

RAILOMUODON VAIKUTUS 500 MPA OFFSHORE-
TERÄKSEN HITSIN ISKUSITKEYTEEN

ArcDigi-projekti

Ville Juvonen

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Konetekniikka

2020

Tekniikka ja liikenne
Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Ville Juvonen	Vuosi	2020
Ohjaaja	DI Raimo Ruoppa		
Toimeksiantaja	SSAB Europe Oy		
Työn nimi	Railomuodon vaikutus 500 MPa lujuusluokan offshore-teräksen hitsin iskusitkeyteen		
Sivu- ja liitesivumäärä	53 + 3		

Tämä opinnäytetyö tehtiin SSAB Europe Oy:lle. Työn tavoitteena oli tutkia 500 MPa lujuusluokan offshore-teräksen hitsausta ja ominaisuuksia.

Hitsauksen ongelmana kerrottiin olevan ½ V-railon hitsin keskikohta, jossa teräksen iskusitkeys on aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu alentuneen. Tässä työssä tarkoituksena oli tutkia, onko railon muodolla vaikutusta parempaan hitsin iskusitkeyteen sekä muihin ominaisuuksiin.

Työssä perehdyttiin offshore-terästen käyttöön ja niiden ominaisuuksiin. Työssä tutustuttiin myös terästen aineenkoetuskokeisiin sekä MIG/MAG hitsaukseen. Työssä suoritettujen rikkovien aineenkoetuskokeiden perusteella saatiin käsitys, oliko testattavan olevalla railomuodolla vaikutusta hitsin iskusitkeyteen ja muihin mekaanisiin ominaisuuksiin.

Avainsanat

SSAB, Offshore, teräs, hitsaus

Technology, Communication and Transport
Mechanical Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Ville Juvonen	Year	2020
Supervisor	Raimo Ruoppa, M.Sc (Tech.)		
Commissioned by	SSAB Europe Oy		
Subject of thesis	Weld groove shape effect on the impact strength of 500MPa offshore steel		
Number of pages	53 + 3		

This thesis was made for SSAB Raahe Steel Works. The aim of the thesis was to study the welding and properties of S500 strength grade offshore steel.

The problem with welding was reported to be the center of the ½ V-groove weld, where the impact strength of the steel has been reduced in previous tests. The purpose was to investigate whether the K-rail welding shape has an effect on improved impact strength values and other properties.

In this thesis offshore-steels and offshore-steels properties were investigated. The work also introduced material testing tests for steels and MIG/MAG hit welding.

Key words

SSAB, Offshore, steel, welding

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	SSAB	8
2.1	SSAB:n offshore-teräkset	8
3	OFFSHORE-TERÄKSET	9
3.1	Erikoislujien terästen valmistus	9
3.2	Offshore-teräksille käytettävät standardit	10
3.3	Offshore-terästen käyttöolosuhteet	10
4	HITSAUS	11
4.1	Offshore-terästen hitsaus	11
4.2	MIG/MAG Hitsaus	13
4.3	Hitsausvirheet	15
4.4	Hitsausliitoksen mikrorakennemuutokset	15
4.4.2	Jäähtyminen ja jäähtymisaika $t_{8/5}$	19
5	RIKKOVA AINEENKOETUS	22
5.1	Vetokoe	22
5.2	Iskusitkeys-koe	23
5.3	Kovuuskoe	24
6	METALLOGRAFISET TUTKIMUKSET	25
6.1	Näyte-kappale	25
6.2	Hitsien makro- ja mikrohietutkimukset	25
7	KOEMATERIAALIT JA TESTAUS	27
7.1	Koemateriaali	27
7.2	Hitsauskokeet	28
7.3	Vetokokeet	29
7.4	Iskukokeet	30
7.5	Kovuusmittaukset ja mikrorakennetarkastelut	31
8	TULOKSET	34
8.1	Hitsauskokeet	34
8.2	Vetokokeet	35
8.3	Iskukokeet	36

8.4	Kovuusmittaukset	38
8.5	Metallografiset tutkimukset	40
9	TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	47
10	POHDINTA	52
	LÄHTEET	53
	LIITTEET	55

ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia työssä avustaneita, jonka lisäksi kiitokset Business Finlandille, jonka rahoittaman ArcDigi-projektin ”Digitalisoinnin hyödyntäminen erikoisteräksisten teräsrakenteiden toteutuksessa ja laadunhallinnassa” osana työ toteutettiin.

Erytiskiitokset haluan antaa opinnäytetyöni ohjaajalle Raimo Ruopalle, SSAB Europe Oy:n Kimmo Keltamäelle, kovuusmittauksissa avustaneelle Heidi Kalliosalolle ja hitsaajalle Antti Vimparille.

Iso kiitos perheelleni ja läheisilleni kannustuksesta opinnoissani.

Kemissä 8.1.2020

Ville Juvonen

1 JOHDANTO

Offshore-teräkset ovat nykyään merkittävässä roolissa arktisissa olosuhteissa työskenneltäessä. SSAB on tutkinut offshore-terästen hitsattavuutta ja pyrkinyt selvittämään entistä parempia ratkaisuja paksujen offshore-terästen hitsaamiseen. Työn tarkoituksena on syventyä offshore-teräksiin ja niiden hitsaamiseen. SSAB on käyttänyt offshore-terästen hitsauskokeissa aikaisemmin ½ V-railomuotoa, mutta rikkovissa aineenkoetuskokeissa iskusitkeyden on havaittu olevan tietyissä kohdissa hitsiä alentunut. Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää saadanko iskusitkeyttä parannettua, jos hitsaukset suoritetaan K-railoa käyttäen. Työ tarjottiin Lapin ammattikorkeakoululle, koska sen katsottiin olevan mahdollinen toteuttaa opinnäytetyömuodossa.

2 SSAB

SSAB on maailmanlaajuisesti toimiva teräsyhtiö, joka kehittää erikoislujia teräksiä asiakkailleen. Yhtiö on yksi maailman johtavista teräsyhtiöistä, joka valmistaa korkean lujuuden teräksiä, niistä valmistettuja levy-, nauha-, ja putkituotteita sekä auttaa rakentamisen ratkaisuihin. SSAB:n terästehtaiden vuosittainen kapasiteetti on noin 8,8 miljoonaa tonnia. Tuotantolaitokset sijaitsevat Suomessa, Ruotsissa ja Yhdysvalloissa. Näiden lisäksi yritys käsittelee ja viimeistelee terästuotteitaan Brasiliassa ja Kiinassa sekä monissa muissa maissa. (SSAB 2019.)

Raahen terästehdas on aloittanut toimintansa vuonna 1964. Sekä sulatto että kuumavalssaamo aloittivat toimintansa vuonna 1967. Tehtaalla työskentelee vakituisessa työsuhteessa noin 2400 henkilöä, joista 85 % on miehiä ja 15 % naisia. Tehtaan päätuotteina valmistetaan kuumavalssattuja levyjä sekä kelatuotteita. Tehdas pitää sisällään koksaamon, kaksi masuunia, terässulaton, voimalaitoksen ja kuumavalssaamon. (SSAB 2019.)

2.1 SSAB:n offshore-teräkset

SSAB valmistaa useita erilaisia offshore-teräksiä. Erikoislujissa teräksissä Strenx 700 OME -terästä käytetään esimerkiksi offshore-nostureihin, nostojalkoihin, nostolaitteisiin ja poraustorneihin. Strenx 960 -terästä käytetään hammastankoihin. Termomekaanisesti valssattuja erikoislujia teräksiä S400, S460 ja S500, jotka ovat offshore-spesifikaatioiden mukaisia, käytetään porauslauttojen rakenteisiin, jäänmurtajiin ja laivojen runkoihin. Normaaleja laivanrakennus- ja offshore-rakenteisiin SSAB tarjoaa laatuluokat A:sta S355-lujuusluokkaan asti. Teräksiä käytetään laivojen runkoihin ja porauslauttojen rakenteisiin. (Eames 2016.)

3 OFFSHORE-TERÄKSET

Teräkset ovat rauta-hiili-seoksia, joiden valmistus aloitettiin 1800-luvun puolivälissä. Teräkseksi luokitellaan rautapohjainen seos, joka sisältää alle 2,11 % hiiltä. Kansallinen standardi 10020:2000 määrittelee teräksen seuraavasti: ”Teräs on materiaali, joka sisältää rautaa enemmän kuin mitään muuta yksittäistä alkuainetta ja jonka hiilipitoisuus on yleensä alle 2 % ja joka sisältää muitakin alkuaineita. Tietyt kromiteräkset voivat sisältää hiiltä yli 2 %, mutta yleensä 2 % on raja, joka erottaa valuraudan ja teräksen.” Hitsauksen kannalta teräkset jaetaan standardin CEN ISO/TR 15608:fi mukaan materiaaliryhmiin niiden lujuuden ja kemiallisen koostumuksen mukaan. Hiili vaikuttaa teräksessä esimerkiksi lujuuteen, sitkeyteen, kovuuteen, muovattavuuteen ja hitsattavuuteen. (Lukkari, Kyröläinen & Kauppi 2016a, 38.)

3.1 Erikoislujien terästen valmistus

Erikoislujat teräkset tehdään termomekaanisesti valssaamalla, karkaisemalla ja nuorruttamalla tai suorassammutuksella. Termomekaaninen valssaus on menetelmänä standardien EN 10025-4 ja EN 10149-2 mukainen. Termomekaanisesti valssaamalla saadaan teräksestä tehtyä hyvin hitsattavia, sitkeitä ja korkealujuuksisia teräksiä. Näiden terästen hiilipitoisuuden arvo on 0,03 – 0,15 % välillä. Teräksen raekoko pienenee, kun sen lämpötilaa ja muokkausta kontrolloidaan. Suurin murtolujuus saadaan, kun termomekaanisesti valssatun teräksen raekoko pienennetään. Valssauksen jälkeen teräs jäädytetään, jolloin saavutetaan pienempi raekoko. Termomekaanisesti valssatut teräkset luokitellaan yleensä seostamattomiin hienoraeteräksiin. Pieni raekoko voidaan saada muissa seostamattomissa hienorakenneteräksissä seostamalla mukaan mikroseosaineita kuten titaania ja niobia. Nuorrutuksessa teräs valmistetaan ensin karkaisemalla, jonka jälkeen suoritetaan päästö yli 450 °C:n lämpötilassa. Nuorrutuksen tavoitteena on saada teräkselle korkea murto-, myötö- ja väsymislujuus. Kun päästölämpötila on matala, teräksestä saadaan luja, mutta tämän seurauksena siitä tulee myös hauraampi. Päästölämpötila erikoislujille teräksille on 580-680 °C. (Lämsä & Kiuru 2012.)

3.2 Offshore-teräksille käytettävät standardit

Offshore-teräksille sovelletaan esimerkiksi eurooppalaista standardia SFS-EN 10225 ja norjalaista NORSOK-standardia. NORSOK:in standardeja ovat esimerkiksi M-001 (Materials selection), M-101 (Structural steel fabrication) ja M-120 (Material data sheets of structural steel), joissa viitataan usein eurooppalaiseen EN 10225-standardiin. Pohjois-Amerikassa on käytössä teräksille API-Standardit. Luokituslaitoksilla on olemassa omia sääntöjä sekä kiinteille että liikkuville offshore-rakenteille. Standardeissa yleisin testauslämpötila iskukokeille on -40 °C ja iskuenergiavaatimus on 40-60 J riippuen teräslajista ja levyn paksuudesta. (Lukkari ym. 2016a, 63.)

3.3 Offshore-terästen käyttöolosuhteet

Arktisissa olosuhteissa käytettäville teräksille asetetut vaatimukset ovat tiukat. Esimerkiksi iskusitkeysvaatimuksien on täytettävä jopa -60 °C :n lämpötila haurasmurtumavaaran ehkäisemiseksi. Tyypillisiä teräksiä arktisiin olosuhteisiin ovat matalahiilliset normalisoidut tai termomekaanisesti valssatut hienoraeteräkset. (Lukkari ym. 2016a, 164.)

Termomekaanisesti käsitellyt teräkset soveltuvat offshore-sovelluksiin parhaiten, koska niitä on hyvä hitsata kaikilla hitsausprosesseilla ja niiden työlämpötilaa ei tarvitse yleensä nostaa. Lisäksi vetyhalkeilu, haurausmurtuma tai lamellirepeily ei ole yhtä yleistä termomekaanisesti käsitellyissä teräksissä kuin seostamattomissa rakenneteräksissä. (Lukkari ym. 2016a, 164.)

4 HITSAUS

Terästen yleisimpänä liittämismenetelmänä käytetään hitsausta. Kappaleet liitetään yhteen sulattamalla kappaleiden liitospinnat lisäainetta apuna käyttäen. Lämpöenergia vaikuttaa hitsauskappaleisiin, lisäaineisiin, perusaineen rakenteeseen ja ominaisuuksiin voimakkaasti. Hitsausaumassa syntyy erilaisia vyöhykkeitä. Seostumisvyöhykkeessä sekoittuvat toisiinsa perusaine ja lisäaine 15-60 %:n sekoittumisasteella, riippuen hitsaustyylistä. HAZ-vyöhykkeeksi kutsutaan aluetta, jossa perusaine ei ole sulanut, mutta hitsauslämpö on aikaansaanut vyöhykkeelle mikrorakennemuutoksia. Lujuus voi HAZ-vyöhykkeellä vaihdella paljon. HAZ-vyöhykkeellä sauman kohdalla riski myötämislle kasvaa, jolloin myös halkeilun ja liiallisen karmenemisen riski kasvaa. Ongelmia on mahdollista ehkäistä oikeanlaisella esilämmityksellä, sekä hitsauksen aikaansaaman lämpöenergian rajoittamisella. (Rissanen 2011.)

Lisäaineet jaetaan hitsauksessa kahteen pääryhmään, joita ovat seostamattomat ja vähäseosteiset lisäaineet. Näiden lisäksi käytetään myös ruostumattomasta austeniittisestä teräksestä valmistettuja lisäainetta. Lisäainetta valittaessa huomio tulee kiinnittää lisäaineen vetypitoisuuteen ja lujuuteen. Rasitus, kulutus, hitsausasento ja liitosmuoto ovat tärkeimmät asiat lisäainetta valittaessa. Erikoislujissa teräksissä lisäaineet ovat niukkavetyisiä ja ferriittisiä. Tasaluja lisäaineita valitaan, kun liitokselta vaaditaan suurta lujuutta ja kulutus kohdistuu liitokseen. Tasalujuisella lisäaineella myötölujuus on sama, kuin hitsattavalla materiaalilla. Kun kuormitus on vähäisempi, valitaan aliluja lisäaine. Alilujan lisäaineen etuina ovat matalampi työlämpötila, hitsin matalampi jännitystila, parempi muodonmuutoskyky ja paremmat iskutikeysominaisuudet. Jos halutaan yhdistää molempien lisäaineiden edut, voidaan käyttää molempia lisäaineita. (Rissanen 2011.)

4.1 Offshore-terästen hitsaus

Erikoislujia teräksiä hitsattaessa käytetään yleensä MIG/MAG-, puikko-, tig-, tai täytelankahitsausta. Hitsaustyylistä riippuen, kappaleeseen kohdistuu suuria lämpöenergioita, jonka seurauksena teräksen ominaisuudet kuten lujuus ja sitkeys muuttuvat. (SSAB 2017.)

Hitsattujen offshore-terästen käyttö on ollut yleistä arktisissa olosuhteissa jo pitkään. Arktisilla olosuhteilla tarkoitetaan alueita, joissa lämpötila ei nouse korkeammaksi kuin -20 - -15 °C. Näissä olosuhteissa on varauduttava työskentelemään jopa -40 °C:n lämpötiloissa. Ongelmat offshore-terästen hitsaukseen liittyvät suurimmaksi osaksi hitsaajan työolosuhteisiin ja hitsausliitoksen sitkeyteen. Perus- ja lisäaine tulee valita tarkasti. Lämmöntuontia joudutaan usein rajoittamaan, jotta liitosten sitkeys pysyy hyvänä, tämän vuoksi tuottavuus putoaa. Tarkastustoimenpiteet ja hitsien hyväksymiset korostuvat entisestään. Sitkeyden osalta ongelma arktisissa olosuhteissa hitsattaessa ei ole tekniset ominaisuudet vaan kysymys on enemmän taloudellinen. Runsaan nikkeli-seoksen käyttö on kallista ja rakenteen turvallisuus tulisi kyetä takaamaan halvemmilla keinoilla. (Lukkari ym. 2016b, 164.)

Arktisissa olosuhteissa käytettäville teräksille asetetut vaatimukset ovat tiukat. Esimerkiksi iskusitkeysvaatimusten on täytettävä jopa -60 °C:n lämpötila hauras- murtumavaaran ehkäisemiseksi. Tyypillisiä teräksiä arktisiin olosuhteisiin ovat matalahiiliset normalisoidut tai termomekaanisesti valssatut hienorateräkset. (Lukkari ym. 2016b, 164.)

Taulukossa 1. on annettu S500 lujuusluokan teräksen hitsausvaatimukset (SFS-EN 10225:2019)

Taulukko 1. S500 lujuusluokan teräksen hitsausvaatimukset (SFS EN 10225:2019)

Lujuusluokka	Valmistustyyppi	Koekappaleen tila	Lämmöntuonti (kJ/mm)		
			MAG/Täytelanka 0,8±0,2	Jauhekaari 3,5±0,2	Jauhekaari 5,0±0,2
S500	MLO QLO	Hitsauksen jälkeen lämpökäsitelty	Kyllä	Kyllä	Ei *
		Hitsattuna	Ei	Ei	Ei *

Min. Esilämmitys lämpötila 125°C ja Max. 250°C

Kyllä = Testaus vaaditaan
 Ei = Testausta ei vaadita
 * = Ei saa hitsata yli 3,5 kJ/mm

Taulukkoon viittaavan standardin mukaan esilämmityksen vähimmäislämpötilan määrittäminen tulisi perustua hiiliekvivalentin ja materiaalin paksuuteen. Vaihtoehtoisia esilämmitys- ja välilämpötiloja voidaan hyväksyä ostajan ja valmistajan välisellä sopimuksella. Jauhekaarella hitsatessa alle 40mm:n paksuista terästä,

esilämmitystä voidaan muuttaa valmistajan harkinnan mukaan. (SFS-EN 10225:2019.)

Termomekaanisesti käsitellyt teräkset soveltuvat offshore-kohteisiin parhaiten, koska niitä on hyvä hitsata kaikilla hitsausprosesseilla ja niiden työlämpötilaa ei tarvitse yleensä nostaa. Lisäksi vetyhalkeilu, haurausmurtuma tai lamellirepeily ei ole yhtä yleistä termomekaanisesti käsitellyissä teräksissä kuin seostamattomissa rakenneteräksissä. (Lukkari ym. 2016b, 164.)

4.2 MIG/MAG Hitsaus

Sanat MIG (Metal-Arc Inert Gas Welding) ja MAG (Metal-Arc Active Gas Welding) tulevat englannin kielen sanoista, mutta yleisimmin hitsausmenetelmästä käytetään nimeä MIG-hitsaus. (ESAB osaamiskeskus 2019a.)

