

Janne Rajala

Sulametallihauraus lujien terästen kuumaupotuksissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka

Insinöörityö

20.11.2014

Tekijä Otsikko	Janne Rajala Sulametallihauraus lujien terästen kuumaupotuksissa
Sivumäärä Aika	48 sivua + 7 liitettä 20.11.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Ohjaajat	Tuotekehityspäällikkö Esa Virolainen Lehtori Arto Yli-Pentti
<p>Opinnäytetyö liittyy Tekesin rahoittamaan SHOK-ohjelmaan Breakthrough Steels and Applications (FIMECC BSA) ja sen projektiin 2: Design beyond present codes. Projektiryhmä koostui usean organisaation edustajista. Metropolia Ammattikorkeakoulun lisäksi mukana oli SSAB, Aurajoki Oy, Boliden Kokkola Oy, VTT, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Kuor-maväline Oy ja Majava Group Oy.</p> <p>Tämä opinnäytetyö jakautui kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa tutkittiin sulametalli-haurauden esiintymistä SSAB:n Optim 960 QC teräksestä valmistetuissa levynäytteissä, joita oli särnäetty eri säteillä. Levynäytteiden avulla yritettiin selvittää tunkeumaneste- ja magneettijauhetarkastuksen soveltuvuutta mahdollisten säröjen havaitsemiseen. Toisessa osassa työtä tutkittiin SSAB:n teräksistä S500 Laser ja Optim 700 Plus valmistetuilla putki-profiili näytteillä erilaisten hitsaustapojen ja leikkausmenetelmien sekä nikkelseostuksen vaikutusta sulametallihaurauteen.</p> <p>Työn perusteella S500 Laser on sinkittävässä lähes puhtaalla ja nikkelpitoisella sinkillä. Sen sijaan Optim 700 Plus teräksessä esiintyi sulametallihaurautta, mikä vaikuttaisi olevan hallittavissa oikean tyyppisellä konepajatyöllä. Magneettijauhetarkastus toimii sulametalli-haurauden aiheuttamien säröjen havaitsemiseen kuumasinkityksen jälkeen. 960 QC näyt-teissä ei havaittu säröjä.</p>	
Avainsanat	sulametallihauraus, kuumasinkitys, ultraluja teräs, magneettijauhetarkastus

Author Title	Janne Rajala Liquid metal embrittlement in hot dipping ultra high strength steels
Number of Pages Date	48 pages + 7 appendices 20 November 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Materials Technology and Surface Engineering
Specialisation option	Materials Technology and Surface Engineering
Instructors	Esa Virolainen, Senior Product Development Manager Arto Yli-Pentti, Lecturer
<p>The thesis is linked to the Tekes-funded SHOK-program called <i>Breakthrough Steels and Applications</i> (FIMECC BSA) and its second project titled “Design Beyond the present codes”. The project team consisted of representatives of several organizations: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, SSAB, Aurajoki Oy, Boliden Kokkola Oy, VTT Technical Research Centre of Finland, Lappeenranta University of Technology, Kuormaväline Oy and Majava Group Oy.</p> <p>This thesis was divided into two sections. In the first part, the occurrence of liquid metal embrittlement (LME) was studied in plate samples made of SSAB’s Optim 960 QC steel that had been bent in different radii. The suitability of non-destructive testing methods such as dye penetrant inspection (DPI) and magnetic particle inspection (MPI) were tested to detect possible fractures in plate samples formed by LME. In the second part of the thesis, it was studied how different nickel content(s?) and welding and cutting methods affect the occurrence of LME. Tubular structure samples were manufactured of SSAB’s steels S500 Laser and Optim 700 Plus.</p> <p>The results showed that S500J can be hot dip galvanized in pure and nickel-alloyed zinc. However, in Optim 700 Plus steel exhibited LME, which appears to be manageable with the right type of workshop processes. Magnetic particle inspection is suitable for the detection of fractures formed by LME in hot-dip galvanizing. There were no indications of LME in Optim 960 QC plate samples.</p>	
Keywords	liquid metal embrittlement, hot dip galvanizing, ultra high strength steels, magnetic particle inspection

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sulametallihauraus	3
3	Ultralujat teräkset	5
3.1	Kemiallinen koostumus	5
3.1.1	Seostamattomat rakenneteräkset	5
3.1.2	Seostetut rakenneteräkset	7
3.2	Ultralujat teräkset	8
3.3	Ultralujien terästen valmistus	9
4	Kuumaupotus	10
4.1	Kuumasinkitys	10
4.1.1	Epäpuhtauksien poisto	11
4.1.2	Suolahappopeittäus	11
4.1.3	Juoksuteaine	13
4.1.4	Upotus sulaan sinkkiin	13
4.1.5	Pinnoitteen laatu	13
4.2	Rakenteen suunnittelu ja muotoilu	14
4.2.1	Yleisperiaatteita	15
4.2.2	Turvallisuustekijöitä	16
4.2.3	Muodonmuutokset	17
4.2.4	Erilaiset pinta- ja teräslaadut samassa rakenteessa.	17
4.2.5	Kierteelliset osat	18
4.3	Raudan ja sinkin väliset reaktiot sekä sinkkipinnoitteen muodostuminen	18
5	Sopiva menetelmä säröjen etsintään	19
5.1	Magneettijauhetarkastus	19
5.1.1	Periaate	19
5.1.2	Käyttö	21
5.2	Tunkeumanestetarkastus	21
5.3	Tarkastus	21
6	Kokeellinen osuus	23

6.1	Plasmaemissio	24
6.2	Sinkin seosaineet	25
6.2.1	Standardiliuokset	26
6.2.2	Analysointi ja sinkkikylvyn koostumus	26
7	Koesarjat	28
7.1	Levynäytteet	32
7.1.1	Kuumaupotus	32
7.1.2	Tutkimusmenetelmien testaus säröjen etsintään	34
7.2	Putkinäytteet	36
7.2.1	Kuumaupotukset	37
7.2.2	Tarkastukset	38
7.3	Tulokset	39
7.4	Johtopäätökset	41
7.4.1	Tutkimusmenetelmän valinta	41
7.4.2	Sulametallihauraus	42
7.5	Jatkotutkimukset	44
	Lähteet	45
	Liitteet	
	Liite 1. Sinkkikylvyn analysointi ja koostumus	
	Liite 2. Hitsauspöytäkirjat putkinäytteistä	
	Liite 3. Kooste putkien sahauksista	
	Liite 4. 0,05 % nikkelseostuksen analyysi	
	Liite 5. 0,1 % nikkelseostuksen analyysi	
	Liite 6. Sinkittyjen putkinäytteiden käsittelytiedot	
	Liite 7. Mikrorakennekuvia säröistä	

1 Johdanto

Energian ja erityisesti fossiilisten polttoaineiden hinnan jatkuva nousu on asettanut paineita terästehtaille, konepajoille ja tuotteiden loppukäyttäjille kehittää niiden prosesseja ja tuotteita kaikin tavoin kustannustehokkaammiksi.

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana FIMECC BSA – Applications of high strength galvanized steel structures (APPGASS)-projektia. Projektiryhmä koostui usean organisaation edustajista. Metropolia Ammattikorkeakoulun lisäksi mukana oli SSAB, Aurajoki Oy, Boliden Kokkola Oy, VTT, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Kuormaväline Oy ja Majava Group Oy. Opinnäytetyön sisällön laatimisessa ja työn etenemisessä aktiivisesti mukana olivat Jussi Minkkinen ja Esa Virolainen SSAB:ltä. Sinkin ja nikkelin toimitti Jorma Panula Boliden Kokkola Oy:stä. Aurajoki Oy:ssä tapahtuneista sinkityksistä vastasi Marko Rantala.

Markkinoilla on lujia teräksiä, joiden käytöllä pystytään vastaamaan nykyajan haasteisiin. Rakenteet erilaisissa sovelluksissa pystytään muotoilemaan entistäkin kevyemmiksi ja lujemmiksi.

Majava Group Oy:n ja Kuormaväline Oy:n tavoite teräsrakenteiden suunnittelussa on siirtyä yhä enemmän kevyempiin rakenteisiin. Painonsäästö on tärkeää esimerkiksi trailerin jarrumääräysten suhteen, jos mennään yli rajan ja vaaditaan jarruja niin kustannukset kasvavat selvästi. Kuljetuskaluston painon keventyessä säästetään polttoainekuluksessa tai kapasiteettia voidaan nostaa. Myös tuotteen käyttöikä ja visuaalisen laadun parantaminen on tavoiteltavaa.

Lujien terästen käyttö aiheuttaa kuitenkin uusia haasteita tuotteen pintakäsittelylle. Pintakäsittelymenetelmistä kuumasinkitys on tehokkain tapa kasvattaa teräksen käyttöikää. Kuumasinkityksen etuja on myös alhainen hinta, pinnoituksen tasalaatuisuus ja vaikeapääsyiset pinnat pinnoittuvat vähintään yhtä paksusti kuin sileät pinnat. Pinnoite kestää myös hyvin mekaanista rasitusta.

Työn tavoitteena oli tuottaa SSAB:lle ja Boliden Kokkola Oy:lle lisää tietoa sinkkikylvyn seosaineiden vaikutuksesta lujien terästen sinkityksessä sekä luoda pohjaa kuumasinkitykseen liittyvien haasteiden ymmärtämiseen ja ratkaisujen löytämiseen. Työn tavoitteena oli myös löytää pintaa rikkomatonta menetelmää sulametallihaurauden havaitsemiseksi.

Erityisvaatimuksia tuovat etenkin kylmämuovautetut putket, joiden epäsuotuisa jäännösjännitystilä saattaa korkeilla yli 500 Mpa:n murtolujuuksilla aiheuttaa teräksen murtumista kuumasinkityksessä. Kuumasinkityksen aikana tapahtuvaa teräksen murtumista kutsutaan sulametallihaurauksiksi. Sulametallihaurautta ja siihen vaikuttavia tekijöitä on tutkittu aikaisemmin erilaisissa yhteisprojekteissa laajalti kotimaassa esimerkiksi Erikoislujat kuumasinkityt teräsputkipalkit tulevaisuuden teräsrakenteissa (eLusiter) ja Euroopassa esimerkiksi Hot-dip-zinc-coating of prefabricated structural steel components.

Sulametallihaurauden mekanismia ei vielä tunneta täysin, mutta on saatu selville tekijöitä, jotka sen esiintymiseen vaikuttaa. Selvää on että sulametallihaurautta esiintyy rakenneteräksissä joissa jäännösjännitystilä on hyvin korkea. Sulametallihaurautteen vaikuttaa myös konepajatyön laatu sekä sinkityksessä käytettävät sinkkipadan seosaineet. Sulametallihaurauden täydellistä hallintaa varten on vielä paljon tutkittavaa, miten mitkään tekijät siihen vaikuttavat.

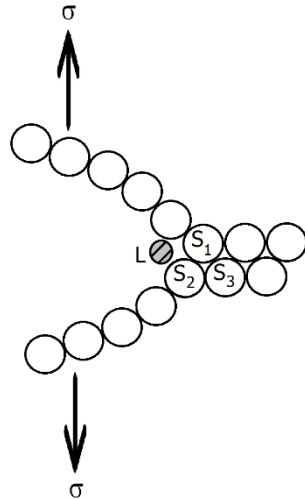
Tässä opinnäytetyössä tutkittiin erilaisten rakenteiden valmistustapojen sekä nikkeli- ja mangaanin eroavien sinkin koostumusten vaikutusta sulametallihaurautteen sekä keuhko- ja magneettijauhetarkastusta sulametallihaurauden aiheuttamien säröjen havaitsemiseen.

2 Sulametallihauraus

Yleensä käytettävät rakenneteräkset korrosoituvat helposti. Korroosion ehkäisemiseksi on monia tapoja pintakäsittellä teräkset. Kuumaupotuksessa tapahtuva teräksen pinnoittaminen toisella metallilla on perinteinen tapa suojata terästä korroosiolta. Tämän prosessin aikana osa upotetaan sulaan metalliin, jonka aikana kiinteä ja nestemäisen metalli ovat suorassa kontaktissa. Seurauksena saattaa olla mekaanisten ominaisuuksien muutoksia tai ääritapauksissa jopa osan vaurioituminen. [1, s. 1.] Haurasmurtumaa voi esiintyä myös, kun kaksi eri metallia ovat kontaktissa kiinteässä muodossa. Silloin haurasmurtuman aiheuttavan metallin höyryfaasi kulkeutuu pintadiffuusion välityksellä murtuvan metallin ydintyneeseen säröön. [2, s. 493.]

Vuonna 1928 Peter Rehbinder käynnisti tutkimuksen kuumaupotuksen yhteydessä ilmenneestä tuntemattomasta vaurioitumisilmiöstä. Rehbinderin vaikutuksena tunnettua, pinta-aktiivisen väliaineen vaikutusta materiaalien mekaanisiin ominaisuuksiin, joka ilmenee pintaenergian alenemisena, on tutkittu monen tyyppisillä kiinteillä materiaaleilla. Kiinteiden aineiden ympäristölle herkkä mekaaninen käyttäytyminen on esiintyvyydeltään ja mekanismeiltaan hyvin monimuotoinen. Ääritapauksissa metallit ja metalliseokset menettävät lujuutensa ja vaurioituvat joutuessaan kontaktiin nestemäisen metallin kanssa. Ilmiötä kutsutaan sulametallihaurauksiksi. [1 s. 1.]

Sulametallihaurauden uskotaan olevan seurausta nestemäisen metallin kemisorptiosta aiheutuneen kiinteän metallin koheesiovoimien heikkenemisestä korkean jännityksen alueilla. Kuvassa 1 kuvataan, kuinka nestemäisen metallin atomin L uskotaan heikentävän kiinteän metallin atomien S_1 ja S_2 välistä sidosta särön kärjessä, aiheuttaen sidoksen murtumisen. Kun S_1 ja S_2 sidos on murtunut, nestemäisen metallin atomi L heikentää atomien S_1 ja S_3 välistä sidosta mahdollistaen särön etenemisen nopeasti. [2, s. 494.]



