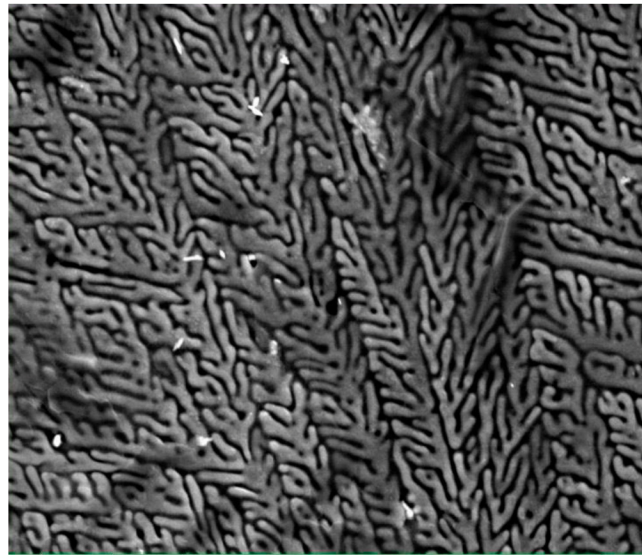


Antero Kyröläinen • Ulla Annanpalo • Timo Kauppi

Tutkimus ruostumattomien terästen täytelankahitsauksesta ja sen kuonametallurgiasta

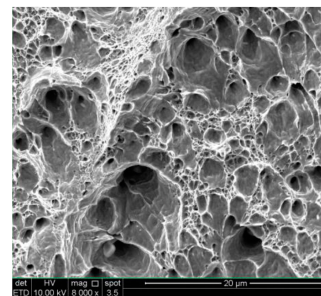
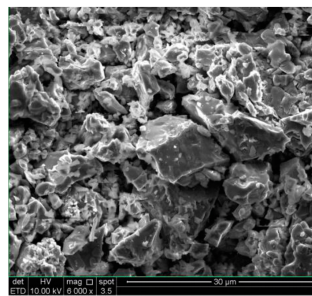
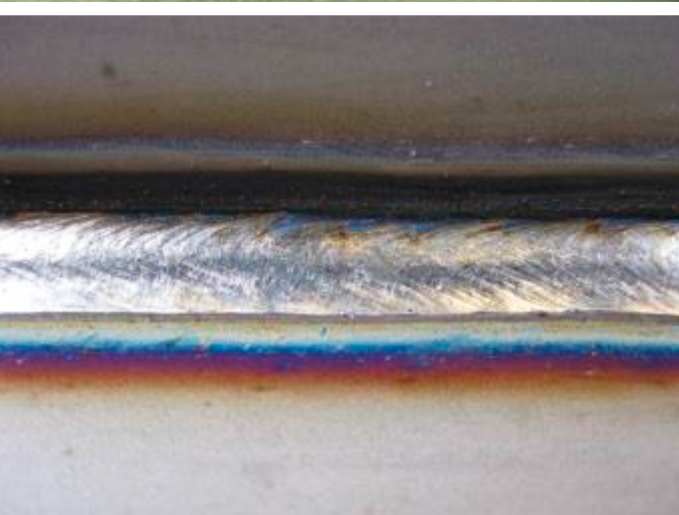
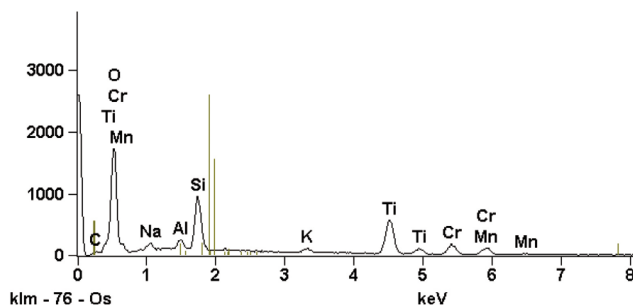


det HV mag □ spot
ED 10.00 kV 12.000 x 3.5

10 μm

Full scale counts: 2596

B3(11)_pt1



det HV mag □ spot
ED 10.00 kV 6.000 x 3.5

30 μm

det HV mag □ spot
ED 10.00 kV 8.000 x 3.5

20 μm

Tutkimus ruostumattomien terästen täytelankahitsauksesta ja sen
kuonametallurgiasta

Antero Kyröläinen • Ulla Annanpalo • Timo Kauppi

Tutkimus ruostumattomien terästen täyte- lankahitsauksesta ja sen kuonametallurgiasta

Sarja B. Raportit ja selvitykset 13/2013

© Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu ja tekijät

ISBN 978-952-5897-76-0 (nid.)
ISSN 1799-2834 (painettu)
ISBN 978-952-5897-77-7 (pdf)
ISSN 1799-831X (verkkójulkaisu)
ISSN-L 1799-2834

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun julkaisu
Sarja B. Raportit ja selvitykset 13/2013

Rahoittajat: KTAMK
Kirjoittaja: Antero Kyröläinen, Ulla Annanpalo &
Timo Kauppi

Kannen kuva: Ulla Annanpalo & Antero Kyröläinen
Taitto: Ella Käyhkö

Juvenes Print, Oulu 2013

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu
Tietokatu 1
94600 Kemi
Puh. 010 353 50

www.tokem.fi/julkaisut

Lapin korkeakoulukonserni



Lapin korkeakoulukonserni LUC on yliopiston ja kahden ammattikorkeakoulun strateginen yhteenliittymä. Konserniin kuuluvat Lapin yliopisto, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu ja Rovaniemen ammattikorkeakoulu.

www.luc.fi

Sisällys

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO | 7 |
| 1.1 Tutkimuksen tausta | .7 |
| 1.2 Tämän tutkimuksen tavoitteet | .7 |
| 1.3 Täytelanka ja sillä hitsaaminen | .8 |
| 1.4 Täytelankahitsauksen kuonametallurgia | 10 |
| 2 KOEJÄRJESTELYT | 15 |
| 2.1 Materiaalit | 15 |
| 2.1.1 Perusaineet | 15 |
| 2.1.2 Lisäaineet | 15 |
| 2.2 Suojakaasu | 16 |
| 2.3 Hitsauskokeet | 17 |
| 2.3.1 Hitsausasennot, laitteet | 17 |
| 2.3.2 Hitsausparametrien muodostuminen ja kokemukset hitsauksesta | 17 |
| 2.4 Tutkimusmenetelmät | 20 |
| 2.4.1 Makrokuvaukset | 20 |
| 2.4.1 FESEM-tutkimus | 20 |
| 3 LABORATORIOKOKOKEIDEN TULOKSET | 23 |
| 3.1 Hitsausliitosten makrokuvat | 23 |
| 3.2 Kuonan irtoaminen | 26 |
| 3.3 Lankojen FESEM-tutkimus | 27 |
| 3.3.1 Shield-Bright 316L-asentolanka | 27 |
| 3.3.2 Shield-Bright 316L X-tra- lanka | 31 |
| 3.2.3 Yhteenveto langoista Shield-Bright 316L ja Shield-Bright 316L X-tra | 34 |
| 3.4 Hitsikuonien tutkimus | 35 |
| 3.4.1 Shield-Bright 316L-1.4509-jalkopiena | 36 |
| 3.4.2 Shield-Bright 316L-1.4509-lakipiena | 39 |
| 3.4.3 Shield-Bright 316L X-tra-1.4509-jalkopiena | 43 |
| 3.4.4 Shield-Bright 316L X-tra-1.4509-lakipiena | 49 |
| 3.4.5 Yhteenveto hitsikuonista | 51 |
| 3.5 Hitsiliitoksen pinnan tutkimus | 52 |

| | |
|--|----|
| 3.5.1 Shield-Bright 316L-1.4509 jalkopiena | 52 |
| 3.5.2 Shield-Bright 316L X-tra-1.4509 laki-piena | 53 |
| 3.5.3 Yhteenveto hitsin pintatutkimuksesta | 54 |
| 4. JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO | 55 |
| 4.1 Hitsattavuus ja laatu | 55 |
| 4.2 Langat ja kuonat | 56 |
| 4.3 Hitsin pinta | 56 |
| 4.4 Tulosten hyödyntäminen ja jatkotutkimus | 57 |
| 5 VIITTEET | 59 |
| 6 LIITTEET | 61 |
| 6.1 Liite 1: Hitsattavat liitokset ja asenno | 61 |
| 6.2 Liite 2: Hitsauslaitteet | 62 |

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Tämä tutkimus on jatkoa sille Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Materiaalien käytettävyyden tutkimusryhmän tutkimukselle, jonka tuloksia esiteltiin Hitsaustekniikka-lehdessä 1/2013 otsikolla ”Ruostumattoman teräksen pienahitsauksen eroja umpi- ja ydintäytelangoilla – hitsaajan näkökulma”, Ulla Annanpalo, Antero Kyröläinen, Timo Kauppi /1/. Tutkimuksessa tehtiin MAG -hitsauksia austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle EN 1.4307 sekä umpilangalla 316LSi että rutiilityypisellä täytelangalla 316L, joka on tarkoitettu jalko- ja alapienahitsaukseen. Tutkimus sisälsi hitsauskuonien kuonametallurgisia tuloksia, joita saatiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun SEM (Scanning Electron Microscope) /EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) -tekniikalla, FESEM -laitteistolla.

1.2 Tämän tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli oppia ymmärtämään kaarihitsauksessa tapahtuvia kuonailmiöitä, jotta hitsausprosessin toimivuutta voitaisiin ymmärtää aiempaa monipuolisemmin. Kaarihitsausprosesseista MAG -hitsaus on puikkohitsauksen jälkeen laajimmalle levinnyt menetelmä. Kuonalla täytetyt langat ovat MAG -hitsauksessa yleistymässä. Voi olla, että tulevaisuudessa osa lankahitsauksesta tehdään kuonatäytelangalla ilman suojakaasua.

Tutkimuksessa suoritettiin MAG -hitsauksia kahdella erityyppisellä täytelangalla, Esab_Shield-Bright 316L (asentolanka) ja Esab Shield-Bright 316L X-tra (jalkolanka), jotka olivat rutiilityypisiä eli niiden kuona oli TiO_2 -pitoista. Hitsauksen perusaineina olivat ferriittinen EN 1.4509 ja austeniittinen EN 1.4318 ruostumaton teräs. Tuloksia tarkasteltiin hitsaamisen näkökulmasta paneutumalla kuonametallurgiaan, johon keskittyviä julkaisuja on ollut käytettävissä niukasti ja ovat hyvin vanhoja, liittyen enemmänkin hitsimetallin käyttäytymiseen, esim. /2/ ja /3/. Alan merkittävin kirjallisuus on lähinnä saksankielistä ja perusteisiin paneutuvaa. /4/ Vielä yleisemmin kuonametallurgiaa käsitellään erilaisissa ASM Handbook -kirjoissa, esim. /5/ tai American Welding Society:n Welding Metallurgy -teoksessa /6/. Hitsauksen kuonametallurgia muistuttaa monessa suhteessa teräksenvalmistuksen kuonametallurgiaa, josta on

tehty tutkimusta ja julkaistu hyvin laajasti ja perusteellisesti, esim. /7/ mistä onkin paljon hyötyä hitsauksen kuonametallurgiaa kehitettäessä.

1.3 Täytelanka ja sillä hitsaaminen

Kuvassa 1 esitetään perinteiset tavat valmistaa täytelanka hitsausta varten. Vaihtoehtoja ovat saumaton lanka ja erilaiset tekniikat, joissa nauhasta rullamuovamalla valmistetaan lankaa. /8/

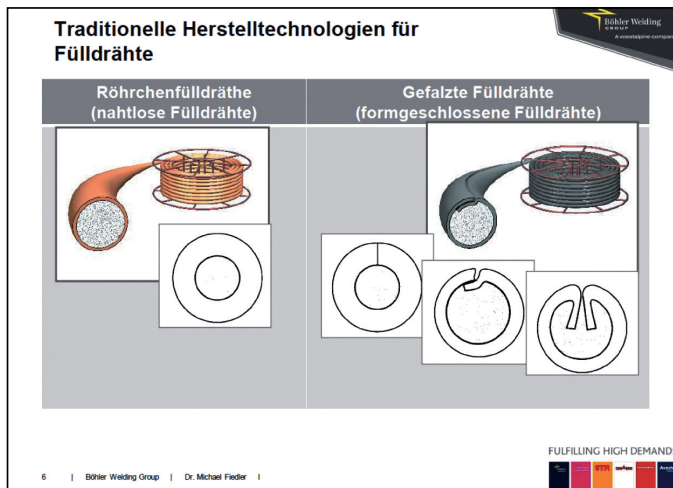
Langan täytteen tarkoituksena hitsauksessa on, kuva 2 /8/:

- Hitsisulan deoksidaatio (hapen sitominen ja poisto)
- Kuonan muodostaminen (suojaaksi ilmasta tulevalle hapelle jne.)
- Valokaaren stabilointi
- Metallijauheen lisääminen (ml. seosaineet)

Langan täytteen koostumus vaikuttaa, kuva 2 /8/:

- Hitsattavuusominaisuuksiin
- Hitsin sulamisominaisuuksiin
- Mekaanisiin ja muihin teknologisiin ominaisuuksiin
- Asentohitsattavuuteen

Materiaalin siirtyminen täytelangalla hitsattaessa tapahtuu hienona pisarasumuna, kun taas umpilangalla langan keskustasta irtoavina pisaroina, kuva 3. /8/ Virran pulsituksella umpilangan pisanmuodostusta on mahdollista hienontaa. Täytelangon valokaari on kellomainen, umpilangalla kapeampi ja enemmän keskittynyt kuin täytelangalla. Edellisestä seuraa, että umpilangalla saavutetaan terävämpi tunkeuma kuin täytelangalla, kuva 3. /8/



Kuva 1 Perinteiset tavat valmistaa täytelanka /8/

Was bewirkt die Pulverfüllung einer Fülldrahtelektrode

Pulverfüllung

Ermöglicht:

- Desoxidation des Schweißguts
- Bildung einer Schlacke
- Stabilisierung des Lichtbogens
- Zufuhr von Metallpulver oder Legierungselementen

Beeinflusst:

- Schweißeigenschaften
- Abschmelzleistung
- Mechanisch/technologische Gütewerte
- Positionsverschweißbarkeit

Böhler Welding Group | Dr. Michael Fiedler

FULFILLING HIGH DEMANDS

Kuva 2 Jauheen vaikutustavat täytelankahitsauksessa /8/

Lichtbogeneigenschaften

Massivdraht

Axialer Tropfenübergang
Kegelförmiger Lichtbogen

Fülldraht

Diffuser Tropfenübergang
Glockenförmiger Lichtbogen

Fülldrahtelektroden haben:

- weniger Bindefehler
- besseren Flankeneinbrand
- bessere Ausgasung führt zu geringerer Porenneigung

14 | Böhler Welding Group | Dr. Michael Fiedler

FULFILLING HIGH DEMANDS

Kuva 3 Tunkeuma hitsattaessa umpi ("Massivdraht") - ja täytelangalla ("Fülldraht") /8/

1.4 Täytelankahitsauksen kuonametallurgiaa

Täytelankahitsauksessa kuonaa muodostavat ja hitsattavuutta parantavat aineet ovat jauhemaisessa muodossa langan sisällä. Hitsisulan pintaan muodostuvan sulan kuonan koostumukseen vaikuttavat tässä jauheessa olevien aineiden lisäksi ilmasta ja hitsisulasta tulevat kaasumaiset ja sulassa lienneena olevat teräksen (perusaine ja langan pinta) seosaineet. Usein puhutaan kuitenkin kuonasta vaikka tarkoitetaan täytelangan sisällä olevaa jauhetta.

TÄYTELANKOJEN KUONATYYPIT:

Killing /4/ lajittelee täytelankojen kuonatyypit seuraaviin luokkiin (prEN 758):

| Tunnus | Kuonan ominaisuudet | Suojakaasu |
|--------|---|-------------------|
| R | Rutiilipohjainen, hitaasti jähmettyvä | C ja M2 |
| P | Rutiilipohjainen, nopeasti jähmettyvä | C ja M2 |
| B | Emäksinen | C ja M2 |
| M | Metallijauhe | C ja M2 |
| V | Rutiili tai emäksinen/Fluorid | ilman suojakaasua |
| W | Emäksinen/Fluoridi, hitaasti jähmettyvä | ilman suojakaasua |
| Y | Emäksinen/Fluoridi, nopeasti jähmettyvä | ilman suojakaasua |
| S | Muut tyypit | - |

Näistä DIN EN ISO 17633-A:ssa on hyväksyttynä (2012) luokat ja merkinnät R, P, B, M ja S (Z = muut tyypit).

Tässä tutkimuksessa keskityttiin rutiilipohjaisiin asento- ja jalkohitsauslankoihin, joilla käytetään suojakaasua (tyypit R ja P). Näistä R on ns. ”jalkolanka” ja P on ns. ”asentolanka”.