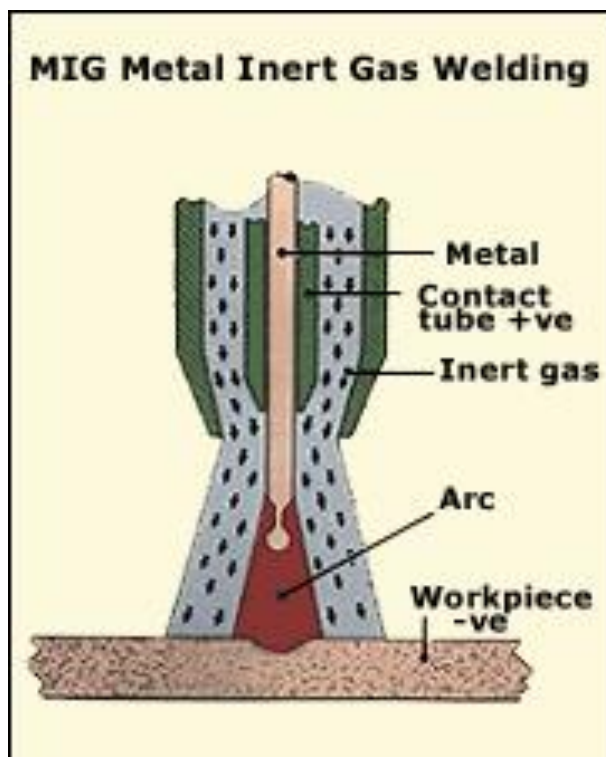
MIG/MAG hitsaus on kaasukaarihitsausmenetelmä. Hitsauksessa suojakaasun ympäröimä valokaari palaa hitsattavan kappaleen ja hitsauslangan välissä. Langansyöttölaite syöttää hitsauslankaa hitsauspistoolinkautta valokaareen asti. MAG-hitsauksessa suojakaasuna on aktiivinen suojakaasu, joka on joko puhdasta hiilidioksidia tai argonin ja hiilidioksidin muodostama seoskaasu. MIG-Hitsauksessa käytetään reagoimatonta suojakaasua eli inerttistä kaasua. Inerttistä kaasua ovat helium ja argon. (ESAB osaamiskeskus 2019a.)

Hitsauksessa lisäainetta kutsutaan umpilangaksi. Kelalla olevaa umpilanka on vastakohta täytelangalle. Lankoja on halkaisijaltaan sekä paksumpia että ohuempia, mutta käytetyimpinä ovat 1,0 ja 1,2 mm. Niukkaseosteiset ja seostamattomat teräslangat ovat usein kuparoituja pinnasta. Yleensä lisäainelanka vastaa hitsauksessa kemiallisilta koostumuksiltaan hitsattavan teräksen koostumusta. (ESAB osaamiskeskus 2019a.)

MIG/MAG-hitsausta käytetään lisäaineen määrän käytön perusteella yleisimpänä hitsausmenetelmänä useissa eri maissa. Prosessi sopii myös useiden muiden erilaisten terästen kuten esimerkiksi alumiinin tai kuparin hitsaukseen. MIG/MAG-hitsausta käytetään lähes kaikkialla hitsaavilla teollisuudenaloilla (ESAB osaamiskeskus 2019). Kuviossa 1 on nähtävissä havainnollistava kuva MIG-hitsauksesta.

MIG/MAG -hitsauksen etuja ovat esimerkiksi:

- jatkuva lisäainelanka
- kuonaton
- mekanisoinnin ja automatisoinnin yksinkertaisuus
- halpa lisäaine
- hyvä tuottavuus.



Kuvio 1. MIG-hitsaus (ESAB osaamiskeskus 2019)

4.3 Hitsausvirheet

Hitsausvirheet heikentävät liitoksen kestävyyttä ja sen ominaisuuksia. Tämän takia lähes aina pyritään mahdollisimman virheettömään lopputulokseen, mutta tämän seurauksena voivat työaika ja kustannukset nousta huomattavasti. Virheet eivät tee välttämättä hitsausliitoksesta kuitenkaan käyttökelpotonta. Täysin virheetöntä hitsiä ei aina tarvita, mikäli rakenteen kuormitukset ja olosuhteet eivät sitä vaadi. Hitsiluokat B, C ja D on osoitettu tuotannossa ilmoittamaan hitsin laatusoikeus sallittuine virheineen. Standardi SFS-EN ISO 6520-1 on kansainvälinen standardi, joka määrittelee kaikki hitsausvirheet ja antaa virheille oman numero-tunnuksen. (ESAB osaamiskeskus 2019b.)

Standardi SFS-EN ISO 6520-1 jakaa päävirheet kuuteen pääryhmään (ESAB osaamiskeskus 2019b):

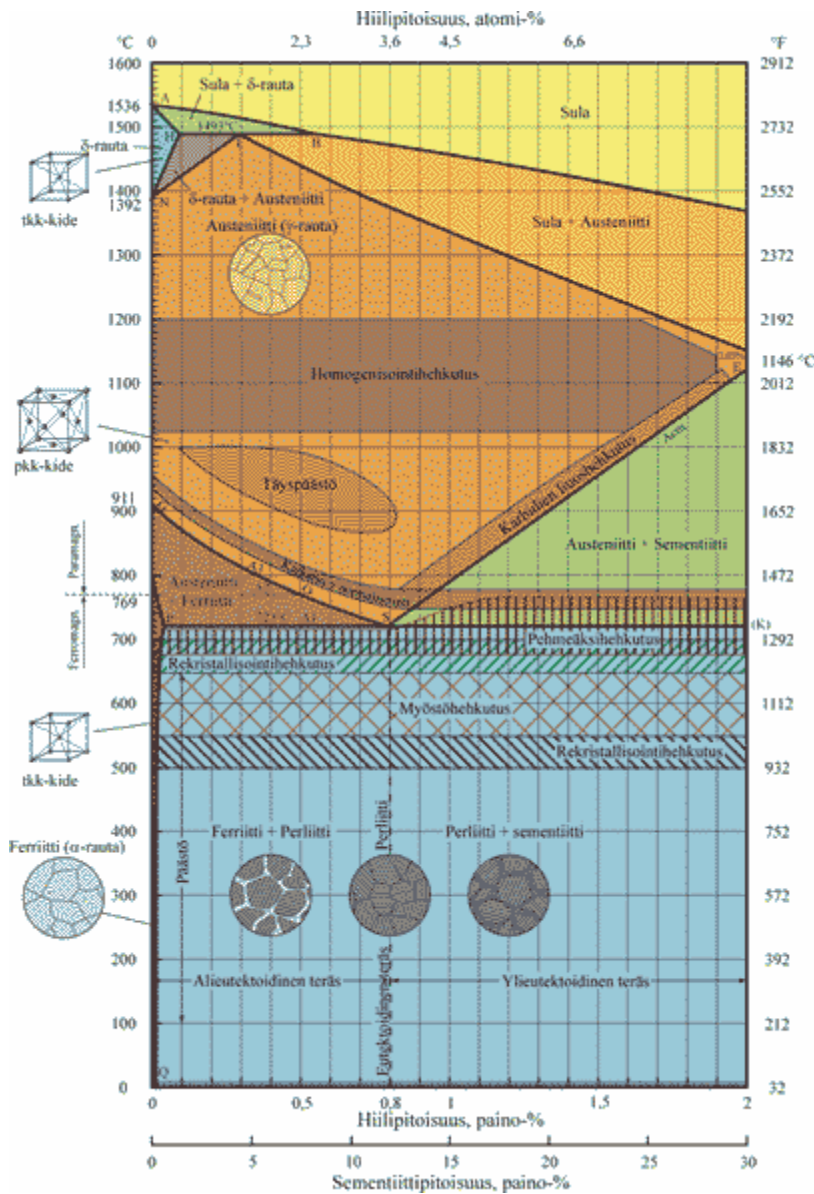
- halkeamat
- ontelot
- sulkeumat
- liittymisvirheet
- muoto- ja mittavirheet
- muut virheet.

4.4 Hitsausliitoksen mikrorakennemuutokset

Hiiliteräksiä voidaan tarkastella esimerkiksi rauta-hiili-faasidiagrammin avulla. Diagrammissa esitetään raudan ja hiilen muodostamat faasit ja faasimuutokset, jotka ovat koostumus-lämpötilakentässä. Faasidiagrammi antaa hitsauksen kannalta tietoa esimerkiksi teräksen mikrorakenteesta ja sen sulamispisteestä. (Lukkari ym. 2016a, 22)

Kuviossa 2 esitetään rauta-hiili -tasapainopiirros. Piirroksessa esitetyt faasit ovat ferriitti (α), austeniitti (γ), sementiitti ja δ -ferriitti. Rauta-hiili tasapainopiirroksen avulla voidaan tarkastella tasapainon mukaisessa hitaassa jäähtymisessä syntyviä termodynaamisesti stabiileja faaseja. Kuvan perusteella voidaan todeta, että

lämpötilan laskiessa hitaasti austeniittialueelta 723°C:en alapuolelle, muodostuu alieutektidissa ($C < 0,8 \%$) teräksissä ferriittiä ja perliittiä. Eutektidissa teräksissä ($C=0,8 \%$) alkaa muodostua perliittiä ja ylieutektidisissa teräksissä ($C > 0,8 \%$) perliittiä ja sementiittiä.



Kuvio 2. Rauta-hiili -faasidiagrammi (Tampereen teknillinen yliopisto 2005)

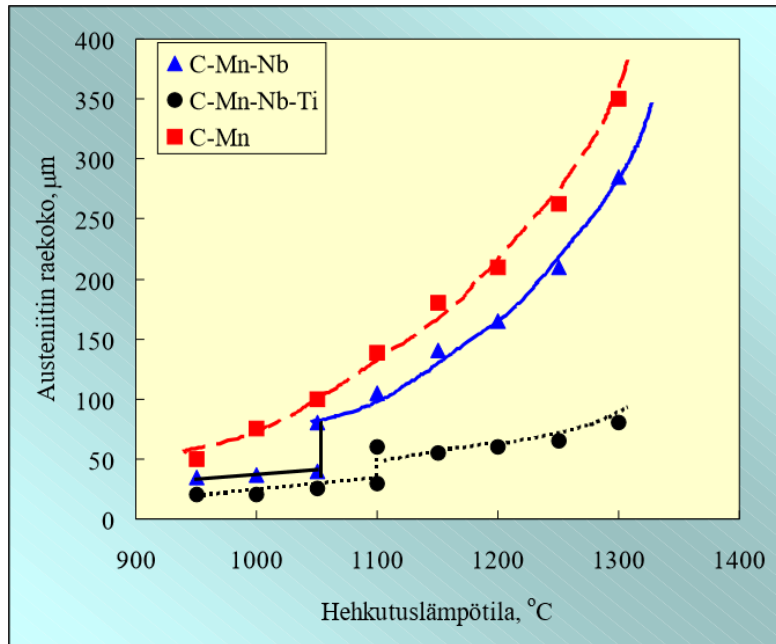
Hiili lisää ferriittisissä teräksissä lujuutta ja haurastumisriskiä. Hiilen ja muiden seosaineiden yhteisvaikutuksesta on tehty hiilikvivalentti kaava, joka on rakeneterästen hitsattavuuden merkittävin kriteeri. Kaavalla (1) saadaan kuva teräksen karkenevuudesta, joka on merkittävässä osassa vetyhalkeilutaipumukseen. (Lukkari ym. 2016a, 75.)

$$CEV(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

missä

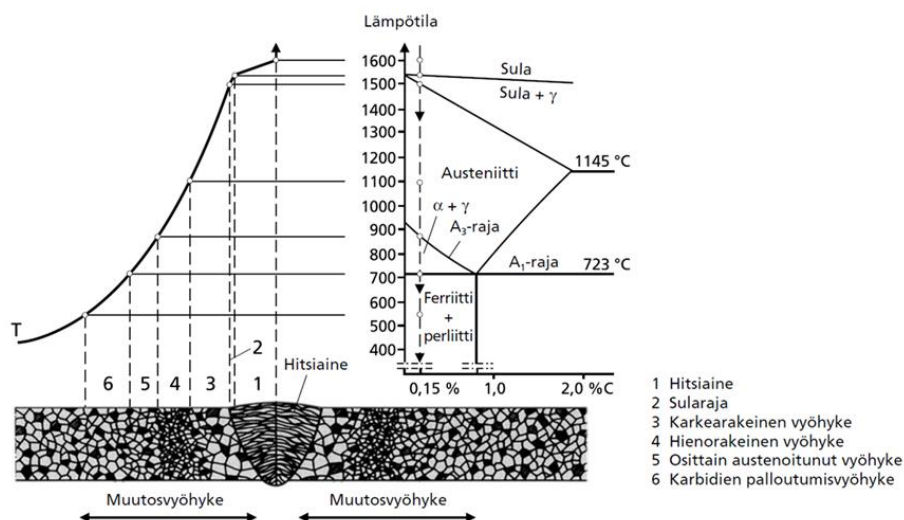
<i>C</i>	on	hiilipitoisuus (p-%)
<i>Mn</i>	on	mangaanipitoisuus (p-%)
<i>Mo</i>	on	molybdeenipitoisuus (p-%)
<i>Cr</i>	on	Kromipitoisuus (p-%)
<i>Ni</i>	on	Nikkelipitoisuus (p-%)
<i>Cu</i>	on	Kuparipitoisuus (p-%).

Hiiliekvivalentin (CEV) ollessa alle 0,40 p-% esikumennusta ei yleensä tarvita. Kun CE on 0,40 – 0,50 p-%, ei esikumennusta yleensä tarvita, kun aineenpaksuudet ovat pieniä ja lisäaineet niukkavetyisiä, mutta suurilla aineenpaksuuksilla esikumennus tarvitaan. Kun CEV on enemmän kuin 0,50 p-%, esikumennus tarvitaan ja lisäaineiden tulee olla mahdollisimman niukkavetyiset, ja myös jälkikumennusta tulisi käyttää (Lukkari ym. 2016a, 73). Lisäaineiden avulla voidaan parantaa teräksen karkenevuutta, ja tätä kautta parantaa teräksen lujuutta. CEV-arvon ollessa alhainen teräksen hitsattavuus on hyvä. Termomekaanisesti valsatuilla teräksillä mikroseostuksesta on etua esimerkiksi titaanista (Ti) ja niobista (Nb) (Tihinen 2013). Kuviossa 3 esitetään mikroseosaineiden vaikutusta rakeen kasvuun.



Kuvio 3. Mikrooseostuksen vaikutus rakeen kasvuun (Tihinen 2013)

Teräksen koostumus, lämpösyklin huippulämpötilä, huippulämpötilan oloaika ja jäähtymisnopeus muodostavat teräksen mikrorakenteen. Teräksen mikrorakenne muuttuu, kun hitsauksesta syntyvästä lämmöstä iso osa kohdistuu perusaineeseen. Mikrorakenteen- ja lämpötilanmuutokset ovat sitä pienempiä mitä kauemmaksi sularajasta mennään. Kuviossa 4 on nähtävissä eri vyöhykkeiden maksimilämpötila, josta nähdään lämpötilaa vastaava mikrorakenne. (Lukkari ym. 2016a, 72.)



Kuvio 4. Hitsausliitoksen vyöhykkeet ja niiden maksimilämpötila (Ovako 2015)

4.4.1 Työlämpötila ja lämmöntuonti

Työlämpötilalla tarkoitetaan hitsattavan kappaleen hitsauksen alussa olevaa lämpötilaa. Työlämpötila on merkittävässä osassa hitsausliitoksen jäähtymisnopeuden. Työlämpötilan ollessa korkea, hitsausliitos jäähtyy hitaammin ja sitä pitempi on jäähtymisaika $t_{8/5}$. Esikuumentamalla voidaan nostaa työlämpötilaa korkeammaksi. Työlämpötilaa voidaan korottaa myös sopivan hitsausjärjestyksen suunnittelulla, jotta hitsipalkojen välistä lämpötilaa saadaan nostettua. (Lukkari ym. 2016a, 73.)

Monipalkohitsausta käytetään lähes aina paksujen rakenteiden hitsaukseen. Monipalkohitsaus tekee hitsauksesta sen mikrorakenteen muodostumisen ja mekaanisten ominaisuuksien kannalta hankalampaa, koska monipalkohitsauksessa lämpövyöhykkeet syntyvät perusaineeseen ja myös edellisiin hitsattuihin palkoihin. Lämpösyklien vaikutuksesta palkojen leikkauskohtiin syntyy monimutkainen lämpövyöhyke. (Lukkari ym. 2016a, 74.)

4.4.2 Jäähtyminen ja jäähtymisaika $t_{8/5}$

Hitsausliitoksen jäähtymisnopeus määrittää liitoksen ominaisuudet. Jäähtymisnopeuden suuruuteen vaikuttavat levynpaksuus, lämmöntuonti, työlämpötila ja liitosmuoto. Suure $t_{8/5}$:lla kuvataan jäähtymisaikaa, jonka teräs on ollut lämpötilavälillä $800^{\circ}\text{C} \rightarrow 500^{\circ}\text{C}$. Tällöin tapahtuu austeniitin hajaantuminen lämpötilan lasiessa lämpötila-alueen läpi, ellei jäähtymisnopeus ole tarvittavan suuri, jotta diffuusio estyy. Jäähtymisnopeus määrittää sen, mitä faaseja teräksessä on austeniitin hajaannuttua. Liiallisen martensiitin muodostumista on vältettävä hitsausliitoksen ominaisuuksien kannalta. Jäähtymisaika $t_{8/5}$ (s) vaikuttaa merkittävästi teräksen kovuuteen ja iskusitkeyteen. Jäähtymisaikaa $t_{8/5}$ voidaan laskea kaavoilla (2) ja (3) ennen hitsausta kahdella tavalla, kaksidimensionaalisessa lämmönjohtumisessa (2) ja kolmidimensionaalisessa lämmönjohtumisessa (3). Yleensä jäähtymisaika lasketaan molemmista kaavoista ja yleensä se kaava kumpi antaa suuremman $t_{8/5}$ -arvon, on oikea (Lukkari ym. 2016a, 73). Eri hitsausprosessien termiset hyötysuhteet ovat taulukossa 2.

$$T_{8/5} = (4300 - 4,3 * T_0) * 10^5 * \left(\frac{k^2 * E^2}{d^2}\right) * F_2 * \left[\left(\frac{1}{500 - T_0}\right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right)^2\right] \quad (2)$$

missä

$t_{8/5}$	on	jäähtymisaika välillä 800 – 500 °C (s)
T_0	on	työlämpötila (°C)
k	on	hitsausprosessin terminen hyötysuhde (Taulukko 2)
E	on	hitsausenergia (kJ/mm)
d	on	työkappaleen aineenpaksuus (mm)
F_2	on	liitosmuotokerroin kaksidimensionaalisessa lämmönjohtumisessa.

$$T_{8/5} = (6700 - 5 * T_0) * k * E * F_3 * \left(\frac{1}{500 - T_0}\right) - \left(\frac{1}{800 - T_0}\right) \quad (3)$$

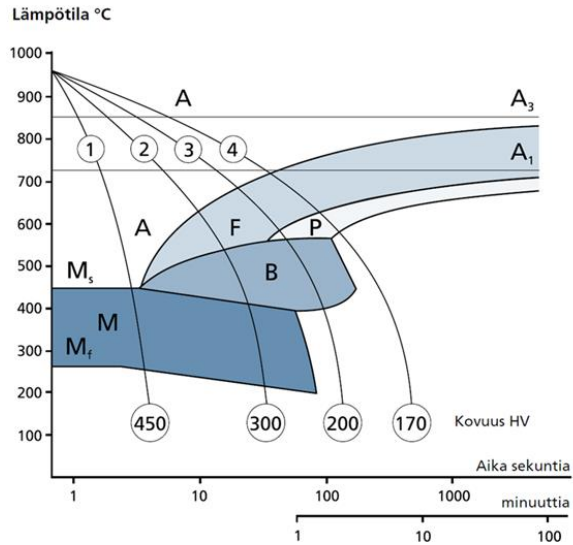
jossa,

F_3 on liitosmuotokerroin kolmidimensionaalisessa lämmönjohtumisessa.