Kuva 1. Mallikuva kuinka nestemäinen metalli aiheuttaa kiinteän metallin koheesiovoimien alenemista [2, s. 495]

S.P.Lynch on esittänyt vaihtoehtoisen haurasmurtumamekanismin sulametallihaurautteen, jossa murtolujuuden menetys johtuu metallissa jo olleesta vauriosta eikä koheesiovoimien menetyksestä. Tässä tapauksessa säröt ydintyvät pienellä jännityksellä aiheuttaen plastista muodonmuutosta. [1, s. 494—495.]

Aikaisemmissa tutkimuksissa on kuumasinkityksessä käytetyistä seosaineista tinan havaittu ainakin alentavan teräksen myötörajaa. Vauriokohdasta tehdyssä alkuaineanalyysissä oli havaittu tinaa aivan särön kärjessä. Myös lyijyä oli kulkeutunut rauta-sinkkikerrokseen hyvin lähelle teräksen pintaa. [3, s. 13, 52.]

Tuntemalla sulametallihaurausilmiön mekanismit, voidaan löytää ratkaisuja estämään jännitetyn teräksen haurasta käyttäytymistä tai ilmiötä voidaan hyödyntää esimerkiksi lujien terästen murskaamiseen tai pehmentämiseen. [1, s. 1, 2.]

3 Ultralujat teräkset

Tarve ultralujien terästen kehittämiseksi on syntynyt käyttäjien ja suunnittelijoiden vaatimuksista saavuttaa kevyempiä ja lujempia rakenteita. Rakenteen ainevahvuuden las-
kiessa tulee käytettävän teräksen myötörajan olla korkea. Ultralujiksi teräksiksi kutsu-
taan teräksiä, joiden lujuusluokka on suurempi kuin 700 MPa. [4, s. 4.]

Ultralujia teräksiä on laajalti käytössä kuljetussektorilla, maansiirtoajoneuvoissa, au-
tonostureissa, metsäkoneissa, prosessiteollisuudessa, kaivos- ja mineraaliteollisuus-
teollisuudessa. Lujien terästen käyttöä puoltaa mahdollisuus lisätä tuotteen käyttötarkoituksen
mukaista kapasiteettia. Suhteellisesti suuri lujien teräksien loppukäyttäjä nykypäivänä on
nosto- ja kuljetusvälineiteollisuus mukaan lukien hyötyajoneuvoteollisuus. Näiden teolli-
suudenalojen tuotteiden suunnittelussa tavoitellaan usein mahdollisimman pientä oma-
painoa ja suurta hyötykuormaa. [4, s. 4 ; 5, s. 9.]

3.1 Kemiallinen koostumus

Tavallisesti rakenneteräkset voidaan jaotella seostettuihin ja seostamattomiin teräksiin.

3.1.1 Seostamattomat rakenneteräkset

Teräslajien määrittely ja luokittelu standardin SFS-EN 10020 mukaan seostamattomat
rakenneteräkset ovat valmistusprosessiansa ja ominaisuuksiensa perusteella
seostamattomia laatuteräksiä, joissa minkään seosaineen pitoisuus ei ylitä standardissa
annettuja arvoja (taulukko 1). [5, s. 8.]

Taulukko 1. Seosainepitoisuuksien raja-arvot seostamattoman ja seosteräksen välillä [5, s. 8]

Seosaine		Raja-arvo (paino-%)
B	Boori	0,0008
Ti	Titaani	0,05
Zr	Zirkoni	
Nb	Niobi	0,06
Mo	Molybdeeni	0,08
Bi	Vismutti	0,1
La	Lantanoidit (jokainen)	
Se	Seleeni	
Te	Telluuri	
V	Vanadiini	
Al	Alumiini	0,3
Co	Koboltti	
Cr	Kromi	
Ni	Nikkeli	
W	Volframi	
Cu	Kupari	0,4
Pb	Lyijy	
Si	Pii	0,6
Mn	Mangaani	1,65 ^{a)}
Muut	(paitsi hiili, fosfori, rikki, typpi) (jokainen)	0,1
^{a)} Jos mangaanilla on määritelty vain enimmäispitoisuus, raja-arvo on 1,80 % ja 70 % sääntö ei ole voimassa		

Seostamattomat teräkset voidaan jaotella edelleen seostamattomiin laatuteräksiin ja seostamattomiin erikoisteräksiin. Seostamattomat erikoisteräket ovat puhtaampia kuin seostamattomat laatuteräket. Erikoisteräket ovat usein tarkoitettu nuorutettaviksi tai pintakarkaistaviksi, ja lämpökäsittelyn jälkeiset ominaisuudet ovat tarkoin hallitut. Seostamattomille erikoisteräksille on asetettu tiukat vaatimukset, jotka voidaan täyttää vain tarkoin säädetyllä kemiallisella koostumuksella ja erityisen huolellisella valmistuksella. Vaatimukset ovat yleensä yhdistelmä erilaisista tarkasti rajatuista ominaisuuksista, kuten korkea tai tarkoin tunnettu myötölujuus tai karkenevuusarvot mahdollisesti yhdistettynä kylmämuovattavuuteen, hitsattavuuteen tai sitkeyteen. [5, s. 10.]

Seostamattomat erikoisteräkset ovat teräslajeja, jotka täyttävät ainakin yhden seuraavista vaatimuksista: [5, s. 10, 12]

- määrätty iskutikeus nuorrutettuna
- määrätty karkenemissyvyys tai pintakovuus karkaistuna, nuorrutettuna tai pintakarkaistuna
- erityisen alhainen epämetallisten sulkeumien pitoisuus
- fosforin tai rikin määritelty enimmäispitoisuus:
 - sulatusanalyysissä $\leq 0,020$ %
 - tuoteanalyysissä $\leq 0,025$ %
- ydinreaktoreissa käytettävät teräkset, joilla on seuraavat tuoteanalyysin mukaiset seosainerajoitukset voimassa samanaikaisesti:
 - $Cu \leq 0,10$ %, $Co \leq 0,05$ %, $V \leq 0,05$ %
- määritelty sähkönjohtavuus > 9 S·m/mm²
- erkautuskarkaistavat teräkset, joiden hiilipitoisuus sulatusanalyysissä on vähintään 0,25 %, ja jotka ovat mikrorakenteeltaan ferriittis-perliittisiä ja sisältävät yhtä tai useampaa mikroseosainetta kuten niobia tai vanadiinia alle seosterästen raja-arvon. Erkautuskarkaisu toteutetaan yleensä kontrolloituna jäädytyksenä kuumamuovauslämpötilasta.
- jänneteräkset

3.1.2 Seostetut rakenneteräkset

Seosteräksiä ovat teräkset, jotka eivät täytä ruostumattoman teräksen määritelmää, $C < 1,2$ % ja $Cr > 10,5$ %, ja joissa vähintään yhden seosaineen pitoisuus on sulatusanalyysillä määritettynä yhtä suuri tai suurempi kuin taulukossa 1 esitetty raja-arvo [5, s. 8].

Seostetut teräkset, joille esitetään vaatimuksia esimerkiksi sitkeyden, raekoon ja/tai muovattavuuden osalta, ovat seostettuja laatuteräksiä. Seostettuja laatuteräksiä on hitsattavat hienoraeteräkset mukaan lukien paineastiateräkset, jotka täyttävät kaikki seuraavat ehdot sekä seosainepitoisuudet alittavat taulukossa 2 esitetyt arvot: [5, s. 12]

- vaadittu minimi myötöraja < 380 N/mm² paksuuksilla ≤ 16 mm
- määritelty iskutikeus lämpötilassa -50 °C on ≤ 27 J käytettäessä valssausuuntaan nähden pitkittäisiä Charpy koesauvoja tai ≤ 16 J käytettäessä poikittaisia koesauvoja

Taulukko 2. Seosteräkset. Hitsattavat hienoraeteräkset. Seosainepitoisuuksien raja-arvot laatu- ja erikoisteräksien välillä [5, s. 14]

Seosaine		Raja-arvo (paino-%)
Nb	Niobi	0,08
Mo	Molybdeeni	0,1
Ti	Titaani	0,12
V	Vanadiini	
Zr	Zirkoni	
Cr	Kromi	0,5
Cu	Kupari	
Ni	Nikkeli	
Mn	Mangaani	
		1,8

Seostettuja erikoisteräksiä ovat kaikki muut seosteräkset, jotka eivät määräydy edellä esitetyn ehdoin seostetuiksi lauteräksiksi. Seostettujen erikoisterästen ominaisuuksille määritellyt vaatimukset voidaan saavuttaa vain menetelmillä, joille on tyypillistä tarkasti hallittu kemiallinen koostumus sekä valmistusprosessille ja sen valvonnalle asetetut erityisvaatimukset. Näiden terästen ominaisuusvaatimukset määritellään usein eri ominaisuuksien yhdistelminä ja tarkasti rajattuna. Seostettuihin erikoisteräksiin kuuluvat seostetut koneenrakennusteräkset ja seostetut painelaiteteräkset, laakeriteräkset, työkaluteräkset, pikateräkset ja teräkset, joille on määritetty erityiset fysikaaliset ominaisuudet, kuten kontrolloitu lämpölaajenemiskerroin ferriittisillä nikkeli-teräksillä tai vastuslankateräkset. [5, s. 14].

3.2 Ultralujat teräkset

Lujilta teräksiltä vaadittavat ominaisuudet saavutetaan valmistusmenetelmällä ja mikro-seostuksella. Yksi ultralujien terästen kehittämistavoitteista on ollut terästen hyvä hitsattavuus. Hyvän hitsattavuuden edellytyksenä on teräksen alhainen seostus, mutta materiaalin läpikarkenevuuden saavuttamiseksi teräs vaatii määrätyn määrän seosaineita. [4, s. 6]. Esimerkkinä SSAB:n Optim QC terästen kemiallinen koostumus, taulukossa 3.

Taulukko 3. SSAB:n Optim QC terästen kemiallinen koostumus. Pitoisuus enintään p-% (sulatusanalyysi) [6]

Teräslaji	C	Si	Mn	P	S	Ti
Optim 900 QC	0,10	0,25	1,15	0,020	0,010	0,070
Optim 960 QC	0,11	0,25	1,20	0,020	0,010	0,070
Optim 1100 QC	0,16	0,30	1,25	0,020	0,010	0,070

Mekaanisten ominaisuuksien lisäksi terästä valmistettaessa on kiinnitettävä huomiota myös pintakäsittelyn vaatimuksiin. Lujat teräkset ovat maalattavissa ilman erikoismenetelyjä ja teräksillä on hyvät maalattavuusominaisuudet. [7, s. 8]. Lujia teräksiä voidaan myös kuumasinkitä, kun pintakäsittely on otettu huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Lujien terästen kuumaupotuksissa riskinä on kappaleen vaurioituminen kaston aikana. Ilmiö tunnetaan nimellä sulametallihauraus. [8, s. 1].

3.3 Ultralujien terästen valmistus

Rakenneterästen tavoiteltu korkea lujuus edellyttää pientä raekokoa, joka saavutetaan mikroseostuksella ja lämpökäsittelyn, tai termomekaanisen käsittelyn avulla. Markkinoilla on tällä hetkellä termomekaanisesti valssattuja (M, thermomechanically rolled) ja nuorrutettuja (QL, quenched and tempered) teräksiä. [9, s. 5].

Termomekaanisesti valssatut teräkset voidaan luokitella kuuluvaksi seostamattomiin hienoraeteräksiin, joissa hienorakeisuus saadaan aikaiseksi perinteisten hienoraeterästen tapaan mikroseosaineilla, kuten niobilla, titaanilla ja vanadiinilla. Termomekaanisessa käsittelyssä on yhdistetty muokkaus ja lämpökäsittely samanaikaiseksi kontrolloiduksi prosessiksi. Mikroseostetun teräksen valssaus suoritetaan lämpötiloja ja muokkausta kontrolloiden minkä jälkeen teräslevy jäädytetään nopeasti vesisuihkulla. Menetelmää kutsutaan myös suorasammutukseksi tai suorakarkaisuksi. Tällöin saavutetaan pienempi raekoko, parempi sitkeys ja korkeampi lujuus. [9, s. 5].

Nuorrutetut teräkset valmistetaan suorittamalla päästö noin 580 – 680 °C lämpötilassa normalisoinnin ja vesisuihkun avulla tehdyn suorasammutuksen jälkeen. Kyseisillä teräksillä saavutetaan erilaiset ominaisuudet kuin muilla levytuotteilla. Huonona puolena

on kuitenkin vaativampi hitsaus. Nuorrutetut teräkset luokitellaan seostettuihin teräksiin. [9, s. 5].

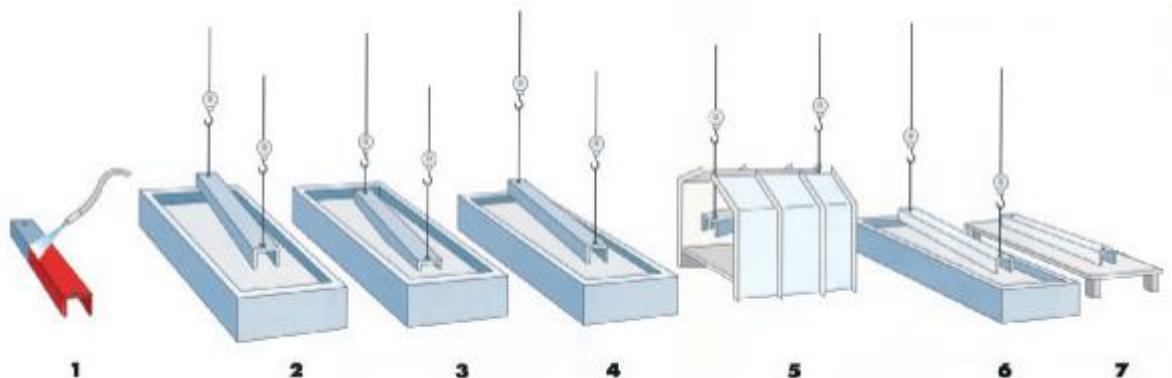
4 Kuumaupotus

Kuumaupotuksella tarkoitetaan sellaista termistä pinnoitusmenetelmää, jossa kiinteä pinnoitettava kappale kastetaan sulassa tilassa olevaan pinnoitekylpyyn. Pinnoituksessa alustamateriaali ja pinnoite reagoivat diffuusion välityksellä muodostaen metallurgisen liitoksen, jossa alustamateriaalin ja puhtaan pinnoitefaasin välissä on niiden seoskerros. [10, s. 8, 13].

