

**KYLMÄNAUHOJEN HITSAUSLIITOKSEN OLENNAISET
MUUTTUJAT JA NIIDEN HALLINTA HP2- JA
HP4-LINJOILLA**

HP2- ja HP4-linjojen liitoshitsauksen kehittäminen

Saksi Santeri

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

2019

Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Santeri Saksi	Vuosi	2019
Ohjaajat	TkL, IWE, IWI-C Timo Kauppi ja DI Raimo Ruoppa		
Toimeksiantaja	Outokumpu Stainless Oy		
Työn nimi	Kylmänauhojen hitsausliitoksen olennaiset muuttujat ja niiden hallinta HP2- ja HP4-linjoilla		
Sivu- ja liitesivumäärä	49 + 7		

Opinnäytetyö tehtiin Outokummun Tornion tehtaassa kylmävalssaamo 1:sen hehkutus- ja peittäuslinja 2:lle ja 4:lle. Työn tavoitteena oli tutkia hitsausparametrien vaikutusta vastushitsauksessa ja kehittää sen pohjalta käytössä olevien hitsausparametrien arvoja.

Työn aihe valittiin perustuen aiempaan työkokemukseen HP-linjoilla ja hitsausparametrien tutkimisen ja kehittämisen tarpeeseen. Hitsausprosessia ja parametreja kehittämällä saataisiin parannettua hehkutus- ja peittäuslinjojen saantia hitsausongelmista johtuvien uunin- ja haponseisausten vähentyessä.

Työssä perehdyttiin vastuskiekkohitsauksen teoriaan ja käytäntöön. Lisäksi työssä tutustuttiin erilaisiin hitsausliitoksen lujuutta määritteleviin testeihin. Opinnäytetyön pohjalta saatiin viitteitä hitsausparametrien kehittämissuunnasta sekä mahdollinen toimintaperiaate vastushitsauksen lisätutkimusta varten.

Avainsanat
parametrit

hehkutus- ja peittäuslinja, vastuskiekkohitsaus, hitsaus-

Technology, Communication and Transport
Mechanical and Production Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Santeri Saksi	Year	2019
Supervisor	Timo Kauppi, Lic. (Tech.), IWE, IWI-C and Raimo Ruoppa, M.Sc (Tech.)		
Commissioned by	Outokumpu Stainless Oy		
Subject of thesis	Essential variables for the welded joint of cold rolled coil at annealing and pickling line 2 and 4		
Number of pages	49 + 7		

The thesis was made for cold rolling plant 1 annealing and pickling line 2 and 4 of Outokumpu's Tornio mill. The aim of this work was to study the effect of welding parameters on resistance welding and to develop the values of the welding parameters at use.

Subject of the thesis was picked based on previous working experience at annealing and pickling lines and in the need for research and development of welding parameters. By developing the welding process and parameters, improved access to the annealing and pickling lines would occur as the furnace and acid stoppages due to welding problems decreased.

The thesis explored the theory and practice of the resistance disc welding. Also, various tests to determine the strength of the welding joint were introduced. Based on the thesis, there were indications of the direction of the development of the welding parameters and the possible operating principle for further investigation of resistance welding.

Key words annealing and pickling line, mash seam welding,
welding parameters

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
2	KYLMÄVALSSAAMO 1	10
2.1	Hehkutus- ja peittäuslinja 2.....	11
2.2	Hehkutus- ja peittäuslinja 4.....	13
3	LIITOSHITSI JA SEN OMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVAT MUUTTUJAT	15
3.1	Hitsausliitos.....	15
3.2	Vastushitsaus	15
3.3	Vastuskiekkohitsaus	19
3.4	Hitsausparametrit vastuskiekkohitsauksessa.....	22
4	RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET JA NIIDEN HITSAUS.....	23
4.1	Ruostumattomat teräokset.....	23
4.2	Austeniittiset ruostumattomat teräokset.....	23
4.3	Ferriittiset ruostumattomat teräokset	24
4.4	Austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräokset	25
4.5	Martensiittiset ruostumattomat teräokset	25
5	KIEKKOHITSAUSKONEIDEN TEKNISET TIEDOT JA PARAMETRIT	26
5.1	HP2-linjan hitsauskone	26
5.2	HP4-linjan hitsauskone	28
5.3	Hitsauskiekot HP-linjoilla.....	31
6	TEHDYT KOKEET JA KÄYTETYT KOEMENETELMÄT	32
6.1	Tilastollinen koesuunnittelu (DOE).....	32
6.2	Hitsauskokeet	33
6.3	Vetokokeet.....	35
6.4	Taivutuskokeet.....	35
6.5	Hitsiliitoksen testaaminen tappikoneella	36
7	TULOKSET.....	37
7.1	Vetokokeiden tulokset.....	37
7.2	Taivutuskokeiden tulokset.....	38
7.3	Hitsiliitoksen mikrorakenne	39
7.4	Tappitestin tulokset.....	41

8 TULOSTEN TARKASTELU	42
8.1 Hitsausliitoksen lujuuteen vaikuttavat tekijät	42
8.2 Kehitysideat	44
9 POHDINTA	46
LÄHTEET	47
LIITTEET	49

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Outokumpu Stainless Oy:n tehtaalle Tornioon. Työ suoritettiin kylmävalssaamo 1:llä käsittelylinjoilla sekä tehdasalueen laboratorio-tiloissa.

Haluan kiittää opinnäytetyöni ohjauksesta Timo Kauppia ja Raimo Ruoppaa, sekä Outokummun ohjaajaani Hannu-Pekka Heikkistä. Lisäksi haluan kiittää käsittelylinjojen ja laboratorion henkilöstöä hyvin sujuneesta yhteistyöstä.

Kemissä 15.5.2019

Santeri Saksi

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

KYVA	kylmävalssaamo
HP	hehkutus- ja peittäuslinja
DOE	Design of experiments

1 JOHDANTO

Hitsauksen onnistuminen jatkuvatoimisella hehkutus- ja peittäuslinjalla ensimmäisellä hitsauskerralla on ruostumattoman teräksen laadun kannalta erittäin tärkeää, sillä linjan prosessiosan ollessa jatkuvatoiminen on hitsauksessa käytettävä aika rajallinen. Hitsausongelmien ilmetessä linjan alkupäässä on linjan prosessiosan ajonopeutta hiljennettävä, jotta alkupäässä sijaitsevan varaajan tyhjentymistä voidaan hidastaa. Linjan prosessiosan hidastaminen vaikuttaa linjalla sijaitsevan hehkutusruunun lämpötilaan ja näin vaikuttaa tuotenauhan mekaanisiin ominaisuuksiin. Prosessiosan nopeuden hidastaminen voi aiheuttaa myös tuotenauhan ylipöytäntumistä. Laadun heikketessä tuotetta ei enää voida myydä 1-laatuna ja pahimmassa tapauksessa joudutaan heikkolaatuinen alue tuotenauhasta romuttamaan kokonaan.

Jatkuvatoimisessa hehkutus ja peittäusprosessissa kylmävalssatut tuotenauhat hitsataan yhteen kiekkolitistyshitsauksella (engl. Mash Seam Welding), joka on vastushitsauksen eräs sovellusalue. Kerralla onnistuneen hitsiliitoksen aikaansaaminen on tärkeää tuotantokapasiteetin ja tuoteominaisuuksien kannalta.

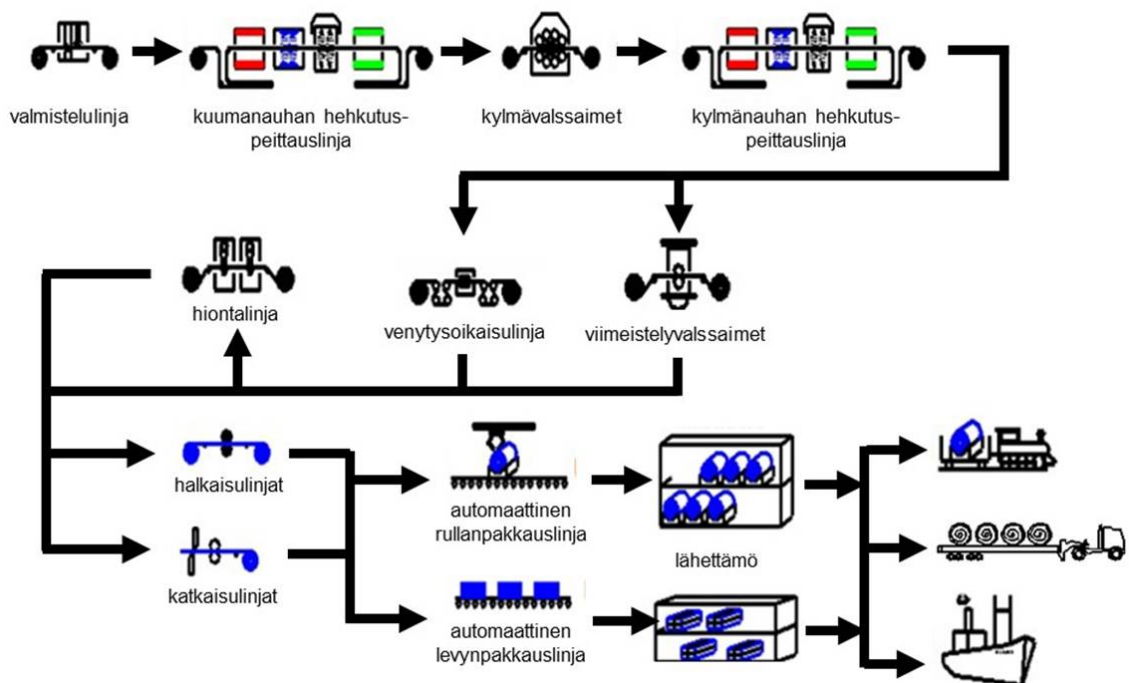
Opinnäytetyön aihe perustuu hehkutus- ja peittäuslinjojen 2 ja 4 alkupäässä tapahtuvan hitsaustapahtuman kehittämiseen. Kehittämällä hitsaustapahtumaa saadaan linjan prosessiosan hidastamisia vähennettyä. Hitsauksen onnistumista vaikeuttavat muun muassa linjoilla erilaiset ajettavat teräslajit ja paksuudet, joilla on erilaisia mekaanisia ominaisuuksia. HP-linjoilla joudutaan ajamaan myös niin kutsuttuja apunauhoja esimerkiksi, kun linjalle tehtävät huoltotyöt tai happoaltaiden lämpötilojen muutokset vaativat linjan pysäyttämistä. Nämä useasti hehkutetut nauhat ovat usein likaisia ja huomattavasti pehmeämpiä kuin tuotenauhat, mikä vaikeuttaa hitsauksen onnistumista entisestään.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, mitkä ovat liitoshitsin ominaisuuksiin vaikuttavat olennaiset muuttujat. Näistä tavoitteena on kartoittaa ne, joilla on eniten vaikutusta hitsiliitoksen mekaanisiin ominaisuuksiin. Työhön sisältyy myös selvitys HP2- ja HP4-linjojen hitsausteknisistä ominaisuuksista ja käytössä olevien hitsausparametrien kartoitus. Myös hitsauskoneiden parametrien monitoroinnin

nykytila ja sen mahdollisuudet selvitetään. Opinnäytetyöhön sisältyy myös kirjallisuusselvitys hitsausparametrien vaikutuksesta hitsiliitoksen lujuuteen.

2 KYLMÄVALSSAAMO 1

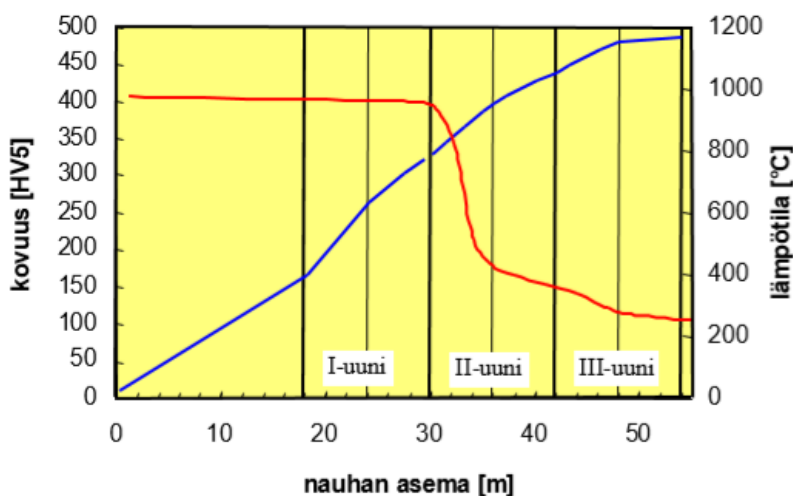
Kylmävalssaamo 1 sijaitsee Outokummun Tornion tehdasalueella Röytässä. Kylmävalssaamon prosessi kattaa kuumanauhan käsittelyt aina valmiiksi tuotteeksi asti (Kuva 1). KYVA 1:n prosessi alkaa, kun kuumavalssaamolta aihioista valsatut kuumanauhat hehkutetaan ja peitataan HP3- ja HP1-linjoilla. Pääasiassa kuumanauhat ohjataan HP3-linjalle, sillä linjan kuulapuhallus on tehokkaampi ja näin käytettävät ajonopeudet voidaan pitää suurempina. Kuitenkin myös HP1-linjalla on valmiudet ajaa kuumanauhaa ja ferriittiset kuumanauhat ajetaankin HP1-linjalla. Prosessin vaikutuksesta nauhan väri muuttuu hilsekerroksen poistumisen ansiosta kirkkaan harmaan väriseksi. Yli 6 mm paksuihin nauhoihin hitsataan valmistelinjalla 6 mm paksut jatkopäät, sillä tätä paksummat nauhanpäät eivät mahdu Senzimir-valssaimilla kelaimella sijaitsevaan rakoon. Myös tätä ohuempiin nauhoihin on mahdollista hitsata jatkopäät, jotta mahdollisimman suuri osa tuotenauhasta saadaan valssattua ja materiaalihävikkiä saadaan pienennettyä. Valmistelinjalla voidaan myös tehdä erilaisia korjauskäsittelyjä teräsnauhoille. (Outokumpu 2019.)



Kuva 1. Kylmävalssaamon tuotantokaavio (Outokumpu 2019)

Teräsnauhat nostetaan alkupään rullarampille käyttäen siltanosturia, jonka jälkeen teräsnauhat kuljetetaan kääntöristille käyttäen siirtovaunua. Kun teräsnauha saadaan kääntöristille, romutetaan nauhan keulasta ensin valssaamaton osa pois käyttäen romutuspuolen leikkuria, kunnes tuotenauhan paksuus vastaa oikeaa paksuutta. Tämän jälkeen teräsnauha otetaan linjaan kääntöristin avulla ja hitsataan edellä olevan nauhan häntään kiinni käyttäen vastuskiekkohitsauskonetta. Samalla edellä olevan nauhan häntä kääntyy romutuspuolelle, jossa häntäosan valssaamaton alue romutetaan. Tämän aikana alkupään nauhavaaraaja alkaa tyhjäntyä linjan prosessiosan ollessa ajolla, jolloin hitsaukseen käytettävä aika on rajallinen. Hitsausprosessin jälkeen linjan alkupää laitetaan ajolle, jolloin alkupään varaaja alkaa vastaavasti täyttyä. Hitsauksen jälkeen nauha kulkee rasvanpoiston läpi, jossa kylmävalssauksessa käytetty valssausöljy poistetaan nauhan pinnalta käyttäen kuumaa vettä, alkalista pesuainetta sekä harjarullia. (Outokumpu 2019.)

Jotta kylmämuokkauksessa teräksen muuttuneet mekaaniset ominaisuudet saadaan palautettua, tulee teräsnauha hehkuttaa oikeassa lämpötilassa (Kuva 3). Käytettävä lämpötila riippuu teräksen laadusta sekä halutusta raekoosta. Ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä seurataan raekoon sijasta teräksen remanenssia eli aineen jäännösmagnetismia. Hehkutuksen jälkeen nauha jäähdytetään nopeasti käyttäen ilmajäähdytystä sekä tarvittaessa vesisuihkua. (Outokumpu 2019.)