Taulukko 2. Hitsausprosessin termiset hyötysuhteet (Tihinen 2013)

Prosessi	k
Jauhekaari	1
Puikko	0,8
MIG/MAG	0,8
Täytelanka	0,8
TIG	0,6

Jatkuvan jäähtymisen muutoskäyrillä (CCT-käyrät) voidaan arvioida jäähtymisen vaikutusta hitsausliitoksen mikrorakenteeseen (kuvio 6). Teräksen hitsattavuuden määrittävät syntyvä mikrorakenne ja tästä seuraavat mekaaniset ominaisuudet. Lämmöntuonti, esikuumennus ja hitsausteknologia ovat tärkeässä osassa asioissa, joilla voi vaikuttaa liitoksen jäähtymisnopeuteen ja sen seurauksena mikrorakenteeseen. (Lukkari ym. 2016a, 73.)



Kuvio 5. Jäähtymisnopeuden vaikutus mikrorakenteeseen (Ovako 2015)

Kuvion 6 mukaisesti käyrä 1 kulkee austeniittialueelta suoraan martensiittialueen läpi. Mitä korkeampi hiilipitoisuus on, sitä kovempaa on martensiitti. Käyrissä 2 ja 3 lämmöntuontia lisätessä tai esikuumennusta käytettäessä austeniitti ehtii osittain hajaantua sitkeämmiksi ja pehmeämmiksi rakenteiksi. Käyrä 4 näyttää ferriittis-perliittistä rakennetta. (Ovako 2015.)

5 RIKKOVA AINEENKOETUS

Teollisuudessa käytetyt metallit ovat yleensä alkuainemetallien ja epämetallien seoksia. Seostuksen, lämpökäsittelyn ja muokkauksen avulla metalleille saadaan halutut ominaisuudet sen vaatimiin käyttökohteisiin. Tuotteilta voidaan vaatia esimerkiksi seuraavia ominaisuuksia: lujuus, kovuus, sitkeys, muovattavuus, lastuttavuus, hitsattavuus, lämmönkestävyys, lämmönjohtavuus, kimmoisuus, sitkeys, kiilto, sähkönjohtavuus. (Lepola & Makkonen, 2016, 44.)

5.1 Vetokoe

Lujuudella tarkoitetaan metallien kykyä kestää kuormitusten aiheuttamia veto- ja puristusjännityksiä. Jos sekä veto että puristusjännityksiä kohdistuu rakenteeseen, edellytetään kappaleelta väsymislujuutta. Lujuutta mitataan vetokokeen avulla. Yleisimpinä lujuusominaisuuksia ovat väsymislujuus, myötöraja (R_e), vetomurtolujuus (R_m) ja 0,2 raja ($R_{p, 0,2}$). (Lepola & Makkonen, 2016, 44.)

Yleisin menetelmä metallien lujuuden määrittämiseksi on vetokoe. Vetokokeella tutkitaan materiaalin vetomurtolujuutta, kimmoisuutta ja myötörajaa. Vetokokeessa koesauva kiinnitetään koepenkkiin, joka kokeen aikana mittaa käytettävän voiman eli vetojännityksen ja koesauvassa tapahtuvan venymisen. Kokeen jälkeen koesauva palautuu normaaliin mittaan, jos vetojännitys poistetaan, koska kuormitus ei aiheuta kimmoalueella pysyviä muodonmuutoksia. Koesauva alkaa kimmoisuuden päättyessä myötäämään, jonka seurauksena koesauvassa tapahtuu pysyvää muodonmuutosta eli venymistä. (Lepola & Makkonen, 2004, 44.)

Ylemmäksi myötörajaksi (R_{el}) nimitetään kimmoalueen päättymisrajaa. Myötörajalalla esiintyy osittaista sisäisten jännitysten laukeamista koesauvassa, joka aiheuttaa värähtelyä. Tämä näkyy jännitys-venymäkäyrässä terävänä aaltokuviona. Alemmäksi myötörajaksi (R_e) nimitetään aaltokuvion alaosaa. Kaikilla metalleilla ei esiinny selvästi myötörajaa (R_e), silloin lujuuslaskennassa käytetään 0,2-venymärajaa ($R_{p0,2}$), joka ilmoittaa vetojännityksen suuruuden koesauvassa tapahtuvasta 0,2% venymästä. (Lepola & Makkonen, 2004, 44.)

Koesauvassa tapahtuu myötörajän jälkeen muokkauslujittumista ja vetojännityksen noustessa tasaista venymistä. Aluetta kutsutaan tasavenymäalueeksi. Veto-murtolujuus (R_m) määritetään tasavenymäalueen korkeimman pisteen eli murto-
rajan perusteella. Murto-
rajan jälkeen koesauva katkeaa sauvan venymisen ja ohentumisen seurauksena. Tämän aiheuttaa kuroutumakohdan sisällä tapahtuva pieni repeily. (Lepola & Makkonen, 2004, 45.)

Myötörajaa käytetään yleensä yleisimpänä lähtöpisteenä, kun lasketaan ja mitoitetaan rakenteiden lujuutta. Tällöin jännitykset jäävät ainoastaan kimmoalueelle ja venymä palautuu kuormituksen aikaansaaman jännityksen poistuttua rakenteesta. Kun kuormitus pysyy kimmoalueella, rakenteeseen ei pääse syntymään pysyviä muutoksia. (Lepola & Makkonen, 2004, 45.)

5.2 Iskusitkeys-koe

Iskusitkeys-kokeessa mitataan metallin murtumiseen tarvittavaa iskuenergiaa usein eri lämpötiloissa. Sitkeys heikkenee metallilla lämpötilan alentuessa. Iskusitkeys taas tarkoittaa metallin kykyä vastustaa murtumista iskumaisessa kuormituksessa. Iskusitkeys-kokeen yhtenä tärkeimpänä tehtävänä on selvittää teräksen transitiolämpötila. Transitiolämpötilalla tarkoitetaan lämpötilaa, jolloin teräksen murtuminen muuttuu hauraasta sitkeäksi. Tällöin murtumiseen vaadittavan iskuenergian suuruus laskee voimakkaasti. Iskusitkeys-koea käytetään paljon myös laadunvalvonnassa, hitsauskokeiden tarkastuksessa ja haurasmurtumataipumuksien tutkimisessa. (Lämsä & Kiuru, 2012.)

Iskusitkeys-koe on standardisoitu koemenetelmä, joka on määritelty standardeissa SFS-EN ISO 9016:2012 ja SFS-EN ISO 148-1:2011. ISO 9016:2012 määrittelee koesauvan sijainnin, loven suunnan ja koesauvan tarkastuksen. ISO 148-1:2011 määrittelee kokeen menetelmän. Iskukokeet suoritetaan heilurivasaralla. Koesauvat irrotetaan kappaleesta standardin mukaisesti, valssaussuuntaisena tai poikittain valssaussuuntaan katsottuna. Koesauvat tehdään V- tai U-lovi-sauvaksi. V-lovisauvaa käytetään sitkeiden kappaleiden kokeisiin, kun taas U-lovisauvaa käytetään hauraiden kappaleiden kokeisiin. (Lukkari ym. 2016a, 145.)

Iskusitkeyskokeessa sauvat jäähdytetään ensin kokeessa haluttuun lämpötilaan. Yleensä terästen iskusitkeyskokeissa koelämpötila on -20...60 °C välillä. Sauvojen jäähdytys tehdään nestemäisessä tai kaasumaisessa väliaineessa. Jäähdytyksen jälkeen vasara putoaa sille asetetulta korkeudelta ja iskee koesauvaan katkaisten sen. Sauvan murtamiseen kulunut iskuenergia on yhtä kuin vasaran heilahduksen aikana menettämä potentiaalienergia, mikä lasketaan vasaran lähtö- ja loppupisteen korkeuseron avulla. (Lukkari ym. 2016a, 145.)

5.3 Kovuuskoe

Terästen kovuutta mitataan pääsääntöisesti kolmella eri menetelmällä, joita ovat Vickersin, Brinellin ja Rockwellin kovuuskokeet. Kaikki edellä mainitut testimenetelmät ovat standardisoituja ja ne soveltuvat hieman eri materiaalityypeille. Nykyään on käytössä yleiskovuusmittareita, joilla voidaan suorittaa kaikki kolme kovuuskoetta. (Lukkari ym. 2016a, 150.)

Robert L. Smith ja George E. Sandland Vickers Ltd yhtiö ovat kehittäneet Vickersin koemenetelmän. Standardissa SFS-EN ISO 6507-1:2006 on määritetty Vickersin kovuuskoetta. Vickersin-kokeessa kovuus mitataan painamalla pyramidin muotoon hiottua timanttia tutkittavan aineen pintaan. Timanttia painetaan 10-15 sekunnin ajan koekappaleeseen annetulla kuormituksella. Kuormituksen poiston jälkeen pintaan muodostuneet painauman lävistäjät mitataan ja lasketaan pinta-ala. Kovuuskoetta tulee suorittaa kappaleelle, jonka pinta on sileä, tasainen, puhdas oksidihilseestä ja muista aineista. Erityisesti kappaleen tulee olla puhdas voiteluaineesta. Tärkeää kokeessa on, että kappale on hyvin kiinni ja se ei pääse liikkumaan kokeiden aikana. Vickersin kovuus lasketaan kaavalla (5). (Lukkari ym. 2016a, 150.)

$$HV = 0.102x \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^3} \quad (5)$$

missä,

HV	on	kovuus
F	on	koevoima
d	on	lävistäjien d_1 ja d_2 aritmeetrinen arvo

6 METALLOGRAFISET TUTKIMUKSET

Metallografisilla tutkimuksilla tarkoitetaan menetelmiä, joilla tutkitaan teräksen mikrorakennetta. Mikrorakenteen tutkimiseen käytetään esimerkiksi valomikroskooppia, pyyhkäisyelektronimikroskooppia tai läpivalaisuelektronimikroskooppia. Mikroskooppia käytettäessä tarvitaan oikeaoppisesti valmistettu näyte tutkittavasta koekappaleesta. (Lukkari ym. 2016a, 160.)

6.1 Näytekappale

Näytekappale valmistetaan leikkaamalla sopiva pala tutkittavasta koekappaleesta. Näytekappaleen tulee olla mahdollisimman virheetön pinta ja tasainen. Sopiva katkaisumenetelmä on esimerkiksi hiova märkäkatkaisu, koska se aiheuttaa vähän vauriota kappaleeseen suhteessa leikkaukseen käytettyyn aikaan. Näytekappale voidaan valaa myös muoviin, jolloin se valetaan kuumapainevalulla tai kylmävalulla. (Lukkari ym. 2016a, 160.)

Yleisimmin näytteenvalmistus suoritetaan mekaanisesti. Kappaleesta pyritään poistamaan materiaalia hiomapapereita käyttäen vaiheissa. Hiomapaperi vaihdetaan pienempi raekokoisempaan vaihe vaiheelta, jotta kappaleesta saadaan haluttu tulos. Teräksellä käytetään yleensä vesihiomapaperia, joita käytetään hiomapaperin karheuden hienonevassa järjestyksessä. Seuraavassa vaiheessa kiillotuksessa tavoitteena on saada peilikiiltävä ja naarmuton pinta. Teräs vaatii vielä kiillotuksen jälkeen pinnan syövyttämisen sopivaksi. Syövyttämiseen käytetään sopivaa syövytettä metalliseoksesta ja halutusta tuloksesta riippuen. (Lukkari ym. 2016a, 160.)

6.2 Hitsien makro- ja mikrohietutkimukset

Standardissa SFS-EN ISO 17639:2013 on määritelty hitsien makro- ja mikrohietutkimus. Tutkimusta käytetään makroskooppisten ja mikroskooppisten ominaisuuksien tutkimiseen. Yleensä tutkimukset suoritetaan poikkileikkauspinnoille. Makro- ja mikrohietutkimuksella tutkitaan hitausliitoksen rakennetta. Makrohieestä voidaan selvittää esimerkiksi muutosvyöhykkeen leveys, hitsin palkora-

kenne ja havaita mahdolliset makroskooppiset hitsausvirheet. Mikrokuvalla saadaan yksityiskohtaisemmat tiedot hitsin ja teräksen rakenteesta. (Lukkari ym. 2016a, 161.)

7 KOEMATERIAALIT JA TESTAUS

7.1 Koemateriaali

Hitsauskokeita varten toimitettiin neljä SSAB:n valmistamaa 1065x350x60mm S500 offshore-teräslevyä. Standardin SFS EN 10225-1:2019 mukaiset terästen kemialliset koostumukset ovat taulukossa 3 ja mekaaniset ominaisuudet taulukossa 4. Koeteräksen hiiliekvivalentin tulokseksi laskettiin 0,46 %.

Taulukko 3. S500 teräksen kemiallinen koostumus (SFS-EN 10225-1:2019)

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	N %	At tot c %	Cu %	Nb %	Ti %	V %	Nb+V %	Nb+V+Ti %
0,14	0,55	1,7	0,02	0,01	0,3	1	0,25	0,01	0,15 to 0,01	0,4	0,05	0,025	0,08	0,12	0,13

Taulukko 4. S500 teräksen mekaanisten ominaisuuksien vaatimukset (SFS-EN 10225-1:2019)

Teräslaatu		Minimi myötöraja(ReH) (MPa) paksuudessa t (mm)	Vetolujuus(Rm) (MPa) paksuudessa t (mm)	Re/Rm suhdeluku max	Minimi venymä A mittarin pituudella 5,65S ₀ %	Minimi keskiarvo Charpyn iskukokeessa	
Teräksen nimi	Teräksen num.	40<t≤63	40<t≤100			Lämpötila °C	Energia J
S500QLO	1.8661	455	540 - 715	0,93	15	-40	60

Lisäaineina käytettiin NSSW SF-50A lankaa, jota on käytetty aikaisemmin SSAB:n toimesta suoritetuissa offshore-terästen hitsauskokeissa. Langan tuote esite on liitteenä (Liite 5). Lisäaineen koostumus (Taulukko 5) ja mekaaniset ominaisuudet (Taulukko 6) on esitetty taulukoissa. Lisäaineen tyypillinen myötölujuus on hieman korkeampi kuin koemateriaalin minimi myötölujuus, mutta vastaa suunnilleen mekaanisilta ominaisuuksiltaan koemateriaalin mekaanisia ominaisuuksia.

Taulukko 5. NSSW SF-50A kemiallinen koostumus

C-%	Si-%	Mn-%	P-%	S-%	Cu-%	Ni-%
0,05	0,48	1,22	0,012	0,005	0,31	1,55

Taulukko 6. NSSW SF-50A mekaaniset ominaisuudet

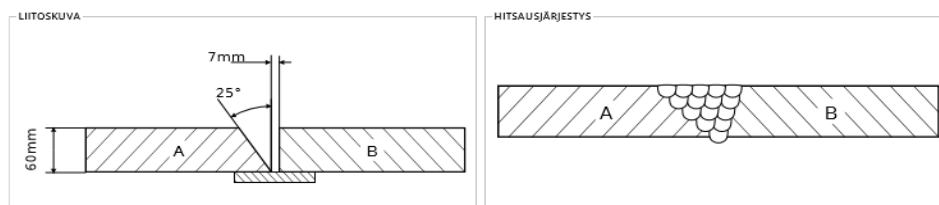
Myötö- ja vetolujuus			Charpyn iskukoe
Myötölujuus (MPa)	Vetolujuus (MPa)	Venymä (%)	Charpy V (J) -40°C
606	657	27	45

7.2 Hitsauskokeet

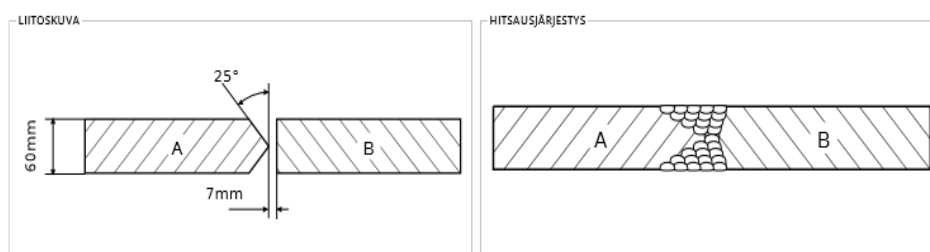
Hitsauskokeissa kaksi levyä hitsattiin yhteen joko $\frac{1}{2}$ V-railolla tai K-railolla. Hitsaukset suoritettiin MIG-hitsauslaitteella (Kuva 1). Kumpaakin hitsiä varten laadittiin hyväksytty hitsausohje (WPS) $\frac{1}{2}$ V-railo (Liite 1) ja K-railo (Liite 2). Hiiliekvi-valentin ollessa 0,46 p-% levyt esilämmitettiin lämmitysmattojen avulla 150°C :een. K-Railoa hitsatessa apuna käytettiin keraamista 30° juuritukea. Hitsauskokeet suoritettiin Ammattiopisto Lappian tiloissa ammattihitsaajan toimesta. Kuvioissa 6 ja 7 on havainnollistavat kuviot $\frac{1}{2}$ V-railosta ja K-railosta.



Kuva 1. Hitsauksissa käytetty Kempin hitsauskone



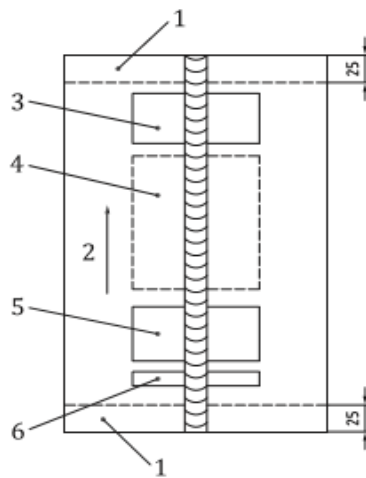
Kuvio 6. Liitos- ja hitsausjärjestyskuva $\frac{1}{2}$ V-railosta (WPS)



Kuvio 7. Liitos- ja hitsausjärjestyskuva K-railosta (WPS)

7.3 Vetokokeet

Vetokokeet suoritettiin SSAB:n Raahen tehtaan testilaboratoriossa standardin SFS-EN ISO 15614-1:2017 mukaisesti. Kuviossa 8 on merkitty kohdat, joista vetokoesauvat tulee standardin SFS-EN 10225-1:2019 mukaisesti leikata levystä. Standardi SFS-EN 10225-1:2019 määrittää, että vetokokeissa mitattava hitsinvetolujuus (R_m) tulos ei saa olla pienempi kuin S500-teräksen perusaineen vetolujuus.



Selite

- 1 Poistetaan 25 mm
- 2 Hitsaussuunta
- 3 Alue, josta irrotetaan
 - 1 vetokoesauva
 - taivutuskoesauvat
- 4 Alue, josta irrotetaan
 - iskukoesauva ja mahdollisesti vaadittavat lisäkoesauvat
- 5 Alue, josta irrotetaan
 - 1 vetokoesauva
 - taivutuskoesauvat
- 6 Alue, josta irrotetaan
 - 1 makrohie
 - 1 kovuuskoesauva

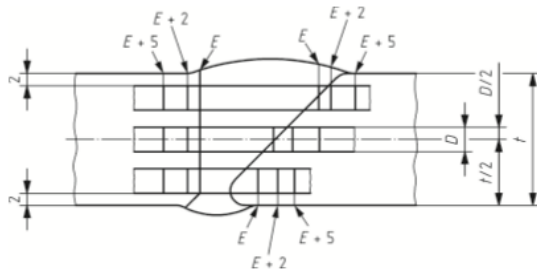
HUOM. Alueet eivät ole oikeassa mittasuhteessa.