ITSESUOJAAVA TÄYTELANKA (TYYPIT V, W JA Y):

Killing /4/ antaa esimerkin itsesuojaavan täytelangan valmistamisesta tavoitteena hitsimetallin loppukoostumus 0.019 C, 0.3 Si, 6.66 Mn, 19.15 Cr, 9.07 Ni (langan halkaisija 1.6 mm, 200 A, 26 V, 30 cm/min). Tässä langan kuori on terästä: 0.017 C, 0.03 Si, 0.33 Mn, 13.43 Cr, 0.11 Ni, 0.016 P, 0.004 S. Langan sisälle seostettiin jauheena seuraavat mineraalikomponentit (paino-%):

| | | | | | |
|------------------|------------------|-----|------------------|------------------|---|
| SiO ₂ | CaF ₂ | CaO | TiO ₂ | K ₂ O | Muuta |
| 0.8 | 5.7 | 2.4 | 11.7 | 1.9 | CaCO ₃ , ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , Na ₂ O |

Metallit (paino-%):

| | | | |
|------|------|------|-----|
| FeMn | Cr | Ni | Si |
| 22.6 | 24.4 | 24.1 | 1.5 |

TÄYTELANKAJAUHEIDEN JAKO:

Killing /4/ jakaa jauheet käyttötarkoituksen mukaan yleisesti luokkiin:

Kuonaa muodostavat, esim:

Al₂O₃, CaF₂, TiO₂, SiO₂, CaSiO₃, CaMg(CO₃)₂, ZrO₂, Fe₃O₄, MgO, MnO₂

Fluksit, vaikuttavat kuonan viskositeettiin, esim:

Na₃AlF₆, BaF₂, LiF, LiCl, BaCO₃, CaF₂

Valokaarta stabiloivat, esim:

TiO₂, K₂C₂O₄, Li₂CO

Kaasun muodostukseen, esim:

C₆H₁₀O₅, CaCO₃, (C₆H₁₀O₅)_x

Seos- ja deoksidointiaineet, esim:

FeSi (50%/50%), FeAl (85%Al), FeTi (40%Ti), Zr-seos (40%Zr+40%Si+Fe), Mn (100%), Ni (100%), Cr (100%), FeMn (80%Mn)

Lisäksi jauheiden käsittelyssä tarvitaan erilaisia side- ja juoksevuus-aineita /4/.

ASM Handbook /5/ toteaa Mo -seosainelähteeksi FeMo (97%Mo).

Hilkesin et al. /10/ mukaan hitsauskuonaa synnyttävinä mineraaleina käytetään seuraavia:

| Consumable type | Type of slag system | TiO ₂ | SiO ₂ | CaO | CaF ₂ | Na ₃ AlF ₆ | Al ₂ O ₃ + MgO | Alloy metals |
|--------------------|---|------------------|------------------|----------|------------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| Covered electrodes | <u>Rutile</u> | 49 | 24 | 12 | 5 | - | - | Cr |
| | <u>Rutile / silicate</u> (AWS: silicate type – 17) | 41 | 40 | 12 | 7 | - | - | Cr |
| | <u>Rutile / basic</u> | 35 | 39 | 15 | 11 | - | - | Cr |
| | <u>Basic</u> / <u>Calc. fluoride</u> <u>Cryolite</u> | - 15 | 2 5 | 53 35 | 45 - | - 45 | - - | - |
| Flux Cored Wire | <u>Rutile</u> | 85 | 15 | - | - | - | - | Fe, Cr |
| | <u>Rutile / silicate</u> | 60 | 40 | - | - | - | - | Ni, Mo |
| SAW flux | <u>Silicate</u> | - | 30 | - | 20 | - | 50 | (Cr) |
| | <u>Basic</u> | - | 12 | - | 49 | - | 39 | |

Kuonien koostumuksia voidaan käsitellä esim. kolmen komponentin TiO₂ – SiO₂ – CaO (CaF) -faasikentässä. /2/ Taulukossa oleva täytelanka (Flux Cored Wire) sisältää vain TiO₂ – SiO₂, mikä on edellistä yksinkertaisempi kuvata TiO₂ – SiO₂- lämpötilakentässä.

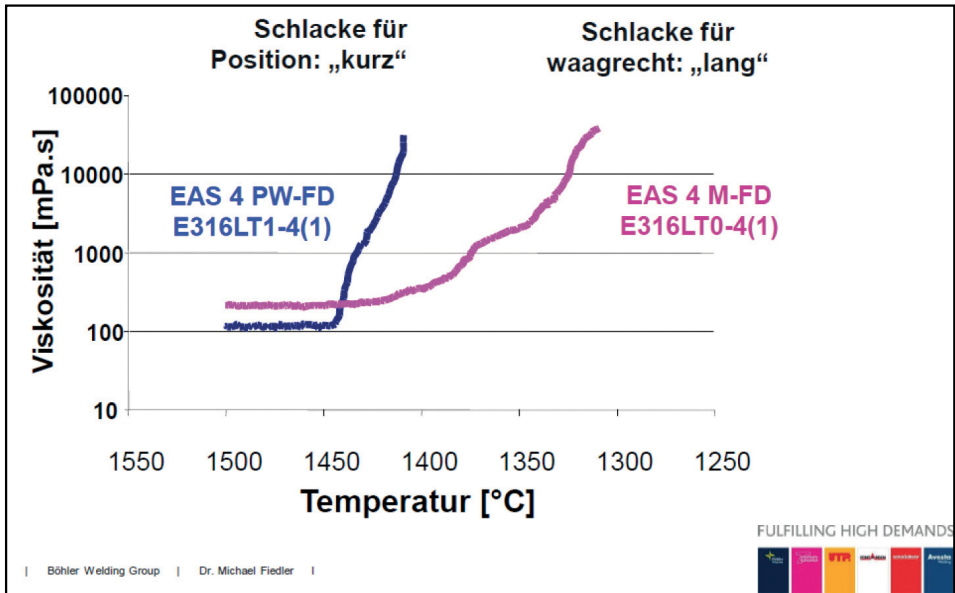
Lähteessä /5/ esitellään seuraavia MAG -hitsauksen (FCAW) kuonia (paino-%):

| Tyyppi | Suoj. | SiO ₂ | Al | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | ZrO ₂ | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | CO ₂ | C | Fe | Mn | CaF ₂ |
|----------|-----------------|------------------|-----|--------------------------------|------------------|------------------|-----|-------------------|------------------|-----------------|-----|------|------|------------------|
| E70T-1/2 | CO ₂ | 21.0 | - | 2.1 | 40.5 | - | 0.7 | 1.6 | 1.4 | 0.5 | 0.6 | 20.1 | 15.8 | - |
| E70T-3 | itse | 3.6 | 1.9 | - | 20.6 | - | - | 0.1 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 50.0 | 4.5 | 22.0 |

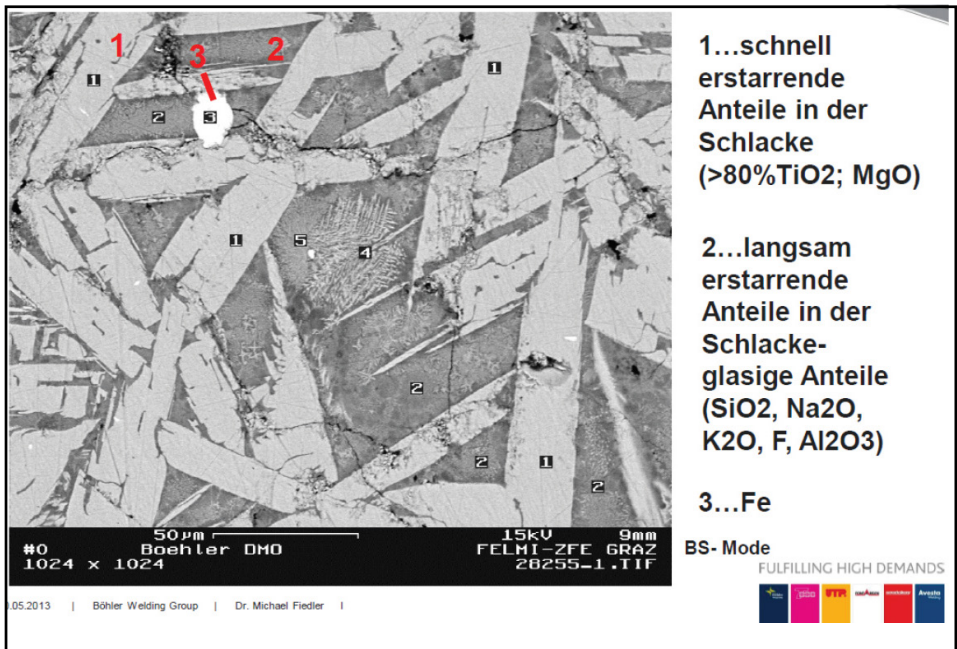
KUONAN JÄHMETTYMINEN:

Fiedler Böhler Weldingistä esittelee /8/ asento- ja jalkolankojen eroja perustuen kuonan käyttäytymiseen joko nopeasti ("kurz") tai hitaasti ("lang") jähmettyvinä, kuva 4. Nopeasti jähmettyvän asentolangan viskositeetti kasvaa jäähtymisen edetessä nopeasti jo korkeassa lämpötilassa, kun taas jalkolangan viskositeetti kasvaa vähitellen ja jatkuu selvästi matalampiin lämpötiloihin.

Fiedlerin /8/ mukaan nopea kuona saadaan aikaan seostamalla kuona korkeassa lämpötilassa sulavilla oksideilla, kuten TiO₂ tai MgO, kuva 5. Hitaaksi kuona taas muuttuu seostettaessa siihen SiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂O tai F.



Kuva 4 Täytelangan kuonan jähmettyminen nopeasti ("Kurz") tai hitaasti ("Lang") /8/



Kuva 5 Täytelangan kuonan mikrorakennetta /8/

2 Koejärjestelyt

2.1 Materiaalit

2.1.1 Perusaineet

Perusaineina käytettiin hehkutettua ja peitattua, stabiloitua ferriittistä EN 1.4509- ja kylmävalssaamalla lujitettua austeniittista EN 1.4318-terästä.

EN 1.4509 2E (hehkutettu ja peitattu) 3 mm,
 $R_{p0.2} = 360$, $R_m = 520$, $A_5 = 30$ (tyypillisesti, Outokumpu).

EN 1.4318/301LN 2H/TR (kylmävalssaamalla lujitettu) 3 mm,
 $R_{p0.2} = 575/576$, $R_m = 908/906$, $A_5 = 44/42$ (ainestodistus 11.02.2013, Outokumpu).

| Teräs | C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | Muut |
|--------|------|------|------|------|-----|----|--------|
| 1.4509 | 0.02 | | | 18.0 | - | - | Nb, Ti |
| 1.4318 | 0.02 | 0.42 | 1.13 | 17.6 | 6.5 | - | 0.167N |

EN 1.4509 on ferriittinen ruostumaton teräs, joka on stabiloitu käyttäen Nb/Ti-seostusta. Teräksen mikrorakenne on kaikissa lämpötiloissa ferriittinen. Lämmön vaikutuksesta teräksen raekoko kasvaa ja ferriittisen teräksen iskusitkeys pienenee.

EN 1.4318 on austeniittinen ruostumaton teräs, jonka austeniitti on suhteellisen matalasta Cr/Ni-seostuksesta johtuen melko epästabiliia, mikä ilmenee kylmävalssauksessa austeniitin muuttumisena muokkausmartensiitiksi. Teräs lujittuu tehokkaasti kylmävalssauksessa. Kun tällä tavalla lujitettua terästä hitsataan, muuttuu teräksessä oleva martensiitti takaisin austeniitiksi ja lujuus pienenee.

2.1.2 Lisäaineet

Lisäaineiksi valittiin asentolanka ja jalkolanka. Molemmat langat olivat rutiilityyppeissä, joissa täyte sisälsi TiO₂. Asentohitsausominaisuudet on huomioitu kuonan koostumuksessa.

1.2 ESAB SHIELD-BRIGHT 316L (ASENTOLANKA)

Shield-Bright 316L on 19%Cr-12%Ni-3%Mo-seosteinen ruostumaton täytelanka MAG-hitsaukseen. Se on rutiilityyppinen jauhetäytelanka, joka on suunniteltu täysin asentohitsauskelpoiseksi (ns. asentolanka). Puikon valokaari palaa pehmeästi ja roiskeettomasti. Kuona on itsestään irtoava ja hitsin pinta on puhdas ja sileä. Se on tarkoitettu vastaavien ns. haponkestävien terästen hitsaukseen, esim. EN 1.4404 (AISI 316L), EN 1.4435 (AISI 316L), EN 1.4401 (AISI 316) ja EN 1.4436 (AISI 316). Se soveltuu myös vastaavien stabiloitujen ruostumattomien terästen hitsaukseen, kuten EN 1.4571 (AISI 316Ti), paitsi kun vaaditaan perusaineen veroista virumislujutta korkeissa lämpötiloissa. Suojakaasu: seoskaasu M21 ja CO₂, Hitsausvirta DC+ (Esab Oy tuoteseloste)

1.2 ESAB SHIELD-BRIGHT 316L X-TRA (JALKOLANKA)

Shield-Bright 316L X-tra on ruostumattomien terästen täytelanka MAG-täytelankahitsaukseen. Se on rutiilityyppinen jauhetäytelanka, joka on suunniteltu hitsattavaksi jalko- ja alapiena-assennoissa. Valokaari palaa pehmeästi, kuona irtoaa hyvin ja hitsin pinta tasainen ja sileä. Se soveltuu 18Cr-12Ni-3Mo-tyyppisten ruostumattomien, ns. haponkestävien, terästen hitsaukseen, mm. EN 1.4404, EN 1.4432, EN 1.4436 ja AISI 316 ja AISI 316L. Suojakaasu: seoskaasu M21 ja CO₂. Hitsausvirta DC+ (Esab Oy tuoteseloste)

2.2 Suojakaasu

Suojakaasuna käytettiin Mison 18 (Ar + 18% CO₂ + 0,03 % NO). Suojakaasu sisältyy EN 439-S-standardin ryhmään M21 (jossa eri CO₂-pitoisuustasoja sisältäen 0,03 % NO). Hitsauksissa käytettiin, suuttimesta mitattuna, kaasunvirtausta: 20 l/min.

HIILIDIOKSIDI VAI HAPPI?

Useimmiten on edullisempaa käyttää suojakaasun hapettavana komponenttina hiilidioksidia kuin happea. Yksi eduista on parempi hitsin geometria ja ulkonäkö verrattuna argon-happiseoksiin. Syynä ovat sulan pintajännityksestä ja hapettumisen määrästä johtuvat erot hitsisulan juoksevuuudessa. Käytettäessä hiilidioksidia hapen asemasta on hapettuminen ja kuonanmuodostus vähäisempää, mikä vaikuttaa edullisesti hitsin ulkonäköön ja tarvittavan jälkityön määrään.

Toinen etu hiilidioksidilla hapettavana komponenttina on parempi tunkeuma, etenkin sivutunkeuma. Tämä johtuu pääasiassa suuremmasta kaarijännitteestä ja energian tuonnista, sekä hiilidioksidin aiheuttamasta suuremmasta kaaripaineesta argon-happiseoksiin verrattuna. (AGA Oy tuoteseloste)

Oli havaittu, että suojakaasuun lisätty pieni määrä typpimonoksidia (NO) reagoi herkästi otsonin kanssa, jolloin muodostuu happea (O₂) ja typpidioksidia (NO₂). Savukaasujen otsoniarvot alentuvat ja tuloksena on parempi työympäristö hitsaajalle. (AGA Oy tuoteseloste)

2.3 Hitsauskokeet

2.3.1 Hitsausasennot, laitteet

Hitsauskokeet tehtiin käsihitsauksena pienaliitoksille eri asennoissa, liite 1. Hitsaukset suoritettiin Froniuksen TransPuls Synergic 3200 CrNi-Edition-MIG/MAG-koneella tasavirralla, liite 2. Hitsauskokeissa hyödynnettiin standardia SFS-EN ISO 17633. /9/

2.3.2 Hitsausparametrien muodostuminen ja kokemukset hitsauksesta

Hitsauksessa verrattiin saman valmistajan erityyppisiä ydintäytelankoja (Esab Shield-Bright 316L [asentolanka] ja Esab Shield-Bright 316L X-tra [jalkolanka]) hitsaamalla eri hitsausasennoissa kahteen eri perusaineeseen (EN 1.4509 ja EN 1.4318). Tarkoituksena oli hitsata kiinnityслиitos eri ydintäytelangoille ja materiaaleille yhteensopivilla arvoilla, jotta voitaisiin tarkastella:

- kuonan muodostumista ja irtoamista
- hitsin pinnan laatua
- tunkeumaa ja
- pienen nurkan sulamista.

Hitsauskoneeseen asetetut hitsausparametrit olivat: virta 140 A, jännite 22.4 V, kuljetusnopeus 5.7m/min ja kaarijännitteen säätö 6.

Varsinaista tutkimusta täydentämään tehtiin lisähitsauksia. Lisähitsauksissa hitsauksen parametriasetukset olivat: 150 A, 22 V, 6,2 m/min ja kaarijännitteen säätö 2.