Kuumaupotusmenetelmiä on useita, mutta tässä opinnäytetyössä keskitytään kappale-tavaran kuumasinkitykseen.

4.1 Kuumasinkitys

Kuumasinkitysprosessissa, kuva 2, epäpuhtaudet poistetaan kappaleiden pinnoilta tarpeen mukaan mekaanisesti ja kemiallisesti. Mekaanista esikäsittelyä ei uusilla pinnoilla välttämättä tarvita. Puhdistuksen jälkeen kappaleet peitataan yleensä suolahappoliuoksessa, josta se nostetaan huuhtelun jälkeen juoksutekylpyyn. Juoksuteaineen kuivuttua kappaleet upotetaan sulaan sinkkiin. [10, s. 11].



Kuva 2. Kuumasinkitysprosessi. 1. Maalin, rasvan ym. lian poisto 2. Ruosteenpoisto happopeittauksella 3. Vesihuuhtelu 4. Juoksuteainekäsittely 5. Kuivaus 6. Upotus sulaan sinkkiin 7. Jäähdytys [11]

4.1.1 Epäpuhtauksien poisto

Kappaleen pinta on puhdistettava sinkitystä vaikeuttavista epäpuhtauksista, kuten valssihilseestä, hitsauskuonasta ja –roiskeista, väri- ja maalimerkeistä sekä muista karkeista epäpuhtauksista. Mekaaninen puhdistus voidaan tehdä hiomalla tai suihkupuhdistamalla. Suihkupuhdistus kuitenkin saattaa aiheuttaa sinkkikerroksen liiallista kasvua. [10, s. 11, 14.]

Pinnassa olevat öljyt ja rasvat tai vastaavat epäpuhtaudet poistetaan upottamalla kappale alkaliseen rasvanpoistoliuokseen. Alkalisen rasvanpoiston jälkeen kappale on huuhdeltava hyvin ennen peittäystä. Jos rasvaa on paikoitellen vain pieniä määriä, voidaan kappaleen pinta puhdistaa liuotepuhdistuksella. Liuotepuhdistuksen jälkeen kappale ei tarvitse huuhdella. [10, s. 11; 12, s. 5.]

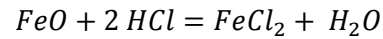
4.1.2 Suolahappopeittäus

Teräksen pinnalla olevien epäorgaanisten valssihilseen ja ruosteen poistamiseksi kappaleet peitataan happoliuoksessa. Happoliuos sisältää hapon lisäksi myös korroosionestoainehihtiä ja mahdollisesti kostutuslisäaineita. Inhibiitti estää perusaineen syöpmisen ja haurastumisen. Kostutusaine edesauttaa hapon tunkeutumista hilsekerroksen halkeamiin pienentämällä sen pintajännitystä. Pintajännityksen alentamisen vaikutuksesta happoa saattaa myös tunkeutua pienten öljy- ja rasva-alueiden alle ruoste ja hilsekerroksessa. Happopeittauksen jälkeen kappaleet huuhdellaan vedellä. [13, s. 114, 119.]

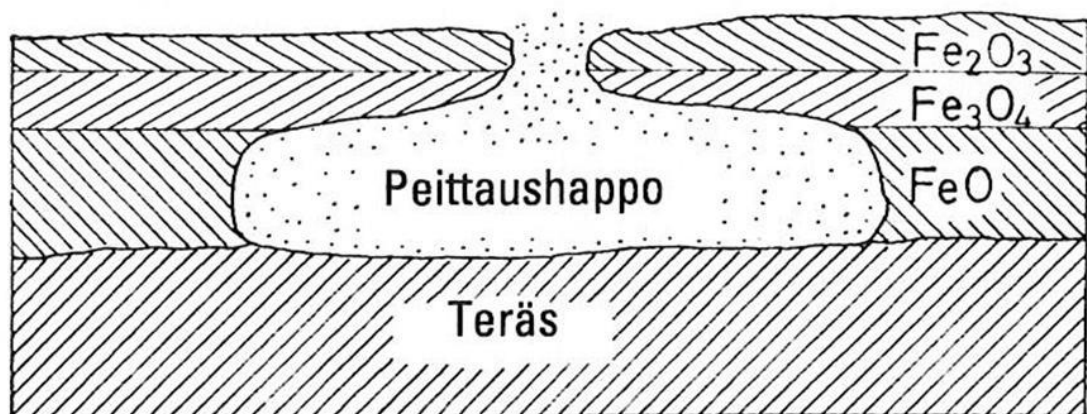
Inhibiitit ovat tavallisesti orgaanisia aineita, jotka muodostavat ohuen kalvon puhtaalle metallipinnalle. Kalvon tarkoituksena on suojella teräspintaa syöpmiseltä peittauksen aikana ja ehkäistä vedyn liukenemisestä aiheutuvaa vetyhaurautta. Riittävä inhibiointi on tärkeää etenkin lujien terästen peittäuksessa. Pintakäsittelyissä syntyvän vetyhaurauden riski kasvaa teräksen lujuuden kasvaessa. Riskirajana pidetään murtolujuutta 900MPa. Inhibiitit eivät ole ikuisia, vaan ne hajoavat lajista riippuen sitä nopeammin mitä vahvempi happo on. Inhibiittinä toimii tiokarbamidi, kinoliini ja dietyleenitriamidi. Peittäuksessa syntyvä rautakloridi myös toimii inhibiittinä ja vähentää ulkoisen inhibiitin tarvetta. [7, s. 27–28; 13, s. 119.]

A-typin valssihilseen peittäuksessa suolahappo tunkeutuu oksidikalvon halkeamien eli hematiitti- sekä magnetiittikerrosten aukkojen kautta alimpana olevaan wüstiittiin, kuva

3. Kolmesta oksidityypistä vain wüstiitti (FeO) on suolahappoon helposti liukeneva. Rautaoksidit reagoivat suolahapon kanssa alla olevan yhtälön mukaisesti, muodostaen rautaklorideja [13, s. 117].



Muiden rautaoksidien liukoisuuden ollessa voimakkaasti riippuvaisia peittaushapon rautakloridipitoisuudesta, on korkea rautakloridipitoisuus edullista. Hematiitti (Fe₂O₃) ja magnetiitti (Fe₃O₄) irtoavat wüstiitin liuetessa, sekä liukenevat wüstiitin ja suolahapon reaktiotuotteen vaikutuksesta. [13, s. 116.]



Kuva 3. Peittaushapposyöpyminen hehkuhilsessä [13, s. 122]

C-tyyppin valssihilse liukenee samalla tavoin kuin A-tyyppin, mutta peittausaika on magnetiitin tiivyyden johdosta pidempi. B-Tyyppin valssihilse on todella vaikeaa peitata suolahapolla, koska magnetiitin liukoisuus suolahappoon on hyvin pieni. [13, s. 116.]

Suolahappopeittauksen tehokkuus kasvaa liuoksen lämpötilan kasvaessa, mutta käyttölämpötila pidetään 15—20 C asteessa. Korkeampi lämpötila kasvattaa suolahappopohörypitoisuutta ympäröivässä ilmassa, aiheuttaen terveydellisiä riskejä ja korroosiota. Suljetussa järjestelmässä ongelmat saadaan minimoitua, jolloin voidaan käyttää korotettua lämpötilaa. [12, s. 6.]

4.1.3 Juoksuteaine

Juoksutteen tehtävänä kuumasinkityksessä on poistaa oksidijäänteet kappaleen pinnalta. Tämä mahdollistaa metalli—metalli kontaktin syntymisen kappaleen koskettaessa sinkkikylpyyn ja edesauttaa rauta—sinkkireaktioiden tapahtumisen tasaisesti koko kappaleen pinnalla. Juoksutekastossa sinkittävät kappaleet kastetaan juoksuteliuokseen. Ennen upotusta sulaan sinkkiin kappaleet kuivataan. Kappaleen pinnalle jää ohut juoksutekerros. [10, s. 11.]

4.1.4 Upotus sulaan sinkkiin

Kappaleet upotetaan sinkkipataan pienellä nopeudella, jotta kappaleeseen mahdollisesti jäänyt kosteus ehtii poistua aiheuttamatta sinkin roiskumista. Ennen kappaleiden nostoa, sinkkikyllyn pinta puhdistetaan siinä olevista oksideista ja juoksuteainejäämistä. Nosto tapahtuu pienellä nopeudella, jotta sula sinkki valuu pois. Sinkkivalumien poistamiseksi, kappaletta naputellaan noston yhteydessä. [12, s. 16—17.]

Upotuksen aikana sinkki jähmettyy ensin teräksen pintaan, kunnes teräksen lämpötilan noustessa yli sinkin sulamispisteen, sulaa jähmettynyt sinkki uudelleen. Teräksen diffuusion ansiosta pintaan alkaa muodostua rauta-sinkkiseoskerroksia. [12, s. 17.]

Kappaleet voidaan jäähdyttää sinkkikaston jälkeen joko ilmassa tai jäähdytystä nopeutetaan vesijäähdytyksellä. Jäähdytysmenetelmän valinnassa on otettava huomioon rakenteiden hoikkuus, että välttyttäisiin muodonmuutoksilta. Mikäli kappaleet halutaan maalata sinkityksen jälkeen ilman esikäsitteilyä, vesijäähdytystä ei voida käyttää, koska sinkin pintaan syntyisi sinkkihydroksideja. [12, s. 17.]

4.1.5 Pinnoitteen laatu

Hyväksymistarkastuksessa tulee edustavien pintojen näyttää virheettömältä paljaalla silmällä tai normaaliksi korjatulla näöllä. Pinnalla ei saa esiintyä nystyröitä, rakkuloita, epätasaisuutta, teräviä piikkejä tai pinnoittumattomia kohtia 1 m etäisyydeltä tarkasteltuna. Pinnalla saa esiintyä tummuudeltaan eriasteisia kennomaisia kuvioita tai tummanharmaita laikkuja. Myöskään kosteuden aiheuttama värjäytyminen ei ole haitallista, kunhan pinnoitteen paksuus on vähintään vaaditun vähimmäisarvon suuruinen. Juoksutejäämiä ei sallita. Valumia tai sinkkituhkaa ei sallita silloin, kun ne voivat haitata kuumasinkittyjen

tuotteiden aiottua käyttöä tai niiden korroosionkestävyysvaatimukset eivät täytyisi. [14, s. 14.]

Kuumasinkityksen päätarkoituksena kuitenkin on suojata alla olevaa teräsrakennetta korroosiolta. Siksi ulkonäköä tulisi pitää toisarvoisena seikkana. Suositeltavaa olisikin, että asiakas ja kuumasinkitsijä sopivat saavutettavissa olevasta pinnanlaadusta ottaen huomioon rakenteessa käytetyt materiaalit. Pinnoitteen karheus ja epätasaisuus on suhteellisia käsitteitä ja kuumasinkityksen jäljiltä oleva epätasaisuus eroaa mekaanisesti kaavituista tuotteista. [14, s. 14.]

Kuumasinkkipinnoitteen paksuuden määrittämisessä voidaan käyttää magneettista menetelmää, jossa laitteet mittaavat joko magneetin ja perusmetallin välistä vetovoimaa johon pinnoite vaikuttaa, tai pinnoitteen ja perusmetallin kautta kulkevan magneettivuon vastusta. Magneettiset menetelmät soveltuvat tehdasolosuhteisiin ja laadunvalvontaan. Mittausalueiden lukumäärä, sijainti ja koko määritellään standardissa SFS-EN ISO 1461. [14, s. 16.]

Vaihtoehtoisia menetelmiä ovat punnitus- ja mikroskooppimenetelmät. Nämä vaihtoehtoiset menetelmät ovat kuitenkin ainetta rikkovia menetelmiä eivätkä siksi sovi suurten tai kalliiden kappaleiden rutiinimittaukseen. Mikroskooppimenetelmä edellyttää koekappaleesta leikattua osaa, mitä tarkastellaan mikroskoopin ja kalibroidun asteikon avulla. Punnitusmenetelmässä kuumasinkitty kappale punnitaan, jonka jälkeen siitä syövytetään sinkkipinnoite pois. Sinkkipinnoitteen poiston jälkeen kappale punnitaan uudelleen ja voidaan laskea massanmuutos pinta-alan suhteen. [14, s. 16, 30 ; 15, s. 8 ; 16, s. 3.]

4.2 Rakenteen suunnittelu ja muotoilu

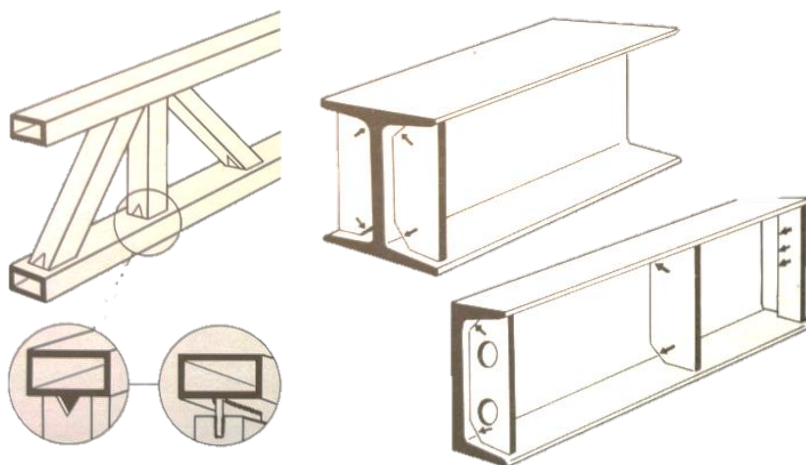
Sinkittävien rakenteiden suunnittelijoilla on oltava käsitys kuumasinkitys prosessista. Rakenteessa ei saa olla suljettuja rakenneosia eikä kohtia, jotka muodostavat taskuja, joihin voi jäädä ilmaa, peittäusaineita tai sinkkiä. Suunnittelijan on tiedettävä käytettävän sinkkipadan koko sekä mahdolliset kastotavat. Kappaleessa on vältettävä hoikkia ja laajoja ohuita tasopintoja sekä samassa rakenneosassa ainevahvuudeltaan suuresti toisistaan eroavia osia. Rakenneosien tulevat kiinnitystavat on suunniteltava sinkkipinnoite huomioon ottaen. [17, s. 1—2.]