Kuvio 8. Standardin SFS 10225-1:2019 määrittämät koekappaleiden leikkauspaikat levykoekappaleessa (SFS-10225-1:2019)

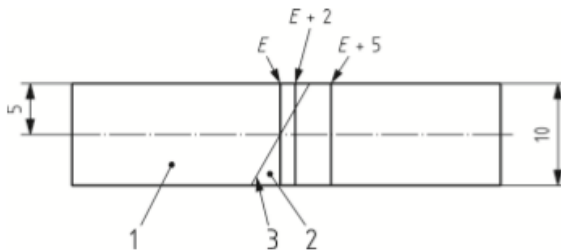
7.4 Iskukokeet

Iskukokeet suoritettiin SSAB:n testilaboratoriossa Raahessa. Koesauvojen mitoituksessa ja kokeen suorituksessa noudatettiin ISO-9016 standardia. Iskukoesauvat irrotettiin kuvion 8 mukaisesti. Standardin määrittämät iskukoesauvojen paikat ovat kuviossa 9 ja iskulovien paikat kuviossa 10.

Iskukokeet suoritettiin kolmessa eri lämpötilassa: -40 °C , -50 °C ja -60 °C . Iskulovien paikat olivat pinnasta, juuresta ja keskeltä. Standardi SFS-EN 10225:2019 määrittää S500-teräksen iskukokeiden yhden sarjan minimi keskiarvotulokseksi 46 J ja yksittäisen mittauksen minimi tulokseksi 32 J lämpötilassa -40 °C .



Kuvio 9. Standardin SFS-EN 10225-1:2019 määrittämät paikat iskukoesauvoille



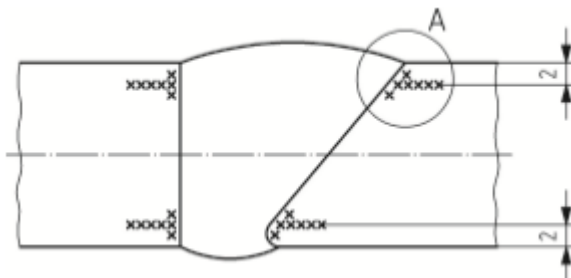
Kuvio 10. Iskulovien paikat (SFS-EN 10225-1:2019)

Kuvioissa 9 ja 10 iskusauvojen paikat on esitetty seuraavilla merkinnöillä,

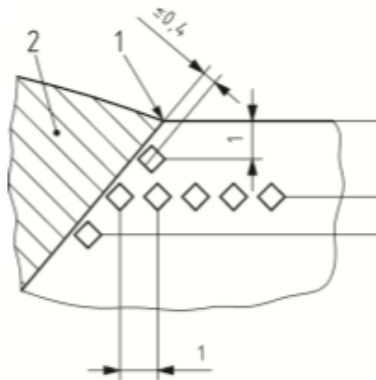
<i>E</i>	on	sularaja (FL)
<i>D</i>	on	näytteen koko
<i>1</i>	on	perusaine
<i>2</i>	on	HAZ-vyöhyke
<i>3</i>	on	hitsin sularaja
<i>t</i>	on	levyn paksuus

7.5 Kovuusmittaukset ja mikrorakennetarkastelut

Kovuuskokeet suoritettiin Lapin ammattikorkeakoulun laboratoriossa Kemissä. Kovuuskokeet suoritettiin standardin SFS-EN ISO 6507-1:2018 mukaisesti Vickersin kovuuskokeella HV10. Kovuuskokeet, jotka on määritelty standardissa SFS-EN 10225-1:2019 otettiin kappaleesta kuvion 11 mukaisesti. Kuviossa 12 on suurennoskuviot mittauspaikeista. Standardin SFS-EN 10225-1:2019 määrittämä arvo kovuuskokeissa S500-teräkselle oli maksimissaan 325 HV10. Lämmöntuonnilla 0,8 kJ/mm maksimiarvoksi standardi määritteli arvon 350 HV10.



Kuvio 11. Standardin määrittämät kovuusmittauspaikat (SFS-EN 10225-1:2019)



Kuvio 12. Suurennoskuvat mittauspaikeista (SFS-EN 10225-1:2019)

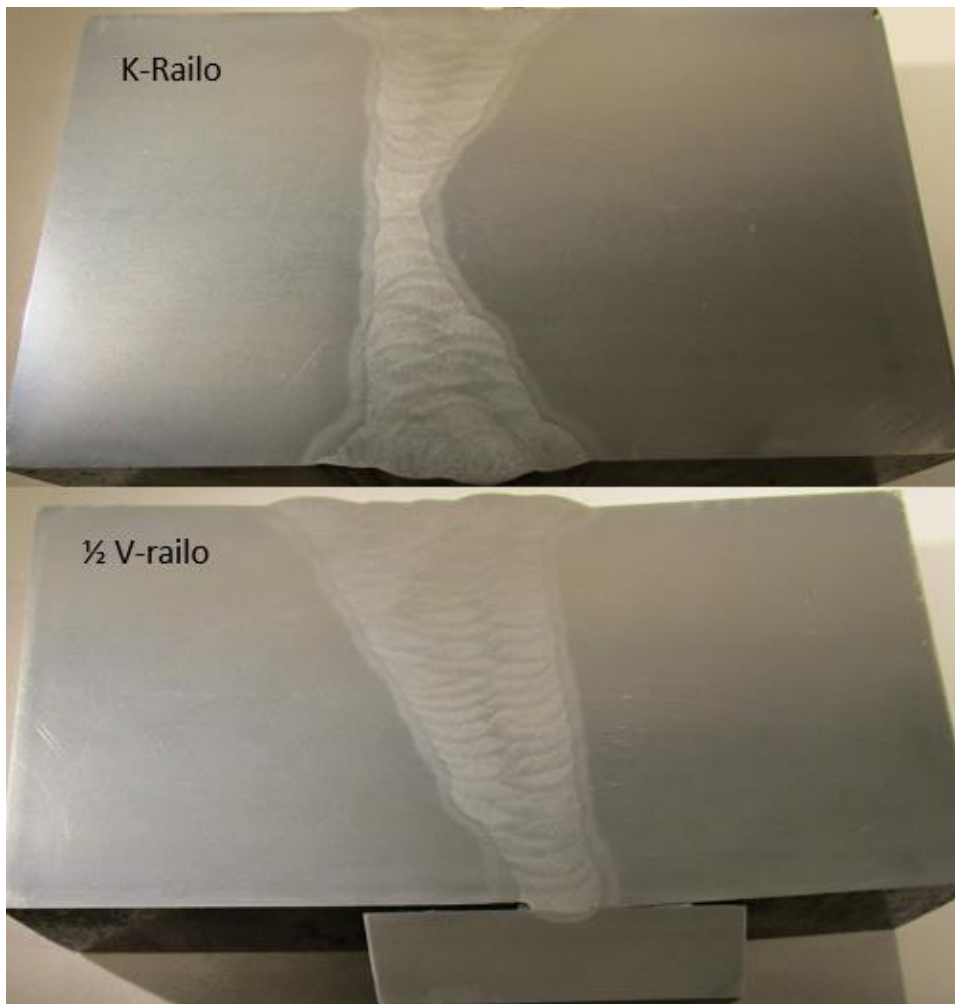
1. Sularaja

2. Hitsi

Kovuusmittaukset tehtiin ½ V-Railosta standardin SFS-EN 10225-1 mukaisesti. Standardin mukaisten mittausten lisäksi V-railosta otettiin mittaukset myös koe-kappaleen keskiosasta. K-Railosta tehtiin mittaukset standardin mukaisista pai-

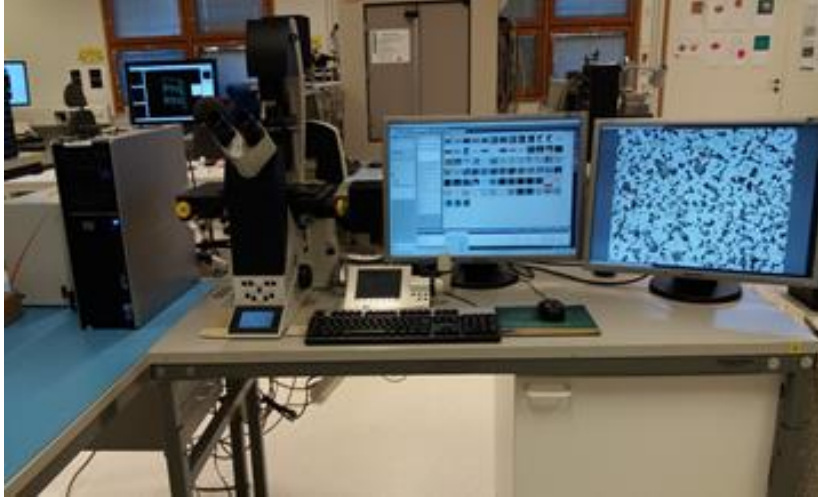
koista, jonka lisäksi tehtiin mittaukset myös koekappaleen keskialueen HAZ-vyöhykkeeltä kuusi mittausta, keskeltä hitsiä ylhäältä ja alhaalta yhteensä kuusi mittausta.

Kovuusmittauksia varten valmistettiin poikkileikkaushieet standardin SFS-EN ISO 17639:2013 mukaisesti (Kuva 2). Hieet valmistettiin Lapin ammattikorkeakoulun laboratoriossa mekaanisella menetelmällä. Hieen hionta suoritettiin hiomakoneella, jossa hiomapapereiden karheuksia olivat 120#, 220#, 600# ja 1000#. Kiillotuksessa käytettiin kangasta ja väliaineena MD mol 3µm sekä MD nap 1µm. Kappaleen pintaan käytettiin nital 3 % syövytettä.



Kuva 2. Poikkileikkaushieet K-railosta ja 1/2 V-railosta

Kovuusmittausten lisäksi hieistä tarkasteltiin hitsien mikrorakennetta Leica DMI5000M -valomikroskoopilla (Kuva 3).

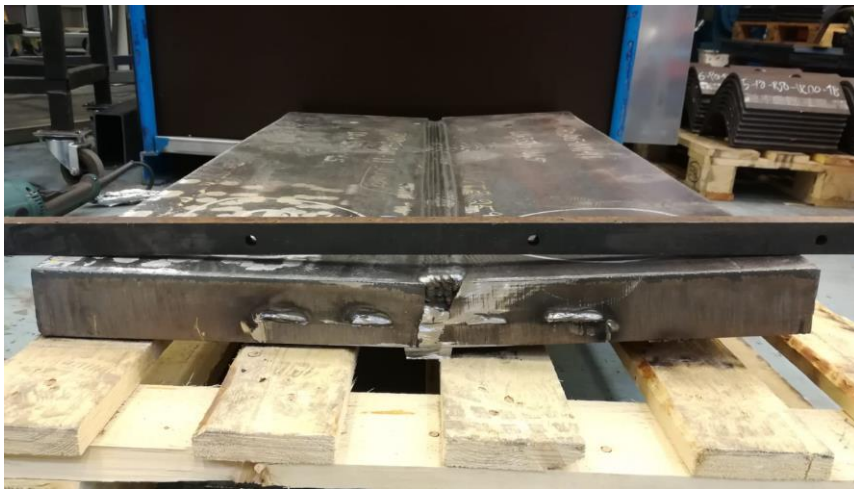


Kuva 3. Lapin AMK:n Leica DMI5000M -valomikroskooppi

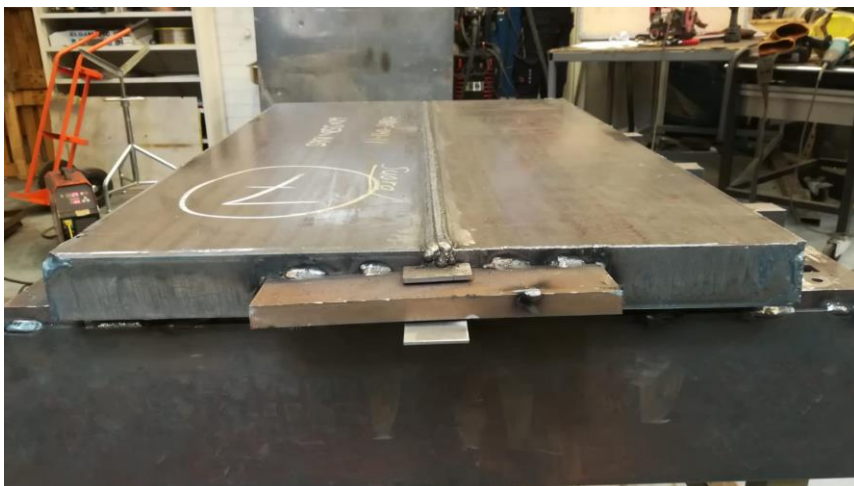
8 TULOKSET

8.1 Hitsauskokeet

Hitsauskokeissa lopputuloksena oli 56 palkoa $\frac{1}{2}$ V-railoon (Kuva 4) ja 45 palkoa K-railoon (Kuva 5). Hitsauksissa $\frac{1}{2}$ V-railon tuenta ei ollut hitsausten alussa riittävä, joten koekappaleeseen syntyi n. 15mm taipuma. Taipumasta huolimatta rikkovat aineenkoetuskokeet saatiin tehtyä.



Kuva 4. Koekappaleet hitsattuna $\frac{1}{2}$ V-railoon.



Kuva 5. Koekappaleet hitsattuna K-Railoon.

Hitsauksia varten laskettiin kaavalla 3 jatkuvan jäähtymisen $t_{8/5}$ tulokseksi 5,7s.

8.2 Vetokokeet

Vetokokeiden tulokset ovat luettavissa taulukosta 7. Molemmista railomuodoista tehtiin kaksi koetta.

Taulukko 7. Vetokokeiden tulokset

Koekappale	Lc mm	A avg mm ²	t avg mm	w avg mm	Rp0.2 Mpa	Rm Mpa	A80 %	A120 %	Agt %	Ag %	E Mpa
A1 1/2 V-Railo	125	1299.00	51.96	25	520	628	34.3	24.8	7.5	7.1	144991
A2 1/2 V-Railo	125	1298.25	51.83	25	515	628	34.1	25.0	7.9	7.9	209210
B1 K-Railo	125	1298.53	51.91	25	490	627	35.4	26.9	8.7	8.7	335795
B2 K-Railo	125	1299.10	51.85	25	498	627	36.1	26.0	8.9	8.9	139845

missä,

<i>Lc</i>	on	koepituus
<i>A avg</i>	on	vetokoesauvan paksuus x vetokoesauvan leveys
<i>t avg</i>	on	vetokoesauvan paksuus
<i>w avg</i>	on	vetokoesauvan leveys
<i>Rp0.2</i>	on	0,2 -venymäraja
<i>Rm</i>	on	murtolujuus
<i>A80</i>	on	murtovenymä 80 millimetrin koepituudella
<i>A120</i>	on	murtovenymä 120 millimetrin koepituudella
<i>Agt</i>	on	kokonaistasavenymä suurimmalla voimalla
<i>Ag</i>	on	plastinen tasavenymä suurimmalla voimalla
<i>E</i>	on	kimmokerroin

8.3 Iskukokeet

Iskukokeiden tulokset on merkitty taulukoissa ½ V-railosta (Taulukko 8) ja K-railosta (Taulukko 9). Taulukoissa tulokset ovat kolmesta kohtaa kappaletta: pinnasta (CAP), keskeltä (MIDDLE) ja juuresta (ROOT). Iskukokeet suoritettiin -40, -50 ja -60 °C:ssa.

Taulukko 8. ½ V-railon iskukoe tulokset

Testi Alue	1/2 V-Railo						
	Lovi	T (°C)		1st	2st	3st	avg
CAP	FL-2	-40		99	93	126	106
		-50		141	130	140	138
		-60		66	128	78	91
	FL	-40		237	230	238	236
		-50		240	124	229	198
		-60		96	182	65	115
	FL+2	-40		220	187	213	207
		-50		231	188	213	211
		-60		117	168	194	160
	FL+5	-40		293	290	300	295
		-50		300	300	298	300
		-60		300	263	277	280
MIDDLE	FL-2	-40		128	107	78	105
		-50		92	86	94	91
		-60		56	66	57	60
	FL	-40		280	164	258	234
		-50		266	256	265	263
		-60		269	164	141	192
	FL+2	-40		144	172	189	169
		-50		42	124	92	86
		-60		37	33	93	55
	FL+5	-40		18	231	252	168
		-50		18	42	151	71
		-60		19	27	29	26
ROOT	FL-2	-40		154	157	156	156
		-50		121	160	175	152
		-60		151	164	180	166
	FL	-40		229	217	226	224
		-50		108	43	129	94
		-60		56	50	88	65
	FL+2	-40		161	258	179	200
		-50		145	196	193	178
		-60		135	131	170	146
	FL+5	-40		273	298	300	291
		-50		300	256	300	286
		-60		296	297	257	284

Taulukko 9. K-railon iskukoetulokset

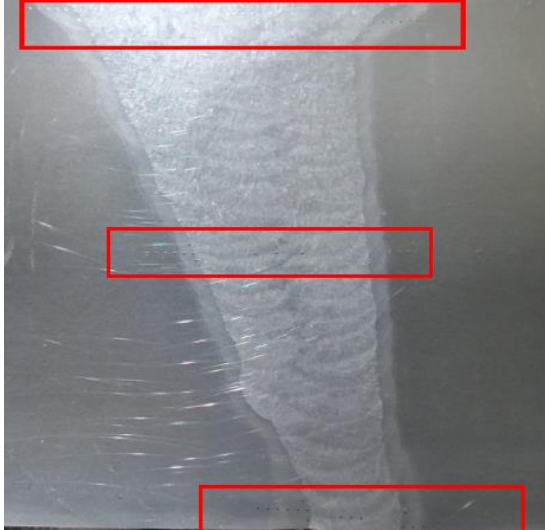
Testi Alue	K-Railo						
	Lovi	T (°C)		1st	2st	3st	avg
CAP	FL-2	-40		114	91	106	104
		-50		111	98	101	104
		-60		80	78	81	80
	FL	-40		113	150	207	157
		-50		75	83	90	83
		-60		79	76	50	69
	FL+2	-40		212	245	207	222
		-50		154	170	190	172
		-60		184	171	189	182
	FL+5	-40		300	290	288	293
		-50		297	283	300	294
		-60		300	263	300	288
MIDDLE	FL-2	-40		77	81	86	82
		-50		59	55	61	59
		-60		39	44	51	45
	FL	-40		135	171	59	122
		-50		131	61	251	148
		-60		123	180	261	188
	FL+2	-40		154	175	96	142
		-50		64	74	29	56
		-60		20	35	44	34
	FL+5	-40		220	262	265	250
		-50		36	230	31	100
		-60		16	23	21	20
ROOT	FL-2	-40		119	107	110	112
		-50		94	87	97	93
		-60		101	88	70	87
	FL	-40		229	237	246	238
		-50		231	257	253	248
		-60		155	226	91	158
	FL+2	-40		215	209	210	212
		-50		186	188	207	194
		-60		184	188	168	180
	FL+5	-40		300	300	299	300
		-50		300	299	300	300
		-60		300	300	290	297

Iskusauvojen paikat (kuvio 11&12) on merkitty taulukoissa seuraavasti:

- J* on Joule
- FL-2* on kahden millimetrin etäisyys sularajasta hitsiin päin
- FL* on sularaja
- FL+2* on kahden millimetrin etäisyys sularajasta poispäin hitsistä
- FL+5* on viiden millimetrin etäisyys sularajasta poispäin hitsistä

8.4 Kovuusmittaukset

Kuvassa 6 ovat kovuusmittauspaikat $\frac{1}{2}$ V-Railon ja kuvassa 7 kovuusmittauspaikat K-railosta. Kuvissa olevat kovuusmittauspaikat ovat hitsistä ja HAZ:sta. Kovuusmittausten tulokset ovat taulukossa 10.



