



**KEYHOLE TIG-HITSAUS PAINELAITEVALMISTUKSESSA:  
MAHDOLLISUUDET SEOSTETTUJEN LAATUTERÄSTEN POHJAPALON  
HITSAAMISESSA**

**KEYHOLE TIG WELDING IN PRESSURE VESSEL MANUFACTURING:  
POSSIBILITIES IN ROOT PASS WELDING OF ALLOY QUALITY STEELS**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Juho Immonen

Tarkastaja: TkT Sakari Penttilä

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Juho Immonen

### **Keyhole TIG-hitsaus painelaittevalmistuksessa: mahdollisuudet seostettujen laatuterästen pohjapalon hitsaamisessa**

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

56 sivua, 34 kuvaa, 1 taulukko ja 10 liitettä

Tarkastaja: TkT Sakari Penttilä

Avainsanat: Keyhole TIG-hitsaus, pohjapalon hitsaaminen, painelaitteet, hitsauskoe, menetelmäkoe

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, voidaanko keyhole TIG-hitsauksella hitsata seostetusta laatuteräksestä valmistettujen painelaitteiden pohjapalkoja. Tutkimuksen tarkoituksena oli kehittää käytössä olevia pohjapalon hitsausmenetelmiä. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, täyttääkö hitsi painelaitteiden hitseille asetetut vaatimukset ja voidaanko hitsaus suorittaa ilman juurikaasua.

Tutkimuksessa tehtiin hitsauskokeita ja alustava menetelmäkoe. P355NL2-levyjen päittäisliitoksen pohjapalkko hitsattiin osaviistettyyn V-railoon ilmaraon ollessa noin 0 mm. Pohjapalon hitsauksen jälkeen koekappaleisiin hitsattiin toinen palkko jauhekaarihitsauksella. Tämän jälkeen koekappaleille tehtiin alustava menetelmäkoe, jonka tulosten avulla voitiin arvioida hitsin laatua.

Hitsauskokeessa havaittiin, että S355- ja P355NL2-teräksien hitsaaminen on mahdollista ilman juurikaasua. Pohjapalon hitsauskoe epäonnistui osittain hitsiin muodostuneiden epämuodostumien ja korkean hitsin kuvun takia. Kokeen perusteella todettiin pohjapalon keyhole TIG-hitsaamisen olevan mahdollista, mutta haastavaa. Alustava menetelmäkoe ei täyttänyt painelaitteiden vaatimuksia, koska yksi pintataivutussauva murtui. Tutkimuksen tulosten pohjalta kuitenkin todettiin, että menetelmälle voi olla potentiaalista käyttöä painelaitteiden pohjapalkojen hitsaamisessa.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Juho Immonen

### **Keyhole TIG welding in pressure vessel manufacturing: possibilities in root pass welding of alloy quality steels**

Bachelor's thesis

2022

56 pages, 34 figures, 1 table and 10 appendices

Examiner: D.Sc. Sakari Penttilä

**Keywords:** Keyhole TIG welding, root pass welding, pressure vessel, welding test, welding procedure test

The topic of this bachelor's thesis was to study the capability of keyhole TIG welding to root pass welding of alloy quality steels. This could be used to manufacture pressure vessels. The aim of the research was to develop root pass welding procedures already in use. The research also studied if the weld fulfills the requirements for pressure vessel welds and is there possibility to conduct the welding without backing gas.

Welding tests and a provisional welding procedure test were made for the research. The root pass of P355NL2 plates was butt welded. There was a V-preparation with root face and a root gap of ~0 mm between the plates. Another bead was welded on top of the root pass using submerged arc welding. Afterwards the provisional welding procedure test was done to evaluate the quality of the weld.

During the welding tests it was discovered that S355 and P355NL2 steels can be welded without backing gas. The root pass welding test partially failed because of the malformation and high face of the weld. This test demonstrated that keyhole TIG welding could be used to root pass welding's, but it's challenging. The provisional welding procedure test didn't fulfill the requirements for pressure vessel welds because one of the face bend test specimens broke. The research nevertheless demonstrated that this procedure has potential for root pass welding of pressure vessels.

## KIITOKSET

Kandidaatintyö tehtiin Refinec Oy:lle ja työssä mukana olivat Metawell Oy ja Lappeenrannan–Lahden teknillisen yliopiston LUT hitsaustekniikan laboratorio. Haluan kiittää Sakari Penttilää ja Riku Turkiaa työn ohjaamisesta. Haluan myös kiittää Jukka Hietasta, joka mahdollisti keyhole TIG-hitsauskokeet sekä hitsaustekniikan laboratorion henkilökuntaa suuresta työstä alustavan menetelmäkokeen tekemisessä.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

$h$	enimmäissyvyys	[m]
$K_r$	kaarevuuden vähimmäisarvo	[1/m]
$p$	paine	[Pa]
$r$	kaarevuussäde	[m]
$s$	sulan tehollinen pituus	[m]
$w$	sulan tehollinen leveys	[m]

### Kreikkalaiset

$\gamma$	pintajännitys	[N/m]
$\lambda$	lämmönjohtavuus	[W/(m·K)]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

### Vakiot

$g$	painovoimakiihtyvyys	9,81 m/s <sup>2</sup>
-----	----------------------	-----------------------

### Lyhenteet

CF-TIG	elektrodin jäädytystä hyödyntävä kaasukaarihitsausprosessi (Cathode Focused Tungsten Inert Gas arc welding)
GTAW	kaasukaarihitsausprosessi (Gas Tungsten Arc Welding)
SAW	jauhekaarihitsaus (Submerged Arc Welding)
TIG	kaasukaarihitsausprosessi (Tungsten Inert Gas Arc Welding)

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Työn tausta ja tavoitteet .....	8
1.2	Työn suorittaminen ja rajausta .....	9
2	Teoria.....	10
2.1	TIG-hitsaus.....	10
2.2	Keyhole TIG-hitsaus .....	13
2.2.1	Elektrodin jäähditys .....	14
2.2.2	Prosessiin vaikuttavat materiaaliominaisuudet .....	15
2.2.3	Muut prosessiin vaikuttavat tekijät .....	19
2.2.4	EWM forceTig.....	21
2.2.5	Fronius ArcTig.....	23
2.3	Painelaitteiden vaatimukset hitseille .....	25
2.3.1	Hitsausohjeen hyväksyminen .....	26
2.3.2	Muut painelaitteiden vaatimukset.....	27
3	Koejärjestelyt ja tulokset .....	28
3.1	Keyhole TIG-hitsaus .....	28
3.1.1	Juurikaasun vaikutus hitsiin.....	29
3.1.2	Pohjapalon hitsaaminen .....	30
3.2	Jauhekaarhitsaus.....	35
3.3	Alustava menetelmäkoe .....	36
3.3.1	Rikkomaton aineenkoetus.....	36
3.3.2	Poikittainen vetokoe .....	37
3.3.3	Poikittainen taivutuskoe.....	38
3.3.4	Iskukoe.....	40
3.3.5	Kovuuskoe .....	41

3.3.6	Makrohietutkimus .....	42
4	Analyysi ja pohdinta.....	44
4.1	Hitsauskoe .....	44
4.2	Alustava menetelmäkoe .....	48
5	Johtopäätökset .....	51
	Lähteet .....	53

## Liitteet

Liite 1. P355NL2 materiaalitodistus

Liite 2. Harjoituskappale K3

Liite 3. Koekappale T1

Liite 4. Lisäainelangan aineodistus

Liite 5. Lisäainejauheen aineodistus

Liite 6. Poikittaisen vetokokeen tulokset

Liite 7. Poikittaisen taivutuskokeen tulokset

Liite 8. Iskukokeen tulokset

Liite 9. Kovuuskokeen pinnan puolen tulokset

Liite 10. Kovuuskokeen juuren puolen tulokset

# 1 Johdanto

Painelaitteiden hitseiltä vaaditaan korkeaa laatua, ja hitsien tulee olla sellaiset, että ne eivät vaaranna turvallisuutta missään tilanteessa. Tässä tutkimuksessa tutkitaan keyhole TIG-hitsausprosessia ja sen mahdollisuuksia seostetun laatuteräksen pohjapalon hitsaamisessa osaviistettyyn V-railoon. Keyhole TIG-hitsausmenetelmän mahdollisuuksia seostetun laatuteräksen pohjapalon hitsaamisessa ei tiedetä, mutta sillä voi olla mahdollisuus korvata käytössä olevat menetelmät tehostaen ja nopeuttaen tuotantoa. Keyhole TIG-hitsauksen yksinkertainen toimintaperiaate ja polttimen pieni koko tekevät siitä potentiaalisen vaihtoehdon pohjapalkojen hitsaamisessa. Keyhole TIG-hitsauksen on todettu soveltuvan materiaaleille, joiden lämmönjohtavuus on suuri, kuten titaanille ja ruostumattomalle teräkselle (Davim 2021, s. 314). Seostetun laatuteräksen pohjapalon hitsaamista keyhole TIG-hitsauksella ei ole kuitenkaan aikaisemmin tutkittu.

## 1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Tämä kandidaatintyö tehdään Refinec Oy:lle, joka on vaativien painelaitteiden, kuten putkilämmönsiirtimien ja painesäiliöiden suunnitteluun sekä valmistukseen erikoistunut konepaja. Refinec Oy etsii hitsausprosessia, joka korvaisi seostettujen laatuterästen pohjapalkojen käsinhitsaamisen parantaen laatua ja kustannustehokkuutta. Pohjapalko tulee voida hitsata ulkopuolelta ilman juuritukea tai juurikaasua ja hitsien tulee täyttää standardien sekä lainsäädännön vaatimukset. Käytetyn menetelmän tulee soveltua pohjapalon hitsaamiseen, vaikka ilmarako muuttuisi hitsausprosessin aikana. Hitsausprosessin kehittämisen tavoitteena on myös parantaa työntekijöiden ergonomiaa sekä saada hitsien laadusta parempaa ja tasaisempaa.

Tutkimusongelma on seostetusta laatuteräksestä valmistettavien painelaitteiden pohjapalon hitsausmenetelmän kehittäminen. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, soveltuuko keyhole TIG-hitsaus painelaitteiden pohjapalkojen hitsaamiseen ja millainen hitsin laatu on. Hypoteesina on, että painelaitteiden pohjapalkojen hitsaaminen on mahdollista keyhole TIG-



hitsauksella. Toisena hypoteesina on, että keskittyneen lämmöntuonnin ja nopean jäähtymisen takia pohjapalon hitsin sekä muutosvyöhykkeen kovuus nousee merkittävästi. Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Voidaanko keyhole TIG-hitsauksella hitsata seostetusta laatuteräksestä valmistettujen painelaitteiden pohjapalkoja?
2. Onnistuuko hitsaus ilman juurikaasua?
3. Saavutetaanko menetelmällä painelaitteiden hitseiltä vaadittava laatu?

## 1.2 Työn suorittaminen ja rajaus

Tutkimuksessa hyödynnetään triangulaatiota tutkimuksen luotettavuuden varmistamiseksi ja tulosten verifioimiseksi. Keyhole TIG-hitsaukseen, prosessimuuttujiin ja painelaitteiden vaatimukseen perehdytään kirjallisuuskatsauksen avulla. Keyhole TIG-hitsauksen soveltuvuutta seostetun laatuteräksen pohjapalkojen hitsaamiseen tutkitaan hitsauskokeiden avulla. Hitsauskokeiden tuloksia verrataan aiempiin tutkimuksiin ja kirjallisuuteen tulosten verifioimiseksi sekä kokeessa havaittujen ilmiöiden selittämiseksi. Koehitsatuille paloille tehdään alustava menetelmäkoe, jotta saadaan konkreettisia tuloksia hitsin laadusta ja siitä, täyttääkö hitsi painelaitteiden vaatimukset. Asiantuntijahaastattelujen avulla verifioidaan kokeiden tuloksia, pyritään selittämään tutkimuksessa havaittavia ilmiöitä ja hankitaan tietoa keyhole TIG-hitsauksesta. Työn hitsauskokeissa on mukana Metawell Oy ja alustavassa menetelmäkokeessa Lappeenrannan–Lahden teknillisen yliopiston LUT hitsaustekniikan laboratorio.

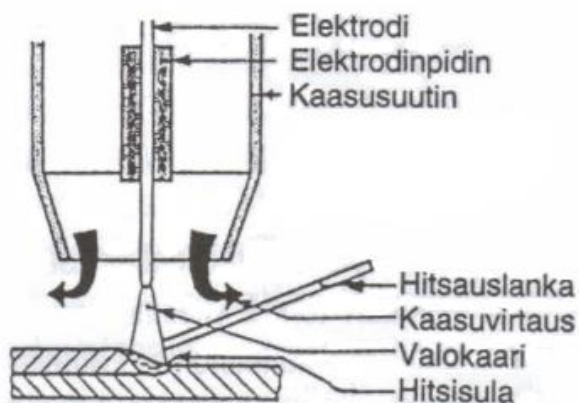
Tutkimuksessa keskitytään seostettujen laatuterästen pohjapalkojen hitsaamiseen ja hitsin laadun tutkimiseen. Ilmaraon muuttumista hitsauksen aikana ei tarkastella tässä tutkimuksessa, vaan oletetaan ilmaraon olevan noin 0 mm. Keyhole TIG-hitsauslaitteeseen investoimisen kannattavuutta tai vaikutusta tuotantoprosessiin ei myöskään tässä tutkimuksessa tutkita. Tutkimuksessa pyritään siis selvittämään, onko painelaitteiden pohjapalon hitsaaminen 0 mm:n ilmaraolla mahdollista keyhole TIG-hitsausmenetelmällä.

## 2 Teoria

Tässä luvussa käsitellään TIG-hitsauksen periaate, sen variaatio keyhole TIG-hitsaus sekä painelaitteiden vaatimukset hitseille. Asiaan perehdytään kirjallisuuskatsauksen ja asiantuntijahaastattelujen avulla. Keyhole TIG-hitsausprosessiin vaikuttavat prosessimuuttujat esitellään, jotta menetelmän soveltuvuutta seostettujen laatuterästen pohjapalon hitsaamiseen voidaan arvioida. Työssä esitellään myös Suomessa yleisesti saatavissa olevat keyhole TIG-hitsauslaitteistot. Painelaitteiden hitseille asettamat vaatimukset esitellään, jotta ymmärretään lainsäädännöstä ja valmistusprosessista aiheutuvat vaatimukset hitseille ja hitsausprosessille.

### 2.1 TIG-hitsaus

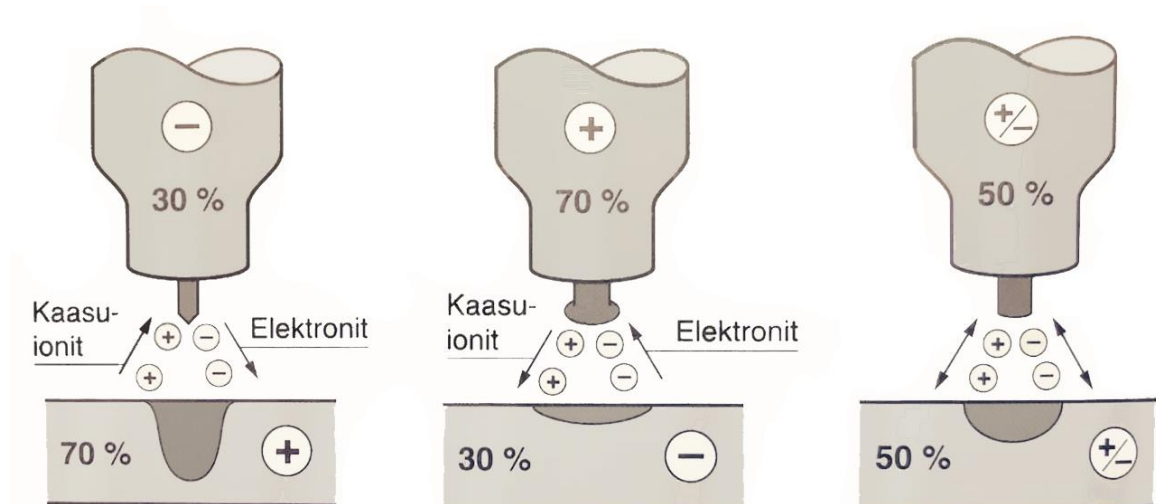
TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas arc welding) eli volframi-inerttikaasukaarihitsaus on kaasukaarihitsausprosessi. Prosessi tunnetaan myös nimellä GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) sekä WIG (Wolfram-Inertgasschweissen). Valokaari palaa sulamattoman volframi-elektrodin ja työkappaleen välillä sulattaen työkappaletta muodostaen hitsisulan. (Lukkari 2002, s. 249.) Hitsaustapahtumaa ja elektrodia suojaa inertti suojakaasu, joka on yleensä heliumia, argonia tai niiden seosta (Lepola & Ylikangas 2016, s. 130). TIG-hitsauksen periaate on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. TIG-hitsauksen periaate (Lukkari 2002, s. 249).

TIG-hitsaus voidaan suorittaa ilman lisäainetta, syöttämällä lisäaine käsin tai langansyöttölaitteella. Ilman lisäainetta hitsataan yleensä todella ohuita metalleja (Cary & Helzer 2005, s. 72). Käsinhitsauksessa hitsainta kuljetetaan toisella kädellä ja toisella kädellä syötetään lisäainetta valokaareen. Mekanisoidussa TIG-hitsauksessa lisäaine syötetään langansyöttölaitteella ja poltinta liikutetaan kuljetuslaitteella. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 121.)

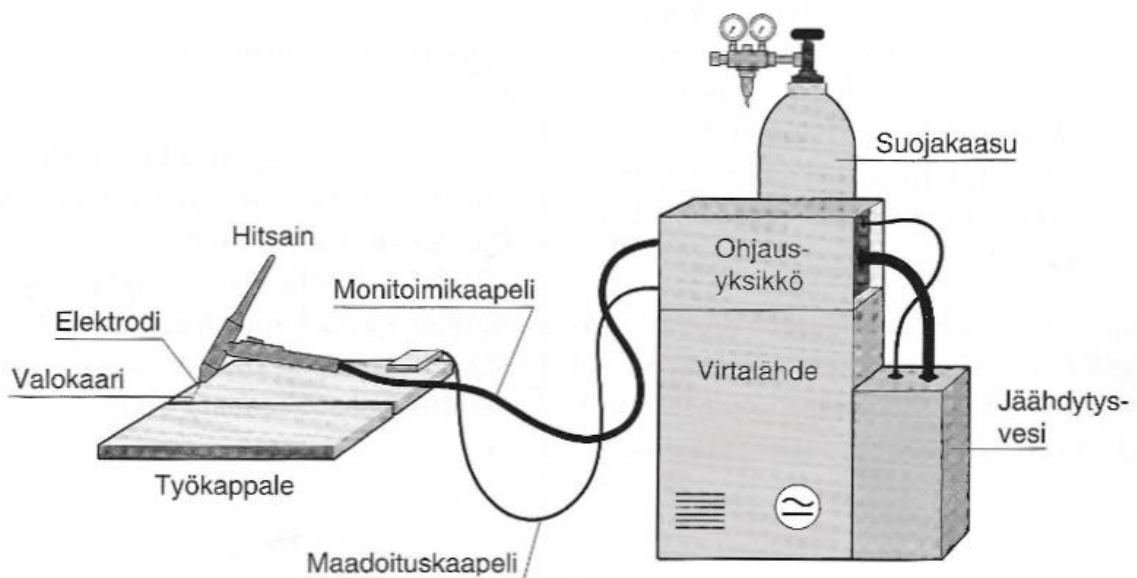
Sekä tasa-, että vaihtovirtaa voidaan käyttää TIG-hitsauksessa. Kun hitsataan tasavirralla elektrodi kytkettynä miinusnapaan (DC-), lämmöstä kohdistuu noin 70 % työkappaleeseen ja noin 30 % elektrodiin. Kun elektrodi on kytketty plusnapaan (DC+), suurin osa lämmöstä kohdistuu elektrodiin. Yleisemmin käytetty menetelmä on elektrodin kytkeminen miinusnapaan, koska sillä saavutetaan syvämpi ja kapeampi tunkeuma. Vaihtovirralla (AC) hitsattaessa elektrodin napaisuus vaihtuu virran taajuuden mukaan ja valokaari sammuu napaisuuden vaihtuessa. Vaihtovirralla hitsattaessa lämpöä jakautuu tasan elektrodin ja työkappaleen välillä. Napaisuuden vaihtumisesta on hyötyä hitsattaessa esimerkiksi alumiinia ja magnesiumia, koska sen avulla saadaan poistettua metallin pinnalla oleva oksidikalvo. (Lukkari 2002, s. 250.) Virtalajit ja niiden vaikutukset lämpöjakaumaan, tunkeumaan ja elektrodin paksuuteen on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Virtalajien napaisuuksien vaikutukset lämpöjakaumaan ja tunkeumaan sekä elektrodin paksuuteen (Lepola & Ylikangas 2016, s. 122).