4.2.1 Yleisperiaatteita

Sinkittävien kappaleiden muotoilussa pätee samat rakenteen muotoiluperiaatteet kuin hitsattujen teräsrakenteiden suunnittelussa, jossa korroosiosuojattavuus kuuluu keskeisiin tekijöihin [10, s. 18]. Standardin SFS-EN ISO 14713 osat 1 ja 2 esittävät yleisiä ohjeita ja suosituksia sovellettavaksi kuumasinkittävien kappaleiden suojaamiseksi korroosiolta. Nämä ohjeet ja suositukset eivät käsittele teräksen sinkkipinnoitteiden käytön aikaista kunnossapitoa korroosionkestävyyden säilyttämiseksi. Ohjeita tähän liittyen esitetään standardeissa SFS-EN ISO 12944-5 ja SFS-EN ISO 12944-8. [18, s. 8].

Jo suunnitteluvaiheessa on huomioitava upottamalla tapahtuva esikäsitteily, jolloin huonosti suunniteltuun rakenteeseen voi jäädä peittausaineita, pinnalta irronneita epäpuhtauksia tai huuhteluvettä. Peittaushapon on myös kostutettava kaikki pinnat ja rakenne on saatava metallipuhtaaksi kaikilta pinnoiltaan sinkin riittävän tarttuvuuden varmistamiseksi. Hitsausseamat on suunniteltava yhtenäisiksi ja jatkuviksi, jotta vältetään limitäisiä liitoksia ja rakoja, joihin saattaa jäädä peittaus- tai huuhtelujäämiä. [10, s. 18, 20.]

Ylimääräisen sulan sinkin on nostovaiheessa päästävä esteettömästi valumaan pois rakenteista takaisin sinkkikylpyyn [10, s. 18, 21]. Kuvassa 4, on esimerkkejä aukoista sulametallivirtauksia varten.



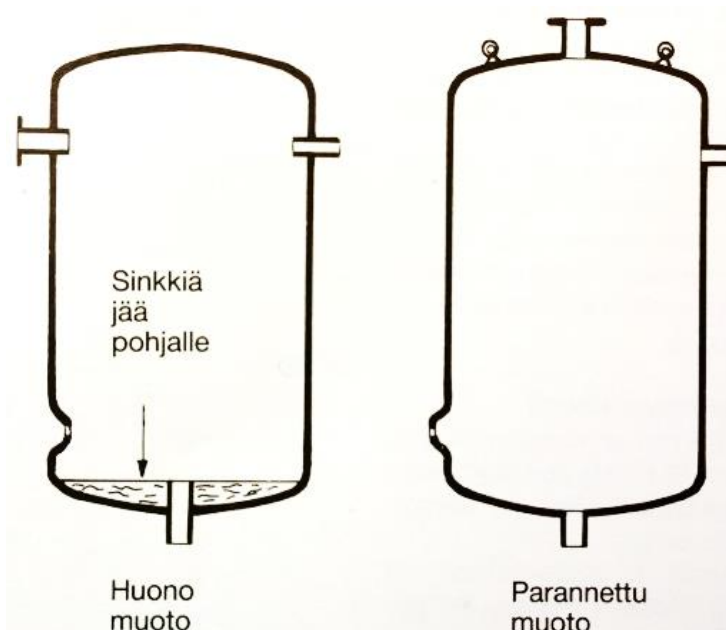
Kuva 4. Esimerkkejä leikata aukko sulametallivirtauksia varten kuumasinkityksessä [10, s. 19, 21]

Kuumasinkittävien teräsrakenteiden suunnittelussa on erittäin tärkeää huomioida käytävissä olevan sinkkipadan mitat. Edullisinta on, jos sinkittävä kappale voidaan kastaa upottamalla kerralla kokonaan. Sinkitys voidaan suorittaa myös kääntökastolla, jolloin voidaan pinnoittaa pitempiä kappaleita kuin mitä padan pituus on. [10, s. 18.]

Sinkittyjen rakenneosien kokoamiseen suositellaan ruuviliitoksia, koska sinkkipinnoite vaurioituu hitsauksessa. Sinkityn teräksen hitsaus on selvästi pinnoittamatonta terästä vaikeampaa. [10, s. 18.]

4.2.2 Turvallisuustekijöitä

Tärkein turvallisuustekijä on varmistaa, ettei rakenteeseen jää upotuksen aikana taskuja, kosteutta tai suljettuja kohtia. Kappaleita kastettaessa 450 C asteiseen sulaan sinkkikylpyyn, rakenteen ilmataskuihin tai suljettuihin kohtiin jäänyt kosteus aiheuttaa höyrystyessään sinkin räjähdysmäisen roiskumisen ympäristöön tai muodonmuutoksia rakenteeseen. Vaaratekijöiden poistamiseksi, suljettuihin rakenteisiin tehdään ilmanpoistoaukot. Rakenteet on varustettava nostokorvakkeilla tai nostoaukoilla tarpeen vaatiessa [10, s. 18, 20]. Kuvassa 5 esitetään esimerkki säiliöstä nostokorvakkeilla ja parannetuilla putkiosilla.



Kuva 5. Esimerkkejä nostokorvakkeista ja putkiosista [10, s. 19]

4.2.3 Muodonmuutokset

Muodonmuutosten välttämiseksi rakenteessa on vältettävä suuria aineenpaksuuseroja, pitkiä ja hoikkia rakenteita sekä ohuita laajoja tasopintoja. Hitsausjännitysten aiheuttamien muodonmuutosten vähentämiseksi, hitsaus on tehtävä mahdollisimman symmetrisesti painopisteakseliin nähden. Hitsausjärjestys suunnitellaan siten, että jännitykset jäävät mahdollisimman vähäisiksi. [10, s. 20.]

Rakenteissa, joissa on suuria aineenpaksuuseroja, kuumeneminen sinkkikylvyssä ja vastaavasti jäähtyminen sinkityksen jälkeen tapahtuvat epätasaisesti. Rakenne voi siitä syystä vedellä ja aiheuttaa muodonmuutoksia. [10, s. 20.]

Ohuita seinämävahvuudeltaan alle 4 mm:n laajoja tasopintoja on vältettävä. Muodonmuutoksien minimoimiseksi tehdään tasopintojen katkaisuja ja jäykistämisiä symmetrisesti tasopintaan. [10, s. 20.]

4.2.4 Erilaiset pinta- ja teräslaadut samassa rakenteessa.

Erilaisilla teräksillä, toimitustilalla ja pinnan tilalla on merkitystä valmiin pinnoitteen ulkonäköön. Ulkonäkö voi vaihdella kirkkaasta puhtaasta sinkkipinnasta tumman harmaaseen Fe—Zn-seospintaan. Pinnoitteen paksuus- ja ulkonäköeroavuudet voivat uudessa sinkkipinnassa olla liian silmiinpistäviä. [12, s. 35.]

Samassa rakenteessa tulisi käyttää samaa teräslajia tai samalla peruskoostumuksella olevia lujuudeltaan erilaisia teräksiä. Pinnoitteen kannalta oleellisimpia ovat Si-, Al-, P-, ja Mn-pitoisuudet. [12, s. 35.]

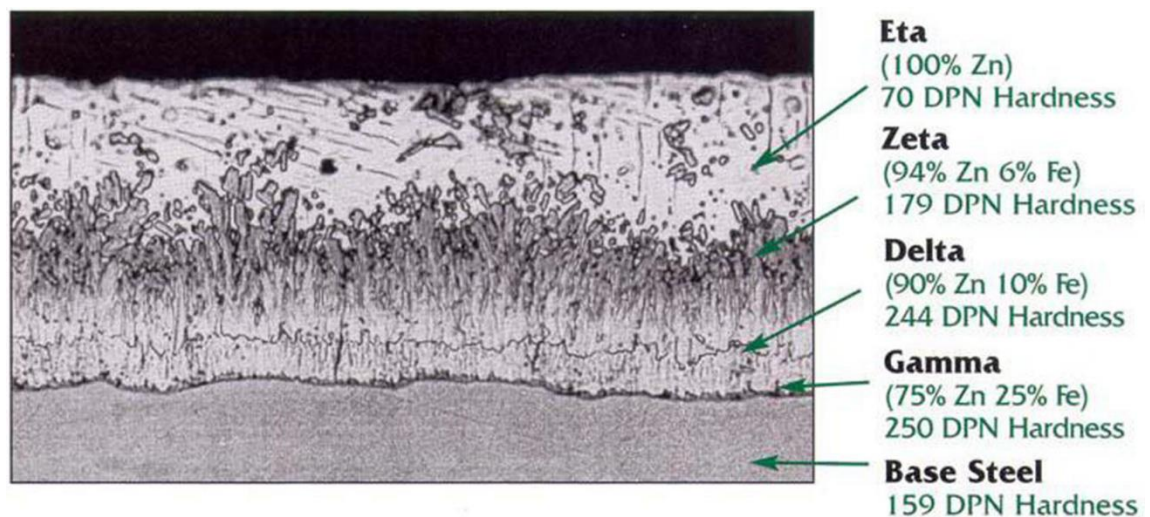
Esikäsitteilyä suunniteltaessa on huomioitava pintojen ruostumisasteet. Peittäus ja mahdollinen suihkupuhdistus on suunniteltava pintojen perusteella siten, että rakenneosien pintojen tila olisi kaikilla samanlainen ennen kuumasinkitystä. Uusi valssihilseinen pinta on vaikeammin peitattavissa kuin ruostunut pinta. Liian ruosteinen pinta on vaikea saada puhdistetuksi kokonaan ja antaa helposti epätasaisen pinnan. Samassa rakenteessa tulee välttää suihkupuhdistettuja ja suihkupuhdistamattomia osia. [12, s. 35.]

4.2.5 Kierteelliset osat

Kuumasinkittävien kierreosien mitoituksessa on otettava huomioon sinkkipinnoitteen kalvonpaksuuden aiheuttamat mittamuutokset. Ulkopuoliset kierteet valmistetaan alimittaisiksi, koska sinkkipinnoite kasvattaa mittoja. ISO metrisillä kierteillä kierteen ulkomittaa pienennetään neljä kertaa sinkkikalvon paksuuden verran. Sisäpuoliset kierteet tehdään tai avataan sinkityksen jälkeen. Ulkopuolisen kierteen sinkkipinnoite suojaa sisäpuolista kierrettä ruostumiselta. [12, s. 38.]

4.3 Raudan ja sinkin väliset reaktiot sekä sinkkipinnoitteen muodostuminen

Kappaletta upotettaessa sulaan sinkkiin, sinkki jähmettyy ensin teräksen pintaan. Teräksen lämpötilan noustessa yli sinkin sulamispisteen, sulaa jähmettynyt sinkki uudelleen. Diffuusion vaikutuksesta alkaa pinnalle muodostua erilaisia rauta—sinkkikerroksia. Ylös noston yhteydessä seoskerroksen päälle kiinnittyy vielä kerros puhdasta sinkkiä. [12, s. 17, 41, 43.] Kuvassa 6 kuumasinkityspinnoitteen poikkileikkaus rauta—sinkkikerrokseen.



Kuva 6. Sinkkipinnoitteen rauta—sinkkiseosten muodostamia kerroksia [19]

Ensimmäisenä muodostuu alhaisen Si-pitoisuuden Zeta-faasi, joka eristää teräspinnan. Reaktio kuitenkin jatkuu raudan diffuntoituessa kiinteän Fe—Zn faasin lävitse kiinteän ja sulan rajapinnalle, jossa diffuntoitunut rauta reagoi sinkkiatomien kanssa, kasvattaen Zeta-faasia. Fe-pitoisuuden kasvaessa, lähempänä teräspintaa oleva osa Zeta-faasista muuttuu Delta-faasiksi. Raudan diffuntoituminen jatkuu edelleen, jonka seurauksena osa Delta-faasista muuttuu korkean Fe-pitoisuuden Gamma-faasiksi. Uloimpana oleva Eta-faasi syntyy puhtaasta sinkistä, joka kiinnittyy pintaan ylös noston yhteydessä. [12, s. 43.]

5 Sopiva menetelmä säröjen etsintään

Yhtenä työn tavoitteena oli löytää menetelmä, jolla kastosinkittyjä rakenteita voidaan tarkastaa sinkin pintaa rikkomatta. Kirjallisuusselvityksen perusteella, kokeiltavaksi menetelmäksi valikoitui magneettijauhetarkastus. Magneettijauhetarkastuksen lisäksi kokeiltiin tunkeumanestetarkastusta. Tunkeumanestetarkastus edellytti sinkin pois syövyttämistä hapolla, eikä siksi ole adekvaatti vaihtoehto laaduntarkkailuun. Tunkeumanestetarkastuksella haluttiin pääasiassa varmistaa magneettijauhetarkastuksen toimivuus.

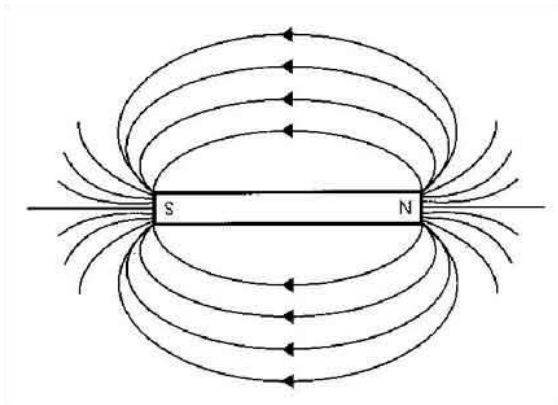
5.1 Magneettijauhetarkastus

Magneettijauhetarkastuksessa tarkastettava kappale magnetisoidaan sähköllä, jonka jälkeen pinnalle levitetään hienoa jauhetta, joka koostuu magneettisista partikkeleista. Magneettinen jauhe asettuu kappaleen pinnalle kappaleen aiheuttaman magneettikentän mukaisesti. Magneettijauheen tasainen jakautuminen viittaa virheettömään kappaleeseen, kun taas kasautuneet kohdat indikoivat epäjatkuvuuskohtia. [20, s. 249.]