Kuva 6. Kovuusmittauspaikat $\frac{1}{2}$ V-railossa



Kuva 7. Kovuusmittauspaikat K-railossa

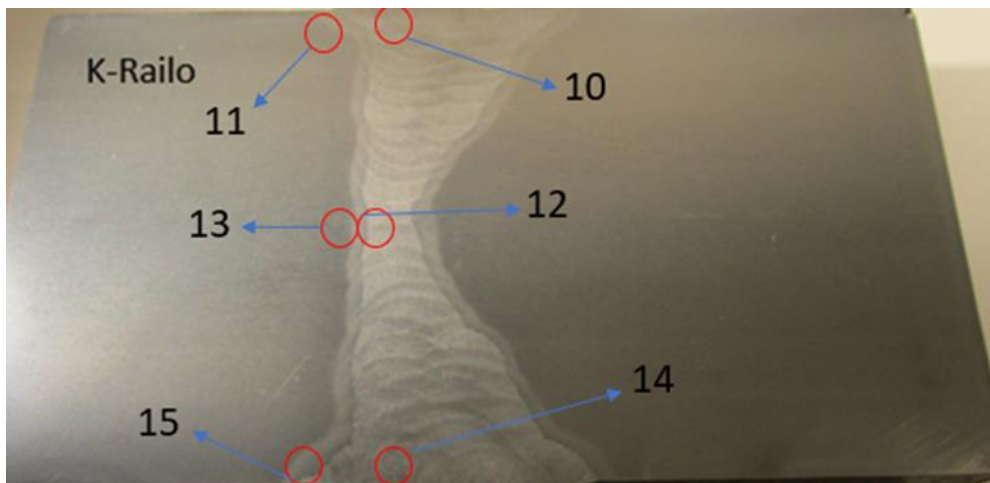
Taulukko 10. Kovuusmittausten tulokset

etäisyys sularajalta [mm]	Puoli V railo (HV10)			K railo (HV 10)			
	yläriivi	keskirivi	alarivi	yläriivi	alarivi	keskiylä	keskiala
perusaine	243	196	245		254	188	195
perusaine	238	194	249	231	254	196	195
perusaine	240	205	251	230	259	199	192
perusaine	227	190	255		255	194	196
perusaine	227	195	258	203	256	203	196
perusaine	234	192	255	208	250	202	200
≤ 0,4 +5	237	205	212	229	247	207	205
≤ 0,4 +4	226	209	206	207	226	208	213
≤ 0,4 +3	214	208	196	208	215	209	207
≤ 0,4 +2	217	198	205	221	217	199	199
≤ 0,4 +1	237	207	204	231	234	223	225
≤ 0,4	262	233	208	229	245	258	242
hitsi	229	227	233	251	257	279	259
hitsi	259	235	237	240	250	284	253
hitsi	215	236	238	246	225	276	260
≤ 0,4	230	227	209	206	238	253	239
≤ 0,4 +1	221	216	206	211	210	230	223
≤ 0,4 +2	218	193	209	193	202	216	213
≤ 0,4 +3	211	205	215	176	210	205	198
≤ 0,4 +4	214	213	223	221	231	205	204
≤ 0,4 +5	227	211	229	230	230	200	205
perusaine	249	196	228	226	226	199	204
perusaine	247	189	229	226	218	196	194
perusaine	248	186	234	234	222	196	192
perusaine	241	191	234	243	223	199	196
perusaine	233	190	235	235	226	185	191
perusaine	235	197	238	244	221	199	191
HAZ_A1	252	222	207	231	245	244	225
HAZ_A2	229	225	218	243	255	226	237
HAZ_B1	240	218	203	243	245	240	245
HAZ_B2	213	223	219	246	245	232	227

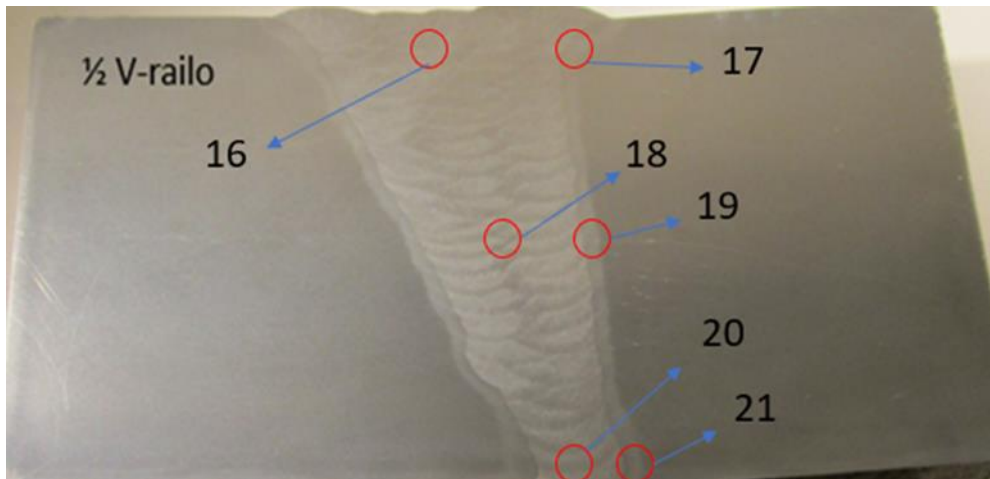
Taulukosta voidaan lukea sekä ½ V-railon että K-railon kovuusmittaustulokset. Kovuusmittaustuloksissa hylättiin kaksi mittausta K-railon yläriiviltä, ja K-railon yläriivin ≤ 0,4 -tulos mitattiin hitsistä, joten tulos ei ole luotettava.

8.5 Metallografiset tutkimukset

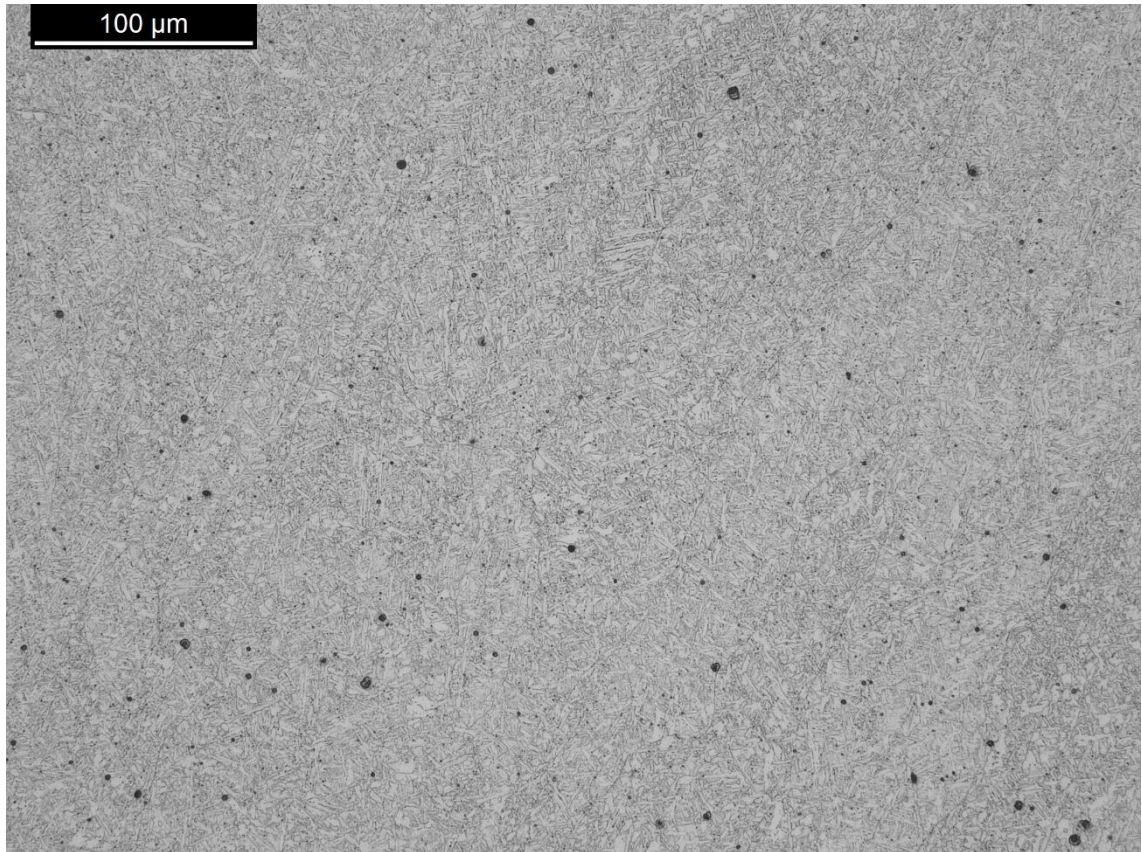
Kuvissa 8 ja 9 on nähtävissä makrokuvat $\frac{1}{2}$ V-railosta ja K-railosta. Makrokuvissa on myös nähtävissä paikkamerkinnyt, joista mikrorakenne kuvat on otettu. Kuvissa 10, 11, 12, 13, 14 ja 15 on nähtävissä mikrorakennekuvia K-railosta. Kuvissa 16, 17, 18, 19, 20 ja 21 on nähtävissä mikrorakenne kuvia $\frac{1}{2}$ V-Railosta. Mikrorakenne kuvat $\frac{1}{2}$ V-Railosta on otettu kuvan 9 peilikuvan suuntaisesti.



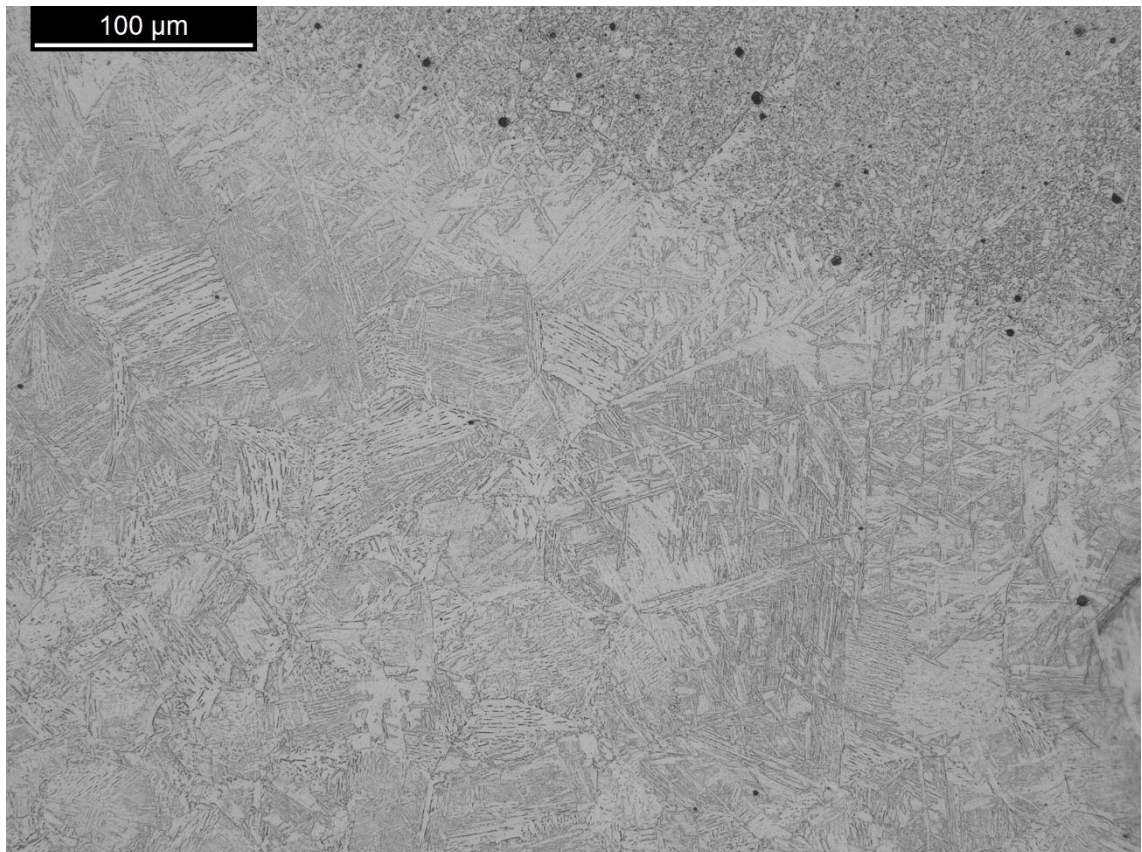
Kuva 8. Makrokuva K-railosta, jossa havainnollistavat paikkamerkinnyt mikrorakennekuvista



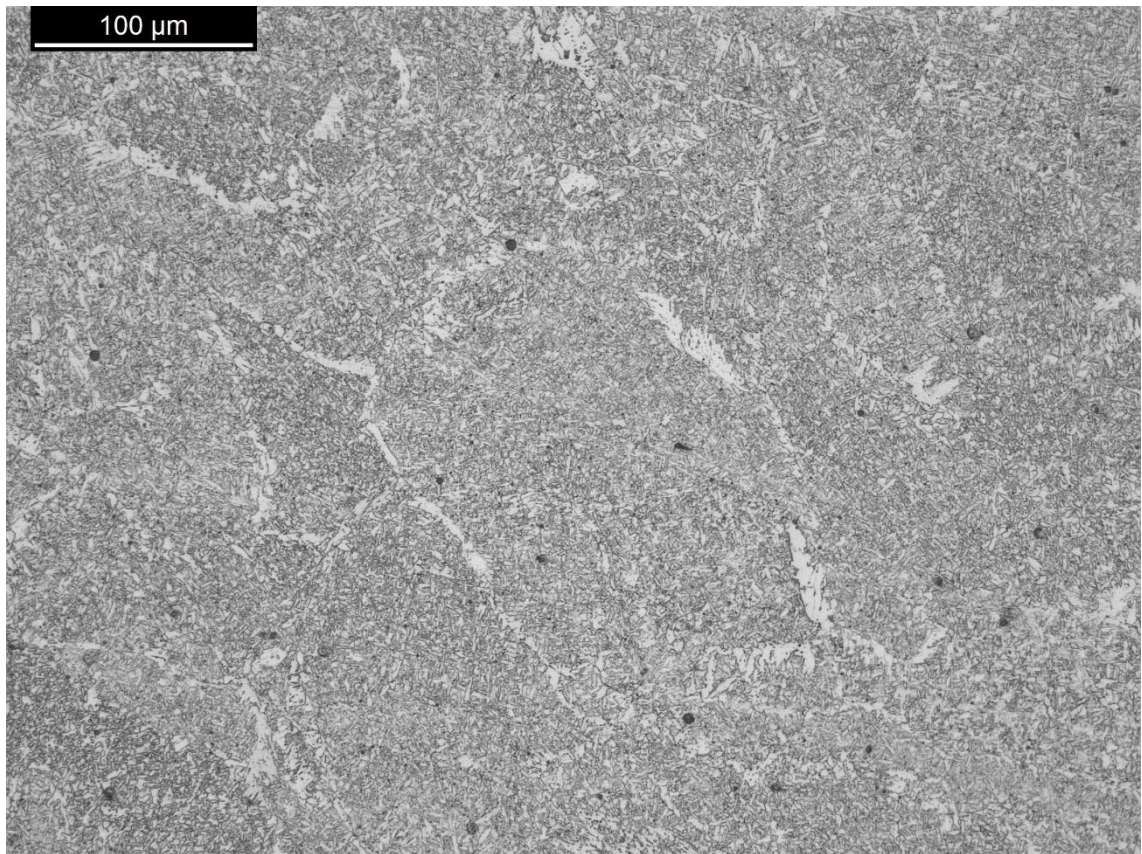
Kuva 9. Makrokuva $\frac{1}{2}$ V-railosta, jossa havainnollistavat paikkamerkinnyt mikrorakennekuvista



