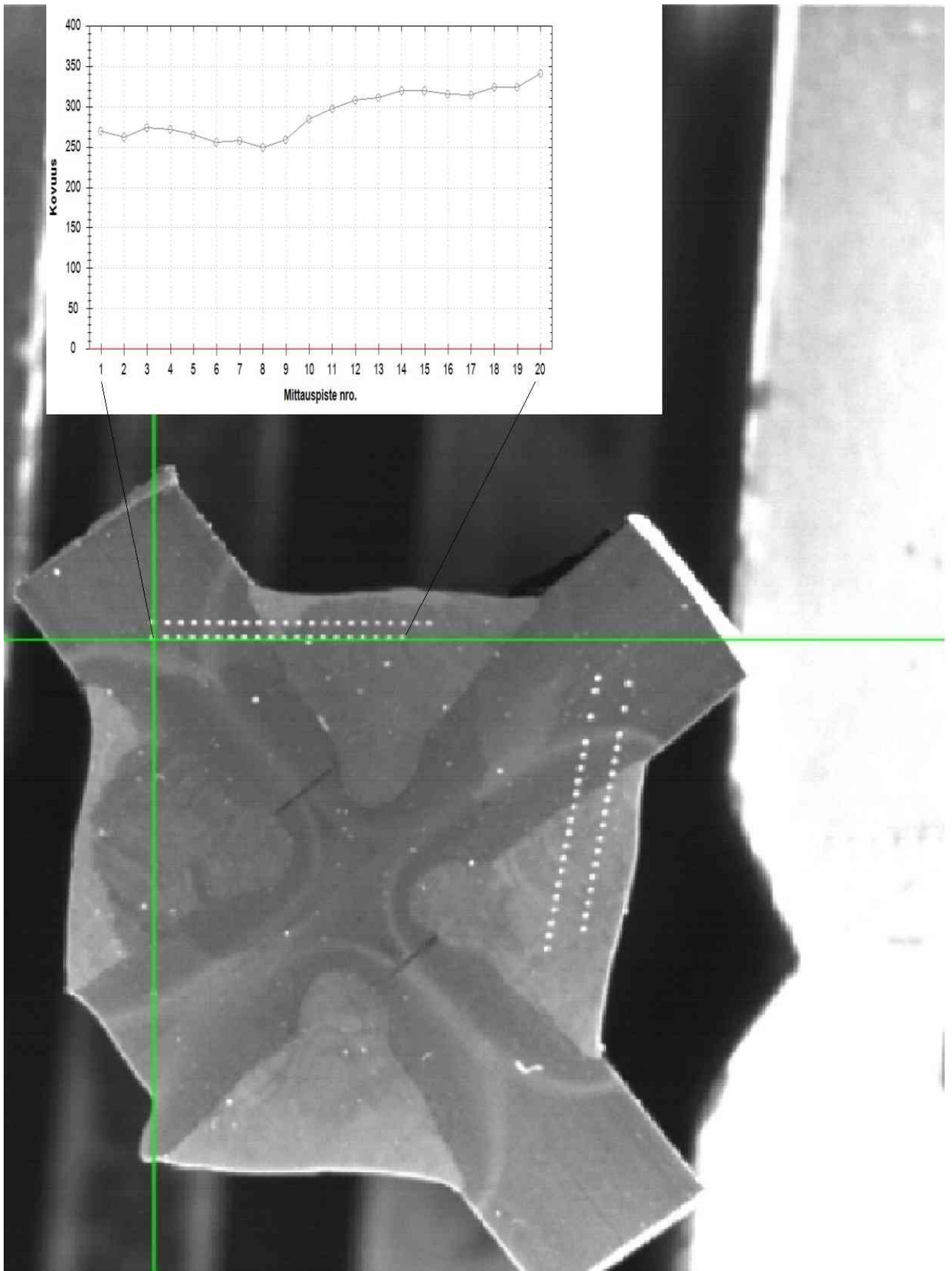
Hitsauksen aiheuttamat mikrorakennemuutokset ovat kriittisempiä suurlujuusteräksillä verrattuna matalalujuuksisiin teräslaatuihin. Lujempien teräslaatuojen lujuusominaisuudet voivat pudota enemmän nimellisistä arvoistaan verrattuna perinteisiin matalalujuuksisiin teräksiin. Suurilujuuksisten terästen lujuusominaisuudet on saavutettu pääasiassa termomekaanisilla käsittelyillä, joilla on päästy hienoon raekokoon ja raekoko on keskeinen teräksen lujuus- ja sitkeysominaisuuksiin vaikuttava tekijä. Hieno raerakenne on esimerkiksi tarkempi hitsauksen lämmöntonille kuin karkeamman raerakenteen omaavat perinteiset teräslaadut. [5]

Mikrorakenteen muutoksia voidaan tarkastella esimerkiksi kovuusmittauksilla. Hitsatun liitoksen ympäristön (lämpövyöhyke, HAZ) kovuusjakauma on periaatteeltaan kuvan 10 mukainen. Tämän perusteella on odotettavissa, että lämpövyöhykkeellä on pientä kovuuden nousua hitsiin nähden. [6]

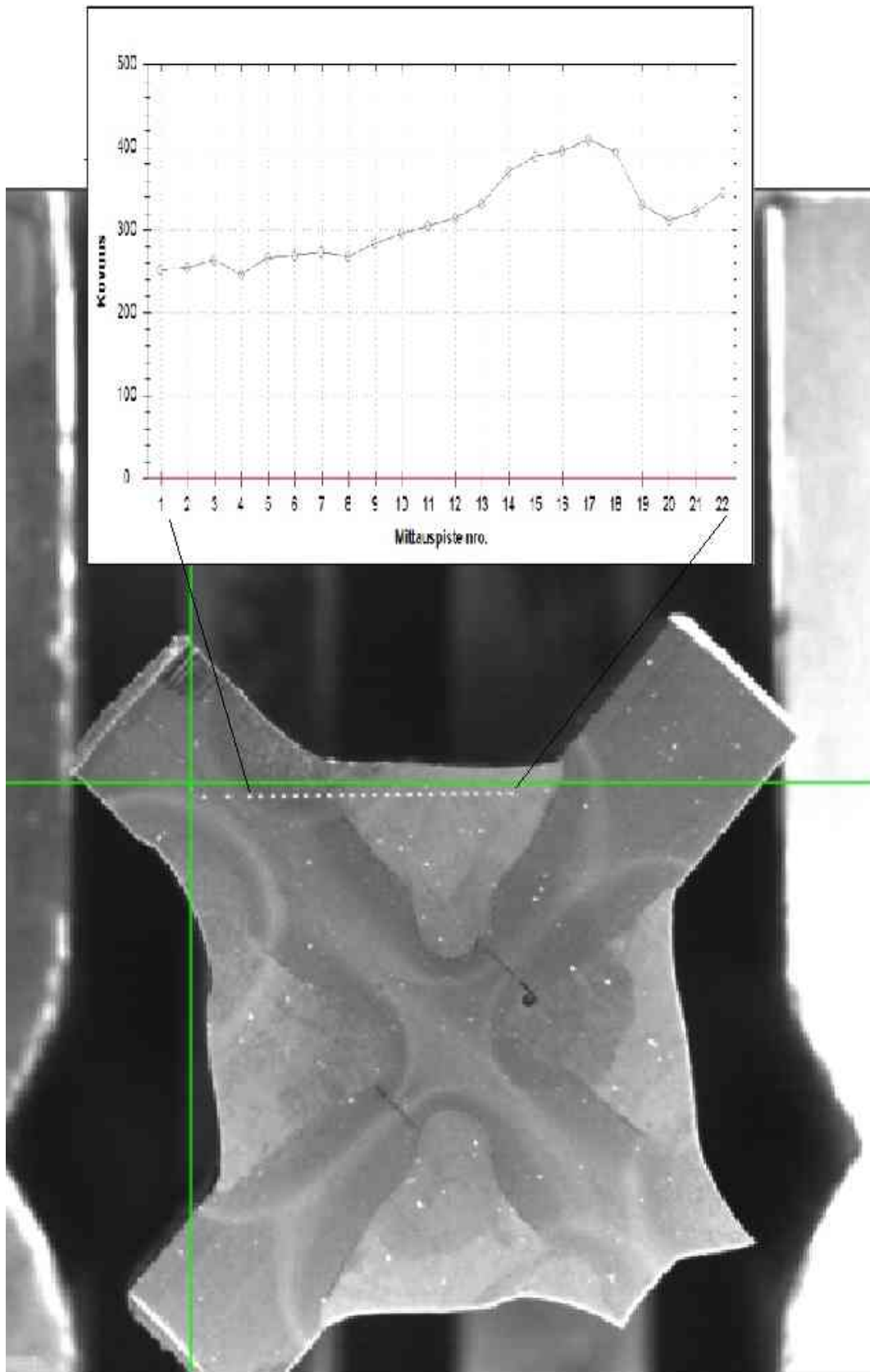
Poiketen kuvan 10 periaatteesta työssä mitattiin kovuusjakauma kahdesta sauvasta kuvan 11 periaatteen mukaisesti HV5-menetelmällä mittauspisteiden ollessa 0.4 mm:n etäisyydellä toisistaan. Valmistetuista koesauvoista mitattiin sauvat JK_R2 ja JK_R11 ja niiden kovuusjakaumat ovat taulukoiden 6 ja 7 mukaiset. Yksityiskohtaiset kovuusmittauspöytäkirjat ovat liitteinä 1 ja 2.



Kuva 10. Hitsiliitoksesta mitattuja kovuusjakaumia eri teräksillä. [6]



Kuva 11. Koesauvan JK_R2 HV5-kovuusjakauma mittauspisteittäin.



Kuva 12. Koesauvan JK_R11 HV5 -kovuusjakauma mittauspisteittäin.

Koesauvojen kovuusjakaumat ovat samankaltaiset. Ensimmäinen ja toinen mittauspiste ovat selkeästi perusaineen puolella ja kauempina hitsauksen aiheuttamista lämpövaikutuksista. Pisteestä 3 alkaen on havaittavissa lämpövyöhykkeen kovuuden nousua perusaineeseen nähden, mutta heti seuraavista mittauspisteistä alkaen (molemmista mittauspisteistä 3...n) siirrytään yhä enemmän hitsin puolelle kovuuden laskiessa. Mittauspisteestä 10 alkaen kovuus kasvaa edettäessä yhä enemmän hitsipienan puolelle ja perusaineen määrä jähmettyneessä hitsisulassa vähenee tasalujan X96-lisäainelangan seosaineiden osuuden kasvaessa. Koesauvalla JK_R11 mittaus etenee pidemmälle hitsin yli kuin sauvalla JK_R2, joten edettäessä vastaavasti pienahitsin ja perusaineen liitoskohtaa kohti alkaa kovuus jälleen alentua. Eri vyöhykkeiden kovuusmittausjakaumat noudattavat kuvassa 10 esitettyjä tuloksia, joten koesauvoista mitatut kovuudet osoittavat, että niiden hitsiliitosten voitiin olettaa olevan riittävän tasalaatuisia ja kelvollisia väsytyскоestukseen.

3.1.3 Hitsin geometria

Hitsausliitoksen geometriatarkastelussa keskeisimmässä roolissa varsinaisen liitosmuodon (T-liitos, päittäisliitos jne.) on perusaineen ja hitsiaineen liittymiskohta. Tätä voidaan tarkastella esimerkiksi SLM-menetelmällä (Structured Light Method). Keskeistä on pyörityssäde perusaineen ja hitsin liitoskohdassa, sillä mahdollisimman jouheva (eli suuri pyörityssäde) takaa väsymiskestävyydeltä edullisemmän liitoksen ja tähän pyritään esimerkiksi hitsien TIG- tai UIT-jälkikäsitteilyillä.