Lopulliset hitsausparametrien arvot sekä tutkimuksen avulla saadut a-mitat ja nurkan sulamistiedot ovat seuraavassa taulukossa:

| | Hit-saus- virta | Kaari- jänni- te | Kaari- energia | Läm- mön- tuonti | Hitsaus nopeus | Hit- sattu- pi- tuus | Hit- saus- aika | Lan- gan- syöttö | | | | a-mitta | Nur- kan sula- minen |
|-----|--------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------|--------|--------------------|-----------|-------------------------------|
| N:o | I [A] | U [V] | E [kJ/ mm] | Q [kJ/ mm] | v [mm/ min] | s [mm] | t | [m/ min] | Lisäaine SB=Shield- Bright | Teräs | Asento | a [mm] | |
| 1.a | 147 | 22,3 | 0,57 | 0,45 | 348 | 400 | 1,09 | 5,7 | S-B 316L | 1.4509 | Ylhääl- tä alas | 2.3 | ei |
| 1.b | 132 | 22,3 | 0,56 | 0,45 | 316 | 400 | 1,16 | 5,7 | S-B 316L | 1.4509 | Jalko | 2.7 | ei |
| 1.c | 126 | 22,3 | 0,82 | 0,66 | 205 | 400 | 1,57 | 5,7 | S-B 316L | 1.4509 | Alhaal- ta ylös | 4.0 | ok |
| 1.d | 129 | 22,2 | 0,66 | 0,53 | 261 | 400 | 1,32 | 5,7 | S-B 316L | 1.4509 | Laki | 3.9 | ei |
| 2.a | 146 | 22,3 | 0,47 | 0,38 | 414 | 400 | 0,58 | 5,7 | S-B 316L | 1.4318 | Ylhääl- tä alas | 2.4 | ei |
| 2.b | 134 | 22,3 | 0,53 | 0,42 | 338 | 400 | 1,11 | 5,7 | S-B 316L | 1.4318 | Jalko | 2.8 | ei |
| 2.c | 124 | 22,3 | 0,79 | 0,63 | 211 | 400 | 1,54 | 5,7 | S-B 316L | 1.4318 | Alhaal- ta ylös | 3.8 | ok |
| 2.d | 142 | 22,3 | 0,73 | 0,58 | 261 | 400 | 1,32 | 5,7 | S-B 316L | 1.4318 | Laki | 2.9 | ei |
| 3.a | 148 | 22,2 | 0,48 | 0,39 | 407 | 400 | 0,59 | 5,7 | S-B 316L X-tra | 1.4509 | Ylhääl- tä alas | 2.3 | ei |
| 3.b | 137 | 22,3 | 0,60 | 0,48 | 308 | 400 | 1,18 | 5,7 | S-B 316L X-tra | 1.4509 | Jalko | 3.1 | ok |
| 3.c | - | - | #ARVO! | #ARVO! | #ARVO! | 400 | | 5,7 | S-B 316L X-tra | 1.4509 | Alhaal- ta ylös | - | - |
| 3.d | 135 | 22,3 | 0,81 | 0,65 | 222 | 400 | 1,48 | 5,7 | S-B 316L X-tra | 1.4509 | Laki | 4.8 | ok |
| 4.a | 154 | 22,3 | 0,47 | 0,38 | 436 | 400 | 0,55 | 5,7 | S-B 316L X-tra | 1.4318 | Ylhääl- tä alas | 2.3 | ei |
| 4.b | 142 | 22,3 | 0,57 | 0,46 | 333 | 400 | 1,12 | 5,7 | S-B 316L X-tra | 1.4318 | Jalko | 3.0 | ok |
| 4.c | - | - | #ARVO! | #ARVO! | #ARVO! | 400 | | 5,7 | S-B 316L X-tra | 1.4318 | Alhaal- ta ylös | - | - |
| 4.d | 153 | 22,3 | 0,82 | 0,66 | 250 | 400 | 1,36 | 5,7 | S-B 316L X-tra | 1.4318 | Laki | 4.1 | ok |

| Lisähitsaukset | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|------|------|------|-----|-----|------|-----|---|-------------|--------|--------------------|-----|----|
| 5.b | 125 | 22.2 | 0.53 | 0.43 | 312 | 400 | 1.17 | 5.7 | 6 | S-B 316L | 1.4318 | Jalko | 3 | ei |
| 5.c | 138 | 22.3 | 0.98 | 0.79 | 188 | 400 | 2.08 | 5.7 | 6 | S-B 316L | 1.4509 | Alhaal- ta ylös | 4.5 | ok |
| 5.d | 137 | 22.3 | 0.85 | 0.68 | 216 | 400 | 1.51 | 5.7 | 6 | S-B 316L | 1.4509 | Laki | 3.7 | ei |
| 6.b | 137 | 21.9 | 0.62 | 0.49 | 293 | 400 | 1.22 | 6.2 | 2 | S-B 316L | 1.4509 | Jalko | 3.4 | ei |
| 6.c | 136 | 21.9 | 1.09 | 0.88 | 163 | 400 | 2.27 | 6.2 | 2 | S-B 316L | 1.4509 | Alhaal- ta ylös | 5 | ok |
| 6.d | 139 | 21.8 | 0.96 | 0.77 | 189 | 400 | 2.07 | 6.2 | 2 | S-B 316L | 1.4509 | Laki | 4.3 | ei |

Kokemuksesta tiedettiin jo etukäteen, että suurin ero on alhaalta *ylöspäin hitsaukses-*sa. Jalkolangkaa ei ole tarkoitettu ylöspäin hitsaukseen, ”*eikä hitsaaminen onnistunut-*kaan kuin täppäämällä”. Asentolangalla ylöspäin hitsaaminen oli erittäin vaivatonta ja helposti hallittavaa.

Lakipienaliitoksen hitsaaminen sujui jalkolangalla samalla tavalla kuin asentolangalakin: ”*hitsi kaivoi voimakkaasti, sula levittyi helposti molempiin reunoihin, mutta ei keskelle. Kuljetus oli hidasta ja korjaustoimenpiteitä täynnä, sillä piti odottaa keski-*kohdan täyttymistä”. Lopputulokset poikkesivat kuitenkin toisistaan. Jalkolangalla hitsatun lakipienaliitoksen ulkonäkö ei ollut tasainen ja ”*se oli paljon huonompi mitä kuljetuksen perusteella olisi odottanut. Se oli epätasainen, voimakkaasti vaellellut ja toispuoleinen*”.

Molemmilla langoilla *ylhäältä alaspäin* ja *jalkopienan* hitsaaminen olivat miellyttäviä. Jalkolanka oli kuitenkin ”*asteen miellyttävämpi*” ja sen lopputulos oli silmämääräisesti erittäin hyvä. Hitsin pinta oli aivan kirkas ja hyvin tasainen. Ks. kohta 3.1.

Kuonan irtoamista seurattiin, koska se on ydintäytelankahitsauksessa ja kuonan käyttäytymisessä tärkeä ominaisuus. Kuonan täytyy irrota hyvin, eikä hitsiliitokseen saa jäädä kuonajäämiä ulkonäön ja korroosioalttiuden vuoksi. Ks. kohta 3.2.

2.4 Tutkimusmenetelmät

2.4.1 Makrokuvaus

Makrokuvaus tehtiin sekä hitsausliitoksen pinnasta että poikkileikkaushieestä.

Hitsausliitoksen pinnan kuvauksella haluttiin dokumentoida hitsauksen yleistä onnistumista, ulkonäköä ja kuonajäämiä. Kuvaus suoritettiin digikameralla.

Hitsin poikkileikkaushieillä selvitettiin tunkeuman muotoa ja pienen kulman täyttymistä. Kuvaukset tehtiin stereomikroskooppiin liitettyllä kameralla.

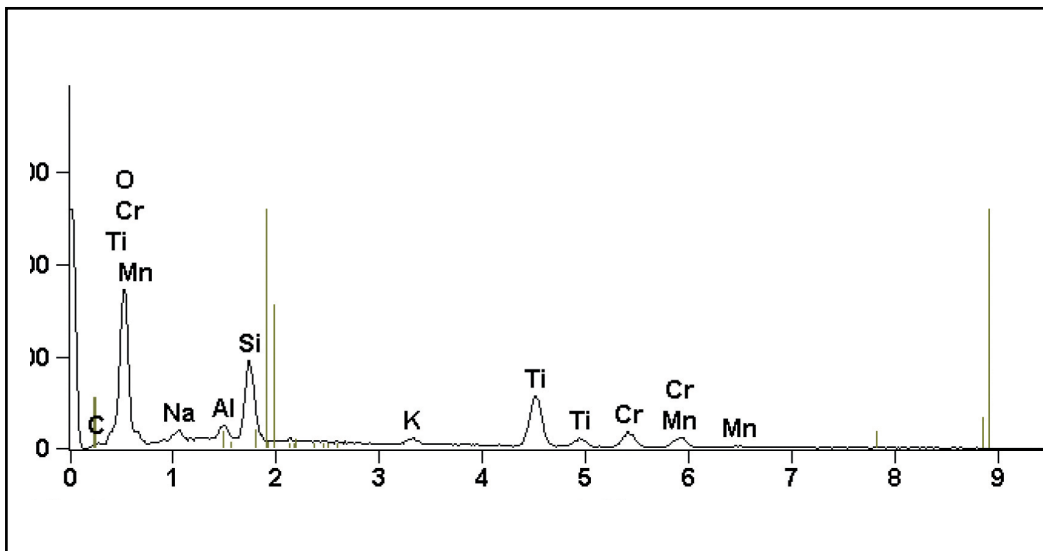
Ks. kohta 3.1.

2.4.1 FESEM-tutkimus

Pyyhkäisyelektronimikroskooppiset (SEM) tutkimukset tehtiin FESEM-Quanta 450 FEG-laitteella. Koostumusanalyysit tehtiin em. mikroskooppiin liitettyllä Thermo Nora System 312E EDS-röntgenanalysaattorilla.

FESEM-laitteeseen liitetyn EDS-analysaattorin (energiadiispersiivinen rntg-analysaattori) mittauksista voitiin tulostaa koostumus neljällä eri tavalla, joista esimerkit seuraavissa:

1. EDS-spektri, jossa merkittyyinä röntgenpulssien määrät (counts) energian (keV) funktion



2. Eri alkuaineiden pulssimäärät (Net counts), joista koostumus lasketaan

Net Counts

| | O-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|-----|------|------|------|-----|------|------|------|
| pt1 | 1113 | 93 | 665 | 60 | 610 | 176 | 131 |

3. Eri alkuaineiden pitoisuudet atomi-%:na

Atom %

| | O-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|-----|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| pt1 | 42.90 | 1.28 | 9.91 | 1.24 | 22.99 | 10.53 | 11.15 |

4. Eri alkuaineiden pitoisuudet paino-%:na

Weight %

| | O-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|-----|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| pt1 | 20.74 | 1.04 | 8.41 | 1.46 | 33.28 | 16.54 | 18.52 |

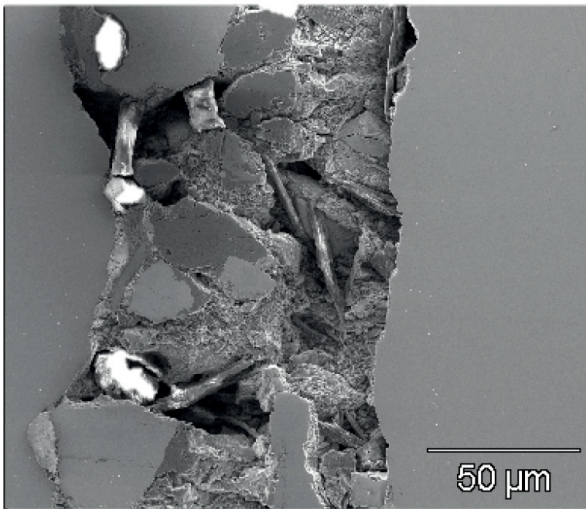
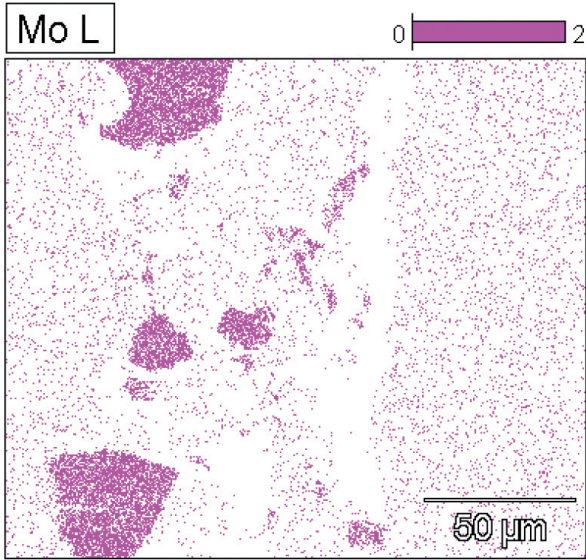
Jauhemaisen materiaalin vuoksi tämän tutkimuksen EDS -analyyseissä ei käytetty standardia, johon saatua koostumusta olisi verrattu, vaan atomi- ja painoprosentit normeerattiin siten, että kunkin analyysin eri alkuaineiden summa on 100 %. Tästä seuraa, että analyysejä on pidettävä viitteellisinä. Edellä esitetystä esimerkistä voidaan karkeasti päätellä, että alkuaineet ovat todennäköisesti kokonaan oksideina, olettaen, että ne ovat: Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Cr_2O_3 ja MnO .

FESEM -laite mahdollisti myös ns. alkuainejakauma-kuvan muodostamisen, jolloin yksittäisten aineiden jakaumaa voitiin verrata mikrorakenteeseen (SEM-kuva). Tästä esimerkkinä seuraava tapaus, jossa halkaistusta täytelangasta on tulostettu SEM-kuva ja vastaava Mo-jakauma:

FESEM-tutkimus jakautui 1) langan, 2) hitsin pintakuonan ja 3) hitsin pinnan tutkimukseen.

Langan tutkimuksella selvitettiin erityisesti täytelangan kokoonpanoa. Selvitettiin jauheen kuona- ja metallikomponentteja hitsausliitokseen muodostavien aineiden eroja jalko- ja asentotyypissä langoissa.

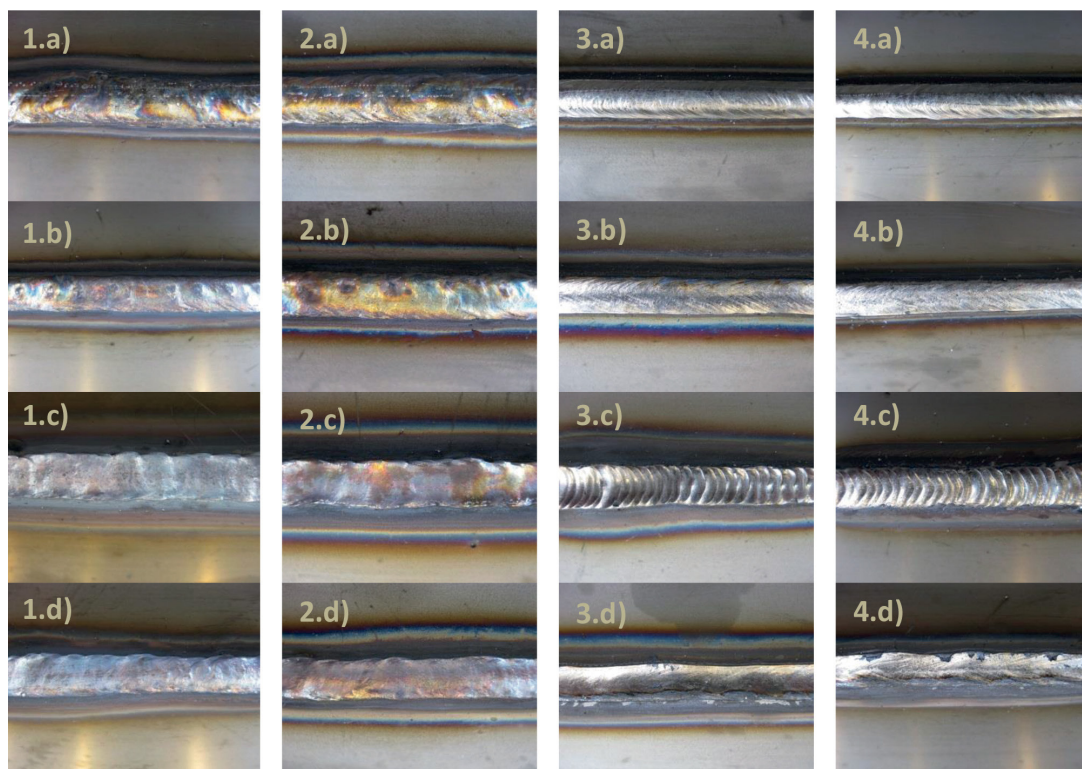
Hitsiin syntyneen kuonan selvittämisellä pyrittiin määrittämään jalko- ja asentotyyppisellä langalla hitsatun hitsausliitoksen pintakuonan koostumuksen eroja sekä selittämään eroja kuonien käyttäytymisessä näillä langoilla hitsattaessa. Kuona-tutkimuksessa sovellettiin teräksen kuonametallurgian tutkimusmenetelmiä.



3 Laboratoriokokeiden tulokset

3.1 Hitsausliitosten makrokuvat

Hitsausliitosten kuvat hitsin pinnan puolelta on esitetty kuvassa 6.



Sarake nro 1: S-B 316/EN1.4509, nro 2: S-B 316/EN1.4318, nro 3: S-B 316 X-tra/EN1.4509 ja nro 4: S-B 316 X-tra/EN1.4318. Rivi a) ylhäältä alas, b) jalkopiena, c) alhaalta ylös ja d) on lakipiena.

Kuva 6 Hitsausliitosten pinnan makrokuvat

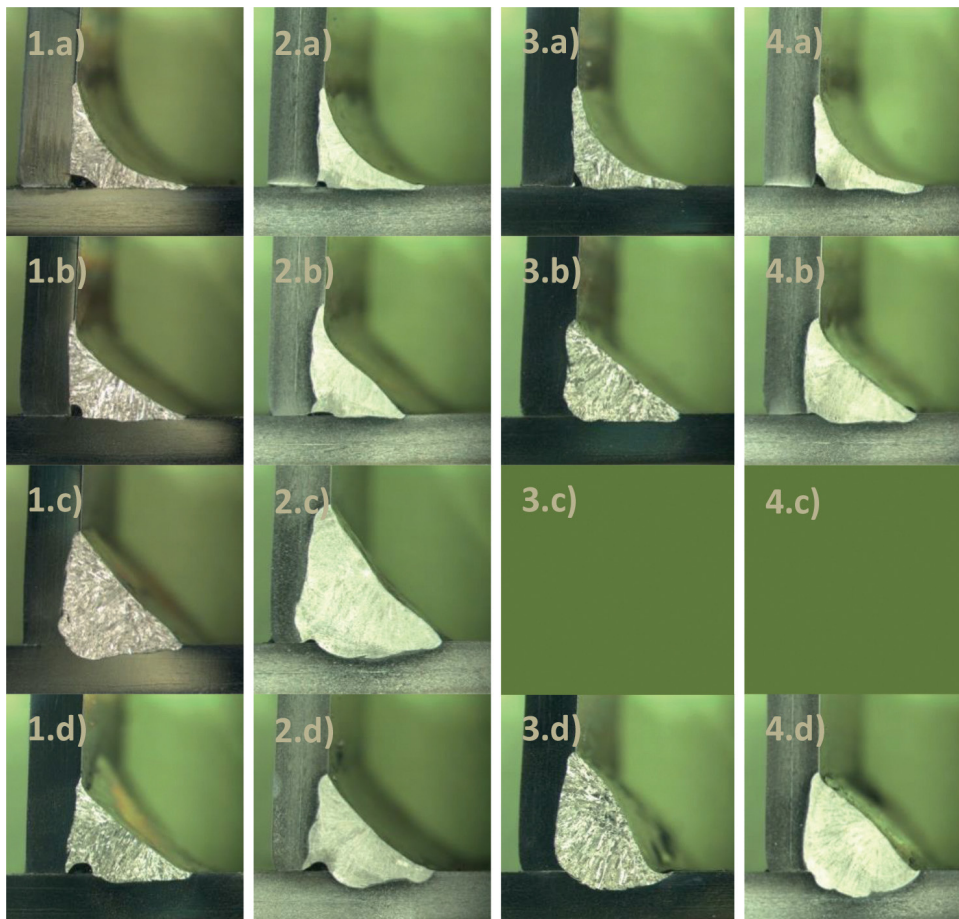
Hitsausliitoksen poikkileikkaushieiden avulla tarkasteltiin hitsausliitosten tunkeumaa ja pienen nurkan sulamista, kuva 7. Tarkastelusta saatiin seuraavia tuloksia:
SHIELD-BRIGHT 316L

Koehitseistä asentolangalla makrokuvien perusteella onnistui ainoastaan alhaalta ylös -hitsi. Muissa asennoissa hitsatuista hitseistä nurkka oli jäänyt sulamatta.