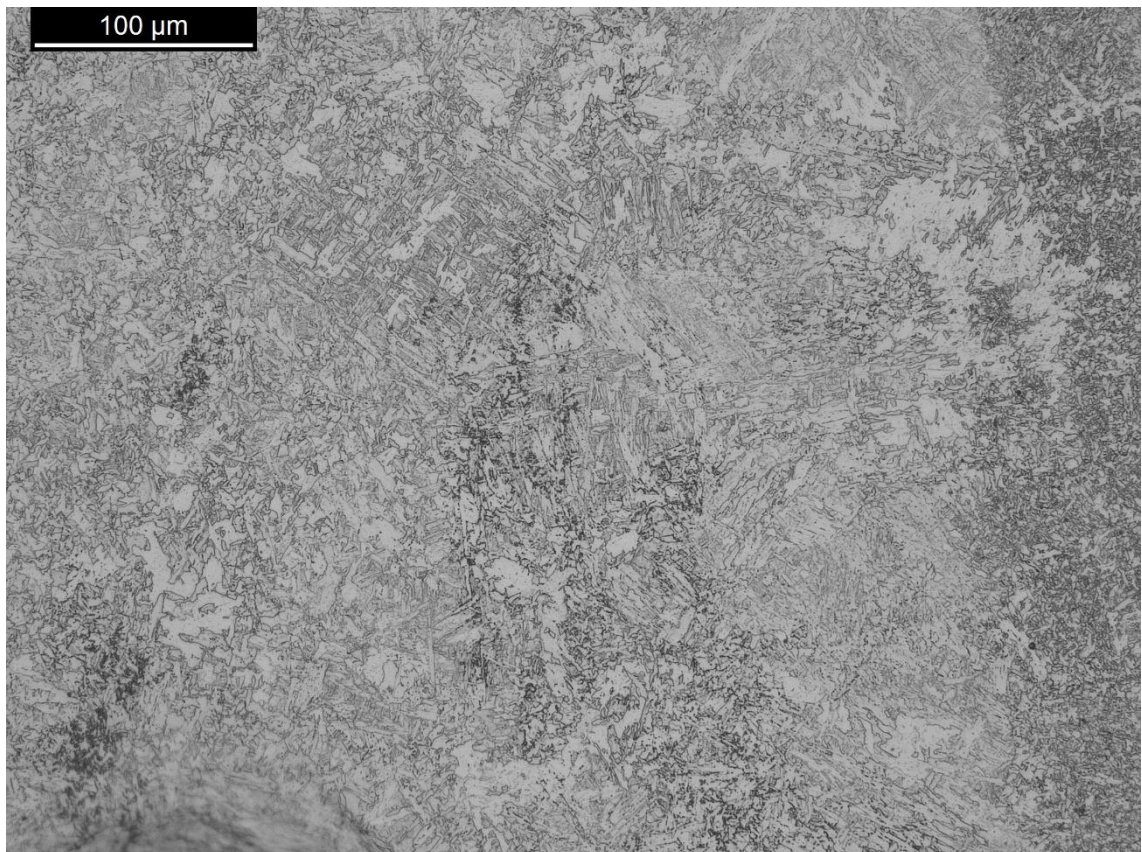
Kuva 10. K-railon pinnan hitsi



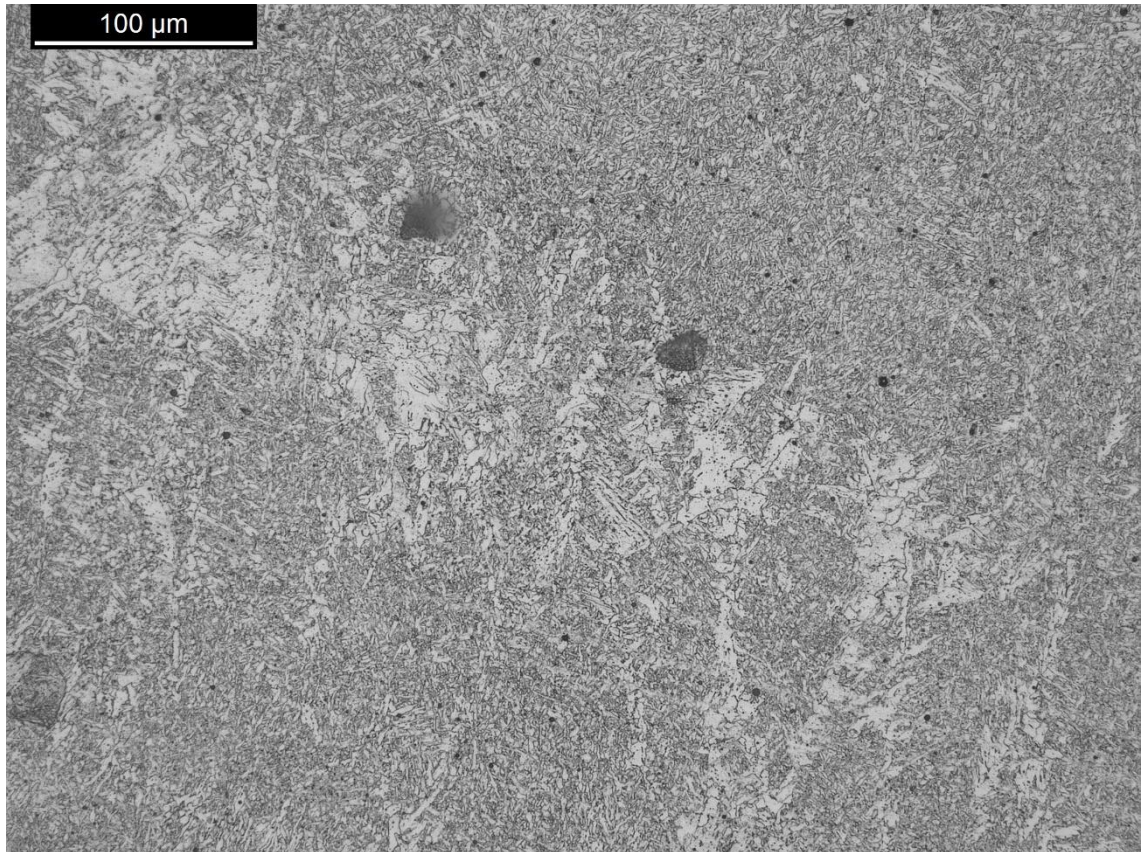
Kuva 11. K-Railon pinnan HAZ



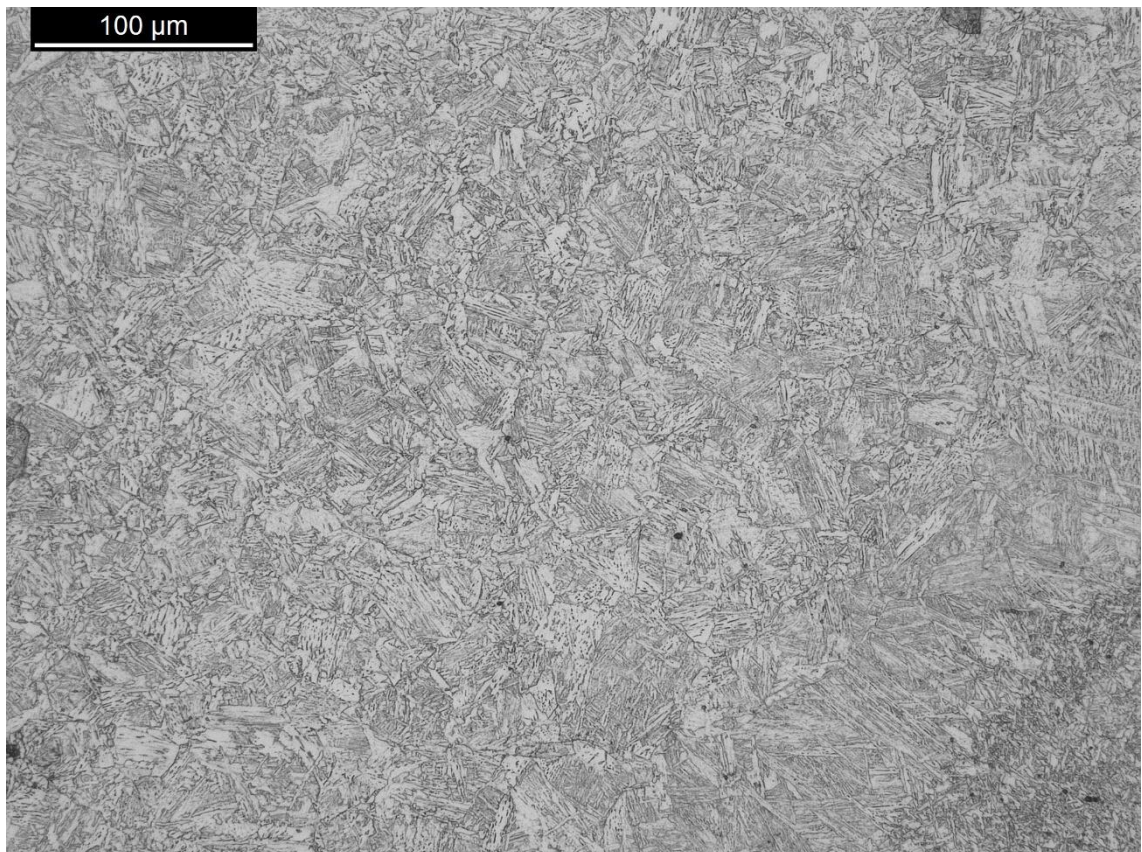
Kuva 12. K-Railon keskialueen hitsi



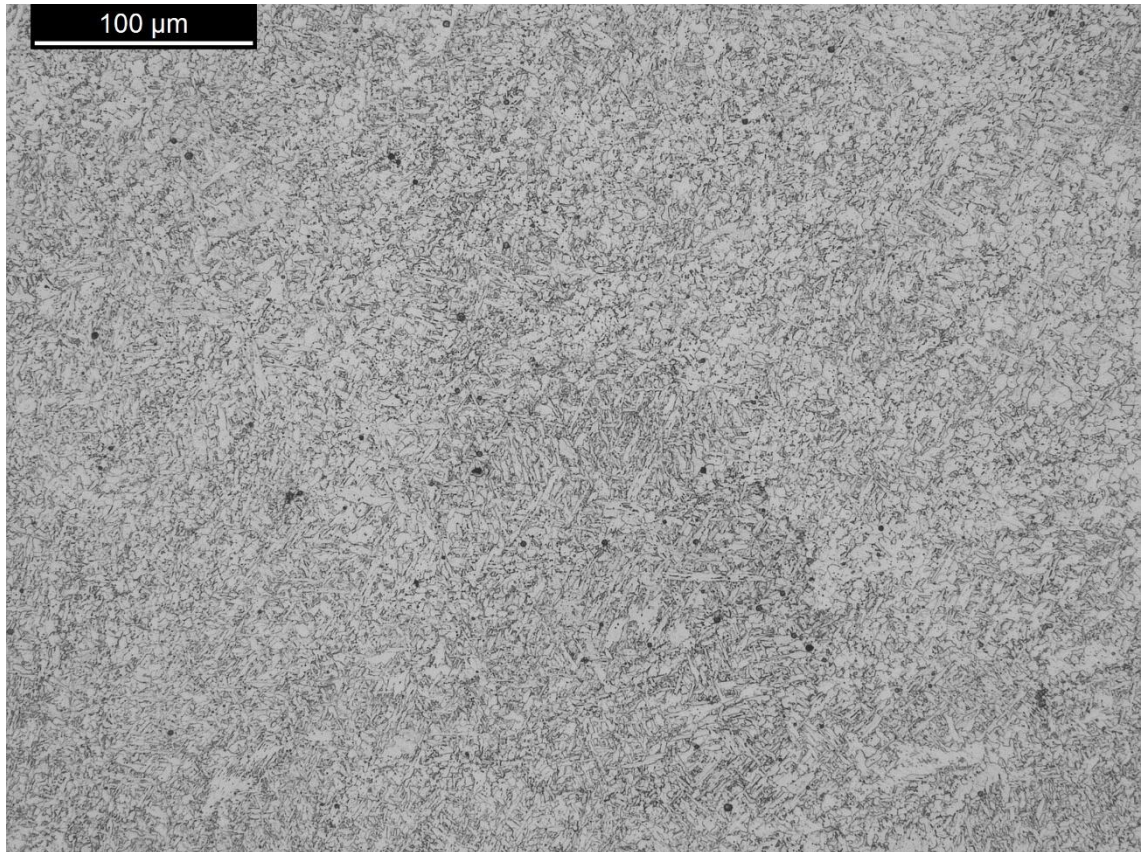
Kuva 13. K-railon keskialueen HAZ



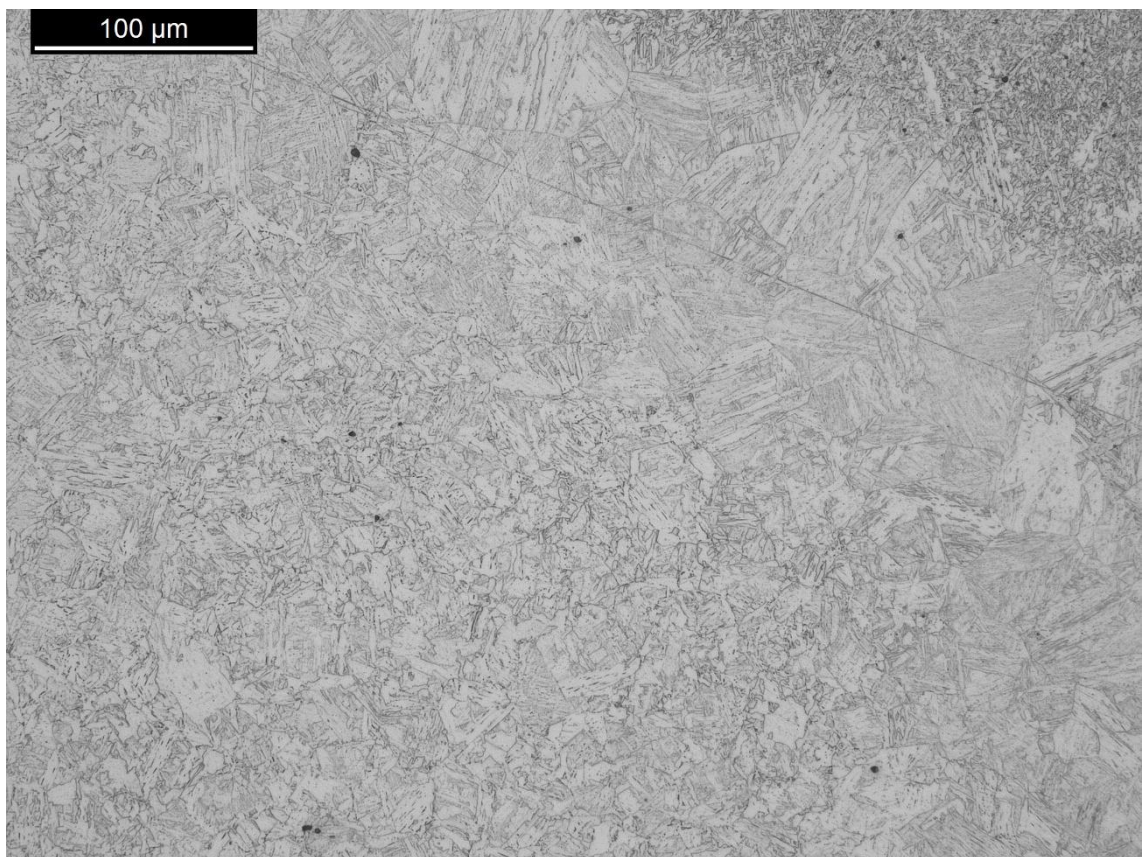
Kuva 14. K-railon juuren hitsi



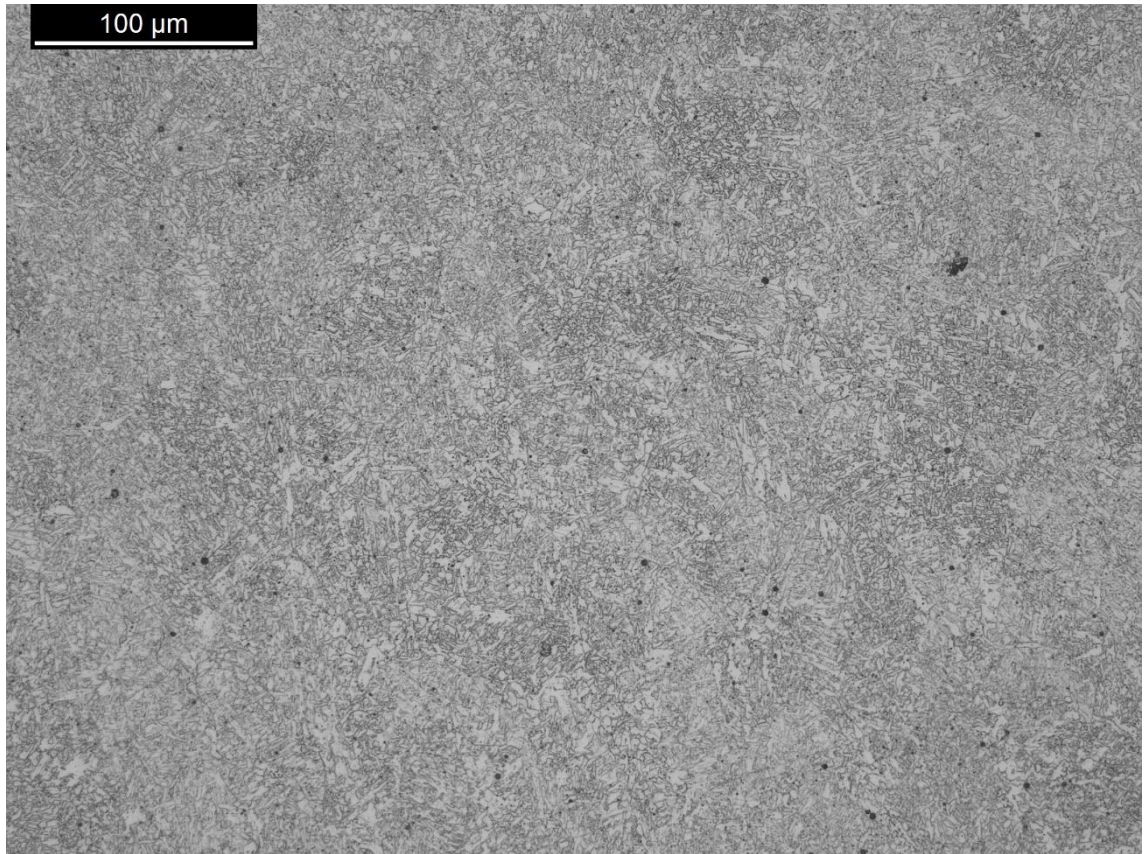
Kuva 15. K-railon juuren HAZ-vyöhyke



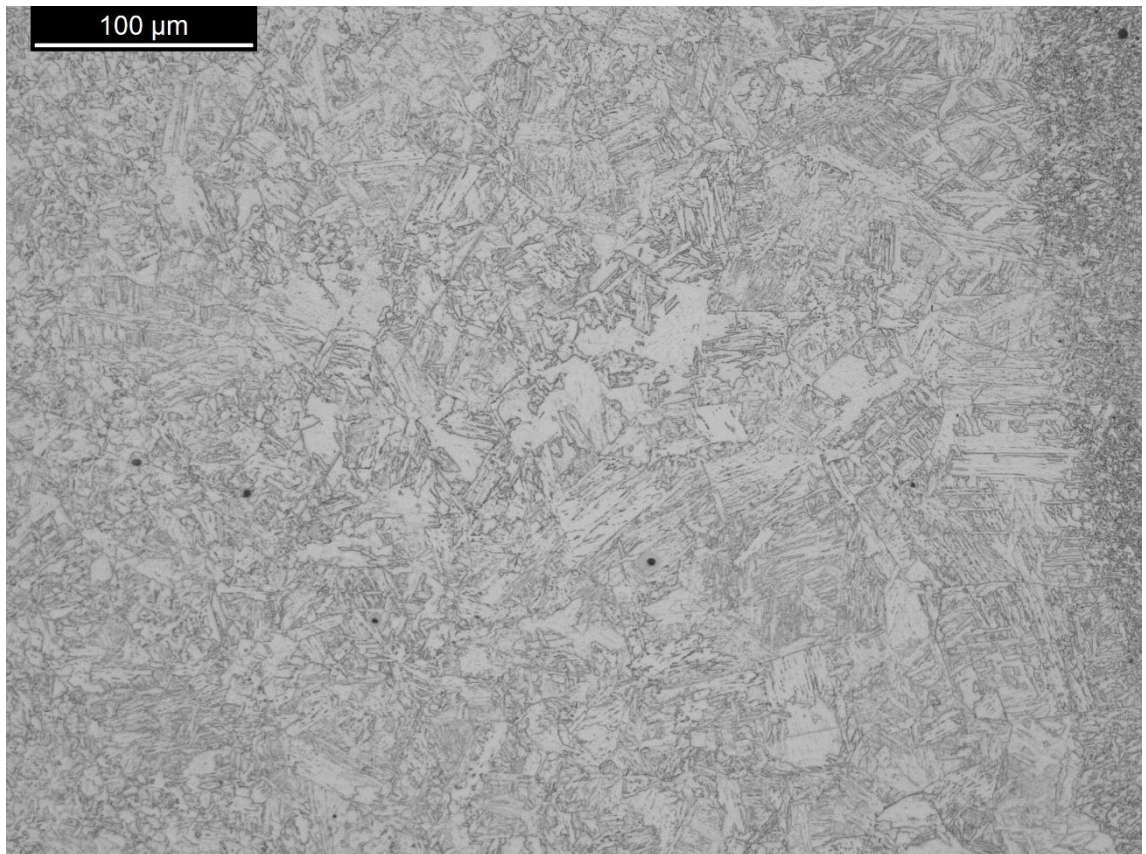
Kuva 16. V-Railon pinnan hitsi



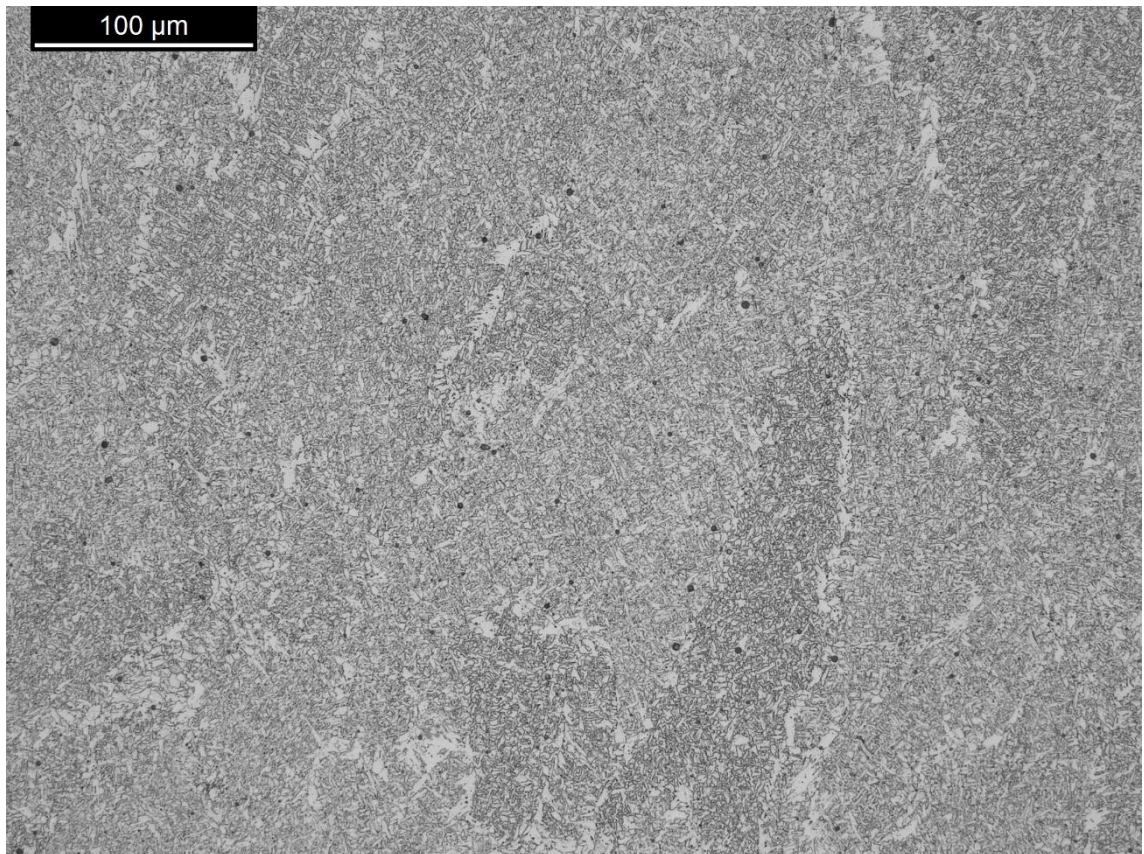
Kuva 17. V-railon pinnan HAZ-vyöhyke



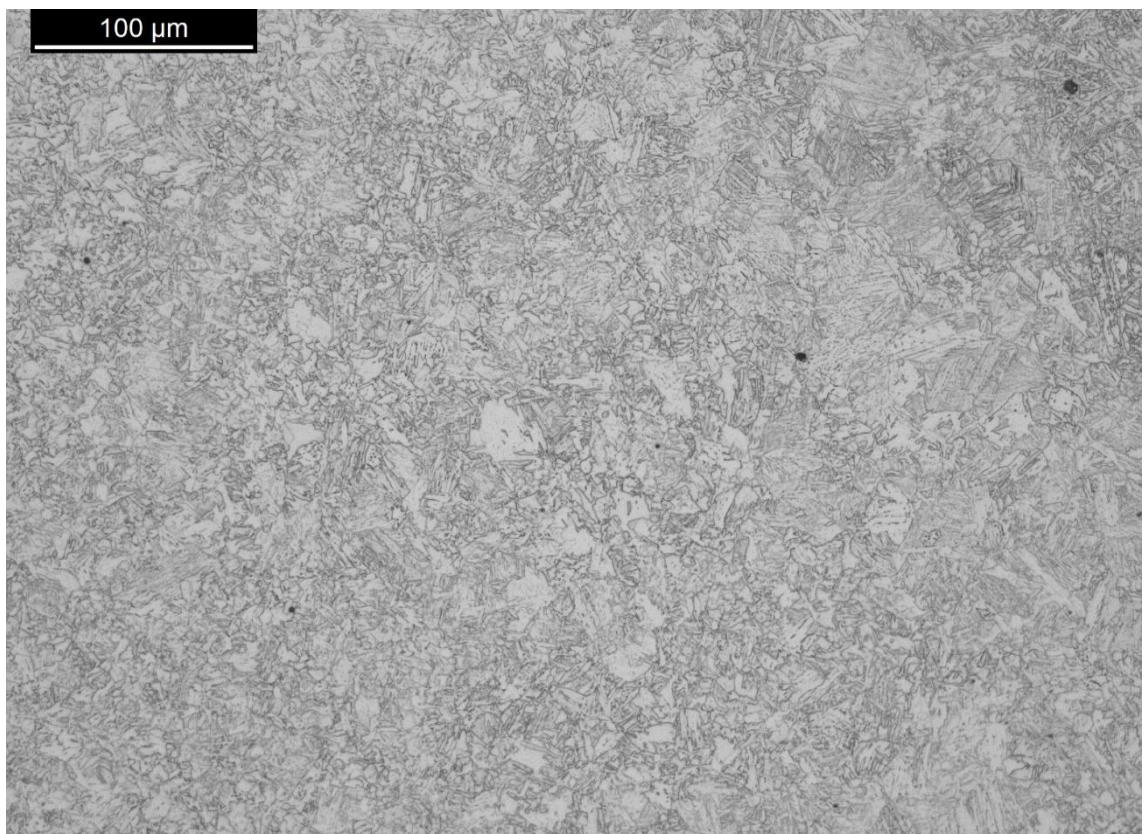
Kuva 18. V-railon keskialueen hitsi



Kuva 19. V-railon keskialueen HAZ-vyöhyke



Kuva 20. V-railon juuren hitsi



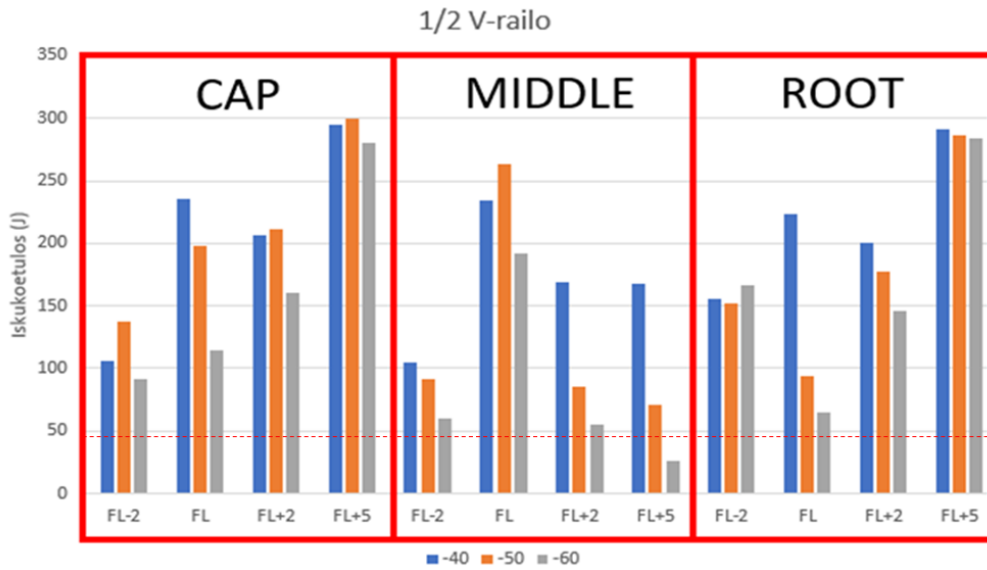
Kuva 21. V-Railon juuren HAZ

9 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

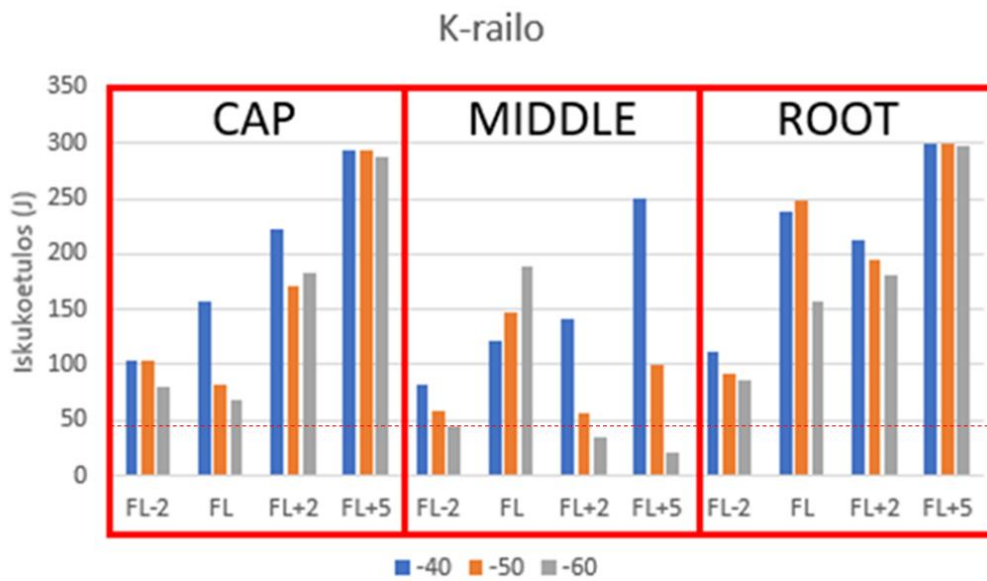
Taulukossa 7 vetokokeiden tulokset osoittivat $\frac{1}{2}$ V-railon myötölujuuden olevan hieman korkeampi kuin K-railon. Myötölujuus oli $\frac{1}{2}$ V-railolla noin 25-30 MPa korkeampi kuin K-railolla, jolla myötölujuus jäi hieman alle 500 MPa. Molemmat kuitenkin täyttävät teräksen minimimyötölujuuden 455 MPa. Murtolujuuteen railon muodolla ei näyttäisi olevan vaikutusta. Molemmissa railotyypeissä murtolujuus oli noin 630 MPa, joka on myös teräkselle tyypillisellä murtolujuusalueella.

Kuvioissa 13 ja 14 on vertailtu $\frac{1}{2}$ V- ja K-railojen iskukokeiden keskiarvoja. Iskukokeen lämpötilan laskiessa iskusitkeys laskee voimakkaasti useimmissa kohdissa hitsiä. Hitsin pintaa ja juurta tarkastellessa ainoastaan 5 mm sularajasta HAZ:n puolella iskusitkeys näyttää pysyvän korkeana. Keskellä siinäkin kohdassa tapahtuu iskusitkeydessä voimakas lasku. Alimmillaan iskusitkeydet kaikilla syvyyksillä näyttävät olevan kohdassa FL-2, eli 2 mm sularajalta hitsiin päin. Mitä kauempana sularajalta HAZ:iin päin mennään, sitä paremmaksi iskusitkeys pääsääntöisesti muuttuu. Standardin mukainen vaatimus sarjan keskiarvolle on 46 J ja yksittäisen mittauksen minimi tulokseksi 32 