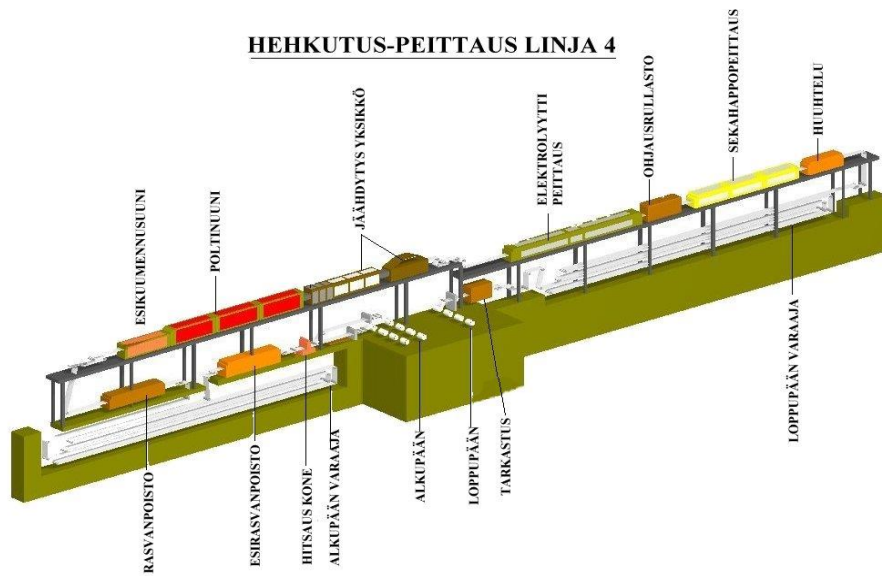


Kuva 3. Nauhan kovuus, asema ja lämpötila hehkutusuunissa (Outokumpu 2019)

Hehkutuksen aikana nauhaan syntyvä oksidikerros sekä kromiköyhä vyöhyke poistetaan peittauksen avulla. Peittausprosessi koostuu elektrolyyttipeittauksesta, välihuuhtelusta, sekahappopeittauksesta ja loppuhuuhtelusta. Elektrolyyttipeittauksen sähkökemiallisen prosessin avulla nauhan pinnasta saadaan poistettua hehkutuksen aikana liian paksuksi kasvanut kromioksidi ensimmäinen hilsekerros. Peittauksien välissä nauha huuhdellaan vedellä ja harjataan harjarullilla välihuuhtelussa. Sekahappopeittauksen avulla nauhasta poistetaan oksidikerroksen jäänteet sekä kromiköyhä vyöhyke. Samalla teräksen pinta passivoituu. Sekahappopeittauksessa syntyvät kaasut pestään kaasunpesurilla, jota käyttää myös HP1-linja. Peittauksen jälkeen nauha kulkee loppuhuuhtelun läpi, jonka toimintaperiaate on samanlainen välihuuhtelun kanssa. Loppuhuuhtelun jälkeen teräsnauha kulkee loppupään varaajan kautta pinnantarkastuspisteelle, jonka jälkeen teräsnauha kelataan päällekelaimelle. HP2-linjalla on vuorossa viisi operaattoria, joiden työtehtävät vaihtelevat vuoron aikana alkupään sekä loppupään työtehtävien välillä. (Outokumpu 2019.)

2.2 Hehkutus- ja peittauslinja 4

Hehkutus- ja peittauslinja 4 on otettu käyttöön vuonna 1997 ja sen tuotantokapasiteetti on 200 000 tonnia vuodessa. HP4-linjan prosessiossa sijaitsee kahdessa kerroksessa ja teräsnauha kulkee valvomon molemmilla puolilla, jolloin linjan aukikelain sekä päällekelain sijaitsevat lähellä toisiaan (Kuva 4). HP4-linjalla rullat otetaan rullarampeille automaattivarastosta automaattisen nosturin avulla. Linjalla on kaksi rullaramppia, joiden kautta teräsnauhat otetaan linjaan vuorotellen. (Outokumpu 2019.)



Kuva 4. HP4-linjan periaatekuva (Outokumpu 2019)

HP4-linjalla ajetaan austeniittisiä kylmänauhoja, joiden paksuus vaihtelee välillä 0,3 - 2,0 mm. Kuten myös HP2-linjalla, käytetään myös HP4-linjalla vastuskiekkokohitsauskoneita nauhanpäiden liittämiseen toisiinsa. HP4-linjan valvomon sijainti mahdollistaa HP4-linjan pitämisen ajolla vuoron aikana neljällä operaattorilla viiden sijaan. (Outokumpu 2019.)

3 LIITOSHITSI JA SEN OMINAISUUKSIIN VAIKUTTAVAT MUUTTUJAT

3.1 Hitsausliitos

Hitsausliitoksella tarkoitetaan pysyvää kahden tai useamman kappaleen kiinteää liitääntä, jossa liitos on aikaansaatu sulattamalla kappaleet toisiinsa korkean lämmön, paineen tai näiden yhdistelmän avulla. Kappaleiden jäähtyessä takaisin kiinteään muotoon syntyy kappaleiden välille kiinteä liitos. (Lepola & Ylikangas 2016, 13.)

Hitsausprosessit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: sulahitsaukseen ja puristushitsaukseen. Sulahitsauksessa hitsisula saadaan aikaan kuumentamalla liitospinnat sulaan lämpötilaan, jolloin kappaleet saadaan liitettyä toisiinsa ilman suurta puristusvoimaa. Puristushitsauksessa pintojen liitäntä suoritetaan kuumentamalla liitoskohtien pintoja ja puristamalla niitä tarvittavalla voimalla yhteen, jolloin puristusvoima yhdessä kuumennuksen kanssa saavat aikaan liitoksen. (Lepola & Ylikangas 2016, 14.)

3.2 Vastushitsaus

Vastushitsaus on puristushitsausmenetelmä, jossa hitsattavien kappaleiden sulaminen saadaan aikaan puristamalla työkappaleita yhteen elektrodeilla ja välittämällä hitsausvirta kappaleiden läpi. Tällöin hitsattavien kappaleiden vastuksien vaikutuksesta syntyy kappaleiden välille hitsisula. Puristusta jatketaan, kunnes hitsisula jäähtyy kiinteäksi ja kappaleiden välille syntyy pysyvä hitsiliitos. Tätä hitsausmenetelmää käytetään yleisimmin ohutlevyjen liittämismenetelmänä, sillä se on nopea ja tehokas hitsausmenetelmä. Vastushitsaus on myös helposti automatisoitavissa, jolloin se sopii hyvin käytettäväksi osana jatkuvatoimista tuotantoprosessia. (Talonen 1999, 67.)

Koska lämpöenergiaa syntyy aina, kun sähkövirtaa johdetaan sähkövastuksen läpi, voidaan lämpöenergian syntyä laskea kaavalla 1.

$$W = I^2 R \quad (1)$$

missä

W on teho [W]

I on virta [A]

R on työkappaleen kokonaisvastus [Ω] (RWMA 1997, 4-1).

Jokaisella teräksellä on oma ominaisvastuksensa, joka vaihtelee teräksen mekaanisten ominaisuuksien ja lämpötilan perusteella. Lisäksi hitsaustapahtumassa syntyy vastusta hitsattavien pintojen välille. Hitsattavien pintojen vastukseen vaikuttavat kosketuksissa olevien kappaleiden pinnanlaatu, muoto sekä käytettävä puristusvoima. Myös eri metallit omaavat keskenään erilaisia kontaktivastuksia pintojen välisessä kontaktissa. Tämän johdosta materiaalien keskinäinen kontaktivastus voi vaihdella hyvinkin suuresti ja parhaimpaan lopputulokseen päästäänkin hyvällä laitesuunnittelulla ja pintojen puhtaanapidolla. (RWMA 1997, 4-1.)

Vastushitsauksessa suurin lämpöarvo ja resistanssi tarvitaan ylemmän ja alemman teräsnauhan välille (kohta 4). Suurin lämpöarvo saavutetaan, kun vastus on suurimmillaan näiden työkappaleiden välissä. Työkappaleita tulee kuitenkin puristaa yhteen riittävän suuruisella voimalla, jotta sähkövirta saadaan kulkemaan työkappaleiden läpi. (Talonen 1999, 68.) Seuraavaksi eniten vastusta syntyy nauhojen ja elektrodien kontaktipinnoille (kohdat 2 & 5). Näille kontaktipinnoille lämmön ja vastuksen syntyminen ei ole hitsauksen onnistumisen kannalta suotavaa, ja tätä vastusta voidaankin vähentää pitämällä hitsattavien työkappaleiden pinnat sekä elektrodien kontaktipinnat puhtaina ja tasaisina. Jotta hitsauslämpö ja suurin resistanssi saataisiin pysymään keskellä työkappaleita (kohta 4), tulee tilanteen olla mahdollisimman symmetrinen. Esimerkiksi hitsattaessa mekaanisilta ominaisuuksiltaan erilaisia materiaaleja yhteen, pyrkii lämpö siirtymään isomman resistanssin omaavaan puolelle. Tällöin hitsisula ei synny keskelle liitosta, ja näin hitsiliitoksen kestävyys heikkenee ja mahdollista sulamista työkappaleiden välille ei välttämättä synny. Sama ilmiö tapahtuu myös, hitsattaessa eri paksuisia materiaaleja. Alla esitettyinä pystysuunnassa vastushitsaustapahtuman kontaktipinnat, jonka läpi sähkövirta kulkee sarjassa:

1. Ylempi elektrodi

2. Ylemmän elektrodin ja ylemmän teräsnauhan kosketuspinta
3. Ylempi teräsnauha
4. Ylemmän ja alemman teräsnauhan kosketuspinta
5. Alempi teräsnauha
6. Alemman teräsnauhan ja alemman elektrodin kosketuspinta
7. Alempi elektrodi

(RWMA 1997, 1-5, 1-6.)

Tärkeimpiä hitsausparametreja vastushitsauksessa ovat hitsausvirta ja hitsaukseen käytettävä aika, elektrodien puristusvoima, elektrodin kontaktipinnan muoto ja elektrodeissa käytettävä materiaali. Myös esi- ja jälkipuristusajalla voidaan vaikuttaa syntyneen hitsausliitoksen ominaisuuksiin. (Talonen 1999, 68.)

Hitsaustapahtumassa syntyvää lämmöntuontia voidaan kontrolloida hitsausaikaa muuttamalla (Kaava 2). Hitsausajan pituudella on merkittävä vaikutus syntyvän lämmön suuruuteen, hitsin tunkeumaan ja näin myös hitsiliitoksen lujuuteen. Vastushitsauksessa nopea lämmöntuonti hitsaukseen on tärkeää, jotta lämmön johtumista hitsausliitoksen ulkopuolelle tapahtuisi mahdollisimman vähän (RWMA 1997, 1-3). Tämän vuoksi vastushitsauksessa hitsataan usein korkealla virralla ja lyhyellä hitsausajalla. Liian pitkä hitsausaika lyhentää elektrodien käyttöikää sekä aiheuttaa painauma hitsattavaan kappaleeseen. (Talonen 1999, 69.)

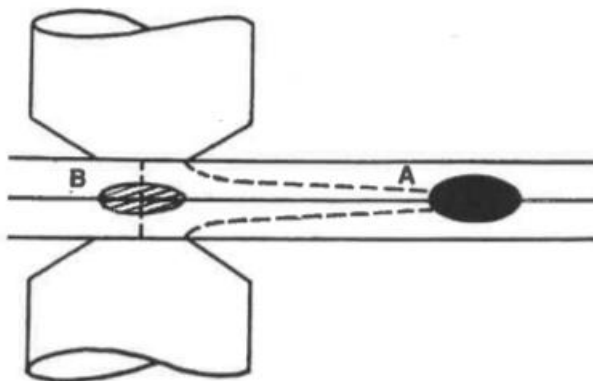
Jotta sähkövirta saadaan kulkemaan hitsattavien kappaleiden läpi, tulee elektrodien puristusvoiman olla riittävän suuri. Puristusvoiman lisääminen kuitenkin pienentää kontaktivastusta hitsauspisteessä, jolloin lisäenergian tarve hitsisulan aikaansaamiseksi kasvaa. Tällöin hitsausnopeutta on pienettävä tai hitsausvirtaa lisättävä. Liian pienellä puristusvoimalla voidaan huomata hitsauspisteen kippinointia ja samalla elektrodit kuluvat myös nopeasti. Toisaalta liian suurella hitsauspaineella elektrodit voivat jopa puristua kasaan ja samalla aiheuttaa tarpeetonta painauma työkappaleen pinnalle. (Talonen 1999, 69.)

Kuten aiemmin tekstissä mainittiin, kulkee osa sähkövirta sarjassa yksittäisen hitsipisteen läpi. Mikäli toinen hitsipiste sijoitetaan lähelle edellistä hitsipistettä, kulkee osa sähkövirrasta sarjassa viereisen hitsipisteen läpi (Kuva 5). Tätä ilmiötä kutsutaan hajavirraksi. Koska sarjaan kytketyt erilliset vastukset pienentävät kokonaisvastusta virtapiirissä, voidaan tästä päätellä, että kokonaisvastus pienenee myös hitsaustapahtumassa (Kaava 2). Vastuksen pienetessä myös hitsauksen lämpötila vähenee, ja tämä voidaan huomata pistehitsien koon pienenemisenä, mikäli hitsausvirtaa ei kasvateta. Hajavirtojen osuus käytettävästä hitsausvirrasta voi olla jopa 10 %. Hajavirrat voivat johtua toiseen kappaleeseen myös esimerkiksi leikkurista syntyneen jäysteen kautta. Hajavirran suuruuteen vaikuttavat työkappaleen paksuus, sähkönjohtavuus ja kontaktivastus. Näitä suureita kasvattaessa myös hajavirtojen osuus kokonaisvirrasta kasvaa. (Talonen 1999, 75.) Vastuskiekkohitsauksessa ilmiötä voidaan kompensoida kasvattamalla virtaa hitsauksen loppua kohden, jolloin hitsin lämpötila ja tunkeuma saadaan pysymään tasaisena (RWMA 1997, 1-6).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (2)$$

missä

R	on	kokonaisvastus [Ω]
R_1	on	vastus pisteessä 1 [Ω]
R_2	on	vastus pisteessä 2 [Ω]
R_n	on	vastus pisteessä n [Ω].

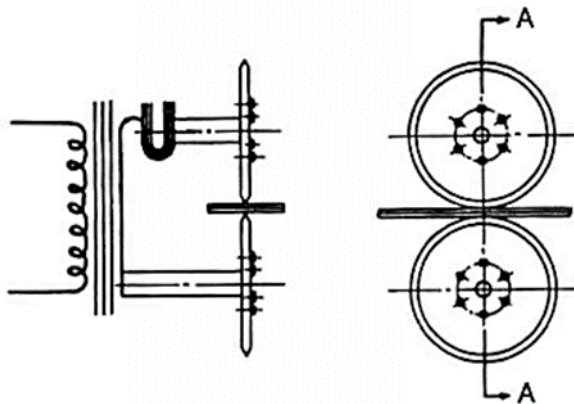


Kuva 5. Sähkövirran kulkureitti rinnan kahden hitsipisteen B ja A välillä (RWMA 1997, 1-7)

Vastushitsauksessa elektrodien materiaalin tulee olla hyvin sähköä ja lämpöä johtavaa, eikä elektrodien materiaali saa olla ominaisuuksiltaan samanlainen hitsattavan kappaleen kanssa. Materiaalin tulee myös riittävän kuumalujaa, jotta se kestää hitsauksen aikana syntyvän puristuspuheen sekä korkean lämpötilan. Yleisin käytettävä materiaali onkin seostettu kupari, jossa seosaineena on käytetty kromia (Cr) ja zirkonia (Zr). Myös elektrodien muodolla voidaan vaikuttaa hitsattavan sauman laatuun. (Talonen 1999, 70-78.)

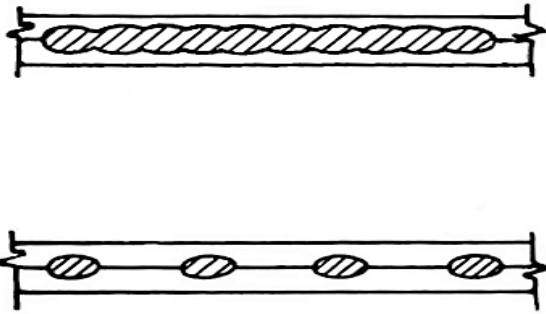
3.3 Vastuskiekkohitsaus

Vastuskiekkohitsaus on vastushitsausmenetelmä, jossa hitsausvirta johdetaan hitsattaviin kappaleisiin pyörivän kiekkomaisen elektrodin kautta (Kuva 6). Tavalliseen pistehitsaukseen verrattuna kiekkohitsauksessa käytettävät hitsausvirrat ja niiden vaikutusajat ovat suurempia, kuin vastaavilla työkappaleen paksuusarvoilla pistehitsauksessa. Kiekkohitsauksesta voidaan käyttää myös nimitystä rullasaumahitsaus. Kiekkohitsaukseen voidaan tarvittaessa tuoda myös lisäainetta, käyttäen hyödyksi kiekkolankahitsausta. (Talonen 1999, 70.) Tällä hitsausmenetelmällä on mahdollista tuottaa yhtäjaksoista hitsiliitosta sekä yksittäisiä peräkkäisiä pistehitsejä (Kuva 7). Yhtenäinen hitsausliitos koostuu limittäin sijoittuneista pistehitseistä ja tämä saadaan aikaan, kun elektrodeina toimivat hitsauskiekot ajetaan hitsattavien kappaleiden poikki pulssittaen hitsausvirtaa ja puristaen kappaletta tasaisesti yhteen koko hitsauksen ajan (Kuva 8).



