

**AUSTENIITTISIEN RUOSTUMATTOMIEN TERÄKSIEN
MIG/MAG-HITSAUSSAUMOJEN LUJUUDEN HALLINTA**

EN 1.4404

Markus Harrinkoski

Opinnäytetyö
Tekniikan ja liikenteen ala
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

2016

Tekniikan ja liikenteen ala
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri

Tekijä	Markus Harrinkoski	Vuosi	2016
Ohjaaja(t)	TkL Timo Kauppi		
Toimeksiantaja	Outokumpu Oyj		
Työn nimi	Ruostumattomien teräksien saumojen lujuuden hallinta	MIG/MAG-hitsaus-	
Sivu- ja liitesivumäärä	43 + 6		

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko nykyisillä hitsauslisäaineilla mahdollista saada aikaan austeniittisia ruostumattomia teräksiä hitsattaessa lujempi hitsausauma kuin perusainevetokokeessa. Taustalla oli asiakaslähtöinen tarve, jossa ongelman muodosti säiliöstandardin SFS-EN 14015:2005 kohta 17.2.3.2 a) ”Liitoksen vetokokeessa kappaleen on murruttava perusaineen kohdalta”. Vetokokeet tehtiin laajassa käytössä olevalla EN 1.4404 ruostumattomalla teräksellä, jonka kanssa ongelmia oli ilmennyt, kahdella erillä hitsauslisäaineella. Hitsauslisäaineista toinen oli halkaisijaltaan 1 mm paksua umpilankaa ja toinen 1,2 mm paksua täytelankaa.

Selvitys on tarpeellinen, koska nykyiset ruostumattoman standarditeräksen lujuudet ovat sellaisia, että on haasteellista saada markkinoilla tarjolla olevilla hitsauslisäaineilla aikaan sellainen liitos, jossa puhtaan hitsiaineen lujuus on selvästi perusainetta suurempi.

Tuloksista ilmeni, etteivät läheskään kaikki vetokoesauvat katkenneet perusaineen kohdalta, vaan jopa yli puolet katkesi hitsisaumasta. Tämä aiheuttaakin ongelman, koska nykyiset ruostumattomat teräkset ovat huomattavasti lujempia kuin saatavilla olevat hitsauslisäaineet. Standardiin 14015:2005 tulisikin kohta 17.2.3.2 a) ”Liitoksen vetokokeessa koekappaleen on murruttava perusaineen kohdalta” muuttaa paremmin nykytilannetta vastaavaksi. Tämän opinnäytetyön merkitystä voidaan pitää huomiota herättävänä, koska nykyinen standardijärjestelmä ei pysy kehityksen nopeassa vauhdissa mukana.

Asiasanat

ruostumaton teräs, hitsaus, lujuuskokeet, murtolujuus.

Technology, Communication and
Transport
Mechanical and Production Engi-
neering
Bachelor of Engineering

Author	Markus Harrinkoski	Year	2016
Supervisor	Timo Kauppi, Lic.Sc (Tech.)		
Commissioned by	Outokumpu Oyj		
Subject of thesis	Strength control of MIG/MAG welding seams in stainless steels		
Number of pages	43 + 6		

The objective of this thesis was to find out, if it is possible to get an strong enough weld with current welding consumables in tensile test when welding high strength austenitic stainless steels. Behind this thesis was a customer-oriented need, where the problem was when welding under standard for steel tanks SFS-EN 14015 the welds did not pass section 17.2.3.2 a) of standard SFS-EN 14015, which says the following sentence "The joint tensile test shall fail in the plate material". The tensile tests of this thesis are made with EN 1.4404 stainless steel, using two different types of welding wire 1 mm thick solid wire and 1.2 mm thick cored wire.

This research was important because stainless steels today are cold formed to be very hard and welding consumables have not stayed up to the task and the weld is not as strong as the base material.

The results were that 50 % or more of the tested seams failed from the weld. This creates a problem with standard SFS-EN 14015:2005 chapter 17.2.3.2 a) "The joint tensile test shall fail in the plate material", because current welding consumables simply do not have high enough tensile strength. Therefore chapter 17.2.3.2 a) should be removed from the standard or changed to suit better current welding consumables and stainless steels, for example "The joint tensile test shall fail from the weaker tensile strength material". The significance of this thesis can be considered notable due to the clear and present problems regarding too slow updates in the standards.

Keywords stainless steel, welding, strength test, tensile strength.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	8
1.1	Työn tavoite ja rajaus	8
2	NESTEIDEN VARASTOINTIIN KÄYTETTÄVÄT SÄILIÖT	10
3	AUSTENIITTINEN RUOSTUMATTOMAN TERÄS JA SEN HITSAUS	12
3.1	Mitä hitsaus on?	12
3.2	Mitä austeniittinen ruostumaton teräs on?	13
3.3	Yleistä ruostumattomista teräksistä	15
3.4	Austeniittisen ruostumattoman teräksen mekaaniset ominaisuudet	17
3.4.1	Muovattavuus ja koneistettavuus	18
3.4.2	Iskusitkeys ja väsymislujuus	19
3.5	Hitsattavuus	20
3.6	Hitsauksessa huomioitavaa	23
3.6.1	Raerajakorroosio	24
3.6.2	Ferriittipitoisuus austeniittisessä ruostumattomassa teräksessä ...	25
4	KOEMATERIAALIT JA -MENETELMÄT	27
4.1	Koemateriaalit	27
4.2	Hitsauskokeet	28
4.3	Vetokoesauvojen merkintä	28
4.4	Vetokokeet	29
4.5	Metallografia	31
4.6	Kovuusmittaukset	31
5	TULOKSET	32
5.1	Vetokokeet	32
5.2	Hitsin mikrorakenne	33
5.3	Kovuusmittaukset	34
6	TULOSTEN TARKASTELU	35
6.1	Tulosten analysointi Studentin t-testillä	37
6.2	Tulosten merkitys säiliöstandardin SFS-EN 14015:2005 kannalta	37
7	POHDINTA	40
	LÄHTEET	42

ALKUSANAT

Haluaisin kiittää tämän opinnäytetyön tekemisessä korvaamattomaksi avuksi olleita henkilöitä, opinnäytetyön ohjaajaa Timo Kauppia, sekä tutkimusinsinööri Hannu-Pekka Heikkistä Outokummun Tornion tehtailta. Suuri kiitos myös muille projektissa mukana olleille yhteistyökumppaneille.

Lisäksi erityiskiitos perheelleni, joka on ollut tukenani koko opiskelujen ajan ja mahdollistaneet tämän opiskelun.

Keminmaassa 6.6.2016

Markus Harrinkoski

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

HAZ	Muutosvyöhyke (Heat Affected Zone) on se osa perusaineesta, johon hitsausprosessi on aiheuttanut mikrorakennemuutoksia (Kyröläinen & Lukkari 2002, 51).
PMZ	Osittain sulanut vyöhyke (Partially Melted Zone) on perusainetta ja sijaitsee sulamattoman perusaineen ja ns. sekoittumattoman täysin sulaneen perusaineen välisellä alueella (Kyröläinen & Lukkari 2002, 51).

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aihe on syntynyt ruostumattomien terässäiliöiden valmistuksessa havaitusta ongelmasta. Lapin ammattikorkeakoulussa toimiva Arctic Steel and Mining TKI-ryhmä törmäsi mielenkiintoiseen ongelmaan syksyllä 2016. Kysymyksessä oli metanolin varastosäiliön valmistuksessa käytettävän hitsausohjeen menetelmäkokeen hylkäys vetokokeiden osalta. Säiliö oli suunniteltu valmistettavaksi austeniittisesta ruostumattomasta EN 1.4404 teräksestä (EN X2CrNiMo17-12-2). Lapin ammattikorkeakoulun yhteistyökumppanin mukaan hylkäyksen syynä oli ollut se, että vetokokeessa koesauva oli murtunut hitsistä. Säiliö oli suunniteltu kansallisen standardin SFS-EN 14015:2005 mukaan. Kun aihetta kartoitettiin tarkemmin, selvisi, että kyse on laajemmasta, säiliönvalmistusta jo pitempään koskettaneesta haasteesta.

Ruostumattoman teräksen valmistaja on havainnut jo vuosia sitten lujien lisäaineiden niukan tarjonnan ja sen, että monesti on haasteellista löytää muita kuin tasalujia vaihtoehtoja eri teräslaatujen hitsaukseen.

Työn toimeksiantajana toimi TkL Timo Kauppi Arctic Steel and Mining TKI-ryhmästä.

1.1 Työn tavoite ja rajaus

Tässä opinnäytetyössä tehdään EN 1.4404 austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle hitsauskokeita kahdella eri lisäaineella ja määritetään hitsiliitosten mekaaniset ominaisuudet vetokokeella. Tähän liittyen opinnäytetyön tavoitteena on:

1. tutkia markkinoilta löytyviä hitsauslisäainetoimittajia sekä soveltuvia hitsauslisäaineita
2. valita testattavaksi parhaiten soveltuvat lisäaineet
3. tehdä vetokokeet EN 1.4404 teräksen eri hitsauslisäaineilla hitsatuille koekappaleille

4. tutkia saatua dataa koehitsien testauksesta ja määrittellä parhaiten soveltuvat hitsauslisäaineet.

Tämä opinnäytetyö on rajattu koskemaan vain MIG/MAG-hitsausta. Työn viitekehystenä toimii SFS-EN 14015:2005 standardi, jonka alaisissa hitsaustöissä ongelmia on ilmennyt.

2 NESTEIDEN VARASTOINTIIN KÄYTETTÄVÄT SÄILIÖT

Standardi SFS-EN 14015:2005 käsittelee sellaisten nesteiden varastointia, jotka varastoidaan ympäristön lämpötilaan, pystylieriön muotoiseen tasapohjaiseen säiliöön, joka on maanpäällinen ja hitsattu. Standardissa on tarkoin määritelty kaikki se, mitä tulee ottaa huomioon vastaavien säiliöiden suunnittelussa ja valmistuksessa.

Standardia sovelletaan varastointisäiliöille, joilla on seuraavia ominaisuuksia:

- Suunnittelupaine jää alle 500 mbar, ja suunnittelualipaine on vähintään 20 mbar.
- Nestepinnan korkeuden yläraja on enintään lieriönmuotoisen säiliön yläreunassa.
- Suunnittelulämpötila metallille tulee olla vähintään -40 °C ja korkeintaan 300 °C.
- Terässäiliön suunnittelulujuus on korkeintaan 260 N/mm².

Standardissa käsitellään dokumentoitavat tiedot ja vaatimukset, tekniset vaatimukset, materiaalit, suunnittelukuormat, säiliön pohjat kuoren suunnittelu, kiinteän katon suunnittelu, paineentasausvaatimukset, kelluvan katon suunnittelu, säiliön ankkurointi, aukot, eristys, säiliön rakenneosien konepajavalmistus, pysytys asennuspaikalla ja toleranssit, hitsausmenetelmien ja hitsaajien hyväksyntä, hitsaus, testaus ja tarkastus sekä dokumentaatio ja säiliökilpi.

Kohta 6.2 määrittelee säiliöiden valmistuksessa käytettävät ruostumattomat teräkset. Kaikkien tämän standardin mukaisen säiliöiden valmistamisessa käytettävien ruostumattomien terästen on täytettävä standardien SFS-EN 10088-1 ja -2 minimivaatimukset. Ferriittisiä ruostumattomia teräksiä saa käyttää korkeintaan 10 mm paksuisina, martensiittisiä ruostumattomia teräksiä ei saa käyttää ollenkaan. Hitsausaineiden tulee täyttää kohdan 6.2.6 mukaan standardin SFS-EN 3581:2012 mukaiset vaatimukset. Hitsausaineiden mukana tulee toimittaa asi-

aankuuluva aineodistus, näitä on lisäksi käytettävä kohdan 17 mukaisissa menetelmäkokeissa. Menetelmäkokeessa on pystyttävä todentamaan, että hitsausliitoksessa myötö- ja murtolujuusarvot ylittävät perusmateriaalin arvot. (Kauppi 2016; SFS-EN 14015:2005, 1-37.)

Kaikki hitsaustyöt, jotka liittyvät tämän standardin alaisiin säiliöihin, tulee tehdä hyväksytyjä hitsausmenetelmiä käyttäen, pätevöityjien hitsaajien toimesta. Hitsaajan tulee merkitä valmiit hitsit päivittäin omalla tunnistenumeroillaan, nämä tiedot tulee tallentaa päähitsauspiirustukseen. Tarvittaessa on pystyttävä toimittamaan kaikki hitsausohjeet ja hitsausmenetelmän hyväksymispöytäkirjat hyväksyttäväksi. Valmistajan ja asentajan on laadittava alustava hitsausohje (pWPS) ennen menetelmäkokeen suorittamista. Tämän ohjeen on täytettävä standardin SFS-EN 15607:2004 vaatimukset. Standardissa SFS-EN 15614–1:2004 kohdassa 6 on määritelty menetelmäkokeen koekappaleille tarkat mitat. (Kauppi 2016; SFS-EN 14015:2005, 88–109.)

Kohta 17.2.3.2 määrittelee rikkovan aineenkoetuksen testit. Se tulee tehdä standardin SFS-EN 15614–1:2004 kohdan 7.4 mukaisesti seuraavissa olosuhteissa:

- a) Liitoksen vetokokeessa koekappaleen on murruttava perusaineen kohdalta.
- b) Ruostumattomilla teräksillä ei vaadita iskukoetta.
- c) Hiili- ja mangaaniterästen iskukoe on tehtävä kohdassa 6.1.6 määritellyssä lämpötilassa.

Kohta a) määrittelee lisäehdon menetelmäkokeen hyväksymiskäytäntöön, jossa murtumiskohtaan ei oteta kantaa. Sen kohdassa 7.4.2 määritellään seuraavasti: ”vetosauvan murtolujuuden tulee normaalitapauksessa täyttää perusaineelle asetettu vähimmäisvaatimus, ellei toisin ole määritetty ennen koetta” (SFS-EN 15614-1:2012, 28).