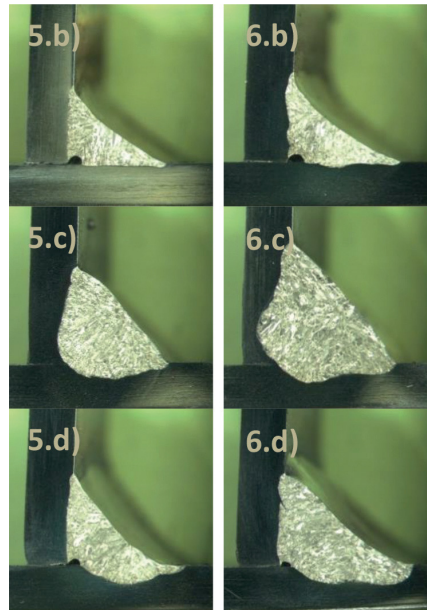
EN 1.4318 - teräksessä tunkeumaa oli hieman enemmän mitä teräksessä EN 1.4509. Erityisesti lakipienasta näki ilmiön, että tunkeumaa oli syntynyt, mutta nurkka ei ollut sulanut.

SHIELD-BRIGHT 316L X-TRA

Jalkolangalla onnistuneita hitsejä olivat jalko- ja lakipienat. Silmämääräisesti tarkasteltuna lakipienen pinta ei ollut kuitenkaan tasainen. Eri terästen välillä ei ollut juuri havaittavaa eroa tunkeumissa.



Sarake nro 1: S-B 316L/EN1.4509, nro 2: S-B 316L/EN1.4318, nro 3: S-B 316L X-tra/EN1.4509 ja nro 4: S-B 316L X-tra/EN1.4318. Rivi a) ylhäältä alas, b) jalkopiena, c) alhaalta ylös ja d) on lakipiena.



Lisähitsaukset: Sarake nro 5: alkuperäiset hitsausarvot uudestaan/S-B 316L nro 6: muutetut hitsausarvot/S-B 316L. Rivi b) jalkopiena, c) alhaalta ylös ja d) on lakipiena.

Kuva 7 Hitsausliitosten poikkileikkaukset

LISÄHITSAUKSET:

Lisähitsaukset suoritettiin asentolangalla. Hitsaukset toistettiin uudestaan samoilla arvoilla kuin ensimmäisellä kerralla sekä muutetuilla hitsausparametreilla.

Lopputulokset eivät kuitenkaan muuttuneet ja hitsaustapahtumat toistivat itseään, kuva 7: jalkopienoissa nurkat eivät sulaneet, alhaalta ylös -hitti oli helposti hallittavaa ja lakipienoissa ”sulat kaivoivat, mutta eivät täyttäneet”. Hitsausparametrien säätö ei tässä tutkimuksessa parantanut tulosta nurkan sulamisessa. Jalko- ja lakipienoissa nurkka jäi edelleen sulamatta. Hitsien a-mitat sen sijaan kasvoivat hitsausvirran lisäämisen, jännitteen pienentämisen ja langansyötön lisäämisen myötä.

JOHTOPÄÄTÖKSINÄ VOITIIN TODETAA HITSAUKSESTA:

Suurin ero käsivaraissa hitsauksessa asento- ja jalkolangan välillä näkyi tässä tutkimuksessa ylöspäin hitsaamisessa, missä asentolanka toimi jalkolankaa paremmin. Asentolangalla nurkan sulamiseen täytyisi sen sijaan kiinnittää enemmän huomiota, sillä nurkka ei sulanut yrittämättä muissa asennoissa kuin ylöspäin -hitsauksessa. Jalkolangalla saatiin helpommin aikaan onnistunut lopputulos nurkan sulamisen suhteen. Hitsaajan tulkinta jalkolangasta - ”asteen miellyttävämpi” - tarkoitti tässä tapauksessa paremman hitsattavuuden lisäksi parempaa tunkeumaa, jossa pienen nurkka oli myös sulanut.

Käytetty jalkolanka oli monipuolisempi mitä oletettiin. Silläkin lakipienen hitsaaminen onnistui, vaikka hitsistä tuli ”aaltoileva”.

3.2 Kuonan irtoaminen

Riippuen ydintäytelangasta, hitsausparametreista ja kuljetuksesta, kuona voi irrota itseksään pitkinä kaareutuvina suikaleina. Tässä koetilanteessa niin ei käynyt, vaikka kuona irtosikin kaikissa tilanteissa helposti vain painamalla kuonavasaralla saumaa pitkin. Ylöspäin hitsatuista - ja lakipienahitseistä, langasta riippumatta, kuona irtosi parhaiten itseksään. Niissä myös kuonan paksuus oli silmämääräisesti tarkasteltuna suurempi kuin alaspäin hitsatuissa ja jalkopienahitseissä, joissa kuonaa oli vain ohut kerros. Jalkolangalla hitsatuissa lakipienahitseissä reunoille jäi paikoittain kuonajäämiä.

Shield-Bright 316L X-tra-langalla hitsatuista hitseistä kuona piti irrottaa lähes kaikista painamalla, vain yhdestä hitsistä kuona irtosi itse. Shield-Bright 316L-langalla hitsatuista hitseistä kuona irtosi hieman paremmin. Selvää systematiikkaa kuonan irtoamisessa ei erilaisilla teräs/lanka-yhdistelmillä näkynyt.

Kuonan käyttäytymistä hitsauksen aikana erityyppisten lankojen välillä oli hankala verrata silmämääräisesti. Kuonan irtoamisia on tarkasteltu seuraavassa taulukossa:

| Shield-Bright 316L | | | |
|--------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| Materiaali | Hitsaustapa | Kuona irtosi itse | Kuona piti irrottaa |
| 1.4509 | ylhäältä alas | | Kokonaan |
| 1.4509 | jalko | Noin 30 % | Noin 70 % |
| 1.4509 | alhaalta ylös | Kokonaan | |
| 1.4509 | laki | Noin 70 % | Noin 30 % |
| 1.4318 | ylhäältä alas | | Kokonaan |
| 1.4318 | jalko | Noin 30 % | Noin 70 % |
| 1.4318 | alhaalta ylös | Noin 90 % | Noin 10 % |
| 1.4318 | laki | Kokonaan | |

| Shield-Bright 316L X-tra | | | |
|--------------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| Materiaali | Hitsaustapa | Kuona irtosi itse | Kuona piti irrottaa |
| 1.4509 | ylhäältä alas | | Kokonaan |
| 1.4509 | jalko | | Kokonaan |
| 1.4509 | alhaalta ylös | - | - |
| 1.4509 | laki | Kokonaan | |
| 1.4318 | ylhäältä alas | | Kokonaan |
| 1.4318 | jalko | | Kokonaan |
| 1.4318 | alhaalta ylös | - | - |
| 1.4318 | laki | Noin 20 % | Noin 80 % |

3.3 Lankojen FESEM-tutkimus

Langoista valmistettiin FESEM-tutkimusta varten näytteet kolmella eri tavalla:

1. Valamalla lanka nappiin ja hiomalla langan sisältö näkyviin näytteen pintaan,
2. Katkaisemalla käsin lanka poikki, jolloin langan sisältö saatiin näkyviin ja
3. Ripottelemalla langan sisällä olevaa jauhetta näytteenpitimessä olevan teipin päälle.

Kullakin näistä menetelmistä oli omat etunsa ja heikkoutensa. Suuri riski oli, että näytteen valmistuksessa menetettiin osa jauheesta tai tutkittiin vain jauhepartikkelien pintaa.

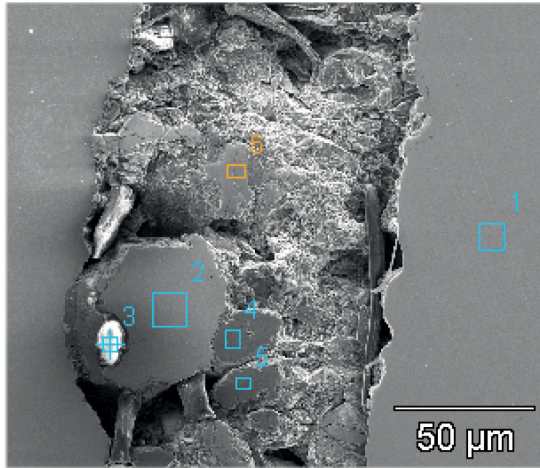
3.3.1 Shield-Bright 316L-asentolanka

NAPPINÄYTTEET

Langasta valmistettiin FESEM-näyte valamalla lanka nappiin napin tason suuntaisesti ja hiomalla näyte siten, että saatiin langan halkileikkaus näkyviin. On mahdollista, että langan sisällä olevaa jauhetta pääsi hiontavaiheessa valumaan pois eikä tästä osasta jauhetta saatu havaintoa.

Shield-Bright 316L-asentolanka, joka oli halkaisijaltaan 1.2 mm, näytti valmistetun siten, että kuori oli austeniittista ruostumatonta terästä 304L ja molybdeeni oli seostettu ferromolybdeeninä (partikkeleina) langan täytteen joukkoon, ks. kuva 8.

Titaani (rutiili, TiO_2) esiintyi partikkeleissa, jotka sisälsivät myös happea ja mangaania.



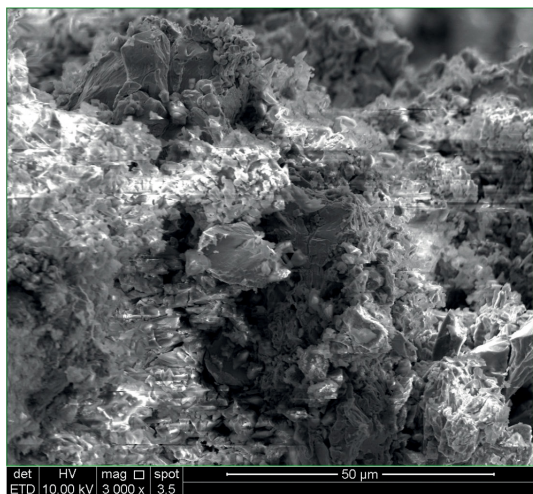
Weight %

| Anal | O-K | Si-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Fe-L | Ni-L | Mo-L | Muut <2 % |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 1 | | 0.46 | | 24.84 | 2.31 | 57.06 | 15.33 | | |
| 2 | | 0.47 | | | | 22.99 | | 76.54 | |
| 3 | 37.58 | 62.21 | | | | | | | Al |
| 4 | 13.81 | 0.23 | 44.88 | | 39.30 | | | | F, Na |
| 5 | 15.78 | 0.36 | 67.57 | | 14.81 | | | | Au, K |
| 6 | | 0.50 | 2.91 | 89.72 | 6.86 | | | | |

Kuva 8 Leikkaus S-B 316L-langasta ja sen EDS-analyyseja.

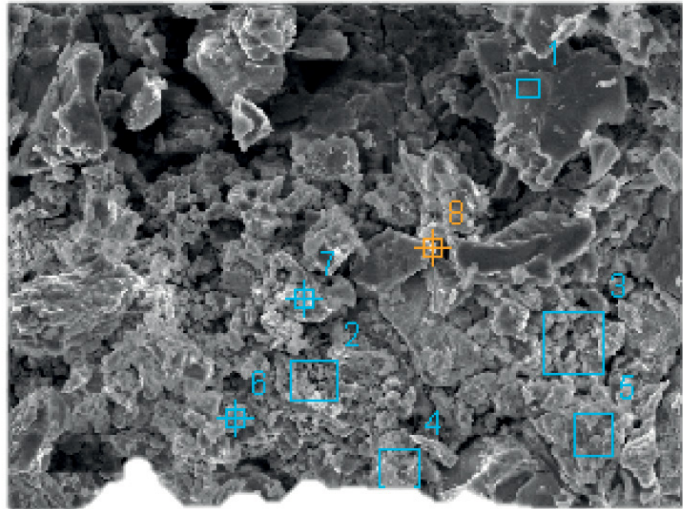
KATKAISTUN LANGAN PÄÄ

Toinen FESEM-näytetyyppi tehtiin murtamalla lanka käsin ja tutkimalla langan poikkileikkauksen sisältöä FESEM:llä, kuva 9. Näin jauhepartikkeleista saatiin kuva sellaisenaan ja jauhetta pääsi varisemaan vähemmän näytteestä.



Kuva 9 S-B 316L-lanka, katkaistu langan pää

Kuvassa 10 on EDS-analyysinä katkaistun langanpään jauheesta. Näissä kahdeksassa analyysissä oli mukana suuri määrä aineita, joita asentolanka sisältää. Rutiili (TiO_2) oli tässäkin tärkein, monenlaisena yhdistelmänä eri alkuaineiden kanssa. Näissä analyysissä esiintyi runsaasti Zr sekä Si.



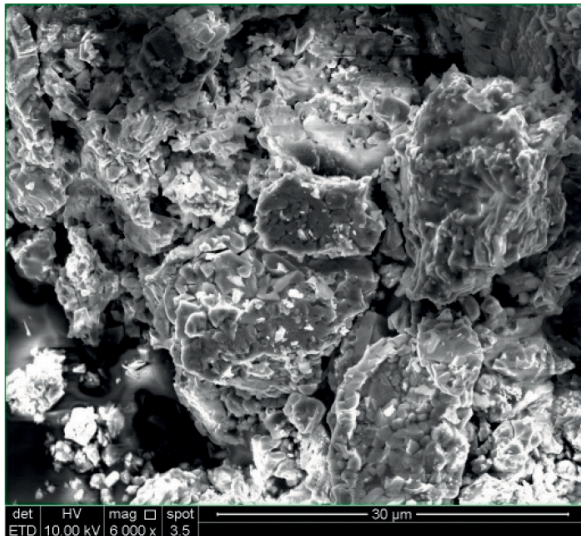
Weight %

| Anal | C-K | O-K | F-K | Si-K | K-K | Ti-K | Mn-K | Zr-L | Fe-L | Muut <2 % |
|------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| 1 | | 4.16 | | 0.58 | | 94.55 | | | | Na, Al |
| 2 | | 2.36 | | 37.71 | | 2.28 | | 19.38 | 38.26 | |
| 3 | | 12.52 | 6.97 | 14.57 | | | 20.61 | 45.33 | | |
| 4 | | | | 56.39 | | | | | 43.61 | |
| 5 | | 12.87 | | 6.19 | | 5.62 | 12.73 | 61.32 | | Na |
| 6 | | | | 87.83 | | | | | 12.17 | |
| 7 | 3.88 | 20.96 | 4.04 | 15.42 | 2.11 | 27.62 | 11.16 | 11.82 | | Na, Al |
| 8 | 1.64 | 25.88 | | | | 71.11 | | | | N |

Kuva 10 S-B 316L-lanka, katkaistu langan pää ja sen EDS -analyysinä

LANGASTA VARISTETTU JAUHE

Kolmas FESEM-tutkimus tehtiin katkaistusta langasta varisseesta jauheesta, jota laitettiin näytteenpitimen päällä olevan sähköä johtavan teipin päälle. Tällaista jauhetta on kuvassa 11. Jauheessa oli erityisen runsaasti Ti sekä oksideina että metallisena.



Kuva 11 S-B 316L -langasta varissutta jauhetta

Langasta varissut jauhe on analysoitu kuvassa 12. Jauhe oli rutiilivaltaista (TiO₂).

Weight %

| Anal | C-K | O-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Muut < 2 % |
|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 1 | 12.13 | 2.68 | 8.15 | 12.01 | 34.91 | 29.37 | | Na |
| 2 | 3.40 | 9.96 | 1.82 | | 55.35 | | 29.47 | |
| 3 | | 19.88 | 2.42 | 0.96 | 59.34 | 16.33 | | Na |
| 4 | | 16.18 | 2.86 | 1.13 | 65.29 | 10.64 | | Br, Na, F |
| 5 | | | | | 84.25 | | 15.75 | |
| 6 | 2.20 | 15.89 | 1.43 | | 41.88 | 1.70 | 35.40 | Br, F |
| 7 | 1.09 | | | | 98.91 | | | |
| 8 | 2.28 | | | | 97.72 | | | |
| 9 | 2.02 | 1.26 | 0.17 | | 84.36 | | 12.05 | Al |
| 10 | | 23.88 | 0.86 | | 63.44 | | 11.82 | |

Kuva 12 S-B 316L-langasta varissutta jauhetta ja sen EDS-analyysijä

Eri näytteistä tehdyt analyysit antoivat paremman kuvan langan jauheisällöstä kuin yksittäinen näytetyppi.