Kappaleen tai alueen magnetisointiin ja magneettisten partikkeleiden levitykseen on olemassa useita eri menetelmiä, joista valitaan sopivin kohteen mukaan [20, s. 262—263].

5.1.1 Periaate

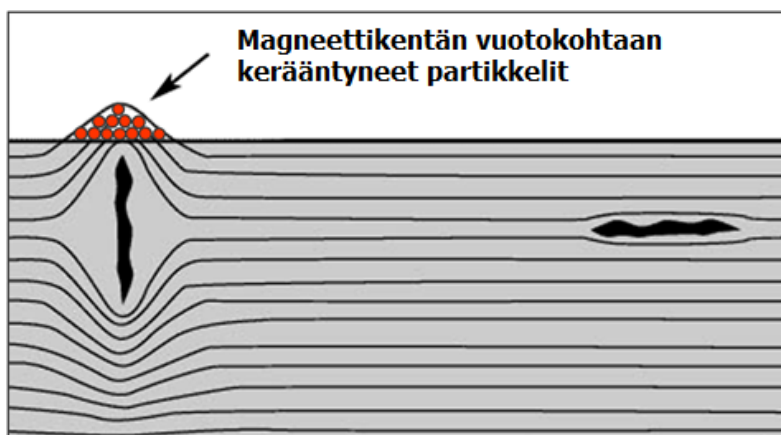
Magneettinen kappale luo ympärilleen magneettikentän, jolla on suunta ja voimakkuus. Magneettikenttää kuvataan kenttäviivaesityksellä kuten kuvassa 7. Magneettikenttä kulkee kehää eteläkohtiosta kappaleen läpi pohjoiskohtioon ja pohjoiskohtiosta ulos takaisin eteläkohtioon. [20, s. 248.]



Kuva 7. Esimerkki magneettikentän kenttäviivaesityksestä [21]

Magneettikentän vuorovaikutusta ei havaita magneettisen kappaleen pinnalla. Ainoastaan kohtiot, joista kenttäviivat tulevat ulos aiheuttavat magneettista vuorovaikutusta. Magneettikentän voimakkuus on suurimmillaan kohtioiden läheisyydessä. Jos kappale katkaistaan, syntyy kappaleiden katkeamiskohtiin uudet pohjois- ja eteläkohtiot. Napoja ei siis voida erottaa toisistaan, vaan katkaistusta magneetista syntyy aina kaksi uutta magneettia. [20, s. 248.]

Kappaleen pinnalla tai pinnan läheisyydessä olevat epäjatkuvuuskohdat synnyttävät magneettisia kohtioita, jotka häiritsevät koko kappaleen synnyttämän magneettikentän yhdenmukaisuutta. Magneettinen jauhe kerääntyy epäjatkuvuuskohtiin, koska niissä paikallinen magneettikenttä on suurempi kuin ehjällä pinnalla, kuva 8. [20, s. 248.]



Kuva 8. Vian vaikutus magneettikenttään ja jauheen kerääntyminen magneettikentän häiriökohtaan [22]

5.1.2 Käyttö

Magneettijauhetarkastusta voidaan käyttää ferromagneettisissa materiaaleissa olevien säröjen ja halkeamien tarkastamiseen. Tarkastusta käytetään pintaan avautuvien epäjatkuvuuskohtien havaitsemiseen. Menetelmä voi myös paljastaa välittömästi pinnan alla olevia epäjatkuvuuskohtia, mutta tarkastusherkyys alenee nopeasti mitä syvemmällä epäjatkuvuuskohdat ovat. [23, s. 6]. Tarkastettava kappale tulee magnetisoida useampaan suuntaan, koska magneettikentän suuntaiset säröt eivät aiheuta riittävää häiriötä magneettikenttään, eikä siksi indikoidu kerääntyneillä partikkeleilla [20, s. 253.]

Tutkittavaan kohteeseen on pystyttävä luomaan magneettivuo, joka on tiheydeltään vähintään 1 T (tesla). Kuitenkin liian voimakas magneettikenttä voi aiheuttaa häiriötä tarkastukseen. Kappaleen demagnetointi tulisi olla myös mahdollista, jos kappale joudutaan tarkastamaan eri menetelmillä tai kappaleen käyttökohteen niin vaatiessa. [23, s. 8, 12].

5.2 Tunkeumanestetarkastus

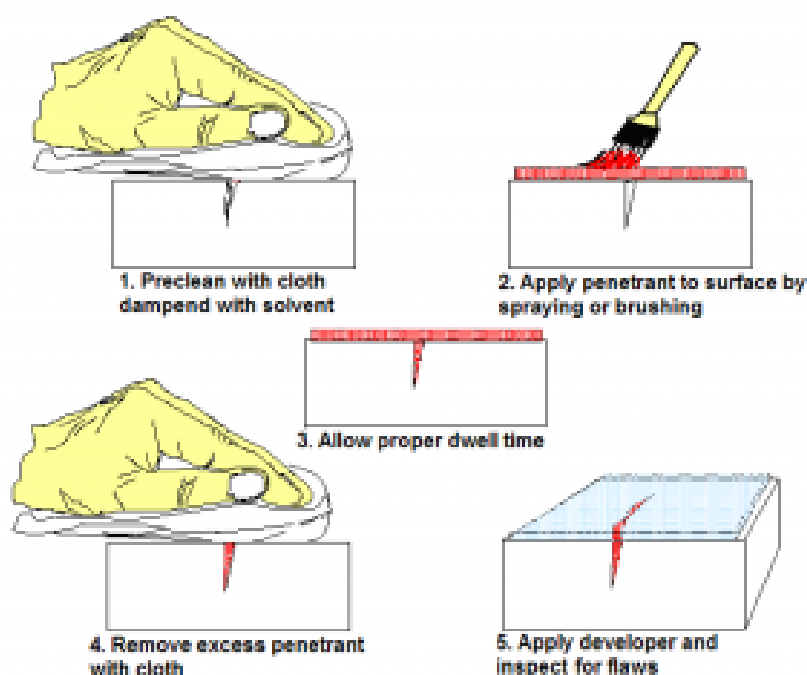
Tarkastuksessa tutkittavan kappaleen pinta käsitellään voimakkaasti värjättyllä tai fluoresoivalla nesteellä, joka kapillaari-ilmiön seurauksena tunkeutuu pinnassa mahdollisesti oleviin epäjatkuvuuskohtiin. Ylimääräisen nesteen poiston jälkeen pintavirheisiin jäänyt neste absorboidaan pinnalle levitettävään vaaleaan kehiteeseen. Absorboitunut neste indikoi vikojen muotoa ja sijaintia. [20, s. 222.]

5.3 Tarkastus

Ennen tunkeumanesteen levittämistä tutkittava pinta on esikäsiteltävä, kuva 9, kohta 1. Pinta on puhdistettava mahdollisista irtopartikkeleista tai pinnoitteista, jotka saattavat kätkeä pintaviat alleen. Kemiallisesti saadaan poistettua pintaan kontaminoituneet epäpuhtaudet, mutta esimerkiksi ruosteen tai valssihilseen poisto saattaa vaatia kevyen teräsharjauksen. Pinnan turhaa mekaanista rasitusta on vältettävä, koska Suomisen [24, s. 16] opinnäytetyön perusteella pinnankarheudella on merkittävä vaikutus menetelmän suorituskykyyn. Öljyn ja rasvan poistoon soveltuu parhaiten höyrypuhdistus. Happojen ja kromaattien poisto on tärkeää etenkin käytettäessä fluoresoivaa tunkeumanestettä, koska ne heikentävät nesteen fluoresointikykyä. [20, s. 222—223.]

Pinta on kuivattava hyvin, koska vesi itsessään on hyvin tunkeutuvaa ja saattaa estää tunkeumanesteen pääsyn riittävän syvälle vikaan. Seurauksena vika saattaa jäädä havaitsematta. Vesi myös ohentaa vesipestäviä tunkeumanesteitä aiheuttaen värin vaalenemista. [20, s. 223.]

Tunkeumaneste voidaan applikoida kastamalla, kaatamalla, ruiskuttamalla tai sivelemällä, kuten kuvan 9 kohdassa 2. Tunkeumanesteitä ja kehitteitä on myös aerosolipulloissa, jolloin ne ovat helposti siirrettävissä. Suurilla pinnoilla nesteen kaataminen tai siveleminen saattaa olla adekvaatimpi vaihtoehto kuin aerosoli. Nesteen applikoimisen jälkeen valutetaan ylimääräinen neste pois sekä annetaan nesteen vaikuttaa pinnalla riittävän pitkään, jotta se tunkeutuisi mahdollisimman hyvin pinnan vikoihin, kuvan 9 kohta 3. Vaikutusajalla voidaan myös säädellä tarkastuksen herkkyyttä. Vaikutusajat ovat yleensä muutamasta minuutista tuntiin riippuen käytetystä tunkeumanesteestä tai tutkitavan pinnan materiaalista. [20, s. 223.]



Kuva 9. Tunkeumanestetarkastuksen suoritus [25]

Vaikutusajan jälkeen ylimääräinen neste poistetaan tapauskohtaisesti sopivalla tavalla, kuvan 9 kohta 4. Vesipestävät nesteet huuhdellaan karkealla vedellä käyttäen pientä painetta. Liuotinpestävät pyyhitään pehmeällä liuottimeen kastetulla pyyhkeellä. Nesteylimäärän poistossa on tärkeää kiinnittää huomiota huolellisuuteen, jotta tunkeumaneste poistuisi vain pinnalta eikä säröistä tai muista pinnan vioista. [20, s. 223.]

Kuva 9, kohta 5: Kun ylimääräinen neste on poistettu, pinnalle levitetään kehite, joka absorboi vikoihin tunkeutunutta nestettä itseensä. Kehitteen vaikutusaika on riippuvainen tunkeumanesteen vaikutusajasta. Mitä kauemmin nesteen tunkeutuminen vikaan on kestänyt, sitä kauemmin sen kestää kulkeutua myös viasta pois. Kehitteeseen absorboitunut voimakkaasti värjätty neste erottuu hyvin vaaleasta kehitteestä indikoiden epäjatkuvuuskohtia. Fluoresoivaa tunkeumanestettä käytettäessä vikojen havaitsemiseen käytetään UV-valoa tai sinistä valoa, jolloin viat erottuvat kirkkaina väreinä tummasta taustasta. [20, s. 223—224 ; 26, s. 13.]

6 Kokeellinen osuus

Työ aloitettiin uusimalla Metropolia Ammattikorkeakoulun peittauslinjan rasvanpoisto-, huuhtelu- ja peittauskylpy. Rasvanpoistokylpyä varten veteen sekoitettiin Coventyan PRESOL FSD rasvanpoistoainetta 80 g/l. Peittauskylpynä käytettiin noin 12 %:sta suolahappoliuosta, joka valmistettiin veteen sekoittamalla 33 %:sta suolahappoa. Peittauskylpyyn lisättiin korroosionestoinhibiittia. Inhibiittinä käytettiin SSAB:n toimittamaa Lubro IB 50:tä, inhibiittia lisättiin peittaushappoon 0,1 %:ia. Peittauskylpy vaihdettiin kokonaan, mikä aiheutti peittausajan pidentymisen. Altaaseen olisi ollut syytä jättää jonkun verran vanhaa happoa, jotta kylpyyn olisi jäänyt peittauksessa syntyvää rautakloridia. Koska kylvyn rautakloridipitoisuus vaikuttaa peittausaikaan merkittävästi, hapossa liuotettiin noin viikon ajan ruostunutta paksua rautalankaa, jotta kylvyn rautakloridimäärää saatiin lisättyä ja peittausaika lyhennettyä. Taulukkoon 4 on koottu yhteen esikäsitteilykylpyjen koostumukset.

Taulukko 4. Esikäsitteilykylpyjen koostumukset.

Kylpy	Seosaine	Pitoisuus
Rasvanpoistokylpy	PRESOL SFD	80 g/l
Peittauskylpy	Suolahappo	12 %
	Inhibiitti Lubro IB 50	0,10 %
Juoksute	Sinkki-ammoniumkloridi	n. 30 %

Metropolian sinkkikylvyn tiedettiin olevan seostamatonta sinkkiä, mutta asia varmistettiin ennen kuumaupotuksen aloittamista. Sinkkikylvystä haluttiin tietää lyijy-, tina- ja nikkeli-pitoisuus. Pitoisuudet selvitettiin Metropoliasa plasmaemissiolla.

Työn myöhemmässä vaiheessa sinkkiin seostettiin nikkeliä vaiheittain ensin 0,05 p-%:n pitoisuuteen ja sitten 0,1 p-%:n pitoisuuteen. Nikkeliä seostettiin, jotta saataisiin selville sen pitoisuuden vaikutus sulametallihaurauteen. Seostus tehtiin Boliden Kokkola Oy:n toimittamalla puhtaalla nikkeli-pulverilla.

6.1 Plasmaemissio

Plasmaemissiomenetelmässä näyteliuos sumutetaan korkealämpötilaplasmaan (6000 - 9000 K). Yhdisteet hajoavat ja atomit virittyvät. Kun viritystila purkautuu, atomit lähettävät säteilyä joka on alkuaineelle tunnusomaista. Menetelmällä voidaan määrittää lähes kaikki alkuaineet. Havaitsemisrajat ovat 2 - 10 kertaa pienempiä kuin liekkiatomisabsorptio menetelmällä. [27, s. 1.] Menetelmässä mitataan tutkittavana olevan alkuaineen lähettämän säteilyn intensiteettiä.

Metropolian plasmaemissio laite on kuvassa 10 oleva Agilent MP-AES 4100, jossa plasma aikaansaadaan mikroaalloilla. Mikroaaltogeneraattorin teho on 1 kW ja magneutroni tuottaa säteilyä taajuudella 2450 MHz. Plasmakaasuna käytetään typpeä. Typpivirtaus on 20 l/min ja typpi (99,5 %) tuotetaan paineilmastasta adsorptiolaitteen avulla. Ainoastaan plasman sytytykseen käytetään argonia. Laitteen optiikka suojataan plasman lämpöenergialta voimakkaalla ilmavirralla (25 l/min). [27, s. 2.]



Kuva 10. Analysoinnissa käytetty mikroplasma atomiemissiospektrometri [28]

Näyteliuos syötetään letkupumpulla lasiseen syklonikammioon, josta näyte sumutetaan plasmaan. Kaasuvirtaus on 0,4 – 1,0 l/min [27, s. 2].