Kuva 6. Poikkileikkauskuva kahdella hitsauskiekolla varustetusta kiekkohitsauskoneesta (RWMA 1997, 4-2)

Näin syntyvä hitsiliitos on jo ilman jälkikäsitteilyä kaasun- ja nesteenpitävä. Liikkuvan hitsaustapahtuman johdosta syntyvät hitsipisteet ovat ovaalin muotoisia. Mikäli elektrodit ehtivät jäähtyä hitsauksen aikana esimerkiksi katkomalla hitsausvirtaa, syntyy työkappaleisiin peräkkäisiä pistehitsejä. Mikäli hitsiliitoksen laatu niin vaatii, on kiekkohitsaus mahdollista toteuttaa myös jatkuvalla hitsausvirralla, tällöin kuitenkin on hitsausnopeutta nostettava, jotta elektrodit eivät kuumene liikaa. (RWMA 1997, 4-1.)



Kuva 7. Jatkuva ja pätkittäinen hitsiliitos (RWMA 1997, 4-2)

Elektrodin pinta, joka on kosketuksissa työkappaleeseen, voi olla muodoltaan kupera tai tasainen. Tällä voidaan vaikuttaa puristusvoiman keskittämiseen, sekä virrantiheyteen hitsaustapahtumassa. Elektrodien kontaktipintaa voidaan myös tarvittaessa kaventaa tekemällä hitsauskiekon pintaan viisteitä. (Talonen 1999, 70-78.) Kiekkomaisien elektrodien pyöriminen voidaan toteuttaa erillisillä sähkömoottoreilla sekä myös antamalla hitsauskiekon pyöriä puristusvoiman synnyttävän kitkan avulla hitsaustapahtuman aikana (RWMA 1997, 4-1).

Elektrodin otsapinnan leveys d voidaan laskea kaavalla 3.

$$d = 5\sqrt{t} \quad (3)$$

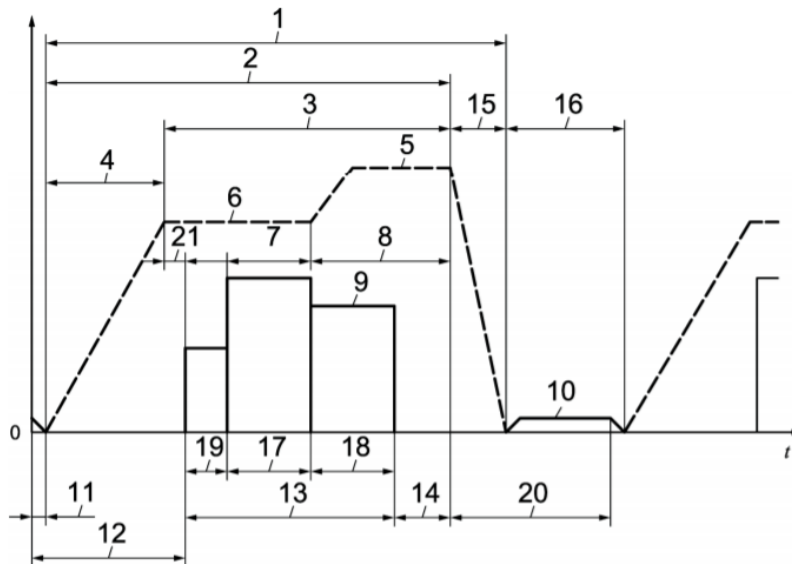
missä

d on elektrodin otsapinnan leveys [mm]

t on hitsattavan ohutlevyn paksuus [mm].

Myös kapeamman elektrodin käyttö on mahdollista, jolloin $d = 2\sqrt{t}$ tai $d = 3\sqrt{t}$ tällöin energiantarve on vähäisempää ja hitsaus nopeampaa. Tämä johtaa kuitenkin kapeamman hitsiliitoksen syntyyn (Houldcroft 1977, 161). Mikäli hitsataan eripaksuisia kappaleita, tulisi ohuemmalle kappaleelle valita kapeampi elektrodi.

Kiekkohitsausta voidaan käyttää tyypillisesti kolmen millimetrin paksuuteen asti ohutlevyjen liittämiseksi. Tämän jälkeen hitsisulan aikaansaaminen vaikeutuu huomattavasti. (Talonen 1999, 70.)



Kuva 8. Kiekkohitsaustapahtuma kuvattuna elektrodien puristusvoiman ja ajan avulla (SFS-EN ISO 15609-5 2011, 22)

Kiekkohitsauksessa lämmöntuontia voidaan kontrolloida pulssittamalla syötettyä hitsausvirtaa. Nauhapaksuuden kasvaessa hitsausnopeutta on pienennettävä ja hitsausvirtaa lisättävä, jotta työkappaleisiin saadaan aikaiseksi hitsisula. Hitsattavien ohutlevyjen yhteispaksuuden ylittäessä 3,5 mm paksuuden on vastuskiekkohitsaus muita vastushitsausmenetelmiä vaikeampaa. Ohutlevyjä liitettäessä kiekkohitsausmenetelmällä on elektrodien hyvä jäähdytys tärkeää, sillä yhtenäistä saumaa hitsattaessa elektrodit kuumenevat nopeasti. (Talonen 1999, 70-71.) Kiekkomaisia elektrodeja ei usein voida jäähdyttää sisäisesti, mutta niiden ulkoinen jäähdyttäminen on mahdollista ilmajäähdytyksellä, suihkuttamalla tai upottamalla elektrodit jäähdytysveteen (Houldcroft 1977, 70).

Hyvän liitoksen aikaansaamiseksi tulisi hitsattavien ohutlevyjen pintojen ja hitsauskiekkojen kontaktipintojen olla puhtaita, sillä lian kertyminen elektrodin kontaktipintaan kasvattaa kontaktivastusta, jolloin käytettävä kiekko kuumenee ja liikaantuu entisestään. Tämä voi johtaa myös hitsiliitoksen liialliseen sulamiseen ja

reikiintymiseen hitsausmateriaalin tarttuessa hitsauskiekon kontaktipintaan. Pinnan vähäinen öljyisyys ei usein haittaa hitsaustapahtumaa, sillä öljy ehtii palaa lämpötilan vaikutuksesta nauhan pinnalta. Toisaalta hitsauspinnalla oleva öljy kerää helposti likaa, joka öljyn haihtuessa jää kontaktipinnalle ja voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa sulkeumia hitsattavaan saumaan. (Talonen 1999, 70-71, 74.)

3.4 Hitsausparametrit vastuskiekkohitsauksessa

Vastuskiekkohitsauksen periaate perustuu kaavaan 4.

$$Q = I^2 R t - C \quad (4)$$

missä

Q	on	Lämpö [C]
I	on	hitsausvirta [A]
R	on	hitsattavan materiaalin vastus [Ω]
t	on	hitsausaika [s]
C	on	materiaalinlämpöhäviövakio (Guild international).

Virran pienilläkin muutoksilla voidaan vaikuttaa hitsauksessa syntyvään lämpötilaan, virran kasvaessa hitsauslämpötila kasvaa. Vastuksen kasvaessa myös hitsauslämpötila kasvaa. Nauhan etu- ja takapään limitystä kasvatettaessa hitsausvastus kasvaa, mutta kuitenkin hitsausvoimaa lisättäessä vastus pienenee. Paksummalla ja kovemalla materiaalilla on suurempi alkuvastus verrattuna ohueen ja pehmeämpään materiaaliin. Hitsauskiekkoon tarttuneet partikkelit nostavat kontaktivastusta, jolloin hitsaustapahtumassa voi ilmetä läpipalamista, sekä kiekkojen kulumista. Hitsausaikaa muutetaan eri hitsausnopeuden arvoilla. Hitsausnopeutta vähentämällä saadaan hitsauslämpötila kasvamaan lämmöntuonnin kasvamisen vuoksi. (Outokumpu 2019.)

4 RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET JA NIIDEN HITSAUS

Materiaalin hitsattavuutta voidaan yleensä pitää hyvänä, kun siihen on mahdollista saada aikaan vaatimukset täyttävä hitsiliitos. Vastushitsauksessa hyvin hitsautuvan materiaalin hitsaukseen voidaan usein käyttää laajasti erilaisia hitsausparametreja. Korkean ominaisvastuksen omaavat metallit hitsautuvat matalamman ominaisvastuksen omaavia metalleja paremmin ja hitsatessa matalan ominaisvastuksen omaavia metalleja täytyy hitsausvirtaa nostaa. Myös hyvän lämmönjohtokyvyn omaavia metalleja on vaikea hitsata, sillä hitsauslämpö johtuu pois hitsauspisteestä. Muokkauslujitetuissa teräksissä hitsiliitoksen alue pehmenee ja pehmeissä materiaaleissa karkenee. (Talonen 1999, 71.)

4.1 Ruostumattomat teräokset

Ruostumattoman teräksen nimitys tulee teräksen kyvystä ehkäistä ympäröivän kostean ilman, veden sekä happo- ja emäsluosten syövyttävää vaikutusta. Teräksen eri ominaisuuksiin, kuten tulenkestävyyteen, ruostumattomuuteen ja syöpymättömyyteen päästään käyttämällä erilaisia seosaineita. Ruostumattoman teräksen pääseosaineena on kromi (Cr), jota ruostumattomassa teräksessä on vähintään 10,5 % ja hiiltä (C) enintään 1,2 % (EN 10020:2000, 77-78). Kromin lisääminen perustuu sen luomaan suojaavaan oksidikalvoon, kun teräs on hapen kanssa kosketuksissa. Tätä reaktiota hapen kanssa kutsutaan passivoitumiseksi. (Lepola & Ylikangas 2016, 213.) Teräksen syöpymiskestävyyttä voidaan myös lisätä käyttämällä seosaineina molybdeeniä (Mo). Nikkeli (Ni) lisää teräksen lujuutta korkeissa lämpötiloissa kromin (Cr) ohella, jolloin teräksen viruminen hidastuu. (Kyröläinen 2016, 172.) Ruostumattomat teräokset jaetaan standardin SFS-EN 10088-1 mukaan neljään eri pääryhmään mikrorankenteen perusteella: austeniittisiin, ferriittisiin, austeniittis-ferriittisiin ja martensiittisiin teräksiin (EN 10088-1 2014, 77-78).

4.2 Austeniittiset ruostumattomat teräokset

Suurin osa ruostumattomien teräksien laaduista kuuluu austeniittisiin ruostumattomiin teräksiin. Austeniittisissä ruostumattomissa teräksissä on käytetty tyypilli-

sesti seosaineina kromia (Cr) 16-20 %, nikkeliä (Ni) 8-12 %, ja usein myös molybdeeniä (Mo) 1-4 % tuomaan teräkseen myös pistekorrosiokestävyyttä. Austeniittiset teräkset eivät ole magneettisia ja ne voidaan jakaa kolmeen pääryhmään mekaanisten ominaisuuksien ja käyttötarkoituksen perusteella: ruostumattomiin teräksiin, haponkestäviin teräksiin ja tulenkestäviin teräksiin. (Lepola & Ylikangas 2016, 213.)

Haponkestäviä teräksiä, kuten esimerkiksi X2CrNiMo 17-12-3 (Cr 17 % Ni 12 % Mo 3 %), voidaan käyttää muun muassa laajalti kemian- ja selluteollisuudessa putkistoissa ja säiliössä. Austeniittiset tulenkestävät teräkset, esimerkiksi X1CrNi 25-21 (Cr 25 % Ni 21 %), kestävät suurissa lämpötiloissa hapettavien kaasujen vaikutusta. Mikäli teräs säilyttää lujuutensa näissä korkeissa lämpötiloissa, kutsutaan niitä kuumalujiksi teräksiksi. Kuumalujuus saavutetaan lisäämällä teräkseen seosaineiksi piitä (Si) ja Alumiinia (Al). (Lepola & Ylikangas 2016, 214.)

Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat hitsattavuudeltaan hyviä. Kuitenkin seostuksen kasvaessa austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä esiintyy jonkin verran kuumahalkeilua, mikäli hitsin jäähmettyminen on puhtaasti austeniittinen. Lisäksi Cr-Mn-Ni -teräksillä voi esiintyä haurausilmiötä korkeissa lämpötiloissa, jolloin hitsausprosessin lämmöntuontiin on kiinnitettävä erityistä huomiota (Kyröläinen 2016, 196). Kuumahalkeilun ehkäisemiseksi olisi hyvä rajoittaa rikki- ja fosforipitoisuudet mataliksi (alle 0,04 %). Myös lisäämällä seosaineeksi mangania (Mn) 2 %, voidaan taipumusta kuumahalkeiluun vähentää. (Taulavuori, Kyröläinen & Manninen 2012, 32-33.) Lämpölaajenemiskertoimen ollessa $17,5 \cdot 10^{-6}/K$ tapahtuu teräksessä vetelyä hitsauslämmön vaikutuksen johdosta sen laajetessa ja kutistuessa (Taulavuori, Kyröläinen & Manninen 2012, 11, 33).

4.3 Ferriittiset ruostumattomat teräkset

Kuten myös austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä, on ferriittisten ruostumattomien terästen pääseosaineena kromi (Cr) 10,5 - 20 % (Kyröläinen 2016, 174). Muita käytettäviä seosaineita ovat molybdeeni (Mo), pii (Si), niobi (Nb) ja titaani (Ti). Käyttökohteita ovat esimerkiksi autojen pakoputkijärjestelmien äänenvaimentimet sekä katalysaattorit. Kuumalujilla ferriittisillä teräksillä kromipitoisuus on 17 - 30 %. (Lepola & Ylikangas 2016, 214.)

Ferriittisen ruostumattoman teräksen hitsauksen aikana teräksen raekoko kasvaa reilusti, mikä voi ilmetä hitsiliitoksen ja sen ympäristön haurastumisena (Taulavuori, Kyröläinen & Manninen 2012, 11, 33). Tämän johdosta hitsauslämpötila tulisi pitää suhteellisen matalana (Outokumpu 2010, 19).

4.4 Austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräkset

Austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräkset sisältävät kahta faasia: austeniittia ja ferriittia. Tällainen mikrorakenne saavutetaan käyttämällä pienempiä määriä nikkeliä suhteessa austeniittiseen teräkseen. Nämä teräkset voivat olla myötölujuudeltaan jopa $R_{p0,2}$ 560Mpa (Outokumpu 2010, 16), ja niiden kovuus on austeniittista terästä suurempi. Parempi korroosionkestävyys saavutetaan lisäämällä seosaineeksi kromia (Cr) ja typpeä (N) (Kyröläinen 2016, 172). Austeniittis-ferriittiset teräkset kestävät hyvin jännitys- ja pistekorroosiota (Lepola & Ylikangas 2016, 214).

Austeniittis-ferriittisiä teräksiä käytetään muun muassa öljy- ja kaasuteollisuudessa säiliöiden rakennusmateriaalina. Hitsattavuudeltaan austeniittis-ferriittiset teräkset ovat hyviä niiden pienen lämpölaajenemiskertoimen vuoksi. (Lepola & Ylikangas 2016, 214.) Näillä teräksillä voi esiintyä sigmahaurautta kromin ja molybdeenin faasien erkautuessa 900°C lämpötilassa (Taulavuori, Kyröläinen & Manninen 2012, 35).

4.5 Martensiittiset ruostumattomat teräkset

Martensiittisissa ruostumattomissa teräksissä on pääseosaineena kromia tyypillisesti 12 - 17 %. Ne sisältävät myös muita ruostumattomia teräksiä enemmän hiiltä (0,1 - 1 %). Näin ne omaavat muita teräksiä suuremmat lujuus- ja kovuusarvot. Tavallisimpia käyttökohteita ovat suurta kovuutta ja kulutuksen kestävyyttä vaativat käyttökohteet, kuten veitset ja turbiinien siivet. Martensiittisellä ruostumattomalla teräksellä on suuri karkenemistaipumus, jolloin ne eivät juuri sovellu hitsattaviksi. (Lepola & Ylikangas 2016, 214.) Mikäli hitsausliitos tarvitaan, tulee esilämmitys suorittaa 200 - 300°C lämpötilassa martensiittisillä ruostumattomilla teräksillä, joissa on yli 0,1 % hiiltä (C). Myös korkeampien lämpötilojen käyttö voi olla tarpeellista, jos hitsataan paksuja materiaaleja. (EN 1011-3:2018, 22.)