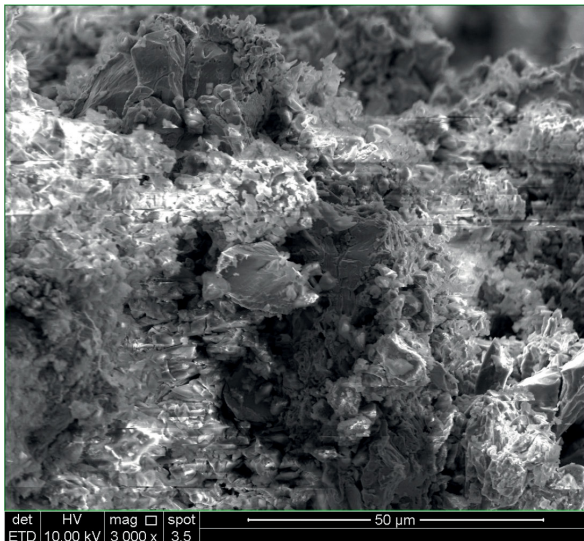
3.3.2 Shield-Bright 316L X-tra- lanka

KATKAISTUN LANGAN PÄÄ

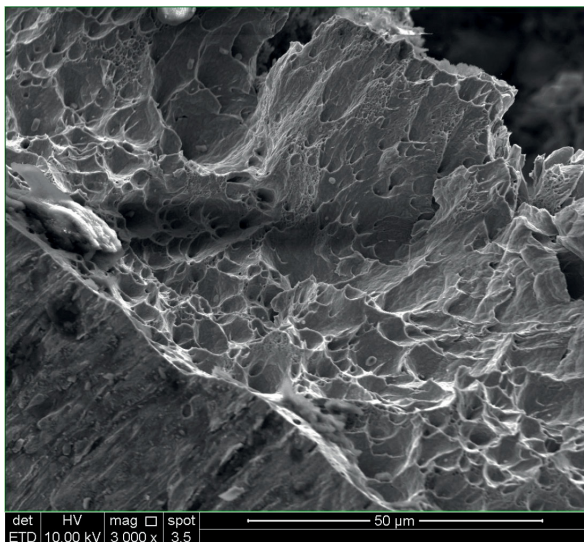
Shield-Bright 316L X-tra -langan täytettä tutkittiin katkaisemalla lanka taivuttamalla ja tutkimalla täytettä katkaisupinnasta, millä ehkäistiin osaa jauheena olevasta täytteestä valumasta pois tutkittavasta pinnasta.

Kuva 13 esittää katkaistun langan murtopintoja. Jauhe, joka täyttää koko langan sisustan, koostuu eri kokoisista partikkeleista. Langan teräspinta on murtunut sitkeästi.

Langan sisältämää jauhetta

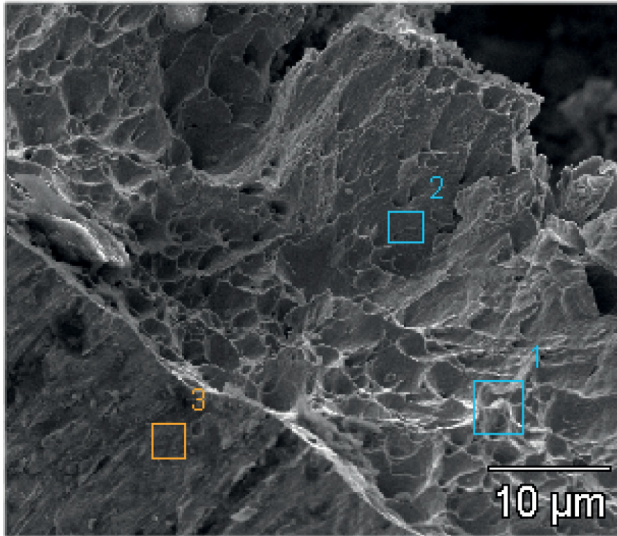


Täytelangan teräskuoren murtopintaa



Kuva 13 Leikkaukset S-B 316L X-tra -langan murtopinnasta

Kuva 14 selvittää täytelangan kuoren koostumusta. Kuori sisältää EDS-analyysin mukaan Fe, Cr, Ni jne., mutta ei Mo, jolloin se olisi ruostumatonta EN 1.4301-tyyppistä terästä, jonka sitkeästä murtopinnasta ei saada tarkkaa analyysiä.

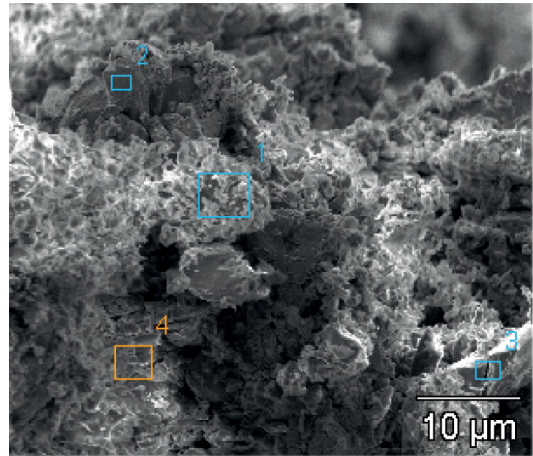


Weight %

| | C-K | Cr-K | Mn-K | Ni-L | Fe-L | Muut < 2 % |
|---|-------|-------|------|-------|-------|---------------|
| 1 | 14.98 | 32.61 | | | 52.41 | |
| 2 | 4.65 | 33.42 | 3.81 | 10.44 | 47.69 | |
| 3 | 12.49 | 30.21 | 4.19 | 7.24 | 44.61 | 0 |

Kuva 14 S-B 316L X-tra-langan kuoren murtopinnasta saatuja koostumuksia

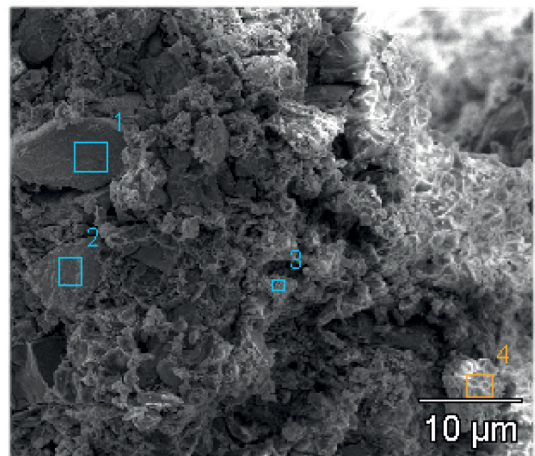
Shield-Bright 316L X-tra –täytelangan jauheesta löytyneet tärkeimmät aineet näkyvät kuvien 15 (a) ja (b) taulukoista. Kuvan (a) Si ja Ti esiintyivät hapen kanssa (oksideja), kun taas nikkeli lähes puhtaana. Fe ei esiinny. Kuvassa (b) Mo esiintyi lähinnä metallisissa seoksissa teräksen eri aineiden (esim. Fe, Cr) kanssa.



(a)

Weight %

| Anal | O-K | F-K | Si-K | K-K | Ti-K | Mn-K | Ni-L | Mo-L | Br-L | Muut <2% |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|-------------|
| 1 | 27.08 | 2.23 | 30.77 | 7.77 | 17.90 | | | 2.62 | 2.29 | Na |
| 2 | 1.70 | | 3.21 | | 1.92 | | 86.40 | | | |
| 3 | 23.43 | | 2.39 | 0.96 | 65.41 | 3.47 | | | | |
| 4 | 27.29 | 4.22 | 24.59 | 9.43 | 20.92 | | | | | Na |



(b)

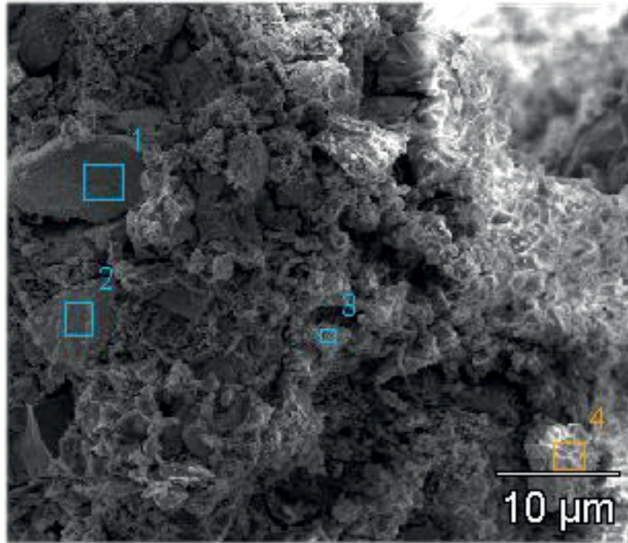
Weight %

| | O-K | F-K | Si-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Mo-L | Fe-L | Muut <2% |
|---|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 1 | | | 1.25 | 2.30 | 11.79 | | 65.48 | 13.95 | |
| 2 | 1.46 | | 1.30 | | 48.80 | | 35.26 | 6.14 | |
| 3 | 4.10 | | 2.42 | 1.65 | 3.29 | | 52.76 | 27.19 | K |
| 4 | 17.56 | 4.74 | 19.39 | 5.36 | | 40.89 | | | Br, K |

Kuva 15 S-B 316L X-tra-langan poikkileikkauksen koostumustuloksia

LANGASTA VARISTETTU JAUHE

Shield-Bright 316L X-tra –täytelangasta varistettua jauhetta on analysoitu kuvassa 16. Jauhe sisälsi Ti-Mn- ja Si-Mn-oksiedeja.



Weight %

| Anal | C-K | O-K | F-K | Si-K | Ti-K | Mn-K |
|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 2.88 | 24.02 | 1.26 | 0.78 | 53.07 | 17.99 |
| 2 | | 16.24 | | | 40.81 | 42.94 |
| 3 | | 14.40 | | | 39.69 | 45.91 |
| 4 | 3.33 | 16.55 | 4.75 | 11.87 | 8.00 | 55.50 |

Kuva 16 S-B 316L X-tra-langasta varissutta jauhetta ja saatuja koostumuksia

3.2.3 Yhteenvedo langoista Shield-Bright 316L ja Shield-Bright 316L X-tra

Molemmat täytelangat, Shield-Bright 316L ja Shield-Bright 316L X-tra, koostuivat pinnan teräskuoresta, joka oli austeniittista 1.4301-terästä (tai vastaavaa) ja kuoren sisällä olevasta jauheesta. Jotta hitsisulan koostumus saadaan AISI 316L-koostumusta vastaavaksi, on Mo seostettu näihin lankoihin jauheena.

Molemmissa langoissa kuonaa muodostavista aineista tärkein on Ti, joka esiintyi jauheissa pääasiassa oksidina (TiO_2). Mn ja Si toimivat myös kuonaa muodostavina aineina, seostettuna jauheeseen joko metallisena tai oksidina. Seostus voi tapahtua ferroseoksina, jolloin jauheesta pitäisi löytyä myös Fe.

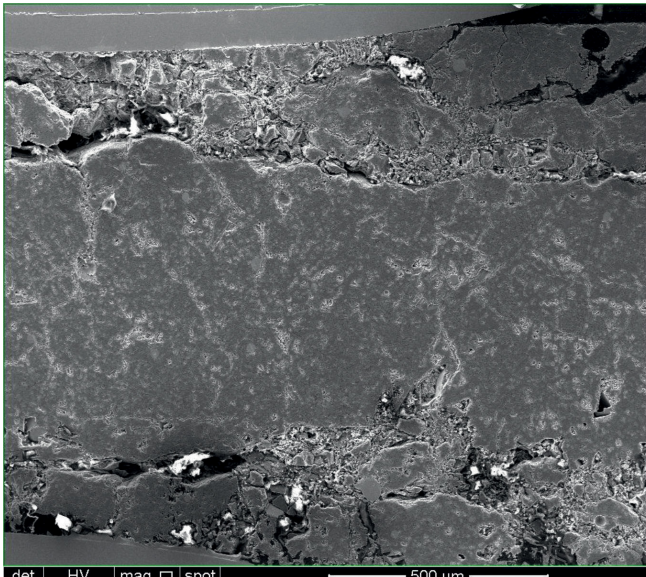
Rutiilitäytteen jalkolangan täytyy sisältää TiO_2/Ti lisäksi muitakin kuonaa muodostavia komponentteja, joilla saadaan kuona ”hitaammin” jähmettyväksi. Tällaisina alkuaineina käytetään Si, Mn ja Fe.

Langoissa esiintyi pienempiä määriä Zr, Na, F, Br ja K.

3.4 Hitsikuonien tutkimus

Hitsisulan pinnalle syntyy kuona langan täytteenä ja hitsisulassa olevista aineista sekä ilmasta tulevasta hapesta (ja typestä).

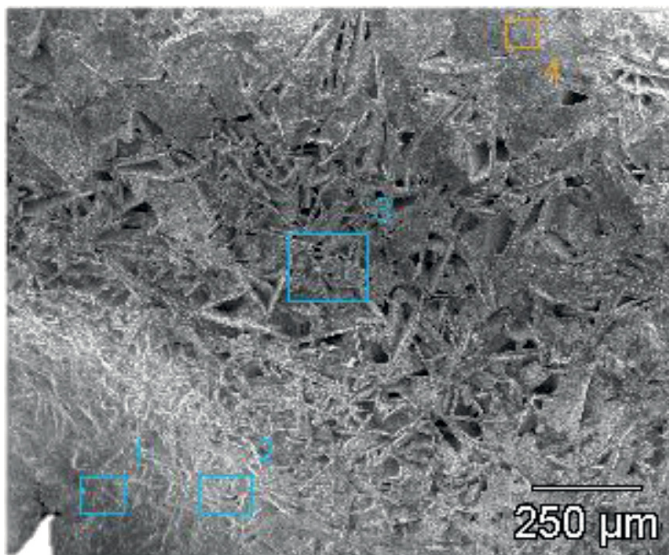
Hitsisulan pinnalle syntynyttä kuonaa analysoitiin sekä ylä- että alapinnalta. Kuonan alapinta oli hitsauksen loppuvaiheessa ollut kosketuksissa sulaan teräkseen. Lisäksi kuonakerroksen sisäosia tutkittiin jalkopienahitsistä irronneen kuonan murtopinnasta sekä valmistamalla hie kuonan poikkileikkauksesta, kuva 17. Ylä- ja alapinnoistaan kuona oli lohjennut, mutta sisäosistaan ehjä.



Kuva 17 Kuonan poikkileikkaushie SEM:llä kuvattuna, S-B 316L-jalkopienahitsi

3.4.1 Shield-Bright 316L-1.4509-jalkopiena

Kuvassa 18 on jalkopienahitsistä itsestään irronneen *kuonan yläpintaa* ja sen koostumustietoa. Kuona oli verkkomaista, puikoista muodostunutta. Kuonassa oli aukkoja, jonka ympäristöä kuvassa 15 on tutkittu. Kuonan yläpinta sisälsi kaikissa analyyseissä Ti, Mn, Na ja K, joissakin myös F, Cr, Fe ja Zr.

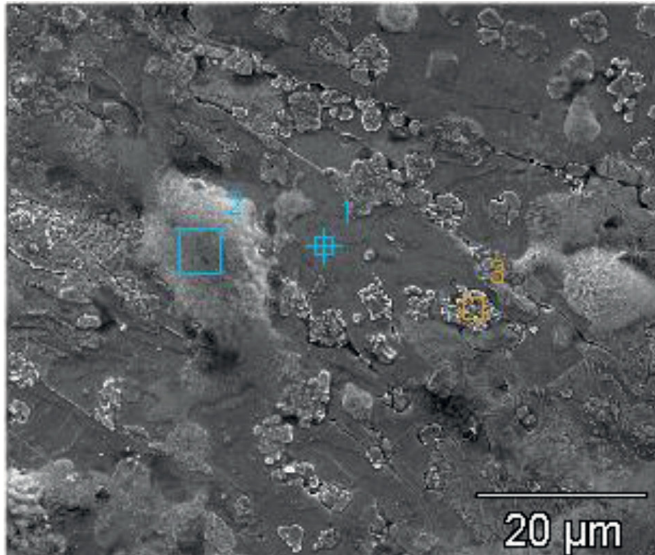


Weight %

| | O-K | F-K | Na-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Fe-L | Zr-L | Muut <2% |
|---|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|
| 1 | 19.60 | 5.90 | 37.31 | 4.17 | 13.13 | | 19.15 | | | Si |
| 2 | 16.88 | | 25.76 | 4.01 | 25.19 | | 17.59 | 10.57 | | |
| 3 | 14.16 | 0.00 | 12.63 | 2.48 | 37.13 | 10.49 | 9.96 | 10.42 | 1.66 | Si |
| 4 | 19.89 | 0.00 | 18.35 | 2.85 | 42.77 | 5.91 | 5.87 | | 2.86 | Si, Al |

Kuva 18 S-B 316L-langalla hitsatun jalkopienahitsin itsestään irronneen kuonan yläpinta ja sen EDS-analyysejä

Kuvassa 19 esitetään saman jalkopienahitsin kuonan alapintaa, joka kuonan ja hitausliitoksen jäähmettyessä on ollut kosketuksissa terässulaan.