Laitteessa on monokromaattorina hila, jossa on 2400 uurretta/mm. Ilmaisimena on CCD-ilmaisim, joka on jäädytetty 0 °C:een Peltier-termoelementillä. Mittausaallonpituus 178—780 nm. CCD-ilmaisim rekisteröi spektrin mitattavan piikin alueelta, jolloin taustan osuus voidaan vähentää. [27, s. 2.]

6.2 Sinkin seosaineet

Pitoisuuksien analysointia varten sinkkikylvystä otettiin kauhalla sulaa sinkkiä, josta valettiin grafiittimuotin avulla valunäyte, kuva 11. Valunäytteestä veistettiin lastuja analyysiväan avulla tarkkaan 1 g:n verran. Lastut liuotettiin noin 10 ml:aan typpihappoa. Liuotuksessa käytettiin suolahapon sijaan typpihappoa, koska MP-AES on herkkä kloridille. Kun kaikki sinkki oli liuenneena, huuhdeltiin sinkkipitoinen typpihappo liuos 1 l:n mittapulloon ja pullo täytettiin ionivaihdetulla vedellä. Saatiin näyteliuos jonka sinkkipitoisuus on 1 g/l.



Kuva 11. Sulasta sinkistä valettu näyte

6.2.1 Standardiliuokset

Seuraavaksi valmistettiin lyijyn, tinan ja nikkelin standardiliuokset. Lyijyn ja nikkelin standardiliuosten valmistuksessa käytettiin Agilent Technologies:n Wavecal liuosta, jota käytetään myös laitteen kalibrointiin. Wavecal liuos sisältää useita alkuaineita pitoisuudella 50 mg/l. Liuos ei sisällä tinaa, mutta lyijyä ja nikkeliä se sisältää. Koska liuoksen konsentraatio alkuaineilla on sama, voitiin lyijylle ja nikkelille tehdä yhteiset standardiliuokset. Standardit valmistettiin pitoisuuksille 0,01, 0,04, 0,06 ja 0,08 mg/l. Liuoksen pitoisuuden ollessa suuri, aloitettiin standardiliuosten valmistus välilaimennuksella. Välilaimennus suoritettiin pipetoimalla 8 ml Wavecal:ia 200 ml:n mittapulloon, mikä täytettiin ionivaihdetulla vedellä. Saatiin 200 ml liuosta jonka konsentraatio on 2 mg/l. Välilaimennosta pipetoitiin erillisiin 200 ml:n mittapulloihin 1,0, 4, 6, 8 ja 10 ml verran ja täytettiin ionivaihdetulla vedellä. Saatiin tarvittavat standardiliuokset halutuilla pitoisuuksilla.

Tinan standardiliuokset valmistettiin liuottamalla tarkasti punnittu 1 g puhdasta tinaa typpihappoon. Typpihappo jossa tina on liuenneena, huuhdeltiin 1 l:n mittapulloon ja täytettiin ionivaihdetulla vedellä. Seuraavaksi suoritettiin samanlainen välilaimennos kuin lyijy/nikkeli standardien valmistuksessa. Myös lopulliset standardiliuokset valmistettiin samalla tavalla ja samoilla pitoisuuksilla.

Lopulliset pitoisuudet sekä tinan ja lyijy/nikkelin standardiliuoksissa oli 0,01 mg/l, 0,04 mg/l, 0,06 mg/l, 0,08 mg/l.

Sinkkipadan nikkelpitoisuus kasvoi ensimmäisen nikkelseostuksen jälkeen, joten valmistettiin nikkelin määritystä varten uudet standardiliuokset pitoisuuksiltaan 0,08 mg/l, 0,5 mg/l, 1,0 mg/l, 1,5 mg/l, 2,0 mg/l.

6.2.2 Analysointi ja sinkkikylvyn koostumus

Analysointi tapahtui hyvin tietokoneen ohjeistamana aloittaen nollaliuoksen, eli ionivaihdetun veden analysoinnilla. Laite analysoi liuosta noin minuutin ajan, jonka jälkeen pyysi asettamaan ensimmäisen standardiliuoksen, sitten toisen ja niin edelleen kunnes viimeisenä analysoitiin näyte.

Analysoinnin jälkeen tietokoneen näytöllä näkyi vaihtoehtoisesti joko standardien mitatut intensiteetit tai asetetut konsentraatiot, jos ohjelma on hyväksynyt standardiliuokset. Ohjelmaan asetettiin kalibrointipisteen suurimmaksi sallituksi virheeksi 10 %, jos yksikin standardiliuos hylättiin, ohjelma ei muodostanut standardi suoraa eikä sen vuoksi laske-
nut konsentraatiota. Konsentraatio piti laskea mitattujen intensiteettien avulla. Ohjelma ei kuitenkaan tulosta näytteen intensiteettiä raporttiin, vaan se piti kirjoittaa ylös heti analysoinnin jälkeen.

Lyijyn konsentraatioksi laite määrittäi 0,03 mg/l. Näyteliuoksessa oli liuenneena sinkkiä 1 g/l, mikä tarkoittaa sinkkikylvyssä olevan 0,003 p-% lyijyä. Vaikka sinkkikylvyn oletettiin olevan puhdasta sinkkiä, on täysin ymmärrettävää että pitkään käytössä olleesta altaasta löytyy hyvin vähäinen määrä lyijyä, jota aikaisemmin käytettiin sinkin pintajännityksen alentamiseksi ja pohjaan muodostuvan kovasinkin poistamisen helpottamiseksi [29, s. 214].

Nikkelin konsentraatioksi saatiin 0,02 mg/l, eli sinkkikylvyssä oli aloitettaessa nikkeliä 0,002 p-%. Nikkelin löytyminen oli odotettavissa, koska Nikkeliä käytetään sinkkikylvyssä kontrolloimassa sinkkikerroksen paksuuden kasvua sinkittävän teräksen Si-pitoisuusalueella 0,04—0,12 %. Myös nikkelin oletettiin olevan jäännöstä sinkkipadan aikaisemmasta käytöstä.

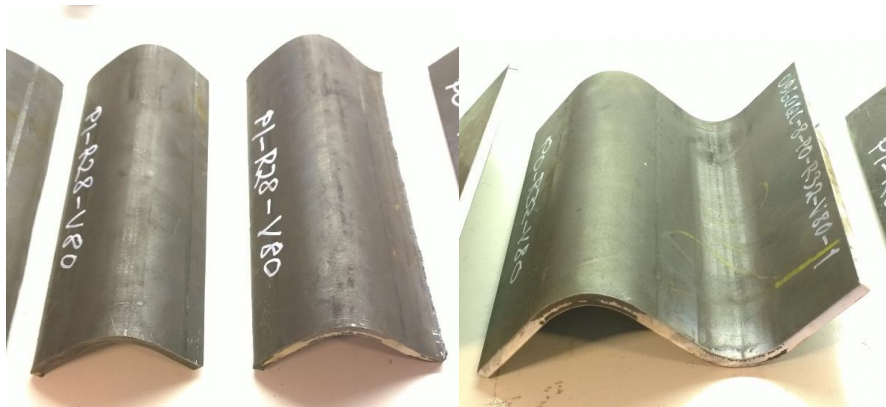
Tinan konsentraatio jouduttiin määrittämään laskennallisesti, koska standardiliuoksista yhden intensiteetti oli virhemarginaalin ulkopuolella. Konsentraation laskeminen suoritettiin Excelillä. Ensiksi muodostettiin standardiliuosten mitattujen intensiteettien avulla standardisuora. Standardisuoralta jätettiin pois 0,01 mg/l:n liuos, koska sen intensiteetissä oli virhettä. Standardisuoran kuvaajasta saadaan yhtälö, josta näyteliuoksen tina-pitoisuus voidaan laskea määritetyn intensiteetin avulla. Tinan intensiteetiksi saatiin 2969,66 c/s, sijoittamalla se y:n paikalle yhtälöön $y = 592361x - 303,7$ voidaan ratkaista x, eli konsentraatio. Standardisuora ja laskutoimitus sekä yhteenveto määritettyjen aineiden pitoisuuksista löytyvät Liitteestä 1.

Tinan konsentraatioksi saatiin $5,526 \times 10^{-3}$ mg/l. Tinan prosentuaalinen osuus sinkkikylvyssä on niin vähäinen 0,0005526 p-%, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon.

Sinkkikylvyn katsottiin olevan riittävän puhdasta sinkkiä, jotta kuumaupotukset voitiin aloittaa.

7 Koesarjat

Työtä varten SSAB toimitti kaksi sarjaa erilaisia ja erilaisista teräksistä valmistettuja näytteitä. Toinen sarja oli 8 mm:n Optim 960 QC teräslevystä valmistettuja näytteitä, joita oli särmätty eri särmäyssäteellä ja eri suuntiin valssaussuuntaan nähden. Levynäytteitä oli kahta eri kokoa, kuten kuvasta 13 nähdään, yhteensä 13 kpl.



Kuva 13. Erikokoisia särmättyjä levynäytteitä.

Levynäytteet jaettiin koon perusteella pieniin ja suuriin levyihin. Pienistä levyistä käytettiin tunnuksia A1 – A6:een ja isoista puolestaan B1 – B7:ään, taulukon 5 mukaisesti

Taulukko 5. Levyjen tunnuksien ja särmäysten

	Tunnus	Särmäys
Pienet levyt	A1	PO-R25-V80
	A2	PO-R25-V80
	A3	PI-R28-V80
	A4	PI-R28-V80
	A5	PO-R28-V80
	A6	PO-R28-V80
Isot levyt	B1	PI-R25-V100
	B2	PO-R25-V80
	B3	PO-R32-V80
	B4	PO-R25-V100
	B5	PO-R25-V80
	B6	PI-R32-V100
	B7	PO-R32-V100

Särmäysmerkinnöistä ensimmäiset kaksi kirjainta kertoo onko levy särmätty valssausuuntaan nähden pitkittäin vai poikittain, PI = pitkittäin ja PO = poikittain. Seuraava merkintä kertoo särmäyssäteen, R25 = särmäyssäde 25 mm. Viimeinen merkintä tarkoittaa särmäyksessä käytetyn vastakappaleen V-aukon leveyden, V80 = aukon leveys 80 mm. Osassa levynäytteissä leikkausjälki oli todella karkeaa, kuva 14. Ohjeen mukainen minimaivutussäde on 28. Osa näytteistä oli taivutettu alle minimisäteen.



Kuva 14. Polttoleikatun reunan leikkausjälki

Toinen sarja koostui erilaisista putkirakenteista ja eri tavalla katkaistuista rakenneputkista. Kaikkia putkinäytteitä valmistettiin kahdesta eri teräksestä siten, että jokaista näytettä oli 8 kpl kummastakin teräksestä, yhteensä siis 16 kpl/näyte. Käytetyt teräkset olivat SSAB:n S500 Laser ja Optim 700 Plus. Putkinäytteitä valmistettiin viidellä eri tavalla. Suoria putkia katkaistiin eri menetelmin sekä erimuotoisia kuvissa 15–17 näkyviä rakenteita hitsattiin. Yhteensä putkinäytteitä valmistettiin 80 kpl, joista 20 kpl sinkittiin Aurajoki Oy:ssä.

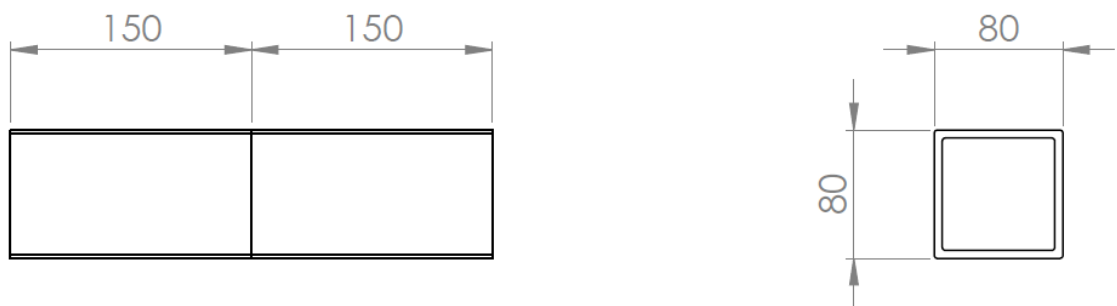


Kuva 15. Päistään eri menetelmällä katkaistu putki

Eri katkaisumenetelmiä oli laserleikkaus, kuumasaha ja kylmäsaha. Kuumasaha tarkoittaa putkitekhealla pyörivällä terällä tehtyä sahausta ja kylmäsaha tarkoittaa vannesahaa. Laserleikatut putket olivat molemmista päistä katkaistu laserilla. Kylmä- ja kuumasahalla katkaistuista putkista toinen pää oli katkaistu kuumasahalla ja toinen pää kylmäsahalla.