3 AUSTENIITTINEN RUOSTUMATTOMAN TERÄS JA SEN HITSAUS

3.1 Mitä hitsaus on?

SFS 3052 standardi määrittelee hitsauksen seuraavasti: ”Valmistusmenetelmä, jolla osia liitetään tai päällystetään käyttämällä hyväksi lämpöä ja/tai puristusta siten, että osat muodostavat jatkuvan yhteyden. Hitsauksessa voidaan käyttää lisäainetta, jonka sulamispiste on suunnilleen sama kuin perusaineen.” (SFS 3052. 2.)

Kaarihitsaus on yleisin hitsausprosessiryhmä, jossa hitsausvirtalähteestä saatava sähköenergia muutetaan elektrodin ja työkappaleen välissä palavan valo-kaaren avulla lämmöksi, jota tarvitaan sulattamaan liitettävät pinnat ja hitsausli-säaine hitsisulaksi. Jähmetyttyään hitsisula muodostaa hitsaussauman, joka liit-tää kappaleet toisiinsa. (Kyröläinen & Lukkari 2002, 50.) Tässä opinnäytetyössä perehdytään MIG/MAG hitsaukseen, joka kuuluu kaarihitsausryhmään.

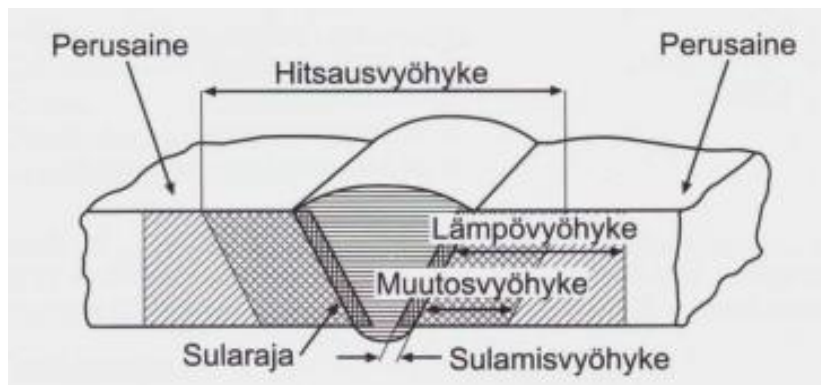
Kaarihitsaukselle on luonteenomaista metallin paikallinen ja nopea kuumenemi-nen, metallin sulaminen paikallisesti, hitsisulan muodostuminen ja jähmettyminen sekä hitsatun metallin nopea jäähtyminen. Kaarihitsauksen seurauksena on raju paikallinen lämpökäsittely, josta voi seurata rekristallisaatiota, rakeenkasvua, faasimuutoksia, suotautumista, erkautumista, koostumusmuutoksia ja hitsaus-jännityksiä. (Kyröläinen & Lukkari 2002, 50–51.)

Kaarihitsausliitoksen vyöhykkeet, kuvio 1a.

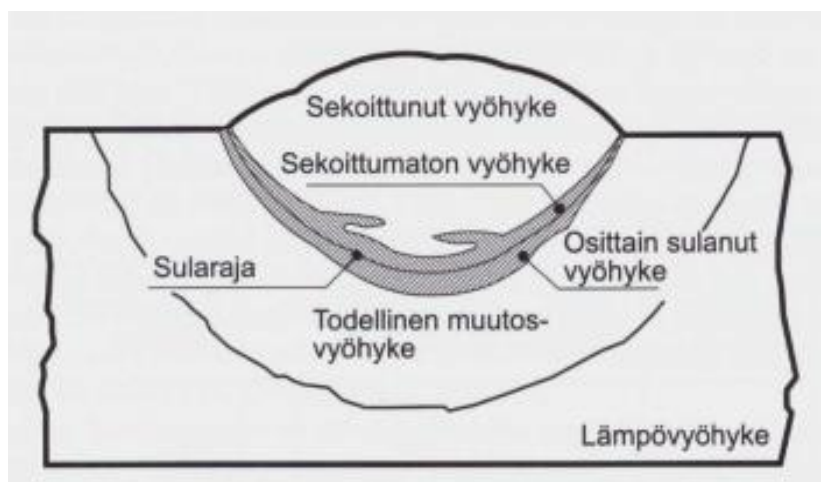
- hitsiaine, hitsaustapahtumassa sulassa tilassa ollut aine.
- sularaja, hitsiaineen ja sulamattoman aineen välinen raja.
- muutosvyöhyke, HAZ.
- hitsausvyöhyke, muutosvyöhykkeen ja hitsin muodostama alue.
- sulamisvyöhyke, perusaineen osa, joka on hitsauksen aikana sulanut.

- lämpövyöhyke, perusaineen osa, jonka lämpötila on hitsauksessa noussut perusaineen lämpötilaa korkeammaksi.

Näiden vyöhykkeiden lisäksi ruostumattomilla teräksillä voi tulla tärkeäksi osittain sulanut vyöhyke PMZ (kuvio 1b), joka on halkeilun ja korroosion kannalta tärkeä (Kyröläinen & Lukkari 2002, 51.)



Kuvio 1a. Hitsausliitoksen vyöhykkeet (Kyröläinen & Lukkari 2002, 51 on viitannut standardiin SFS 3052 1996)

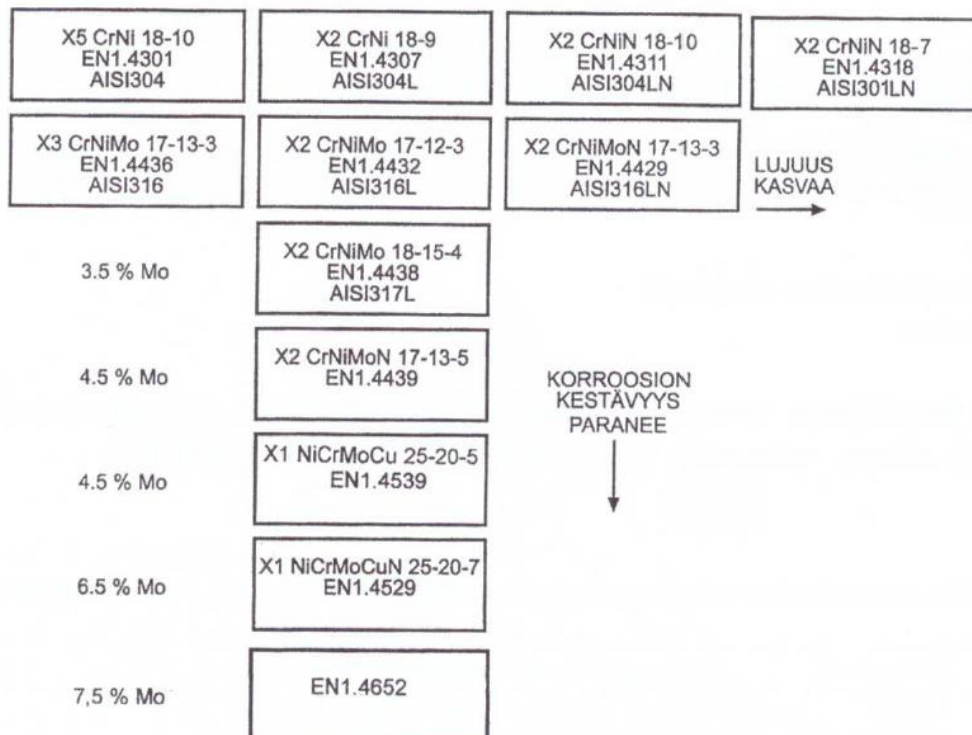


Kuvio 1b. Hitsausliitoksen vyöhykkeet (Kyröläinen & Lukkari 2002, 51 on viitannut Szekeresiin 1968)

3.2 Mitä austeniittinen ruostumaton teräs on?

Teräs on määritelty rautapohjaiseksi (Fe) metalliseokseksi, jonka hiilipitoisuus (C) on alle 1 %. Ruostumattoman ominaisuuden teräkselle antaa kromi (Cr).

Kromi muodostaa teräksen pintaan erittäin ohuen, korkeintaan muutamia kymmeniä nanometrejä (0,000001 mm) paksun oksidikalvon, joka suojaa terästä ulkoisilta korroosion aiheuttajilta. Tällöin ruostumaton teräs on passiivtilassa. Ympäristössä oleva happi mahdollistaa passiivikalvon syntymisen teräksessä kromipitoisuuden ollessa vähintään 11 – 12 %. Ruostumattomiin teräksiin lisätään kromin lisäksi nikkeliä (Ni), kun pyritään austeniittiseen mikrorakenteeseen. Ferriittisissä ruostumattomissa teräksissä ei yleensä ole nikkeliä lainkaan. Kromin lisäksi korroosionkestävyyttä parannetaan molybdeenillä (Mo). Kuviossa 2 on esitetty austeniittisten terästen kehittelypuu, josta nähdään eri metalliseostuksien vaikutus teräksen ominaisuuksiin. Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat runsaimmin seostettuja, koska niiltä vaaditaan vaikeissakin olosuhteissa hyvää korroosionkestävyyttä. Seostus voi runsaimmillaan olla esim. 20 % Cr, 25 % Ni ja 6,5 % Mo. seosainekustannukset tällaisissa teräksissä ovat huomattavat verrattuna jopa titaaniin (Kyröläinen & Lukkari 2002, 10–11.) Tässä opinnäytetyössä tehtyjen vetokoetestien materiaalin standardin mukainen kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 3.



Kuvio 2. Austeniittisten terästen kehittelypuu (Kyröläinen & Lukkari 2002, 16)

3.3 Yleistä ruostumattomista teräksistä

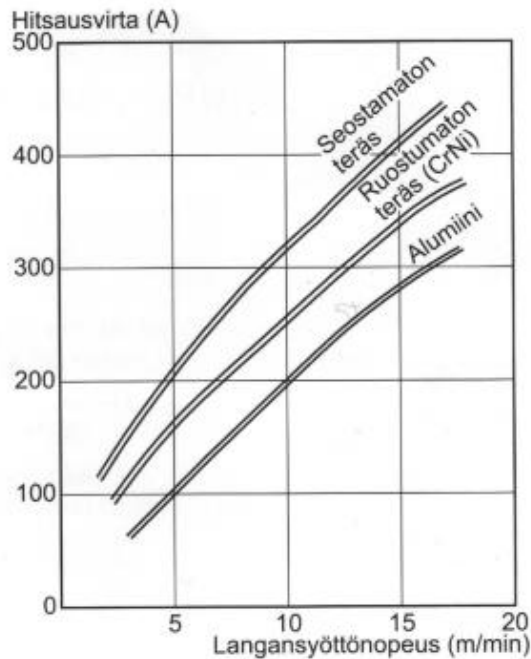
Erinomaisen muovattavuutensa johdosta austeniittiset vakioteräkset soveltuvat mainiosti mitä erilaisimpien tuotteiden valmistukseen. Hyvä ulkonäkö, muuttumaton pinta lievissä korroosiota aiheuttavissa olosuhteissa, hygieenisuus ja sitkeys ovat austeniittisen teräksen käyttöetuja. Lievästi korroosiota aiheuttavissa olosuhteissa voidaan käyttää tavallista ruostumatonta 18/10-terästä. Enemmän korroosionkestävyyttä tarvittavissa kohteissa käytetään haponkestäviä 2-3 % molybdeenillä seostettuja vakioteräksiä. Olosuhteiden mennessä erittäin korroosiota aiheuttaviksi esimerkiksi prosessi- ja selluteollisuudessa tai merivesiteknologiassa, tarvitaan runsaasti seostettuja austeniittisiä teräksiä (Kyröläinen & Lukkari 2002, 16.)

Ruostumattomia teräksiä on saatavana useissa eri toimitustiloissa käyttökohteen mukaan (Taulukko 1). Tyypillisiä käyttökohteita ovat aterimet, kattilat, olutastioihin, kulhoihin sekä paperi- elintarvike ja kemianteollisuuden laitteistoihin. Ruostumatonta terästä käytetään myös erilaisten säiliöiden, putkien ja paperikoneiden valmistuksessa (Outokumpu Oyj 2016.)

Taulukko 1. Joitakin ruostumattomien terästen toimitustiloja (SFS-EN 10088-2, 38).

Toimitustila	Pinnanlaatu	EN-stand. merkintä	ASTM-stand. merkintä
Kuumavalssattu, hehkutettu ja peitattu	Hilseetön	1D	1
Kylmävalssattu, hehkutettu ja peitattu	Sileä	2D	2D
Kylmävalssattu, hehkutettu, peitattu ja viimeistelyvalssattu	Sileämpi kuin 2D	2B	2B
Kylmävalssattu, hehkutettu, peitattu ja muokkauslujitettu	Kirkas	2H	TR
Kylmävalssattu, hehkutettu, peitattu ja hiottu	Vaihtelee tilaajan tarpeiden mukaan	2K	4
Kylmävalssattu, hehkutettu, peitattu ja harjattu	Sileämpi kuin hiottu	2J	6
Kylmävalssattu, kiiltohehkutettu	Sileä, kirkas ja heijastava	2R	BA

Monilta fysikaalisilta ominaisuuksiltaan austeniittinen ruostumaton teräs eroaa seostamattomasta tai niukkaseosteisesta rakenneteräksestä sekä myös muista ruostumattomista teräksistä muun muassa lämmönjohtavuuden, magneettisuuden, lämpölaajenemisen, sulamislämpötila-alueen ja sähkönjohtavuuden suhteen. Nämä erot ovat erittäin tärkeitä ottaa huomioon rakenteen suunnittelussa ja hitsauksessa. Austeniittisen teräksen epämagneettisuus ei kuitenkaan vaikuta hitsaukseen kovinkaan suuresti. Austeniittisen teräksen hitsauslisäaineessa on yleensä hieman ferriittiä, minkä vuoksi se on hieman magneettinen. Austeniittinen teräs johtaa lämpöä huomattavasti rakenneterästä huonommin, minkä takia lämpötilaerot ovat jyrkempiä. Lämpö säilyy hieman pitempään hitsisauman ympärillä, mikä puolestaan hidastaa hitsisauman jäähtymistä ja voi kasvattaa herkistymisvaaraa. Lämmönjohtumisen hitaus myös puolestaan kasvattaa lämpölaajenemiskertoimen kanssa perusmateriaalin vetelyä. Austeniittisessä teräksessä lämpölaajenemiskerroin on noin 50 % suurempi suhteessa hiiliteräkseen, mikä aiheuttaa hitsattaessa voimakasta jännitystä ja vetelyä teräkseen. Austeniittisen teräksen sähköinen ominaisvastus on noin viisi kertaa suurempi kuin rakenneteräksellä, mikä on tärkeä ominaisuus hitsauksen kannalta. Samalla hitsausvirralla saadaan lämpöä enemmän kuin rakenneteräksellä. Suurempi ominaisvastus matalamman lämpötilakertoimen kanssa aiheuttaa sen, että hitsauslisäaine sulaa nopeammin ja hitsiaineentuotto on suurempi käytettäessä samaa virtaa kuin rakenneteräksen hitsauksessa (Kuvio 3) (Kyröläinen & Lukkari 2002, 150.)