5 KIEKKOHITSAUSKONEIDEN TEKNISET TIEDOT JA PARAMETRIT

5.1 HP2-linjan hitsauskone

HP2-linjalla käytettävä hitsauskone on Guild Internationalin vuosina 2007 - 2008 valmistama vastuskiekkohitsauskone Guild QMM 125-64 (Kuva 9). Hitsauskone on suunniteltu kylmävalssattujen ohutlevyjen hitsaamiseen (Taulukko 1).

Taulukko 1. Guild International -hitsauskoneen tekniset tiedot (Outokumpu 2019)

Valmistaja	Guild International	
Käyttöalue	Hitsattavat materiaalit	AISI 200, 300 & 400 kylmävalssattu ruostumaton teräs
	Nauhan leveys	Max. 1630 mm
		Min. 930 mm
	Nauhapaksuus	0,4 - 3mm
	Nauhan kulkusuunta	oikealta vasemmalle
	Nauhan kulkukorkeus	1100 mm
Maksimi vetolujuus	1800 N/mm ²	
Hitsaaminen	Hitsausmenetelmä	rullasaumahitsaus
	Hitsausvoima	2,0 - 50 kN
	Hitsausnopeus	0 - 7,50 m/min
	Hitsauskiekon materiaali	
	Nauhojen limitys	0 - 5 mm
	Hitsausvirta	100 - 25000 A
Silitys	Silitysvoima	0 - 50 kN
Sähköistys	Verkkoonkytkentä	400 V, 50 Hz

Hitsauskoneen prosessi alkaa, kun nauha katkaistaan aukikelaimen jälkeisellä leikkurilla. Tämän jälkeen nauhan häntä ajetaan automaattilla hitsauskoneelle, jossa häntä jätetään keskelle leikkuria ja jättöpuolen leuat ajetaan kiinni. Kun uusi tuotenauha otetaan linjaan, ajetaan nauhan keula vastaavasti keskelle leikkuria ja hitsauskoneen tulopuolen leuat ajetaan kiinni. Tämän jälkeen hitsauskoneen leikkuri leikkaa nauhojen päät ja hitsauskone on valmis hitsaustapahtumaa varten. Hitsauskoneella käytettäviä hitsausparametereja ovat hitsausvirta, hitsausnopeus, hitsauskiekkojen puristuspaine, valssauskiekon puristuspaine sekä nauhan limitys nauhan etu- ja takareunassa. (Outokumpu 2019.)



Kuva 9. HP2-linjan hitsauskone

Hitsauskoneen käyttävät hitsausparametrit määräytyvät hitsattavan laadun sekä hitsattavan nauhapaksuuden mukaan (Taulukko 2). Operaattorilla on myös mahdollisuus muuttaa hitsausarvoja käsin ennen hitsaustapahtumaa. Ennen hitsaustapahtumaa hitsauskone ajaa nauhan päät annettujen limitysarvojen mukaisesti yhteen käyttäen tulopuolen pöydän etu- ja takareunassa sijaitsevia kuularuuveja (Keskitalo 2019). Limityksessä nauhan häntään hitsattava keula jää päällimmäiseksi. Tämän jälkeen hitsauskone suorittaa hitsausprosessin. (Outokumpu 2019.)

Taulukko 2. HP2-linjan hitsauskoneen hitsausparametrit austeniittisille ruostumattomille teräksille (Outokumpu 2019)

HMI			Virta A	Hitsausnopeus m/min	Hitsauskiekko Paine	Valssauskiekko Paine	Limitys	
	Laatu	Paksuus					ETU mm	Taka mm
3	0	0.34<0.48	10800	4,50	1000	1000	1,00	2,80
4	0	0.48<0.59	10800	4,50	1000	1000	1,00	2,80
5	0	0.59<0.7	10800	4,50	1000	1000	1,00	2,80
6	0	0.7<0.81	10800	4,25	1100	1000	1,20	3,00
7	0	0.81<0.92	10800	4,00	1100	1000	1,30	3,10
8	0	0.92<1.03	11250	4,00	1500	1000	1,50	3,30
9	0	1.03<1.17	11250	4,00	1600	1000	1,50	3,30
10	0	1.17<1.32	11700	3,50	1700	1000	2,00	3,80
11	0	1.32<1.48	11700	3,00	1800	1000	2,00	3,80
12	0	1.48<1.65	11700	2,50	1900	1000	2,10	3,90
13	0	1.65<1.83	12600	2,00	2000	1000	2,10	3,90
14	0	1.83<2.01	13050	1,50	2100	1000	2,20	4,00
15	0	2.01<2.21	13050	1,50	2200	1000	2,50	4,30
16	0	2.21<2.42	13500	1,25	2300	1000	2,50	4,30
17	0	2.42<2.64	13500	1,00	2400	1000	2,70	4,50
18	0	2.64<2.87	13950	0,75	2500	1000	3,20	4,50
19	0	2.87<3.18	10500	0,75	2600	1500	5,00	5,00
20	0	3.18<3.50	10500	0,75	2700	1500	5,00	5,00

Hitsauskone käyttää kolmea eri hitsausparametritaulukkoa. Käytettävän parametritaulukon valinta riippuu, hitsataanko keskenään austeniittisia pareja, ferriittisiä pareja vai pareja, joissa toinen hitsattava nauha on austeniittinen ja toinen ferriittinen. (Outokumpu 2019.) Hitsauskone laskee hitsausparametrien käyttävän nauhapaksuuden käyttäen kaavaa 5.

$$t_{yhd} = t_1 - \frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} \quad (5)$$

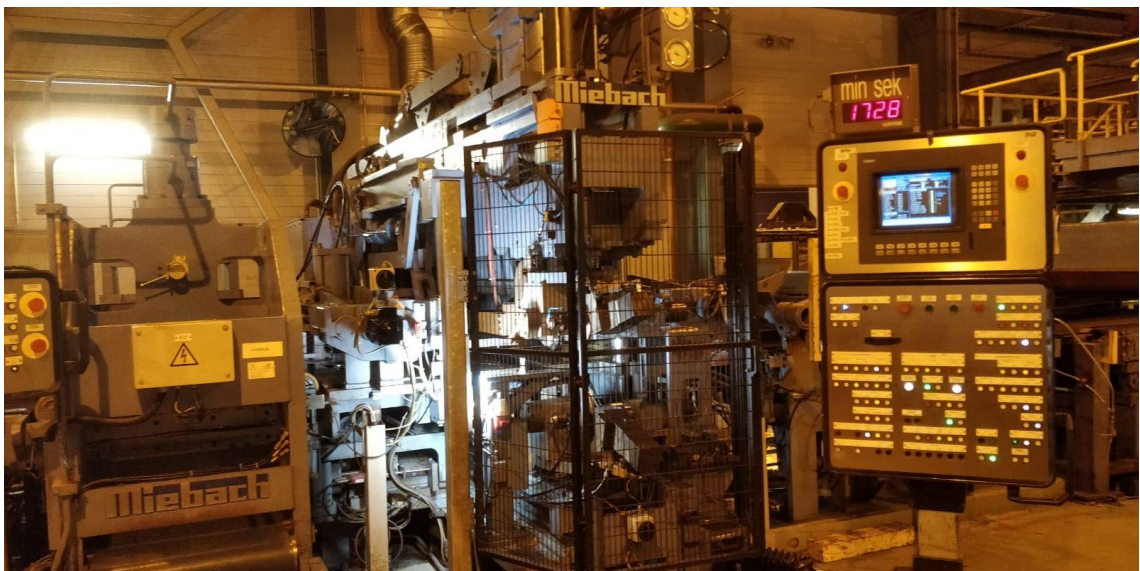
missä

t1 on paksumman nauhan paksuus (mm)

t2 on ohuemman nauhan paksuus (mm) (Outokumpu 2019).

5.2 HP4-linjan hitsauskone

HP4-linjan hitsauskone on ohutlevyjen liittämiseen suunniteltu rullasaumahitsauskone, jonka on valmistanut saksalainen yritys Miebach (Kuva 10). Hitsauskoneella muuttuvat hitsausparametrit ovat hitsausvirta, hitsausnopeus, hitsauskierrojen puristusaine, valssauskierrojen puristusaine sekä nauhan limitys etu- ja takareunassa (Taulukko 3). (Outokumpu 2019.)



Kuva 10. HP4-linjan hitsauskone

Poiketen HP2-linjan hitsauskoneesta, HP4-linjan hitsauskoneen antamat arvot ovat prosentuaalisia arvoja hitsauskoneen maksimiarvoista. Kuten HP2-linjan hitsauskoneella, voidaan myös HP4-linjan hitsauskoneella muuttaa hitsausparametreja ennen hitsaustapahtumaa. HP4-linjan hitsauskone valssaa myös nauhan ennen hitsaustapahtumaa, jolloin hitsauskoneen leikkurin jättämä jäyste saadaan poistettua hitsausalueelta. Mikäli valssausta ei suoriteta, voi osa hitsausvirrasta johtua jäysteen kautta, jolloin vastus hitsaustapahtumassa pienenee. Jäystettä pääsee syntymään enemmän, kun teräsnauhaa leikataan käyttäen tylsiä leikkurin teriä, tai leikkurin leikkausväli on väärä. Mikäli leikkurien terät ovat tylsät on hitsauskoneen leikkurin terien vaihto suositeltavaa. (Outokumpu 2019.)

Taulukko 3. Miebach-hitsauskoneen tekniset tiedot (Outokumpu 2019)

Valmistaja	Miebach	
Käyttöalue	Hitsattavat materiaalit	AISI 300 ja 400 kylmävalssattu ruostumaton teräs
	Hitsattava nauhanleveys	maks. 1630 min. 800 mm
	Nauhan paksuusalue	0,3 - 2,0 mm
	Nauhan kulkusuunta	oikealta vasemmalle
	nauhan kulkukorkeus	1100 mm
	Maksimi vetolujuus	1800 N/ mm ²
Hitsaaminen	Hitsausmenetelmä	rullasaumahitsaus
	Hitsausvoima	maks. 30 kN
	Hitsausnopeus	2 - 12 m/min
	Hitsauskiekon materiaali	Wirbalit RS (CuCrZr)
	Nauhojen limitys	0 - 3 mm
	Hitsauskiekon halkaisija	240 - 320 mm
	Hitsausvirta Max	25000 A
Silitys	Silitysvoima	maks. 40 kN
Kiinnityslaitteet	Kiinnitysvoima	40 kN
Leikkuri	Leikkausvoima	145 kN
Sivumeisti	Meistin voima	145 kN
	Lävistimen halkaisija	16 mm
	etäisyys hitsiliitoksesta	90 mm
Läpimenoaukko	vertikaalinen	120 mm
	horisontaalinen	1850 mm
Keskityslaitte	min. leuanetäisyys	600 mm
	maks. leuanetäisyys	1990 mm
Sähköistys	Verkkoonkytkentä	400 V, 50 Hz
	Apulaitteiden kytkentä	400 V, 50 Hz
	Hitsausvirran nimellisteho	300 kVA
	Sähkökaapin nimellisteho	25 kVA
	Ohjausjännite	24 V, DC / 230 V, AC
	Magnettiventtiilijänite	24 V, DC
Kulutus	Magneettiventtiilijännite	n 1,2 m ³ / hitsaus
	5bar	
	Hydraulipaineöljy	170 l / min
Tilantarve	hitsauskone	8300 x 7500 x 3200 mm

5.3 Hitsauskiekot HP-linjoilla

Molemmilla HP-linjoilla käytetään samoja hitsauskiekkoja. Kuitenkin kahden eri hitsauskoneen elektrodien kiinnitys on erilainen, jolloin HP2-linjalla käytettäviin kiekkoihin on työstettävä ura, jotta hitsauskiekon kiinnitys onnistuu. Liitteen 2 hitsauskiekon materiaali on DIN 2.1285 standardin mukainen WIRBALIT® B (CuCo₂Be). Näille hitsauskiekoille on mitattu vuonna 2016 kovuusarvoksi 88 HRB ja kontaktipinnalla kovuusarvo on arviolta jopa tätä suurempi. (Keskitalo 2019.) Tätä tukee valmistajan ilmoittama maksimikovuusarvo 106 HRB (Taulukko 4).

Taulukko 4. CuCoBe-hitsauskiekon teknisiä arvoja (SVS Schweisstrchnik 2019)

		A	B
Murtolujuus R _m	Mpa	740-880	690-860
Myötöraja R _{p0.2}	MPa	610-740	570-690
Murtovenymä A ₅	%	10-18	10-20
Murtokurouma Z	%	25-45	15-40
Kovuus HBW 2.5/178.5		230-270	220-260
Kovuus HV30		240-300	230-290
Kovuus HRB		99-106	97-104
Sähkönjohtavuus	MS/m	26-32	26-32
Sähkönjohtavuus	%IACS	45-55	45-55

Hitsauskiekot soveltuvat parhaiten käytettäväksi toistuvaan hitsaustapahtumaan, kun niiden kovuusarvot ylittävät 70 HRB. Tällöin kiekkojen käyttöikä saadaan maksimoitua. Kyseisten hitsauskiekkojen seosaineina on käytetty kobolttia (Co) 2,2 %, berylliumia (Be) 0,55 %, nikkeliä (Ni) ja rautaa (Fe) alle 0,5 %, sekä loput kuparia (Cu). (SVS Schweisstrchnik 2019.)

6 TEHDYT KOKEET JA KÄYTETYT KOEMENETELMÄT

6.1 Tilastollinen koesuunnittelu (DOE)

Design of experiment (DOE) eli tilastollinen koesuunnittelu on tutkimusmenetelmä, jota käytetään, kun halutaan tutkia esimerkiksi jotakin ilmiötä, jonka lopputulokseen vaikuttaa useampi muuttuja (Särkelä 2017, 18). Käytettäessä kyseistä testimenetelmää voidaan ottaa huomioon useampi haluttuun tulokseen vaikuttava muuttuja. Tilastollista koesuunnittelua voidaan käyttää myös silloin, kun aika ei riitä kaikkien erilaisten yhdistelmien tutkimiseen. (ASQ 2019.)

Koska vastuskiekkohitsauksen hitsaustapahtuman vaikuttavat erilaiset muuttujat ja opinnäytetyön tekemiseen varattu aika on rajallinen, hitsauskokeet päädyttiin tekemään käyttäen DOE-menetelmää. Hitsauskokeet tehtiin käyttäen kaksitasoista faktorikoetta, jonka avulla voidaan tutkia useampaa muuttujaa, joiden arvoja vaihdellaan kahdella tasolla. (Särkelä 2017, 18.) Tutkittavaksi muuttujiksi valittiin hitsauskiekkojen puristusvoima (F), hitsausvirta (I), hitsausnopeus (v) sekä muokkausmartensiitin määrä hitsattavassa kappaleessa (M). Hitsauskokeissa käytetyt arvot on annettu taulukossa 6.

Taulukko 6. Kaksitasoinen faktorikoe neljällä muuttujalla

F	I	v	%M	F%	I%	v%	M%	Numero
1	1	-1	-1	75	65	70	hehkutettu	1
-1	1	1	-1	70	65	99	hehkutettu	2
-1	1	-1	1	70	65	70	valssattu	3
-1	-1	-1	-1	70	63	70	hehkutettu	4
1	1	1	1	75	65	99	valssattu	5
1	-1	1	-1	75	63	99	hehkutettu	6
1	-1	-1	1	75	63	70	valssattu	7
-1	-1	1	1	70	63	99	valssattu	8

Hitsaustesteissä muuttumattomina arvoina pidettiin valssausvoimaa, limityksen kompensointia, limityspituutta takareunassa, esivalssausvoimaa ja esivalssausnopeutta (Taulukko 7). Hitsaustestit suoritettiin linjan huoltoseisakin aikana.

Taulukko 7. Muuttumattomat hitsausparametrit 1,5 mm hitsaustesteissä

Valssaus-voima%	Kompensointi%	Limitys etureuna%	Limitys taka%	Esivalssausvoima%	Esivalssausnopeus%
60	6	20	24	15	99

Mikäli DOE-koemenetelmä laaditaan oikein, saaduista tuloksista saadaan selville ne muuttujat, joilla on eniten vaikutusta tarkasteltaviin vasteisiin. Lisäksi voidaan saada selville, miten muuttujien arvojen vaihtelu vaikuttaa lopputulokseen sekä miten halutun lopputuloksen vaihtelua saadaan pienennettyä. (ASQ 2019.)

6.2 Hitsauskokeet

Hitsauskokeet päädyttiin suorittamaan HP4-linjan hitsauskoneella, koska hitsauskoneen käyttäminen oli mahdollista levykappaleiden avulla. Hitsaustestejä tehtiin kaksi kappaletta, jossa ensimmäisessä pyrittiin selvittämään austeniittisessä ruostumattomassa teräksessä olevan muokkausmartensiitin määrän vaikutus hitsattavuuteen, ja toisessa hitsausparametrien vaikutus hitsiliitoksen laatuun.