TIG-hitsauksella voidaan hitsata lähes kaikkia metalleja, kuten alumiinia, kuparia, titaania ja magnesiumia. Sillä voidaan hitsata myös seostamattomia, niukkaseosteisia ja runsasseosteisia teräksiä. Yleisimpiä TIG-hitsauksessa käytettyjä materiaaleja ovat ruostumaton teräs ja alumiini. Materiaalipaksuus, johon TIG-hitsaus soveltuu alkaa 0,1 mm:stä. 6–8 mm paksuisilla materiaaleilla TIG-hitsausta käytetään lähinnä pohjapalkojen hitsaukseen. (Lukkari 2002, s. 256–257.)

TIG-hitsauksessa valokaari ja lisääineen tuonti ovat erillään toisistaan, mikä mahdollistaa hitsausenergian ja lisääineen syötön säätelämisen toisistaan riippumatta. Tämä johtuu TIG-hitsauksessa käytetystä sulamattomasta elektrodista. Plasmahitsausta lukuun ottamatta muissa kaarihitsausprosesseissa lisääinelanka tai puikko toimivat sulavana elektrodina. Sulamattoman elektrodin ansiosta TIG-hitsauksella on mahdollistaa hallita sulaa ja tunkeumaa tarkasti. Hitsatessa voidaan käyttää pienimmillään jopa muutaman ampeerin virtaa. Nämä ominaisuudet tekevät TIG-hitsauksesta ylivoimaisen menetelmän pohjapalkojen sekä ohuiden materiaalien hitsaamiseen. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 121.) TIG-hitsauslaitteisto on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. TIG-hitsauslaitteisto (Lepola & Ylikangas 2016, s. 121).

## 2.2 Keyhole TIG-hitsaus

Keyhole TIG-hitsausmenetelmällä voidaan läpihitsata yhdellä palolla ilman lisäainetta tai railonvalmistusta. Keyhole TIG-hitsauslaitteisto on halvempi kuin muissa keyhole-menetelmissä käytetyt laitteistot ja sillä voidaan suorittaa hitsauksia erikoisiin tarpeisiin. Tämän takia keyhole TIG-hitsauksella nähdään olevan potentiaalista käyttöä teollisessa tuotannossa. Keyhole TIG-hitsaus soveltuu parhaiten materiaaleille, joiden lämmönjohtavuus on pieni, kuten esimerkiksi titaanille ja ruostumattomalle teräkselle. (Davim 2021, s. 314–315.)

Yleensä keyhole-hitsausta on tehty plasmahitsauksella. Plasmahitsauksessa keyhole muodostuu valokaaren palaessa kaasuatmosfääriin läpi, joka saa lämmön siirtymään tehokkaasti hitsattavaan kappaleeseen (Lukkari 2002, s. 272, 274). V-railon pohjapalkoa hitsattaessa polttimen koon ja geometrian tulisi olla sellainen, ettei railokulmaa tarvitse polttimen takia kasvattaa. Plasmahitsauksen poltin on yleensä keyhole TIG-hitsauspoltinta suurempi ja plasmahitsauksen toimintaperiaate monimutkaisempi. Tämän takia keyhole TIG-hitsaus voisi olla potentiaalinen vaihtoehto pohjapalkojen hitsaamisessa. (Penttilä 2022.)

Perinteisessä korkeavirtaisessa TIG-hitsauksessa tunkeuman aiheuttaa korkea lämmöntuonti ja kaarivoiman aiheuttama sulan uppoaminen perusmateriaaliin. Korkealla virralla hitsattaessa tunkeuman hallinta voi olla haastavaa ja prosessi voi muuttua epävakaaksi kaaripaineen aiheuttaman kraatterin tai ontelon muodostuessa hitsisulaan. Prosessia voidaan vakauttaa vähentämällä kaarivoimaa ja jakamalla se tasaisemmin sulan päälle, mikä vähentää kaaren huippupainetta (Lathabai et al. 2001, s. 82). Toinen vaihtoehto on tarkoituksella kasvattaa kaaren huippupainetta niin kauan, että ontelo työntyy koko hitsattavan kappaleen läpi. Näin hitsiin syntyy pieni reikä: keyhole. (Jarvis 2001, s. 35, 37.)

Keyhole:n on oltava riittävän pieni, jotta se sulkeutuu valokaaren mentyä sen ohi. Aukon sulkeuduttua hitsi on valmis. Kuvassa 4 on sivukuva keyhole TIG-hitsauksesta. Prosessin on

havaittu olevan vakaa, koska paine vapautuu ontelon kautta. Keyhole:n onnistunut muodostuminen riippuu useista prosessimuuttujista, kuten volframielektrodin geometriasta, kaarijännitteestä, hitsausvirrasta, suojakaasusta, hitsausnopeudesta sekä hitsattavan materiaalin ominaisuuksista ja mitoista. Prosessiin vaikuttavia hitsattavan materiaalin ominaisuuksia ovat sulan lämmönjohtavuus, materiaalin tiheys ja nestemäisen sulan pintajännitys (Jarvis 2001, s. 48–49). Lisäksi prosessiin vaikuttaa elektrodin jäähtytys (Liu et al. 2019, s. 34). Menetelmä on saatu soveltumaan tietyillä materiaaleilla monelle eri materiaalipaksuudelle valitsemalla oikeanlainen elektrodin geometria ja säätämällä hitsausnopeutta sekä virtaa. (Lathabai et al. 2001, s. 82–83.)

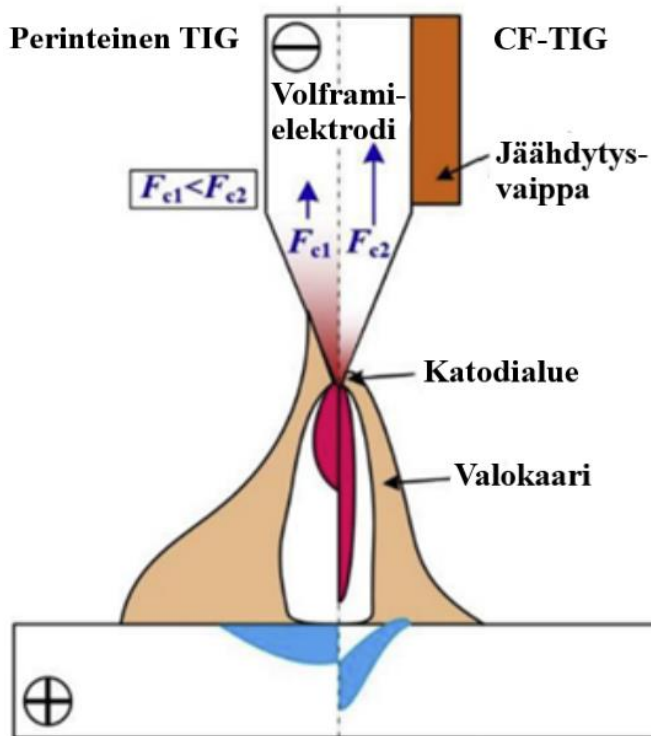


Kuva 4. Sivukuva keyhole TIG-hitsauksesta (mukaiillen: Jarvis 2001, s. 39).

### 2.2.1 Elektrodin jäähtytys

Keyhole TIG-hitsauksessa käytetään tasavirtalähdettä ja elektrodi kytketään miinusnapaan (DC-) (Jarvis 2001, s. 40). Noin 70 % lämmöstä kohdistuu hitsattavaan kappaleeseen ja noin 30 % elektrodiin (Lukkari 2002, s. 250). Liu et al. tekemässä tutkimuksessa tutkittiin volframielektrodin jäähtytysten vaikutusta katodialueen fokuusoitumiseen. Prosessia kutsutaan nimellä CF-TIG (cathode focused TIG). Tutkimuksessa käytettiin kahta itsetehtyä

hitsauspoltinta, joista toista jäähdytettiin kiertävän veden avulla. Toista hitsauspoltinta jäähdytettiin kiertävän veden sekä kuparisen jäähdytysvaipan avulla. Hitsauspoltin, jota jäähdytettiin sekä kiertävän veden, että jäähdytysvaipan avulla jäähdyi tehokkaammin kuin poltin, jota jäähdytettiin pelkästään kiertävän veden avulla. Katodialuetta volframi-elektrodin päässä kuvattiin ja sen korkeus sekä leveys mitattiin. Tutkimuksessa verrattiin kahdella eri jäähdytysasteella toimivan polttimen vaikutusta kaaren ominaisuuksiin. Tutkimuksessa todettiin, että volframi-elektrodin tehokkaalla jäähdytyksellä on mahdollista saada katodialueesta fokusoidumpi ja valokaaresta kapeampi (Liu et al. 2019, s. 25–27, 32, 34.) Kuvassa 5 on esitetty elektrodin jäähdyttämisen vaikutus valokaareen, sulaan ja katodialueeseen.



Kuva 5. CF-TIG-hitsauksen periaate (mukaiillen: Liu et al. 2019, s. 26).

### 2.2.2 Prosessiin vaikuttavat materiaaliominaisuudet

Keyhole TIG-hitsauksen on todettu soveltuvan metalleille, joiden lämmönjohtavuus on matalahko, esimerkiksi titaanille (Lathabai et al. 2001 s. 92) ja AISI 316L-ruostumattomalle

teräkselle (Feng et al. 2015, s. 30). Huang et al. tutkimuksessa hitsattiin AISI 304-ruostumatonta terästä ja Q345-rakenneterästä. Rakenneteräksellä on lähes kolminkertainen lämmönjohtavuus verrattuna AISI 304-ruostumattomaan teräkseen. Tutkimuksessa todettiin, että korkea lämmönjohtavuus teki keyhole:n ominaisuudet todella huonoiksi, koska hitsausvyöhykkeelle kerääntyy liikaa lämpöä. (Huang et al. 2018, s. 4042–4043.) Eri materiaalien lämmönjohtavuusarvoja on esitetty taulukossa 1.

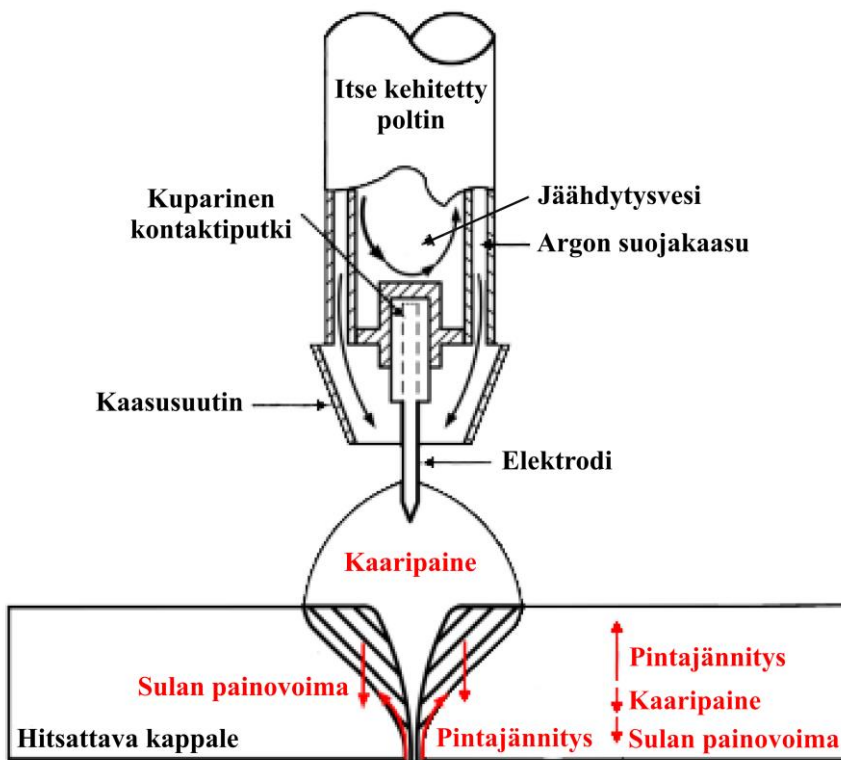
Taulukko 1: Eri materiaalien lämmönjohtavuuksia

Materiaali	Lämmönjohtavuus $\lambda$ [W/(m·K)]
Titaani	16–22 (Fort Wayne Metals)
AISI 316L-ruostumaton teräs	14,0–15,9 (MatWeb 2022a)
AISI 304-ruostumaton teräs	16,2–21,5 (MatWeb 2022b)
Q345-rakenneteräs	13,2–41,3 (Steel Grades)

Fan et al. tutkimuksessa hitsauspoltinta sekä hitsattavaa kappaletta jäähdytettiin kiertävällä vedellä. Rakenneterästä Q345 hitsattiin, kun se oli upotettu osittain veteen. Jäähdytyksellä saatiin pienennettyä juuren leveyttä, pidettyä paremmin sulaa paikallaan sekä vakautettua keyhole:a. Tutkimuksessa ei havaittu merkkejä vetyhalkeamista tai huokoisuudesta hitsissä. Hitsin mikrorakenne hitsausliitoksessa oli monimutkainen. Mikrorakenteessa oli havaittavissa selvä ero hitsin pinnan ja juuren puolella. (Fan et al. 2017, s. 2209, 2215.)

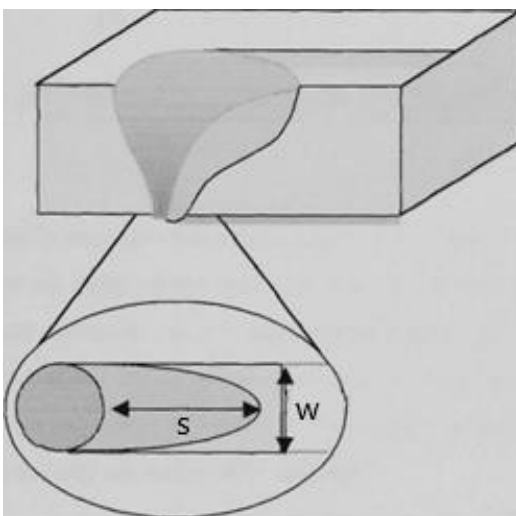
Nestemäisen sulan jähmettyessä pintajännityksen on pidettävä sulaa paikallaan, jotta hitsaus onnistuu (Lathabai et al. 2001, s. 83). Vakaan keyhole:n muodostuminen edellyttää dynaamista tasapainoa voimien väliltä. Sulaan vaikuttavat voimat on esitetty kuvassa 6. Kaaripaine sekä nestemäiseen sulaan kohdistuva painovoima ovat merkittävimmät alaspäin suuntautuvat voimat. Merkittävin ylöspäin suuntautuva voima on sulan pintajännitys. (Fan et al. 2017, s. 2208.)





Kuva 6. Voimat keyhole TIG-hitsauksessa (mukaillen: Fan et al. 2017, s. 2208).

Keyhole:n käyttäytymistä voidaan arvioida tarkastelemalla pintajännitystä, joka estää juuren puolella olevaa sulaa romahtamasta. Merkitään juurenpuolen sulan tehollista leveyttä kirjaimella  $w$  ja pituutta kirjaimella  $s$  (kuva 7). (Jarvis 2001, s. 73.)



Kuva 7. Termien  $s$  ja  $w$  määrittäminen (mukaillen: Jarvis 2001, s. 73).

Suurin materiaalipaksuus, jota keyhole TIG-hitsauksella voidaan hitsata, lasketaan seuraavilla kaavoilla (Jarvis 2001, s. 73–74):

$$r_a = \frac{w}{2} \quad (1)$$

$$r_b = s \quad (2)$$

$$K_r = \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \quad (3)$$

Kaarevuussäteen  $r_a$  arvo lasketaan kaavalla (1) ja kaarevuussäteen  $r_b$  arvo kaavalla (2).

Näiden avulla lasketaan keskimääräinen kaarevuuden vähimmäisarvo  $K_r$  kaavalla (3).

$$p = \gamma K_r \quad (4)$$

$$p = \rho g h \quad (5)$$

Pinnan puhkaisemiseen tarvittavaa painetta merkitään kirjaimella  $p$  ja pintajännitystä kirjaimella  $\gamma$ . Pinnan puhkaisemiseen vaadittava paine lasketaan kaavalla (4). Sulan metallin aiheuttama paine, joka kohdistuu juureen, voidaan laskea enimmäissyvyyden  $h$ , putoamiskiihtyvyyden  $g$  ja tiheyden  $\rho$  avulla käyttäen kaavaa (5).

Merkitsemällä kaavojen (4) ja (5) paineet yhtä suuriksi, voidaan laskea enimmäissyvyys, jonka pintajännitys voi kantaa:

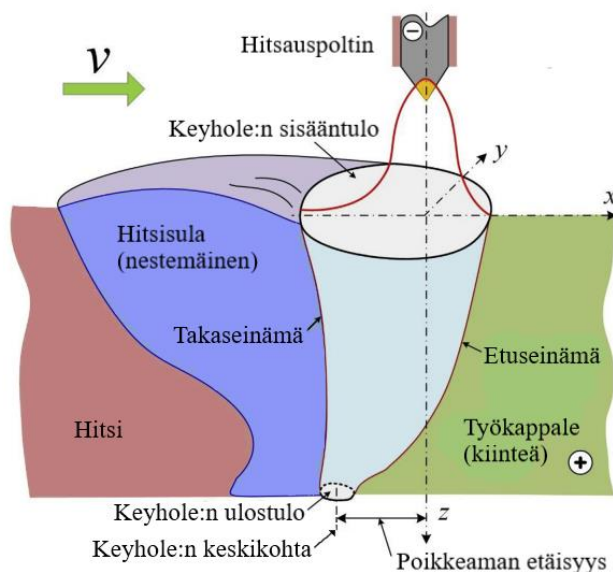
$$h = \frac{\gamma K_r}{\rho g} \quad (6)$$

Enimmäissyvyyden  $h$  tulee olla suurempi kuin materiaalipaksuus, jotta sula ei romahda (Jarvis 2001, s. 74). Suurin materiaalipaksuus, jota keyhole TIG-hitsauksella voidaan hitsata, lasketaan kaavalla (6).