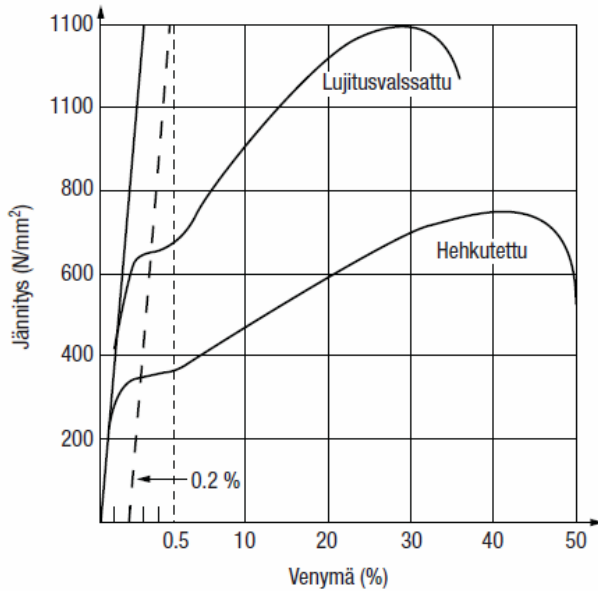


Kuvio 3. Hitsauslangan syöttönopeudet seostamattoman teräksen, austeniittisen ruostumattoman teräksen ja alumiinin MIG/MAG-hitsauksessa 1,2 mm langalla (Kyröläinen & Lukkari 2002, 154).

3.4 Austeniittisen ruostumattoman teräksen mekaaniset ominaisuudet

Yksifaasisilla (austeniittisilla ja ferriittisillä), austeniittis-ferriittisillä ja martensiittisillä ruostumattomilla teräksillä ei ole korostunutta myötörajaa. Tämän vuoksi niiden vetokäyrillä ei ole selvää myötörajaa (R_{eL} , R_{eH}) kuten hiiliteräksillä. Tästä johtuen niiden myötölujuudet mitataankin 0,2 % pysyvää myötymää vastaavana rajana ($R_{p0.2}$) (Kuvio 4), yksifaasisilla teräksillä nämä arvot ovat liuotushehketetussa tilassa suhteellisen matalia. Ruostumattoman teräksen eri lajit lujittuvat kylmämuokkauksessa voimakkuudeltaan eri tavoilla, mikä näkyy niille standardisoitujen minimiarvojen murto- ja myötörajojen erotuksissa ($\Delta R = R_m - R_{p0.2}$). Tyypillisesti austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä ΔR -arvo on luokkaa 280–300 N/mm² (280–300 MPa). Kylmämuokattaessa austeniittista ruostumattomaa terästä osa muokkauslujittumisesta tulee austeniitin lujittumisen mukana ja osa siitä, että kylmämuokkauksessa austeniitti muuttuu martensiitiksi. Lämpötilan laskiessa austeniitin taipumus muuttua martensiitiksi kasvaa koostumuksen muuttuessa siten, että austeniitti on epästabiilimpaa. Muokkauslujittumisen saa

selvimmin esille kun mitataan vetokoesuureet R_m ja $R_{p0.2}$ kylmävalssatulle nauhalle (Kuvio 4) (Lukkari, Kyröläinen & Kauppi 2016, 180.)



Kuvio 4. Vetokäyrät epästabiilille austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle pehmeäksi hehkutettuna ja lujitettuna. Periaatekuva (Lukkari ym. 2016, 181).

3.4.1 Muovattavuus ja koneistettavuus

Ruostumattomilla teräksillä on hyvä muovattavuus särmäyksessä ja syvävedossa. Austeniittiset teräkset ovat pehmeitä ja niillä on vielä ominaisuus lujittua voimakkaasti muokkauksessa ja niiden venytysmuovattavuus on todella hyvä. Lastuava työstö erityisesti austeniittisillä teräksillä on rajoittunutta, yleisessä vertailussa ne sijoittuvat terästen kanssa keskitasolle (Taulukko 2). Mitä suurempi on koneistettavuus-arvo, sitä vaikeampaa kyseistä terästä on koneistaa. Arviointi perustuu pinnan laatuun, työkalun kestoon ja koneistusnopeuteen (Lukkari ym. 2016, 182–183.)

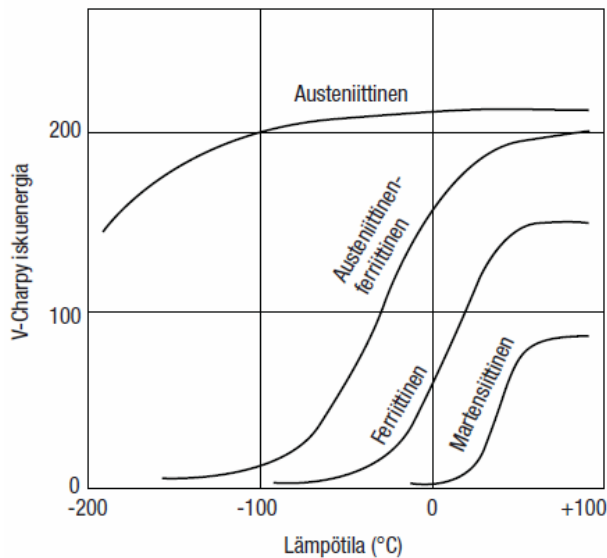
Taulukko 2. Eri metalliseosten koneistettavuus esimerkkejä (Lukkari ym. 2016, 183).

Materiaali EN/AISI	Brinell	
	kovuus	Koneistettavuus
1.4512/12Cr-teräs	165	0.70
B-1112	160	1.00
1.4310/301	183	0.55
1.4301/304	160	0.40
310	160	0.30
1.4436,1.4401/316	195	0.35
317	195	0.35
410	160	0.55
430F	147	0.65
440C	240	0.35
440	160	0.50
Hastelloy B (valu)	200	0.12
Hastelloy X	197	0.09
Inconel 700	290	0.09
Inconel 901	200	0.20
Titaani A-55	160	0.30
Titaani C-140	285	0.15
Alumiini A-214		2.00
Alumiini 218-T		2.40
Alumiini 333-T		1.30
Alumiinipronssi (8-9.5 % Al)		0.60
Alumiinipiipronssi		1.80
Fosforipronssi (5-10 % Sn)		0.60
Punakupari (35 % Cu, Se/Te)		2.70
Koneistettava fosforipronssi		2.70

3.4.2 Iskutilkeys ja väsymislujuus

Erilaisilla ruostumattoman teräksen tyypeillä on mikrorakenteeltaan oleellinen ero iskutilkeyden lämpötilariippuvuudessa (Kuvio 5). Ferriittisillä, martensiittisilla ja austeniittis-ferriittisillä teräksillä esiintyy iskutilkeydessä transitiolämpötila sitkeästä hauraaksi, kuten rakenneteräksilläkin. Tämä lämpötila joka voi olla huoneen lämpötilassakin, riippuu mikrorakennetilasta teräksessä (martensiitti, raekoko ym.). Austeniittisilla teräksillä säilyy sitkeys hyvin matalissakin lämpötiloissa ja niillä ei esiinny liuotushehketettuna varsinaista transitiolämpötilaa. Wöhler-käy-

rän mukaisessa kokeessa ruostumattomilla teräksillä on väsymisraja joka ilmaistaan rajajännityksenä, joka 10^6 kuormanvaihtoluvun kohdalla ei johda enää väsymismurtumaan. Väsymisen hallinnassa on tärkeää tuntea materiaalissa olevat alkusäröt, joita ovat erilaiset sulkeumat, vieraat faasit, erkaumat sekä varsinaiset murtumat. Hitsausliitoksilla ei ole varsinaista väsymisrajaa, vaan särö lähtee eteenpäin pienestäkin jännityksestä (Lukkari ym. 2016, 181–182.)



Kuvio 5. Erityyppisten ruostumattomien terästen iskuenergiakäyriä (Lukkari ym. 2016, 182 Handbook of Stainless Steels Outokumpu Oy, 2014 mukaan).

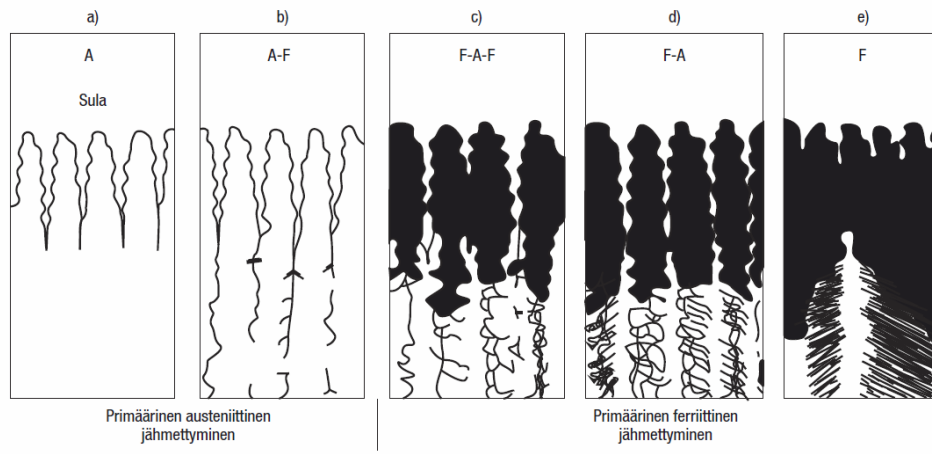
3.5 Hitsattavuus

Austeniittisten terästen hitsaus on melko helppoa ja hitsattavuus erittäin hyvä. Nykyaikaisissa teräksissä ja hitsauslisäaineissa perinteiset ongelmat, kuten kuumahalkeilu ja raerajakorroosio, ovat nykypäivänä harvinaisia, johtuen matalien hiili- ja epäpuhtauspitoisuuksien ja koostumuksen optimoinnin ansiosta. Herkistyminen ja raerajakorroosio eivät ole nykyään juurikaan ongelma, johtuen matalasta hiilipitoisuudesta (alle 0,05 %). Suuri lämpölaajenemiskerroin austeniittisissä teräksissä aiheuttaa huomattavasti suuremmat hitsauksesta aiheutuvat muodonmuutokset kuin seostamattomilla teräksillä. Muodonmuutokset voidaan ottaa huomioon monella eritavalla, muun muassa tiheämmällä silloituksella, oi-

kealla hitsausjärjestyksellä, X-railon käytöllä, levyjen kiinnityksellä hitsausalustaan ja levyjen esitaivutuksella. Pieni lämmönjohtavuus aiheuttaa sen, että lämpö johtuu hitsauskohdasta hitaammin ja jää hitsin läheisyyteen pitemmäksi aikaa. Tämä aiheuttaa sen, että lämpötilaerot ovat suurempia. Kaikki kaarihitsausmenetelmät soveltuvat hyvin myös austeniittisille ruostumattomalle teräksille, näistä täytelankahitsaus on kovassa kasvussa. Hitsausrailot ovat samanmuotoisia kuin seostamattomilla teräksillä, mutta railokulma ja ilmarako voivat joskus olla erilaisia (Kyröläinen & Lukkari 2002, 158–159).

Ruostumattomien terästen kaarihitsaus SFS-EN 1011-3 -standardi jakaa austeniittiset teräkset kolmeen ryhmään seostuksensa ja hitsattavuutensa suhteen seuraavasti:

1. Vakioteräkset: 1.4301, 1.4401, 1.4436, 1.4306, **1.4404**, 1.4432 ja stabiloidut lajit 1.4541 sekä 1.4571 sijoittuvat AF-alueelle (kuvio 6), jossa $FN = n. 2.10 \%$.
2. Täysin austeniittiset teräkset: 1.4335 sekä runsaasti Mo seostetut 1.4539, 1.4547 sijoittuvat A-alueelle.
3. Erikoisteräkset:
 - a) Tyypiseosteiset: 1.4344, 1.4406 ja 1.4429 sijoittuvat A- tai AF-alueelle.
 - b) Tulenkestävät: usein sijoittuvat A-alueelle ks.15 b Tulenkestävät teräkset.
 - c) Hyvin koneistettavat rikkiseosteiset: 1.4305 sijoittuu AF-alueelle (Lukkari, Kyröläinen ja Kauppi 2016, 191.)



Kuvio 6. Austeniittisen ruostumattoman teräksen viisi eri jäähdytysjärjestystä: a) Täysin austeniittinen, b) austeniittis-ferriittinen, c) ferriittis-austeniittis-ferriittinen, d) ferriittis-austeniittinen ja e) täysin ferriittinen jäähdytys. (Lukkari ym. 2016, 197, lainannut Suutalaa 1982).