J lämpötilassa -40 °C (SFS-EN-10225-1:2019). Suoritettujen kokeiden mukaan keskiarvovaatimus ylittyy siis molemmilla railomuodoilla kaikissa kohdissa hitsiä. Lämpötilan laskiessa -60 °C :seen, keskellä hitsiä ei kyseinen vaatimus enää täyty, vaan iskusitkeys laskee alle 46 J:n (punainen katkoviiva). K-railon kohdalla näin tapahtuu sekä hitsissä että HAZ:ssa, kun taas $\frac{1}{2}$ V-railossa ainoastaan 5 mm sularajalta HAZ:iin päin. Hitsin pinnassa ja juuressa tällöinkin standardin vaatimus täyttyy kaikissa kohdissa hitsiä.

Johtopäätöksenä edellä esitettyjen tulosten ja niiden tarkastelun perusteella voidaan todeta, että iskusitkeys on molemmilla railomuodoilla alimmillaan sularajalta 2 mm hitsin puolelle, mutta molemmissa tapauksissa iskusitkeys kuitenkin ylittää standardin minimivaatimuksen. Vasta iskukokeen lämpötilan ollessa -60 °C , alituu standardin vaatima 46 J. Tällöin K-railon iskusitkeydet ovat myös keskimäärin hieman matalampia kuin $\frac{1}{2}$ V-railon. Eron railomuotojen välillä ei kuitenkaan voi sanoa olevan kovin suuri.



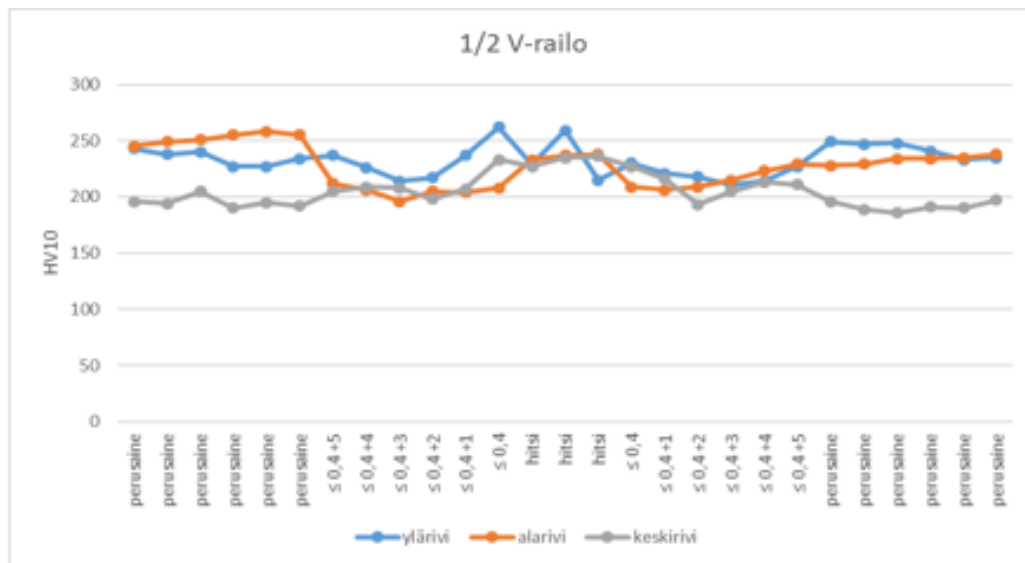
Kuvio 13. 1/2 V-railon iskukoetulosten keskiarvot



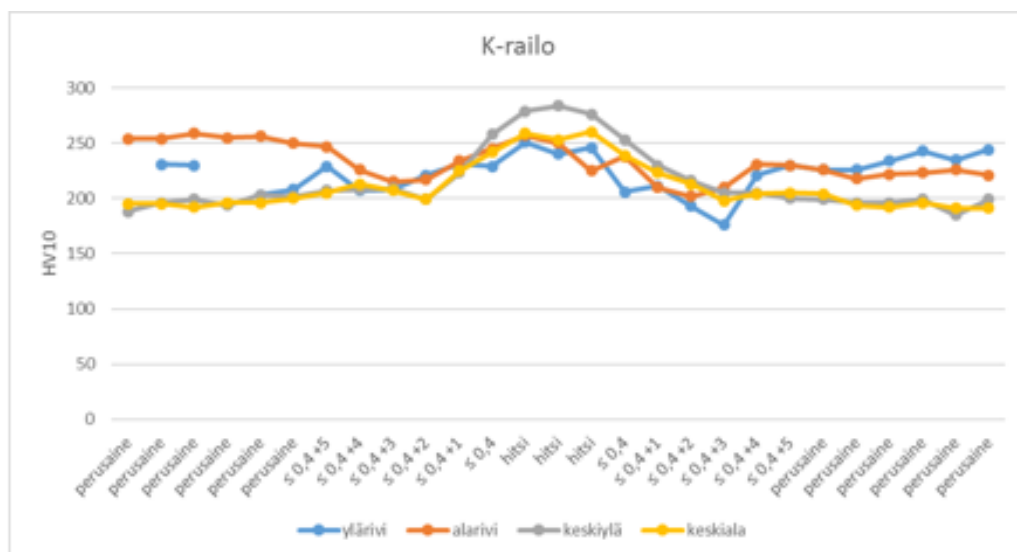
Kuvio 14. K-railon iskukoetulosten keskiarvot

Tarkasteltaessa hitsien kovuuksia HAZ:ssa sularajan lähellä havaitaan hieman muita alueita pehmeämpi vyöhyke, joka yleensä johtuu austeniitin raekoon kasvusta hitsauksen aikana, kuten kuviossa 3 havainnollistetaan. Mikrorakenneku-
vissa esimerkiksi kuvassa 11 nähdään karkearakeinen mikrorakenne sularajan vieressä.

Kuvioissa 15 ja 16 nähdään kovuuskokeiden tulokset diagrammeina. Kovuus nousee mentäessä perusaineeseen päin saavuttaen lopulta perusaineen kovuuden. Railomuodoilla ei näytä olevan suurta vaikutusta HAZ:n kovuuteen vaan se on molemmissa 200-250 HV10 välillä. Molemmissa railomuodoissa alimmat iskutiteksarvot olivat HAZ:ssa hitsin keskellä. Keskialueen kovuudessa ei näytä olevan eroa verrattuna hitsin pintaan ja juureen. Perusaineen kovuudesta huomataan, että keskellä on selvästi pehmeämpää kuin levyn pinnoilla. Syy tähän on ilmeisesti levyn keskilinjasuotautuminen.