Weight %

| Anal | O-K | Na-K | Si-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Zr-L | Muut <2% |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| 1 | 0.00 | | | 81.59 | 7.07 | 6.35 | 4.74 | Al |
| 2 | 20.14 | 12.94 | 22.57 | 5.29 | 4.35 | 25.29 | 5.06 | Al, K |
| 3 | 0.00 | 8.75 | 2.29 | 44.77 | 11.80 | 11.72 | 20.05 | Al, K |

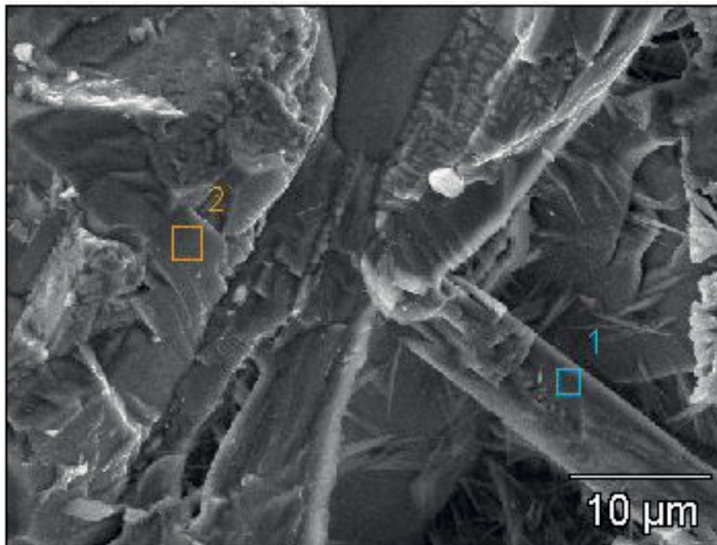
Kuva 19 S-B 316L-langalla hitsatun jalkopienahitsin itsestään irronneen kuonan alapinta ja sen EDS-analyysit

Tarkastellun jalkopienahitsin kuonan alapinnassa esiintyi periaatteessa kolmenlaista rakennetta:

- Tasainen pohjakerros, jossa Ti, Cr, Mn, Zr
- Isoja kasaumia, joissa Mn, Si, Na, Ti, Cr, Zr ja runsaasti O₂
- Runsaasti erillispartikkeleita, joissa Ti, Zr, Cr, Mn, Na, Si

Kerros (1) poikkesi muista siinä, että se ei sisältänyt Na.

Kuvassa 20 on Shield Bright 316L-jalkopienahitsin murrettua poikkileikkausta EDS-analysoituna. Rakenne koostui suurehkoista Ti -oksidisauvoista, joissa oli hieman Cr.

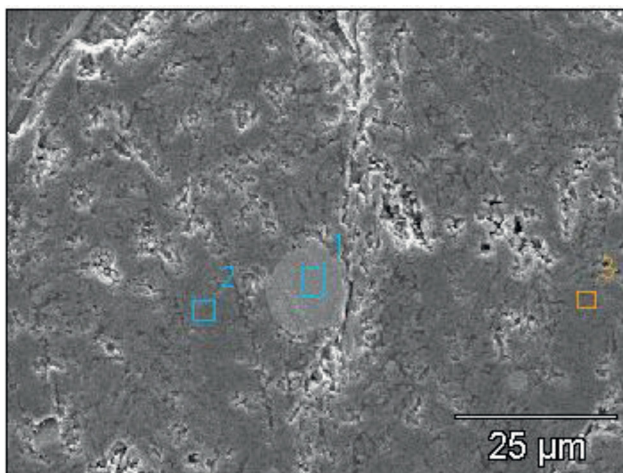


Weight %

| Anal. | O-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Muut <2% |
|-------|-------|-------|------|------|----------|
| 1 | 23.65 | 64.99 | 7.51 | 2.57 | P |
| 2 | 15.95 | 74.46 | 7.32 | | P |

Kuva 20 S-B 316L-jalkopienahitsin kuonan murtopinta ja sen EDS-analyyseja

Kuonaan oli sekoittuneena metallisia pallomaisia partikkeleita, joissa oli teräksen alkuaineita, esim. Fe, Cr, Mo, kuva 21. Nämä ovat hyvin pieniä pisaroita (sumun osasia), jollaisina hitsattava teräs siirtyy valokaaren välityksellä kiinteästä langasta sulaan.



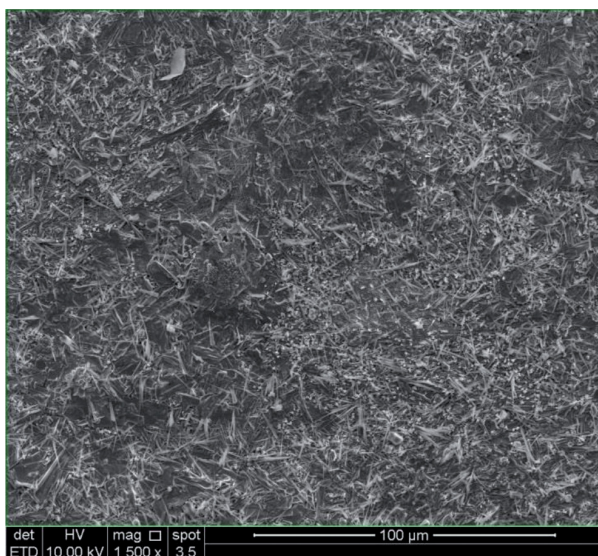
Weight %

| Anal. | O-K | Ti-K | Cr-K | Fe-K | Mo-L | Muut <2% |
|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|
| 1 | | | 22.77 | 69.10 | 8.13 | |
| 2 | 19.92 | 72.46 | 5.64 | | | P |
| 3 | 20.58 | 69.26 | 8.66 | | | P |

Kuva 21 S-B 316L-jalkopienahitsin kuonan poikkileikkausie ja sen EDS-analyyseja

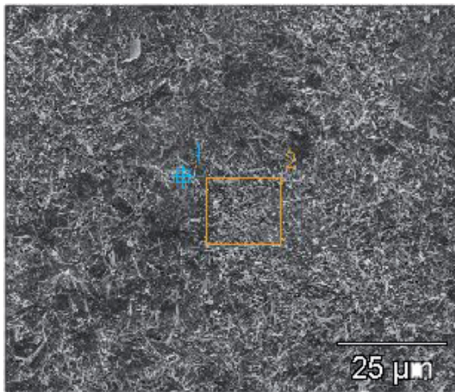
3.4.2 Shield-Bright 316L-1.4509-lakipiena

Kuva 22 esittää lakipienahitsin *kuonan yläpintaa*, jonka rakenne oli hyvin säännöllinen, ”puikoista” koostuva.



Kuva 22 S-B 316L-langalla hitsatun lakipienahitsin itsestään irronneen kuonan yläpinta

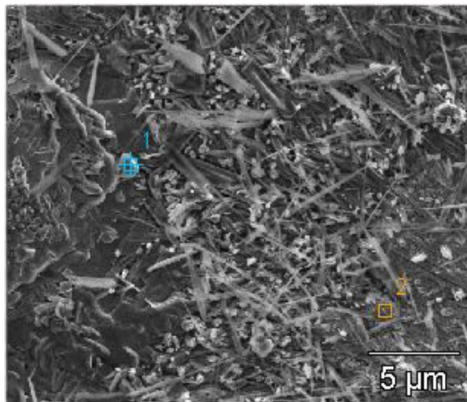
Kuvat 23 ja 24 esittävät kuonan yläpinnan mikrorakennetta ja koostumusta analyysineen eri suurennuksilla. Molemmissa tapauksissa kuonan perustana oli Ti-oksidi, mutta verkkomainen rakenne sisälsi myös Mn ja Fe sekä myös Cr, oksideina.



Weight %

| Anal | O-K | F-K | Na-K | Si-K | Ti-K | Mn-K | Fe-L |
|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 16.01 | | 5.94 | | 19.65 | 24.61 | 33.80 |
| 2 | 28.04 | 3.44 | 16.66 | 2.67 | 49.18 | | |

Kuva 23 S-B 316L-langalla hitsatun lakipienahitsin itsestään irronneen kuonan yläpinta ja sen EDS-analyysijä

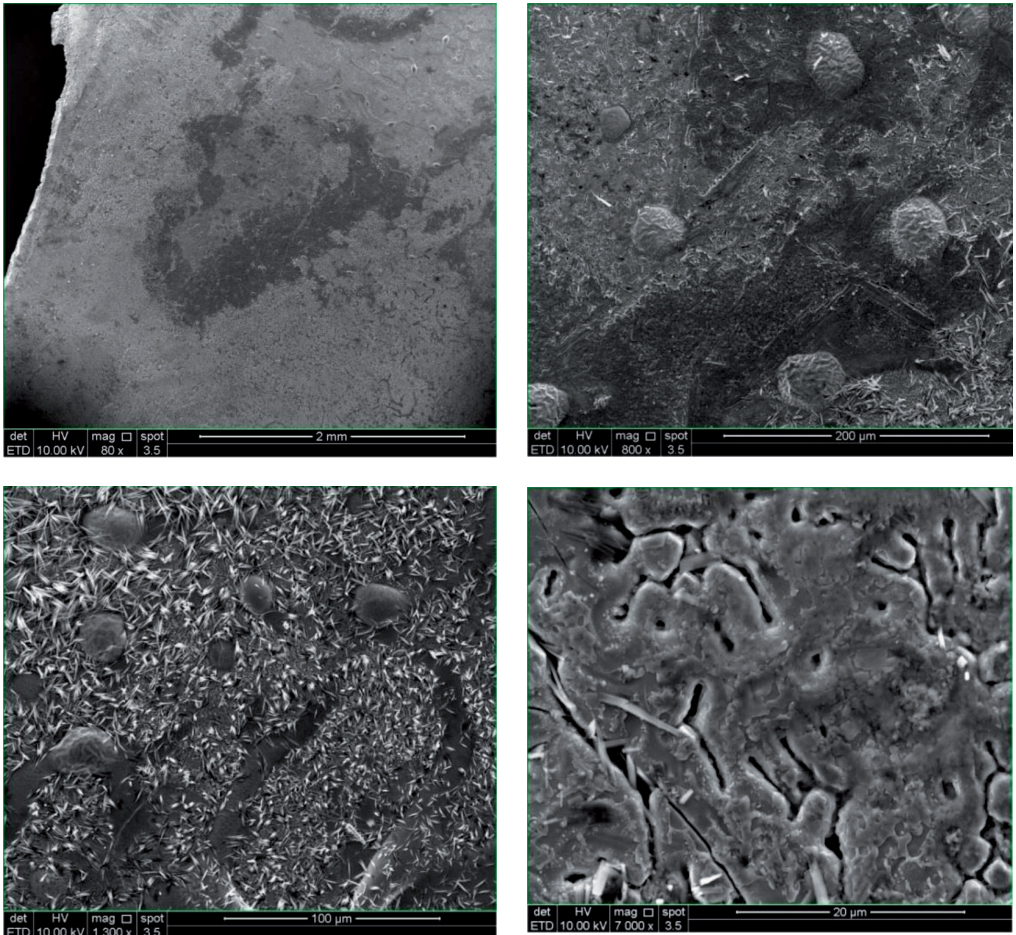


Weight %

| Anal | C-K | O-K | Na-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Zr-L |
|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 10.36 | 23.60 | 9.62 | 27.74 | | 28.68 | |
| 2 | | 30.28 | 7.31 | | 39.66 | | 22.75 |

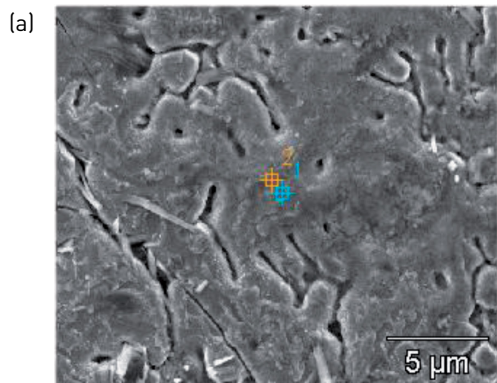
Kuva 24 S-B 316L-langalla hitsatun lakipienahitsin itsestään irronneen kuonan yläpinta ja sen EDS-analyysijä

Kuvassa 25 on laki-pienahitsin kuonan *alapintaa* kuvattuna eri suurennuksilla. Puikko-maista rakennetta esiintyi paikoitellen ja välissä löytyi pyöreälinjaista mikroraken-
netta.



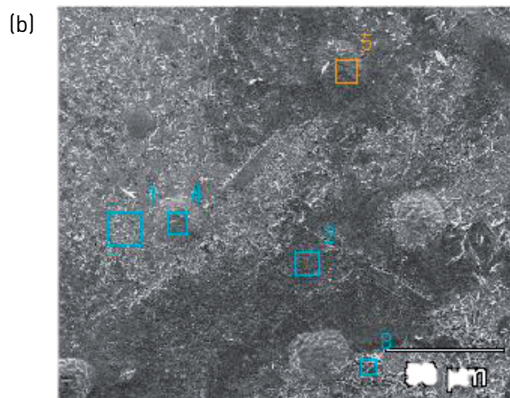
Kuva 25 S-B 316L-langalla hitsatun laki-pienahitsin itsestään irronneen kuonan alapinta

Kuvassa 26 a) ja b) on analysoitu lakipienahitsin alapinnan eri mikrorakenteiden koostumusta. Na ja C nousivat tässä voimakkaasti esiin, samoin kuin O₂.



Weight %

| Anal | C-K | O-K | Na-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.75 | 16.62 | 0.89 | 54.33 | 17.46 | 9.95 |
| 2 | | 14.84 | 6.43 | 51.73 | 15.90 | 11.09 |



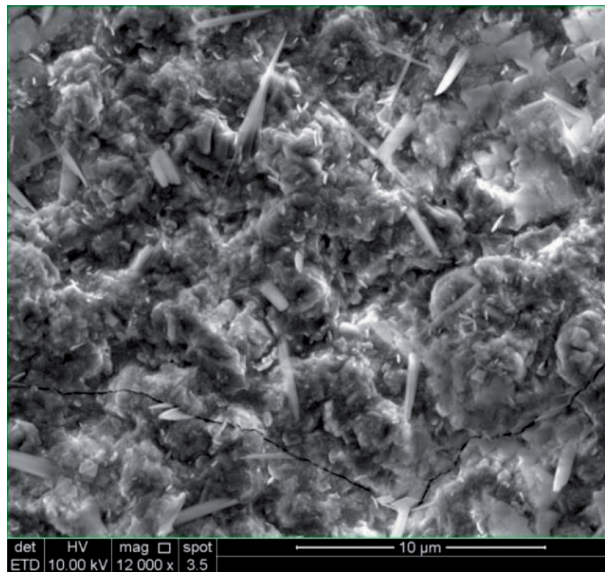
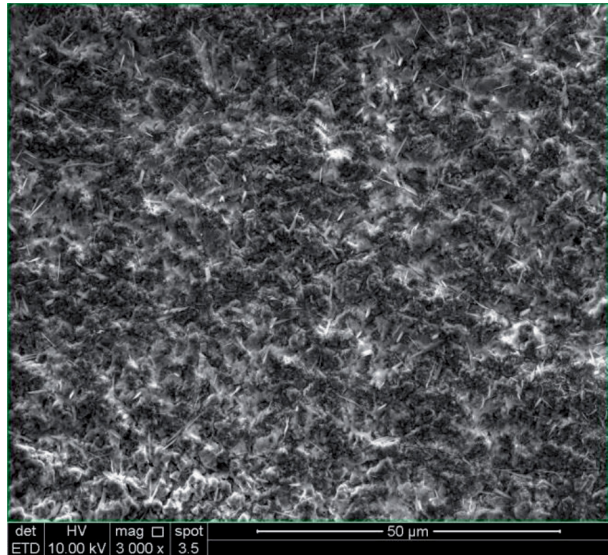
Weight %

| Anal | C-K | O-K | Na-K | Si-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Zr-L | Muut <2% |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------------|
| 1 | 4.70 | 24.04 | 17.59 | 1.99 | 39.48 | 12.20 | | | |
| 2 | 9.87 | 26.14 | 26.28 | 1.39 | 15.96 | 6.36 | 9.85 | 4.13 | |
| 3 | 18.95 | 37.87 | 43.18 | | | | | | |
| 4 | 8.62 | 18.91 | 31.95 | 6.86 | 3.62 | 2.22 | 26.84 | | Al, K |
| 5 | 11.35 | 22.50 | 30.43 | 10.60 | | | 25.12 | | |

Kuva 26 S-B 316L-langalla hitsatun lakipienahitsin itsestään irronneen kuonan alapinta ja sen EDS-analysejä

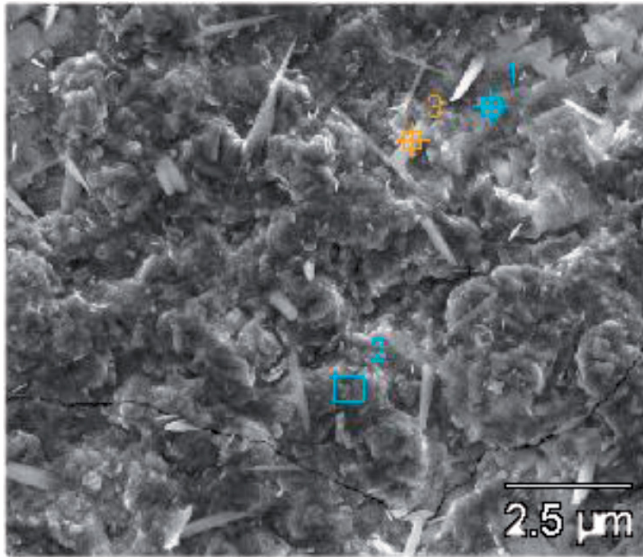
3.4.3 Shield-Bright 316L X-tra-1.4509-jalkopiena

Kuvassa 27 on Shield-Bright 316L X-tra jalkopienahitsin irrotetun *kuonan yläpintaa*. Kuona oli jähmettynyt hyvin kidemäistä rakennetta muistuttavaksi.