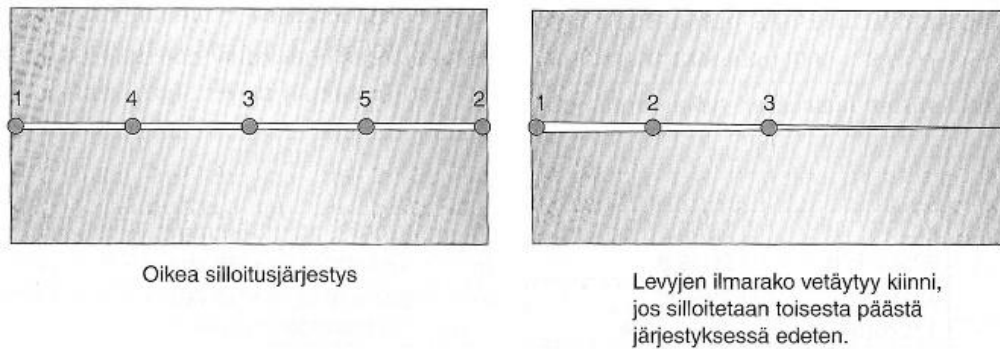
Austeniittisen ruostumattoman teräksen hitsattavuuden yleispiirteitä:

- haurausilmiöt kuten kuumahauraus (täysausteniittisilla), sigmahauraus (korkean Cr+Mo omaavilla) ja 475 °C-hauraus (runsasseosteisilla)
- vetely on voimakasta johtuen pienestä lämmönjohtavuudesta ja suuresta lämpölaajenemiskertoimesta
- herkistyminen rearajakorroosiolle jos C > n. 0,05 % ja lämmöntuonti runsasta
- yksifaasinen teräs, omaa yleensä hyvän hitsattavuuden kaikilla kaarivastus- ja sädehitsausmenetelmillä
- lisäaine on yleensä hieman perusainetta seostetumpi
- runsasseosteisissa austeniittisissa teräksissä esiintyy jäähdytysmurtumista
- korroosionkestävyyden kannalta hitsausliitosten jälkikäsittely tärkeää (Lukkari, Kyröläinen & Kauppi 2016, 192, lainannut Kyröläinen et al. 2002.)

3.6 Hitsauksessa huomioitavaa

Ruostumattomien terästen käsittely tulee tehdä huolellisesti äärimmäistä siisteyttä noudattaen, koska materiaalit eivät saa naarmuuntua tai likaantua. Ruostumattomat teräkset eivät saa joutua alttiiksi muiden materiaalien hiontapölyille ja hionnassa tulee käyttää sellaisia hiontalaikkoja joilla ei ole hiottu muita materiaaleja. Myös puhdistuksessa käytettävien teräsharjojen tulee olla ruostumattomasta teräksestä valmistettuja. Mikäli hitsaukset tehdään hitsauspöydällä, tulee pöydän kannen olla myös valmistettu ruostumattomasta teräksestä. Levyjen leikkauksessa on huomioitavaa, että ruostumattomat teräkset ovat erittäin sitkeitä ja vaativat noin kaksinkertaisen leikkaustehon verrattuna rakenneteräksiin. Hitsattaessa kappaletta pöydällä niin että maadoitus kulkee pöydän kautta, on pöydän pinnan oltava täysin puhdas ja tasainen. Mikäli pöydän väliin jää epäpuhtauksia voivat ne aiheuttaa kipinöintiä kappaleen ja pöydän rajapinnassa. Tällainen kipinöinti aiheuttaa kappaleen alapintaan arpia jotka altistuvat paikalliselle korroosiolle. Mikäli valokaaren sytytyksestä aiheutuu sytytysjälkiä tai arpia railon ulkopuolelle, on ne poistettava hiomalla huolellisesti. (Lepola & Makkonen 1999, 246–247.)

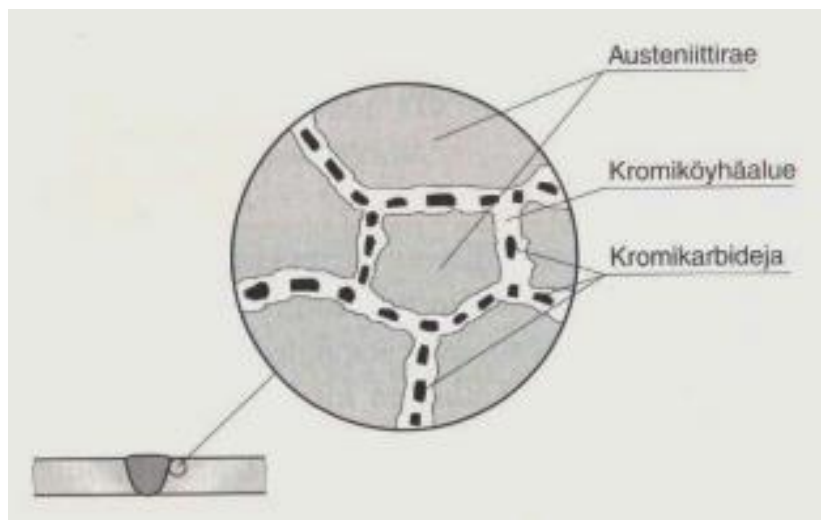
Hitsauspalkojen on oltava suhteellisen ohuita ruostumattomien terästen hitsauksessa, laajoja levitysliikkeitä tulisi välttää ja pyrkiä hitsaamaan mieluummin rinnakkaisia palkoja. Tällä tavoin vältetään liiallisen lämmöntonin aiheuttama raerajakorroosio, myös hitsausjännitykset jäävät näin pienemmiksi. Silloitusten hitsauksessa on huomioitava ruostumattoman teräksen suuri lämpölaajenemiskerroin, noin 1,5-kertainen rakenneteräksiin verrattuna. Ilmarakoa asetettaessa tulee ennakoida siltahitsien jäähtyessä voimakas kutistuminen ja suunnitella oikea silloitusjärjestys (Kuvio 7). Hitsausaumaa lopetettaessa ruostumattomaan teräkseen syntyy helposti hitsipalon päähän lopetuskraateri, tällaisessa tapauksessa se tulee hioa pois (Lepola & Makkonen 1999, 247–248.)



Kuvio 7. Silloitusjärjestyksen suunnittelu (Lepola & Makkonen 1999, 248).

3.6.1 Raerajakorroosio

Raerajakorroosioksi (Kuvio 8) nimitetään ilmiötä jossa austeniittista terästä hehketetaan riittävän kauan 500–900 °C:n lämpötilassa, tällöin muodostuu kromista ja hiilestä kromikarbideja, jotka sitten erkaantuvat austeniittikiteiden rajoille. Raerajalle muodostuu kromin sitoutuessa karbideihin vyöhyke, jossa syöpymiskestävyyden kannalta kromipitoisuus voi laskea liian alhaiseksi. Tällaisen alueen joutuessa alttiiksi hapon vaikutuksille se syöpyy erittäin nopeasti. Teräksen hiilipitoisuuden kasvaessa, raerajakorroosiolle altis vyöhyke muodostuu helpommin (Lepola & Makkonen 1999, 245.)



Kuvio 8. Niillä alueilla joilla kromi on erkaantunut kromikarbideiksi, alkaa raerajakorroosio (Lepola & Makkonen 1999, 245).

3.6.2 Ferriittipitoisuus austeniittisessa ruostumattomassa teräksessä

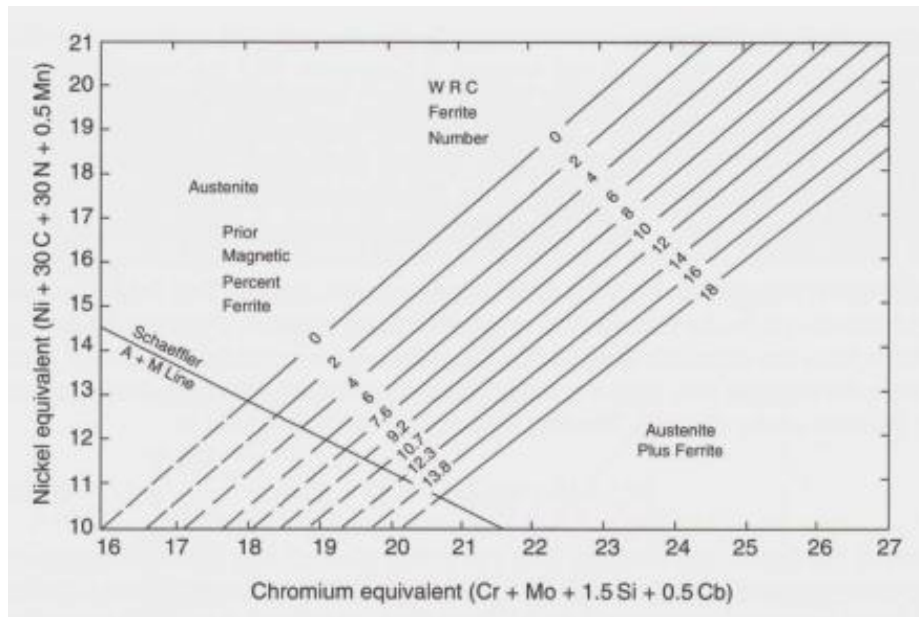
Ferriitti joka syntyy austeniittisen ruostumattoman teräksen hitsiaineeseen vaikuttaa useilla tavoilla hitsin ominaisuuksiin, mm.

- vähentää kuumahalkeilua
- magnetisoi hitsiainetta
- mahdollisesti haurastuttaa hehkutuksessa hitsiä
- nostaa lujuutta hitsiaineessa
- pienentää lämpölaajenemiskerrointa ja suurentaa lämmönjohtavuutta hitsissä
- huonontaa sitkeyttä erittäin matalissa lämpötiloissa
- saattaa syöpyä valikoivasti
- korkeissa lämpötiloissa saattaa haurastuttaa hitsiä

Tärkein vaikutus ferriitillä austeniittisessa hitsiaineessa on sen vaikutus estää kuumahalkeilua. Ferriittipitoisuuteen vaikuttaa jähmettyvän hitsisulan koostumus, joka määräytyy hitsauksessa syntyvästä perusaineen ja hitsauslisäaineen koostumuksesta ja niiden sekoittumissuhteesta, sekä mahdollisen suojakaasun perusteella. Suurimmassa osassa austeniittisiä hitsauslisäaineita on pieniä määriä ferriittiä. Useimmat austeniittiset standarditeräokset ovat koostumukseltaan sellaisia, että niihin syntyy kaarihitsauksessa ilman lisäaineitakin muutama prosentti ferriittiä (Kyröläinen & Lukkari 2002, 78.)

Ferriittipitoisuus voidaan määrittää erilaisten diagrammien avulla, tällöin pitää olla tiedossa hitsiaineen tai lisäaineen ja perusaineen koostumukset. Mikrorakenteen ennustaminen perustuu hitsiaineen koostumukseen. Vain seosaineiden vaikutus on näissä diagrammeissa otettu huomioon, esim. jäähdytysnopeutta ei ole otettu huomioon. Tähän soveltuvia diagrammeja ovat: Scaeffler-diagrammi (1949), De-Long-diagrammi (1973, Kuvio 9), Espy-diagrammi (1982), WRC-diagrammi (1988) ja WRC-diagrammi (1992). Edellä mainitut diagrammit eroavat toisistaan ekvivalenttien laskentakaavojen ja kuvioden rajojen suhteen. Ferriittidiagram-

meja käytetään monipuolisina työkaluina kun arvioidaan mm. tulevan hitsin ferriittipitoisuutta, sigmahaurastumista, kuumahalkeilualttiutta, rakeenkasvuhaaurusriskiä ja kylmähalkeamariskiä. Diagrammilla ja magneettisella mittauksella ei aina saada aikaan samaa ferriittipitoisuutta (Kyröläinen & Lukkari 2002, 78–79.)



Kuvio 9. De-Long diagrammi (Lippold & Kotecki 2005, 34 on viitannut DeLongiin 1973).

4 KOEMATERIAALIT JA -MENETELMÄT

4.1 Koemateriaalit

Hitsauskokeissa käytettiin Outokummun toimittamaa 4 mm paksua EN 1.4404 austeniittista ruostumatonta terästä, jonka toimitustila oli 2B. Standardin SFS-EN 10088-2:2014 ja aineodistuksen (liite 2) mukaiset kemialliset koostumukset on annettu taulukossa 3 ja mekaaniset ominaisuudet taulukossa 4.

Taulukko 3. EN 1.4404 austeniittisen ruostumattoman teräksen standardin mukainen ja koeteräksen aineodistuksen mukainen kemiallinen koostumus.

	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%N
EN 10088-2	≤0.030	≤1.00	≤2.00	16.5 - 18.5	10.0 - 13.0	2.00 - 2.50	-	-
koeteräs	0.022	0.48	1.79	17.00	10.00	2.04	0.35	0.045

Taulukko 4. EN 1.4404 austeniittisen ruostumattoman teräksen standardin mukainen ja koeteräksen aineodistuksen mukaiset mekaaniset ominaisuudet.

	R _{p0.2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
EN 10088-2	240	530 - 680	>40
koeteräs	333	621	51

Lisäaineina käytettiin kahta EN 1.4404 teräksen hitsaukseen suositeltavaa MIG-lankaa. Ne olivat tyypiltään täyte- ja umpilanka. Tästä eteenpäin lisäaineista käytetään merkintöjä A (täytelanka, paksuus 1,2 mm) ja B (umpilanka, paksuus 1,0 mm). Lisäaineiden ilmoitetut kemialliset koostumukset on annettu taulukossa 5 ja mekaaniset ominaisuudet taulukossa 6. Täytelanka oli standardin SFS-EN ISO 17633 mukaista T19 12 3 L -tyyppistä ja umpilanka standardin SFS-EN ISO 14343 mukaista G 19 12 3 L Si -tyyppistä lisäainetta.

Taulukko 5. Lisäaineiden kemialliset koostumukset.

Lisäaine	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%N
A	0.010	0.80	1.70	18.30	12.20	2.50	0.11	0.06
B	0.030	0.62	1.39	17.78	12.58	2.95	0.07	0.05

Taulukko 6. Lisäaineiden standardin mukaiset mekaaniset ominaisuudet.