Juuren leveys kasvaa lämmönjohtavuuden kasvaessa. Tämän ja kaavan (6) takia materiaaleja, joilla on alhainen lämmönjohtavuus, suuri sulan pintajännitys, pieni sulan tiheys tai jotka ovat ohuita, on helpompi hitsata keyhole TIG-hitsauksella. (Lathabai et al. 2001, s. 83.)

### 2.2.3 Muut prosessiin vaikuttavat tekijät

Hitsausnopeuden arvioidaan olevan kääntäen verrannollinen hitsattavan materiaalin paksuuteen (Lathabai et al. 2001, s. 83). Hitsausnopeuden ollessa nolla, keyhole:n ontelo on akselisymmetrinen ja samassa linjassa polttimen keskilinjan kanssa. Hitsausnopeuden ollessa erisuuri kuin nolla, keyhole:n ulostuloaukko poikkeaa polttimen keskilinjasta. Liian pienellä hitsausnopeudella nestemäinen hitsisula romahtaa helposti. Jos hitsausnopeus on liian suuri, avoin keyhole ei synny ja prosessi on epävaka. Hitsausnopeuden kasvaessa keyhole:n halkaisija pienenee ja ulostuloaukon poikkeama polttimen keskilinjasta kasvaa. Hitsausvirran kasvaessa kaaripaine sekä kappaleeseen kohdistuvan lämmön määrä kasvavat. Sen lisäksi keyhole:n halkaisija suurenee ja ulostuloaukon poikkeama polttimen keskilinjasta pienenee. Hitsausnopeus vaikuttaa myös kappaleeseen kohdistuvan lämmön määrään. (Liu et al. 2017a, s. 353–355, 357–358, 360–361.) Keyhole:n parametrien määrittäminen ja muoto on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Keyhole:n parametrit ja muoto (mukaillen: Liu et al. 2017a, s. 335).

TIG-hitsauksessa muiden hitsausprosessien tavoin hitsausvirran suuruus vaikuttaa eniten tunkeumaan (Lepola & Ylikangas 2016, s. 136). Pienintä virtaa, jolla keyhole muodostuu, sanotaan kynnysvirraksi. Kun virta on kynnysvirtaa suurempi, hitsin laatu huononee reunahaavan takia (Davim 2021, s. 318.) Korkeataajuista virtaa (38.6 kHz) käytettiin hitsattaessa matalaseosteista rakenneterästä Q345. Korkeataajuisen virran käyttäminen teki valokaaresta kapeamman ja laski kynnysvirtaa verrattuna perinteiseen keyhole TIG-hitsaukseen. (Fang et al. 2017, s. 281, 286.)

TIG-hitsauksessa kaarijännitteen suuruus määräytyy valokaaren pituuden sekä virtalähteen ominaiskäyrän mukaisesti, minkä vuoksi sitä ei voi säätää erikseen. Kaarijännite on yleensä noin 12 V – 15 V. Valokaaren pituuden kasvaminen nostaa kaarijännitettä. Kun kaarijännite kasvaa, lämpö kohdistuu suuremmalle alueelle, mikä pienentää tunkeumaa. Lyhyellä valokaarella hitsatessa suojakaasu suojaa tehokkaammin hitsiä ja elektrodia. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 136.)

Keyhole TIG-hitsauksessa käytetään kartiomaisia elektrodin kärkiä. Kokeellisessa tutkimuksessa on tutkittu elektrodin halkaisijan ja kärjen kulman vaikutusta kynnysvirtaan hitsattaessa ruostumatonta duplex-terästä. Elektrodin kärkikulman pienentäminen ja halkaisijan kasvattaminen laskivat kynnysvirran suuruutta. Kärkikulman vaikutus kynnysvirran suuruuteen on suurempi kuin elektrodin halkaisijan vaikutus. (Davim 2021, s. 322.)

TIG-hitsauksessa käytetään lähes poikkeuksetta inerttiä suojakaasua volframielektrodin kestävyuden takia. Suojakaasu suojaa hitsaustapahtumaa sekä elektrodia ilman hapettavalta vaikutukselta. Argon on yleisin TIG-hitsauksessa käytetty suojakaasu. (Lepola & Ylikangas 2016, s. 130.) Huang et al. ja Fang et al. tekemissä tutkimuksissa hitsattiin niukkaseosteista terästä Q345 onnistuneesti käyttäen suojakaasuna puhdasta argonia (Huang et al. 2018, s. 4042; Fang et al. 2017, s. 282). TIG-hitsauksen tunkeumaa on saatu kasvatettua käyttämällä argonin ja heliumin seoskaasua tai lisäämällä vetyä suojakaasuun (Niagaj 2014, s. 48).

Liu et al. (2017b) tutkivat juurikaasun vaikutusta hitsattaessa 16Mn-teräslevyjä. Ilman juurikaasua hitsattaessa havaittiin, että hitsisulan hallinta on vaikeaa ja hitsisula romahtaa kappaleen läpi. Tämä johtuu nestemäisen hitsisulan reagoimisesta hapen kanssa. Happi pienentää sulan pintajännitystä ja aiheuttaa hitsisulan romahtamisen. Kun juurikaasuna käytettiin puhdasta argonia, hitsisulan romahtamiselta vältyttiin. (Liu et al. 2017b, s. 136–137.)

#### 2.2.4 EWM forceTig

Yksi keyhole TIG-hitsauslaitteita valmistava yritys on EWM. Yritys on kehittänyt keyhole TIG-hitsauslaitteiston, joka tunnetaan nimellä forceTig. Se perustuu tehokkaaseen virtalähteeseen ja elektrodin jäähtymiseen. EWM:n esitteen mukaan jäähtymisen ansiosta voidaan jatkuvasti hitsata 1000 A virralla ja valokaaresta saadaan kapeampi sekä vakaampi. Laitteistolla voidaan hitsata yhdellä palolla 10 mm:n paksuisia runsasseosteisia teräksiä ilman railonvalmistusta tai juuren tukemista. (EWM 2021, s. 2.)

Hitsauspolttimia on saatavana eri rakenteilla, joista pienin kestää 500 A:n suuruisen virran jatkuvan käytön ja vastaavasti suurin 1000 A:n suuruisen virran jatkuvan käytön. Laitteisto voidaan varustaa myös langansyöttölaitteistolla sekä lisäainelangan esilämmityksellä. Suositellut virtalähteiden koot ovat 550 A tai 1000 A. (EWM 2021, s. 2–3, 6–7.)

EWM forceTig-hitsauslaitteistoa voidaan ohjata Metawell Oy:n kehittämällä ohjausjärjestelmällä. Ohjausjärjestelmä ottaa huomioon ilmaraon muuttumisen hitsauksen aikana säätämällä muun muassa hitsausvirtaa ja langansyötön nopeutta. Järjestelmällä voidaan ohjata myös oheislaitteita, kuten pyörittäjää. (Hietanen 2022b.)

ForceTig-hitsauslaitteistolla on hitsattu onnistuneesti säiliötä, jonka halkaisija on 8 m. Säiliö on valmistettu ruostumattomasta teräksestä ja hitsaus suoritettiin vaaka-asennossa (PC). Kuva 9 esittää kyseistä tilannetta. ForceTig-hitsauslaitteistolla on myös onnistuneesti kehähitsattu ruostumattomasta teräksestä valmistetun putken päittäisliitos jalkoasennossa

(PA). Tilanne on esitetty kuvassa 10. Juurikaasuna käytettiin 100 % argonia, putken halkaisija oli 140 mm, seinämäpaksuus 4 mm ja hitsausnopeus 850 mm/min. Suojakaasuna käytettiin vedyn ja argonin seoskaasua, jossa oli 95 % argonia ja 5 % vetyä. (Hietanen 2022a.)



Kuva 9. EWM forceTIG: säiliön hitsaus (mukaiillen: Hietanen 2022a).

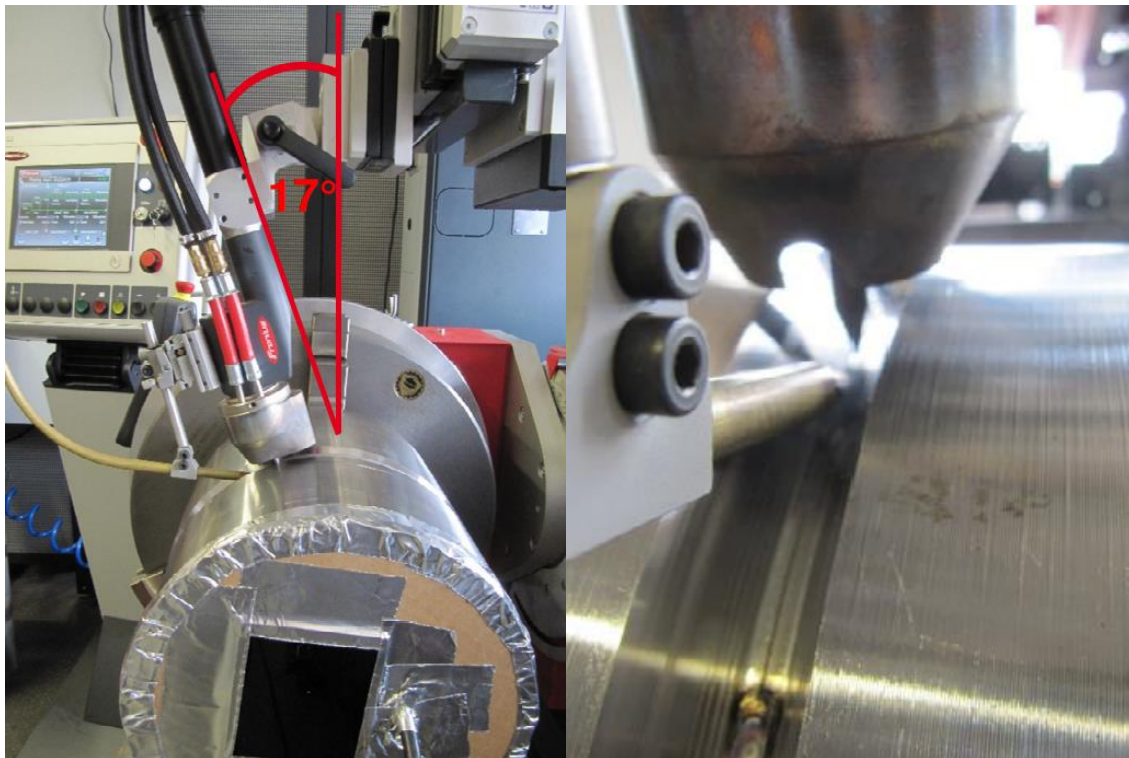


Kuva 10. EWM forceTIG: putken kehähitsi.

### 2.2.5 Fronius ArcTig

Froniuksen ArcTig-hitsauslaitteiston toiminta perustuu myös elektrodin tehokkaaseen jäähtytykseen, jolla valokaaresta saadaan kapeampi ja vakaampi. Laitteistolla voidaan hitsata yhdellä palolla 10 mm:n paksuisia runsasseosteisia levyjä ja putkia ilman suuria esivalmisteluja. Olemassa olevia yli 400 A:n TIG-virtalähteitä voidaan päivittää ArcTig-prosessille vaihtamalla hitsauspoltin ja lisäämällä ylimääräinen lämmönvaihdin. (Fischer 2018.)

ArcTig-hitsauskokeessa on kehähitsattu kuvan 11 mukaisesti putkien päittäisliitoksen pohjapalko. Hitsattavaan kappaleeseen oli koneistettu kuvan 11 mukainen railo, jonka juuripinta oli 6 mm. Poltin oli 17 asteen kulmassa, hitsausvirta 440 A, langansyötönnopeus 124 cm/min ja hitsausnopeus 16 cm/min. Suojakaasuna ja juurikaasuna käytettiin 100 % argonia. Kuvassa 12 on esitetty pohjapalko ja pohjapalosta tehty makrohie. (Lehtomaa 2022b.)



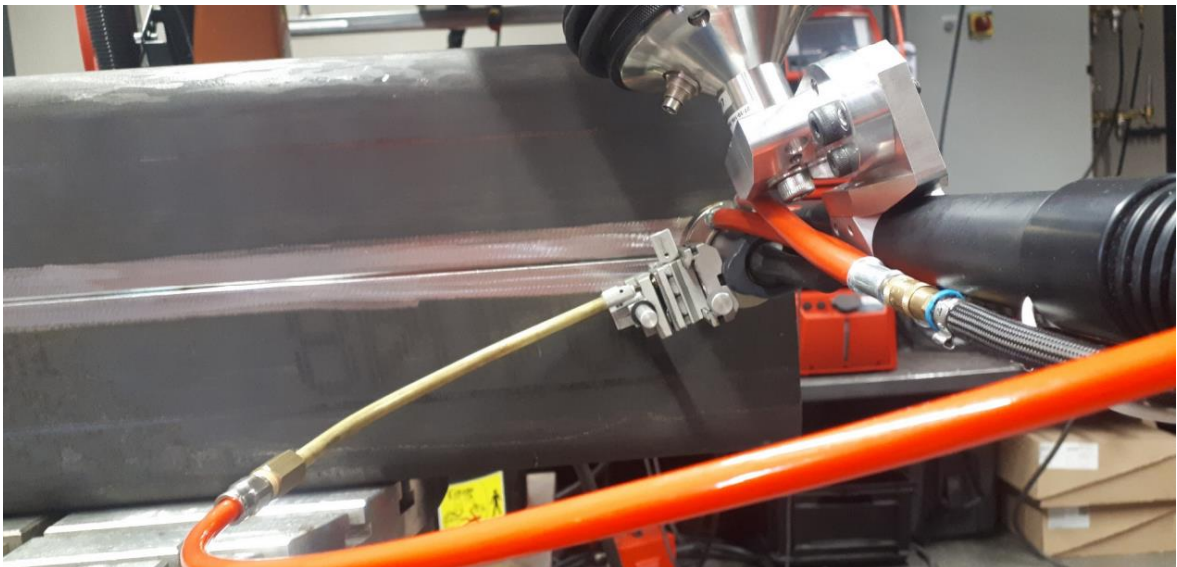
Kuva 11. Fronius ArcTig: kehähitsaus (mukaillen: Lehtomaa 2022b).





Kuva 12. Fronius ArcTig: hitsi ja makrohie (mukaillen: Lehtomaa 2022b).

ArcTig-hitsauslaitteistolla on onnistuneesti läpihitsattu osaviistetty V-railo vaaka-asennossa (PC). V-railon juurikulma oli 45 astetta, juuripinta 6 mm ja hitsattavan materiaalin paksuus 8 mm. Elektrodin kärjen ja hitsattavan kappaleen pinnan välillä oli 1 mm etäisyys. Suojakaasuna käytettiin 100 % argonia. Lisäänelanka syötettiin 20 asteen kulmassa kuvan 13 mukaisesti. Hitsausvirta oli 460 A, langansyötön nopeus 180 cm/min ja hitsausnopeus 24 cm/min. Valmiin hitsin pinta ja juuri esitetty kuvassa 14. (Lehtomaa 2022a.)



Kuva 13. Fronius ArcTig: hitsaus vaaka-asennossa (Lehtomaa 2022a).



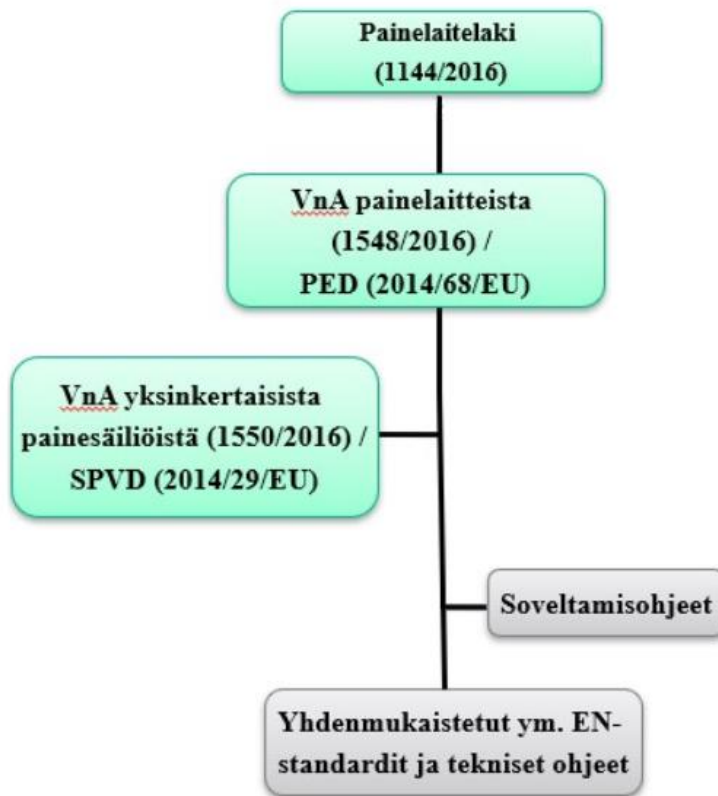


Kuva 14. Fronius ArcTig: hitsin pinta ja juuri (mukaillen: Lehtomaa 2022a).

### 2.3 Painelaitteiden vaatimukset hitseille

Painelaitelaissa (16.12.2016/1144) määritetään termi painelaite seuraavasti: ”Tässä laissa tarkoitetaan: 1) painelaitteella säiliötä, putkistoa ja muuta teknistä kokonaisuutta, jossa on tai johon voi kehittyä ylipainetta, sekä painelaitteen suojaamiseksi tarkoitettuja teknisiä kokonaisuuksia.” Painelaitteet tulee suunnitella, valmistaa, hoitaa, tarkastaa ja niitä on käytettävä siten, että ne eivät vaaranna kenenkään turvallisuutta, terveyttä tai omaisuutta. (16.12.2016/1144.)

Painelaitteiden suunnittelua ja valmistusta koskeva lainsäädäntö on yhteinen kaikissa EU:n jäsenmaissa ja ETA-alueella. Painelaitteiden teknisistä vaatimuksista säädetään painelaitedirektiivissä 2014/68/EU. Direktiivi sisältyy valtioneuvoston asetukseen painelaitteista 1548/2016. Soveltamisohjeilla selitetään direktiivien sisältöä kysymys-vastaus-periaatteella. (Tukes.) Painelaitteiden suunnittelua ja säädöksiä on havainnollistettu kuvassa 15.



Kuva 15. Suunnittelua ja valmistusta koskevat säädökset (mukaiillen: Tukes).