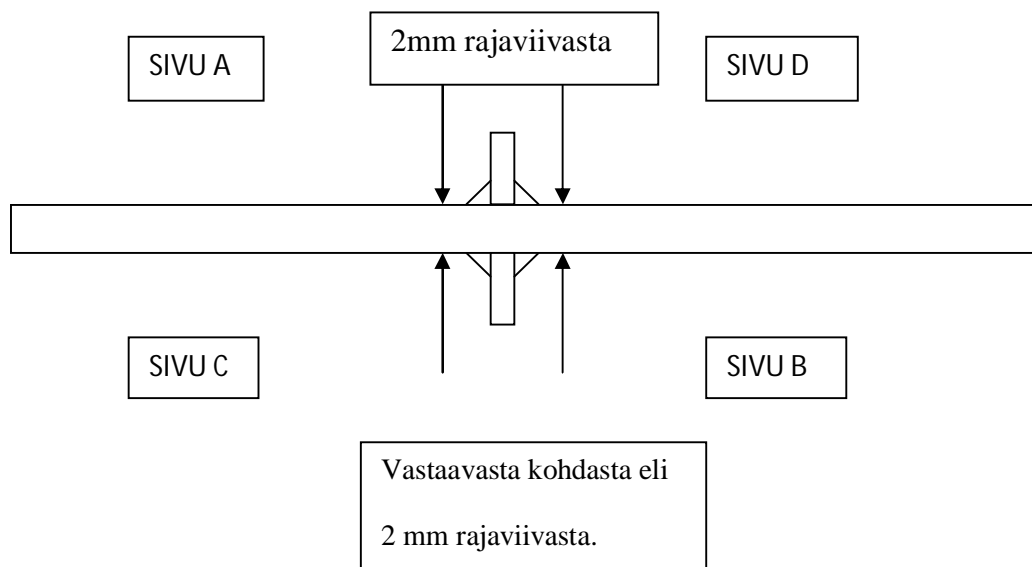
3.1.4 Jännitystilat (jännösjännitykset)

Hitsin jähmettyessä rakenteeseen jäävät jännitystilat vaikuttavat liitoksen väsymiskestävyyteen. Erilaisten veto- ja puristusjännitystilojen yhdistelmä voi heikentää liitoksen kestävyysominaisuuksia, jos nämä jännitystilat korostavat ulkoisia kuormituksia. Jännitystilat voivat myös sopivissa liitosmuodoissa kompensoida toisiaan esimerkiksi taivuttamalla rakennetta vastakkaisiin suuntiin. [11]

Kustakin koesauvasta mitattiin jäännösjännitykset röntgendiffraktiomenetelmällä. Jäännösjännitysmittauksella selvitettiin, onko koestettavien kappaleiden pinnalla jo valmiiksi jännityksiä, jotka voisivat vaikuttaa yhdessä ulkoisten kuormitusten kanssa. Jäännösjännitysmittauksen tuloksia käytettiin myös hyödyksi määrittäessä venymäliuskan kiinnityspaikka (sivu

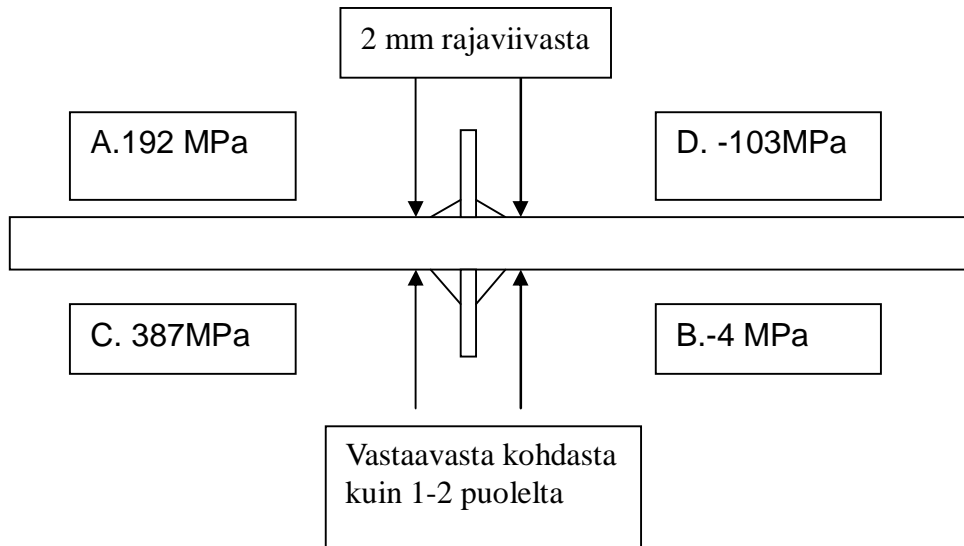
A...D). Jännösjännitysmittauksella pyrittiin siis myös ennustamaan se rajaviivaa, jossa väsymissärö oletettavasti lähtee kasvamaan.

Jännösjännitysmittaukset tapahtuivat kussakin koesauvassa samalla periaatteella kuvan 13 mukaisesti 2 mm etäisyydellä ennalta määritetystä hitsin rajaviivasta.



Kuva 13. Koesauvojen jännösjännitysten määrittäminen.

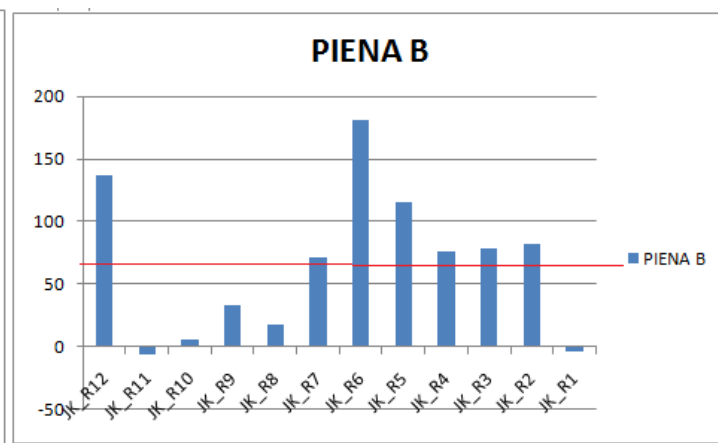
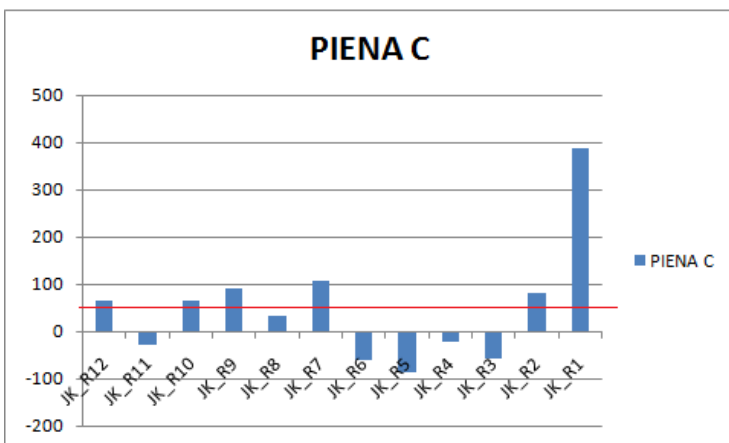
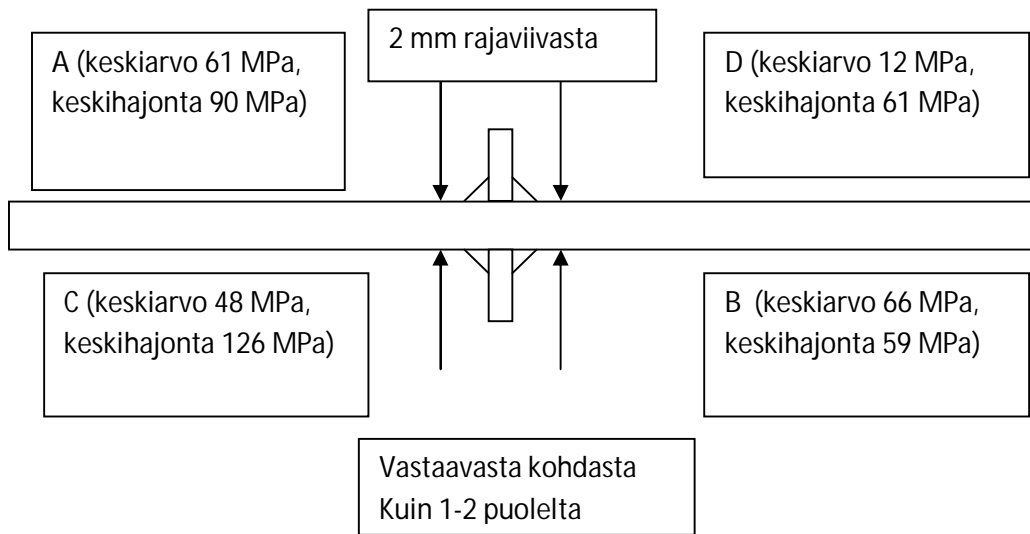
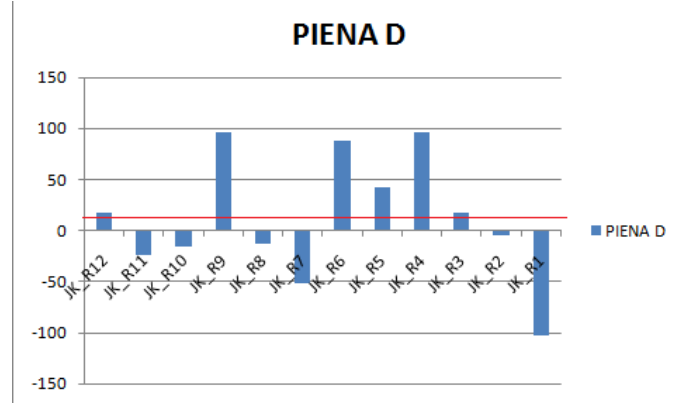
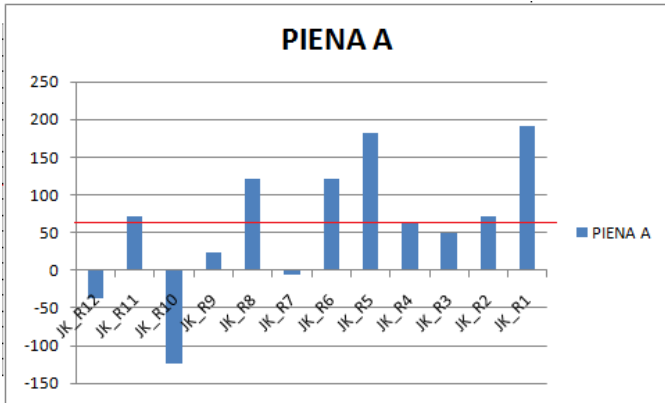
Esimerkiksi koesauvat JK_R1 rajaviivakohtaiset jännösjännitykset ovat kuvan 14 mukaiset. Mittaustuloksissa on selkeä jakauma eri rajaviivojen kesken.



Kuva 14. Koesauvan JK_R1 rajaviivakohtaiset jäännösjännitykset.

Esimerkkikoesauvassa on havaittavissa, kuinka myös hitsausjärjestys vaikuttaa lopullisiin jäännösjännityksiin hitsin jäähtyttyä. Havaintosauvassa JK_R1 viimeisenä hitsattava pieni D pienentää jäännösjännitystä sivulta B taivutuksella. Tämän sauvan tapauksessa venymäliuska liimataan mittausrajaviivan juuren läheisyyteen koesauvan sivulle C, jossa on mitattu suurin vetojännitys. Tämän oletetaan myös olevan vetokokeessa särönkasvultaan aktiivisin rajaviiva.

Sauvakohtaiset jäännösjännitykset esitetään diplomityön liitteissä 1-12. Kaikkien koesauvojen jäännösjännitysten keskiarvot on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Koesauvojen jäännösännitysmittausten koonti.

Jäännösjännitysmittaukset osoittavat, että vastakkaisilla rajaviivoilla A ja B on hyvin yhtenevät positiiviset jäännösjännitykset, kun tilastollisesti rajaviivalla C on suurin hajonta.

OSA III: KOESTUS

4 KOESTUKSEN SUORITUS

Aikaisempien ultralujien terästen hitsausliitosten tutkimushankkeiden pohjalta tiedetään, että ultralujilla teräksillä saadaan hyvä väsymiskestävyysluokka (FAT > 120 MPa) jo hitsatussa tilassa (AW). Täten on oletettavissa, että jälkikäsittelyt kuten TIG-sulatus ja ultraäänivasarrus parantavat sitä entisestään. [1] [7]

4.1 HYPOTEESI

Aiemmissa ultralujien terästen hitsausta käsittelevissä tutkimushankkeissa koekappaleet väsyttiin pääasiassa vakioamplitudisella $R = 0.1$ ja muuttuva-amplitudisella $R = -1$ kuormituksella. Kuormitussuhteen vaikutusta ultralujien terästen väsymiskestävyyteen ei ole aikaisemmin tutkittu.

Ennen koetuloksia olettamuksena on FAT-luokan (väsymiskestävyysluokan) pieneneminen jännityssuhteen R suurentuessa, eli vetokeskijännityksen kasvaessa. Laaja jännitysvaihteluväli ei johda automaattisesti alhaiseen väsymiskestävyyteen, sillä myös lähellä myötörajaa olevalla maksimikuormitusalueella voidaan saada hyviä väsymiskestävyystuloksia. Tämä edellyttää kuormitussuhteen saamista mahdollisimman pieneksi.

4.2 R-TEORIA

Jännityssuhteen vaikutusta ultralujien terästen hitsiliitosten väsymiskestävyyteen on tutkittu vähän. Tunnetuimmat jännityssuhdetta sivuavat tutkimukset käsittelevät särönkasvunopeuden määräytymistä jännityssuhteesta, sekä pehmenemisen ja maksimijännityksen välistä yhteyttä. Keskeistä on myös löytää keski- ja maksimijännityksen vaikutukset väsymiskestävyyteen, sekä selvittää kuinka suuri vaikutus on maksimijännityksen ulottumisesta pehmenneen alueen myötölujuusalueelle.