Ensimmäinen hitsaustesti suoritettiin käyttäen 1,5 mm paksuisia, 500 mm pitkiä ja 1300mm leveitä koepaloja tuotenauhoista. Hitsauskoetta varten kerättiin kahdeksan Sendzimir-valssaimella valssattua näytettä. Lisäksi hitsauskokeisiin kerättiin kahdeksan kappaletta HP-linjan läpi ajettuja näytteitä, jolloin muokkauslujittumisen vaikutusta hitsattavuuteen pystyttiin tutkimaan.

Toinen hitsaustesti suoritettiin käyttäen 1,2 mm paksuisia, 500 mm pitkiä ja 1300mm leveitä valssattuja näytepaloja. Näytteitä kerättiin kuusi kappaletta, joista neljää käytettiin kasitasoisessa faktorikokeessa kolmella muuttujalla (Taulukko 8). Lisäksi kahdesta jäljelle jääneestä näytteestä hitsattiin toinen hitsauskoneen antamilla arvoilla ja toinen operaattorin itse muokkaamilla arvoilla (Taulukko 9).

Taulukko 8. Kaksitasoinen faktorikoe kolmella muuttujalla

F	I	v	F%	I%	v%	Numero
1	1	1	57	56	99	1
-1	-1	1	53	54	99	2
1	-1	-1	57	54	90	3
-1	1	-1	53	56	90	4

Toisessa hitsaustestissä jokaisen hitsiliitoksen keskialueelle jäi noin 200 - 350 mm pitkä alue, jossa hitsattavat päät jäivät toisistaan irti. Kuitenkin testipalan etu- ja takareunassa hitsiliitos oli onnistunut (Kuva 11).

Taulukko 9. muuttumattomat hitsausparametrit 1,2 mm hitsaustesteissä

Valssaus- paine%	Kompen- sointi%	Limitys%	Limitys- pituus%	Esivals- sauspaine%	Esivalssaus- nopeus%
40	6	20	24	15	99

Arvoitukseksi jäi, minkä vuoksi hitsiliitos oli irtonainen keskialueelta, sillä kunnosapidon arvion mukaan hitsauskoneessa ei ollut vikaa hitsaustestien aikaan ja myös leikkurin terät olivat kunnossa. Hyvälaatuista hitsausliitosta oli kuitenkin riittävästi, jolloin kappaleista saatiin leikattua vetosauvat sekä palat poikkileikkaushieitä varten.



Kuva 11. Irtonainen hitsausliitos koehitsin keskialueelta

6.3 Vetokokeet

Hitsatuista koelevyistä irrotettiin vetosauvat ja niille tehtiin vetokokeet hitsiliitoksen mekaanisten ominaisuuksien selvittämiseksi.

Vetokokeet suoritettiin käyttäen kyseiselle paksuusalueelle käytettäviä arvoja normaalitilanteessa, jossa sauvassa ei ole hitsausliitosta. Vetokokeet suoritettiin SFS-EN ISO 6892-1:2016 standardin mukaisesti.

6.4 Taivutuskokeet

Taivutuskokeita varten hitsatuista koelevyistä leikattiin kahdeksan kappaletta 20 x 100 mm kokoisia näytteitä. Taivutustestit tehtiin hydraulisella puristimella kolmipistetaivutuksena painaen tukiteloilla olevaa näytekappaletta taivutintelalla. Taivutuskokeissa sovellettiin SFS-EN ISO 5173:2011 standardia. Kaksi ensimmäistä koetta suoritettiin käyttäen taivutintelan halkaisijana $d = 9\text{mm}$ (Kaava 6). Tämä kuitenkin johti taivutussauman luistamiseen sivuun, jolloin taivutuskohta ei ollutkaan hitsausliitoksen keskellä. Loput kuusi taivutuskoetta päädyttiin suorittamaan käyttäen suurempaa taivutustelan halkaisijaa, jotta taivutettavan kappaleen luistaminen saataisiin mahdollisimman vähäiseksi. Käytettävä tukitelojen väli on riippuvainen taivutustelan halkaisijasta sekä levynpaksuudesta (Kaava 7). Sauvan minimileveys voidaan laskea kaavalla 8.

$$d = 4t \quad (6)$$

missä

d on taivutustelan halkaisija [mm]

t on levynpaksuus [mm] (Outokumpu 2019).

$$d + 2t \leq l \leq d + 3t \quad (7)$$

missä

l on tukitelojen väli [mm] (Outokumpu 2019).

$$b \geq 4t \quad (8)$$

missä

b on sauvan leveys [mm]

t on levyn paksuus [mm] (Outokumpu 2019).

Taivutuspaloja päädyttiin ottamaan lisää, jotta taivutuskokeet voitaisiin suorittaa pintataivutuskokeena sekä juuritaivutuskokeena. Lisäksi lisätestejä tarvittiin, sillä ensimmäisellä taivutuskerralla kaikki taivutustestit eivät onnistuneet suunnitellusti näytekappaleen luistaessa sivuun.

6.5 Hitsiliitoksen testaaminen tappikoneella

Hitsausliitokset testattiin lisäksi myös käyttäen HP4 -linjalla hitsiliitoksen testaamiseen tarkoitettua tappikonetta. Tappikokeessa hitsiliitosta painetaan alapuolelta pallomaisella tapilla, kunnes liitos repeää hitsiliitoksen suuntaisesti tai pitkittäisesti. Tämän avulla voidaan arvioida hitsausliitoksen kestävyyttä hitsaustapah-tuman visuaalisen tarkkailun lisäksi.

Jokaisesta hitsausnäytteestä leikattiin lisäksi myös poikkileikkaushie, jonka avulla hitsatun sauman rakennetta voitiin tutkia tarkemmin. Poikkileikkaushieet valmistettiin Outokummun laboratoriotiloissa.

7 TULOKSET

7.1 Vetokokeiden tulokset

Ensimmäisten hitsauskokeiden tulokset on annettu taulukossa 10. Taulukon mukaan näytteiden murtolujuudet (R_m) vaihtelivat välillä 652 - 1025 MPa. Vetosauva murtui perusaineesta silloin, kun hitsausliitos oli tehty hehkutettuun kokolevyyn. Tällöin liitoksen murtolujuus oli keskimäärin 660 MPa ja murtovenymä oli keskimäärin 44 %. Valsattuihin kokolevyihin tehtyjen hitsausliitosten keskimääräinen murtolujuus oli 983 MPa ja murtovenymä 1,6 %.

Taulukko 10. Ensimmäisen hitsauskokeen vetotulokset

Näyte	paksuus	leveys	$R_{p0.2}$	R_m	A5	murtuma- kohta
	mm	mm	MPa	MPa	%	
1_1	1.43	20.12	296	666	40	PA
1_2	1.47	20.11	291	655	42	PA
2_1	1.45	20.14	300	670	44	PA
2_2	1.45	20.20	286	656	50	PA
3_1	1.50	20.14	887	970	1.3	hitsi
3_2	1.50	20.08	855	939	1.3	hitsi
4_1	1.44	20.14	287	657	45	PA
4_2	1.45	20.15	300	669	44	PA
5_1	1.50	20.13	882	992	1.7	hitsi
5_2	1.49	20.09	884	1025	2.2	hitsi
6_1	1.48	20.08	292	652	43	PA
6_2	1.43	20.06	288	659	43	PA
7_1	1.47	20.14	877	970	1.7	hitsi
7_2	1.48	20.13	880	937	1.2	hitsi
8_1	1.49	20.14	929	1023	1.8	hitsi
8_2	1.49	20.14	863	1011	1.7	hitsi

Toisen hitsaustestin tulokset on esitetty taulukossa 11. Taulukon mukaan murtolujuudet vaihtelivat välillä 315 - 836 MPa. Vetosauvat murtuivat hitsausauman vierestä, lukuun ottamatta näytettä 6_2, jossa vetosauva repesi keskeltä hitsausaamaa. Vetosauvojen keskimääräinen lujuus oli 712 MPa ja murtovenymä 0,7 %.

Taulukko 11. Toisen hitsauskokeen vetotulokset

Näyte	paksuus	leveys	R _{p0.2}	R _m	A5	murtuma- kohta
	mm	mm	MPa	MPa	%	
1_1	1.28	20.17	-	715	0.1	hitsi
1_2	1.28	20.17	-	597	0.2	hitsi
2_1	1.62	20.23	746	824	1.1	hitsi
2_2	1.61	20.26	748	792	1.6	hitsi
3_1	1.63	20.27	742	813	1.1	hitsi
3_2	1.62	20.20	750	819	1.1	hitsi
4_1	1.58	20.17	749	836	1.6	hitsi
4_2	1.57	20.18	754	834	1.6	hitsi
5_1	1.22	20.19	-	667	0.1	hitsi
5_2	1.22	20.17	-	729	0.1	hitsi
6_1	1.22	20.18	-	608	0.1	hitsi
6_2	1.23	20.20	-	315	0.0	hitsi

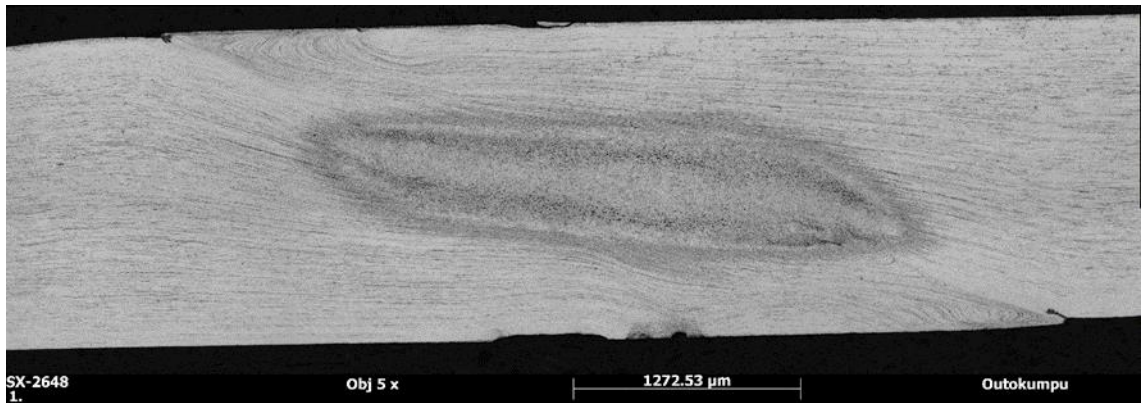
7.2 Taivutuskokeiden tulokset

Taivutustestien tuloksista voitiin päätellä että, taivutintelan halkaisijalla ei ollut kovin suurta merkitystä kappaleen luistamisessa. Kappaleen luistamiseen vaikutti eniten kappaleen kovuus ja lujuus, sillä hehkutettuja näytteitä ei saatu onnistuneesti taivutettua keskeltä hitsiliitosta. Kuitenkin taivuttaessa muokkauslujitettuja näytteitä saatiin hitsiliitos taivutettua keskeltä.

Kaikki hitsausnäytteet kestivät 90 asteen taivutuksen, mutta osassa repeämistä alkoi tapahtua jo tässä vaiheessa. Taivutettaessa 180 astetta jokaisessa hitsausliitoksessa tapahtui repeämistä hitsausauman vierestä. Kaikissa hitsausnäytteissä kappaleet kuitenkin pysyivät toisissaan kiinni, kappaleiden välissä sijaitsevassa hitsauslinssistä. Täydelliset tulokset on annettu liitteessä 1.

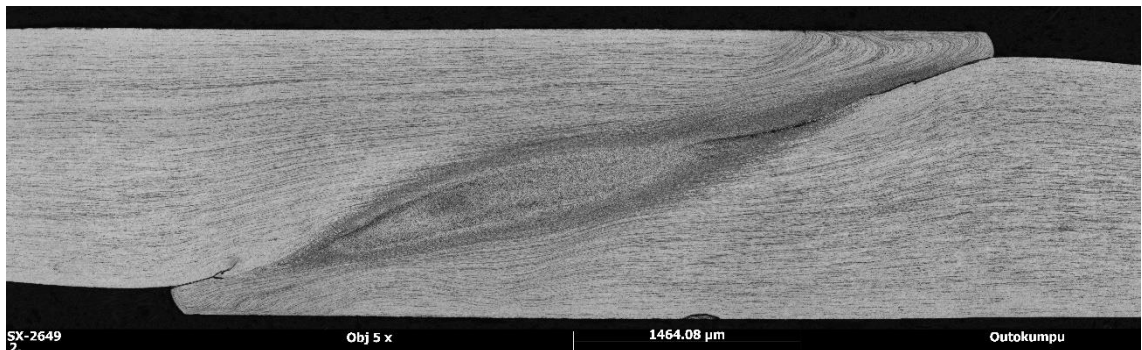
7.3 Hitsiliitoksen mikrorakenne

Ensimmäisen hitsauskokeen näytteissä numero 1, 4 ja 7 hitsattavat kappaleet ovat sulaneet toisiinsa hyvin ja hitsauslinssi sijaitsee keskellä hitsattavia kappaleita. Kuten luvussa 3.2 aikaisemmin jo todettiin, tulisi suurin vastus saada syntymään kahden keskenään hitsattavan pinnan välille. Esimerkki hyvälaatuisesta hitsauslinssistä nähdään kuvassa 12, jossa on esitetty koehitsin numero 1 poikkileikkauksen mikrorakennetta.



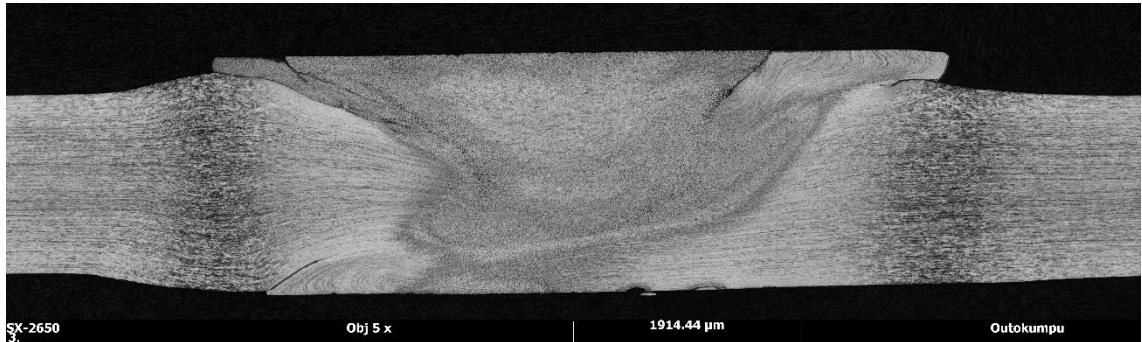
Kuva 12. Koehitsin numero 1 poikkileikkauksen mikrorakennetta

Koehitseissä numero kaksi (2), viisi (5) ja kahdeksan (8) luultavammin leikkausjäyste vaikutti hitsauslinssin suuruuteen. Tästä nähdään esimerkki kuvassa 13. Koska nauhojen välille on jäänyt tyhjää tilaa ja mahdollisesti osa hitsausvirrasta on kulkeutunut jäysteen kautta hajavirtana, on hitsauslinssi pienempi kooltaan kuin kuvassa 12 nähtävä näytteen numero yksi (1) linssi.



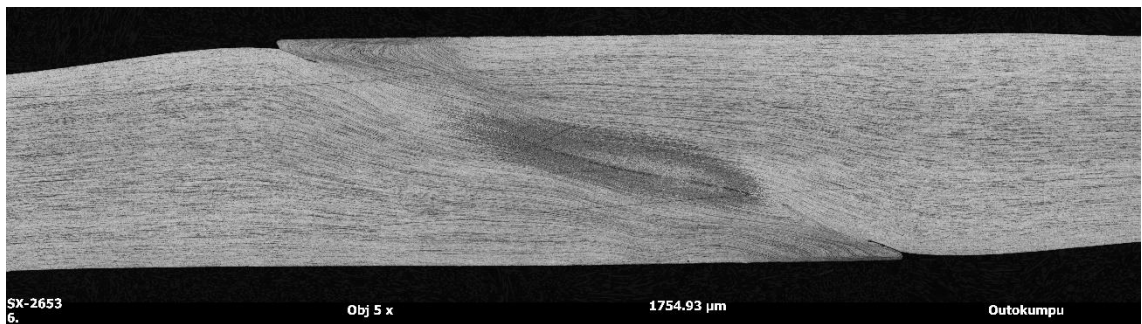
Kuva 13. Jäysteen vaikutus hitsattavuuteen (koehitsi numero 2)

Näytteestä numero kolme (3) nähdään, että sulamista on myös tapahtunut ylemmän elektrodin ja ylempänä olevan teräsnauhan kontaktipinnan välillä. Tällöin hitsausliitoksen linssi on jakautunut myös hitsattavien teräsnauhojen yläpinnalle. (ks. Kuva 14). Tämän on mahdollisesti aiheuttanut hitsauskiekon pinnalla olevat irtopartikkelit, jolloin vastusta on päässyt syntymään myös ylemmän elektrodin ja ylemmän teräsnauhan välille.