### 2.3.1 Hitsausohjeen hyväksyminen

Euroopan komissio on harmonisoinut standardin SFS-EN 13445:2021 osat 1–6, 8 ja 10 direktiivin 2014/68/EU kanssa (European Commission 2022, s. 11–12). Jos painesäiliö täyttää standardin SFS-EN 13445:2021 vaatimukset, painesäiliö täyttää myös direktiivin 2014/68/EU sisältämän liitteen 1 olennaiset turvallisuusvaatimukset. Liitteen 1 kohdan 1.1 mukaan: ”Painelaitteet suunnitellaan, valmistetaan, tarkastetaan ja tarvittaessa varustetaan ja asennetaan siten, että niiden turvallisuus on taattu, jos ne on otettu käyttöön valmistajan ohjeiden mukaisesti tai kohtuudella ennakoitavissa olevissa olosuhteissa.” (2014/68/EU 2014, s. 39). Standardi SFS-EN 13445:2021 koostuu 10 osasta. Osa yksi sisältää yleisiä ohjeita, osa kaksi sisältää materiaalivaatimukset, osa kolme sisältää suunnitteluohjeet ja osa neljä vaatimukset koskien lämmittämättömien painesäiliöiden valmistusta. Osa viisi sisältää painelaitteiden tarkastukset ja testaukset, joilla varmistetaan standardinmukaisuus. (SFS-EN 13445-1:2021 2021, s. 4, 13.) Tässä työssä olennaisimpia ovat osat 1–5.

Painesäiliön valmistajan tulee suorittaa hitsauksen menetelmäkokeet tai esituotannollinen koe paineen kuormittamien hitsien osalta. Esituotannollisessa kokeessa noudatetaan standardia SFS-EN ISO 15613:2004 ja menetelmäkokeessa standardia SFS-EN ISO 15614-1:2017 (SFS-EN 13445-4 :2021 2021, s. 17.) Menetelmäkokeen standardia SFS-EN ISO 15614-1:2017 ei kuitenkaan ole harmonisoitu direktiivin 2014/68/EU kanssa. Siksi menetelmäkokeessa tulee noudattaa standardia 15614-1:2004, joka on harmonisoitu direktiivin 2014/68/EU kanssa. (European Commission 2022, s. 15.) Menetelmäkokeen lisäksi hitsatulle koekappaleelle tehdään standardin SFS-EN 13445-4:2021 kohdan 8.3 mukaiset testaukset (SFS-EN 13445-4 2021, s. 17–18).

### 2.3.2 Muut painelaitteiden vaatimukset

Kohdeyrityksessä pyritään siihen, että seostetusta laatuteräksestä valmistettuja painelaitteita tulisi voida hitsata tarvittaessa yhdeltä puolelta ilman juuritukea tai juurikaasua. Pohjapalon hitsaamisessa käytettävän prosessin tulee täyttää lainsäädännön ja asiakkaiden vaatimusten lisäksi edellä mainitut vaatimukset. Menetelmän tulee soveltua pohjapalon hitsaamiseen, kun ilmarako muuttuu hitsausprosessin aikana. Ilmarako hitsattavien kappaleiden välillä vaihtelee I-railossa, osaviistetyssä X- tai V-railossa yleensä 0 mm ja 0,5 mm välillä, mutta se voi olla jopa 1 mm suuruinen. Ilmaraon suuruuteen vaikuttaa esivalmisteiden valmistustekniikka, käytetty railovalmistusmenetelmä ja kappaleiden koko. Pohjapalon hitsaamisen tulee olla mahdollisimman nopeaa ja kustannustehokasta. Hitsausprosessin kehittämisen tavoitteena on myös parantaa työntekijöiden ergonomiaa sekä saada hitsien laadusta parempaa ja tasaisempaa. (Turkia 2022a.)

### 3 Koejärjestelyt ja tulokset

Työn kokeellisessa osuudessa tutkittiin keyhole TIG-hitsauksen soveltuvuutta seostettujen laatuterästen pohjapalon hitsaamiseen. Soveltuvuutta painelaitteiden pohjapalon hitsaamiseen tutkittiin hitsauskokeiden avulla. Osaviistety V-railon juuripinta läpihitsattiin keyhole TIG-hitsauksella ja V-railo jauhekaarihitsauksella. Hitsin laadun tutkimiseksi hitsatuille koekappaleille tehtiin alustava menetelmäkoe.

Koekappaleet oli valmistettu materiaalista P355NL2, jonka materiaalitodistus on esitetty liitteessä 1. P355NL2 on seostettua laatuterästä, joka on matalalämpötilalaatua (SFS-EN 10028-3:2017 2017, s. 5). Se kuuluu materiaalityöhön 1.2 (CR ISO 15608, s. 5).

Koekappaleita, joissa oli osaviistetty V-railo, oli yhteensä kuusi. Neljä niistä oli valmistettu painelaitteiden valmistukseen käytetystä teräksestä, jonka tarkkaa materiaalia ei tiedetä. Nämä kappaleet nimettiin K1–K4 hitsausjärjestyksen mukaan. Näitä kappaleita käytettiin apuna hitsausparametreja etsittäessä. Viralliset kaksi koekappaletta oli valmistettu materiaalista P355NL2. Näitä kappaleita käytettiin koehitsauksessa ja alustavassa menetelmäkokeessa. Kappaleet nimettiin T1 ja T2 hitsausjärjestyksen mukaan.

#### 3.1 Keyhole TIG-hitsaus

Keyhole TIG-hitsauskokeessa käytettiin EWM forceTig-laitteistoa, joka oli varustettu Tetric 552-virtalähteellä ja FT500-hitsauspolttimella. Kuljetinlaitteistona käytettiin Bug-O-kiskokuljetinta. Hitsauskoe suoritettiin Metawell Oy:n tiloissa heidän henkilökuntansa toimesta. Hitsauskokeessa käytetty laitteisto on esitetty kuvassa 16. Kaikki hitsauskokeet suoritettiin jalkoasennossa (PA) ja hitsauksissa käytettiin suojakaasuna 100 % argonia. Poltin oli kaikissa hitsauskokeissa kohtisuorassa hitsattavan kappaleen pintaan nähden.



Kuva 16. Hitsauskokeessa käytetty EWM forceTig-laitteisto.

### 3.1.1 Juurikaasun vaikutus hitsiin

Juurikaasun vaikutusta hitsiin tutkittiin hitsaamalla kaksi teräslevyä toisiinsa, jotka olivat materiaaliltaan S355-rakenneterästä. Ensin teräslevyjä hitsattiin toisiinsa käyttämällä juurikaasuna 100 % argonia. Kuvassa 17 on esitetty hitsin pinta ja juuri käytettäessä juurikaasua. Tämän jälkeen hitsattiin samaa materiaalia olevat kaksi teräslevyä toisiinsa ilman juurikaasua. Kuvassa 18 on esitetty hitsin pinta ja juuri, kun kappale on hitsattu ilman juurikaasua. Hitsaus onnistui myös ilman juurikaasua.





Kuva 17. Hitsin pinta ja juuri käytettäessä 100 % argonia juurikaasuna.

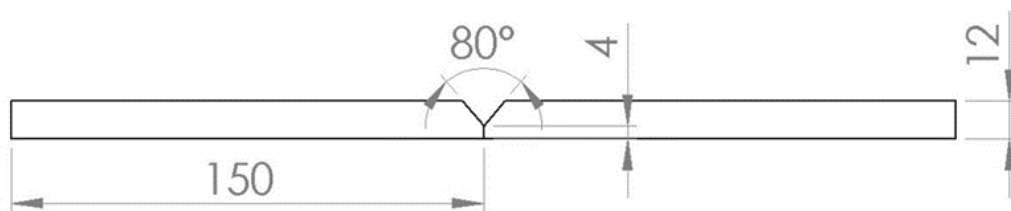


Kuva 18. Hitsin pinta ja juuri hitsatessa ilman juurikaasua.

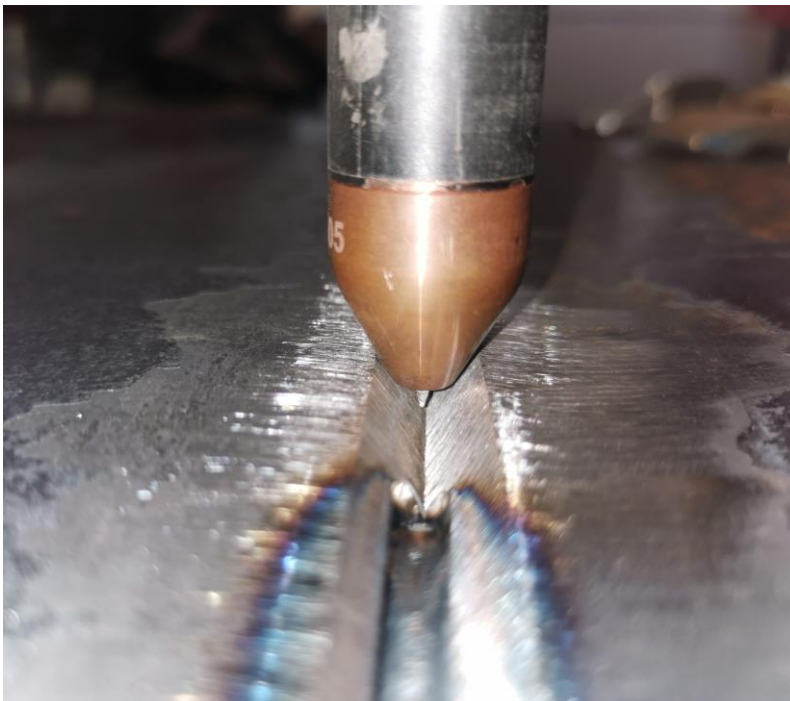
### 3.1.2 Pohjapalon hitsaaminen

Pohjapalon hitsaamista tutkittiin hitsaamalla P355NL2-teräslevyjen päittäisliitos. Molempien koekappaleiden T1 ja T2 pituus oli 500 mm, leveys 150 mm ja paksuus 12 mm. Levyihin koneistettiin osaviistetty V-railo kuvan 19 mukaisesti. Ilmarako oli noin 0 mm ja

juuripinta noin 4 mm. Kappaleet silloitettiin toisiinsa levyn molemmista päistä ennen keyhole TIG-hitsausta. Harjoituskappaleisiin K1–K4 koneistettiin samanlainen osaviistetty V-railo ja niiden pituudet sekä paksuudet olivat samat kuin koekappaleilla T1 ja T2. Harjoituskappaleiden leveydet eivät vastanneet koekappaleiden leveyksiä. Railokulman suuruus määräytyi hitsauspolttimen geometrian mukaan. Hitsauskokeessa käytetty EWM FT500-hitsauspoltin vaati 80 asteen railokulman, kun elektrodin kärjen ja V-railon pohjan etäisyys oli noin 3 mm. Tilanne on esitetty kuvassa 20. Samaa hitsauskorkeutta käytettiin kaikissa hitsauksissa.



Kuva 19. Koekappaleen poikkileikkauksen mitat.



Kuva 20. EWM FT500-hitsauspoltin osaviistetyssä V-railossa.

Hitsausparametrejä valittaessa ensin valittiin hitsausnopeus ja virtaa säädettiin tarkastelemalla visuaalisesti keyhole:n muodostumista. Hitsaaminen aloitettiin harjoituskappaleesta K1. Kappaleeseen hitsattiin noin 20–100 mm:n pituisia hitsejä, joiden välillä hitsausparametrejä muutettiin. Hitsauksessa ei käytetty juurikaasua ja suojakaasuna käytettiin 100 % argonia. Lisäaineen käyttämistä kokeiltiin, mutta siihen ei nähty tarvetta hitsin onnistuessa myös ilman sitä. Valokaari sulatti perusmateriaalia V-railon sivuilta, joka toimi lisäaineen tavoin. Edellä esitetyllä tavalla hitsattiin myös harjoituskappale K2, jonka hitsauksen aikana löydettiin sopivat hitsausparametrit.

Raja-arvoa eli pienintä virtaa, jolla keyhole muodostuu, kutsutaan kynnysvirraksi. Kynnysvirta löydettiin hitsattaessa harjoituskappaletta K1. Silloin hitsausnopeus oli 25 cm/min, hitsausvirta 350 A ja kaarijännite 13,4 V. Kuvassa 21 on esitetty hitsin pinta ja juuri, kun keyhole muodostui. Virran nostamista jatkettiin, kunnes löydettiin raja-arvo sulan romahtamiselle. Raja-arvo löydettiin hitsattaessa harjoituskappaletta K2. Sula romahti, kun hitsausnopeus oli 25 cm/min, hitsausvirta 405 A ja kaarijännite 15,3 V. Hitsin pinta ja juuri sulan romahdettua on esitetty kuvassa 22. Hitsin kuvun havaittiin olevan korkea, vaikka hitsausvirtaa nostettiin pisteeseen, jossa sula romahti. Raja-arvojen löytyttyä hitsausvirraksi valittiin 395 A ja hitsausnopeudeksi 25 cm/min. Harjoituskappale K3, joka on esitetty liitteessä 2, hitsattiin onnistuneesti yhtäjaksoisesti näillä arvoilla.



Kuva 21. Hitsin pinta ja juuri, kun keyhole muodostui (350 A ja 13,4 V).





Kuva 22. Hitsin pinta ja juuri, kun sula romahti (405 A ja 15,3 V).

Hitsausnopeuden nostamisen havaittiin vähentävän tarvittavan virran suuruutta. Tämä havaittiin hitsattaessa harjoituskappaletta K2. Kun hitsausnopeus nostettiin nopeudesta 25 cm/min nopeuteen 35 cm/min, sula romahti virran pysyessä samana. Hitsausnopeuden nostaminen vähensi perusmateriaalin sulamista V-railon sivuilta, jolloin nestemäisen sulan tilavuus pieneni ja energiaa kului vähemmän materiaalin lämmittämiseen ja olomuodon muutokseen.

Varsinaiset koekappaleet T1 sekä T2 hitsattiin 395 A virralla, kaarijännitteen ollessa koekappaleen T1 hitsauksessa 15,6 V ja koekappaleen T2 hitsauksessa 15 V. Suojakaasuna käytettiin 100 % argonia virtausmäärän ollessa 10,5 l/min. Koekappaleiden hitsauksessa ei käytetty lisäainetta tai juurikaasua ja hitsausnopeus oli 25 cm/min.

Hitsattaessa koekappaletta T1 hitsaus jouduttiin keskeyttämään, kun poltin osui V-railoon ja sen kulma muuttui. Sula jähmettyi välillä pallon muotoisiksi epämuodostumiksi ja välillä hitsi onnistui kuvan 23 mukaisesti. Epämuodostuman kohdalla juuren puolella ei ollut havaittavissa poikkeamaa kuin sillä kohtaa, jossa polttimen kulma muuttui ja hitsisula romahti. Epämuodostuma on esitetty kuvassa 24 ja koekappale T1 liitteessä 3.



Kuva 23. P355NL2 onnistuneen hitsin pinta ja juuri.



Kuva 24. P355NL2 hitsiin syntynyt epämuodostuma.

Koekappaleen T1 hitsauksen jälkeen hitsattiin viimeinen harjoituskappale K4. Hitsaus onnistui lukuun ottamatta yhtä epämuodostumaa, joka muodostui hitsisulaan. Tämän jälkeen hitsattiin koekappale T2 käyttäen samoja hitsausparametrejä kuin koekappaletta T1

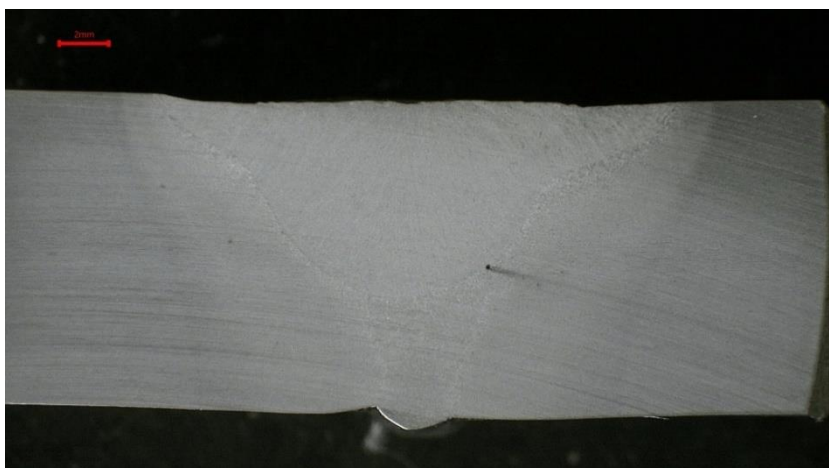
hitsattaessa. Sama ilmiö toistui eli osa hitsistä onnistui ja osaan muodostui epämuodostumia kuvan 24 tavoin.

Hietanen (2022b) toteaa, että tutkimuksessa käytetyn EWM forceTig-hitsauslaitteiston suurin etu plasmahitsaukseen verrattuna on pieni poltin, joka mahtuu V-railoon. Hitsauslaitteisto on hänen mukaansa samaa hintaluokkaa kuin plasmahitsauslaitteisto, mutta pienimmällä polttimella (FT500) varustettu laitteisto saattaa olla jopa edullisempi. Parhaiten osaviistetyyn V-railon hitsaamiseen soveltuu FT500-hitsauspoltin, joka vaatii 80 asteen railokulman. Hietasen mukaan osaviistetyyn V-railon pohjapalon keyhole TIG-hitsaaminen on haastavaa, koska perusmateriaalia sulaa V-railon sivuilta, mikä toimii lisäaineen tavoin ja minkä hallitseminen on haastavaa. Jos hitsattaviin kappaleisiin voitaisiin koneistaa esimerkiksi J-railo, ongelmilta hänen mukaansa todennäköisesti vältyttäisiin.

### 3.2 Jauhekaarhitsaus

Keyhole TIG-hitsauksen jälkeen V-railoon hitsattiin yksi palko jauhekaarhitsauksella. Hitsaus suoritettiin LUT-yliopiston hitsaustekniikan laboratoriossa henkilökunnan toimesta. Hitsauksessa käytettiin Pandaweld-hitsauslaitteistoa. Laitteisto koostui Pandaweld 1250-virtalähteestä ja Pandaweld HMC-digital-hitsaustraktorista.

Hitsausparametreja etsittäessä hitsattiin harjoituskappaleita K1 ja K4. Harjoituskappaleesta K1 tehtiin kuvan 25 mukainen makrohie hitsausparametrien sopivuuden arvioimiseksi. Hieestä havaittiin, että tunkeuma ei ollut riittävä, koska hitsiin muodostui madonreikä. Koekappaleet T1 ja T2 hitsattiin korkeammalla virralla, jotta tunkeuma olisi suurempi ja ongelmalta vältyttäisiin. Koekappaleiden T1 ja T2 hitsausvirta oli 613 A, kaarijännite 31,6 V ja hitsausnopeus 50 cm/min. Jauhekaarilanka oli Bavaria BA-S2Si, jonka halkaisija oli 4 mm (liite 4) ja jauhekaarijauheena Bavaria BF 3.5 (liite 5).



Kuva 25. Makrohie harjoituskappaleesta K1.