4.2.1 Särönkasvunopeuden yhteys jännityssuhteeseen R

Särönkasvunopeuden teoreettinen yhteys jännityssuhteeseen on esitetty IIW:n dokumentissa ”Recommendations for fatigue design of welded joints and components”. Tämä tunnetaan Paris’n lakina kaava (1) ja tämän kaavan jännityssuhteen huomioiva laajennus esitetään kaavassa (3) [11]

$$\frac{da}{dN} = C_0 \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

Jos $\Delta K < \Delta K_{th}$ niin pätee

$$\frac{da}{dN} = 0 \quad (2)$$

a = särön koko

N = kuormitusyhtäisten lukumäärä

ΔK = Jännitysintensiteettikertoimen vaihteluväli

ΔK_{th} = Jännitysintensiteettikertoimen vaihteluvälin raja-arvo, jota pienemmillä vaihteluilla särönkasvua ei ole odotettavissa

C_0, m = materiaalivakioita

Mikäli jännitysintensiiteettikerroin on suuri verrattuna materiaalin murtumissitkeyteen K_c on särön kasvu nopeampaa kuin kaavan (1) tilanteessa ja tällöin IIW suosittelee käytettäväksi Parin lain laajennettua muotoa:

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_0 \cdot \Delta K^m}{(1-R) \cdot \frac{\Delta K}{K_c}} \quad (3)$$

Kaava (3) osoittaa, että särönkasvunopeus on verrannollinen jännityssuhteeseen R ja jännityssuhteen kasvaessa ainakin suurilla jännitysintensiiteettikertoimen arvoilla särönkasvu kiihtyy.

4.2.2 Pehmeneminen ja σ_{\max} :n yhteys

Jähmettymisen tapahduttua ja hitsin jäähtyttyä perusaineen puolella kovuus-, lujuus- ja sitkeysarvot vastaavat ultralujaa perusainetta. Hitsin puolella arvot määräytyvät mm. sekoitus-suhteesta ja käytettävästä lisäaineesta. Nyrkkisääntönä mainitut hitsiaineen lujuusarvot ovat lähempänä käytetyn lisäaineen ilmoitettuja arvoja kuin perusaineen vastaavia. [6]

Väsymiskestävyyden kannalta erityisesti sularajan ja hitsin rajaviivan alue ovat mielenkiintoisimmat. Hitsauksen aiheuttamat metallurgiset muutokset kumuloituvat tällä alueella selkeimmin esiin. Alueella tapahtuu huomattavaa pehmenemistä, mikä ilmenee myös tässä diplomityössä tehtyjen kovuusmittausten (liitteet 1 ja 2) perusteella. Täten pehmenneen alueen todellinen myötöraja tulisi ottaa huomioon väsymiskestävyyttä arvioitaessa, sillä viitatessa esimerkiksi ultralujan perusmateriaalin myötörajaan kestoikäennusteet ovat liian varovaisia. [1].

Sularajan ja hitsin rajaviivan alueella mahdollisesti esiintyvät jäännösjännitykset vaikuttavat näistä kolmesta alueesta (perusaine – sularaja – hitsi) selkeimmin hitsiliitoksen väsymiskestävyyteen. Täten esimerkiksi pehmenneen alueen plastisoituminen heikentää rakenteen väsymiskestävyyttä eikä edes keskimääräistä konepajalaatua kuvaavaa FAT-luokitusta saavuteta. [1]

ULTRASTEEL-hankkeeseen liittyvän ”Hitsin laatu loppuraportti” (2009) perusteella suuri jännityssuhteen arvo (R) heikentää rakenteen väsymislujuutta sulajaraja-alueen pehmenemisen vaikutuksesta. Björkin tutkimuksessa suurella R -arvolla pehmenneellä vyöhykkeellä ta-

pahtuu vaihtoplastisoitumista lähinnä väsymissärön kärjen ympäristössä, sillä jännitys ei ole pysynyt täysin kimmoisalla alueella. Täten keskimääräiset väsymisluokat ovat vain keskimääräisen konepajalaadun tasolla. Väsytyскоestuksessa suurilla R -arvoilla maksimijännitys σ_{\max} kasvaa usein suureksi perusmateriaalin myötörajaan nähden, joten pehmenneen vyöhykkeen myötäminen ja lopulta murtuminen saavutetaan pienellä särön koolla. Tämä näkyy saavutettavissa keskimääräisissä FAT-luokissa. [1]

Käytännössä edellä mainittu ilmiö näkyy murtopinnoissa. Suurilla jännityssuhteen arvoilla särönkasvu lähenee puhdasta 45 asteen kulmaa. Tämä havaitaan esimerkiksi Björkin tutkimuksen erään suuren R -arvon 0.7 omaavan koesauvan murtopinnassa (kuva 16). Toisin sanoen pienellä särökoolla on saavutettu pehmenneen alueen kantokyky ja 45 asteen särönkasvu-vaihe oli lyhyt. Tämä näkyy myös koesauvan kestäessä oletettua vähemmän kuormitusyklejä. [1]



Kuva 16. Timo Björkin ULTRASTEEL-hankkeen tuloksia. Suurilla R -arvoilla murtopinta lähenee 45 asteen kulmaa. [2]

4.3.3 Maksimijännityksen ja nimellisen jännityksen suhde myötölujuuteen

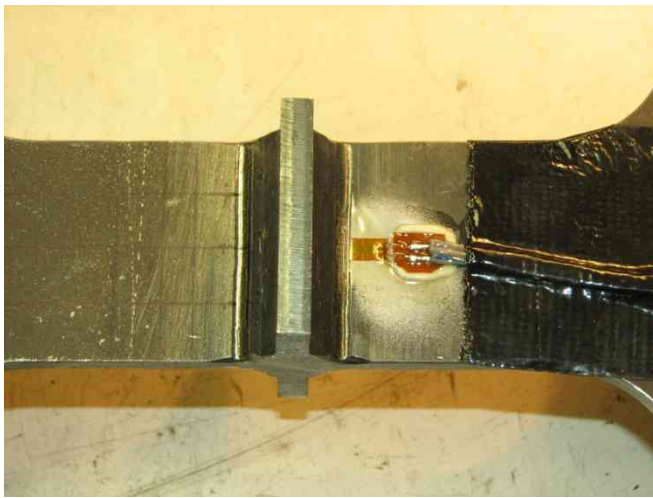
Hitsatun rakenteen kestoikää ei voida määrittää pelkän maksimaalisen jännityksen tai jännitysvaihteluvälin perusteella, sillä siihen vaikuttaa myös rakenteeseen vaikuttavien jännityskomponenttien suhde materiaalin myötörajaan. Kokeellista tutkimustietoa asiasta on vähän ja työssä on tarkoituksena löytää tähän vertailupohjaa kokoamalla aiempia ultralujia teräksiä koskevia tutkimustuloksia.

Korkean myötörajan omaavien ultralujien terästen tapauksessa voidaan tarkastella esimerkiksi σ_{\max}/f_y -suhdetta. Esimerkiksi Tuomas Skrikon kandidaatintyössä vuodelta 2010 tutkittiin samaa ultralujaa S960 terästä. Skrikon tutkimuksessa vertailukohtana oli erittäin pieni (vakio) R -arvo 0.1. Tässä kaikkien testattujen sauvojen (20 kpl) keskimääräinen maksimijännitys oli noin 225 MPa ja maksimijännityksen suhde materiaalin myötörajaan on lähes vakio 0.20. Tällä saavutettiin keskimääräisiä FAT-luokkia välillä 90...172 MPa keskiarvon ollessa 125 MPa ja keskihajonnan ollessa 26 MPa. Tämän perusteella R -arvon sekä maksimijännityksen (ja keski-jännityksen) ollessa lähes vakioita selittävät muut tekijät väsymiskestävyydsuokkien hajonnan. Pienellä σ_{\max}/f_y -suhteella voidaan saavuttaa sekä erittäin hyviä että keskimääräistä konepajalaatua alhaisempia FAT-luokituksia. [8]

Nimellisten σ_{nim} ja rakenteellisten σ_{hs} jännitysvaihteluiden suhdetta myötölujuuteen ja väsymiskestävyyteen voidaan tarkastella lyhyesti esimerkiksi Timo Björkin ULTRASTEEL-hankeeseen liittyvillä tutkimustuloksilla. Björkin tutkimuksessa keskimääräiset σ_{nim} ja σ_{hs} olivat noin 240 MPa, eli näiden keskimääräisten jännitysten suhde myötörajaan oli noin 0.25. R -arvot olivat muutamaa poikkeavaa sauvaa lukuun ottamatta erittäin pieniä. Björkin testeissä saavutetut laskennalliset FAT-luokitukset olivat välillä 83...267 MPa keskihajonnan ollessa 42 MPa. Puhtaasti nimellisten ja rakenteellisten jännitysten pohjalta ei voida myöskään vetää suoria johtopäätöksiä rakenteen väsymislukitukseen. [1]

5 VÄSYTYSKEHÄ

Varsinainen sauvojen koestus tapahtuu Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteiden laboratoriossa kahdessa erilaisessa väsytyksessä, jotka olivat 160 kN:n sekä 400 kN:n keuhät. Myöhemmin taulukossa 6 esitettävien koestusparametrien johdosta suurin osa koekappaleista väsyttiin isommalla 400 kN:n kehällä. Koesauvoihin liimattiin jäännösännitysmitusten perusteella venymäliuskat (kuva 17), joilla voidaan jäljittää materiaalissa tapahtuvia venymiä koestussuunnassa. Koesauvat asetettiin väsytykselle aina siten, että nimetyt rajaviivat A...D ovat aina samoissa kohdissa kehään nähden.



Kuva 17. Väsytykselle valmis koesauva JK_R8 venymäliuskoineen.

6 KOESTUSKENTÄN HAHMOTTELU $R:N$ VAIKUTUKSEN TUTKIMISEKSI

Koestuksessa kullakin sauvalla kuormitus on vähintään 20% myötörajasta (σ_{\min}) ja enintään enintään 70% myötörajasta (σ_{\max}), joka on noin 960 MPa. Taulukon 6 perusteella koestusparametreja laatiessa pyrittiin käymään läpi mahdollisimman laaja-alainen jännityssuhdekenttä rajallisella määrällä sauvoja.

	JÄNNITYSSUHDE R [$\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$]	JÄNNITYKSET [% myötörajasta]		
		Pieni σ_{\max}	Keskisuuri σ_{\max}	Suuri σ_{\max}
Pieni jännityssuhde	0.3	20 %	50 %	70 %
Keskisuuri jännityssuhde	0.5	20 %	50 %	70 %
Suuri jännityssuhde	0.7	20 %	50 %	70 %

Taulukko 6. Koestusparametrien hahmottelu jännityskentän avulla.

6.1 Laskennalliset koestusarvot

Väsytykskehän kalibrointi suoritetaan venymäliuskojen avulla. Kuormituksissa esiintyvä nimellinen jännitysvaihteluväli on pyritty valitsemaan niin, että kullakin testattavalla R -alueella (0.3, 0.5 ja 0.7) on vähintään yksi pieni sekä yksi suurempi nimellinen jännitysvaihteluväli ja näiden ero on vähintään kaksinkertainen toisiinsa nähden.

Taulukon 7 periaatetta noudattaen koestuksessa käytettävät parametrit määritetään seuraavasti:

KOESAUVA	VOIMAT		VENYMÄLIUSKA			
	Maksimivoima F_{max} [kN]	Minimivoima F_{min} [kN]	VOIMIA VASTAAVAT VENYMÄT			Liuskan paikka
			ϵ_{max} [μstr]	ϵ_{min} [μstr]	$\Delta\epsilon$ [μstr]	
JK_R1	67.5	20	1190	360	830	C
JK_R2	63 (81)	31.5 (40)	1109 (1429)	715	714	B
JK_R3	62.1	43.2	(2850) 1095	(2350) 760	500	C
JK_R4	180.9	133.6	3090	2357	733	D
JK_R5	129.6	38.9	2286	686	1600	A
JK_R6	180.9	90.5	3090	1545	1545	B
JK_R7	129.6	64.8	2286	1143	1143	C
JK_R8	85.6	60	1510	1057	453	A
JK_R9	180.9	54.3	3090	927	2163	D
JK_R10	(170.1) 129.6	(119.1) 90.7	(3000) 2286	(2100) 1600	686	A
JK_R11	180.9	54.3	3090	958	2123	A
JK_R12	(180.9)	(90.5)	(3090)	(1545)	1545	B

Taulukko 7. Venymäliuskan kalibrointi väsytyскоestusta varten.

Nimellinen jännitys määritetään kaavan (4) mukaisesti koestuksessa käytettävän voiman (F) ja koesauvan poikkileikkausmittojen (b ja t) perusteella

$$\Delta\sigma_{nim} = \frac{\Delta F}{b \cdot t} \quad (4)$$

Jossa ΔF on kehän voima-anturin mukainen voima (N) ja b sekä t koekappaleen poikkileikkausdimensioita (mm).