Standardi	lisäaineen tunnus	Rp0.2 [MPa]	Rm [MPa]	A %
ISO 17633	A	320	510	25
ISO 14343	B	320	510	25

4.2 Hitsauskokeet

Hitsauskokeita varten Outokummun tutkimuskeskuksen metalliteknologian laboratoriossa leikattiin 150 mm x 300 mm kokoisia levyjä, jotka liitettiin pitkältä sivulta yhteen päittäishitsillä.

Koehitsaukset tehtiin Torniolaisessa konepajassa hyväksytyt hitsausohjeen (WPS) mukaisesti. Kuvassa 1 nähdään koehitsattu levy.



Kuva 1. Koehitsattu levy.

Koehitsatut levyt (8 kpl) toimitettiin Outokummulle, jossa niistä leikattiin tarvittava määrä vetokoesauva-aihoita.

4.3 Vetokoesauvojen merkintä

Standardi SFS-EN 4136:2012 määrittelee koekappaleiden merkinnän seuraavasti: ”Jokainen koekappale merkitään siten, että irrottamisen jälkeen on mahdollista tunnistaa sen tarkka sijainti hitsatussa tuotteessa tai liitosmuodosta, josta se on otettu. Työstösuunta (esim. valssaus tai puristussuunta) merkitään, jos asi-

aankuuluvassa sovellutusstandardissa on niin vaadittu. Kukin koesauva merkitään siten, että irrottamisen jälkeen on mahdollista tunnistaa sen tarkka sijainti koekappaleessa. Kukin koesauva merkitään, kun ne on irrotettu koekappaleesta.” (SFS-EN 4136. 10)

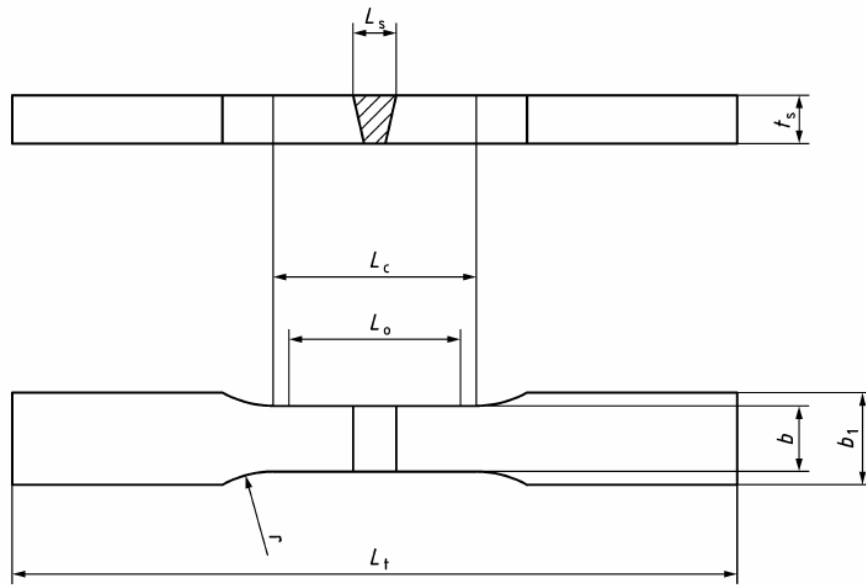
Vetokoesauvat merkittiin liitteen 1 mukaan siten, että yksittäinen vetokoesauva voitiin jäljittää siihen levyyn mistä se oli leikattu ja levyt taas voitiin jäljittää materiaalin aineodistukseen joka on esitetty liitteessä 2.

4.4 Vetokokeet

Vetokoesauvat valmistettiin standardin SFS-EN 4136:2012 (Hitsien rikkova aineenkoetus metalleille. Poikittainen vetokoe) - määrittelyjen mukaisesti. Taulukossa 7 ja kuviossa 10 on esitetty määrittelyjä vetokoesauvan mitoitusliittymään. Kuvassa 2 on esitetty valmiiksi koneistettuja vetokoesauvoja, joista hitsikupu on poistettu hiomalla.

Taulukko 7. Vetokoesauvan mitoitus (SFS-EN 4136. 12).

		Mitat, mm	
Käsite		Tunnus	Mitat
Koesauvan kokonaispituus		L_t	Määräytyy koelaitteen mukaan
Olakkeen leveys		b_1	$b + 12$
Kalibroidun koepituuden leveys	levyt	b	12, kun $t_s \leq 2$ 25, kun $t_s > 2$
	putket	b	6, kun $D \leq 50$ 12, kun $50 < D \leq 168,3$ 25, kun $D > 168,3$
Koepituus ^{a, b}		L_c	$\geq L_s + 60$
Olakkeen pyöryssäde		r	≥ 25
^a Puristus- ja sädehitsaukselle (standardin ISO 4063:2009 mukaiset prosessiryhmät 2, 4, 51 ja 52), $L_s = 0$. ^b Joillakin metalleilla (esim. alumiinilla, kuparilla ja niiden seoksilla) voi olla välttämätöntä käyttää arvoa $L_c \geq L_s + 100$.			



Kuvio 10. Levystä valmistettu vetokoesauva (SFS-EN 4136. 14).



Kuva 2. Valmiita vetokoesauvoja, joista on hitsikuvut hiottu pois

Vetokokeet tehtiin standardin SFS-EN 6982-1:2009 (Metallien vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa) mukaisesti Outokummun tutkimuskeskuksen Zwick-Roell allround 250kN vetokoneella.

4.5 Metallografia

Metallografiset tutkimukset tehtiin Lapin ammattikorkeakoulun ELMA-laboratoriossa. Lisäaineella A ja B hitsatuista koehitseistä tehtiin hitsiliitosta edustava valomikroskooppinäyte. Molemmista liitotyypeistä leikattiin noin 4 mm x 20 mm x 5 mm -kokoinen poikkileikkausta edustava näyte Struersin Discotom-65-tarkkuuslaikkaleikkurilla. Näytteet valettiin Struersin Poly-Fast-muoviseokseen käyttäen Stuers CitoPress-1-kuumavalukonetta ja hiottiin LaboPol-6-vesihiontapöydällä SiC-vesihiomapapereilla karkeuksilla 180, 320, 500 ja 1000 grit. Hionnan jälkeen näytteet pestiin ultraäänipesurilla etanolissa. Puhdistuksen jälkeen näytteet kiillotettiin 3 µm ja 1 µm timanttisuspensioilla. Kiillotuksen jälkeen näytteet syövytettiin Vilella's syövytteellä (2g pikriinihappoa, 100ml etanolia) 40 sekunnin ajan. Syövytetyt näytteet kuvattiin Leica DMI500M-valomikroskoopilla.

4.6 Kovuusmittaukset

Valomikroskooppinäytteistä mitattiin kovuudet Matsuzawan MMT-X-mikrokovuusmittarilla Vickers-menetelmällä (HV0.5) käyttäen 500 gf:n kuormitusta.

5 TULOKSET

5.1 Vetokokeet

Vetokokeiden välittömät tulokset sekä murtuneista sauvoista visuaalisella tarkastuksella määritetty murtumiskohta on annettu taulukossa 8. Täydelliset vetokoe tulokset on annettu erillisessä liitteessä (Liite 3). Lisäaineella A hitsatuista kahdestatoista vetokoesauvasta 8 kpl (67 %) ja lisäaineella B hitsatuista vetokoesauvoista 6 kpl (50 %) murtui hitsistä. Kuvassa 3 on esitetty poikkivedetyt vetokoesauvat, näytetunnukset merkittynä tussilla vetokoesauvojen päässä.

Taulukko 8. Vetokokeiden tulokset.

Näyte tunnus	Hitsausaineen tyyppi	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	R _{p0.2} /R _m %	Paksuus mm	Leveys mm	Murtumiskohta
1.1	Täytelanka	331	602	55	3.787	20.06	Perusaine
1.2	Täytelanka	337	609	55	3.787	20.03	Hitsi
1.3	Täytelanka	333	613	54	3.823	20.10	Perusaine
2.1	Täytelanka	342	612	56	3.712	20.08	Hitsi
2.2	Täytelanka	335	607	55	3.804	20.06	Hitsi
2.3	Täytelanka	336	607	55	3.781	20.06	Hitsi
3.1	Täytelanka	335	605	55	3.914	20.13	Perusaine
3.2	Täytelanka	334	605	55	3.867	20.16	Hitsi
3.3	Täytelanka	336	605	56	3.856	19.96	Perusaine
4.1	Täytelanka	340	607	56	3.881	20.06	Hitsi
4.2	Täytelanka	342	598	57	3.848	20.09	Hitsi
4.3	Täytelanka	345	613	56	3.773	20.11	Hitsi
5.1	Umpilanka	347	617	56	3.686	20.08	Perusaine
5.2	Umpilanka	345	611	57	3.712	20.14	Perusaine
5.3	Umpilanka	341	603	57	3.718	20.14	Perusaine
6.1	Umpilanka	341	614	56	3.783	20.15	Hitsi
6.2	Umpilanka	338	609	56	3.823	20.09	Hitsi
6.3	Umpilanka	342	613	56	3.771	20.13	Hitsi
7.1	Umpilanka	358	623	57	3.526	20.02	Perusaine
7.2	Umpilanka	340	595	57	3.814	20.05	Perusaine
7.3	Umpilanka	344	611	56	3.738	20.00	Perusaine
8.1	Umpilanka	347	591	59	3.506	20.12	Hitsi
8.2	Umpilanka	340	589	58	3.679	20.11	Hitsi

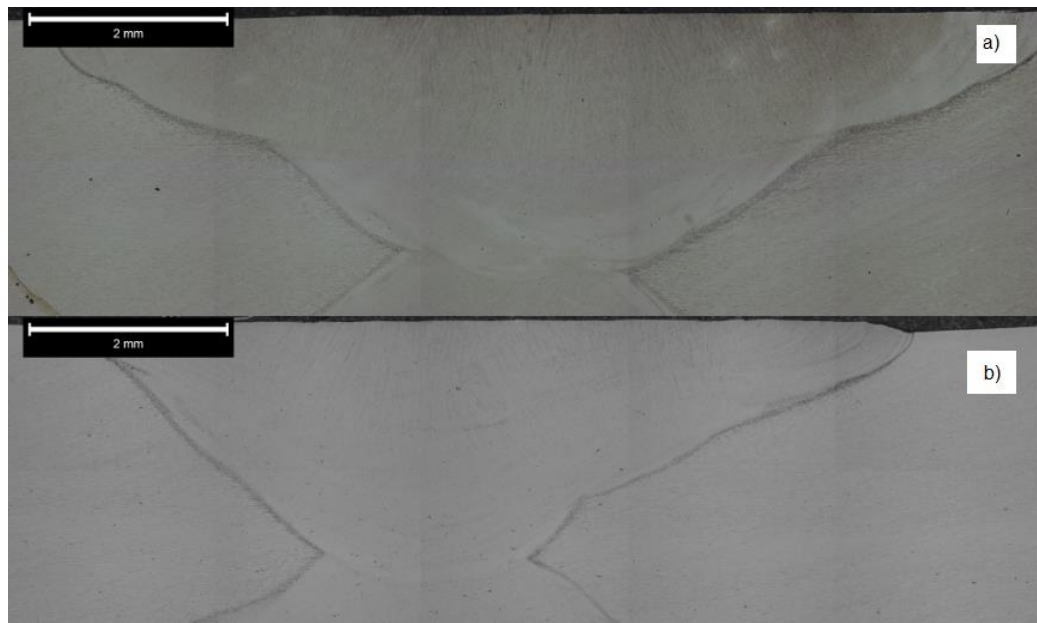
8.3	Umpilanka	357	588	61	3.365	20.07	Hitsi
-----	-----------	-----	-----	----	-------	-------	-------



Kuva 3. Poikkivedetyt vetokoesauvat.

5.2 Hitsin mikrorakenne

Kuvassa 4 on esitetty lisäaineilla A ja B tehtyjen päittäisliitosten poikkileikkauksen mikrorakennetta. Kuvien 4 a ja b perusteella hitsien mikrorakenteet ovat hyvin samankaltaisia.



Kuva 4. Hitsien mikrorakennetta, a) täytelankahitsi (lisäaine A) ja b) umpilankahitsi (lisäaine B).

5.3 Kovuusmittaukset

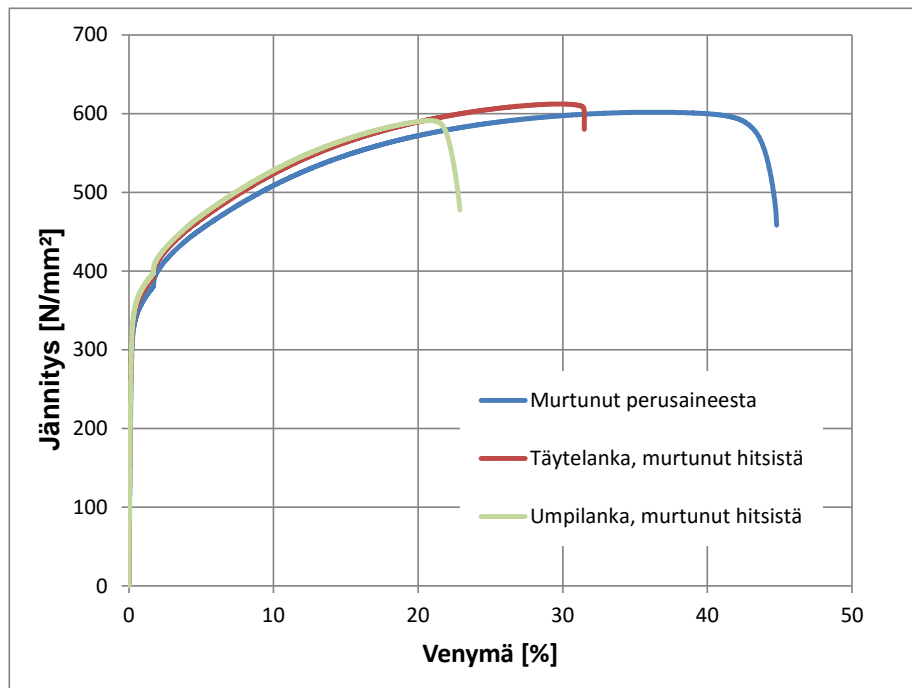
Mikrokovuusmittausten välittömät tulokset on annettu taulukossa 9. Niiden perusteella lisäaineiden välillä ei ole merkittäviä kovuuseroja mikä näkyy myös kovuuden keskiarvossa, joka oli umpilankahitsille 205HV0.5 ja täytelankahitsille 208HV0.5.