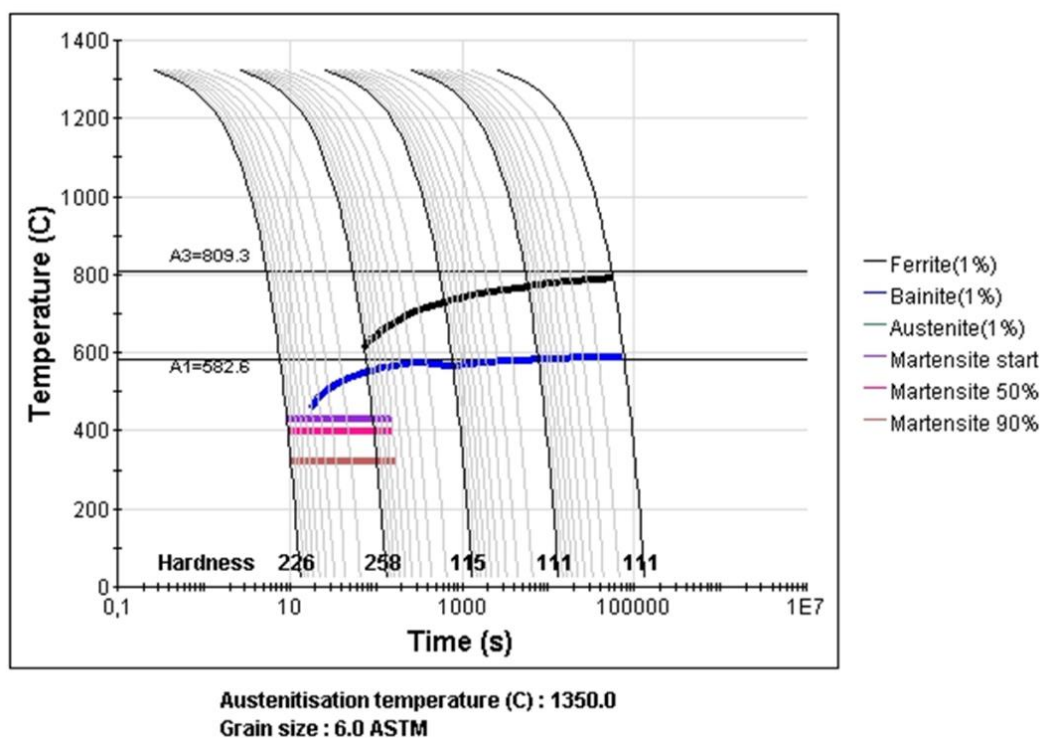
Kuvio 15. ½ V-railon kovuusprofiili



Kuvio 16. K-railon kovuusprofiili

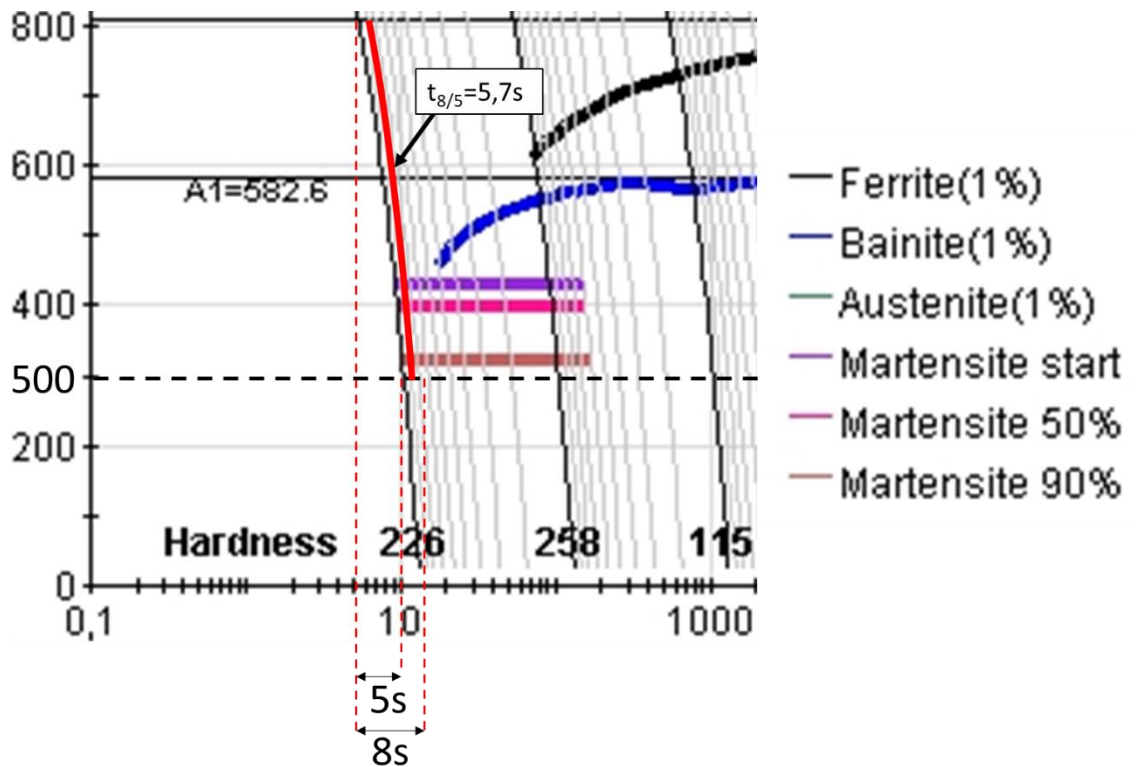
Makro- ja mikrorakenne tutkimuksissa ei havaittu hitsausvirheitä. Mikrorakenne hitsissä näyttää asikulaariselta ferriitiltä, jota tyypillisesti löytyy rakenneterästen hitseissä (Lukkari ym. 2016, 75). HAZ:eista otetuista kuvissa mikrorakenne näyttäisi martensiitilta tai bainiitilta.

Hitsauskokeissa laskettu $t_{8/5}$ oli 5,7s. Oulun yliopistolla laskettiin teräkselle sen todellisia seosainepitoisuuksia käyttäen JMatPro-tietokoneohjelmalla CCT-diagrammi, joka on esitetty kuviossa 17. Diagrammi näyttää eri jäähtymispolkuja vastaavat mikrorakenteet ja kovuudet.



Kuvio 17. Koemateriaalille määritetty CCT-diagrammi

Kuviossa 18 on tarkasteltu lämpötila-aluetta 800-500 °C ja piirretty käyrä, joka vastaa $t_{8/5}$ aikaa 5,7s. Kuvan perusteella mikrorakenteeksi tulisi kyseisellä jäähtymisnopeudella martensiittia.



Kuvio 18. Jäähtymisnopeutta $t_{8/5} = 5,7$ s vastaava jäähtymiskäyrä

Tervo et al. tutkivat samantyyppisen 500 MPa lujuusluokan offshore-teräksen CGHAZ:ssa eli karkearakeisessa vyöhykkeessä syntyviä mikrorakenteita Gleeble fysikaalisen simulaattorin avulla. Tutkimuksen mukaan mikrorakenteessa oli martensiittia $t_{8/5}$:n ollessa 6s, kun taas $t_{8/5}$ ollessa 30 s, mikrorakenne oli bainiittia (Tervo, Mourujärvi, Kaijalainen & Kömi 2018). Tulos on linjassa oheisen CCT-diagrammin kanssa, jonka mukaan bainiittialuetta leikataan, kun $t_{8/5} > 15-20$ s.

HAZ:ssa kovuus oli matalampi kuin perusaineen. Matalaan kovuuteen vaikuttaa toisaalta karkearakeisuus, mutta toisaalta jos mikrorakenne on martensiittia, sillä yleensä on suuri kovuus. Myös CCT-diagrammin perusteella näyttää, että martensiitin kovuus muodostuisi tässä tapauksessa matalammaksi kuin bainiitin. Teräksen hiilipitoisuus oli hyvin matala ja sekä martensiitin että bainiitin kovuus on sitä matalampi, mitä pienempi hiilipitoisuus on. Martensiitissa vähäinen hiili on jakautunut välisijoihin, kun taas bainiitissa hiili muodostaa sementiittierkaumia, jotka voivat toimia lujittavina partikkeleina. Tällä voidaan selittää bainiitin suurempi kovuus verrattuna martensiittiin.

10 POHDINTA

Työn keskeisimpänä tavoitteena oli selvittää, onko vaihtoehtoisella railomuodolla vaikutusta hitsin iskusitkeyteen. Teoriaosuudessa annettiin tietoa rikkovista aineenkoetuskokeista ja tyyleistä, miten testit tullaan suorittamaan. Lisäksi yleinen tieto offshore-teräksistä ja hitsauksesta antoivat pohjan kokeiden suorittamiseen. Tuloksellisesti opinnäytetyö oli onnistunut, koska tavoitteeseen päästiin toteamalla, että erilaisella railomuodolla ei ollut vaikutusta hitsin iskusitkeyteen.

Opinnäytetyö osoittautui lopulta melko mielenkiintoiseksi aiheeksi, sillä työ auttoi perehtymään lujien offshore-terästen hitsaukseen ja rikkovien aineenkoetuskokeiden suorittamiseen. Hitsien mikrorakenteen laajempi tarkastelu opetti terästen mikrorakenteista erittäin paljon, mistä uskon olevan hyötyä tulevaisuudessa.

Opinnäytetyön teoriaosion käsittely opetti keskeisiä asioita itse hitsauksesta ja offshore-teräksistä. Tietoa haettiin lähinnä internetistä ja Lapin ammattikorkeakoulun kirjastosta saatavilla olevista materiaaleista. Osan materiaaleista SSAB toimitti suoraan tutkittavaksi. Haastavaksi sopivan materiaalin etsimisestä teki suppea saatavuus suomen kieliseen tekstiin. Kuitenkin materiaalia saatiin työhön hyvin, ja osa jouduttiin karsimaan pois, jotta aihealue ei laajenisi liian isoksi.

Opinnäytetyö opetti paljon ja antoi minulle tietoa, miten teollisuudessa teräksien hitsausliitoksia ja teräksiä tutkitaan. Uskon opinnäytetyön olevan myös hyvä tiedonlähde, kun halutaan tutkia hitsausliitoksia tai offshore-teräksiä.

LÄHTEET

- Eames, A. 2016. Tutkimusretki offshore-markkinoille. SSAB World 1/2016. Viitattu 10.12.2019. <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/uutishuone/uutiskisto/2016/07/18/12/38/exploring-the-offshore-market>
- ESAB 2019a. ESABin osaamiskeskus. MIG/MAG hitsaus. Viitattu 10.12.2019. <https://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/mig-mag-hitsaus.cfm>
- ESAB 2019b. Hitsausvirheitä–Sytä ja etsiminen. Viitattu 10.12.2019. <https://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/xa00152112a.pdf>
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2004. Materiaalit ja niiden käyttö. Helsinki: WSOY.
- Lukkari, J. 2000. Hitsien laatu ja hitsausvirheet osa 2. Hitsausuutiset 2/2000.
- Lukkari, J., Kyröläinen, A. & Kauppi, T. 2016a. Hitsauksen materiaalioppi osa 1. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y.
- Lukkari, J., Kyröläinen, A. & Kauppi, T. 2016b. Hitsauksen materiaalioppi osa 2. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y.
- Lämsä, J. & Kiuru, H. 2012. Ultralujat rakenne- ja kulutusteräkset – tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle. CASR-Steelpolis-verkostohanke (EAKR). Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy. Oulun yliopisto.
- Ovako 2015. Ovakon terästen hitsaus. Viitattu 10.12.2019. http://ovako.se/PageFiles/49/Ovakon_terasten_hitsaus_15724.pdf
- Rissanen, T. 2011. Ultralujien terästen käyttö ja konepajaprosessit. Tekninen raportti. Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun julkaisu 6/2011.
- Shy-hitsaus 2012. Hitsausenergia ja lämmöntuonti. Viitattu 10.12.2019. http://www.shy-hitsaus.net/portals/shy/iBooklet/2007/ht_2_07/files/assets/basic-html/page10.html
- SSAB 2017. Welding of Strenx, advanced high strength steels. Viitattu 10.12.2019. <https://aemach.com/strenx/pdf/299-en-Welding-of-Strenx-Advanced-High-Strength-Steels.pdf>
- SSAB 2019. SSAB lyhyesti. Viitattu 9.12.2019. <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/ssab-lyhyesti>
- SFS-EN-10225-1. 2019. Hitsattavat rakenneteräkset offshore-rakenteisiin. Tekniset toimitusehdot. Osa 1: Levyt. Helsinki: SFS.
- SFS-EN-ISO 15614-1. 2017. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa 1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkelseosten kaarihitsaus. Helsinki: SFS.

Tampereen teknillinen yliopisto 2005. Rautametallit. Viitattu 9.12.2019.
http://www.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_1.php

Tervo, H., Mourujärvi, J., Kaijalainen, A. & Kömi, J. 2018. Mechanical Properties in the Physically Simulated Heat-Affected Zones of 500 MPa Offshore Steel for Arctic Conditions. Viitattu 14.12.2019. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-75677-6_66

Tihinen, S. 2013. Lujat ja termomekaanisesti valssatut teräkset. Viitattu 14.12.2019. <http://www.shy-hitsaus.net/LinkClick.aspx?fileticket=68W5bPiph3A%3D&tabid=4736>

LIITTEET

- Liite 1. Hitsausohje ½ V-railo (WPS).
- Liite 2. Hitsausohje K-railo (WPS).
- Liite 3. Lisäaineen NSSW SF-50A tuote-esite.

Liite 1. Hitsausohje ½ V-railo (WPS)

HITSAUSOHJE (WPS)				Hitsausohjeen nimi S500 offshore puoli-V Viite					
Viitestandardit EN ISO 15609-1 Valmistaja Lapin AMK Paikka Tornio		Viite WPS:et Asteikas SSAB Vaatimusdokumentin viite		Revisioiden määrä 11.11.2019 Projekti ArcDigi	Revisio 4				
PERUSAIKSEN MERKINTÄ									
Perusaine A Nimi/laatu S500 offshore 70805-041	Materiaaliryhmä 2.2	Standardi EN 10025-1	Toimitustila	Paksuus [mm] 60.0 – 60.0	Halkaisija [mm]				
Perusaine B Nimi/laatu	Materiaaliryhmä	Standardi	Toimitustila	Paksuus [mm]	Halkaisija [mm]				
LIITOSKUVA			HITSAUSKÄYTESITYS						
Hitsauskappi BW	Tuotetyyppi P	Juurituoli mb	Puolet ss	Karmokas ml	Juuren avaus				
Hitsausaesto PA	Avonius [mm]	Polttokulma [°]	Alueansiirtymämuoto Spray						
Vapaalangan pituus [mm] 18.0 – 21.0	Toleranssi	Ballon valmistus ja puhdistus Mechanical cutting			Jauheen merkintä Volttamielekrodi				
HITSAUSPROSESSI									
Hitsausprosessi 136									
Suojekaasu Nimi Mison 25	Ryhmä M21								
Juurikaasu Nimi	Ryhmä								
Lisäaine Kauppanimi SF 50 A Luokitus 17632-A: T 50 4 Z P M 2 HS									
Vaepetus <input type="checkbox"/> Ohimäläikkäys [mm]									
<input type="checkbox"/> Hitsauslaittelato Nimi XB MIG Welder									
HITSAUSPARAMETRIIT									
Palkki	Liikäläp. a [mm]	Hitsausprosessi	Langansyöttönopeus [m/min]	Virran [A]	Jännite [V]	Virran ja napaisuus	Kuivatusnopeus [mm/min]	Kaasuvirtaus [l/min]	Lämpösuoritus [kJ/mm]
1-2	1.2	136	6 – 14	260 – 270	27.0 – 28.0	DC+	450 – 460	19.0 – 19.0	0.73 – 0.81
3	1.2	136	6.0 – 14.0	240 – 250	27.0 – 28.0	DC+	420 – 420	19.0 – 19.0	0.74 – 0.80
4-61	1.2	136	6.0 – 14.0	260 – 270	27.0 – 28.0	DC+	450 – 450	19.0 – 19.0	0.75 – 0.81
LÄMPÖKÄSITTELY									
Sallittu lämpötila min. [°C] 150.0		Vähimmäislämpötila max. [°C] Menettämät		PWHT Lämpötila [°C] Ohjeen nro		Kaeto		Tasaajaheijutus Lämpötila [°C] Kaeto	
Lämpötilan valvonta						Kuumennusnopeus		Jäähdytysnopeus	
MUUNAUKSET						ALLEKIRJOITUKSET			
						Leittäjä Nimi Raimo Ruoppa		Hyväksyjä Nimi Raimo Ruoppa	
						Yritys Lapin AMK		Yritys Lapin AMK	
						Päiväys 11.11.2019		Päiväys 11.11.2019	

Liite 2. Hitsausohje K-railo (WPS)

HITSAUSOHJE (WPS)				Hitsausohjeen nimi S500 Offshore K-railo						
Vitautandardi EN ISO 15609-1 Valmistaja Lapin AMK Paikka Tornio		Vitautuotteen nimi S500 Offshore K-railo Vitse		Revision päivätty 06.11.2019 Projekti ArcDigi						
Vitautuotteen nimi EN ISO 15609-1 Valmistaja Lapin AMK Paikka Tornio		Vitautuotteen nimi S500 Offshore K-railo Vitse		Revision päivätty 06.11.2019 Projekti ArcDigi						
PERUSAIKSEN MERKINTÄ										
Perusaine A Nimiläatu S500 offshore 70805-041		Materiaaliyhelmä Z.2	Standardi EN 10025-1	Toimitustila	Paksuus [mm] 60.0 - 60.0					
Perusaine B Nimiläatu		Materiaaliyhelmä	Standardi	Toimitustila	Paksuus [mm] Halkeilejä [mm]					
LITOSTUKUVA										
HITSAUSJÄRJESTYS										
Libertytyyppi BW	Tuotetyyppi P	Juuritus mb	Puoler ss	Kerrokset ml	Juurien sraus Sillotuksen hitsausohje					
Hitsausasento PA	A-mita [mm] Teknillike	Poltinleikka [°]	Alueenilmyntämuoto Spray		Jauheen merkintä Volframielektrodi					
Vapaalangan pituus [mm] 18.0 - 21.0	Mekaaninen leikkaus Mechanical cutting									
HITSAUSPROSESSI										
Hitsausprosessi 136										
Suojekaasu Nimi Mison 25	Ryhmä M21									
Juurikaasu Nimi	Ryhmä									
Lisäaine Käytännimi SF 50 A										
Luokitus 17632-A: T 50 4 Z P M 2 HS										
Vaaputus Enimmäiskäyte [mm]										
<input type="checkbox"/>										
Hitsauslaitelaito Nimi XS MIG Welder										
HITSAUSPARAMETRIIT										
Pakko	Lisäaine a [mm]	Hitsausproce... [mm/min]	Langansyöttönopeus	Virra [A]	Jännite [V]	Virra ja napaisuus	Kuuljenopeus [mm/min]	Kaasuvirtaus [l/min]	Lämmittäsuandi [kJ/mm]	
1-2	1.2	136	6 - 14	260 - 270	27.0 - 28.0	DC+	450 - 460	19.0 - 19.0	0.73 - 0.81	
3	1.2	136	6.0 - 14.0	240 - 250	27.0 - 28.0	DC+	420 - 420	19.0 - 19.0	0.74 - 0.80	
4-61	1.2	136	6.0 - 14.0	260 - 270	27.0 - 28.0	DC+	450 - 450	19.0 - 19.0	0.75 - 0.81	
LÄMPÖKÄSITTELY										
Soittimittelylämpötila min. [°C] 150.0	Väljälämpötila max. [°C] Manasalmä	PWHT Lämpötila [°C] Ohjeen nro	Kaasu	Tasouhhekkutus Lämpötila [°C]	Kaasu					
Lämpötilan valvonta	Manasalmä	Ohjeen nro	Kuumennusnopeus	Jäähdytysnopeus						
HUOMAUTUKSET						ALLEKIRJOITUKSET				
						Leittäje Nimi Raimo Ruoppa Yhtäje Lapin AMK Päiväje 06.11.2019	Hyväkkyjä Nimi Raimo Ruoppa Yhtäje Lapin AMK Päiväje 06.11.2019			

Liite 3. Lisäaineen NSSW SF-50A tuote-esite

NSSW SF-50A		AWS A5.29 E91T1-GM / AWS A5.36 E91T9-M21A4-K2-H4		EN ISO 17632-A: T 50 4 Z P M 2 H5		NST	
Flux cored wire for welding high tensile steels such as Weldox 500.							
General description:							
<p>NSSW (Nittotau) SF-50A is a semiactive rutile flux cored wire developed for welding high tensile steel such as i.e. Wieldox 500.</p> <p>The wire uses an Argon/CO₂ mixed shielding gas, ensuring a user friendly and stable arc with minimum spatter and good transition to the parent material. SF-50A is CTOD tested with good results.</p> <p>Due to its semiactive characteristic, the wire has an extremely low content of hydrogen (typical 3ml/100g weld metal), something which ensures low risk of cold cracks.</p>				<p>The wire is copper coated and has a clean surface which together with exact diameter and perfect roundness ensures a stable and even wire feeding. The stick out should be between 15-25mm depending upon welding parameters.</p> <p>Volts should be 10% of the Ampereage, this is about 1-3 volts lower than that of which conventional folded flux cored wires require.</p>			
Welding positions:				Welding current:		Type of gas / flow:	
				DC+		Ar+18-25% CO ₂ 18-25 l/min.	
Typical chemical composition of all-weld-metal:							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	
0,05	0,45	1,22	0,012	0,005	0,31	1,55	
Diffusible hydrogen content (ml/100g):							
≤5 ml/100g (2,5 ml/100g typical)							
Typical mechanical properties of all-weld-metal:							
Yield and Tensile Strengths				Charpy Impact Test			
Yield N/A	Tensile N/A	Elongation %	Charpy V (J) -40 °C				
605	657	27	75				
Guidance - Ampere (DC+):							
Wire diameter	1,2 mm						
Ampere / Volt	200-300A / 22-32V						
Packaging information:				Approval:			
1,2mm x 12,5kg spool D300				DNV, LR, CE			
				Reference / date:			
				NSSW SF-50A, English, 26.03.2015.			
Perfect Welding				www.nst.no			