Rakenteellinen jännitysvaihtelu saadaan venymäliuskan antamasta venymävaihtelusta pohjalta kaavan (5) mukaisesti

$$\Delta\sigma_{hs} = E \cdot \Delta\varepsilon = 210000 \cdot \Delta\varepsilon \quad (5)$$

Jossa E on teräksen kimmomoduuliarvo 210 GPa ja $\Delta\varepsilon$ venymän vaihteluväli (mm).

Väsytyскоestettujen koesauvojen väsymiskestävyys- eli FAT-luokka voidaan laskea kaavan (6) mukaisesti

$$FAT_{hs,red} = \sqrt[3]{\frac{N_f}{2 \cdot 10^6}} \cdot \Delta\sigma_{hs} \quad (6)$$

$FAT_{hs,red}$ = koesauvan väsymiskestävyysluokka [MPa]

N_f = kuormanvaihtojen lukumäärä rakenteen lopullisesti rikkoontuessa [kpl]

$\Delta\sigma_{hs}$ = rakenteellinen jännitysvaihtelu venymäliuskan perusteella [MPa]

Koestusparametrit voidaan esittää kootusti jännitysten mukaisesti taulukon 8 mukaisesti:

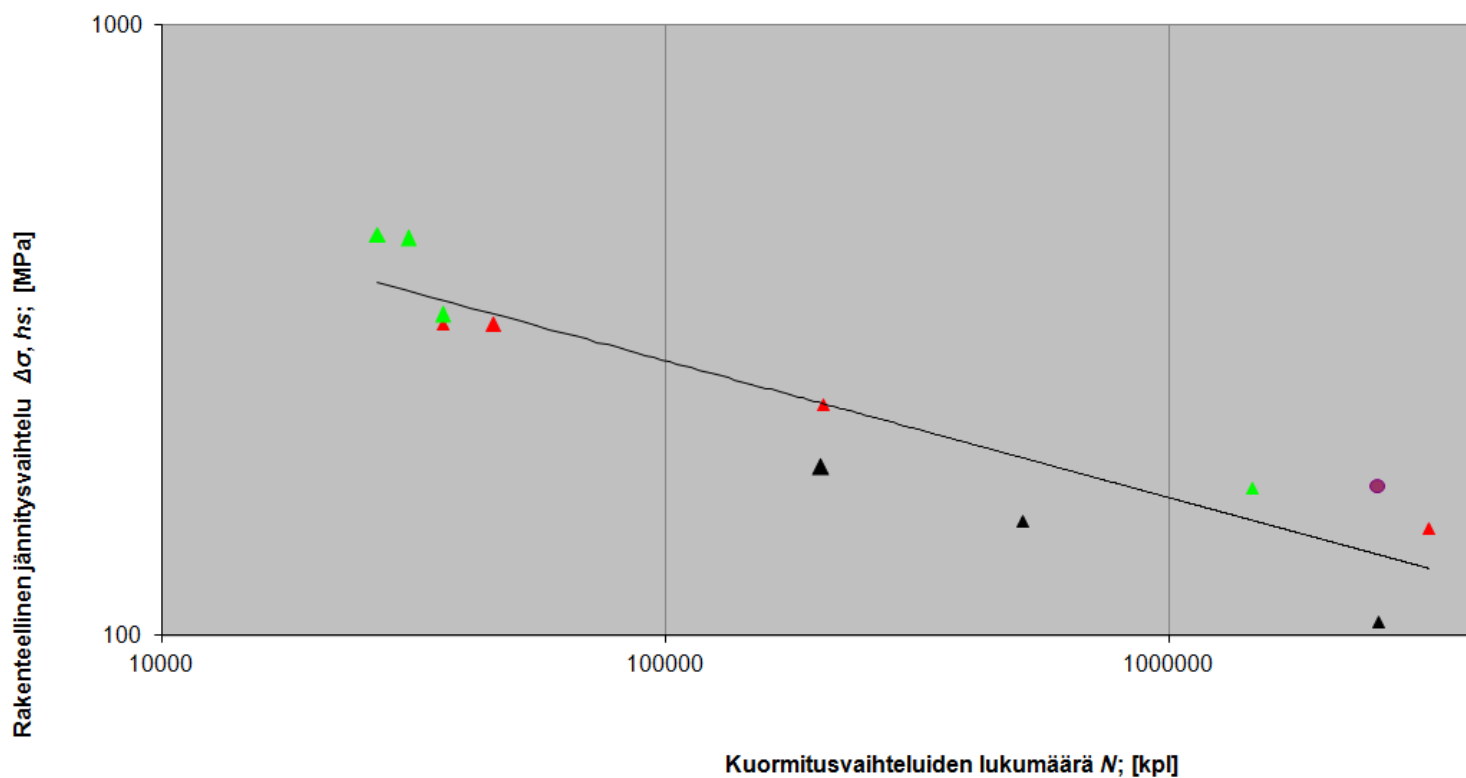
Taulukko 8. Sauvakohtaiset kuormitustiedot ja *R*-arvot ennen väsytyiskoetta.

KOESAUVA	X-LIITOS		HITSIT		KOESTUS VÄSYTYSKEHÄLLÄ		JÄNNITYSVAIHTELUT	
	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>a</i> -MITTA [mm]	TILA	σ_{max}/f_v	<i>R</i> -arvo	Nimellinen jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_{nim}$ [MPa]	Rakenteellinen jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_{hs}$ [MPa]
JK_R1	50	6	4	AW	0.26	0.3	158	174
JK_R2	50	6	4	AW	0.20 (0.31)	0.5	137	150
JK_R3	50	6	4	AW	0.24	0.7	63	105
JK_R4	50	6	4	AW	0.7	0.7	301	154
JK_R5	50	6	4	AW	0.5	0.3	302	336
JK_R6	50	6	4	AW	0.7	0.5	301	324
JK_R7	50	6	4	AW	0.5	0.5	216	240
JK_R8	50	6	4	UIT KAIKKI RAJAVIIVAT	0.33	0.7	85	95
JK_R9	50	6	4	AW	0.7	0.3	422	454
JK_R10	50	6	4	UIT RAJAVIIVA A	(0.66) 0.50	0.7	170	138
JK_R11	50	6	4	TIG KAIKKI RAJAVIIVAT	0.5	0.3	422	446
JK_R12	50	6	4	AW	(0.7)	(0.5)	301	324

OSA IV: KOETULOSTEN KOONTI

7 TULOKSET

Väsytyскоestuksen kootut tulokset ovat taulukon 9 mukaiset. Kuvassa 17 esitetään koetulosten pohjalta perinteinen S-N-käyrä.



Kuva 17. Väsytyскоokeen S-N-käyrä.

Vihreä kolmio	$R = 0.3$
Punainen kolmio	$R = 0.5$
Musta kolmio	$R = 0.7$
Pallo	$R = 0.7$ (run-out, uudelleenajo)

Taulukko 9. Väsytyскоetulokset koottuna.

KOESAUVA	KOESTUS VÄSYTYSKEHÄLLÄ		TULOKSET		
	σ_{\max}/f_v	<i>R</i> -arvo	N_f	FAT luokka [MPa]	Vaurioitunut rajaviiva [liuskan paikka / vauriorajaviiva]
JK_R1	0.26	0.3	1 464 300	157	C / A
(JK_R2)	0.20 (0.31)	0.5	3 286 283	*177	B/D
(JK_R3)	0.24	0.7	2 621 391	*138	C / B
JK_R4	0.7	0.7	513 260	98	D / D
JK_R5	0.5	0.3	36 162	88	A / A
JK_R6	0.7	0.5	45 452	92	B/D
JK_R7	0.5	0.5	206 178	113	C / D
(JK_R8)	0.33	0.7	7 940 632 / 2 596 961	*192	A / C
JK_R9	0.7	0.3	26 872	208	D / D
JK_R10	(0.66) 0.50	0.7	203 761	88	A / D
JK_R11	0.5	0.3	30 884	112	A / D
JK_R12	(0.7)	(0.5)	36 165	85	B / C

* Run-out-koesauvat

7.1 POIKKEAVAT KOESAUVAT

Kahdestatoista koesauvasta neljä käyttäytyi odotuksista poikkeavasti. Koeseauvat JK_R2, JK_R3 ja JK_R8 eivät rikkoutuneet ensimmäisellä kuormitustasolla, joten kuormitustasoja jouduttiin nostamaan.

7.2 FAT-LUOKAT

7.2.1 Hitsatussa tilassa olevat koeseauvat

Ultralujilla teräksillä on saavutettavissa hyvää konepajalaatua parempia keskimääräisiä väsymiskestävyydenluokkia (FAT > 120 MPa) ilman jälkikäsitteilyjäkin. Jätettäessä huomioimatta odotuksista poikkeavat run-out-koeseauvat JK_R2 ja JK_R8 pienillä *R*-arvoilla (*R* = 0.3) keskimääräiset FAT-luokat ovat välillä 88...208 MPa. Suurella *R*-arvolla (*R* = 0.7) FAT-luokat ovat välillä 88...138 MPa. Verrokiksi testatulla keskisuurella *R*-arvolla (0.5) FAT-luokat ovat välillä 92...119 MPa.

7.2.2 Jälkikäsitellyt koesauvat

Määrittämällä koesauvojen FAT-luokat taulukon 9 väsytyскоetulosten perusteella voidaan todeta, että hitsatussa tilassa (AW) koestettujen sauvojen keskimääräiset FAT-luokat ovat 85...200 MPa. Jälkikäsitellyistä sauvoista UIT-käsiteltyjen sauvojen JK_R5 ja JK_R8 FAT-luokat ovat 88...192 MPa ja TIG-käsitellyn sauvan JK_R11 112 MPa. Tuloksista on todettavissa, että hitsattujen rajaviivojen TIG-sulatus ei lisännyt merkittävästi koesauvan väsymiskestävyysluokkaa pienellä R -arvolla ja suurella jännitysvaihtelulla ($R = 0.3$ ja $\Delta\sigma_{nim} = 422$ MPa) sillä keskimääräinen FAT-luokka oli vain hyvän konepajalaadun tasolla. UIT-käsittely puolestaan lisäsi väsymiskestävyyttä suurilla R -arvoilla ja pienellä jännitysvaihtelulla ($R = 0.7$ ja $\Delta\sigma_{nim} = 85$ MPa), mutta pienellä R -arvolla ja suurella jännitysvaihtelulla ($R = 0.3$ ja $\Delta\sigma_{nim} = 302$ MPa) väsymiskestävyys jäi käsittelystä huolimatta keskimääräisen konepajalaadun tasolle.

7.2.3 Murtumismekaaninen tarkastelu

Liitteessä 3 esitettyjen murtopintojen perusteella sauvojen murtumismekanismit voidaan luokitella seuraavasti taulukon 10 mukaisesti.

Taulukko 10. Sauvakohtainen murtopinta-analyysi.

KOESAUVA	MURTUMISMEKANISMI (SITKEÄ/HAURAS/YHDISTELMÄ)	R	MUUTA
JK_R1	Yhdistelmä	0.3	
JK_R2	Sitkeä	0.5	Murtopinta 45 asteen kulmassa
JK_R3	Yhdistelmä	0.7	Murtopinta 45 asteen kulmassa
JK_R4	Yhdistelmä	0.7	
JK_R5	Sitkeä	0.3	
JK_R6	Sitkeä	0.5	
JK_R7	Sitkeä	0.5	Murtopinta 45 asteen kulmassa
JK_R8	Yhdistelmä	0.7	
JK_R9	Sitkeä	0.3	
JK_R10	Sitkeä	0.7	Murtopinta 45 asteen kulmassa
JK_R11	Sitkeä	0.3	
JK_R12	Sitkeä	0.5	

Murtopintojen tarkastelussa havaittiin, että suurin osa murtumista tapahtui joko puhtaasti sitkeästi, jolloin havaittavissa oli mm. selkeää murtopinnan kuroumaa tai yhdistelmämurtoina. Myös muutamia hauraiksi murtumiksi luokiteltavia murtumia havaittiin, ja perustelut ovat murtopintakuvion lisäksi sauvojen kestämissä syklimäärissä.

Murtopinta-analyysin perusteella saatiin myös tukea ULTRASTEEL-hankkeen tuloksille. Hankkeen pohjalta Timo Björk esitti, että suurilla jännityssuhteen arvoilla (sekä suurella σ_{\max} arvolla ultralujan perusmateriaalin myötörajan nähden) särönkasvu lähenee puhdasta 45 asteen kulmaa ja tämä särönkasvuvaihe on lyhyt. Tässä diplomityössä vastaavaa ilmiötä havaittiin jo R -arvolla 0.5, mutta yhtään puhtaita 45 asteen murtopintoja ei saavutettu, mutta tästä huolimatta selkeää yhtenevyyttä tulosten välillä on havaittavissa.