Kuva 27 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun jalkopienahitsin irrotetun kuonan yläpinta eri suurennoksilla

Kuvassa 28 esitetään edellä olevan mikrorakennetyypin EDS -analyysitulokset. Näissä lakipienahitsin kuonan yläpinnalta otetuissa analyyseissä Mn hallitsi koostumusta voimakkaasti, ja varsinainen rutiili ei tule esille juuri lainkaan.

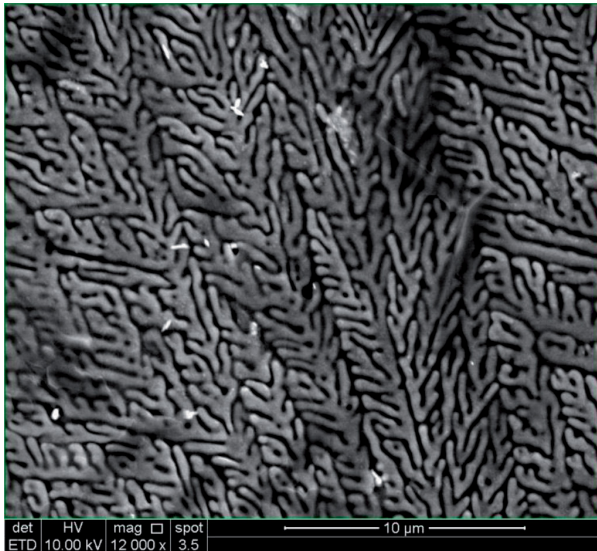


Weight %

| Anal | C-K | O-K | F-K | Na-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Mn-K |
|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 1 | | 17.45 | 7.54 | 9.20 | 1.02 | 5.60 | 2.02 | 4.99 | 52.19 |
| 2 | | 22.25 | | | | 6.99 | | | 70.77 |
| 3 | 2.56 | 22.24 | 2.64 | 4.05 | 1.13 | 7.41 | 2.56 | 6.29 | 51.11 |

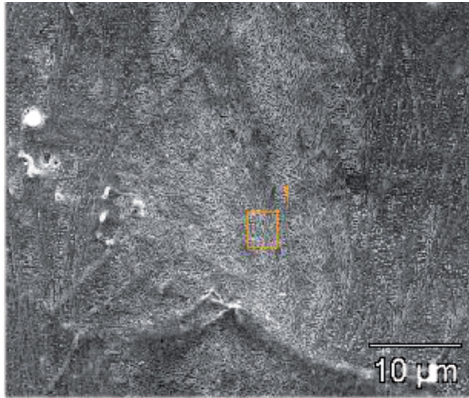
Kuva 28 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun jalkopienahitsin irrotetun kuona yläpinta, sen mikrorakenne ja EDS-analyysejä

Kuvassa 29 on Shield-Bright 316L X-tra jalkopienahitsin irroitettun *kuonan alapintaa*. Rakenne oli tasaisen dendriittimäistä.



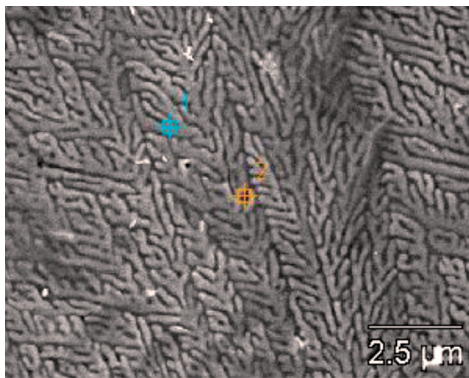
Kuva 29 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun jalkopienahitsin irrotetun kuonan alapinta eri suurennoksilla

Kuvassa 30 on tuloksia em. dendriittirakenteen EDS-analyysistä. Pinnassa esiintyi Ti:n ja Mn:n lisäksi teräksen seosainetta Cr. Dendriittirakenteen ”rungoissa” Ti -pitoisuus oli viimeiseksi jähmettyneitä alueita hieman korkeampi.



Weight %

| Anal | C-K | O-K | Na-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Br-L |
|------|------|-------|------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 1 | 1.91 | 22.49 | 1.65 | 10.65 | 2.00 | 29.06 | 14.38 | 14.17 | 3.69 |

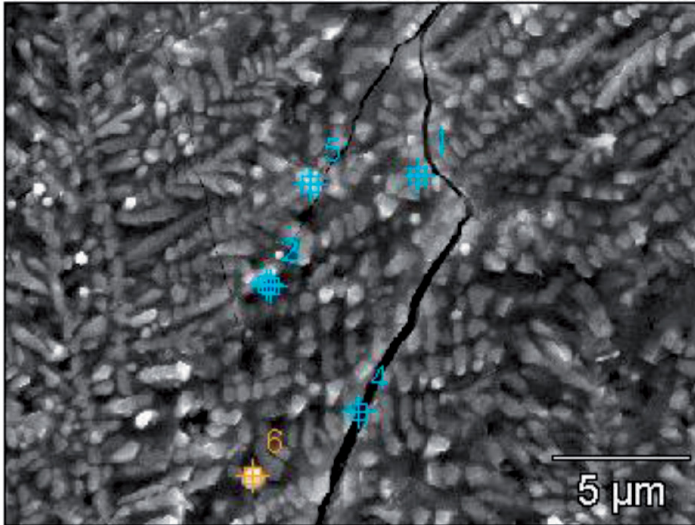


Weight %

| Anal | C-K | O-K | Na-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 1.01 | 22.49 | 1.07 | 0.82 | 6.35 | 1.05 | 34.47 | 20.01 | 12.74 |
| 2 | | 19.55 | 1.81 | 2.00 | 19.31 | 4.07 | 26.52 | | 26.74 |

Kuva 30 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun jalkopienahitsin irrotetun kuonan alapinta, sen mikrorakenne ja EDS-analyysejä

Kuvassa 31 on Shield Bright 316L X-tra-langalla hitsatun jalkopienahitsin kuonan murtopintaa ja siitä saatuja EDS -analyyskejä. Kuonan Ti -pitoisuus pysytteli 20-25 % tasolla. Kuona sisälsi lisäksi 15-20 % SiO₂, 13-15 % Cr ja 14-15 % Mn, mikä voi tulla terässulasta.

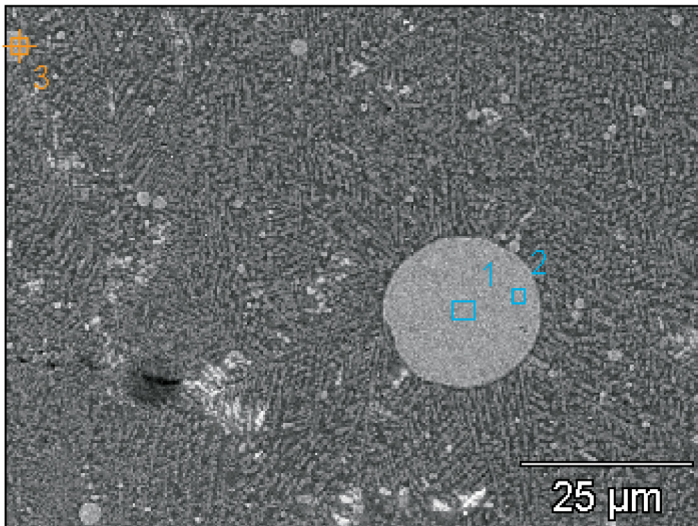


Weight %

| Anal. | O-K | Na-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 24.09 | 1.44 | 1.85 | 16.38 | 3.05 | 23.49 | 14.96 | 14.74 |
| 2 | 23.59 | 1.94 | 2.10 | 17.87 | 3.86 | 21.60 | 13.40 | 15.63 |
| 3 | 23.43 | 2.30 | 1.99 | 17.53 | 3.49 | 21.89 | 14.13 | 15.24 |
| 4 | 23.83 | | 0.89 | 8.32 | 1.54 | 33.91 | 20.89 | 10.63 |
| 5 | 19.96 | 2.44 | 2.09 | 18.87 | 3.68 | 21.33 | 14.28 | 17.35 |
| 6 | 24.64 | 3.30 | 2.09 | 14.23 | 2.62 | 24.71 | 14.44 | 13.98 |

Kuva 31 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun jalkopienahitsin kuonan murtopintaa ja sen EDS -analyyskejä

Kuvassa 32 on SEM-tulostus ja EDS-analyysejä Shield Bright 316L X-tra-langalla hitsatun jalkopienahitsin kuonasta valmistetusta poikkileikkaushieestä. Kuvassa näkyy palloja, joiden koostumus riippui koosta: suuri pallo oli metallinen, sisältäen teräksen seosaineita ja rautaa, kun taas pieni pallo oli hapettunutta (Ti/Cr jne) metallia.



Weight %

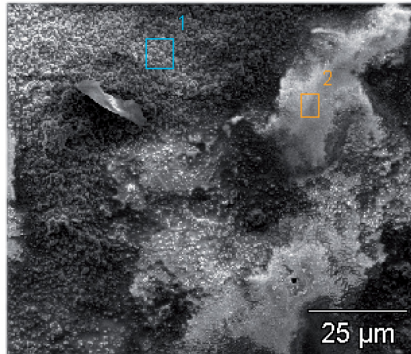
| Anal. | C-K | O-K | Si-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Fe-K | Ni-K | Muut |
|-------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|------|-------|
| | | | | | | | | | <3% |
| 1 | 6.99 | | 0.54 | | 17.68 | | 69.95 | 4.83 | |
| 2 | | | | | 19.80 | | 74.78 | 5.42 | |
| 3 | 5.58 | 22.40 | 6.72 | 33.34 | 21.12 | 7.49 | | | K, Br |

Kuva 32 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun jalkopienahitsin kuonan poikkileikkaushie ja sen EDS -analyysejä

3.4.4 Shield-Bright 316L X-tra-1.4509-lakiapiena

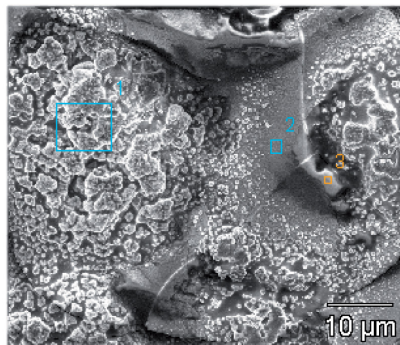
Kuvassa 33 on Shield-Bright 316L X-tra -lakiapienahitsin itsestään irronneen **kuonan yläpintaa**. Kuvassa (a) on yläpinta, joka oli osittain sulanut (analyysi 2) ja osittain rakeisessa (analyysi 2) muodossa. Molemmissa alkuaineet olivat voimakkaasti hapettuneita (happipitoisuus). ”Sulaneessa” alueessa Mn oli matalampi kuin ”rakeisessa”. Kuvan (b) kohdalla kuonassa on myös korkeita Cr -pitoisuuksia.

Molemmissa tapauksissa, (a) ja (b), Si:llä oli voimakas rooli.



(a)
Weight %

| Anal | O-K | F-K | Na-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|-------|
| 1 | 26.99 | 1.09 | 7.90 | 1.38 | 22.72 | 3.99 | 4.22 | | 27.10 |
| 2 | 34.66 | | 3.10 | 0.93 | 28.21 | 3.76 | 4.96 | 10.54 | 8.53 |



(b)
Weight %

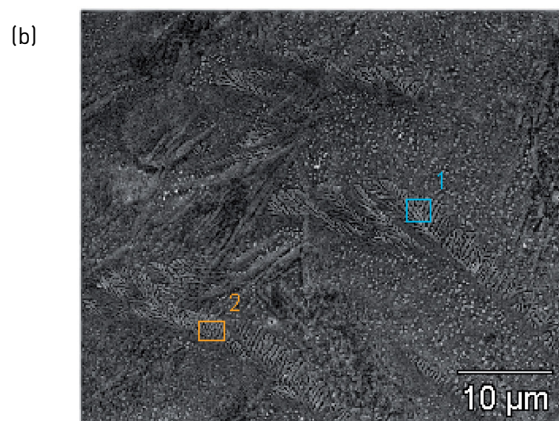
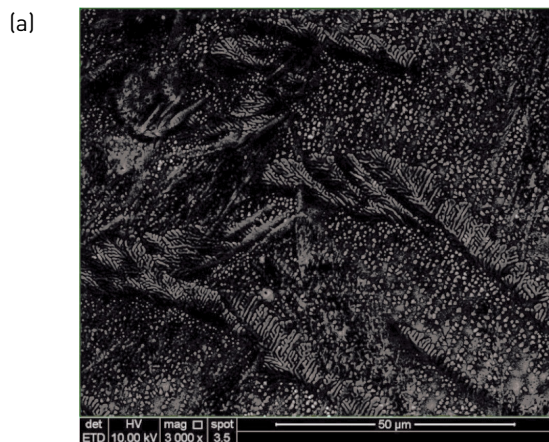
| Anal | O-K | F-K | Na-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 17.08 | 3.99 | 3.14 | 1.19 | 24.72 | 3.49 | | | 46.39 |
| 2 | 30.98 | | 4.32 | | 33.11 | 5.31 | | 24.86 | |
| 3 | 1.99 | | | | 20.60 | 21.77 | 19.75 | | 35.89 |

Kuva 33 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun lakiapienahitsin itsestään irronneen kuonan yläpinta ja sen EDS -analyysit

Kuvassa 34 on Shield-Bright 316L X-tra lakipienahitsin itsestään irronneen kuonan alapintaa. Kuva 34 (a) esittää kuonan jähmettymisrakennetta, joka koostui ”dendriittipakkauksista”, jotka olivat kasvaneet eri suunnissa.

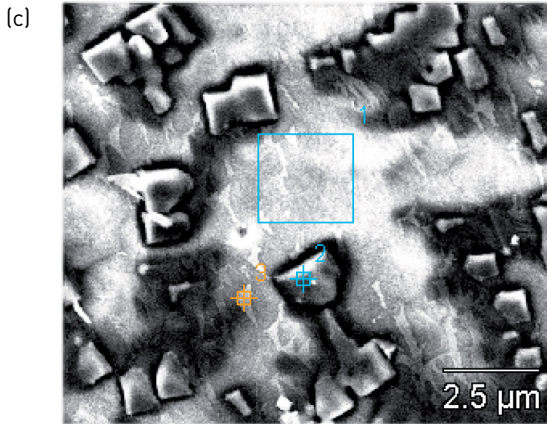
Nämä kuonasta syntyneet ”dendriittipaketit” sisälsivät suurempina määrinä Ti, Si, Cr ja Mn, sekä happea, eli ne olivat pääasiassa oksideina, kuva 34 (b).

Kun tarkasteltiin ”dendriittipakkausten” sisäistä rakennetta, todettiin kuvasta 31 (c), että dendriitin runko-osa oli Ti-valtaista faasia, joka sisälsi myös Cr ja Mn, mutta vähän Si (analyysi 2). ”Dendriittirunkojen” välisissä alueissa Si nousi selvästi korkeammaksi kuin ”rungoissa” (analyysit 1 ja 3). Tällainen oksidien jakauma johtui siitä, että korkeimmassa lämpötilassa ensin syntyi Ti-valtainen ”dendriittirungon” faasi ja ”rungon” väliin jäivät matalammassa lämpötilassa oksidit, joissa oli Ti-oksidien lisäksi muita oksideja, mm. Si.



Weight %

| Anal | O-K | Na-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 20.74 | | 1.04 | 8.41 | 1.46 | 33.28 | 16.54 | 18.52 |
| 2 | 24.76 | 2.49 | 1.66 | 13.17 | 2.68 | 25.66 | 13.37 | 15.00 |



Weight %

| Anal | O-K | F-K | Na-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K |
|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1 | 23.94 | 1.73 | 2.32 | 2.87 | 29.24 | 4.80 | 2.99 | | 23.37 |
| 2 | 14.90 | | 0.29 | 0.63 | 3.15 | 0.41 | 37.00 | 15.09 | 9.66 |
| 3 | 39.30 | | 4.94 | 4.48 | 43.86 | 7.42 | | | |

Kuva 34 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun lakiipienahitsin itsestään irronneen kuonan alapinta ja sen EDS-analyysit.

3.4.5 Yhteenveto hitsikuonista

Shield-Bright 316L- ja Shield-Bright 316L X-tra-lankojen hitsattuna tuottamat kuonat teräksestä EN 1.4509 tarkasteltuna poikkesivat mikrorakenteeltaan toisistaan. Asentolangan Shield-Bright 316L kuonaa peittivät kerroksena sekä ylä- että alapinnalla teräväkärkiset puikkomaiset muodostelmat. Shield-Bright 316L X-tra-langan kuona oli alapinnaltaan pääasiassa jähmettymisessä syntyneitä dendriittirakennetta. Vastaavasti yläpinnalla oli vaihtelevaa rakennetta, osaksi dendriittiä ja ”osittain sulanutta” aluetta.

Shield-Bright 316L X-tra-langalla syntyneen dendriittimäisen kuonan rakenne syntyi, kun Ti-valtainen faasi jähmettyi ensin dendriittien rungoksi ja myöhemmin jäännösulasta jähmettyi myös Si-pitoista faasia.

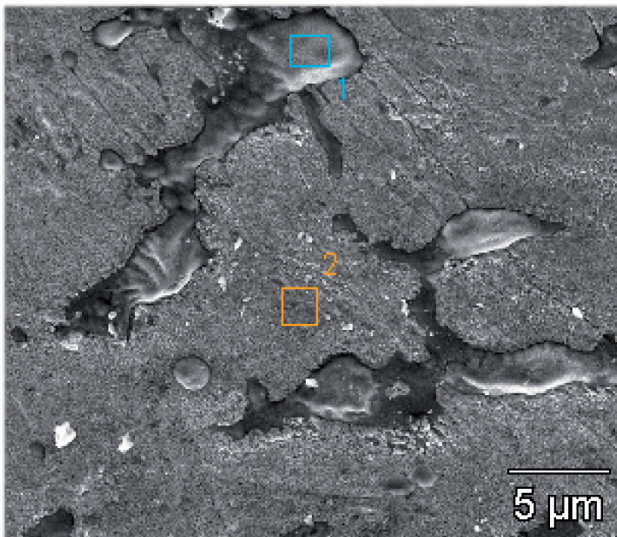
Kuonassa esiintyi teräksen seosaineita Cr ja myös Si ja Mn, joten hitsisulan koostumus voi vaihdella seosaineiden kuonautumisesta johtuen.