Kuva 14. Poikkileikkauskuva hitsiliitoksesta, jossa sulamista on tapahtunut liitoksen yläpinnalla (koehitsi numero 3).

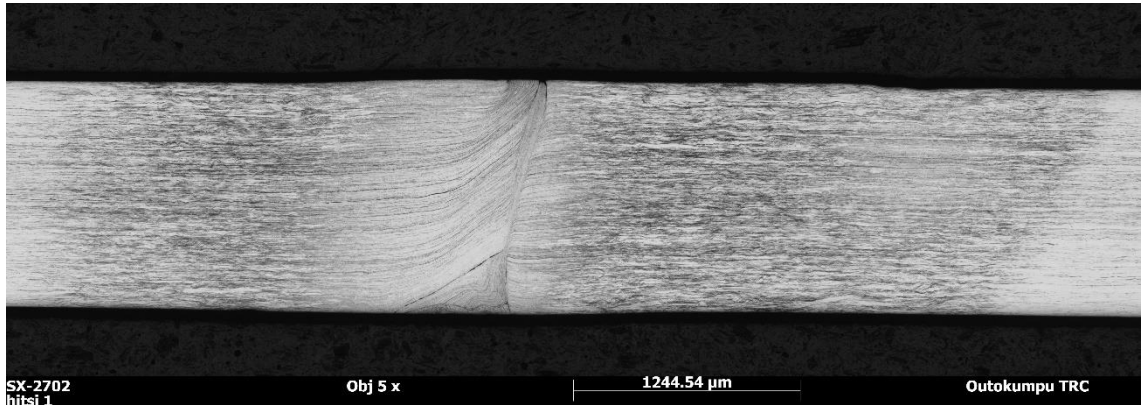
Koehitsin numero kuusi (6) poikkileikkauksen mikrorakenteesta nähdään, että nauhojen välissä oleva hitsauslinssi on pienehkö. (ks. Kuva 15). Tämä johtuu siitä, että käytetty hitsausvirta on ollut liian pieni ja hitsausnopeus liian suuri. Näin sulamispiste on jäänyt kohtuullisen pieneksi ja näin kappaleet ovat osittain irrallaan toisistaan.



Kuva 15 Poikkileikkauskuva heikosti sulaneesta hitsauslinssistä (koehitsi numero 6)

Toisen hitsaustestin näytteistä 1 ja 5 nähdään, että nauhan limitys ei ole ollut kohdallaan. Näytteet on mahdollisesti otettu läheltä keskialuetta, joissa nauhan

päät olivat irti toisistaan. Näytteissä 2, 3 ja 4 hitsauslinssi sijaitsee keskellä kappaleita ja kappaleet ovat sulaneet yhteen (Kuva 16). Näytteessä kolme hitsauslinssi on jakautunut nauhojen alapuolelle mahdollisten irtopartikkeleiden luoman vastuksen vuoksi. Lisäksi nauhojen päissä on myös jäystettä, jonka kautta hitsausvirta on kulkenut hajavirtana. Kaikki poikkileikkaushieet on esitetty liitteestä 2.



Kuva 16. poikkileikkaushie toisen hitsaustestin epäonnistuneesta limityksestä (koehitsi numero 1)

7.4 Tappitestin tulokset

Jokainen hitsiliitos todettiin hyväksi tappitestin perusteella HP4-linjan vuorossa olleiden operaattoreiden toimesta. Tässä tapauksessa hitsausliitoksen kestävydestä kertoi hitsausliitoksen repeäminen poikkisuuntaisesti hitsaussuuntaan nähden (Kuva 17).



Kuva 17. Tappikoneessa testattu hitsattu koepala (hitsausnäyte numero 6)

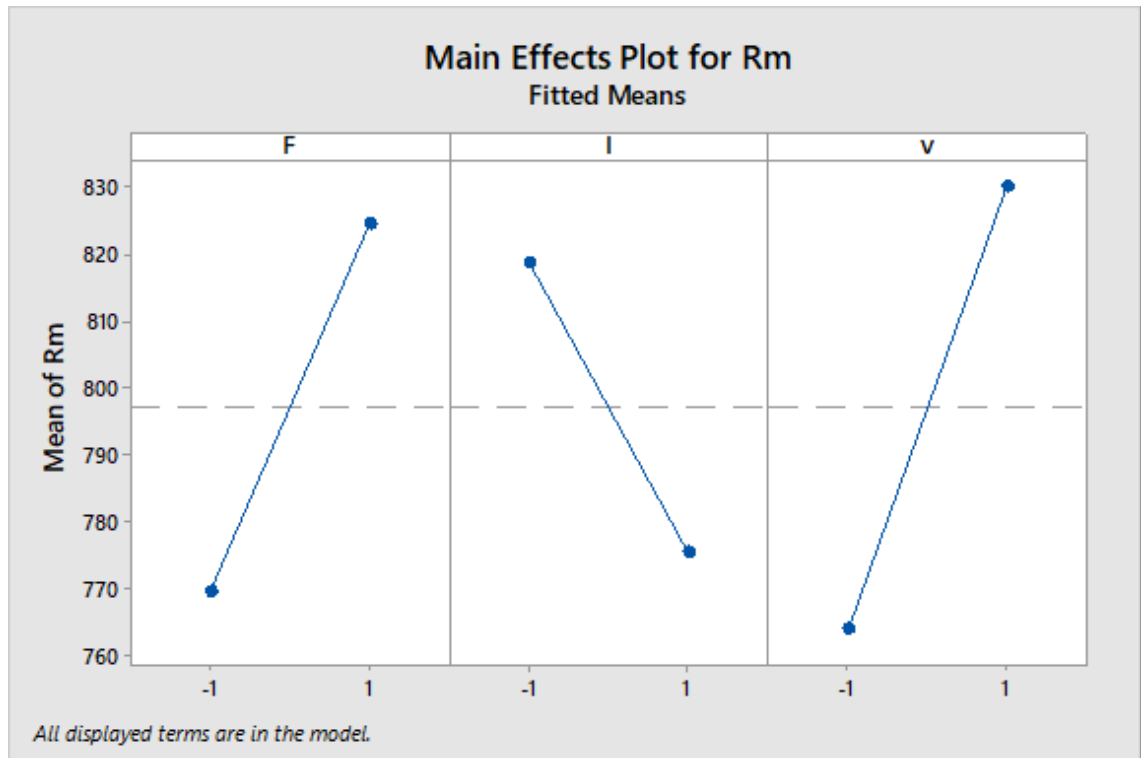
8 TULOSTEN TARKASTELU

8.1 Hitsausliitoksen lujuuteen vaikuttavat tekijät

Saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että hyvälaatuisen hitsausseaman syntyyn vaikuttavat vastuskiekkohitsauksessa hitsausparametrien lisäksi myös hitsauslaitteiston kunnossapito ja hitsausalueen hyvä puhtaus. Tutkituista hitsausparametreista hitsausnopeudella oli suurin vaikutus syntyneen hitsin lujuuteen. Tämän jälkeen eniten vaikutusta hitsin lujuuteen oli hitsausvoimalla ja tutkituista parametreista vähiten hitsausvirralla.

Vetokokeiden perusteella voidaan sanoa, että kertaalleen hehkutettujen näytteiden hitsausliitosten lujuus oli suurempi kuin itse hitsattavan materiaalin sillä vetokappaleet menivät poikki perusaineesta. Vetokokeista saadut murtolujuudet olivat keskenään tasaisia, jos verrataan mekaanisilta ominaisuuksiltaan samanlaisien materiaalin hitsiliitoksia. Poikkeuksen teki 1,2 mm vetokokeissa kuudennen näytteen toinen näyte, jossa murtolujuus oli vain 315 MPa. Tämän voidaan kuitenkin olettaa johtuneen siitä, että vetosauva oli leikattu todennäköisesti alueelta, jossa nauhan päät eivät olleet hitsautuneet toisiinsa liian pienen limityspituuden vuoksi.

Vetokokeiden tuloksia käsiteltiin Minitab-ohjelmalla, jonka avulla saatiin selville, kuinka tilastolliseen koesuunnitteluun valitut hitsausparametrien arvot vaikuttivat hitsausliitoksen lujuuteen. Tuloksista saatiin selville, että elektrodien puristusvoiman kasvaessa hitsausliitoksen lujuus kasvaa. Kuitenkin virran kasvaessa liian suureksi, hitsausliitoksen lujuus heikkenee. Hitsausnopeuden kasvaessa hitsausliitoksen lujuus kasvoi, mikä kertoo liiallisen lämmöntonnin heikentävän hitsausliitoksen lujuutta (Kuva 17).

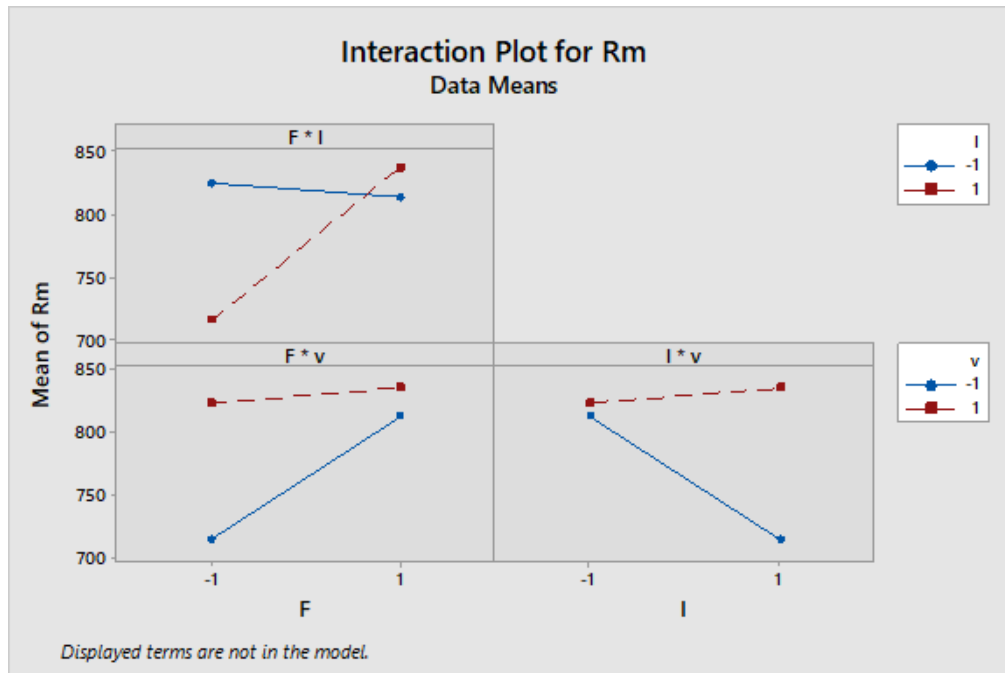


Kuva 17. Hitsausparametrien vaikutus hitsiliitoksen lujuteen

Taivutustesteistä voidaan päätellä, että kolmen pisteen taivutuskoe ei sovi pehmeämmille hehkutetuille näytteille, sillä kappale on erittäin vaikea saada pysymään keskellä. Näin taivutus ei pääse tapahtumaan keskellä hitsausliitosta. Muokkauslujitetuilla näytteillä testausmenetelmä toimii huomattavasti paremmin, mutta näytteitä on silti oltava riittävän suuri määrä, jotta onnistuneita taivutuksia saadaan tehtyä tarpeeksi. Taivutus olisi hyvä suorittaa siten, että kappale ei pääse luistamaan sivuun. Koska hitsausaamaa kulkee useiden eri halkaisijalla olevien rullien ympäri ja taittuu kulkeutuessaan prosessin läpi molempiin suuntiin, on taivutuskoe luotettavampi tapa varmistaa hitsausaaman kestävyys verrattuna pelkkään vetokokeeseen. Tätä tukee myös se, että saatujen vetokokeiden lujuuksien tulokset olivat korkeita, vaikka kappaleiden välille syntynyt hitsauslinssi oli osassa näytteitä erittäin pieni.

Poikkileikkaushieistä nähtiin riittävän lämmöntonnin merkitys hitsaustapahtumaan, jolloin hitsattavat kappaleet pääsevät sulamaan kunnolla. Kun käytetään suurta hitsausvoimaa (F) sekä hitsausvirtaa (I) voidaan hitsausliitoksen lujutta kasvattaa huomattavasti (Kuva 18). Liian suurella lämmöntonnilla sekä likaisilla hitsauskiekoilla sulamista pääsee myös tapahtumaan kappaleen pinnalla, mikä

ei hyvälaatuisen hitsausliitoksen kannalta ole toivottavaa. Myös hitsauskoneen leikkausterien hyvä kunto on todella tärkeää, koska näin leikkausjäysteen syntyminen voidaan minimoida. Tällöin nauhanpääät saadaan mahdollisimman tasaisesti yhteen ja suurin vastus syntyy kahden hitsattavan kappaleen kontaktipintojen välille.



Kuva 18. Hitsausparametrien vuorovaikutukset

8.2 Kehitysideat

Hitsaustapahtuman valmistelussa korostuvat hyvä ennakkovalmistelu, jossa käytössä oleva hitsauslaitteisto huolletaan säännöllisesti ja hitsauslaitteistolle tehdyistä huolloista pidetään kirjaa. Hitsauslaitteiston tärkeimmiksi ja välittömästi hitsaustapahtumaan vaikuttaviin huoltokohteisiin kuuluvat hitsauskiekkojen pitäminen hyvässä kunnossa ja niiden vaihtaminen kunnostettuihin kiekkoihin riittävän usein. Tässä korostuu myös operaattoreiden perehdyttäminen hitsauslaitteiston toimintaan ja esimerkiksi hitsauskiekkojen vaihtamiseen.

Myös hitsauslaitteiston leikkurin terien vaihtoa riittävän usein ja oikean leikkauvälän asettamista voidaan pitää tärkeänä osana onnistunutta hitsaustapahtumaa ajatellen. Tämä korostuu etenkin hehkutus- ja peittäuslinja 2:lla, missä esivals-

sausta ei suoriteta ennen hitsaustapahtumaa. Jäystettä vähentävän esivalssauksen ottaminen käyttöön myös HP2-linjalla olisi suotavaa, mikäli se on mahdollista tehdä ilman suurta vaikutusta hitsaustapahtuman keston. Lisäksi hitsausalueen ja hitsattavien kappaleiden pitäminen puhtaana öljystä ja irtoliasta on tärkeää.

Saatujen tulosten perusteella HP2- ja HP4-linjojen hitsausparametrejä voidaan lähteä kehittämään nostamalla hitsauskierrojen puristusvoimaa sekä käytettävää hitsausvirtaa maltillisesti. Vastaavasti lämmöntuontia voidaan nostaa vähentämällä käytettävää hitsausnopeutta. Mikäli hitsaustapahtumassa näkyy kipinöintiä, on hitsausvirta ollut liian suuri käytettyyn hitsauspaineeseen nähden. Kipinöintiä voivat aiheuttaa myös elektrodin pinnassa ja hitsattavan materiaalin pinnassa olevat epäpuhtaudet. Kuitenkin hitsausvoimaa voidaan kasvattaa vain siinä suhteessa, kun hitsauskiekot kestävät ilman tyssäytymistä.

9 POHDINTA

Opinnäytetyöni aihe oli mielenkiintoinen, sillä aikaisempi työkokemus HP-linjoilla oli mahdollistanut vastuskiekkohitsauksen suorittamisen ja seuraamisen käytännössä. Opinnäytetyö mahdollisti myös vastushitsausprosessin ja eri hitsausparametrien vaikutusten ymmärtämisen syvällisemmin. Opinnäytetyöni aiheesta teki haastavaa HP-linjoilla erilaiset hitsattavat teräslajit sekä hitsaustapahtumaan vaikuttavat ulkoiset tekijät. Koska erilaisia hitsattavia teräslajeja oli paljon, ei opinnäytetyössä käytettävä aika riitä tutkimaan kaikkia laatuja ja paksuusalueita. Tämän johdosta opinnäytetyössä selvitettiin vastuskiekkohitsausprosessin muuttajat, joiden oikeilla arvoilla saadaan aikaseksi vaatimusten mukainen hitsausliitos.