Taulukko 9. Mikrokovuusmittaustulokset

Mittapiste n:o	matka [mm]	lisäaine A HV0.5	lisäaine B HV0.5
1	0.05	204	214
2	1.05	217	198
3	2.05	198	198
4	3.05	193	210
5	4.05	200	210
6	5.05	224	202
7	6.05	204	200
8	7.05	209	213
9	8.05	209	205
10	9.05	219	198
k.a.:		208	205
haj.:		9.9	6.5

6 TULOSTEN TARKASTELO

Kuviossa 11 on esitettyä jännitys-venymäkäyrä johon on koottu perusaineesta, umpilanka- ja täytelankahitsistä murtuneiden vetokoesauvojen tulokset. Kuvasta käy ilmi, että perusaineesta murtuneella vetokoesauvalla on huomattavasti suurempi murtovenymä kuin hitsistä murtuneella. Kuvasta voidaan päätellä myös se, että hitsien myötääminen vaatii hieman suuremman jännityksen kuin perusaineen. Tämän perusteella voisi ajatella, että muodonmuutos tapahtuu helpommin perusaineessa mikä johtaa murtumaan nimenomaan siellä. Kuitenkin, kun perusaine on hitsiä paljon sitkeämpää, voi murtuminen tämä huomioiden tapahtua juuri hitsin kohdalta.



Kuvio 11. Perusaineesta, umpilanka- ja täytelankahitsistä murtuneiden vetokoesauvojen jännitys-venymäkäyrät.

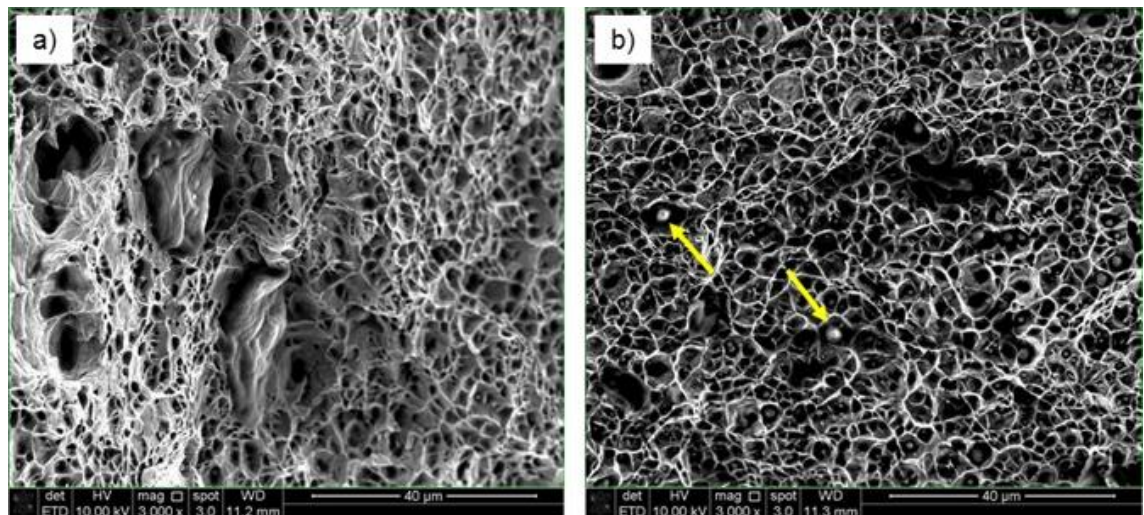
Taulukossa 10 on annettu vetokoetuloksista lasketut koehitsien myötö- ja murtojuuksien keskiarvot. Mielenkiintoista keskiarvoissa on se, että umpilangalla hitsatussa koelevyssä perusaineen myötölujuuden keskiarvo on 13 MPa (n. 4 %) korkeampi ja täytelankahitsin taas 85 MPa (20 %) matalampi kuin ainestodistuksissa annetut testitulokset. Murtojuuuden keskiarvo sen sijaan on lähes sama

kaikissa tapauksissa. Täytelankahitsin murtolujuus on 64 MPa (n. 12 %) korkeampi kuin ainestodistuksessa ilmoitettu, mikä kuvaa hyvin sitä, että puhtaan hitsin lujuusominaisuudet riippuvat voimakkaasti hitsausolosuhteista.

Taulukko 10. Koehitsien myötö- ja murtolujuuksien keskiarvot.

Hitsauslisäaine	Murtumiskohta	$R_{p0.2}$	R_m
		keskiarvo MPa	keskiarvo MPa
Täytelanka	Perusaine	334	606
Täytelanka	Hitsi	339	607
Umpilanka	Perusaine	346	610
Umpilanka	Hitsi	344	601

Hitsistä murtuneiden vetokoesauvojen murtopinnat olivat samantyyppisiä ja niissä havaittiin sitkeälle murtumalle ominaisia painanteita, joita oli havaittavissa molemmissa murtopinnoissa (ks. Kuva 5). Selkein eroavaisuus löytyi täytelankahitsin murtopinnassa olevista sulkeumista joita oli enemmän (keltaisella merkittynä kuvassa 5 b), tämä oli nähtävillä myös valomikroskooppitarkasteluissa (Kauppi. 2016).



Kuva 5. FESEM / SEI kuvia hitsistä murtuneista vetokoesauvoista, a) umpilankahitsi ja b) täytelankahitsi (Kauppi. 2016).

6.1 Tulosten analysointi Studentin t–testillä

Tarkastellessa lisäaineen vaikutusta liitoksen lujuuteen voidaan käyttää apuna Studentin t-testiä, jossa nollahypoteesi on μ_0 muotoa: ”otosten lujuuksien keskiarvot poikkeavat toisistaan” ja kriittinen p-arvo on 0.05. Taulukossa 11 on annettu t-testien p-arvot, joiden perusteella vain täytelangalla hitsatun sauman myötölujuus poikkeaa tilastollisesti merkittävällä tavalla perusaineen myötölujuudesta. Muissa tapauksissa nollahypoteesi on hylättävä, mikä tarkoittaa että lujuuksien keskiarvot eivät poikke toisistaan. Tämä tarkoittaa sitä, että standardin SFS-EN 15614–1:2012 kohdan 7.4.2 ”vetosauvan murtolujuuden tulee normaalitapauksessa täyttää perusaineelle asetettu vähimmäisvaatimus, ellei toisin ole määriteltä ennen koetta” vaatimus täyttyy. Murtolujuudet ovat selkeästi korkeampia kuin standardin SFS-EN 10088–2:2014 minimivaatimus 530 MPa.

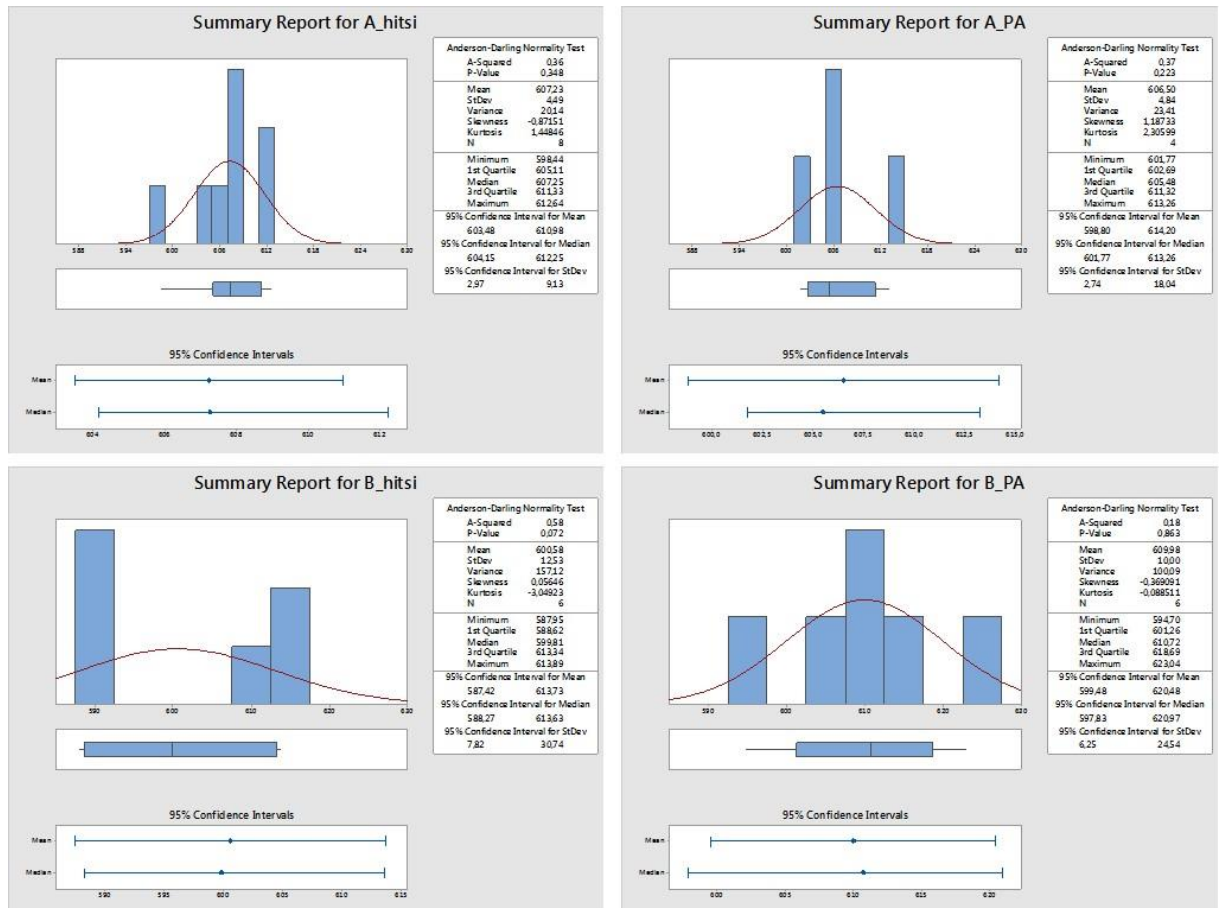
Taulukko 11. Studentin t-testin p-arvot.

p-arvo	Täytelanka / perusaine	Umpilanka / perusaine	Täytelanka / umpilanka
$R_{p0.2}$	0.014	0.659	0.134
R_m	0.810	0.185	0.269

6.2 Tulosten merkitys säiliöstandardin SFS-EN 14015:2005 kannalta

Tuloksienperusteella voidaan esittää, että läheskään aina ei päästä siihen tilanteeseen mitä standardin SFS-EN 14015:2005 kohdassa 17.2.3.2 a) (”Liitoksen vetokokeessa koekappaleen on murruttava perusaineen kohdalta”) vaaditaan. Kuviossa 12 on esitetty murtolujuuksien tilastollisten tunnuslukujen graafiset esitykset Minitab 17 -ohjelmistolla analysoituna. Histogrammien perusteella voidaan todeta, että lisäaine A:n (täytelanka) tapauksessa hitsin murtolujuudet edustavat suurimmaksi osaksi keskiarvoa (607 MPa) tai ovat sitä pienempiä keskiarvon ollessa kuitenkin sama kuin perusaineella Lisäaineen B:n (umpilanka) tapauksessa hitsin murtolujuudet ovat suurimmaksi osaksi keskiarvoa (601 MPa) pienempiä. Lisäksi lisäaineella B keskimääräinen murtolujuus on perusainetta (610MPa) pienempi. Tämän ja murtumakohtatarkastelujen perusteella voidaan esittää, että

riski vetokoesauvan murtumiseen hitsistä on suuri. Menetelmäkokeessa poikittaisia vetokokeita tehdään 2 kpl ja se tarkoittaa sitä, että todennäköisyys kokeen hylkäämiseen on suuri.



Kuvio 12. Murtolujuuden tilastollisten tunnuslukujen graafinen esitys.

Käytännössä tilanne on useimmiten se, että säiliön hitsien kupuja ei hiota ainaakaan liitoksen molemmilta puolilta pois. Tämä kasvattaa poikkipinta-alaa liitoksen kohdalla, mikä nostaa luonnollisesti liitoksen staattista lujuutta. Alilujien hitsiliitosten testaus on tuttua lujien rakenneterästen käytössä. Tihisen ym. Hitsaustekniikka-lehden 5/2015 julkaistussa artikkelissa todetaan seuraavasti: ”valtaosassa hitsatuissa rakenteissa hitsien kuvut jäävät paikoilleen, jolloin on perusteltua tehdä testaus sekä koneistetulla että kuvullisella vetosauvalla”. Vetokoe on mahdollista tehdä standardista poiketen erikseen sovittaessa myös sauvalla, josta kupua ei ole poistettu. (Tihinen, Lehtinen & Väyrynen. 2015, 20.)

Lähtökohtaisesti itse standardissa on käytännön kannalta selvä ristiriitaisuus – onko vaatimus vetosauvan murtumisesta perusaineesta perusteltua? Eihän tällaista vaatimusta esitetä varsinaisessa menetelmäkoestandardissakaan.