Hitsikuonassa esiintyi erilaisia valokaarta stabiloivia ja aineen siirtymistä edistäviä aineita, kuten Ca-karbonaattia, Zr jne., jotka tekevät kuonan hallitsemisen asentohitsauksessa monimutkaiseksi. (ks. kohta 1.4)

3.5 Hitsiliitoksen pinnan tutkimus

3.5.1 Shield-Bright 316L-1.4509 jalkopiena

Kuvassa 35 esitetään Shield-Bright 316L –täytelangalla hitsatun jalkopienahitsin pinta.



Weight %

| Anal | O-K | Na-K | Al-K | Si-K | K-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Fe-L | Ni-L | Zr-L | Mo-L |
|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 1 | 19.77 | 7.41 | 1.37 | 25.56 | 4.18 | 3.60 | 3.89 | 24.60 | | | 8.36 | |
| 2 | 11.49 | 1.00 | 0.25 | 1.55 | | | 24.18 | | 50.74 | 7.92 | | 2.87 |

Kuva 35 S-B 316L-langalla hitsatun jalkopienahitsin pinta ja sen EDS – analyysijä

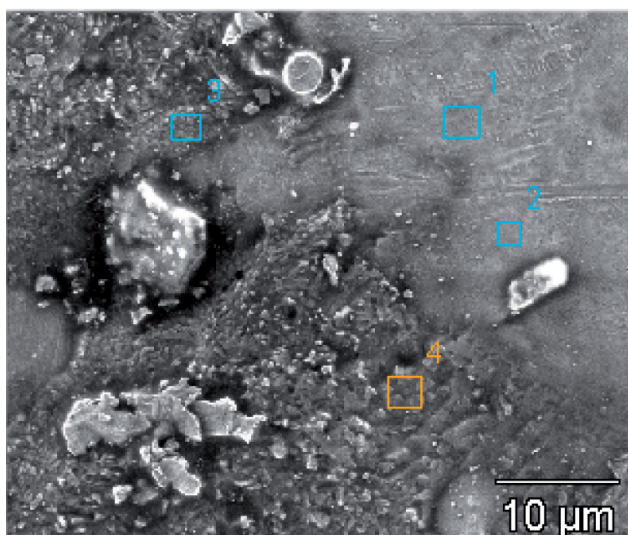
Pinnan hapettuma (alueanalyysi 2) sisälsi teräksen seosainekomponentteja Cr, Ni, Mo, Fe, Si ja O₂. Tämä tarkoitti, että teräs oli hapettunut pinnastaan.

Hitsiliitoksen pinnassa olevat ”kuonalautat” sisälsivät runsaasti Si ja Mn sekä vähemmän Zr, Cr, Ti, K, Na, Al sekä O₂. Korkeahko happipitoisuus merkitsi sitä, että alkuaineet olivat oksideja.

3.5.2 Shield-Bright 316L X-tra-1.4509 lakipiena

Kuva 36 esittää Shield-Bright 316L X-tra lakipienahitsin pintaa. Siinä on alueita (analyysit 1 ja 2), joissa esiintyi teräksen seosaineita Cr, Ni, Mo, näistä Cr korkeina pitoisuuksina. Hiilen korkeaa pitoisuutta selvitettiin. Analyysien 1 ja 2 alueet olivat terästä, jossa Cr oli ilmeisesti hapettunut (mutta ei anna O₂-indikaatiota EDS-analyysissä oksidikerroksen ohuuden vuoksi?).

Hitsin pinnassa esiintyi (analyysit 3 ja 4) lisäksi selvää kuonaa, joka sisälsi Ti, Si, Cr ja Mn. Näissäkin analyyseissä hiili oli korkea, mille ei löydetty selvää syytä.



Weight %

| Anal | C-K | O-K | Si-K | Ti-K | Cr-K | Mn-K | Fe-L | Ni-L | Muut <2% |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|--------------|
| 1 | 14.80 | | 0.48 | | 28.14 | | 45.52 | 9.56 | Mo |
| 2 | 10.07 | | | | 30.44 | | 59.49 | | |
| 3 | 33.82 | 15.37 | 10.66 | 16.78 | 10.42 | 8.95 | | | Al, Na, K |
| 4 | 48.52 | 17.56 | 14.70 | 13.79 | | | | | Al, Na, K |

Kuva 36 S-B 316L X-tra-langalla hitsatun lakipienahitsin pinta ja sen EDS -analyysijä

3.5.3 Yhteenveto hitsin pintatutkimuksesta

Hitsien pinnoissa oli sekä ”puhdasta” hapettunutta aluetta että alueita, joihin oli tarttunut kuonaa.

”Puhdas” alue sisälsi teräksen seosainekomponentteja Cr, Ni, Mo, Fe, Si ja O₂, jotka merkitsivät sitä, että teräs oli hapettunut pinnastaan.

Hitsiliitoksen pinnassa olevat ”kuonalautat” sisälsivät runsaasti langan täytteenä olevia kuonakomponentteja Si, Ti, Na, Al, Zr, K sekä happea. Lisäksi tässä kuonassa on Cr ja Mn, jotka viittasivat teräksen seostukseen. Nämä aineet olivat pääasiassa oksideina.

4. Johtopäätökset ja yhteenveto

Tässä tutkimuksessa suoritettiin MAG -hitsauksia saman valmistajan (Esab) kahdella erityyppisellä täytelangalla Shield-Bright 316L (asentolanka) ja Shield-Bright 316L X-tra (jalkolanka), jotka molemmat olivat rutiilityyppisiä hitsauslankoja. Hitsauksen perusaineina olivat ferriittinen EN 1.4509 ja austeniittinen EN 1.4318 ruostumaton teräs. Kuonatutkimus tehtiin EN 1.4509 perusaineeseen hitsattujen hitsausliitosten kuonille.

4.1 Hitsattavuus ja laatu

Jalkopienana hitsauksen suorittaminen oli molemmilla täytelangoilla (Shield-Bright 316L ja Shield-Bright 316L X-tra) EN 1.4509- ja EN 1.4318-teräksille sujuvaa. Myös hitsausliitosten silmämääräinen laatu oli hyvä. A-mitat olivat jalkopienahitseille pienessä haarukassa ja ainevahvuuden (3,0 mm) luokkaa:

| | |
|------------------------------------|--------|
| Shield-Bright 316L/EN 1.4509 | 2.7 mm |
| Shield-Bright 316L/EN 1.4318 | 2.8 mm |
| Shield-Bright 316L X-tra/EN 1.4509 | 3.1 mm |
| Shield-Bright 316L X-tra/EN 1.4318 | 3.0 mm |

Lakipienanan hitsaaminen toimi molemmilla langoilla ja molemmille teräksille, tosin hitsaaminen haetti hieman Shield-Bright 316L X-tra-langalla. Silmämääräinen laatu Shield-Bright 316L-langalla hitsatussa hitsissä oli hyvä, mutta Shield-Bright 316L X-tra-langalla hitsatussa ei täyttänyt laatuvaatimuksia. A-mitat olivat lakipienahitseille:

| | |
|------------------------------------|--------|
| Shield-Bright 316L/EN 1.4509 | 3.9 mm |
| Shield-Bright 316L/EN 1.4318 | 2.9 mm |
| Shield-Bright 316L X-tra/EN 1.4509 | 4.8 mm |
| Shield-Bright 316L X-tra/EN 1.4318 | 4.1 mm |

Alhaalta ylös -hitsaus oli vaivatonta Shield-Bright 316L-langalla molemmille teräksille. Myös hitsien silmämääräinen laatu oli hyvä, a-mitat niinkin suuret kuin 4,0/3,8

mm. Sen sijaan hitsaus Shield-Bright 316L X-tra-langalla onnistui vain vaivalloisesti, ”täppäämällä”. Silmämääräinen laatu oli kuin epäjatkovaa ”pulssihitsausta”, a-mittaa ei mitattu.

Ylhäältä alas -hitsaus oli Shield-Bright 316L-lisäaineella sujuvaa molemmille teräksille. Silmämääräinen laatu oli myös molemmille teräksille hyvä. A-mitat olivat vain 2.3/2.4 mm, joten ne eivät olleet tavoitteen (min 3.0 mm = ainevahvuus) mukaisia. Shield-Bright 316L X-tra-langalla ylhäältä alas -hitsaus oli vaivatonta molemmille teräksille ja silmämääräinen laatu erinomainen. A-mitat olivat vain 2.3/2.3 mm, myöskään ne eivät olleet tavoitteen mukaisia.

4.2 Langat ja kuonat

FESEM -tekniikalla analysoitiin Shield-Bright 316L (asentolanka) - ja Shield-Bright 316L X-tra (jalkolanka) -langat, ja niillä hitsatut EN 1.4509-teräksen jalko- ja lakipienahitsien hitsikuonat ja sekä hitsin pinnat. Molemmat langat olivat ns. rutiilityypisiä (TiO_2 -pohjaisia), joissa langan kuori oli AISI 304L-tyyppistä terästä ja Mo oli seostettu langan sisällä olevaan jauheeseen. Seostus voi tapahtua ferroseoksina, jolloin jauheesta voi löytyä myös Fe. Langoissa esiintyi pienempiä määriä Zr, Na, F, Br ja K, joita käytetään valokaaren ja kuonan säätöön.

Erot jalko- ja asentolankojen välillä tulivat muusta kuonaseostuksesta (SiO_2) sekä kuonan viskositeettia ja valokaarta säätävistä aineista (esim. fluoridit, F). Langat tuotivat hitsauksissa mikrorakenteeltaan erilaiset kuonat. Shield-Bright 316L X-tra-täytelangon kuona sulii kokonaan ja jähmettyi hitsisulaa vasten dendriittimäisellä mekanismilla. Shield-Bright 316L-täytelangon kuona muodosti neulasmaisesta matosta koostuvan patjan hitsisulan pintaan.

Kuonissa esiintyi melko runsaasti Mn ja Cr, joista erityisesti Cr esiintyminen ei olisi toivottavaa. Mn voi myös olla jauheen ainesosanen.

4.3 Hitsin pinta

Hitsien pinnat olivat hitsauksen jälkeen ohuen oksidikerroksen peittämiä. Tämä oksidikerros voi näyttää silmämääräisesti ”kiiltävältä” tai mattamaiselta. Sekä Shield-Bright 316L- että Shield-Bright 316L X-tra-langalla hitsattaessa hitsien pintaan jäi myös kiinni tarttunutta kuonaa.

Hitsien pintojen oksidikerros sisälsi teräksen seosainekomponentteja Cr, Ni, Mo, Fe, Si ja O_2 , joka merkitsi sitä, että teräs oli hapettunut pinnastaan. Tämä oksidikerros voidaan yleensä poistaa peittaamalla.

Hitsiliitoksen pinnassa olevat ”kuonalautat” sisälsivät langan täytteenä olevia kuonakomponentteja Si, Ti, Na, Al, Zr, K sekä happea. Lisäksi tässä kuonassa oli Cr ja Mn, jotka viittaavat teräksen seostukseen. Nämä aineet olivat pääasiassa oksideina. Nämä

kuonalautat voivat olla merkittävä riski hitsin korroosionkestävyydelle ja lauttojen poistaminen voi olla työlästä.

4. 4 Tulosten hyödyntäminen ja jatkotutkimus

Tutkimuksessa tehtiin hitsauskokeita asento- ja jalkolangalla, teräksille EN 1.4509 ja EN 1.4318 pienahitseinä eri asennoissa. FESEM -tutkimus tehtiin vain teräksen EN 1.4509 hitsien kuonille ja hitsiliitoksen pinnoille. EN 1.4318 -teräksen hitsiliitoksen pintojen tutkimuksen odotetaan jatkossa tuovan täydentäviä, hyödyllisiä tuloksia.

Hitsikuonan tutkimustuloksia voidaan hyödyntää ymmärtämään kaarihitsausprosessin kuonan käyttäytymistä, seos- ja epäpuhtausaineiden reagoimista hitsisulan ja kuonan välillä ja sitä kautta hitsin puhtausasteen kehittymistä deoksidaation ja kuonasuojan kautta.

Kuonan käyttäytymistä asentohitsauksessa päästään ymmärtämään paremmin, kun ymmärretään kuonan koostumuksen ja jähmettymisen yhteyttä, sekä saadaan koostumuksesta mittaamalla todellista tietoa. Nyt tutkimus keskittyi pääasiassa kuonakerroksen pintoihin. Jatkossa selvitetään myös kuonakerroksen sisäistä rakennetta.

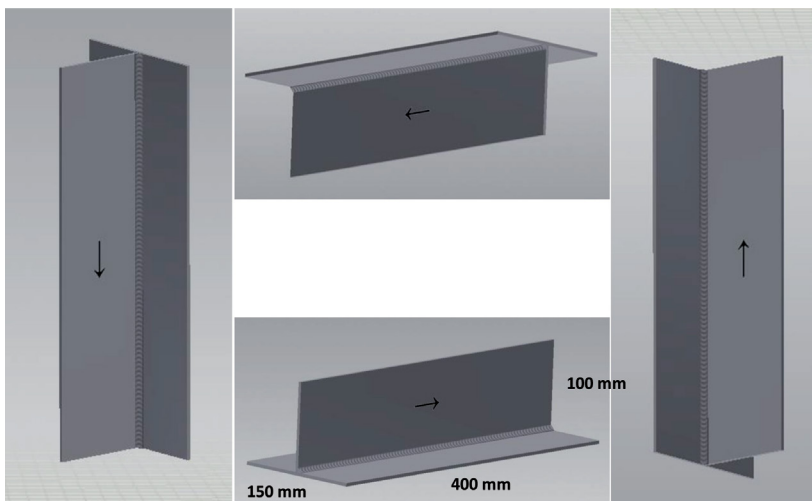
5 Viitteet

- /1/ Ulla Annanpalo, Antero Kyröläinen, Timo Kauppi, Ruostumattoman teräksen pienahitsauksen eroja umpi- ja ydintäytelangoilla – hitsaajan näkökulma, Hitsaustekniikka 1/2013.
- /2/ Pentti Karjalainen, Ruostumattoman teräksen täytelankahitsauksen metallurgiaa, Hitsaustekniikka 4-5/1990.
- /3/ Shigeki Nishiyama, Yukinobu Mastushita ja Toshiharu Maruyama, Ruostumattomat täytelangat, Hitsaustekniikka 4/1995.
- /4/ Robert Killing, Angewandte Schweissmetallurgie: Anleitung für die Praxis, Deutscher Verlag für Schweißtechnik DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf 1996, SS. 34-53 und 78-100.
- /5/ ASM Handbook, Volume 6 Welding, Brazing, and Soldering, pp. 55-63: D.L. Olson, S. Liu, R.H. Frost, G.R. Edwards, and D.A. Fleming (Colorado School of Mines) Nature and Behavior of Fluxes Used for Welding.
- /6/ Welding Metallurgy, Volume I Fundamentals, George E. Linnert, Fourth Edition 1994, American Welding Society, Miami, Florida, USA.
- /7/ In-Ho Jung, Overview of the applications of thermodynamic databases to steelmaking processes, Dept. of Mining and Materials Engineering, McGill University, Canada, available at CALPHAD: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry 34(2010) 332-362.
- /8/ Michael Fiedler, Wirtschaftliche Vorteile bei der Fulldrahtschweissung, "Seminar Eisen und Stahl", 3. ÖGS Workshop, Zeit: Mittwoch, 17. April 2013, Ort: Fa. Zultner, Schmiedlstraße 7, 8042 Graz
Zeit: Mittwoch, 24. April 2013, Ort: Fa. Zultner, Fallegasse 24, 9020 Klagenfurt.
- /9/ Hitsauslisäaineet, täytelangat ja täytesauvat ruostumattomien ja tulenkestävien terästen MAG-täytelankahitsaukseen ja suojakaasuttomaan täytelankahitsaukseen. Luokittelu. Standardi SFS-EN ISO 17633, Suomen Standardisoimisliitto SFS
- /10/ Jan Hilkes & Leo van Nassau, "Modern design criteria for stainless steel welding consumables", Lincoln Smitweld Bv, Netherlands.

6 Liitteet

6.1 Liite 1: Hitsattavat liitokset ja asenno

Hitsaustavat:ylhäältä alas, alapeina, alhaalta ylös ja laki. Hitsattujen koekappaleiden mitat.



6.2 Liite 2: Hitsauslaitteet ja koeympäristö



Tämän tutkimuksen tavoitteena oli oppia ymmärtämään ruostumattomien terästen täytelanka-MAG-hitsauksessa tapahtuvia kuonailmiöitä, jotta hitsausprosessin toimivuutta voitaisiin ymmärtää aiempaa monipuolisemmin. Kaarihitsausprosesseista MAG-hitsaus on puikkohitsauksen jälkeen laajimmalle levinnyt menetelmä, kuonalla täytetyt langat ovat MAG -hitsauksessa yleistymässä. Voi olla, että tulevaisuudessa osa lankahitsauksesta tehdäänkin kuonatäytelangalla ilman suojaakaasua. Tutkimuksen hitsauskokeet tehtiin KTAMK:n Jaloteräs Studiossa Torniossa ja FESEM-tutkimukset KTAMK:n metallilaboratoriossa Kemissä. Tämän tutkimuksen kirjallisuustarkastelun perusteella täytelanka-MAG-hitsauksen kuonametallurgian tutkimustuloksia on julkaistu hyvin vähän.

Esab Oy on osallistunut tutkimukseen toimittamalla koehitsausten lankamateriaalit sekä tietoa MAG-täytelankahitsauksesta.