### 3.3 Alustava menetelmäko

Koekappaleiden T1 ja T2 osille, joiden hitsit onnistuivat, tehtiin alustava menetelmäko. Koesauvoja ei voitu irrottaa standardin SFS-EN ISO 15614-1 vaatimalla tavalla, koska pohjapalon hitsaus epäonnistui osittain. Alustavan menetelmäkokeen testaaja ja valvoja oli LUT-yliopisto, ko

tehtiin hitsaustekniikan laboratoriossa. Koekappaleiden hitseille tehtiin silmämääräinen tarkastus, poikittainen vetokoe, poikittainen taivutuskoe, iskukoe, kovuuskoe ja makrohietutkimus. Tämän lisäksi harjoituskappaleen K4 pohjapalolle tehtiin makrohietutkimus. Kyse ei siis ollut virallisesta menetelmäko

keesta. Hitsille ja koekappaleille ei tehty kaikkia standardin SFS-EN ISO 15614-1 vaatimia testauksia eikä standardia täysin noudatettu.

#### 3.3.1 Rikkomaton aineenkoetus

Standardin SFS-EN ISO 15614-1 mukaan koekappaleille tulisi tehdä silmämääräinen tarkastus, radiografia tai ultraäänitarkastus sekä pintahalkeamien tarkastus ennen koesauvojen irrotusta (SFS-EN ISO 15614-1 2004, s. 18, 26). Rikkomattomasta aineenkoetuksesta koekappaleen hitseille tehtiin ainoastaan silmämääräinen tarkastus. Silmämääräinen tarkastus tehtiin sekä pohjapalolle että valmiille hitsille. Silmämääräinen tarkastus tulee tehdä standardin SFS-EN 970 mukaan (SFS-EN ISO 15614-1 2004, s. 26).

Standardin SFS-EN 970 mukaan silmämääräinen tarkastus tulee tehdä railolle, hitsille hitsauksen aikana ja valmiille hitsille. Hyväksymisrajastandardina voidaan käyttää standardia SFS-EN 25817. (SFS-EN 970 1997, s. 6.)

Pohjapalon hitsissä oli juuren puolella havaittavissa pientä reunahaavaa, jyrkkää juuren liittymistä, epäpuhtautta ja korkeaa juuren kupua. Reunahaavan syvyys ja juurikuvun korkeus täytti visuaalisesti tarkastelemalla standardin SFS-EN 25817 hitsiluokan B vaatimukset. Juuren puolella esiintynyt epäpuhtaus on esitetty kuvassa 23. Pohjapalon pinnan puolella oli havaittavissa korkeaa kupua, joka ei täytä standardin SFS-EN 25817 hitsiluokkien B tai C vaatimuksia. Pohjapalon korkeaa kupua ei kuitenkaan menetelmäkokeen silmämääräisessä tarkastuksessa arvostella, koska se suoritetaan vain valmiille hitsille (SFS-EN 970 1997, s. 6). Pintapalko täytti hitsiä silmämääräisesti tarkastelemalla standardin SFS-EN 25817 hitsiluokan B vaatimukset. Tarkastuksista ei tehty tarkastuspöytäkirjaa. Valmis monipalkohitsi täytti standardin SFS-EN 25817 hitsiluokan B vaatimukset.

### 3.3.2 Poikittainen vetokoe

Poikittainen vetokoe tulee tehdä standardin SFS-EN 895 mukaan. Vetosauvan murtolujuuden tulee olla normaalitapauksessa perusaineen vähimmäisvaatimuksen suuruinen. (SFS-EN ISO 15614-1 2004, s. 26.) P355NL2 perusmateriaalin murtolujuuden vähimmäisvaatimus materiaalipaksuuden ollessa 12 mm on standardin SFS-EN 10028-3:2017 taulukon 4 mukaan 490 MPa (SFS-EN 10028-3:2017 2017).

Vetokokeessa molemmat vetokoesauvat murtuivat perusaineesta muutosvyöhykkeen ulkopuolelta sitkeästi. Vetosauvojen pinnan puoli on esitetty kuvassa 26 ja juuren puoli kuvassa 27. Vetosauvojen myötölujuudet olivat 353,5 MPa ja 331,6 MPa. Murtolujuudet olivat 566,9 MPa ja 564,0 MPa. Molempien vetokoesauvojen murtolujuus oli suurempi kuin perusmateriaalin vähimmäisvaatimus, joten vetokokeen tulos täytti painelaitteiden vaatimuksen. Vetokokeen tulokset sekä jännitys-venymäkäyrä on esitetty liitteessä 6.





Kuva 26. Vetokoesauvat pinnan puolelta.



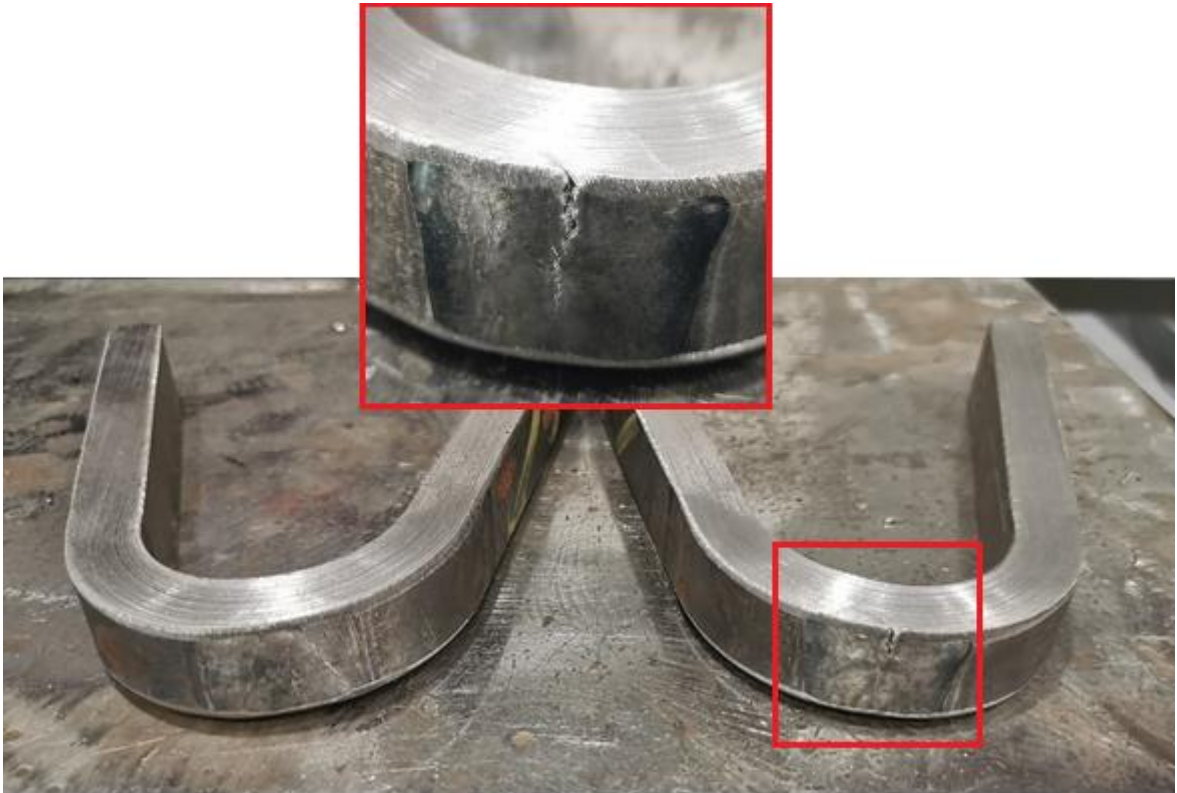
Kuva 27. Vetokoesauvat juuren puolelta.

### 3.3.3 Poikittainen taivutuskoe

Päittäisliitokselle tulee tehdä taivutuskoe standardin SFS-EN 910 mukaan. Kokeessa testataan kaksi juuritaivutussauvaa ja kaksi pintataivutussauvaa. Kun ainepaksuus on 12 mm tai suurempi, suositellaan käytettävän neljää sivutaivutussauvaa. Koesauvojen taivutuskulma on 180 astetta eikä koesauvoihin saa syntyä yli 3 mm suuruisia avoimia vikoja missään suunnassa. Koesauvan nurkissa olevia virheitä ei tarvitse huomioida. (SFS-EN ISO 15614-1 2004, s. 28.)

Taivutuskoe tehtiin kahdelle juuritaivutussauvalle ja kahdelle pintataivutussauvalle. Toinen pintataivutussauva murtui 60 asteen taivutuskulmalla, vaikka toisessa taivutussauvassa ei ollut havaittavissa avoimia vikoja 180 asteen taivutuskulmallakaan. Kuvassa 28 ovat

pintataivutussauvat ja sauvaan syntynyt murtuma. Koska sauva murtui, taivutuskoe ei täytä painelaitteiden vaatimuksia. Kummassakaan juuritaivutussauvassa ei ollut havaittavissa avoimia vikoja. Juurisauvat on esitetty kuvassa 29 ja taivutuskokeen tulokset liitteessä 7.



Kuva 28. Pintataivutussauvat ja sauvaan syntynyt murtuma.



Kuva 29. Juuritaivutussauvat.

### 3.3.4 Iskukoe

Standardi SFS-EN 875 määrittää iskukokeen koesauvojen mitoituksen ja koe suoritetaan sen mukaisesti. Koesauvoina käytetään Charpy-V-sauvoja, jotka irrotetaan kahdesta eri kohdasta hitsiä. Molemmista kohdista tehdään kolme iskusauvaa. Toinen sarja iskusauvoja tehdään siten, että lovi on hitsissä. Toisessa sarjassa lovi on muutosvyöhykkeellä. Jos koekappale on hitsattu yhdistelmähitsauksella, koesauvat irrotetaan molempien hitsausprosessien hitsiaineesta ja muutosvyöhykkeeltä. Kolmen iskusauvan iskuenergian keskiarvon tulee täyttää materiaalistandardin vaatimukset, jos tuotestandardissa ei ole toisin määritelty. Jokaisen koesarjan yhden koesauvan arvo saa olla kuitenkin enintään 30 % sarjan vähimmäis keskiarvoa matalampi. (SFS-EN ISO 15614-1 2004, s. 28.)

Tässä kohteessa iskukoelämpötilaksi valittiin  $-40\text{ °C}$  (Turkia 2022a). Materiaalistandardin mukaan materiaali P355NL2 kuuluu normalisoituihin hienoteräksiin, jonka iskuenergiavaatimus on standardin SFS-EN 13445-2:2021 taulukon B.2-13 mukaan 27 J (SFS-EN 13445-2:2021, s. 31, 60). Tuotestandardin mukaan iskuenergiavaatimus on 30 J (SFS-EN 10028-3:2017 2017, s. 12).

Iskukokeissa testauslämpötilana käytettiin  $-40\text{ °C}$ . Koesauvoina käytettiin Charpy-V-sauvoja, joita tehtiin kaksi sarjaa. Sauvoissa 1.1–1.3 lovi oli hitsissä ja sauvoissa 1.4–1.6 lovi oli muutosvyöhykkeellä. Sauvojen 1.1–1.3 iskusitkeyden keskiarvo oli 39 J. Sarjan matalin iskusitkeyden arvo oli 27 J, joka oli 10 % vähimmäis keskiarvoa alempi. Sauvojen 1.4–1.6 iskuenergian keskiarvo oli 63 J ja kaikkien sauvojen iskusitkeyden arvot vähimmäis keskiarvoa suurempia. Molemmat koesarjat täyttivät painelaitteiden vaatimukset. Iskukokeen tulokset on esitetty liitteessä 8 ja iskukoesauvat kuvassa 30.



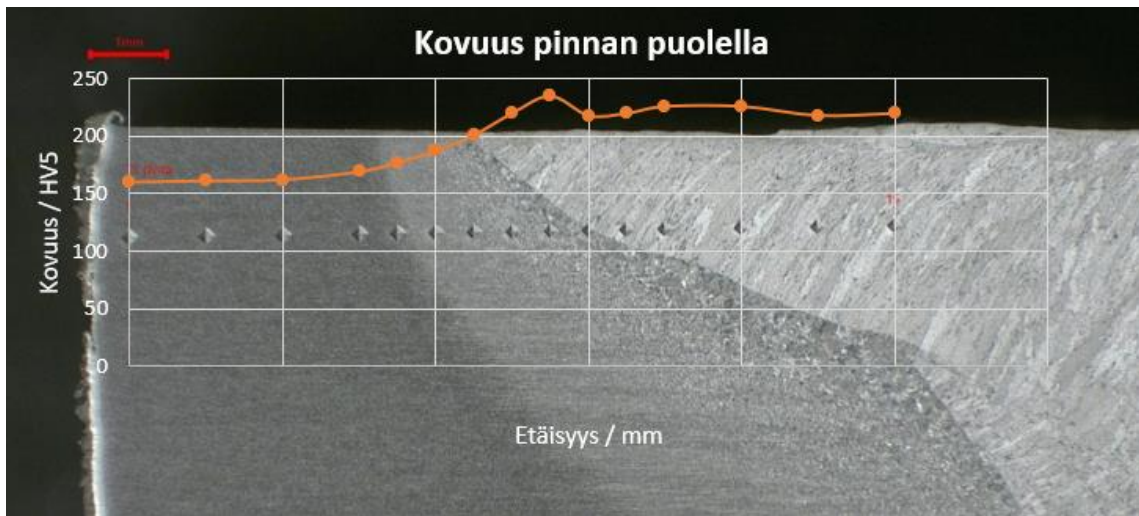


Kuva 30. Iskukoesauvat.

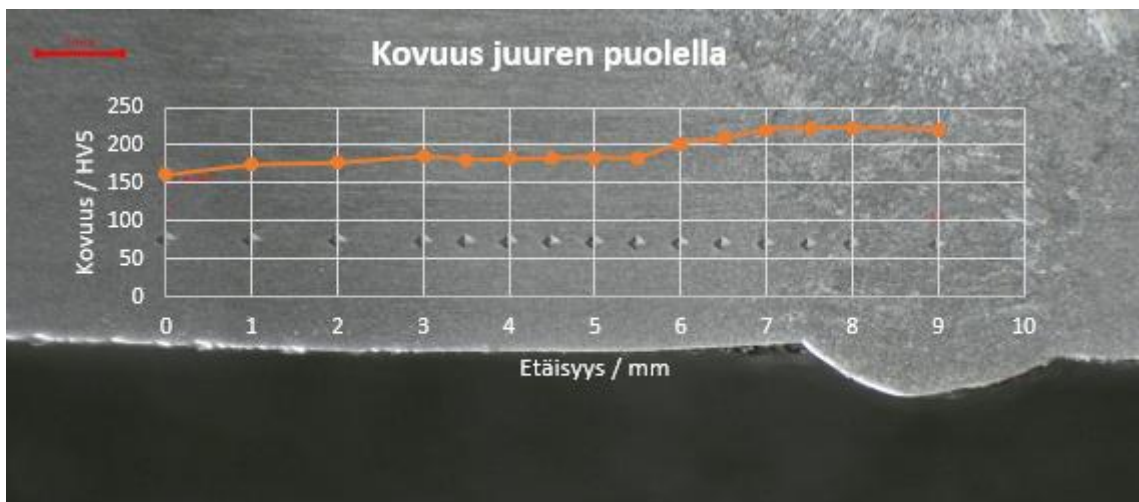
### 3.3.5 Kovuuskoe

Kovuuskoe tulee tehdä standardin SFS-EN 1043-1 mukaan. Kovuusmittaukset tehdään perusaineesta, muutosvyöhykkeeltä ja hitsistä käyttäen Vickerskoetta HV10. Materiaalipaksuuden ollessa yli 5 mm tulee käyttää kahta mittauspisteen riviä, joiden etäisyys kappaleen pintaan on korkeintaan 2 mm. Kovuuskokeen tulosten tulee täyttää standardissa SFS-EN ISO 15614-1 olevan taulukon 2 mukaiset vaatimukset. Taulukon 2 mukaan suurin sallittu Vickers-kovuus (HV 10) teräsryhmälle 1, jota ei ole lämpökäsitelty, on 380. (SFS-EN ISO 15614-1 2004, s. 30.) Tämän lisäksi osalla kohdeyrityksen asiakkaista voi olla materiaalikohtaisia lisävaatimuksia hitsin ja muutosvyöhykkeen kovuudelle. Yksi tämän kaltainen lisävaatimus kovuudelle käyttökohteesta riippuen voi olla 250 (HV10) seostetulle laatuteräkselle. (Turkia 2022a.)

Tutkimuksessa tehtiin Vickerskoe (HV5) käyttäen kahta mittauspisteen riviä, toinen pinnan puolella ja toinen juuren puolella. Mittauksen pienin kovuus oli perusmateriaalin kovuus ja sen Vickers-kovuus oli noin 161. Suurin Vickers-kovuus pinnan puolella oli 235 muutosvyöhykkeellä ja suurin kovuus juuren puolella oli 222 hitsissä. Mittauspisteet ja niiden tulokset pinnan puolella on esitetty kuvassa 31 ja liitteessä 9. Mittauspisteet ja tulokset juuren puolella on esitetty kuvassa 32 ja liitteessä 10. Kovuuskokeiden tuloksista ei suoraan nähdä täyttivätkö tulokset asiakkaiden tai standardin vaatimukset.



Kuva 31. Kovuuden mittauspisteet ja niiden tulokset pinnan puolella.

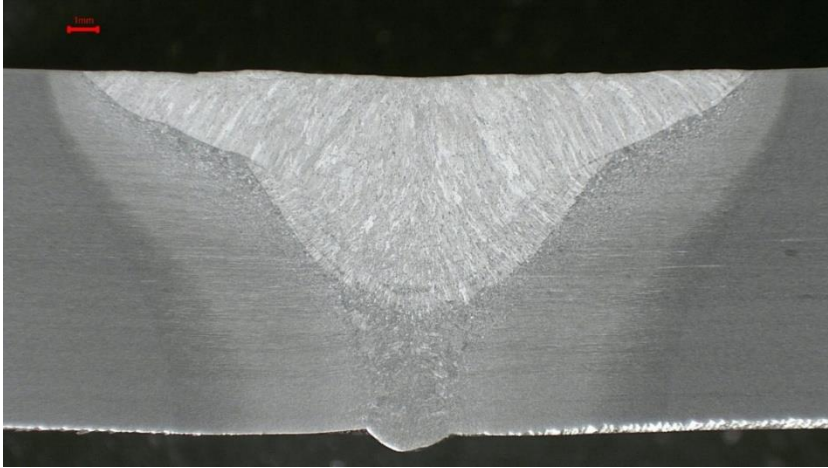


Kuva 32. Kovuuden mittauspisteet ja niiden tulokset juuren puolella.