7.2.4 Jännösjännitykset ja kriittiset rajaviivat

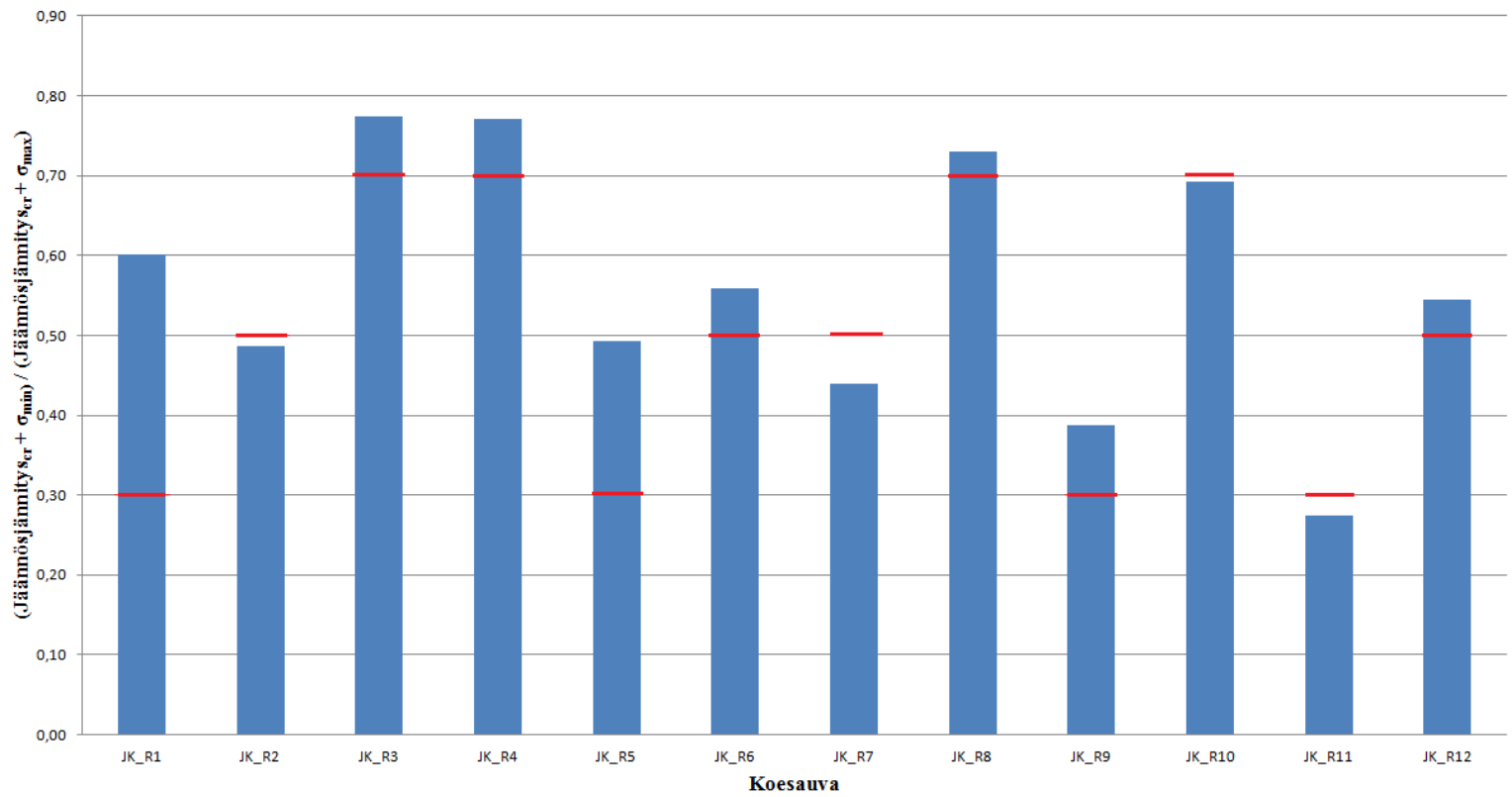
Taulukossa 11 esitetään koesauvojen kriittiset rajaviivat sekä näissä vallinneet jännösjännitykset ja kuvassa 18 vastaava analyysi graafisesti. Tulosten perusteella kolmasosassa koesauvoista särö alkoi kasvaa rajaviivalta, jossa jännösjännitys oli suurin. Keskimääräinen jännösjännitys kriittisellä rajaviivalla oli noin 61 MPa. Seitsemällä koesauvalla kahdestatoista kriittinen rajaviiva oli D, joten voidaan olettaa että kyseiselle pienalle on jäänyt mahdollisia epäjatkuvuuksia. Koesauvojen JK_R8, JK_R10 ja JK_R11 kaikkien rajaviivojen TIG-/UIT-käsittelyistä huolimatta sauvoilla JK_R10 ja JK_R11 rajaviiva D oli edelleen kriittisin.

Lisättäessä koetuksessa käytetyt minimi- ja maksimijännitykset mitattuihin jännösjännityksiin saadaan aiemmin esitettyihin sauvakohtaisiin *R*-arvoihin hieman hajontaa. Kuvassa 18 esitetään pylväillä tehollinen *R*-arvo jännösjännityksen maksimikohdassa ja punainen viiva osoittaa *R*-arvoa murtumiskohdassa. Koesauvojen *R*-arvot ja taulukossa 11 esitetty jännösjännitykset etumerkkeineen huomioiva tehollinen jännitysuhde eroavat kuvan 18 perusteella toisistaan keskimäärin 10 %.

Taulukko 11. Kriittiset rajaviivat ja jännösjännitykset.

KOESAUVA	KRIITTINEN SÄRÖN PAIKKA (A, B, C, D)	KRIITTISELLÄ SÄRÖN PAIKALLA MITATTU JÄÄNÖSJÄNNITYS [MPa]	JÄÄNÖSÄJNNITYSMAKSIMI JA SIJAINTI (A, B, C, D) [MPa]	$\frac{\text{Jännösjännitys}_{cr} + \sigma_{min}}{\text{Jännösjännitys}_{cr} + \sigma_{max}}$
JK_R1	A	192	C 387	0.60
JK_R2	D	-4	B 82	0.49
JK_R3	B	79	B 79	0.77
JK_R4	D	96	D 96	0.77
JK_R5	A	182	A 182	0.49
JK_R6	D	88	B 181	0.56
JK_R7	D	-52	C 108	0.44
JK_R8	C	34	A 121	0.73
JK_R9	D	96	D 96	0.39
JK_R10	D	-16	A -124	0.69
JK_R11	D	-24	A 71	0.27
JK_R12	C	65	B 137	0.54

Kriittisten rajaviivojen jännitysanalyysi

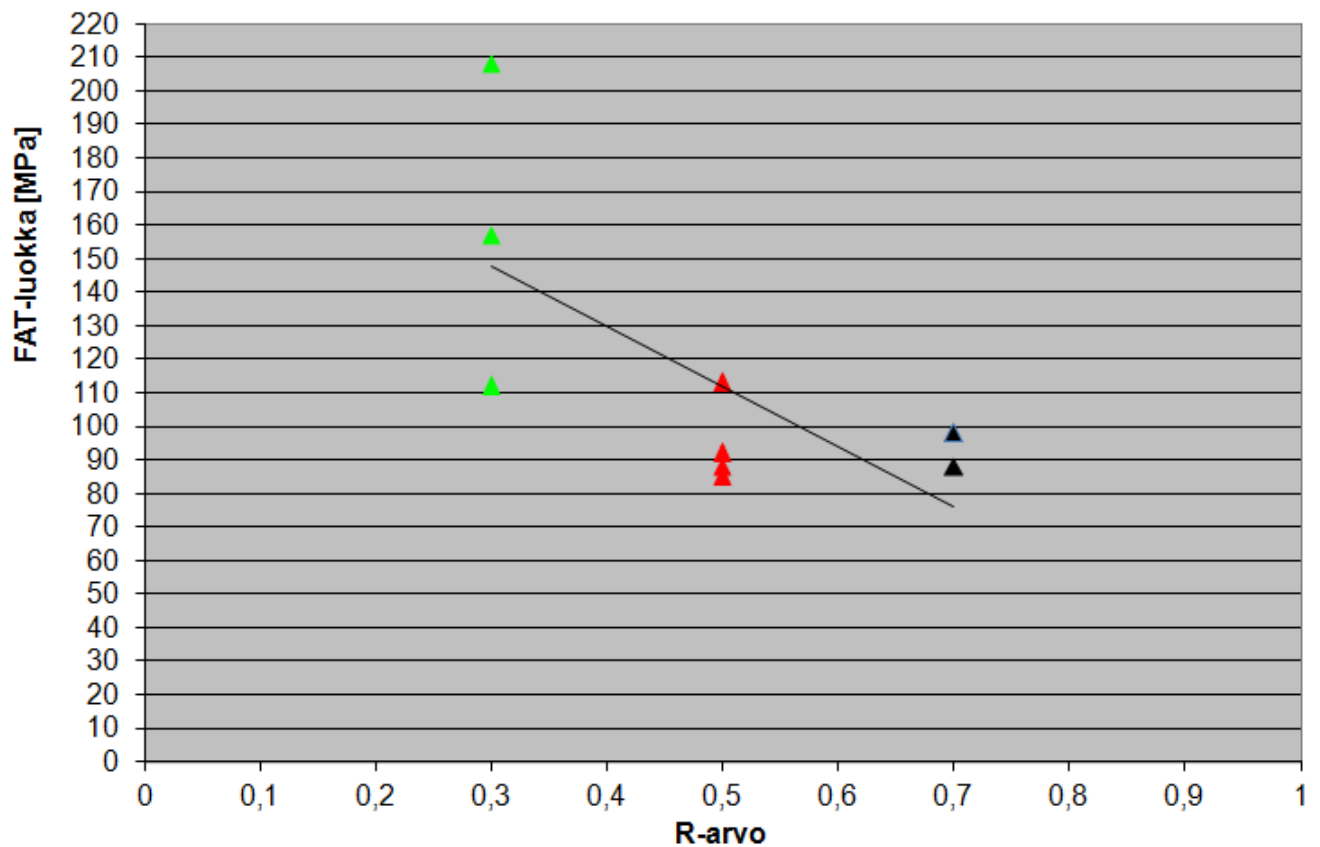


Kuva 18. Kriittisten rajaviivojen jännitysanalyysi: sininen on tehollinen R-arvo, punainen R-arvo murtumiskohdassa.

OSA V: ANALYYSI

8 ANALYSOINTI

Kuvassa 19 esitetään keskimääräiset FAT-luokat jännityssuhteen R funktiona, johon sovitettun suoran avulla havainnollistetaan hypoteesia, jonka mukaan FAT-luokka pienenee jännityssuhteen R kasvaessa. Kuvaajalta on poistettu mainitut kolme sauvaa JK_R2, JK_R3 ja JK_R8 jotka poikkesivat uudelleenajojensa puolesta muista sauvoista.



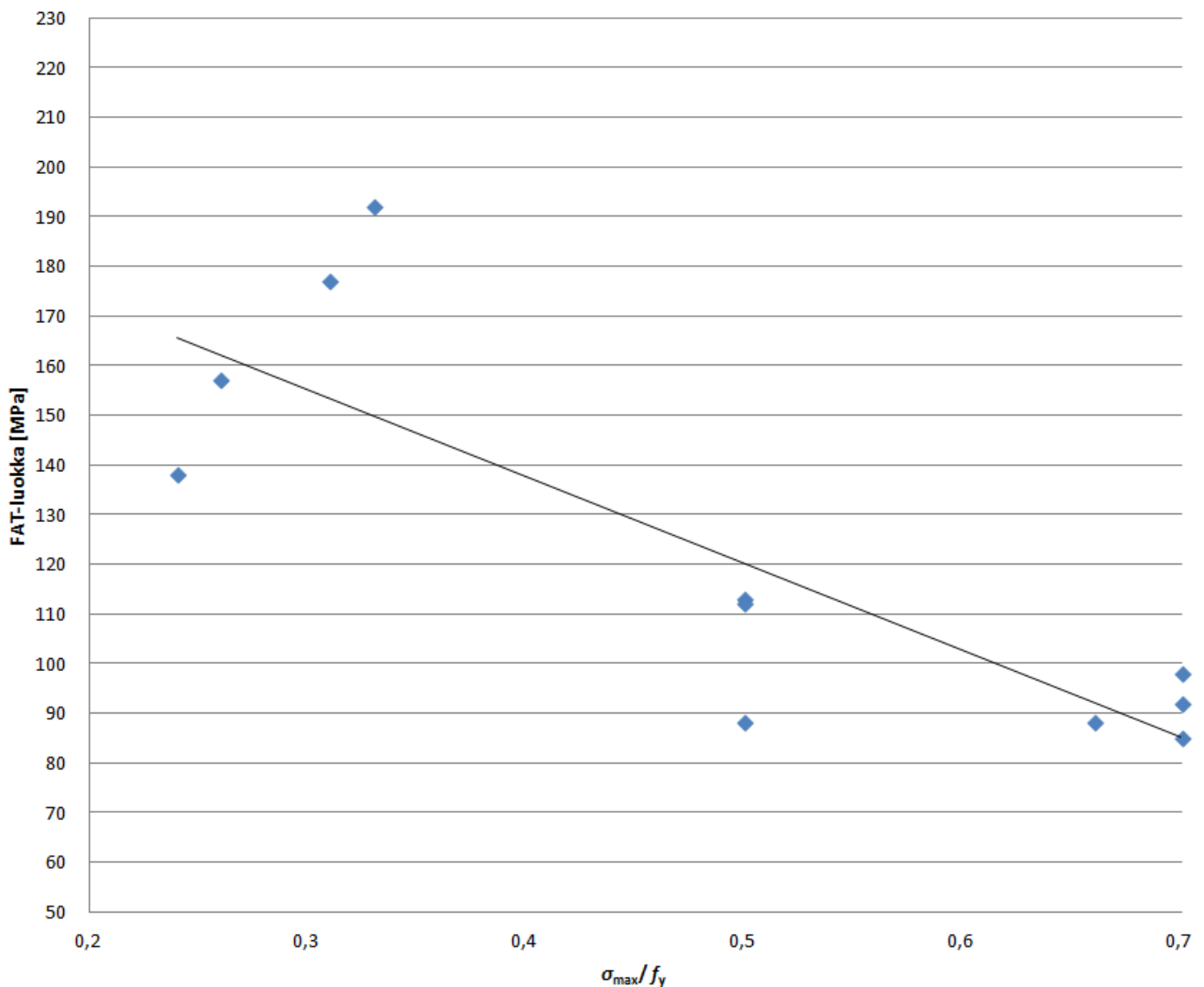
Kuva 19. FAT-luokka jännityssuhteen R funktiona.