Herääkin kysymys, ovatko EN -standardit jääneet jo liian pahasti ajastaan jälkeen koska nykyinen metallien kehitysvauhti on kova ja hitsauslisäaineet eivät pysy kehityksessä mukana. Tästä johtuen tulisikin standardin SFS-EN 14015:2005 kohta 17.2.3.2 a) ”Liitoksen vetokokeessa koekappaleen on murruttava perusaineen kohdalta” tulisi poistaa, tai muuttaa muotoon ”Liitoksen vetokokeessa on kappaleen murruttava murtolujuudeltaan heikomman aineen kohdalta”. Standardit ovat aina tulkinnanvaraisia, niitä tulkitsevat ihmiset oman kokemuksensa ja tietopohjansa mukaan. Tämä voi aiheuttaa sen, ettei aina ole mahdollista saavuttaa sitä tilannetta jossa turvallisuus, käytännöllisyys ja standardien koukerot olisivat sulassa sovussa. Standardeja voidaan tulkita myös siten, että jonkin yksinkertaisenkin kappaleen valmistuksesta voidaan saada aikaan niin monimutkainen ja kallis testausten sarja, ettei pienillä konepajoilla ole yksinkertaisesti varaa lähteä tällaiseen mukaan. Tästä johtuen olisikin erittäin tärkeää että standardeja päivitetäisiin ja selkeytettäisiin huomattavasti nykyistä nopeammalla tahdilla. Kymmenen vuotta sitten käyttöön otettu standardi voi olla auttamatta vanhentunut tänä päivänä ja aiheuttaa vain turhia ongelmia kun sitä koitetaan soveltaa nykypäivän tekniikkaan. Lisäksi vakioteräksiäkin räätälöidään saman standardin sisällä asiakkaiden vaatimusten mukaisesti, tämäkin voi aiheuttaa lujuustason vaihtelua teräksessä.

7 POHDINTA

Työ sisälsi käytännön kokeita joista saatua dataa käytettiin hyväksi selvittäessä austeniittisten terästen hitsauksessa kohdattua käytännön ongelmaa, joka koski standardin SFS-EN 14015:2005 alaisia hitsaustöitä. Projektin edetessä kävi jo selväksi että ongelma on suureksi osaksi standardissa hieman vanhentuneesti merkityssä kohdassa 17.2.3.2 a) jossa sanotaan seuraavasti ”Liitoksen vetoko-keessa kappaleen on murruttava perusaineen kohdalta”, tämän kohdan täyttäminen oli osoittanut erityisen vaikeaksi. Nykyiset hitsauslisäaineet eivät pysty saamaan aikaan riittävän lujaa hitsisaumaa, johtuen suureksi osaksi kylmävalssaus-tekniikan kehittymisestä ja sitä seuraavan kylmälujittumisen parantumisesta. Se voidaanko hitsauslisäaineita saada vastaamaan nykyistä ruostumattoman teräksen ominaisuuksia, jää nähtäväksi tulevaisuuteen, kuitenkin on selvää että standardeista tulisi muuttaa tämän tapaiset ongelmakohdat vastaamaan nykypäivän tilannetta.

Toivottavasti tästä opinnäytetyöstä on hyötyä, jos standardien päivitysvauhtia nopeutettaisiin ja saataisiin ne muutettua sellaiseen muotoon, ettei tulisi turhia näkemuseroja vanhalle tekniikalle suunnitellun standardin vuoksi. Valitettavaa on se, että standardeja päivitetään valitettavan hitaalla tahdilla, ja tästä syystä johtuen tulevaisuudessa on varmasti tulossa lisää vastaavia ongelmia eteen kuin mitä tässä työssä on käsitelty. Lisäksi tässä työssä törmättiin toiseen mielenkiintoiseen kohtaan standardissa SFS-EN 14015:2005, kohdissa 6.1.5 ja 6.2.6 puhutaan vain puikkohitsaukseen liittyvistä standardeista, vaikka suuri osa säiliöistä valmistetaan muita hitsausprosesseja käyttäen. Tarkoittaako tämä nyt, ettei kyseisen standardin alaisia töitä saa hitsata muilla kuin puikkohitsauksella?

Tutkimuksen tuloksia voidaan pitää luotettavana, koska työt teetettiin alansa parhalla ammattilaisilla heidän kokemusta ja asiantuntemustaan hyväksi käyttäen. Tuloksista tehdyt johtopäätökset ovat kiistattomia, ja toimenpiteisiin asioiden korjaamiseksi tulisi ryhtyä.

Projektin läpivienti oli mielenkiintoista monestakin syystä, mutta suurimmaksi osaksi oma mielenkiintoni hitsaustekniikkaan, sekä sopivan aiheen löytyminen oikeaan aikaan pitivät tutkimuskipinää yllä. Ongelmitta ei toki tämäkään projekti edennyt ja alkuperäisestä aikataulusta oltiinkin reilu kuukausi myöhässä kirjoittajasta riippumattomista syistä. Tässä tuli hyvin opittua miten tutkimusprojektissa voi tulla niitä odottamattomia viivästyksiä.

LÄHTEET

Kauppi, T. 2016. Hitsausohjeiden hyväksyntä menetelmäkokeella säiliöstandardiin SFS-EN 14015:2005 liittyen. Hitsaustekniikka-lehti 2016.

Kyröläinen, A. & Lukkari, J. 2002. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. 2. painos. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto (MET).

Lepola, P. & Makkonen, M. 2003. Hitsaus ja teräsrakenteet. 4. painos. Helsinki: WSOY.

Lippold, J. C. & Kotecki, D. J. 2005. Welding metallurgy and weldability of stainless steels. New Jersey: John Wiley & sons, Inc.

Lukkari, J. Kyröläinen, A. & Kauppi, T. 2016. Hitsauksen materiaalioppi osa 2: metallit ja niiden hitsattavuus. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys (SHY).

Outokumpu Oyj. 2016. Ruostumattomat teräkset. Viitattu 25.5.2016.
<http://www.outokumpu.com/fi/ruostumaton-teras/ruostumattoman-teraksen-lajit/Sivut/default.aspx>

SFS 3052. 1995. Hitsaussanasto. Yleistermi. 5. painos. Helsinki: SFS.

SFS-EN 10088-1. 2014. Ruostumattomat teräkset. Osa 1: Ruostumattomien terästen luettelo. 3. painos. Helsinki: SFS.

SFS-EN 10088-2. 2009. Ruostumattomat teräkset. Osa 4: Rakennuskäyttöön tarkoitetut korroosionkestävät levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot. 2. painos. Helsinki: SFS.

SFS-EN 14015. 2005. Nesteiden varastointiin vähintään ympäristön lämpötilassa käytettävien säiliöiden suunnittelu ja valmistus. Paikalla rakennettavat pystylieriön muotoiset tasapohjaiset maanpäälliset hitsatut terässäiliöt. Helsinki: SFS.

SFS-EN 14343. 2010. Hitsausaineet. Hitsauslangat, hitsausnauhat ja hitsaus-sauvat ruostumattomien ja tulenkestävien sulahitsaukseen. Luokittelu. 2. Painos. Helsinki: SFS.

SFS-EN 15614-1. 2012. Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Hyväksyntä menetelmäkokeella. Osa1: Terästen kaari- ja kaasuhitsaus sekä nikkelin ja nikkelseosten kaarihitsaus. 3. painos. Helsinki: SFS.

Tihinen S., Lehtinen M. & Väyrynen J. 2015. Hitsaustekniikka lehti 5/2015.

LIITTEET

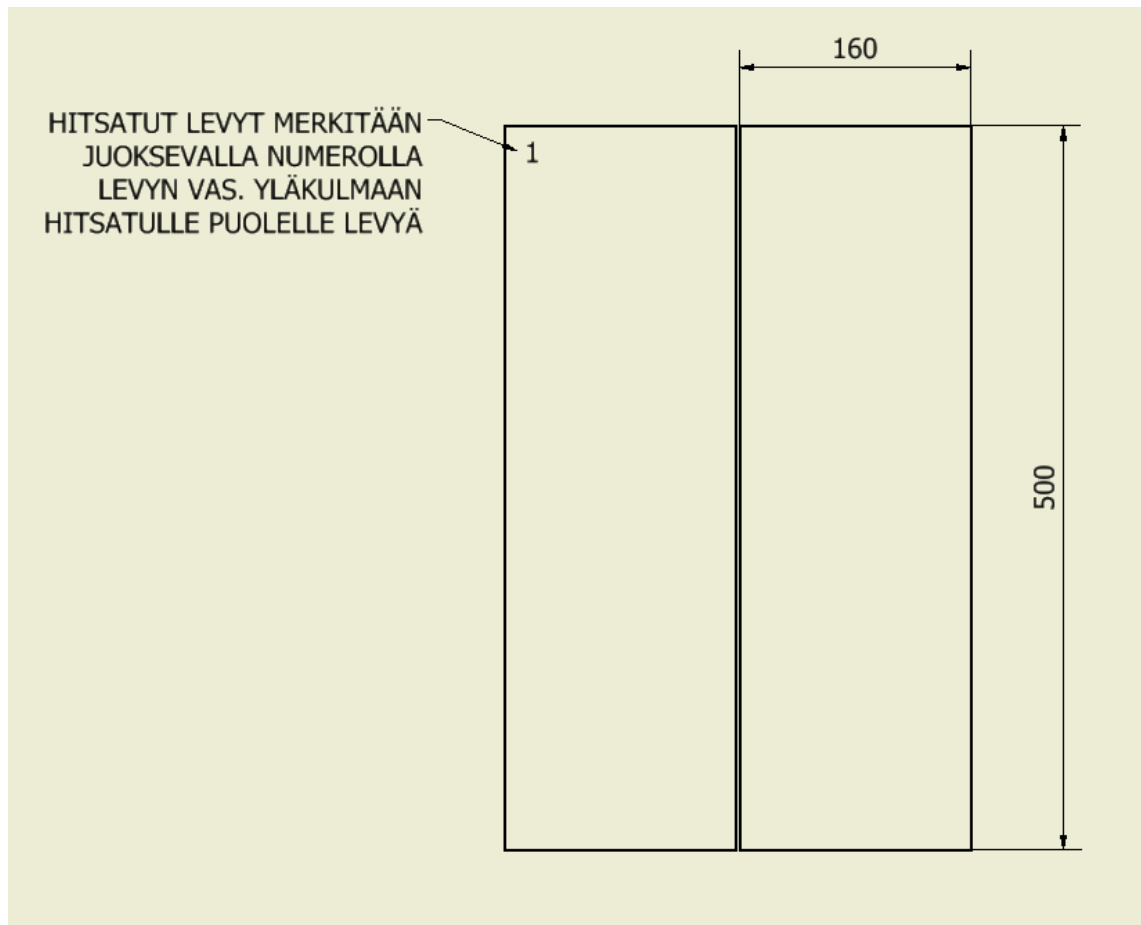
- Liite 1. Merkintäohje hitsatuille levyille sekä vetokoesauvoille
- Liite 2. Materiaali todistus EN 1.4404
- Liite 3. Vetokokeiden tulokset

Liite 1. merkintäohje 1 (2)

MERKINTÄOHJE HITSATUILLE LEVYILLE SEKÄ VETOKOESAUVOILLE

Hitsattujen levyjen merkintä

Levyt hitsataan MIG/MAG hitsausmenetelmällä siten, että levyjen pitkät sivut liitetään yhteen käyttäen I-hitsirailoa. Levyt merkitään juoksevalla numeroinnilla kuvan 1 mukaan. Merkintä tulee tehdä hitsatulle puolelle stanssaamalla, mikäli tämä ei ole mahdollista tehdään merkintä selvästi permanenttitussilla.

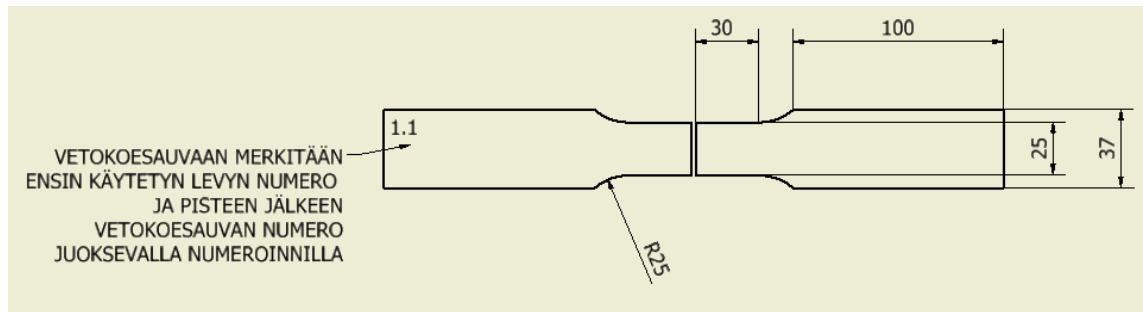


Kuva 1, hitsattujen levyjen merkintä.

Liite 1. merkintäohje 2 (2)

Vetokoesauvan merkintä

Vetokoesauvaan merkitään tiedot käytetystä ahiosta ja perään lisätään piste jonka jälkeen juokseva numero vetokoesauvalle. Merkinnät tehdään vetokoesauvan vasempaan yläkulmaan hitsatulle puolelle stanssaamalla kuvan 2 mukaisesti. Piste voidaan korvata jättämällä numeroiden väliin riittävästi tyhjää, että sekaannusta ei pääse syntymään. Kukin koesauva merkitään, kun ne on irrotettu koekappaleesta.



Kuva 2, vetokoesauvan merkintä.