Opinnäytetyön teoriaperustan kartoittaminen aloitettiin tutkimalla vastushitsaukseen liittyvää kirjallisuutta sekä standardeja. Lisäksi tietoa haettiin Outokummun sisäisestä tietokannasta, alueella työskenteleviltä henkilöiltä ja opinnäytetyön ohjaajilta. Näiden pohjalta saatiin hyvä käsitys siitä, kuinka vastushitsausprosessi tapahtuu, ja miten vastushitsaukseen käytettäviä parametrejä voitaisiin muokata paremman hitsausliitoksen aikaansaamiseksi. Samalla saatiin myös tietoa miten ulkoiset tekijät vaikuttavat syntyvän hitsausliitoksen laatuun. Opinnäytetyön aikana suoritettiin kaksi kappaletta hitsaustestejä, joiden avulla kartoitettiin vastushitsausprosessiin eniten vaikuttavat hitsausparametrit.

Opinnäytetyön pohjalta voidaan tulevaisuudessa tehdä maltillisia muutoksia käytössä oleviin hitsausparametreihin ja lisäksi mahdollisesti suorittaa myös laajempia hitsaustestejä eri paksuusalueille sekä laaduille. Näin tulevaisuudessa hitsaustapahtumasta johtuvia seisauksia saadaan vähennettyä ja hitsaustapahtumaa parannettua luotettavammaksi.

Opinnäytetyö opetti minulle paljon eri teräslajien hitsattavuudesta sekä vastuskiekkohitsauskoneiden toiminnasta ja käytettävyydestä. Lisäksi opin paljon uutta hitsausliitoksen kestävyys testauksista. Tulevaisuuden kannalta opinnäytetyö antoi minulle hyvät valmiudet jatkaa erilaisten hitsausprosessien opiskelua ja tutkimista.

LÄHTEET

ASQ 2019. What is design of experiments (doe)? Viitattu 27.02.2019
<https://asq.org/quality-resources/design-of-experiments>

Guild international. hitsausparametrien vaikutus / vian etsintä. Viitattu 31.01.2019

Houldcroft, P. 1977. Welding process technology. 1. painos. Cambridge: Cambridge university press.

Keskitalo, J. 2019. CuCoBe (2.128Wibalit B5) Sähköposti santeri.saksi@edu.lapinamk.fi 07.02.2019. Tulostettu 08.02.2019

Lepola, P. & Ylikangas, R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. 1. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Lukkari, J. Kyröläinen, A. & Kauppi, T. 2016. Hitsauksen materiaalioppi Osa 2: Metallit ja niiden hitsattavuus. 1. painos. Suomen hitsausteknillinen yhdistys r.y. (SHY)

Miebach Hitsauskone QMH 17 huolto-ohjeet n.d. No.: 101068 Dortmund.

Outokumpu 2010. Welding handbook. 1. Painos. Sweden. Sandvikens Tryckeri AB.

Outokumpu 2019. K-asema. Viitattu 31.01.2019

Resistance Welder Manufacturer's Association 1997. The Resistance Welding Manual. Fourth Edition. Resistance Welder Manufactures.

SFS-EN 10088-2. 2014. Ruostumattomat teräkset. Osa 2: Yleiseen käyttöön tarkoitettut korroosionkestävät levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot. Helsinki: SFS.

SFS-EN 1011-3. 2018:en. Welding. Recommendations for welding of metallic materials. Part 3: Arc welding of stainless steels. Helsinki: SFS.

SVS Schweisstechnik 2019. WIRBALIT® B. Viitattu 08.02.2019 <https://svs-schweisstechnik.de/pages/semi-finished-materials/copper-alloy/wirbalitr-b.php>

Särkelä, A. 2017. Raepuhallusparametrien vaikutus S700E:n särmättävyyteen. Lapin ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Opinnäytetyö.

Talonen, J. & Metalliteollisuuden keskusliitto 1999. Ohutlevyjien liittäminen. 7. painos. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Taulavuori, T. Kyröläinen, A. & Manninen, T. 2012 Ruostumattomat teräkset. 5. painos. Helsinki: Teknologiateollisuus ry.

LIITTEET

Liite 1. Taivutuskoepöytäkirja

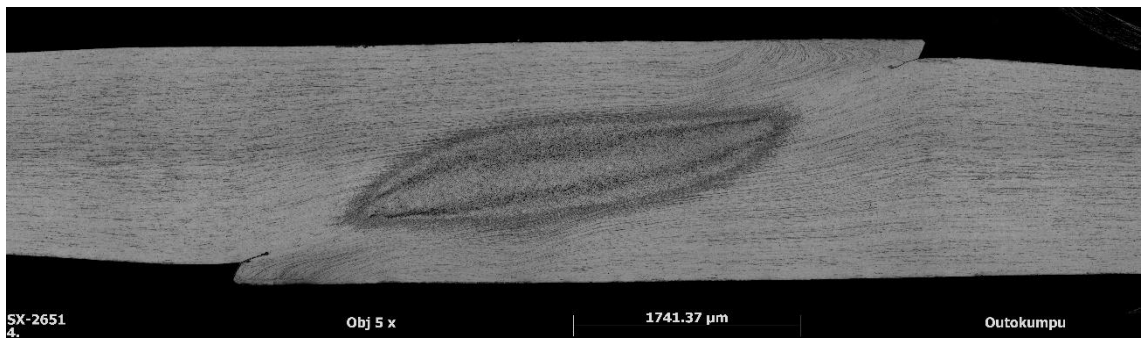
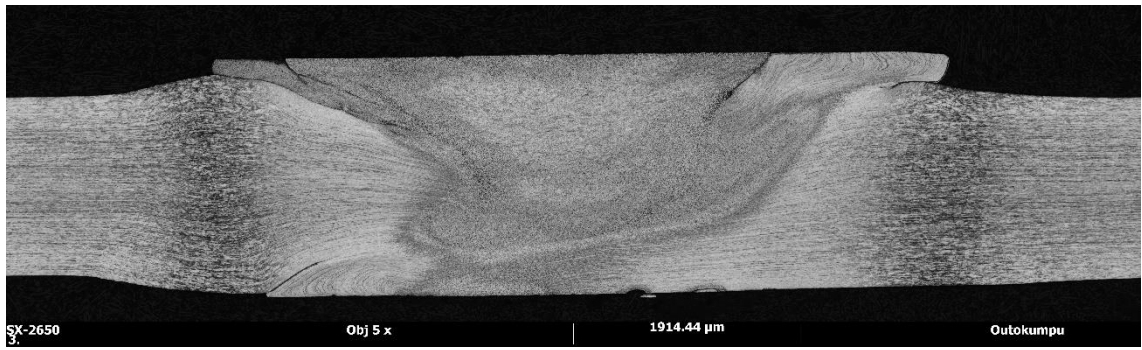
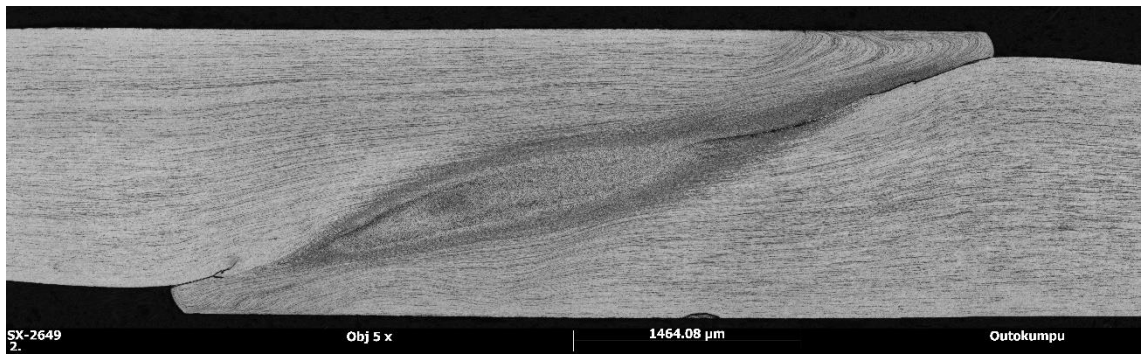
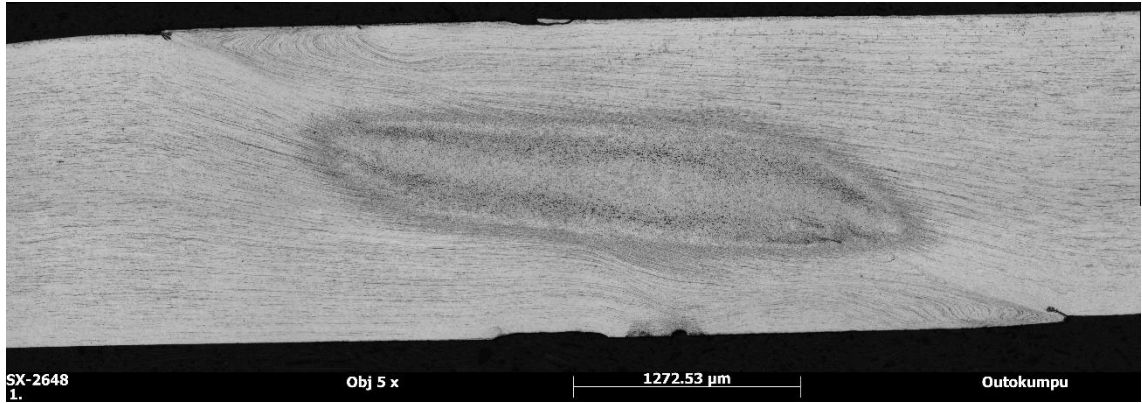
Liite 2. Poikkileikkaushieet

Liite 1. Taivutuskoepöytäkirja

outokumpu		TAIVUTUSKOE		Pöytäkirja nro. _____				
pWPS				Taivutintelan halkaisija: $d=4xt$				
Sovellusstandardi	SFS-EN 5173			Tukitelojen väli: $d + 2*t \leq l \leq d + 3*t$				
Asiakas / Viite	Santeri Saksi opinnäytetyö			Levympaksuus: t				
Perusaine	Aust. Rst.			Sauvan leveys: b, vähintään 4*t				
Aineenpaksuus	1,5 mm			Reunojen pyöristys vedonpuoleiselta pinnalta.				
Hitsityyppi	limityshitsi			Pyöristyssäde $r \leq 0.2*t$, kuitenkin max 3 mm.				
Hitsausprosessi	vastuskiekkohitsaus			FBB Päittäishitsin pintataivutuskoe				
Hitsausaine	Aust. Rst.			RBB Päittäishitsin juuritaivutuskoe				
Koelämpötila	huoneenlämpö			SBB Päittäishitsin sivutaivutuskoe				
Huomautuksia								
Koesauva Nro	Koemeneelmä	Mitat mm	Taivutintelan halkaisija (mm)	Tukitelojen väli (mm)	Taivutuskulma	Alkumittapituus mm	Venymä %	HUOM!
1_1	RBB	20x100	16	20	180			Luisti sivuun
1_2	RBB	20x100	16	20	180			Luisti sivuun
1_3	RBB	20x100	16	20	180			Luisti sivuun
1_4	FBB	20x100	16	20	180			Luisti sivuun
1_5	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
1_6	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
2_1	RBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
2_2	RBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
2_3	RBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
2_4	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
2_5	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
2_6	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
3_1	RBB	20x100	8	12	180			Ok
3_2	RBB	20x100	8	12	180			Ok
3_3	RBB	20x100	8	12	180			90 Ok
3_4	FBB	20x100	8	12	180			Murtumia 180 asteessa
3_5	FBB	20x100	8	12	180			Murtumia 180 asteessa
3_6	FBB	20x100	8	12	180			Murtumia 180 asteessa
4_1	RBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
4_2	RBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
4_3	RBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
4_4	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
4_5	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
4_6	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
5_1	RBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok
5_2	RBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok
5_3	RBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok
5_4	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok
5_5	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok (180 astetta murtuu sauman vierestä)
5_6	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok (180 astetta murtuu sauman vierestä)
6_1	RBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok (180 astetta murtuu sauman vierestä)
6_2	RBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok (180 astetta murtuu sauman vierestä)
6_3	RBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok (180 astetta murtuu sauman vierestä)
6_4	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok (180 astetta murtuu sauman vierestä)
6_5	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok (180 astetta murtuu sauman vierestä)
6_6	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok (180 astetta murtuu sauman vierestä)
7_1	RBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok
7_2	RBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok 180 asteessa luisti sivuun
7_3	RBB	20x100	8	12	180			90 ok
7_4	FBB	20x100	8	12	180			90 asteessa murtumia (kiekoissa irtopartikkeleita?)
7_5	FBB	20x100	8	12	180			90 asteessa murtumia (kiekoissa irtopartikkeleita?)
7_6	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta ok 180 asteessa luisti sivuun
8_1	RBB	20x100	8	12	180			90 ok, 180 astetta sauma aukeaa
8_2	RBB	20x100	8	12	180			90 ok, 180 astetta sauma aukeaa
8_3	RBB	20x100	8	12	180			90 ok, 180 astetta sauma aukeaa
8_4	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta aukeaa
8_5	FBB	20x100	8	12	180			Luisti sivuun
8_6	FBB	20x100	8	12	180			90 astetta repeää
Taivutuskokeen koetulosten mukaisesti koetulos on "_____"								
Testauksen suorittaja Santeri Saksi								
Päivänmäärä		Allekirjoitus						
5.4.2019								
Kokeen valvoja		Hannu-Pekka Heikkinen						
Päivänmäärä		Allekirjoitus						
5.4.2019								

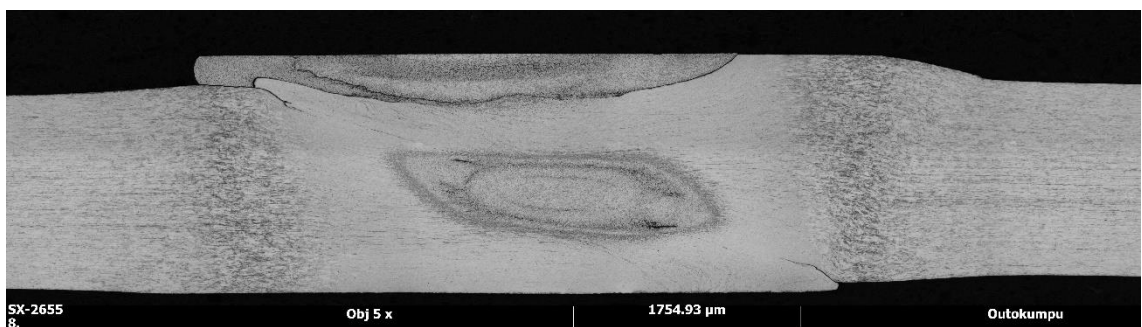
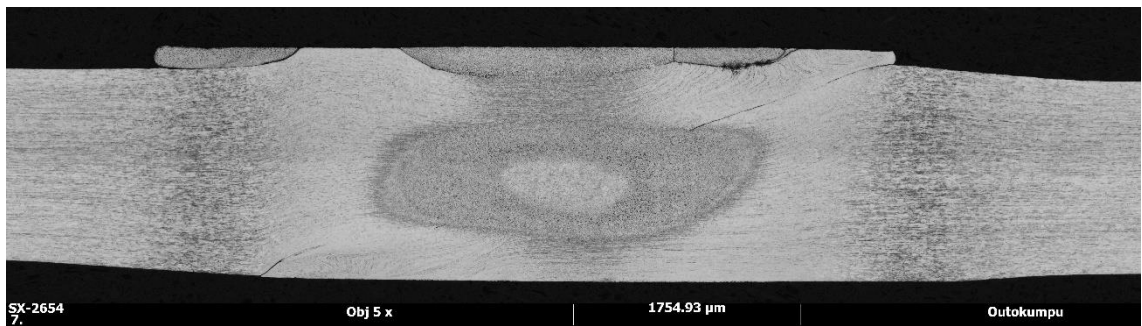
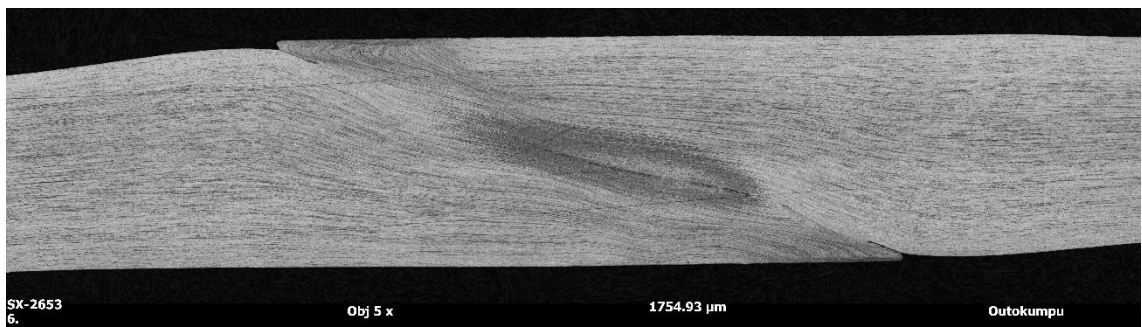
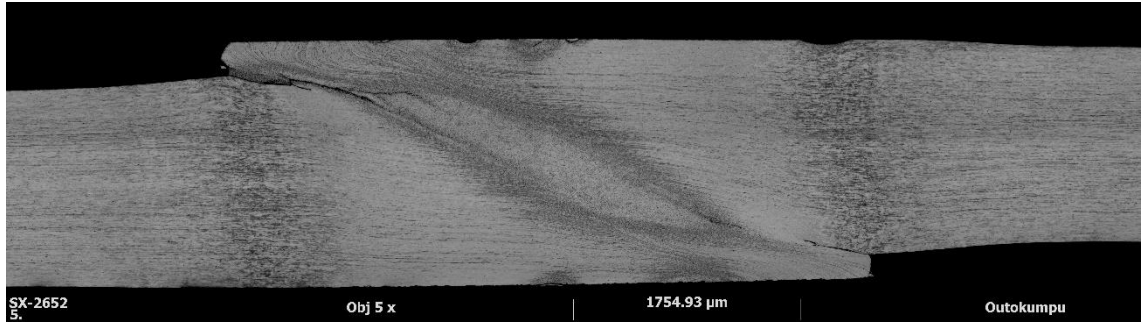
Liite 2. 1(6)