Vihreä kolmio	$R = 0.3$
Punainen kolmio	$R = 0.5$
Musta kolmio	$R = 0.7$

Kuva 20 esittää FAT-luokat σ_{\max}/f_y :n funktiona (koestuksen maksimijännityksen suhde materiaalin myötörajaan). Tulosten perusteella todettiin, että FAT-luokka pieneni myös maksimi-

jännityksen kasvaessa, mutta tulosten hajonta oli suurempi kuin R -arvoihin verrattessa kuvassa 19.

Jälkikäsitellyt eivät automaattisesti takaa ultralujien rakenteiden suurempaa FAT-luokitusta. Tähän vaikuttavat voimakkaasti kuormituksen luonne ja kuormitussuhde sekä jännitysvaihteluväli. Mitä pienempi jännitysvaihteluväli oli, sitä parempi hyöty jälkikäsitelyillä saavutettiin FAT-luokituksilla mitattuna.



Kuva 20. FAT-luokka σ_{\max}/f_y :n funktiona.

8.1 Hypoteesi

Väsytyiskoetuloksista on havaittavissa, että väsymiskestävyysluokka pienenee jännityssuhteen kasvaessa ja suurin romahdus tapahtuu $R = 0.35$:n jälkeen. Tätä pienemmällä jännityssuhteen arvoilla FAT-luokat ovat keskimääräisen konepajalaadun FAT=100 yläpuolella ja tätä suuremmilla keskimääräisen konepajalaadun tasolla ja jopa sen alapuolella huolimatta robotisoidusta MAG-hitsauksesta.

9 HUOMIOT, JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

Diplomityön esitettyjen koetulosten perusteella voidaan nostaa esille erityisesti seuraava:

- Hitsauksen mekanisoinnista ja vakioiduista hitsausparametreista huolimatta väsytyiskoetuloksissa on eroja samoista koestusparametreista huolimatta. Tämä näkyy niin viimeaikaisista aikaisemmista tutkimuksista (Björk, Skriko) kuin allekirjoittaneen diplomityöstä.
- Työssä keskityttiin jännityssuhteen R tutkimiseen. Tulokset ovat selkeästi tulkittavissa, mutta vaihtuva-amplitudisen kuormituksen suhteen tarvitaan lisää tutkimusta.
- Hitsin metallurgiset seikat tulee huomioida osana selittämässä koetuloksia, joihin pelkkä hitsiliitoksen makrogeometrian ja kuormitusten tarkastelu ei riitä.

Diplomityössä suoritettujen koestuksien ja tulosten pohjalta voidaan esittää seuraavia johtopäätöksiä aiempien ultralujia teräksiä koskevien väsytyiskoetutkimusten jatkoksi:

- Mekanisoidulla MAG-hitsauksella voidaan saavuttaa hitsatussa tilassa ilman jälkikäsitteilyä hyviä väsymiskestävyysluokkia.
- Jälkikäsitteilyt (erityisesti TIG) parantavat väsymiskestävyyttä.
- Ultralujien terästen hitsauksen laatu vaikuttaa perinteisiä matalalujuuksisia teräksiä kriittisemmin hitsatun rakenteen väsymiskestävyteen.
- Jännityssuhteen kasvaessa väsymiskestävyysluokka pienenee. Koetulosten perusteella pieneneminen on huomattavaa erityisesti $R = 0.35$ jälkeen.

10 YHTEENVETO

Aiempien ultralujien terästen hitsausta koskevien tutkimushankkeiden osoittamana diplomityössä tutkittiin jännityssuhteen vaikutusta hitsausliitosten väsymislujuuteen. Tutkitut jännityssuhteet kattoivat alueen pienestä $R = 0.3$:sta suureen $R = 0.7$:ään. Jännityskenttä käytiin lävitse maksimijännityksen osalta 70% asti S960-materiaalin myötörajasta.

Kahdentoista mekaanisesti hitsatun ja koneistetun koesauvan perusteella todettiin, että väsymiskestävyysluokka pienenee säännönmukaisesti jännityssuhteen kasvaessa. Erityisesti jännityssuhteen arvon $R = 0.35$ jälkeen FAT-luokat laskivat merkittävästi. Saavutetut keskimääräiset FAT-luokat jälkikäsittelemättömillä koesauvoilla vaihtelivat välillä 85...200 MPa.

Diplomityössä havaittiin myös, että ultralujilla teräksillä on mahdollista saavuttaa jälkikäsittelemättömässä tilassa keskimääräistä konepajalaatua ($FAT = 100$ MPa) huomattavasti parempilaatuisia hitsejä. Jälkikäsitteilyistä erityisesti rajaviivojen TIG-sulatus paransi koesauvojen FAT-luokitusta. Saavutetut FAT-luokat käsitellyillä sauvoilla vaihtelivat välillä 88...192 MPa.

Jatkossa tutkittaessa ultralujien terästen hitsausliitosten väsymisominaisuuksia on kiinnitettävä enemmän huomiota liitoksen metallurgiaan, sillä pelkät kovuusmittaukset eivät riitä selittämään kaikkia ilmiöitä, joita tapahtuu esimerkiksi pehmenneellä vyöhykkeellä. Tämä helpottaa myös laskennallisten väsymiskestävyysluokitusten ja todellisten koetulosten erojen selvittämistä ja tämä helpottaa koetulosten tuomista lähemmäksi rakenteiden suunnittelijoita.


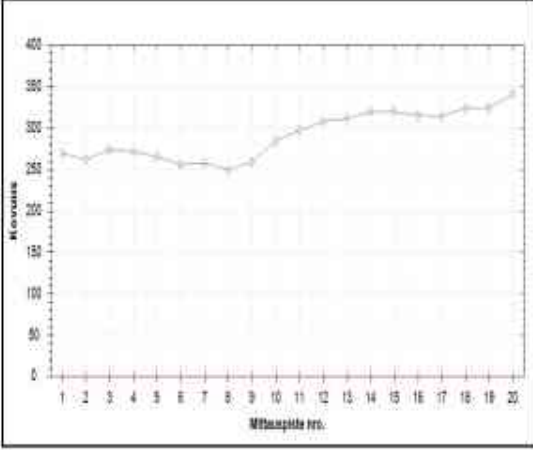
LÄHTEET

- [1] Björk, T., Marquis, G., Nykänen, T., (2009). Hitsin laatu loppuraportti. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillisen yliopiston rakenne- ja lujuustekniikan laboratorio. 56 s.
- [2] Björk, T., (2008). Rakenneteräksestä S960 Hitsatun Liitoksen Väsymislujuus. ULTRAS-TEEL-tutkimusraportti. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT-Metalli. 45 s.
- [3] Haagensen P.J., Maddox S.J., (2009). IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures. IIW Document N.o XIII-2200r3-07. 38s.
- [4] Lopez Martinez, L., Blom, A. F., Trogem, H., Hahle, T. (1997). Fatigue Behaviour of Welded High Strength Steels. Fatigue Behaviour of Steels With Strength Levels between 350 and 900 MPa - Influence of Post Weld Treatment Under Spectrum Loading. Report N.o 97-30. Ruotsi, Tukholma: The Royal Institute of Technology. Department of Aeronautics.
- [5] Maggi, S., Murgia, M. (2008). Introduction to the metallurgic characteristics of Advanced High Strength steels for Automobile Applications. Welding International. Volume 22, issue 9. September 2009. [Kirja saatavissa sähköisessä muodossa LUT:t verkon kautta]. [viitattu 7.4.2012.] Saatavissa <<http://dx.doi.org/10.1080/09507110802413001>>.
- [6] Martikainen, J. (2010). Hitsausmetallurgia. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Digipaino. 282 s.
- [7] Pedersen, M.M., Mouritsen O.O., Hansen M.R., Andersen J.G., Wenderby J. (2009). Comparison of Post Weld Treatment of High Strength Steel Welded Joints in Medium Cycle Fatigue. IIW Document N.o XIII-2272-09. 13 s.
- [8] Skriko, T., (2010). Kandidaatintyö – Ultralujan teräksen MAG-hitsauksen laatu. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT Metalli. 59 s.
- [8] Statnikov. E.S., (1999). Applications of Operational Ultrasonic Impact Treatment (UIT) Technologies in Production of Welded Joints. IIW Russian Delegation. IIW Document N.o XIII-1667-97. Venäjä: Severodvinsk. Northern Scientific & Technological Fund. 19 s.

[10] Venkateshwaran, Pappiah Ayyappan (2005). Master's Thesis - Constant and Variable Amplitude Fatigue Strength of High Strength Steel Welds Treated with Ultrasonic Impact Treatment. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Teräsrakenteiden laboratorio. 30 s.

[11] Vähäkainu, O. (1997). Rautaruukin teräkset hitsaajan opas. 2. painos. Keuruu: Otava. ISBN 950-5010-18-X.


LIITE 1 KOESAUVAN JK_R2 KOVUUSMITTAUSPÖYTÄKIRJA

	Sarjamittaus Test Report																																																																																																																																																			
Userfield 1: Userfield 2: Userfield 3: Userfield 4: Userfield 5:	Userfield 6: Userfield 7: Userfield 8: Userfield 9: Userfield 10:																																																																																																																																																			
																																																																																																																																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Specimen</th> <th>Row</th> <th>Distance</th> <th>Hardness</th> <th>Method</th> <th>Diagonal</th> <th>Sarjamittaus - Value</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>jk_r2</td> <td>Sarja 1</td> <td>0,000</td> <td>269</td> <td>HV 5</td> <td>185,655</td> <td>0,800</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0,400</td> <td>262</td> <td>HV 5</td> <td>188,119</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>0,800</td> <td>274</td> <td>HV 5</td> <td>183,953</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>1,200</td> <td>271</td> <td>HV 5</td> <td>184,969</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>1,600</td> <td>265</td> <td>HV 5</td> <td>187,051</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>2,000</td> <td>255</td> <td>HV 5</td> <td>190,683</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>2,400</td> <td>258</td> <td>HV 5</td> <td>189,572</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>2,800</td> <td>249</td> <td>HV 5</td> <td>192,967</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>3,200</td> <td>259</td> <td>HV 5</td> <td>189,205</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>3,600</td> <td>284</td> <td>HV 5</td> <td>180,686</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>4,000</td> <td>297</td> <td>HV 5</td> <td>176,687</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>4,400</td> <td>308</td> <td>HV 5</td> <td>173,503</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>4,800</td> <td>311</td> <td>HV 5</td> <td>172,664</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>5,200</td> <td>319</td> <td>HV 5</td> <td>170,486</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>5,600</td> <td>319</td> <td>HV 5</td> <td>170,486</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>6,000</td> <td>315</td> <td>HV 5</td> <td>171,565</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>6,400</td> <td>314</td> <td>HV 5</td> <td>171,838</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>6,800</td> <td>324</td> <td>HV 5</td> <td>169,165</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>7,200</td> <td>324</td> <td>HV 5</td> <td>169,165</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>7,600</td> <td>341</td> <td>HV 5</td> <td>164,894</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Specimen	Row	Distance	Hardness	Method	Diagonal	Sarjamittaus - Value	jk_r2	Sarja 1	0,000	269	HV 5	185,655	0,800			0,400	262	HV 5	188,119				0,800	274	HV 5	183,953				1,200	271	HV 5	184,969				1,600	265	HV 5	187,051				2,000	255	HV 5	190,683				2,400	258	HV 5	189,572				2,800	249	HV 5	192,967				3,200	259	HV 5	189,205				3,600	284	HV 5	180,686				4,000	297	HV 5	176,687				4,400	308	HV 5	173,503				4,800	311	HV 5	172,664				5,200	319	HV 5	170,486				5,600	319	HV 5	170,486				6,000	315	HV 5	171,565				6,400	314	HV 5	171,838				6,800	324	HV 5	169,165				7,200	324	HV 5	169,165				7,600	341	HV 5	164,894		
Specimen	Row	Distance	Hardness	Method	Diagonal	Sarjamittaus - Value																																																																																																																																														
jk_r2	Sarja 1	0,000	269	HV 5	185,655	0,800																																																																																																																																														
		0,400	262	HV 5	188,119																																																																																																																																															
		0,800	274	HV 5	183,953																																																																																																																																															
		1,200	271	HV 5	184,969																																																																																																																																															
		1,600	265	HV 5	187,051																																																																																																																																															
		2,000	255	HV 5	190,683																																																																																																																																															
		2,400	258	HV 5	189,572																																																																																																																																															
		2,800	249	HV 5	192,967																																																																																																																																															
		3,200	259	HV 5	189,205																																																																																																																																															
		3,600	284	HV 5	180,686																																																																																																																																															
		4,000	297	HV 5	176,687																																																																																																																																															
		4,400	308	HV 5	173,503																																																																																																																																															
		4,800	311	HV 5	172,664																																																																																																																																															
		5,200	319	HV 5	170,486																																																																																																																																															
		5,600	319	HV 5	170,486																																																																																																																																															
		6,000	315	HV 5	171,565																																																																																																																																															
		6,400	314	HV 5	171,838																																																																																																																																															
		6,800	324	HV 5	169,165																																																																																																																																															
		7,200	324	HV 5	169,165																																																																																																																																															
		7,600	341	HV 5	164,894																																																																																																																																															