Liite 2. Materiaalitodistus EN 1.4404

OUTOKUMPU

Certificate No. / Zeugnis Nr. / N° du certificat: 632690/001
 Page / Seite / Page: 1 (01)
 Date / Datum / Date: 15.03.2013

INSPECTION CERTIFICATE 3.1
 EN 10204 3.1

Delivery address, Empfänger, Lieu de livraison OUTOKUMPU STAINLESS OY		OUTOKUMPU STAINLESS OY										
TERÄSTIE 95490 TORNIO SUOMI - FINLAND		TERÄSTIE 95490 TORNIO SUOMI - FINLAND										
Requirements, Anforderungen, Exigences EN 10088-2:2005		Our Order No. Unser Auftrag Nr. Notre commande n° 45654	Your order, Ihre Bestellung, Votre commande KUST. PAIKKA 4238014022 HANNU-PEKKA HEIKKINEN									
Product, Erzeugnisform, Produit SHEET , STAINLESS STEEL		Mark of Manufacturer Zeichen des Lieferwerkes Signe de producteur KUMPU	Process Erschmelzungsart Mode de fusion AOD									
Grade, Werkstoff, Nuance 1.4404		Tolerances Toleranzen, Tolérances										
Marking, Kennzeichnung, Marquage 1.4404 2B		Marks, Versandzeichen, Marques HITSAUSKOKEISIIN										
Line Reihe Ligne	Item Position Poste	Charge-test No. Schmelz-Probé Nr. Coulée n°	Size, Abmessungen, Dimensions									
1	2	24862 4	4,0 X 1250 X 2500 MM									
			Quantity Stückzahl Nombre									
			10									
			Weight, Gewicht, Poids									
			1002 KG									
			Finish Ausführung Fini EN/ASTM									
			2B									
Charge no. Schmelz Nr. Coulée n°	Chemical composition, Chemische Zusammensetzung, Composition chimiques											
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	MO %	N %			
	24862	0,022	0,48	1,79	0,038	<.001	17,0	10,0	2,04	0,045		
Line Reihe Ligne	Mechanical properties, Mechanische Eigenschaften, Caractéristiques mécaniques								Tensile test, Zugversuch, Essai de traction			
	Location Ort Lieu	Rp0.2 MPa	Rp1.0 MPa	Rm MPa	A5 %	A50 %	%	Hardness Härte, Dureté HBW	ISO 6892-1:2009 A224 SAMPLES PERPENDICULAR TO THE ROLLING DIRECTION			
1	E	333	368	621	51	48		188	TENSILE TEST AT ROOM TEMPERATURE IN DELIVERY CONDITION Rp0.2 PROOF STRENGTH Rp1.0 PROOF STRENGTH Rm TENSILE STRENGTH A50 ELONGATION GL 50 MM A5 ELONGATION PROPORTION HBW BRINELL HARDNESS HV10 VICKERS HARDNESS			
Identify test, Verwechslungsprüfung, Contrôle d'identification Size, Abmessungen, Dimensions Surface, Oberfläche, Surface Test of intergran. coros, Prüfung auf Interkrit. Korros, Test de coros. Interocrit.									A = Beginning / Anfang / Début E = End / Ende / Fin			
EN ISO 3651-2 A: OK									We certify that the above mentioned products comply with the terms of the order contract. Wir bestätigen, dass die Lieferung den Vereinbarungen der Bestellannahme entspricht. Nous certifions que les produits énumérés ci-dessus sont conformes aux prescriptions de la commande.			
This test certificate is made by controlled ADP-system and is valid without signature. Dieses Zeugnis wurde von einem überprüften Datenverarbeitungssystem erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi par un système informatique contrôlé et est valide sans signature.									Outokumpu Stainless Oy <i>Anne-Maria Salmi</i>			
Authorized Inspector Werkstachverständiger Inspecteur autorisé									ANNE-MARIA SALMI			
FI-95490 Tornio, Finland Tel. +358 16 4521, Fax +358 16 452 350, www.outokumpu.com Domicile: Tornio, Finland. Business Identity Code 0023316-9												

Liite 3. Vetokokeiden tulokset 2 (3)

Speed in the yield range mm/min	Travel after break mm	Specimen type	Specimen no.	r- and n-values	Specimen ID	Date	Clock time	LO ST	L _c	L _e	L _c	L ₀	r _a
								mm	mm	mm	mm	mm	MPa
1.8	5	DIN	1	Yes	1.1	19.5.2016	8:15:31	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	2	Yes	1.2	19.5.2016	8:20:55	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	3	Yes	1.3	19.5.2016	8:25:43	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	4	Yes	2.1	19.5.2016	8:29:55	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	5	Yes	2.2	19.5.2016	8:33:57	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	6	Yes	2.3	19.5.2016	8:38:16	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	7	Yes	3.1	19.5.2016	8:42:15	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	8	Yes	3.2	19.5.2016	8:46:21	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	9	Yes	3.3	19.5.2016	8:50:18	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	10	Yes	4.1	19.5.2016	8:54:18	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	11	Yes	4.2	19.5.2016	8:58:38	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	12	Yes	4.3	19.5.2016	9:18:16	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	13	Yes	5.1	19.5.2016	9:23:17	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	14	Yes	5.2	19.5.2016	9:28:02	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	15	Yes	5.3	19.5.2016	9:31:27	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	16	Yes	6.1	19.5.2016	9:34:42	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	17	Yes	6.2	19.5.2016	9:38:15	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	18	Yes	6.3	19.5.2016	9:41:47	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	19	Yes	7.1	19.5.2016	9:45:23	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	20	Yes	7.2	19.5.2016	9:48:43	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	21	Yes	7.3	19.5.2016	9:52:19	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	22	Yes	8.1	19.5.2016	9:56:03	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	23	Yes	8.2	19.5.2016	9:58:53	80	120	80	120	80	30
1.8	5	DIN	24	Yes	8.3	19.5.2016	10:01:53	80	120	80	120	80	30

R _{high}	E-Modulus	Rp0.1	Rp0.2	R _{p0.2} /R _m	Rp1.0	Rp 0.05	Rt2.0	Rp0,01	R _{eh}	A _e	R _{el}	Rm	Ag
MPa	GPa	MPa	MPa	%	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	%	MPa	MPa	%
120	199.8271407	314.7548842	331.2679433	55.04929	367.9194825	293.2311502	400.4074555	220.6552835				601.7660788	36.01670595
120	209.9315615	319.2775576	336.6362947	55.3063	374.0855048	297.7062618	407.2050542	226.4419939				608.676226	34.77357486
120	202.6289892	314.4705981	332.7499831	54.2589	371.1030207	290.9627735	404.3395612	223.9359214				613.2634528	36.42946539
120	223.0735203	323.8930235	341.5414338	55.78752	379.6247816	301.4981598	412.4549257	231.6935272				612.2183482	29.69092619
120	213.6384526	318.7691941	334.8302553	55.1791	370.5403122	298.6309763	403.2665057	233.2122344				606.806294	33.59152098
120	216.3452345	320.5628394	335.9949509	55.32217	371.3366788	301.2936863	404.277108	239.397144				607.3423186	31.5252469
120	213.1469763	318.6039057	334.5102434	55.2456	370.1995729	298.0775215	402.9508464	228.4162336				605.4966579	35.72627458
120	217.0798191	317.0721923	334.4500954	55.23875	368.9798071	294.3135043	401.5773096	218.9998086				605.4628074	35.84054336
120	206.0408322	319.0212522	336.3606244	55.63866	371.9767428	296.6026789	404.0767254	219.8896287				604.5448509	33.91639603
120	213.3769667	323.6433482	339.6041006	55.93267	374.4564285	303.6573842	406.2749402	240.6025877				607.1658968	35.04030587
120	207.7811272	323.9250145	341.8551371	57.12476	377.6566768	301.0587214	408.7129022	230.0029397				598.4359728	28.59097208
120	215.8326917	326.4238892	344.6869705	56.26264	381.224603	302.719128	413.3415072	227.1907836				612.6391729	31.9938682
120	216.2176568	329.8767829	347.1912521	56.24956	383.0680967	306.9051239	415.7919648	236.8445983				617.2336774	34.19089612
120	212.8608705	329.2325945	345.4152983	56.57629	380.5440741	308.9703771	412.8164982	244.096604				610.5301556	32.32411868
120	211.6248711	322.6572485	341.1888348	56.53948	377.5815365	297.2474815	409.4374901	224.0788513				603.4523294	31.44192237
120	220.7512184	324.3833295	341.1343067	55.56937	376.7588828	302.6325601	409.8518527	232.5577821				613.8891321	33.87771214
120	219.1520818	321.3621486	337.7753004	55.50712	373.0699536	300.030657	406.0027317	228.8666684				608.5261009	35.25428068
120	212.2853871	324.6337791	341.5467937	55.70349	377.4272035	302.8459936	410.2474445	231.2272614				613.1515681	33.69784732
120	225.3082765	338.1473165	357.8737022	57.4396	396.3531837	313.0505867	428.9541682	232.4028186				623.0435028	28.95866952
120	204.7478833	323.0003086	339.9362452	57.16075	376.2915906	301.5979358	408.4251026	239.5505152				594.7022438	28.71859157
120	222.1693183	325.2465271	343.8150871	56.27845	381.6401835	300.4111779	414.7120238	221.1642831				610.9178015	31.95590101
120	220.4684608	329.0932921	347.2066903	58.73924	384.95984	307.0997725	416.6636086	241.6647522				591.0984154	20.4496336
120	219.5249736	322.0408019	340.0260239	57.74536	376.990889	299.8735893	408.530991	228.7498064				588.8369333	22.73407026
120	230.8978152	337.6985279	357.0467816	60.7273	395.4047988	315.0538064	427.5697573	244.9065394				587.9510518	17.04106568

Liite 3. Vetokokeiden tulokset 3 (3)

A	A _{5,65}	n _{4-6/Ag}	n _{10-15/Ag}	n _{10-20/Ag}	n _{2-20/Ag}	k _{2-20/Ag}	A5 (80)	A _{gt}	R _B	A80
%	%					MPa	%	%	MPa	%
35.95519544	49.95008189	0.19024565	0.303422827	0.313881631	0.246075924	1023.530142	49.89159279	36.31575108	458.1926401	44.55755463
34.68635628	43.30021375	0.189855247	0.302059393	0.312627478	0.243798056	1033.305193	43.23328142	35.06099939	584.8972819	39.97715068
36.16824219	47.33582559	0.193063591	0.306183298	0.316672865	0.244386089	1032.305654	47.15908806	36.73049927	479.6831059	43.07214166
29.20884519	32.51024393	0.192136406	0.306476492	0.316194739	0.246831115	1055.365977	32.1969551	29.96325016	601.5653384	31.21895089
33.18517409	36.90242925	0.192220601	0.306391978	0.316863717	0.247117358	1035.453392	36.64479718	33.87375116	588.2333386	35.47521462
31.27060401	35.5487513	0.193721614	0.307685476	0.317939335	0.247378666	1039.437942	35.383254	31.80449963	596.0705826	33.89820618
35.4183608	47.18577575	0.190979429	0.303493206	0.314242781	0.240959513	1014.299777	46.98563337	36.00825071	470.9608943	42.78464453
35.18441672	45.42034032	0.191791211	0.30414174	0.315147775	0.242402554	1016.599725	45.00958838	36.11774921	474.419096	41.55815846
33.60470985	42.84873168	0.19096216	0.303417373	0.314243522	0.243199327	1024.219677	42.64410954	34.20825005	581.0765722	39.32403543
34.45808465	37.99978887	0.190444228	0.303137001	0.313508594	0.242566533	1025.494291	37.64261722	35.32350063	594.0610977	36.66194794
28.23529175	32.05890407	0.187718725	0.301211844	0.311320577	0.242049633	1027.887571	31.83631197	28.87725115	585.9932846	30.60620918
31.49475094	34.49594554	0.189260311	0.30203002	0.312237793	0.244470177	1046.54127	34.17943331	32.27624893	608.2536207	33.33840176
34.07836306	47.35487931	0.187308792	0.298837168	0.309452639	0.243235086	1046.86074	47.26315996	34.47449923	454.6149306	42.13360757
32.17884359	43.08237556	0.187497442	0.299155194	0.309303572	0.243191926	1039.924092	42.97410852	32.60925055	456.9234274	38.82753222
31.12883907	42.03438064	0.187594253	0.299248227	0.30911744	0.243553653	1031.413505	41.81953007	31.72499895	458.5915043	37.78412533
33.60960716	45.28661565	0.191086358	0.304270345	0.315362038	0.245427092	1043.534393	45.10317034	34.15499926	492.9483961	40.79949919
35.10733669	42.66742984	0.189935659	0.303500866	0.314371661	0.244393962	1030.100858	42.56611867	35.52974939	577.0535154	39.77989081
33.59943693	42.26505459	0.190008014	0.30299716	0.313633542	0.244770196	1041.812681	42.19110443	33.98474932	555.4919216	38.92400954
28.67220641	37.8977786	0.185766962	0.296183206	0.305156749	0.241484179	1069.529725	37.68824244	29.23350096	446.3128623	34.13860856
28.45285604	37.25060974	0.18613705	0.294842383	0.304641261	0.239926212	1019.944404	37.07345353	29.00700092	464.2823473	33.87853895
31.4702817	41.27022473	0.186945614	0.297430415	0.307629413	0.241592821	1040.112391	40.94653888	32.22975016	472.2990653	37.44604345
20.34713681	24.2678459	0.192432616	0.300415144	0.304244007	0.245539962	1056.335367	24.19192369	20.71650028	477.4244888	22.66944386
22.49163737	26.62244419	0.19190297	0.304528455	0.3122777	0.247826179	1042.94785	26.45986999	23.00174952	483.8262399	24.99740556
16.99059266	20.71118181	0.191919421	0.29158678	0.289200949	0.232261872	1041.444966	20.66935513	17.29500055	470.5461605	19.14691167

A _t	t _{test}	Thickness	Width	S ₀
%	s	mm	mm	mm ²
44.78475094	145.88	3.787	20.06	75.96722
40.25324821	144.16	3.787	20.03	75.85361
43.30725193	153.08	3.823	20.1	76.8423
31.48649931	133.6	3.712	20.08	74.53696
35.74875116	137.18	3.804	20.06	76.30824
34.17224884	138	3.781	20.06	75.84686
43.00350189	153.52	3.914	20.13	78.78882
41.77499771	149.68	3.867	20.16	77.95872
39.60449934	146.48	3.856	19.96	76.96576
36.93900108	145	3.881	20.06	77.85286
30.88649988	134.16	3.848	20.09	77.30632
33.61875057	136.04	3.773	20.11	75.87503
42.34200001	141.28	3.686	20.08	74.01488
39.04050112	137.36	3.712	20.14	74.75968
37.99875021	133.4	3.718	20.14	74.88052
41.02200031	146.9	3.783	20.15	76.22745
40.04099846	145.4	3.823	20.09	76.80407
39.18375015	144.32	3.771	20.13	75.91023
34.33500051	126.86	3.526	20.02	70.59052
34.1032505	133.46	3.814	20.05	76.4707
37.65749931	140.36	3.738	20	74.76
22.88475037	107.56	3.506	20.12	70.54072
25.21724939	118.28	3.679	20.11	73.98469
19.34999943	100.9	3.365	20.07	67.53555