### 3.3.6 Makrohietutkimus

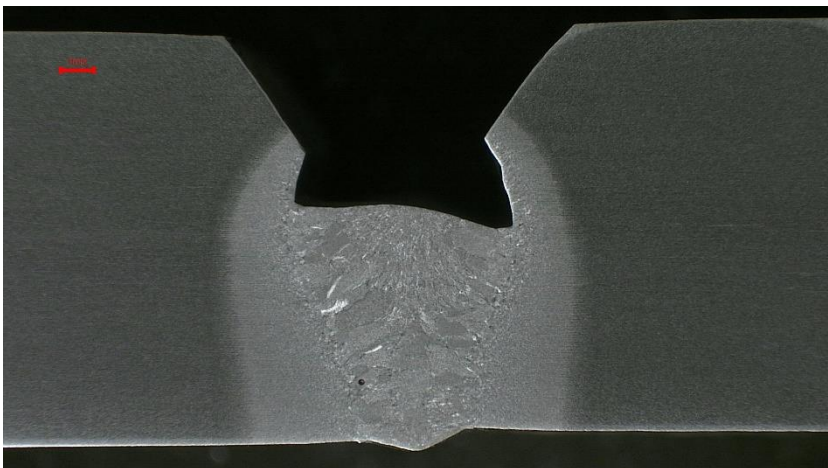
Makrohietutkimus tulee tehdä standardin SFS-EN 1321 mukaisesti. Sularaja, muutosvyöhyke ja palkorakenne tulee olla selkeästi näkyvillä. Makrohieen tulee sisältää perusainetta muutosvyöhykkeen ulkopuolelta. Hitsausohje on hyväksytty, jos se täyttää standardin SFS-EN 25817 mukaiset hitsiluokan B vaatimukset hitsausvirheiden osalta. (SFS-EN ISO 15614-1 2004, s. 28, 30.) Standardin SFS-EN 25817 taulukossa 1 on lueteltu

hitsausvirheiden raja-arvot eri hitsiluokille (SFS-EN 25817 1993, s. 3,7). Kuvan 33 makrohie täyttää hitsiluokan B hitsausvirheille asettamat raja-arvot.



Kuva 33. T1 makrohie.

Kuvassa 34 on esitetty pelkän pohjapalon makrohie, joka on tehty harjoituskappaleesta K4. Makrohieestä havaitaan, kuinka valokaari on sulattanut perusmateriaalia V-railon sivuilta. Makrohieessä on myös pieni huokonen.



Kuva 34. K4 pohjapalon makrohie.

## 4 Analyysi ja pohdinta

Tässä luvussa analysoidaan saatuja tuloksia ja pohditaan kokeiden tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Saatuja tuloksia verrataan aiempiin tutkimuksiin ja asiantuntijoiden näkemyksiin kokeiden tulosten verifioimiseksi ja havaittuihin ongelmiin ratkaisujen löytämiseksi.

### 4.1 Hitsauskoe

Liu et al. (2017b, s. 136–137) toteavat, että keyhole TIG-hitsaamisessa sulan hallinta hitsattaessa ilman juurikaasua on vaikeaa, koska sula romahtaa helposti. Tämän tutkimuksen hitsauskokeessa huomattiin parametri-ikkunan olevan kapea ja hitsauksen olevan haastavaa, mutta ei kuitenkaan mahdotonta. Hitsaus onnistui ilman juurikaasua, vaikka selvä ero hitsin laadussa oli kuitenkin havaittavissa. Ero Liu et al. tekemän tutkimuksen ja tämän tutkimuksen tulosten välillä voi johtua hitsattavasta materiaalista. Liun et al. (2017b, s. 136) tutkimuksessa hitsattiin 16Mn-teräslevyjä ja tämän kandidaatintyön tutkimuksessa S355-rakenneterästä. Tutkimuksissa käytettiin myös erilaisia keyhole TIG-hitsauslaitteistoja, joiden elektrodin jäähtyksen tehokkuudessa oli eroja, mikä saattoi vaikuttaa tulokseen.

Osaviistetyn V-railon hitsauskokeessa tutkittiin keyhole TIG-hitsauksen soveltuvuutta pohjapalon hitsaamiseen. Hitsauskokeessa käytettiin kahta samanlaista koekappaletta T1 ja T2, jotka olivat valmistettu P355NL2 seostetusta laatuteräksestä. Parametrejä etsittäessä käytettiin harjoituskappaleita K1–K4, joiden tarkkaa materiaalia ei tiedetty. Koekappaleiden railokulmassa, juuripinnan korkeudessa ja ilmaraossa oli visuaalisesti havaittavissa pientä vaihtelua. Koekappaleen T1 hitsaus jouduttiin keskeyttämään polttimen kulman muututtua sen osuttua V-railoon. Polttimen osuminen V-railoon saattoi johtua inhimillisestä virheestä. Siihen saattoi myös vaikuttaa kuljetinlaitteiston ja railogeometrian epätarkkuus.

Koekappaleiden T1 ja T2 hitseihin syntyi pallon muotoisia epämuodostumia. Harjoituskappaleen K3 hitsaus onnistui virheettömästi, vaikka koekappaleiden T1 ja T2

hitsaus epäonnistui osittain. Tämä saattoi johtua siitä, että hitsausparametrit valittiin hitsattaessa harjoituskappaleita. Parametrit eivät enää soveltuneet koekappaleiden hitsaamiseen, koska ne olivat eri materiaalia. Hitsin osittainen onnistuminen viittaisi siihen, että kokeessa oltiin parametri-ikkunan reunalla. Ongelman saattoi myös aiheuttaa jokin laitteiston vika tai epätarkkuus. Esimerkiksi kiskokuljettimen epätasainen nopeus saattoi aiheuttaa ongelman. Hitsaustapahtumaa visuaalisesti tarkastelemalla ei kuitenkaan tällaista havaittu. Juuren puolelta keyhole:n läpi virtaavan kaasusuihkun havaittiin muuttuvan epävakaaksi ja alkavan heilua, kun hitsiin syntyi epämuodostuma. Penttilän (2022) mukaan hitsiin syntynyt epämuodostuma saattoi johtua sulan virtaamisesta keyhole:n edestä sen taakse.

Oletetaan, että hitsisula kulkee keyhole:n edellä aallon tapaan ja oletetaan sulan virtaavaan keyhole:n molemmilta puolilta sen taakse. Kappale ja hitsi alkavat jäähtyä heti valokaaren mentyä ohi, samalla kun keyhole sulkeutuu. Kun kuuma hitsisula virtaa keyhole:n edeltä keyhole:n takana olevan viileämmän materiaalin päälle, saattaa se aiheuttaa sulan jähmettymisen pallon muotoisiksi epämuodostumiksi. Tämä ilmiö voisi myös selittää pohjapalon hitsin erikoisen muodon. Hitsiin muodostui korkea kupu ja vaikka hitsausvirtaa lisättiin pisteeseen, jossa sula romahti, hitsin kupu pysyi korkeana. Nämä kaksi ilmiötä liittyvät todennäköisesti toisiinsa.

Tästä herää kysymys onko pohjapalon hitsin korkeasta kuvusta jotain haittaa? Kuten harjoituskappaleen K1 makrohieestä (kuva 25) havaitaan, hitsiin voi jäädä madonreikä, jolloin hitsi ei täytä painelaitteiden vaatimuksia. Korkea kupu lisää myös riskiä siihen, että kappale ei läpihitsaudu. Koekappaleiden jauhekaarihitsauksessa käytettiin korkeampaa virtaa, jotta korkea pohjapalon kupu ei huonontaisi hitsin laatua. Hitsin laadun varmistamiseksi tulisi korkea kupu aina tasoittaa ennen seuraavan palon hitsausta. Tämä lisäisi merkittävästi kustannuksia.

Seostetun laatuteräksen osaviistetyn V-railon pohjapalon hitsaamista keyhole TIG-hitsauksella ei ole ennen tutkittu, eikä kirjallisuudesta löydy mainintaa vastaavista

ongelmista. Ongelmaa ei esiintynyt hitsattaessa S355-teräslevyjä ilman juurikaasua. Ongelman esiintyminen ainoastaan osaviistetyin V-railon pohjapalon hitsaamisessa viittaa siihen, että ongelma johtuu railogeometriasta. Koska keyhole TIG-hitsauksessa lämpö kohdistuu pienelle alueelle ja hitsattavan kappaleen perusmateriaalin jäädyttävä vaikutus on suuri, saattoi näiden tekijöiden yhteisvaikutus aiheuttaa ongelman.

Jos ongelma johtui sulan virtaamisesta, yksi keino ongelman ratkaisemiseksi olisi hitsausnopeuden alentaminen. Sulan virtaaminen hidastuisi ja sulan virtaaminen viileämmän materiaalin päälle vähentyisi. Toinen vaihtoehto olisi syöttää hitsiin lisäainetta hitsaussuuntaan nähden takaapäin, joka saattaisi vähentää sulan virtaamista. Kolmas vaihtoehto olisi polttimen kulman muuttaminen Lehtomaan (2022b) tutkimuksen tavoin. Siinä putken päittäisliitos kehähitsattiin, kun poltin oli kallistettu 17 asteen kulmaan kuvan 11 mukaisesti. Hitsistä otetusta makrohieestä, joka esitettiin kuvassa 12, ei ollut havaittavissa korkeaa kupua.

Parametri-ikkuna oli myös pohjapalon keyhole TIG-hitsauksessa pieni ja hitsaus oli haastavaa. Tämä voi osittain johtua siitä, että hitsauskokeessa ei käytetty juurikaasua. Myös käytetty hitsausasento saattoi vaikuttaa hitsauksen haastavuuteen. Hitsauskokeessa käytettiin jalkoasentoa (PA). Jos hitsauskoe olisi suoritettu esimerkiksi vaaka-asennossa (PC) tai jalko-vaaka-asennossa (PB), juuren puolen sulan pintajännityksen ei tarvitsisi kannatella koko sulaan kohdistuvaa painovoimaa, koska se kohdistuisi osittain kiinteään perusmateriaaliin. Lehtomaan (2022a) tutkimuksessa, läpihitsattiin osaviistetty V-railo yhdellä palolla kuvan 13 mukaisesti vaaka-asennossa eikä siinä törmätty vastaaviin ongelmiin.

Hitsauksesta teki Hietasen (2022b) mukaan haastavaa perusmateriaalin sulaminen V-railon sivuilta, mikä käyttäytyi lisäaineen tavoin. Pohjapalosta otetusta makrohieestä (kuva 34) havaitaan, kuinka perusmateriaalia sulii V-railon sivuilta. Hitsausnopeuden nostamisen havaittiin vähentävän perusmateriaalin sulamista V-railon sivuilta, mutta perusmateriaalin sulamisen hallitseminen hitsausnopeutta muuttamalla on vaikeaa. Jos elektrodin jäädytystä

voitaisiin tehostaa, valokaaresta tulisi todennäköisesti entistä kapeampi ja sen takia perusmateriaalia sulaisi todennäköisesti vähemmän V-railon sivuilta.

Kuten Lathabai et al. (2001, s. 83.) totesi, materiaaleja, joilla on alhainen lämmönjohtavuus, suuri sulan pintajännitys, pieni sulan tiheys tai ovat ohuita, on helpompi hitsata keyhole TIG-hitsauksella. Tässä tutkimuksessa käytetyn P355NL2-teräksen lämmönjohtavuus oli noin 34,1–43,2 W/(m·K) (Matmatch). Se oli noin 2,6 kertainen verrattuna AISI 316L-ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuuteen, jonka lämmönjohtavuus esitettiin taulukossa 1. Vaikka hitsattava juuripinta oli vain 4 mm, hitsaus oli silti haastavaa osaviistetyin V-railon ja hitsattavan materiaalin takia.

Hypoteesi oli, että menetelmä soveltuu pohjapalon hitsaamiseen. Tutkimusten tulosten pohjalta hypoteesi osoittautui oikeaksi. Tutkimuksessa havaittiin ongelmia ja ilmiöitä, joita ei tutkimuksen alussa osattu aavistaa.

Ensimmäinen tutkimuskysymys oli, voidaanko keyhole TIG-hitsauksella hitsata seostetusta laatuteräksestä valmistettujen painelaitteiden pohjapalkoja. Hitsauskokeen tulosten perusteella seostetun laatuteräksen pohjapalon hitsaaminen osaviistettyyn V-railoon on mahdollista, mutta se on haastavaa. Hietanen (2022b) toteaa, että menetelmä vaikuttaa soveltuvan kyseiseen kohteeseen, mutta hitsauskokeessa havaittujen ongelmien ja ilmiöiden takia asiaa pitäisi tutkia enemmän.

Toinen tutkimuskysymys oli, onnistuuko hitsaus ilman juurikaasua. S355-teräslevyjen ja P355NL2-teräksen osaviistetyin V-railon hitsauskokeiden perusteella hitsaus onnistuu myös ilman juurikaasua, vaikka ilman juurikaasua hitsaaminen onkin haastavampaa ja hitsin laatu huonompaa.

## 4.2 Alustava menetelmäkoee

Kolmas tutkimuskysymys oli, saavutetaanko menetelmällä painelaitteiden hitseiltä vaadittava laatu. Koehitsatuille kappaleille T1 ja T2 tehtiin alustava menetelmäkoee, jotta saataisiin kysymykseen vastaus.

Koekappaleille tehty alustava menetelmäkoee ei täytä standardin vaatimia menetelmäkoeeen ehtoja. Ensinnäkin koekappaleiden hitsaus epäonnistui osittain eikä koesauvoja voitu irrottaa standardin mukaisesti. Menetelmäkoeeen valvojana ja tarkastusorganisaationa tulee olla pätevä kolmas osapuoli (SFS-EN 13445-4:2021 2021, s. 18). Tässä tutkimuksessa alustavan menetelmäkoeeen testaaja ja valvoja oli LUT-yliopisto, minkä vuoksi koee ei täytä standardin vaatimusta. Koekappaleille ei myöskään tehty kaikkia standardin vaatimia testauksia eikä niissä noudatettu täysin menetelmäkoeeen standardia. Alustavan menetelmäkoeeen tuloksia voidaan kuitenkin käyttää hitsin laadun arvioimiseksi.

Koekappaleille tehtiin alustavassa menetelmäkoeeessa silmämääräinen tarkastus, poikittainen vetokoee, poikittainen taivutuskoe, iskukoee, kovuuskoe ja makrohietutkimus. Hitsin silmämääräinen tarkistus täytti painelaitteiden hitseille asettamat vaatimukset. Pohjapalon kuvun havaittiin olevan korkea ja se saattoi huonontaa hitsin laatua. Korkeaan kupuun vaikuttavia syitä pohdittiin kohdassa 4.1.

Poikittaisen vetokoeeen tulokset täyttivät painelaitteiden vaatimukset. Vetosauvat murtuivat perusmateriaalista ja toisen vetosauvan myötölujuus oli 331,6 MPa ja toisen 353,5 MPa. Tulosten välillä ei pitäisi olla noin suurta eroa, koska molemmat vetosauvat oli irrotettu koekappaleesta T1 ja murtuivat perusmateriaalista. Ero saattoi johtua siitä, että toinen vetosauva ei ollut kohtisuora. Tämän takia sauvan toisella pinnalla jännitys oli suurempi, mikä alensi myötölujuutta.

Poikittaisen taivutuskokoeeen tulokset eivät täyttäneet painelaitteiden vaatimuksia. Tämä johtui toisen pintataivutussauvan murtumisesta. Murtuma syntyi pinnan puolelle, joka oli



hitsattu jauhekaarihitsauksella. Tämä saattoi johtua hitsissä olleesta epäpuhtaudesta. Koska juuritaijutussauvoissa ei ollut havaittavissa avoimia vikoja, pohjapalon hitsaus olisi todennäköisesti täyttänyt painelaitteiden vaatimukset. Jotta asiaan saataisiin varmuus, tulisi taivutuskoe tehdä uudestaan.

Iskukokeen tulos täytti painelaitteiden vaatimukset. Koesarjojen iskusitkeyden tulosten välillä oli hajontaa. Kun lovi oli hitsissä, ero suurimman ja pienimmän mittaustuloksen välillä oli 21 J. Kun lovi oli muutosvyöhykkeellä, ero oli 35 J. Ero iskukoesarjojen tulosten välillä voi johtua esimerkiksi hitsissä olleista epäpuhtauksista.

Kovuusmittauksissa käytettiin Vickerskoetta (HV5) vaikka standardi edellyttää Vickerskoetta (HV10). Kokeen tekijä halusi käyttää 5 kg paininkuormaa 10 kg paininkuorman sijasta. Koska standardin ja kovuuden lisävaatimuksen arvot oli annettu HV10-kokeelle, tuloksista ei suoraan nähdä täyttivätkö mitatut kovuudet painelaitteiden vaatimukset. Aiemmin tehdyssä P355NL2 kovuuskokeessa perusmateriaalin Vickerskovuus (HV10) oli noin 171 (Turkia 2022b). Tässä tutkimuksessa tehdyn Vickerskokeen (HV5) perusmateriaalin kovuus oli noin 161 ja maksimikovuus 235. Perusmateriaalin kovuus oli noin 6,2 % suurempi käytettäessä HV10-koetta kuin HV5-koetta. Jos lisätään tutkimuksessa saatuun maksimikovuuteen 235 (HV5) 6,2 %, saadaan maksimikovuudeksi 250 (HV10). Näin saadaan suuntaa antava arvo, mitä HV10-kovuuden maksimiarvo olisi mahdollisesti ollut. Painelaitteiden kovuuden maksimiarvo on 380 (HV10), joten voidaan olettaa, että kovuus oli tätä pienempi. Kovuuden lisävaatimuksen 250 (HV10) täyttymistä ei tällä menetelmällä voida tietää. Perusmateriaalin kovuuksien arvoja ei voida myöskään vertailla luotettavasti keskenään, koska ne olivat eri sulatuserää ja niiden perusmateriaalin kovuuksissa saattoi olla eroja.

Hypoteesi oli, että pohjapalon kovuus olisi ollut suurempi, koska keyhole TIG-hitsauksessa kappale jäähtyy nopeasti. Juuren puolella kovuuden vaihtelu oli vähäistä, koska jauhekaarihitsauksen tuoma suuri lämmöntuonti todennäköisesti päästi pohjapalkoa ja pienensi kovuutta. Ilmiöstä on etua hitsattaessa keyhole TIG-hitsausmenetelmällä pohjapalkoja.

Makrohietutkimus täytti painelaitteiden vaatimukset. Harjoituskappaleesta K1 otetusta makrohieestä havaittiin kuitenkin, että korkean pohjapalon kuvun takia kuvun takia hitsiin saattaa jäädä virheitä. Vaikka ongelmaa ei esiintynyt koekappaleesta otetussa makrohieessä, kuvun korkeutta tulee saada laskettua, jotta riskiltä vältyttäisiin. Harjoituskappaleesta K4 otetussa makrohieessä pohjapalon kupu oli alhaisempi, mitä se oli koekappaleissa T1 ja T2. Tämä saattoi johtua esimerkiksi polttimen kulman muuttumisesta tai materiaalierosta harjoituskappaleiden ja testikappaleiden välillä.

Hiltunen (2022) totesi, että alustavan menetelmäkokeen tuloksia ei voida pitää täysin luotettavina. Hänen mukaansa tulokset ovat suuntaa antavia, ja niitä voidaan kuitenkin käyttää apuna arvioitaessa menetelmän soveltuvuutta seostettujen laatuterästen pohjapalon hitsaamiseen.

Näillä pohjustuksilla voidaan vastata kolmanteen tutkimuskysymykseen, saavutetaanko menetelmällä painelaitteiden hitseiltä vaadittava laatu. Saatujen tulosten perusteella menetelmällä ei saavuteta painelaitteiden hitseiltä vaadittua laatua, koska yksi pintataivutussauva murtui. Korkea pohjapalon kupu voi huonontaa hitsin laatua, vaikka alustavassa menetelmäkokeessa ongelmaa ei esiintynyt. Jos menetelmäkoe tehtäisiin uudelleen, menetelmäkokeen tulokset todennäköisesti täyttäisivät painelaitteiden hitseille asettamat vaatimukset. Alustavan menetelmäkokeen tulokset olivat parempia mitä saattoi olettaa hitsauskokeen osittaisen epäonnistumisen takia. Tuloksista kuitenkin nähdään, että pohjapalon keyhole TIG-hitsausta pitäisi tutkia enemmän ja menetelmälle voi olla potentiaalista käyttöä painelaitteiden pohjapalkojen hitsaamisessa.