Date: 27.09.2011

Signature:

LIITE 2 (JATKOA) KOESAUVAN JK_R11 KOVUUSMITTAUSPÖYTÄKIRJA

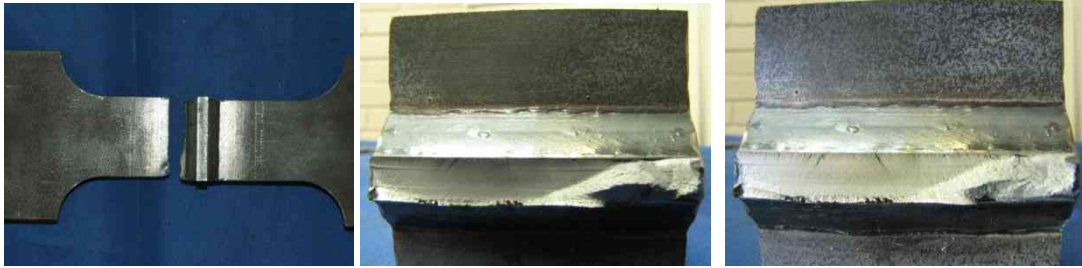
		Sarjamittaus Test Repi				
Specimen	Row	Distance	Hardness	Method	Diagonal	Sarjamittaus - Value
		8,000	322	HV 5	169,690	
		8,400	345	HV 5	163,936	

Date: 28.09.2011

Sinnatur:

LIITE 3 KOOTUT SAUVAKOHTAISET KUVAT

JK_R1 (R=0.3):



JK_R2 (R=0.5) (ei murtopintakuva):



JK_R3 (R=0.7):



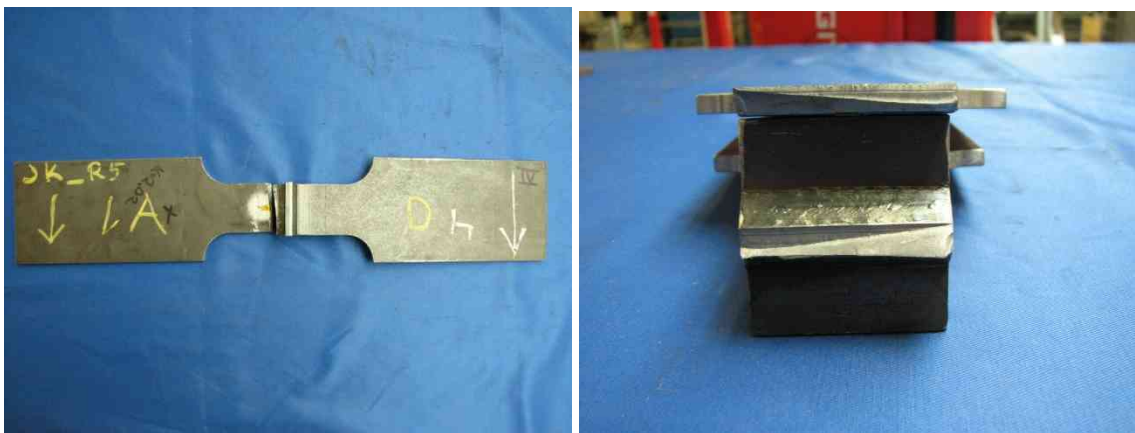
JATKU

LIITE 3 (JATKOA) KOOTUT SAUVAKOHTAISET KUVAT

JK_R4 (R=0.7):



JK_R5 (R=0.3):



JK_R6 (R=0.5):



JATKUU

LIITE 3 (JATKOA) KOOTUT SAUVAKOHTAISET KUVAT

JK_R7 (R=0.5):



JK_R8 (R=0.7):



JATKU

LIITE 3 (JATKOA) KOOTUT SAUVAKOHTAISET KUVAT

JK_R9 (R=0.3):



JK_R10 (R=0.7):



JATKUU

LIITE 3 (JATKOA) KOOTUT SAUVAKOHTAISET KUVAT

JK_R12 (R=0.5) (ei murtopintakuva):



LIITE 4 KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

JK_R1:

Kulhosen di-T_{to} Teos JK_R1 400kv kello Pr: 4.4.2011
 JK-R1

F_{max}= 1190 μs -
 F_{min}= 357 μs -
 F_{mean}=
 f= 4,5 Hz

Kanavat: 1 Voima = 1V - 100 μV
 2 Siirtymä = 1V - 10 mm
 3 Liuska C = 1V - 300 μV

K= 2.04
 Tiiedosto: ~~JK_R1 sta~~ JK_R1 sta, TXT
 Shuntti: 3000 μV - 10V - 19,488 kΩ
 Perus: 8,3 %
 Dyn: 6,2 %
 Mittausmikro: 820 - 1112

Liiska C-pinnalle
 kiinnitys = +0,072V → φ

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
4.4	15.41	∅	JK_R1 sta, TXT	Staalinen vato 1190 μs - 65,3 kV J _{ai} = -0,001 V
4.4	15.45	∅	JK_R1 dyna, TXT	dynoamien aloitus
4.4	15.50	980	JK_R1 dyna, TXT	hoe kaa
5.4	8.0	265 055	JK_R1 dyna, TXT	hoe kaa
6.4	8.15	660 350	JK_R1 dyna, TXT	hoe kaa
7.4	8.36	105 6960	JK_R1 dyna, TXT	hoe kaa
8.4	8.04	1134993	JK_R1 dyna, TXT	hoe kaa laskuri oli pysähtynyt! oikea lukema lähempänä 1436 000
8.4	15.23	1254 490	JK_R1 dyna, TXT	hoe kaa
11.4	8.24	1463 300	JK_R1 dyna, TXT	laskuri loppu kello Säilytykseen puolelta A
				oikea lukema on 1764 000. Laskettava tai korjettava mittaus dynoamia lukemissa.

JATKU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT


JK_R2:

1/2

Rin Voitelu Kulkurin J5-T5 H21 JK-R2 pv: 11.4.2011

$F_{max} = 830 \mu\text{st} - 46 \text{ kW}$ | $1109 \mu\text{st} - 60,6 \text{ kW}$ Tiedosto: JK-R2 sta. TXT
 $F_{min} = 420 \mu\text{st} - 23,7 \text{ kW}$ | $557 \mu\text{st} - 30 \text{ kW}$ $K = 2,04$ Shuntti: $3000 \mu\text{st} - 19,48 \text{ kW}$
 $F_{mean} =$ | $1429 \mu\text{st}$ 78 kW Perus: $28,49\%$ | $38,0\%$ | $48,9\%$
 $f = \sim 8 \text{ Hz}$ | $715 \mu\text{st}$ 40 kW Dyn: $10,2\%$ | $14,1\%$ | $18,1\%$
 Mittausmikro:

Kanavat: 1-Voinen = 1V - 12,5 kW
 2-Siirtä = 1V - 2 mm
 3-Liusta B = 1V - ~~300~~ 600 μst Kuvaa vakuilla



$V_{i:n:n} = 5 =$
 $-0,067 \text{ V} \rightarrow \emptyset$

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
12.4	13.03	\emptyset	JK-R2 sta. TXT	Stabiili veto I $830 \mu\text{st} - 46 \text{ kW}$ Jäi = 0,000V
12.4	13.10	\emptyset	JK-R2 dyn. TXT	dynaaminen ajoitus
12.4	13.15	2340	JK-R2 dyn. TXT	koekäy
12.4	16.25	98850	JK-R2 dyn. TXT	koekäy
13.4	8.09	581430	JK-R2 dyn. TXT	koekäy
14.4	8.52	1219175	JK-R2 dyn. TXT	koekäy Patterin lobi Patterin
15.4	8.36	1947490	JK-R2 dyn. TXT	koekäy Patterin Voimavähti
18.4	8.16	4144175	JK-R2 dyn. TXT	koekäy
18.4	15.09	4355436	JK-R2 dyn. TXT	koekäy keskeytetty Voimien Muutos
18.4	15.13	\emptyset	JK-R2 sta. b. TXT	Stabiili veto I $1109 \mu\text{st} - 55,6 \text{ kW}$ Jäi = 0,0V $557 \mu\text{st} - 30 \text{ kW}$
18.4	15.20	\emptyset	JK-R2 dyn. b. TXT	dynaaminen ajoitus
18.4	15.26	2710	JK-R2 dyn. b. TXT	koekäy
19.4	8.13	603425	JK-R2 dyn. b. TXT	koekäy
20.4	8.12	1461815	JK-R2 dyn. b. TXT	koekäy
21.4	9.41	2373840	JK-R2 dyn. b. TXT	koekäy
26.4	8.24	6622570	JK-R2 dyn. b. TXT	koekäy
27.4	7.47	7459350	JK-R2 dyn. b. TXT	koekäy
	13.39	7666470	JK-R2 dyn. b. TXT	koekäy lopetettu, voinen vaihto 1429 - 715 μst 8 Hz
	13.39	\emptyset	JKR2 dyc. TXT	stabiili veto $1429 \mu\text{st}$ 78 kW kuvakaipa - 0,001V $\rightarrow \emptyset$
	13.43	7	JKR2 dyc. TXT	dynaaminen ajoitus
	13.46	435	JK-R2 dyc. TXT	koekäy

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

2/2

R-n Vaikutus Kulkueuron ditio H21 JK-R2 Pv: 28.4.2011

Fmax= 1429 μ Sr - 78kV

Fmin= 715 μ Sr - 40kV

Fmean=

f= 84z

Kanavat: 1 vaima = 1v - 12.5kV
 2 suuttimä = 1v - 2mm
 3 liuska = 1v - 600pL

Tiedosto: JK-R2 St _{duc} -ITT

K= 2.04 Shuntti: 3000pL - 5v - 10.488kV

Perus: 48.97.

Dyn: 18.17.