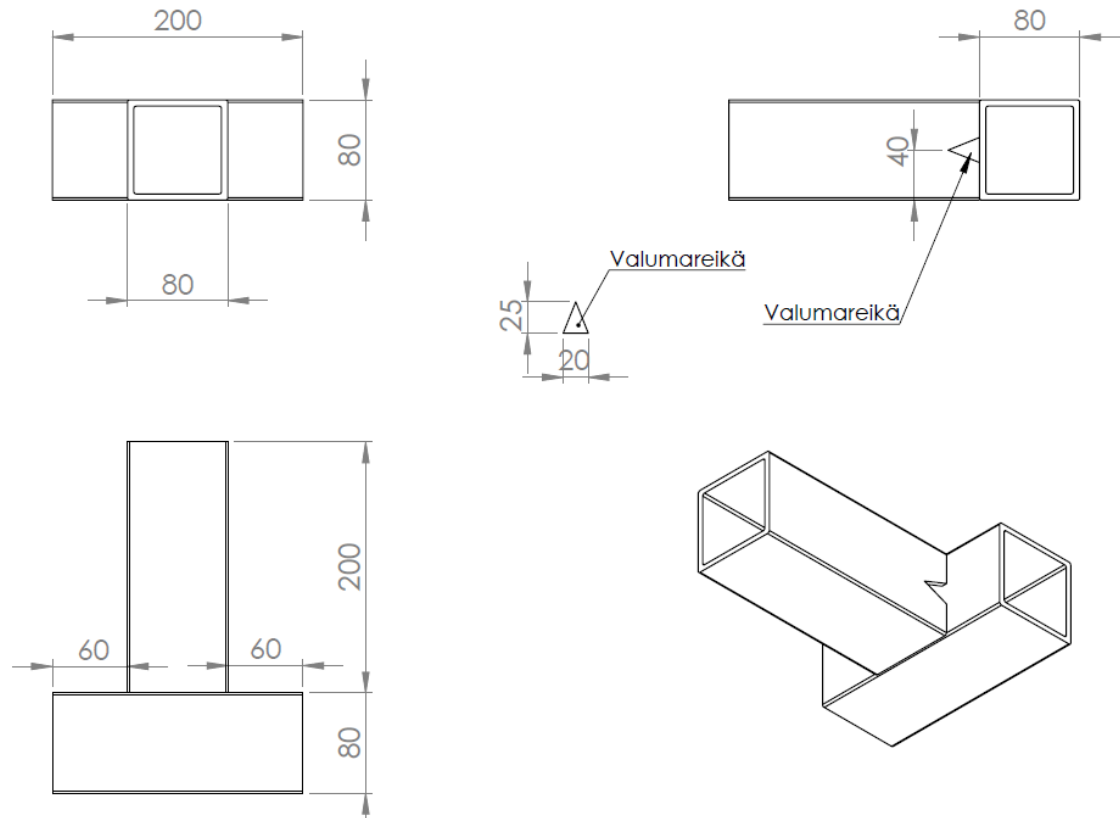
Pelkistä putkista oli myös valmistettu näytteet, joihin oli hitsattu palko keskelle putkea nurkan yli. Näistä putkista ei tehty piirrosta, vaan tekijöitä ohjeistettiin sanallisesti.

Kuvassa 16 olevat päittäisliitokset valmistettiin hitsaamalla laserleikatut putket yhteen. Putkien pituus yritettiin säilyttää mahdollisimman suurena, ottaen huomioon kuumasinkitys padan pieni koko.



Kuva 16. Putkista hitsattu päittäisliitos

T-liitokset valmistettiin hitsaamalla putket kuvan 17 esittämällä tavalla. Putket leikattiin laserilla ja niihin tehtiin valumareivät standardin SFS-EN ISO 14713-1 mukaisesti. Valumareikiä olisi pitänyt olla putken molemmilla puolilla, mutta näissä oli reiät vain toisella puolella putkea.



Kuva 17. Hitsattu T-liitos

Kaikki hitsauksissa käytetyt putket leikattiin laserilla. Pöytäkirjat putkinäytteiden hitsauksista löytyy liitteestä 2. Pöytäkirjoissa on virheellisesti ilmoitettu teräslajiksi S400, vaikka pitäisi olla S500 [30]. Liitteessä 3 on koontia putkien sahausista, ohjeistusta lähetyksistä ja Raahen hitsaukseen liittyvän työtilauksen hahmotelmaa.

Putkinäytteille annettiin tunnukset muodon tai katkaisutavan mukaan, taulukon 6 mukaisesti.

Taulukko 6. Putkinäytteiden tunnukset ja kappalemäärät

Näytteet: Valmistus	Tunnus	Näytemäärä/ S500Laser	Näytemäärä/ Optim 700 Plus
Sahattu putki: Kuumasaha	C	4	4
Sahattu putki: Kylmäsaha	C	4	4
Sahattu putki: Laser	D	8	8
Hitsattu liitos: Päittäisliitos	E	8	8
Nurkkaan hitsaus: T-liitos	G	8	8
Nurkkaan hitsaus: Pelkkä putki	H	8	8
	Yht.		80

Alkuperäisen suunnitelman mukaan putket piti olla molemmista päistä katkaistu samalla menetelmällä. Koska putkia oli katkaistu sahaamalla toisesta päästä kylmäsahalla ja toisesta päästä kuumasahalla, putkien sinkityksessä piti kiinnittää erityistä huomiota siihen, kumpi pää on kylmäsahattu ja kumpi pää kuumasahattu.

7.1 Levynäytteet

Ensimmäiseksi kuumasinkittiin levynäytteet, koska niistä oletettiin löytyvän säröjä helposti. Levynäytteiden avulla oli tarkoituksena perehtyä eri keinoihin havaita sulametallihaurauden aiheuttamaa säröilyä ja löytää paras käytettävä menetelmä putkinäytteiden säröjen löytämiseen.

7.1.1 Kuumaupotus

Kuumaupotukset aloitettiin levynäytteiden kastoilla. Levynäytteiden valmistuksessa oli jäänyt riiputusreiät tekemättä, joten levyihin tehtiin kulmahiomakoneella ja katkaisulakalla kuvan 18 mukaisesti viiltoja kulmiin, joista levyt saatiin rautalangan avulla roikuttamaan. Reikien poraamiseen ei ollut tarvittavia laitteita teräksen lujuuden vuoksi.



Kuva 18. Levynäytteiden riiputustavat

Levynäytteiden esikäsitteily aloitettiin asetonilla pyyhkimällä merkkauksilla tehdyt merkinnät, jonka jälkeen levyt kastettiin noin 60 °C:een rasvanpoistokylpyyn. Kastoaikaa rasvanpoistossa pidettiin noin 15 minuuttia, jonka jälkeen levyt huuhdeltiin ja siirrettiin peittauskylpyyn. Levyjen peittaantuminen oli todella hidasta, mutta peittausaikaa pystyttiin lyhentämään harjaamalla oksidikerrosta välillä tiskiharjalla. Peittausajat, jotka esitetään tarkemmin taulukossa 7, vaihteli levyillä 2—4 h:n välillä.

Peittauksen jälkeen levyt huuhdeltiin ja kastettiin juoksutekylpyyn. Ennen sinkkikylpyyn kastamista, levyistä puhallettiin niihin jäänyttä juoksutetta pois ja annettiin kuivua ilmassa. Ennen sinkkikylpyyn laskemista varmistettiin levyn olevan kuiva, jonka jälkeen sulan sinkin pinnalta poistettiin aiemmista sinkityksistä syntyneet juoksutejäänteet ja oksidit. Levyjä ei esilämmitetty. Lasku- ja nostonopeutta ei pystytty kontrolloimaan tarkasti, mutta jokainen levy pyrittiin kastamaan samoilla lasku- ja nostonopeuksilla. Kastoaikana pidettiin 6 min., lähtien siitä kun levy oli kokonaisuudessaan uponnut sinkkiin. Sinkkikylpyyn pinta putsattiin noin 30 sekuntia ennen kastoajan päättymistä, jotta kappaleen pintaan ei tarttunut kylvyyn pinnalla olleet kuonat. Kastoajan päätyttyä levyt nostettiin sinkkikylvystä ja annettiin jäähtyä ilmassa. Kappaleiden jäähtyttyä, niistä mitattiin sinkin kalvonpaksuus standardissa SFS-EN ISO 2802 kohdassa 5.5.8.1 kuvatulla pyörrevirtaan perustuvalla magneettisella kalvonpaksuusmittarilla [31, s. 52.] Mittari oli Elcometer 355. Kalvonpaksuudet perustuvat kymmenen mittauksen keskiarvoon ja ne esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7. Levyjen peittaus- sekä kastoajat ja sinkin kalvonpaksuudet

	Tunnus	Särmäys	Peittausaika	Kastoaika	Kalvon paksuus
Pienet levyt	A1	PO-R25-V80	2 h 45 min.	6 min.	100 µm
	A2	PO-R25-V80	2 h 45 min.	6 min.	90 µm
	A3	PI-R28-V80	2 h	6 min.	101 µm
	A4	PI-R28-V80	2 h	6 min.	96 µm
	A5	PO-R28-V80	2 h	6 min.	109 µm
	A6	PO-R28-V80	2 h	6 min.	108 µm
Isot levyt	B1	PI-R25-V100	3 h 20 min.	6 min.	102 µm
	B2	PO-R25-V80	3 h	7 min.	130 µm
	B3	PO-R32-V80	3 h 15 min.	6 min.	89 µm
	B4	PO-R25-V100	3 h 40 min.	6 min.	95 µm
	B5	PO-R25-V80	3 h 50 min.	6 min.	91 µm
	B6	PI-R32-V100	3 h 40 min.	6 min.	94 µm
	B7	PO-R32-V100	2 h 5 min.	6 min.	117 µm

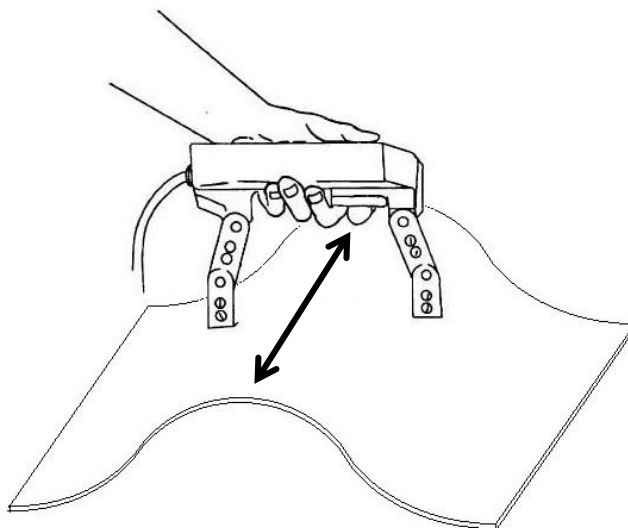
7.1.2 Tutkimusmenetelmien testaus säröjen etsintään

Ensimmäiseksi levynäytteet tarkastettiin visuaalisesti. Jo ennen käsittelyjen aloittamista levynäytteissä havaittiin särmäyksessä syntyneitä jälkiä, jotka otettiin huomioon seuraavia tarkastuksia tehdessä.

Silmämääräisesti levyt näyttivät ehjiltä, mutta joissakin levyissä sinkkikalvossa näkyi hiusmaisia palkoja. Huolellisen tarkastelun jälkeen oli selvää että palot eivät johtuneet säröilystä, koska niitä oli epäsäännöllisesti eripuolilla, eikä niitä alkanut levyjen reunasta.

Seuraavaksi levyjen särmäyksiä tutkittiin stereomikroskoopin avulla. Säröjen havainnointi ilman aikaisempaa kokemusta oli haasteellista. Mitään säröihin viittaavaa ei kuitenkaan mikroskoopilla ollut havaittavissa.

Visuaalisen tarkastelun jälkeen levyille suoritettiin magneettijauhetarkastus. Levynäytteet tarkastettiin ensin magnetisoimalla ne sektoreittain siirtäen magnetisointilaitetta särmää pitkin kuvan 19 osoittamalla tavalla, samalla pinnalle ruiskutettiin fluoresoivaa magneettijauhesuspensiota.



Kuva 19. Havainne kuva levynäytteen magnetisoinnista

Koska käytetty suspensio oli fluoresoivaa, jauheen leviäminen tarkastettiin fluoresenssin aiheuttavan sinisen valon avulla, minkä ensisijainen aallonpituus on 450 nm. Sinistä valoa käytettäessä alle 470 nm:n aallonpituudet suodatettiin pois keltalinssisillä lasilla, kuva 20 [26, s. 13]. Tämän jälkeen säröjä etsittiin magnetisoimalla levyjä sektoreittain särmän yli ristikkäiseen suuntaan erisuuntaisten säröjen havaitsemiseksi. Magneettijauhetarkastuksella levyistä ei säröjä löytynyt.



Kuva 20. Taskukokoinen sinistä valoa lähettävä valaisin ja keltaiset suodatinlasit [26, s. 13]

Säröjen etsintää jatkettiin tunkeumanestetarkastuksella. Tarkastusta varten levyt puksattiin ARDROX 9PR5 puhdistusaineella ja kuivattiin huolellisesti ennen tarkastuksen aloittamista. Puhtaalle pinnalle levitettiin hyvin tunkeutuvaa tunkeumanestettä, ARDROX 9VF2. Nesteen annettiin vaikuttaa levyjen pinnalla noin 30 minuuttia, jonka jälkeen pinnat puhdistettiin ja kuivattiin. Kun kappaleet saatiin kuiviksi, pintaan levitettiin ARDROX 9DIB-kehite, jonka tarkoituksena oli imeä pinnan vikoihin tunkeutunut neste. Kehitekalvoon imeytynyt neste olisi levinnyt vikaa suuremmalle alueelle, jolloin viat olisivat tulleet selkeästi näkyviin. Säröjä ei löydetty tunkeumanestetarkastuksella.

Kun säröjä ei tunkeumanestetarkastuksellakaan löytynyt, syövytettiin levyistä jotka oli särmäty pienimmällä R25 säteellä sinkkiä pois, kuvan 21 esittämällä tavalla. Sinkin syövytykseen käytettiin peittauksessa käytettyä suolahappoa koska se sisälsi vetyhaurautta ehkäisevää inhibiittia.



Kuva 21. Levynäyte josta syövytetty sinkkiä pois

Sinkin syövyttämisen jälkeen kokeiltiin magneettijauhetarkastusta ja tunkeumanestetarkastusta uudelleen. Levyistä ei edelleenkään löytynyt säröjä, joten levyjen todettiin olevan vaurioitumattomat ja aloitettiin putkinäytteiden käsittelyt.

7.2 Putkinäytteet

Putkinäytteiden avulla pyrittiin selvittämään sinkkipadan nikkelpitoisuuden vaikutusta sulametallihaurautteen erilaisissa hitsatuissa rakenteissa ja eri menetelmällä katkaistujen putkien päissä. Putkirakenteita oli neljä samanlaista sarjaa, joista kolme kuumasinkittiin Metropoliasa eri sinkkikylvyn nikkelpitoisuuksilla; 0,00 %, 0,05 % ja 0,1 %. Yksi sarja toimitettiin Aurajoki Oy:lle, jonka sinkkipadan koostumus ei ole tiedossa. Nikkelpitoi-

suutta kasvatettiin sarjojen välissä lisäämällä sinkkipataan nikkelpulveria. Nikkelpulverin lisäystä varten mitattiin padassa olevan sinkin tilavuus, joka muutettiin massaksi ja sitten laskettiin tarvittava nikkelpulverin massa. Sinkkikylvyn nikkelpitoisuus nikkeli-seostusten jälkeen varmennettiin suorittamalla analyysit MP-AES laitteella. Analyysejä varten valmistettiin näytteeksi liuos johon oli liuenneena analysoitavaa sinkkiä 1 g/l.