## 5 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää keyhole TIG-hitsauksen soveltuvuus seostettujen laatuterästen pohjapalon hitsaamiseen. Keyhole TIG-hitsausprosessia ja siihen vaikuttavia tekijöitä tutkittiin kirjallisuuden ja aiempien tutkimusten avulla. Koska keyhole TIG-hitsauksen soveltuvuutta seostettujen laatuterästen pohjapalkojen hitsaamiseen ei ole aikaisemmin tutkittu, tehtiin tässä tutkimuksessa hitsauskokeita ja alustava menetelmäkoe. Painelaitteiden lainsäädäntöön ja muihin vaatimuksiin perehdyttiin, jotta tiedettäisiin hitsausprosessille asetetut vaatimukset. Lisäksi saatiin vertailukohta, johon alustavan menetelmäkokeen tuloksia voitiin verrata.

Hitsauskokeiden tuloksien vertaaminen aiempiin tutkimuksiin oli haastavaa, koska keyhole TIG-hitsausta kyseeseen sovelluskohteeseen ei ole aikaisemmin tutkittu. Pohjapalon hitsauskokeessa osaviistettyyn V-railoon havaittiin, että pohjapalon kupu oli korkea ja hitsiin syntyi välillä pallon muotoisia epämuodostumia. Näiden ilmiöiden välillä arveltiin olevan yhteys ja sen selittämiseksi sekä ongelmien korjaamiseksi haastateltiin asiantuntijoita. Hitsausnopeuden nostamisen havaittiin alentavan tarvittavan virran suuruutta, mikä johtui perusmateriaalin sulamisesta V-railon sivuilta. Pohjapalon hitsauksen jälkeen hitsattiin toinen palko jauhekaarhitsauksella. Tämän jälkeen tehtiin pohjapalon hitsin onnistuneille osille alustava menetelmäkoe. Alustavan menetelmäkokeen tuloksia verrattiin painelaitteiden hitsien vaatimuksiin hitsin laadun riittävyyden arvioimiseksi.

Hitsauskokeiden tulokset osoittivat, että seostetun laatuteräksen pohjapalon hitsaaminen osaviistettyyn V-railoon on mahdollista ilman juurikaasua, mutta hitsaus on haastavaa. Hitsauskokeessa havaittujen ongelmien ja ilmiöiden takia tulisi asiaa tutkia lisää. Jatkossa kannattaisi tutkia sulan käyttäytymistä, jotta tiedettäisiin ilmiö korkean kuvun ja hitsisulaan muodostuneiden epämuodostumisen takana. Myös hitsausasennon, polttimen kulman ja lisäaineen tuonnin vaikutusta hitsiin tulisi tutkia. Railomuodon muuttamista kannattaisi harkita, koska tässä tutkimuksessa todettiin ongelmien ainakin osittain johtuvan käytetystä osaviistetystä V-railosta. Tutkimuksessa todettiin myös, että keyhole TIG-hitsauksen

suurimpia etuja muihin keyhole-hitsausprosesseihin verrattuna on pieni poltin ja yksinkertainen toimintaperiaate.

Alustavan menetelmäkokeen tulosten mukaan hitsi ei täyttänyt painelaitteiden hitseille asettamia vaatimuksia, koska yksi pintataivutussauva murtui. Tutkimuksessa havaittiin, että korkea pohjapalon kupu voi huonontaa hitsin laatua. Alustavan menetelmäkokeen tuloksia ei voida pitää täysin luotettavina, mutta ne ovat suuntaa antavia. Jotta saataisiin luotettavia tuloksia, tulisi menetelmäkoe tehdä täysin standardin mukaan.

Tutkimuksessa ei tutkittu ilmaraon muuttumisen vaikutusta. Jotta tiedettäisiin, soveltuuko menetelmä painelaitteiden pohjapalkojen hitsaamiseen, tulisi ilmaraon muuttumista tutkia. Tämän tutkimuksen tulosten pohjalta voidaan kuitenkin todeta, että menetelmälle voi olla potentiaalista käyttöä painelaitteiden pohjapalkojen hitsaamisessa. Tutkimuksessa ei myöskään tarkasteltu keyhole TIG-hitsausjärjestelmään investoimisen kannattavuutta tai investoinnin vaikutusta tuotantoprosessiin. Jos hitsaus saadaan onnistumaan ilmaraon muuttuessa ja menetelmäkokeen tulokset täyttävät painelaitteiden vaatimukset, kannattaa investoinnin kannattavuutta tutkia.

## Lähteet

Cary, H. B. & Helzer, S. C. 2005. *Modern Welding Technology*. 6. painos. New Jersey: Pearson Education, Inc. 715 s.

CR ISO 15608. *Welding. Guidelines for a metallic material grouping system (ISO/TR 15608:2000)*. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. 11 s.

Davim, J. P. 2021. *Welding Technology*. Cham: Springer Nature Switzerland AG. 430 s.

European Commission. 2022. Summary of references of harmonised standards published in the Official Journal – Directive 2014/68/EU of the European Parliament and of the Council of 15 May 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of pressure equipment. 18 s.

EWM. 2021. *forceTIG - high-performance TIG joining process*. 23 s.

Fan, W., Ao, S., Huang, Y., Liu, W., Li, Y. Feng, Y., Luo, Z. & Wu, B. 2017. Water cooling keyhole gas tungsten arc welding of HSLA steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol 92. S. 2207–2216

Fang, Y., Liu, Z., Cui, S., Zhang, Y., Qiu, J. & Luo, Z. 2017. Improving Q345 weld microstructure and mechanical properties with high frequency current arc in keyhole mode TIG welding. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol 250. S. 280–288

Feng, Y., Luo, Z., Liu, Z., Li, Y., Luo Y. & Huang, Y. 2015. Keyhole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel. *Materials and Design*. Vol 85. S. 24–31

Fischer, A. Setting new standards with exceptional cooling, a modified TIG process sets new benchmarks in terms of quality, speed and cost effectiveness [verkkodokumentti]. *Welding Productivity*. [Viitattu 5.3.2022]. Saatavissa: <https://weldingproductivity.com/article/setting-new-standards/>

Fort Wayne Metals. CP Titanium [verkkodokumentti]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.fwmetals.com/services/resource-library/unalloyed-commercially-pure-cp-titanium1/>

Hietanen, J. 2022a. Forcetig materiaalia [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Juho Immonen. Lähetetty 31.1.2022 klo 16.57 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”forceTig applications and simple set-up.pdf”.

Hietanen, J. 2022b. Toimitusjohtaja, Metawell Oy. Puhelinhaastattelu 18.3.2022. Haastattelijana Juho Immonen. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Hiltunen, E. 2022. Laboratorio-insinööri, Lappeenranta–Lahden teknillinen yliopisto LUT. Lappeenranta. Haastattelu 22.3.2022. Haastattelijana Juho Immonen. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Huang, Y., Luo, Z., Lei, Y., Ao, S., Shan, H. & Zhang, Y. 2018. Dissimilar joining of AISI 304/Q345 steels in keyhole tungsten inert gas welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 96. S. 4041–4049

Jarvis, B. L. 2001. Keyhole gas tungsten arc welding: a new process variant [verkkodokumentti]. Wollongong: heinäkuu 2001 [viitattu 17.2.2022]. Doctor of Philosophy thesis. University of Wollongong, Faculty of Engineering. 288 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://ro.uow.edu.au/theses/1833>

Lathabai, S., Jarvis, B. L. & Barton K. J. 2001. Comparison of keyhole and conventional gas tungsten arc welds in commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering A299*, S. 81–93.

Lehtomaa, K. 2022a. VS: ArcTig. [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Juho Immonen. Lähetetty: 26.1.2022 klo 10.56 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”ArcTig boom test.pdf”.

Lehtomaa, K. 2022b. VS: ArcTig. [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Juho Immonen. Lähetetty: 26.1.2022 klo 11.02 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”ArcTig test.pdf”.

Lepola, P. & Ylikangas, R. 2016. Hitsaustekniikka ja teräsrakenteet. Helsinki: Sanoma Pro Oy. 415 s.

Liu, Z., Chen, S., Cui, S., Lv, Z., Zhang, T. & Luo, Z. 2019. Experimental investigation of focusing cathode region by cooling tungsten. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 138. S. 24–34

Liu, Z., Fang, Y., Cui, S., Yi, S., Qiu, J., Jiang, Q., Liu, W. & Luo, Z. 2017a. Keyhole thermal behavior in GTAW welding process. *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 114. S. 352–362.

Liu, Z., Fang, Y., Qiu, J., Feng, M., Luo, Z. & Yuan, J. 2017b. Stabilization of weld pool through jet flow argon gas backing in C-Mn steel keyhole TIG welding. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 250. S. 132–143.

Lukkari, J. 2002. *Hitsaustekniikka. Perusteet ja kaarihitsaus*. 4. painos. Helsinki: Edita Prima Oy Ab. 292 s.

Matmatch. EN 10216-3 Grade P355NL2 normalized or normalized formed (+N) [verkkodokumentti]. [Viitattu 22.3.2022]. Saatavissa: <https://matmatch.com/materials/minfm35274-en-10216-3-grade-p355nl2-normalized-or-normalized-formed-n->

MatWeb 2022a. AISI Type 316L Stainless Steel, annealed plate [verkkodokumentti]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=530144e2752b47709a58ca8fe0849969>

MatWeb 2022b. 304 Sainless Steel [verkkodokumentti]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da>

Niagaj, J. 2014. Ways to improve the efficiency of welding stainless steel. *Welding International*. Vol. 28 S. 45–53.

Penttilä, S. 2022. Tutkijatohtori, Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT. Puhelinhaastattelu 9.3.2022. Haastattelijana Juho Immonen. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

SFS-EN ISO 15614-1. 2004. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkelseosten kaarihitsaus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 59 s.

SFS-EN 10028-3:2017. 2017. Panielaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 3: Normalisoidut hitsattavat hienoraeteräkset. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. 36 s.



SFS-EN 13445-1:2021. 2021. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 1: Yleistä. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. 123 s.

SFS-EN 13445-2:2021, 2021. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 2: Materiaalit. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. 180 s.

SFS-EN 13445-4:2021. 2021. Lämmittämättömät painesäiliöt. Osa 4: Valmistus. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. 123 s.

SFS-EN 25817. 1993. Terästen kaarihitsaus, Hitsiluokat. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. 21 s

SFS-EN 970. 1997. Hitsien rikkomaton aineenkoetus. Sulahitsausliitosten silmämääräinen tarkastus. Helsinki: Suomen Standarditoimistoliitto SFS. 20 s

Steel Grades. Q345 [verkkodokumentti]. [Viitattu 16.3.2022]. Saatavissa: <https://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Structure-Steel/Q345.html>

Tukes. Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi [verkkodokumentti]. [Viitattu 28.2.2022]. Saatavissa: <https://tukes.fi/-/painelaitteiden-suunnittelu-valmistus-ja-vaatimustenmukaisuuden-arvioin-1>

Turkia, R. 2022a. Suunnittelupäällikkö, hitsauskoordinaattori (IWE), Refinec Oy. Lappeenranta. Haastattelu 10.3.2022. Haastattelijana Juho Immonen. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Turkia, R. 2022b. P355NL2 kovuusmittauksia referenssiksi [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: juho.immonen@student.lut.fi. Lähetetty 21.3.2022 klo 14.25 (GMT +0200).

16.12.2016/1144. Painelaitelaki. [Viitattu 28.2.2022]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161144#L3P15>

2014/68/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 15.5.2014 painelaitteiden asettamista saataville markkinoilla koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön yhdenmukaistamisesta. 96 s.

# SSAB

## VASTAANOTTODISTUS INSPECTION CERTIFICATE

EN 10 204-3-1 (2004)/PED 2014/68/EU

1/3  
A 23413 -003 A  
19.04.2021

Tilauksen Purchaser  
BE GROUP OY AB  
PL 54  
15101 LAHTI FINLAND  
Tilauksen Order No.  
P0888865

Vastaanottaja Consignee  
BE GROUP OY AB  
PAAKKARILANTIE 3  
20240 TURKU FINLAND  
Tilauksen Order Confirmation  
23413  
Tilauksen Order Confirmation  
23413

Asiakkaan merkki Shipping mark

Pakkausmerkki  
20.04.2021  
Vainitsijan merkki  
Mark of the Manufacturer



Todistus Certificate  
3NVPED

Laajuus Shipping

Laatuvaatimus Quality Marking  
P355NL1 P355NL2 P355NH

Tarkastajan laama  
Stamp of Inspector  
Vastaanottajan laama  
Stamp of Surveyor  
Muitä merkkit  
Other Stamps

Mxx

Technical terms of Delivery and/or Official Regulations

Tuotteen Delivery Type  
REST DELIVERY  
Tuote Product  
HEAVY PLATES  
Läji Grade  
P355NL1/NL2/NH EN 10028-3:2017  
Laatuvaatimus Quality Specifications  
WELDABLE FINE-GRAIN PRESSURE VESSEL STEEL

Sulatus no levy no Cast No. Plate No.  
X X X X X X X X X X X X X X X  
Toleranssit Tolerances  
EN 10029:2010 CLASS C

Normalized Steel Plates  
SURFACE CONDITION EN 10 163-2:2005 CLASS B3  
001 12.00 X 2450 X 8000 2100178055

Paikka Position	Mitat Dimensions mm	Merkki Mark	Kpl Pcs	Paino Weight kg	Sulatus levy no Cast Plate No	SP no SP No	UT UT	MT MT
3	5646	71056	049	049	049			
***	3	5646						

### Raaste Steel Works

Tilauksen Testing and Inspection

Tilauksen, todistuksen, ölkön toiminta on tilauksen mukainen.

We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order confirmation.

Certified to comply with the Pressure Equipment Directive 2014/68/EU annex 1 section 4.3 by DNV GL (138046-2015-CE-FIN-DNV GL) according to the quality system standard EN ISO 9001:2015. Certificate No. 91659CC31-2011-AQ-FIN-FINMS.

RTX39  
MINNA VALKAMA  
Valtuutettu edustaja Authorized inspection representative  
Yhtiön nimi Company Name: SSAB Europe Oy  
Kotipaikka Registered Office: HÄMEENLINNA

Osio Address: PL 93 P.O. Box 93  
FIN-92101 RAAHE, FINLAND

Puhelin telephone: 020 5911  
+358 20 5011

Y-tunnus Business ID: 238946-7

Liite 1: P355NL2 materiaalitodistus



**AINESTODISTUS TEST REPORT**

EN 10 204-3:1 (2004)/PED 2014/68/EU

2/3  
A 23413 -003 A  
19.04.2021

Tilain Puhdistus  
BE GROUP OY AB  
PL 54  
15101 LAHTI FINLAND  
Tilaus no Order No:  
P088885

Tuusvaivutus Order Confirmation  
23413

Vaivastodistus Certificate  
BE GROUP OY AB  
PAAKKARLANTIE 3  
20240 TURKU FINLAND  
Aistakaan merkki Shipping mark

Puhdistus Date  
20.04.2021  
Valmistajan merkki  
Mark of the Manufacturer



Laji Grade  
P355NL1/NL2/NH

Leikkausluokka Quality Specifications  
Lisävaivastodistus Additional requirements

Jatkuvavaihtua happipöytäsiili  
Oxygen steel, continuous casting  
Fully killed, Fine grain practice

**WELDABLE FINE-GRAIN PRESSURE VESSEL STEEL**

N 920C,T=1:(MIN)X THICK(MM)

Pos. Item	Sulatus kera no Cast. test No	T-tila Card	Vaikeus Tensile test			REH MPa	RM MPa	Z %	RE / RM	RM + AS	RAZ %	Keskiverto Average	Huom No	Päästö Tempering °C
			K2 °C	RPO2 MPa	RT05 MPa									
001	71056 049	N 11	51	+300	252	403	536	28						
			5C	+300	252	417	541	30						
K2: 11=TOP;TRANSV. 51=BOTTOM;TRANSV. 1C=RP0.2 5C=RP0.2														
N=NORMALIZED														
FA = % Shear fracture appearance														
LE = (mm) Lateral Expansion														
001	71056 049	116	-050	62	72	62	63							
		116	-040	88	106	94	96							
		116	-020	157	109	105	124							
		156	-050	81	62	61	68							
		156	-040	134	138	84	119							
		156	-020	112	124	98	111							
K3: 116=CH-VISO-V(U)7.5X10;TOP;TRANSV;KV600 156=CH-VISO-V(U)7.5X10;BOTTOM;TRANSV;KV600														

**Raabe Steel Works**

Testausta ja tarkastusta Testing and Inspection

Tilain todistuksen alkuperä on tilaajayhteistyön mukainen.  
We hereby certify that the material described above has been tested and complies with the terms of the order confirmation.