Mittausmikro: 424-652

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
28.4	8.58	649755	JK-R2duc.ITT	voe kää
29.4	8.50	1456780	JK-R2duc.ITT	voe kää
2.5	8.16	3286283	JK-R2duc.ITT	Kappale väli
				Säteilyolosuhteet radelta -D

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

JK_R3:

7/3

Kuljettavan di-Työ Teos JK_R3 400kW kela Pv: 19.4.2011

$F_{max} = 1095 \mu s - 64,1 kW$ | $1369 \mu s - 80,5 kW$ Tiedosto: JK_R3 sta.dya.TXT
 $F_{min} = 760 \mu s - 45,2 kW$ | $1140 \mu s - 66,4 kW$ K=2.04 Shuntti: 3000 μs - tav-19,488 kW
 $F_{mean} =$ Perus: 10,85%
 $f = 4,5 \# 5,15 Hz$ Dyn: 2,9%
 Mittausmikro: 820-1112

Kanavat: 1-Voima = 1V - 100kW
 2-Siirto = 1V - 10kW
 3-Liusta C = 1V - 300 μs

D

B

A

C

liusta C-piirite

mittaus -0,553V →

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
19.4	12.37	∅	JK_R3 sta.TXT	staattinen kato I 1095 μs - 64,1 kW Jäi = 0,000V 760 μs - 45,2 kW
19.4	12.42	∅	JK_R3dya.TXT	dynaamisen aloitus
19.4	12.45	414	JK_R3dya.TXT	koelkäy
20.4	8.11	375690	JK_R3dya.TXT	koelkäy
21.4	9.34	864230	JK_R3dya.TXT	koelkäy
26.4	8.18	3144605	JK_R3dya.TXT	koelkäy
27.4	7.43	3593210	JK_R3dya.TXT	koelkäy
28.4	8.34	4069130	JK_R3dya.TXT	koelkäy
29.4	8.46	4534255	JK_R3dya.TXT	koelkäy
2.5	8.13	5909180	JK_R3dya.TXT	koelkäy
3.5	10.12	6411110	JK_R3dya.TXT	koelkäy
4.5	8.20	6832520	JK_R3dya.TXT	koelkäy, voimien vaihto 1369 - 1140 μs
	8.25	∅	JK_R3sta0.TXT	staattinen 1369 μs - 80kW liusta jäs -0,003V → ∅
	8.29	1	JK_R3dya0.TXT	dynaamisen aloitus
	8.31	245	JK_R3dya0.TXT	koelkäy
	13.54	104275	JK_R3dya0.TXT	koelkäy
5.5	8.01	455300	JK_R3dya0.TXT	koelkäy
6.5	8.29	930980	JK_R3dya0.TXT	koelkäy
8.9	8.47	2336055	JK_R3dya0.TXT	koelkäy
10.5	8.23	2795460	JK_R3dya0.TXT	koelkäy
11.5	8.46	3269460	JK_R3dya0.TXT	koelkäy
12.5	9.52	3758840	JK_R3dya0.TXT	koelkäy

Varmista, että signaali on oikein ja Tiedotusvoima

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

2/3

Kokkonen di-Työ Teos JK-R3 400kV kela Pr: 13.5.2011

Fmax=	1369 μ S	80.5 kV	1711 μ S 100kV	Tiedosto: JK-R3 ^{5+X} _{dyb} .TXT
Fmin=	1140 μ S	66.4 kV	1455 μ S 2.04	Shuntti: 300pSt-10v-19.4kSt
Fmean=			88kV	Perus: 14,8%
f=	5.4 Hz			Dyn: 2.6%
Kanavat:	1 Voima = 1v - 100kV			Mittausmikro: 820-1112
	2 siirrokä = 1v - 10m			
	3 Liuska = 1v - 300pSt			

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
13.5	8.42	4201490	JK-R3dyb.TXT	voiman säätö
	8.45	4202460	JK-R3dyb.TXT	koekäy
16.5	8.22	5594430	JK-R3dyb.TXT	koekäy
17.5	8.17	6058990	JK-R3dyb.TXT	koekäy
	12.08	6133925	JK-R3dyb.TXT	Run out, koepäätetty
②				jännityskäytön nosto
				1711-1425 μ S
	12.15	∅	JK-R3Stc.TXT	Stattering 1711 μ S 100kV
				Liuska jäi: 0,000v
	12.18		JK-R3dyc.TXT	dynaamisen alitus
	12.22	335	JK-R3dyc.TXT	koekäy
18.5	8.30	390810	JK-R3dyc.TXT	koekäy
19.5	8.31	853445	JK-R3dyc.TXT	koekäy
20.5	8.27	1320650	JK-R3dyc.TXT	koekäy
	14.26	1436783	JK-R3dyc.TXT	koepäätetty, jännityksen
③				nosto 2400pSt-2000pSt
		∅	JK-R3otd.TXT	Stattering 2400pSt 141kV
				liuska jäi 0,005v → ∅
④	14.34	∅	JK-R3dyd.TXT	dynaamisen alitus 141-110kV
	14.36	240	JK-R3dyd.TXT	koekäy
23.5	8.18	1274955	JK-R3dyd.TXT	koekäy
23.5	14.32	1395968	JK-R3dyd.TXT	koepäätetty Run out Voiman nosto

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

JK_R4:

Kulhosen lä-T₂ Teos JK_R4 400w kela Pv: 12.4.2011

F_{max} = 3090 μsh - 172,5kW

F_{min} = 2357 μsh - 131kW

F_{mean} =

f = 4,542

Kanavat: 1-Voima = 1v - 100w
 2-Sähkö = 1v - 10w
 3-Liiska D = 1v - 500μsh

K = 2.04

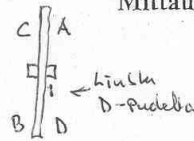
Tiedosto: JK_R4 Sta. TXT

Shuntti: ~~3090 μsh - 172,5kW~~
 5000 μsh - 10v - 11,645kW

Perus: 30,5%

Dyn: 5,6%

Mittausmikro: 820-1112



liiska =
 -0,214V →

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
12.4	12.27	∅	JK_R4 Sta. TXT	Staatinn veto I 3090μ - 171,0kW J _{ai} = 10,068V → ∅
				Staatinn veto II 3090μ - 172,5kW J _{ai} = 0,000V
12.4	12.37	∅	JK_R4 dyna. TXT	dyno, miten alerty
12.4	12.44	235	JK_R4 dyna. TXT	koee kary
12.4	16,18	58 800	JK_R4 dyna. TXT	koee kary Liiska kireti
13.4	8,05	317670	JK_R4 dyna. TXT	koee kary
14.4	8,25	513260	JK_R4 dyna. TXT	koee kary Sävi Ycintymst D-pudella liiska

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

JK_R5:

R:n Vastustus kokeisiin di-Työ JK - R5

Pv:

$$P_{\max} = 2286 \mu\text{sh} - 147,46 \text{ kN}$$

$$P_{\min} = 686 \mu\text{sh} - 4396 \text{ kN}$$

$$P_{\text{mean}} =$$

$$f = 5,1 \text{ Hz}$$

Kanavat: 1-Voima = 1v - toolin

2-Säiliö = 1v - 10cm

3-Liusta A = 1v - 300 gstr

$$K = 2,02$$

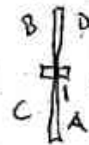
Tiedosto: JK_R5^{sta}.TXT

Shuntti: 3000 μsh - 10V - 19,682 kN

Perus: 19,6 %

Dyn: 27,0 %

Mittausmikro: 424-652



Kiinnitys = -1,079 \rightarrow 0

Liusta - Voima \rightarrow 0 \rightarrow kiinnitys = 0,676 \rightarrow 0

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
4.7.	14.45	0	JK_R5sta.txt	Staatinen veto 2286 gstr - 148,3 kN Jaa = -0,056 V \rightarrow 0
	15.02			Staatinen veto II 2286 gstr - 147,4 kN Jaa = -0,00 V koe oh.
4.7.	15.05	0	JK_R5dya.txt	Dynaamisen aloitus
4.7.	15.13	1018	JK_R5dya.txt	koe käy
4.7.	15.32	8057	JK_R5dya.txt	koe käy
5.7.	8.48	36162	JK_R5dya.txt	kappale rikki

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJA

JK_R6:

Kukkonen J-Työ Teos JK_R6 400 w kabi Pv: 14.4.2011

$$F_{max} = 3090 \mu\text{sh} - 177,2 \text{ kW}$$

$$F_{min} = 1545 \mu\text{sh} - 88,1 \text{ kW}$$

$$F_{mean} =$$

$$f = 4,54 \text{ Hz}$$

Kanavat: 1 - Voima = 1v - 100kw
 2 - Siirtynäkö TV - 10mm
 3 - Liuska B = 1v - 500μm


Tiedosto: JK_R6^{sta} dyna.TXT

K = 2,04 Shuntti: 5000μm - 10v - 11,645kw

Perus: 26,45%

Dyn: 11,8%

Mittausmikro: 820-1112


 ← Liuska B-Puolella
 Kiinnitys = +0,358V → ∅

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
14.4	13.41	∅	JK_R6sta.TXT	Staattinen veto I 3090μsh - 176,4kw Jai = +0,023v → ∅
				Staattinen veto II 3090μsh - 177,2 Jai = +0,002v
14.4	13.51	∅	JK_R6dyna.TXT	dynaaminen aloitus
14.4	13.56	1110	JK_R6dyna.TXT	Koe kary
15.4	8,08	45452	JK_R6dyna.TXT	Kappale k:llä Säns ydinympyt D-Puolelta

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

JK_R7:

R:n Voitelus kokeen di-T70 JK-R7

Pv:

F_{max} = 2286_{gstr} - 116,2 kN

F_{min} = 1143_{gstr} - 57,3 kN

F_{mean} =

f = 5,1 Hz

Kanavat:

1-Voima = 1v - 100kV

2-Siirtymä = 1v - 10m

3-Liiska C = 1v - 300gstr

K = 2,02

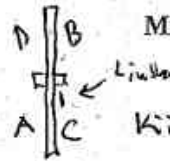
Tiedosto: JK-R7^{sta}.txt

Shuntti: 300_{gstr} - 10V - 19,682 kΩ

Perus: 17,5%

Dyn: 15,6%

Mittausmikro: 424-652



Kiinnitys = 0,083 → ∅

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
5.7.	13.05	∅	JK-R7sta.txt	Staatinen veto I 2286 _{gstr} - 115,6 kN jää = 0,074 V → ∅
5.7.	13.13			Staatinen veto II 2286 _{gstr} - 116,6 jää: -0,00 V → koe ohii
5.7.	13.16	∅	JK-R7dya.txt	Dynaamisen abitus
5.7.	13.24	1748	JK-R7dya.txt	koe käy
5.7.	15.20	37301	JK-R7dya.txt	koe käy
5.7.	16.00	49530	JK-R7dya.txt	koe käy
6.7.	8.10	206178	JK-R7dya.txt	kappale rikki

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

Rinvaikutus kulkune di-Ty2 JK_R8 jotta 400kr kela pv: 28.6.2011

$F_{max} = 2200 \mu s - 133,8 \text{ kN}$

$F_{min} = 1540 \mu s - 935 \text{ kN}$

$F_{mean} =$

$f = 5,1 \text{ Hz}$

- Kanavat: 1-Voima = 1v - 100kr
 2-Siiritys = 1v - 10mm
 3-Liukka A = 1v - 300µm

$K = 2,03$

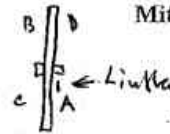
Tiedosto: JK_R8J^{sta}dya.TXT

Shuntti: 300µm - 10v - 17,584k2

Perus: 22,95 %

Dyn: 10,8 %

Mittausmikro: 424-652



$\text{Kiinnitys} = -0,583 \rightarrow \emptyset$

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
28.6	13.00	Ø	JK_R8Jsta.TXT	staattinen voima 2200µs - 132,8kN
28.6				$\Delta \sigma = 0,040 \text{ V} \rightarrow \emptyset$
	13.15			staattinen voima II 2200µs - 133,6kN
				$\Delta \sigma = -0$ koe oh.
	13.19	Ø	JK_R8Jdya.TXT	Dynaamisen alitus
28.6	13.30	1935		koe käy
	16.00	47827		koe käy
29.6	8.18	347095	JK_R8Jdya.TXT	koe käy
30.6	8.03	783060	JK_R8Jdya.TXT	koe käy
1.7	8.40	1234925	JK_R8Jdya.TXT	koe käy
4.7	8.26	2549530	JK_R8Jdya.txt	koe käy
4.7	11.39	2596961	JK_R8Jdya.txt	kappale rikki

JATKUU

LIITE 4 (JATKOA) KOESAUVOJEN MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

JK_R12:

R:n Vaikutus kulkoon D1-T70 R12 400kV linja Pv: 6.9.2011

Fmax= 3090μst - 185,5kV

Fmin= 1545μst - 53,2kV

Fmean=

f= 5Hz 4,85Hz

Kanavat: 1- Voima = 1v - 100kV

2- Siirtymä = 1v - 10m

3- LiuskaB = 1v - 500μst.

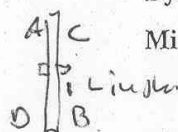
Tiedosto: JK-R12 Sta. TXT
dya. TXT

K= 2,02 Shuntti: 5000μst - 10v - 11,761kV

Perus: 28,27.

Dyn: 24,41.

Mittausmikro: 424-652



Kiinnitys = -0,102 →

Päivä	Aika	N	Tiedosto nimi	Huomioita
6.9	8.35	Ø	JK_R12Sta.TXT	staattim I 3090μst - 184kV luokitus: 0,067v →
				staattim II 3090μst - 185kV luokitus 0,007v →
	8.44	2	JK-R12dya.TXT	Dynaamisen aloitus
	8.50	11.90	JK-R12dya.TXT	korkeus
	12.12	36165	JK-R12dya.TXT	kapteen poikki, sora sivu C.