Poikkileikkausheet



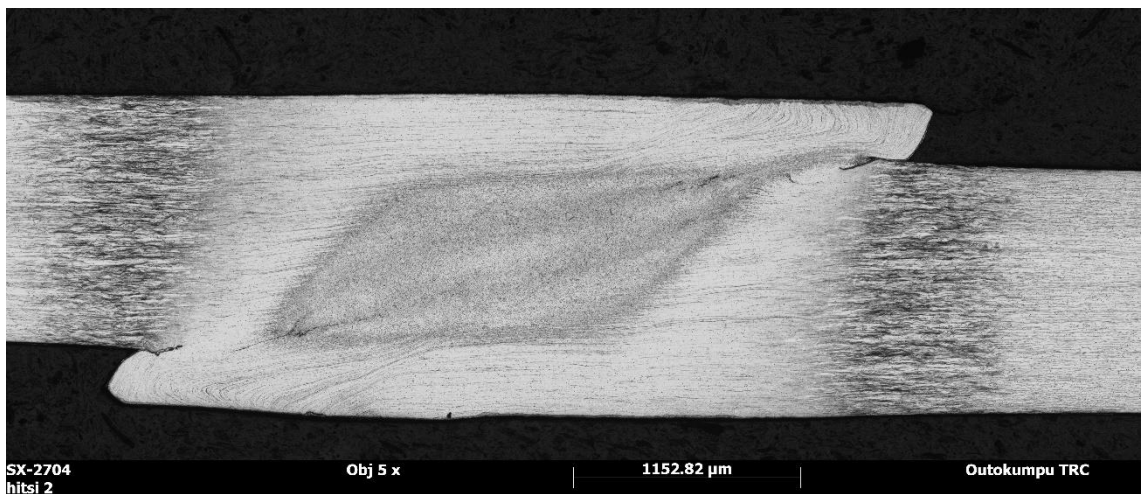
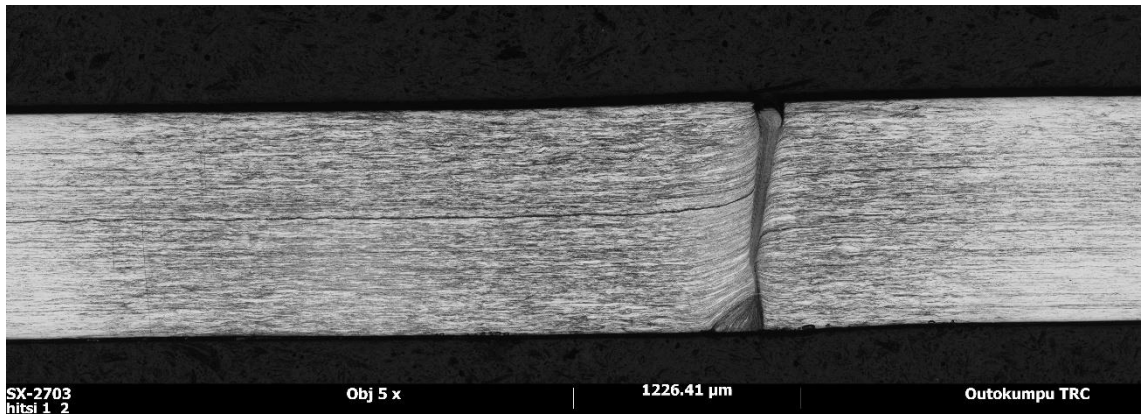
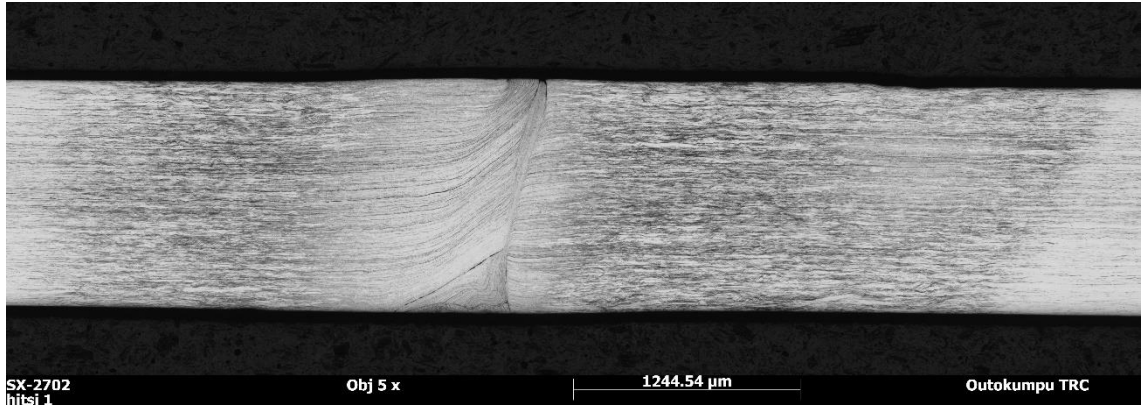
Liite 2. 2(6)

Poikkileikkausheet



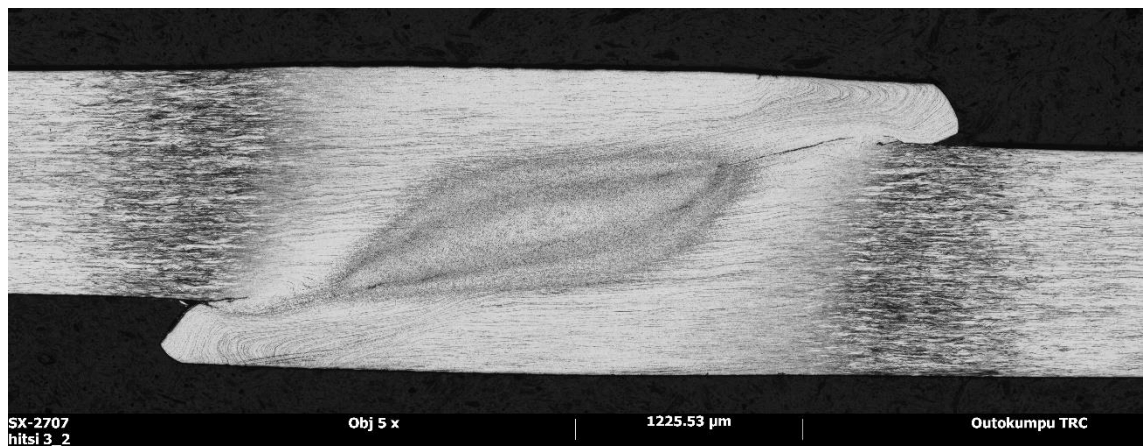
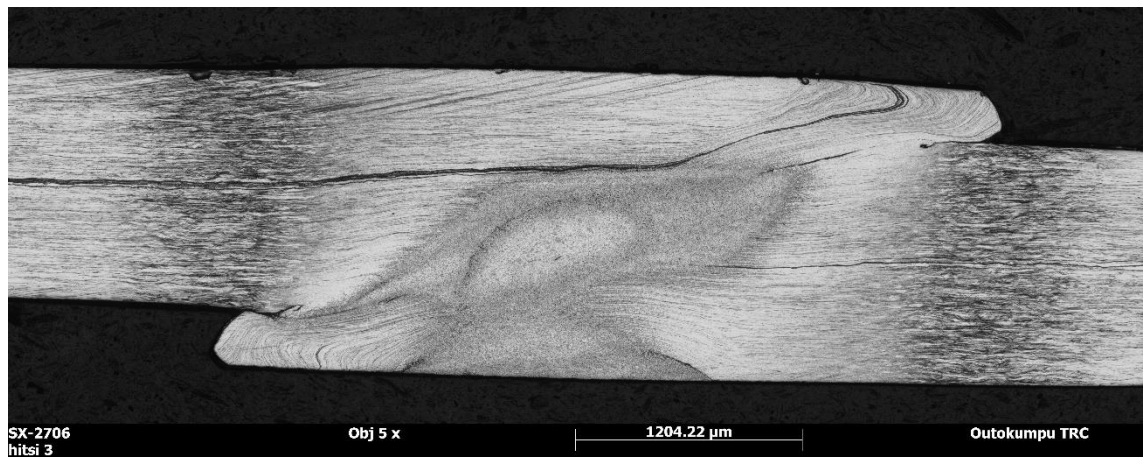
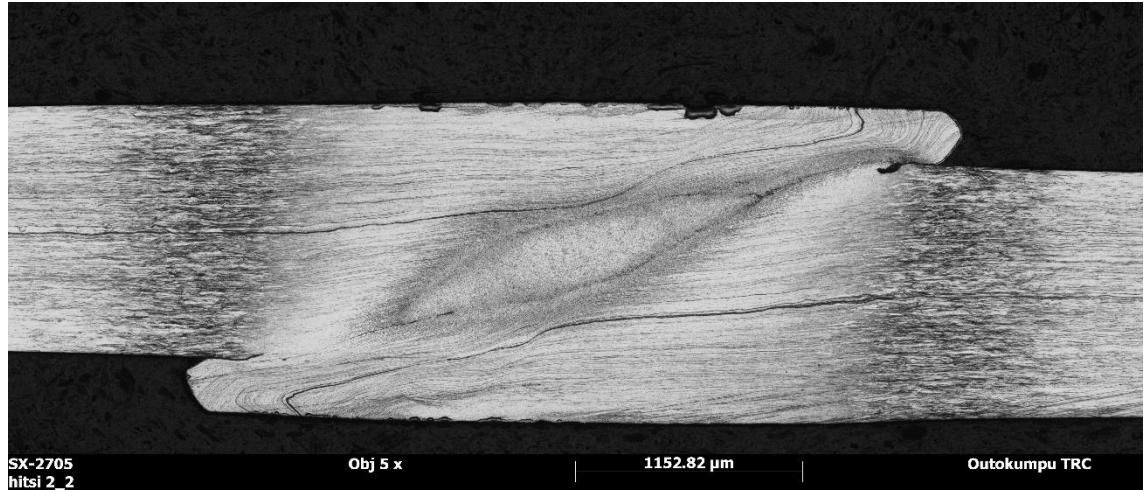
Liite 2. 3(6)

Poikkileikkausheet



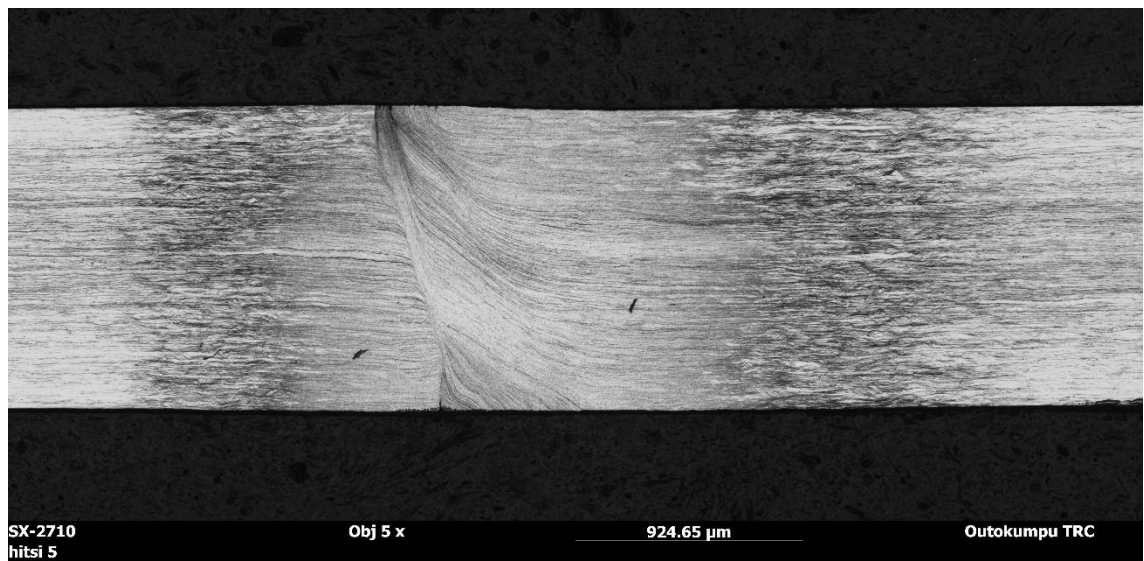
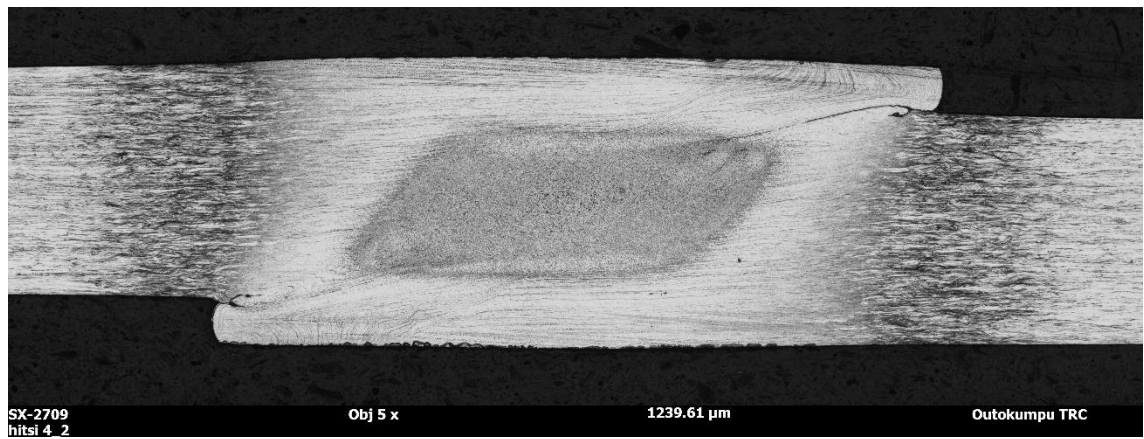
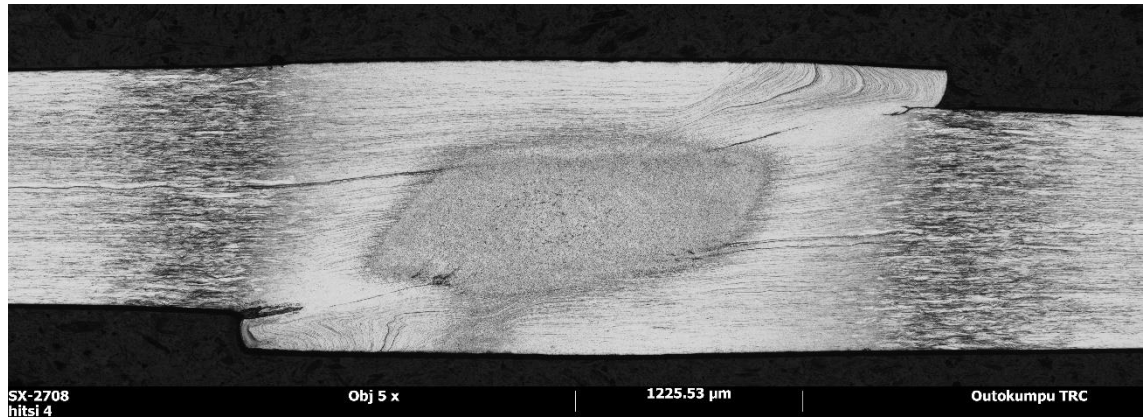
Liite 2. 4(6)

Poikkileikkaushieet



Liite 2. 5(6)

Poikkileikkausheet



Liite 2. 6(6)

Poikkileikkaus