**MINNNA VALKAMA**  
Valtuutettu tarkastaja  
Yhtäyksen nimen mukainen  
Kotipaikka Registered Office:

SSAB Europe Oy  
HÄMEENLINNA

Uusi osoite Address:  
PL 93 P O Box 93  
FIN-92101 RAAHJE FINLAND

Huhailin | telephone: +358 20 3971

Y-tunnus Business ID: 238944-7

RTY97

# SSAB

## ANALYYSITODISTUS ANALYSIS CERTIFICATE ANALYSEBESCHENIGUNG COMPOSITIO CHIMIQUE CERTIFICAT СЕРТИФИКАТ АНАЛИЗА

3/3  
A 23413 -003 A  
19.04.2021

Printed Date Datum Date Date  
20.04.2021

AMH

Sävellys no Schmelzen Nr No de coulees № Плавки	Koe no Pann Essai No № Печи	Pöytä Cäs Cäs № Печи	Ota Cäs Cäs	Analyysi % Chemical composition % Analyse % Composition Chimique %	%	Chemisch Zusammensetzung % Composition Chimique %	%	Composition Chimique %	%	Analyse määrä % (1-ppm)	C	SI	Mn	P	S	Al	NB	V	Ti	Cu	CR	NI	MO	N	B	
71056	001	.41	.156	.44	1.43	.011	.002	.034	.043	.008	.005	.017	0.04	0.05	.003	.004	.0004									

CEQ=C-Mn+V+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/75

### Raabe Steel Works

Taastus ja tarkastus  
Prüfung und Kontrolle

Tasting and Inspection  
Essais et Contrôle

Контроль и проверка качества

Steel manufactured and supplied by Raabe Steel Works is free from deleterious  
Produced and supplied by metallurgical company Raabe Steel Works and its subsidiaries  
Заводской стали не содержит вредных примесей

### MINNA VALKAMA

Valtuutettu tarkastaja  
Sachverständiger  
Yhtiön nimi Company Name  
Kotipaikka Registered Office

Authorized inspection representative  
Inspector authorised  
SSAB Europe Oy  
HÄMEENLINNA

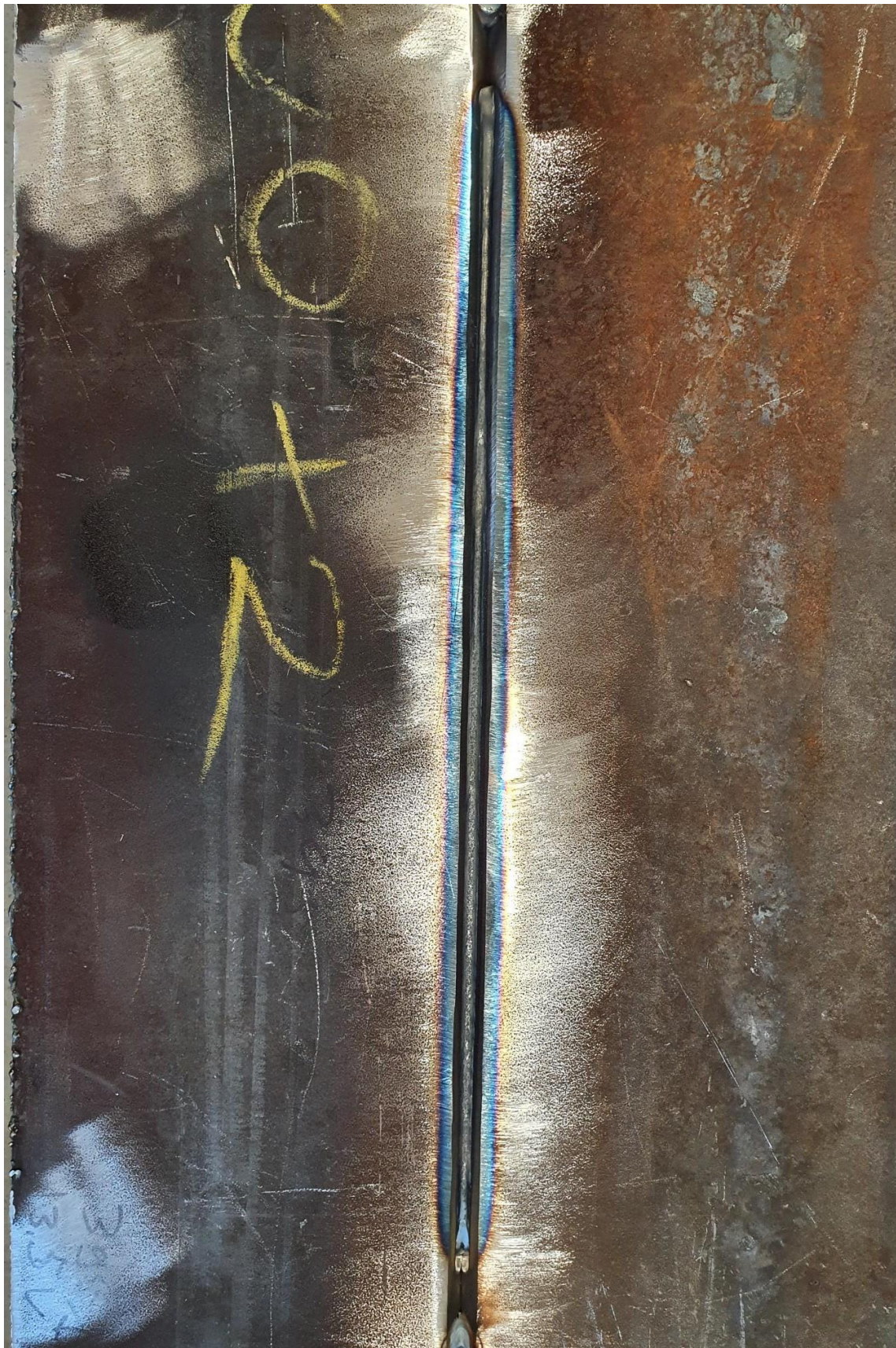
Yhteisöön kuuluva yritys  
Osake Address:  
P.O. Box 93  
FIN-52101 RAABE, FINLAND

Puhelin I telephone:  
020 5911  
+358 20 5911

Y-tunnus Business ID: 2389445-7



Liite 2: Harjoituskappale K3





Liite 3: Koekappale T1



Liite 4: Lisäainelangan ainestodistus

**ABNAHMEPRÜFZEUGNIS NACH EN 10204-3.1**  
Inspection certificate according to EN 10204-3.1

Nr. CE2021-0362  
No.

Retco Oy  
Ojantie 36  
28130 Pori  
Finland



<b>Name:</b> Name	<b>Welding Wire BA-S2Si</b>	<b>Abmessung:</b> Size	<b>4.0 MM</b>
<b>Chargen-Nr.:</b> Lot no.	<b>13427/2020</b>	<b>Normbezeichnung:</b> Classification	<b>S2Si</b>
<b>Nach DIN/EN:</b> Acc. to DIN/EN	<b>ISO 14171</b>	<b>Nach ASME/AWS:</b> Acc. to ASME/AWS	<b>A5.17 EM12K</b>
<b>Bestell-Nr.:</b> Order no.	<b>9218 DATED 25.02.2021</b>	<b>Kommissions-Nr.:</b> Internal order no.	<b>PL2021-0248</b>

**Liefermenge (kg): 3.000**  
Quantity (kg)

**ChemischeAnalyse(Gew.-%)**  
Chemical analysis (wt %)

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu-Steel</b>
<b>0.100</b>	<b>0.180</b>	<b>1.080</b>	<b>0.017</b>	<b>0.017</b>	<b>0.020</b>	<b>0.060</b>	<b>0.040</b>	<b>0.130</b>
<b>V</b>	<b>N</b>	<b>Al</b>	<b>Sn</b>					
<b>0.000</b>	<b>0.007</b>	<b>0.000</b>	<b>0.012</b>					

**Bemerkungen:**  
Notes

Unterschleißheim, 04.03.2021

Abnahmebeauftragter: Jana Brückner

Dieses Dokument wurde durch ein DV-System erstellt und ist gemäß DIN EN 10204, Abschn. 5 ohne Unterschrift gültig.

This document has been prepared by a computer system and is valid without signature in accordance with DIN EN 10204, section 5.





Liite 5: Lisäainejauheen aineodistus

**ABNAHMEPRÜFZEUGNIS NACH EN 10204-2.2**  
Inspection certificate according to EN 10204-2.2

Nr. CE2021-0363  
No.

Retco Oy  
Ojantie 36  
28130 Pori  
Finland



<b>Name:</b> Name	<b>Welding Flux BF 3.5</b>	<b>Körnung:</b> Grain size	<b>K2-16</b>
<b>Chargen-Nr.:</b> Lot no.	<b>35297</b>	<b>Normbezeichnung:</b> Classification	<b>S A AB 1 67 AC H5</b>
<b>Nach DIN/EN:</b> Acc. to DIN/EN	<b>ISO 14174</b>	<b>Nach ASME/AWS:</b> Acc. to ASME/AWS	
<b>Bestell-Nr.:</b> Order no.	<b>9218 DATED 25.02.2021</b>	<b>Kommissions-Nr.:</b> Internal order no.	<b>PL2021-0248</b>
<b>Liefermenge (kg):</b> Quantity (kg)	<b>3.000</b>		

**Chemische Analyse (Gew.-%)**

Chemical analysis (wt %)

**BF3.5 + S2**

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>
<b>0.051</b>	<b>0.49</b>	<b>1.77</b>	<b>0.019</b>	<b>0.008</b>	<b>0.08</b>

**Siebanalyse**

Screen properties

< 0.2	> 0.2	> 0.315	> 0.5	> 0.8	> 1.0	> 1.6	> 2.0	mm
0.3	0.5	4.7	27.7	20.3	37.9	8.7	0.0	%

**Bemerkungen:**

Notes

Unterschleißheim, 04.03.2021

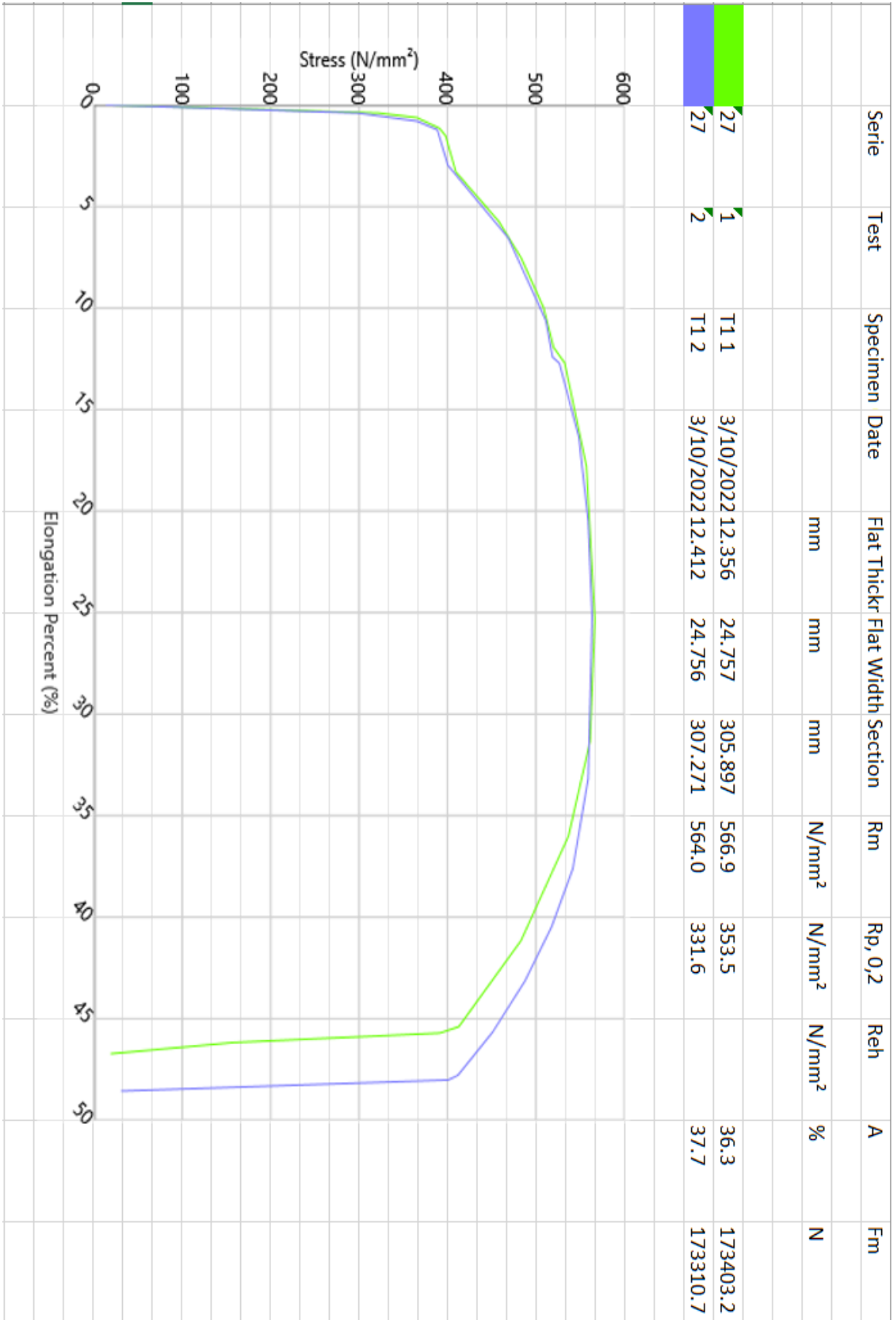
Abnahmebeauftragter: Milivoj Kecman

Dieses Dokument wurde durch ein DV-System erstellt und ist gemäß DIN EN 10204, Abschn. 5 ohne Unterschrift gültig.


This document has been prepared by a computer system and is valid without signature in accordance with DIN EN 10204, section 5.




Liite 6: Poikittaisen vetokokeen tulokset



Liite 7: Poikittaisen taivutuskokeen tulokset

		<b>TAIVUTUSKOE</b>						
		<b>LUT Kone</b>			Pöytäkirjan numero _____			
pWPS	-							
Sovellustandardi	<b>SFS-EN 5173</b>				Taivutintelan halkaisija	$d \leq 4xt$		
Asiakas / viite	<b>Kandidaatintyö</b>				Tukitelojen väli	$l > (d+2xt)$		
Perusaine	<b>P355NL</b>				$t = \text{levynpaksuus}$			
Aineenpaksuus	<b>12 mm</b>							
Hitsityyppi	<b>BW</b>				TFBB	Päittäishitsin pintaivutuskoe		
Hitsausprosessi	<b>TIG + SAW</b>				TRBB	Päittäishitsin juuritaivutuskoe		
Hitsausaine	<b>Wire BA-S2Si Ø 4.0 + Flux BF 3.5</b>				SBB	Päittäishitsin sivutaivutuskoe		
Koelämpötila	<b>20 °C</b>							
Huomautuksia								
Koesauva Nro / sijainti	Koemene- telmä	Mitat mm	Taivutintelan halkaisija/ mm	Tukitelojen väli / mm	Taivutus- kulma / °	Alkumitta- pituus / mm	Venymä %	Huom!
<b>1</b>	<b>TFBB</b>	<b>12x20</b>	<b>45</b>	<b>70</b>	<b>180</b>	-	-	<b>ok</b>
<b>2</b>	"	"	"	"	<b>60</b>	-	-	<b>Murtui</b>
<b>3</b>	<b>TRBB</b>	"	"	"	<b>180</b>	-	-	<b>ok</b>
<b>4</b>	"	"	"	"	<b>180</b>	-	-	<b>ok</b>
Taivutuskokeen koetulosten mukaisesti koetulos " _____ ".								
Testauksen suorittaja								
Päivämäärä		Allekirjoitus						
<b>8.3.2022</b>		<b>Esa Hiltunen</b>						
Kokeen valvoja								
Päivämäärä		Allekirjoitus						

Liite 8: Iskukokeen tulokset

		LAPPEENRANNAN YLIOPISTO						
		LUT Kone						
		Pöytäkirjan numero						
		ISKUKOE						
pWPS							Nimikemerkintä:	
Sovellustandardi	<b>SFS EN 9016</b>					Muoto: 1 2 3 a/b		
Asiakas / viite	<b>Kandidaatintyö</b>					1: sauvan tyyppi (V tai U)		
Perusaine	<b>P355NL</b>					2: loven paikka (W tai H)		
Aineenpaksuus	<b>12 mm</b>					3: lovetun pinnan suunta (S tai T)		
Hiitsityyppi	<b>BW</b>					a: loven etäisyys vertailuviivasta		
Hiitsausprosessi	<b>TIG + SAW</b>					b: koekappaleen ja sauvan pinnan välinen etäisyys		
Hiitsausaine	<b>Wire BA-S2Si Ø 4.0 + Flux BF 3.5</b>							
Huomautuksia								
Koesauva Nro	Nimike	Sauvan mitat / mm	Koelämpötila / °C	Vasaran energia/ J	Iskusitkeys J	Murtuman sijainti	Murtuman tyyppi	Virheen tyyppi ja koko
1.1	VWT0/1	10X10X55	-40	300	43	-	-	-
1.2	"	"	"	"	48	-	-	-
1.3	"	"	"	"	27	-	-	-
Keskiarvo	"	"	"	"	39	-	-	-
1.4	VHT1/1	"	"	"	48	-	-	-
1.5	"	"	"	"	57	-	-	-
1.6	"	"	"	"	83	-	-	-
Keskiarvo	"	"	"	"	63	-	-	-
Keskiarvo								
Keskiarvo								
Keskiarvo								
Keskiarvo								
Iskukokeen koetulosten mukaisesti koetulos " _____ <b>hyväksytty</b>								
Testauksen suorittaja								
Päivämäärä	Allekirjoitus							
<b>22.3.2022</b>	<b>Esa Hiltunen</b>							
Kokeen valvoja								
Päivämäärä	Allekirjoitus							

Liite 9: Kovuuskokeen pinnan puolen tulokset

Näyte	Sarja	Mittauspiste	Menetelmä	Objektiivi	X-etiäisyys aloituspaikkaan (mm)	Y-etiäisyys aloituspaikkaan (mm)	Z-etiäisyys aloituspaikkaan (mm)	Kovuus	Lävistäjä	Väri	Rengasvalo	Zoom taso
TI pinta	Sarja 1	1 HV 5	10x	10x	0	0	0	160	240,658	Ei	Ei	1
		2 HV 5	10x	10x	1	0	0	161	239,617	Ei	Ei	1
		3 HV 5	10x	10x	2	0	0	162	239,583	Ei	Ei	1
		4 HV 5	10x	10x	3	0	0	169	234,385	Ei	Ei	1
		5 HV 5	10x	10x	3,5	0	0	177	228,666	Ei	Ei	1
		6 HV 5	10x	10x	4	0	0	187	222,923	Ei	Ei	1
		7 HV 5	10x	10x	4,5	0	0	201	214,583	Ei	Ei	1
		8 HV 5	10x	10x	5	0	0	220	205,231	Ei	Ei	1
		9 HV 5	10x	10x	5,5	0	0	235	198,443	Ei	Ei	1
		10 HV 5	10x	10x	6	0	0	218	206,272	Ei	Ei	1
		11 HV 5	10x	10x	6,5	0	0	220	205,215	Ei	Ei	1
		12 HV 5	10x	10x	7	0	0	226	202,607	Ei	Ei	1
		13 HV 5	10x	10x	8	0	0	226	202,607	Ei	Ei	1
		14 HV 5	10x	10x	9	0	0	218	206,253	Ei	Ei	1
		15 HV 5	10x	10x	10	0	0	220	205,22	Ei	Ei	1

**Kovuus pinnan puolella**

Liite 10: Kovuuskokeen juuren puolen tulokset

Näyte	Sarja	Mittauspiste	Menetelmä	Objektiivi	X-etäisyys aloituspaikkaan (mm)	Y-etäisyys aloituspaikkaan (mm)	Kovuus	Lävistäjä	Väri	Rengasvalo	Zoom taso
T1 juuri	Sarja 1	1 HV 5	10x	10x	0	0	161	239,667	Ei	Ei	1
		2 HV 5	10x	10x	1	0	174	230,789	Ei	Ei	1
		3 HV 5	10x	10x	2	0	177	228,646	Ei	Ei	1
		4 HV 5	10x	10x	3	0	185	223,961	Ei	Ei	1
		5 HV 5	10x	10x	3,5	0	181	226,057	Ei	Ei	1
		6 HV 5	10x	10x	4	0	182	225,522	Ei	Ei	1
		7 HV 5	10x	10x	4,5	0	183	225,002	Ei	Ei	1
		8 HV 5	10x	10x	5	0	184	224,503	Ei	Ei	1
		9 HV 5	10x	10x	5,5	0	184	224,482	Ei	Ei	1
		10 HV 5	10x	10x	6	0	202	214,063	Ei	Ei	1
		11 HV 5	10x	10x	6,5	0	208	210,944	Ei	Ei	1
		12 HV 5	10x	10x	7	0	219	205,732	Ei	Ei	1
		13 HV 5	10x	10x	7,5	0	222	204,201	Ei	Ei	1
		14 HV 5	10x	10x	8	0	222	204,191	Ei	Ei	1
		15 HV 5	10x	10x	9	0	220	205,21	Ei	Ei	1

Kovuus juuren puolella

Kovuus / HV5

Etäisyys / mm