Näyteliuoksen pitoisuudeksi valittiin 1 g/l prosentuaalisen pitoisuuden laskemisen helpottamiseksi. Koska MP-AES analyysi antaa tutkittavan aineen pitoisuuden mg/l, voidaan tulos jakaa kymmenellä, jolloin saadaan suoraan tulos painoprosentteina. Analyysien tulokset löytyvät liitteestä 4 ja 5.

7.2.1 Kuumaupotukset

Putkinäytteiden käsittely toteutettiin samalla tavalla kuin levynäytteiden. Peittausajat putkinäytteissä oli huomattavasti lyhemmät kuin levynäytteissä. Tämä johtui luultavasti eri teräslaadusta ja putkiprofiilin valmistusmenetelmän poikkeavuudesta levyyn nähden. Hitsatuissa saumoissa peittaantuminen oli hitaampaa. Saumojen peittaantumista saatiin nopeutettua harjaamalla saumoja tiskiharjalla peittauksen yhteydessä. Peittausajat löytyvät liitteestä 6. Putkinäytteissä kokeiltiin myös jäähdytystavan vaikutusta säröilyyn. Kaikkia näytteitä kaikissa sinkkipadan koostumuksessa sinkittiin kaksi kappaletta, joista toinen sammutettiin veteen ja toisen annettiin jäähtyä ilmassa.

Työ eteni sarja kerrallaan siten, että ensin sinkittiin ilman nikkelseostusta ja tehtiin tarkastukset. Sitten sinkittiin 0,05 %:n nikkelseostuksella ja tehtiin tarkastukset. Viimeinen sarja sinkittiin 0,1 %:n nikkelpitoisuudella. Metropolialla suoritetun viimeisen sarjan sinkityksen aikana myös Aurajoella tehtiin yhden sarjan kuumasinkitys. Viimeiset kaksi sarjaa tarkastettiin samanaikaisesti.

Myös kaikkien putkinäytteiden sinkkipinnan kalvonpaksuus mitattiin. Kalvonpaksuudet löytyvät taulukoituna liitteessä 6.

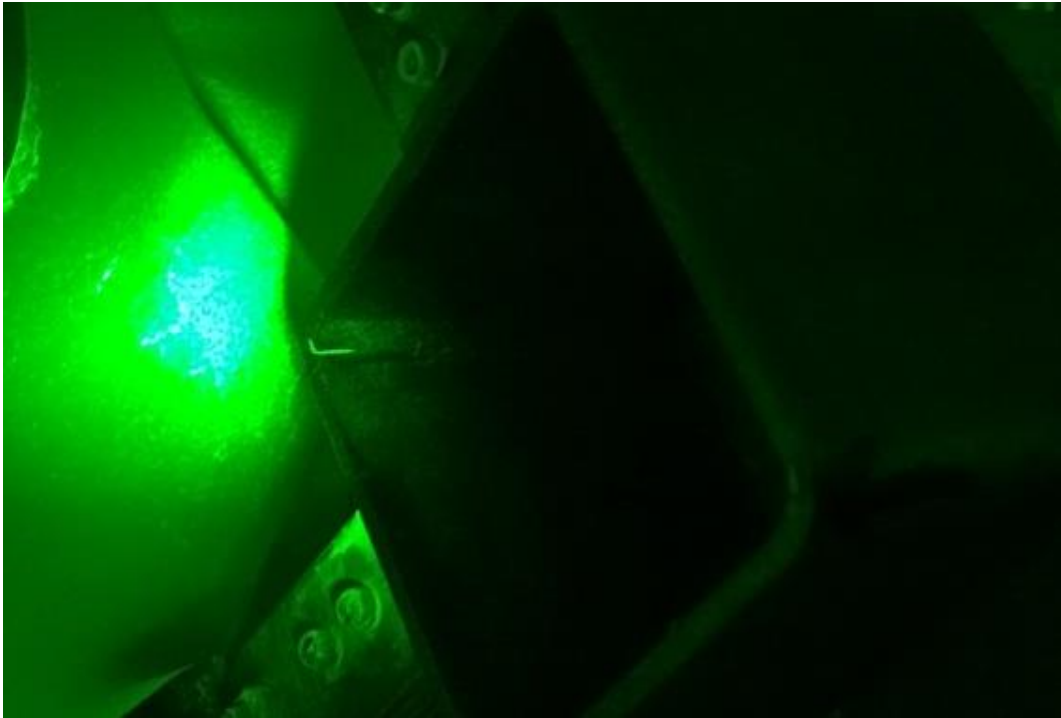
7.2.2 Tarkastukset

Ensimmäisissä putkinäytteissä tarkastukset aloitettiin visuaalisista menetelmistä, ensin silmämääräisesti ja sitten stereomikroskoopilla. Stereomikroskoopilla tarkastaminen rajoittui kohteen mukaan vain putkien päihin ja pintoihin, jotka saatiin sopimaan mikroskoopin alle. Visuaalisella tarkastuksella ei havaittu mitään säröilyyn viittaavaa.

Magneettijauhetarkastus suoritettiin leikattujen putkien päihin ja hitsisaumojen alueille. Hitsisaumojen tarkastuksessa aluetta magnetisoitiin ensin kohtisuoraan sauman yli ja etsittiin säröjä. Sen jälkeen aluetta magnetisoitiin hitsisauman suuntaisesti, kuitenkin niin että magnetisointilaitteen navat olivat eri puolilla saumaa. Näin menettelemällä pystyttiin tarkastamaan myös mahdolliset hitsisauman katkeilut. Putket tarkastettiin myös sisäpuolelta hitsausten kohdalta.

Leikatut putket tarkastettiin leikkauskohtien läheisyydestä ulkopinnalta, etenkin kulmista. Oletuksena oli että säröjä esiintyy profiilin ulkokulmissa, valmistuksen aikana syntyneen vetojännityksen vuoksi. Säröjä ei hitsauksissa tai putkenpään ulkopinnoilla havaittu. Putken päistä syövytettiin sinkki pois peittaushapolla ja suoritettiin tunkeumanestetarkastus. Tunkeumanestetarkastuksessa ei havaittu mitään säröihin viittaavaa.

Putkiprofiilien valmistustavasta johtuen vetojännitystä syntyy profiilin sisäkulmiin [32 ; 33]. Tämän jälkeen tarkastuksissa keskityttiin ulkopinnan sijaan putkenpäiden sisäpintoihin ja suoritettiin jo tarkastetuille putkille uudet tarkastukset. Sisänurkan tarkastuksessa nurkkaa magnetisoitiin ulkopuolelta niin, että magnetointilaitteen navat olivat putken eri lappeella, jolloin laserleikatuista putkista löydettiin säröjä. Magneettijauhetarkastus antoi todella selvän indikaation säröstä, kuten seuraavalla sivulla olevassa kuvassa 22 on nähtävissä.



Kuva 22. Magneettijauhetarkastuksen indikaatio sulametallihaurauden aiheuttamasta säröstä

Magneettijauhetarkastuksella löydettiin säröjä ainoastaan eri menetelmin leikatuista putkinäytteistä, neljästä kylmäsahatusta sekä kuudesta laserleikatusta. Yhtään hitsatussa rakenteessa olevaa säröä ei löydetty. Edes valumareiän kärjessä ei säröilyä esiintynyt, vaikka se on leikattu laserilla ja aiheuttaa suuren jännityskeskittymän. Havaituista säröistä kerrotaan tarkemmin tulokset osiossa.

Magneettijauhetarkastuksen yhteydessä säröjen pituudet mitattiin pituussuuntaan työntömitalla. Kokeellisen osuuden laajuuden vuoksi tarkempaan mittaukseen ei ollut aikaa. Samalla laskettiin putkista löytyneiden säröjen määrä.

7.3 Tulokset

Levynäytteistä ei löydetty näyttöä sulametallihauraudesta. Tarkastusmenetelmää jatkoa ajatellen ei voitu vielä valita tässä vaiheessa. Ensimmäisen putkinäyte sarjan tarkastuksissa magneettijauhetarkastus osoittautui hyvin toimivaksi menetelmäksi ja indikaatiot säröistä olivat selvät.

Sulametallihaurauden aiheuttamaa säröilyä havaittiin vain lujemmassa **Optim 700 Plus** teräksessä. Taulukossa 8 on taulukoituna missä näytteissä säröilyä havaittiin ja millä sinkkipadan koostumuksella näyte oli kuumasinkitty.

Taulukko 8. Säröilleet putkinäytteet

Patakoostumus (Ni)	0 %	0,05 %	0,10 %	Aurajoki Oy
Kylmäsaaha		C5, C6	C9	C15
Laserleikattu	D3, D4	D7, D8	D9, D11	D16

Lisäksi taulukosta 9 löytyy säröjen määrä ja niiden pituuksien keskiarvot.

Taulukko 9. Säröjen määrä ja pituudet (C = kylmäsaahattu, D = laserleikattu)

Sinkkikylvyn koostumus	Tunnus	Säröjen määrä	Särön pituuden keskiarvo	Särön syvyys	Jäähdytys tapa
0,05 %	C5	1	5,9 mm	53 µm	Vesi
0,05 %	C6	2	8,6 mm	1585 µm	Ilma
0,1 %	C9	2	5,8 mm	1089 µm	Vesi
Aurajoki Oy	C15	1	7,2 mm	29 µm	Ilma
0,0 %	D3	1	3,3 mm		Vesi
0,0 %	D4	4	5,6 mm	778 µm	Ilma
0,05 %	D7	3	6,6 mm	1325 µm	Vesi
0,05 %	D8	1	6,6 mm		Ilma
0,1 %	D9	1	3,6 mm		Vesi
0,1 %	D11	2	4,9 mm	604 µm	Ilma
Aurajoki Oy	D16	2	4,3 mm	1021 µm	Vesi

Taulukossa 10 esitetään tarkemmat tiedot näytteiden käsittelystä sekä kalvonpaksuudet. Taulukosta puuttuu näytteiden C15 ja D16 kohdalta peittausajat, koska ne ovat peitattu Aurajoki Oy:ssä eri peittauskylvyssä kuin Metropoliassa peitatut, eikä peittausaikaa ole ilmoitettu.

Taulukko 10. Tarkemmat tiedot säröilleistä putkinäytteistä (C = kylmäsahattu, D = laserleikattu)

Näyte	Lujuus	Peittaus	Kastoaika	Kal- vonpaksuus	Jäähdytys
C5	700 Mpa	35 min.	6 min.	108 µm	Vesi
C6	700 Mpa	35 min.	6 min.	132 µm	Ilma
C9	700 Mpa	120 min.	6 min.	102 µm	Vesi
C15	700 Mpa		6 min.	130 µm	Ilma
D3	700 Mpa	50 min.	6 min.	134 µm	Vesi
D4	700 Mpa	40 min.	6 min.	129 µm	Ilma
D7	700 Mpa	35 min.	6 min.	111 µm	Vesi
D8	700 Mpa	40 min.	6 min.	114 µm	Ilma
D9	700 Mpa	120 min.	6 min.	96 µm	Vesi
D11	700 Mpa	120 min.	6 min.	88 µm	Ilma
D16	700 Mpa		6 min.	130 µm	Vesi

SSAB:llä säröistä otettiin mikrorakennekuvat optisella metallimikroskoopilla ja mitattiin säröjen syvyys ulkopinnasta. Kuvat ovat liitteessä 7. Säröjä oli toisissa putkissa enemmän kuin toisissa. Mikrorakennekuvia on otettu jokaisesta putkesta vain yhdestä säröstä.

7.4 Johtopäätökset

7.4.1 Tutkimusmenetelmän valinta

Visuaalisella tarkastuksella ei pysty havaitsemaan pienempiä sulametallihaurauden aiheuttamia säröjä. Kappaleen vaurioituessa sinkityksen aikana sinkkipinnoite ilmeisesti peittää syntyneen särön niin hyvin, ettei edes stereomikroskoopin avulla voi sitä paikallistaa. Kun putket oli pesty magneettijauhetarkastuksen jälkeen, saattoi särön joistakin putkista erottaa jopa paljaalla silmällä, kuitenkin niin huonosti että sitä ei pystynyt selvästi kuvaamaan.

Tunkeumanestetarkastuksen tekeminen on kuivumisajan ja kehitteen vaikutusajan vuoksi hidasta. Tunkeumanestetarkastuksen toimivuus putkinäytteissä olevien säröjen havaitsemiseen sinkkiä syövyttämättä jäi kokeilematta, koska magneettijauhetarkastuksen nopeus ja selvät indikaatiot tekivät siitä tunkeumanestetarkastusta adekvaatimman vaihtoehdon.

Magneettijauhetarkastus sopii hyvin säröjen etsintään sinkkipinnoitteen alta, pinnoitetta vaurioittamatta. Tarkastuksen tekeminen on suhteellisen nopeaa ja helppoa, särö indikaatiot olivat näkyvissä lähes heti magneettijauhe-suspension levittämisen jälkeen.

Saksalaisessa Technologie und Sicherheitsgewinnung beim Feuerverzinken zum Ausbau der Marktposition des verzinkten Stahlbaus tutkimuksessa oli magneettijauhetarkastuksella havaittu säröjä jopa 1000 µm sinkkipinnoitteen alta. Kuitenkin pinnoitteen paksuuden ollessa vain 360 µm, ei menetelmällä saatu indikaatiota säröstä. Tutkimuksessa oli käytössä laite jolla magneettikentän voimakkuus oli säädettävissä. Tulokset jättivät epäselväksi onko magneettijauhetarkastus 100 %:n menetelmä särön havaitsemiseen. Tulokset viittasivat siihen että magneettijauhetarkastuksen varmuus on sitä heikompi mitä ohuempi on sinkkipinnan paksuus. [34, s. 191—192].

Tässä opinnäytetyössä säröjä löydettiin sinkkipinnan paksuuden ollessa noin 100 µm. Käytössä olleesta laitteesta ei voinut säätää magneettikentän voimakkuutta. Saksalaisesta tutkimuksesta poiketen, tässä työssä käytettiin fluoresoivaa magneettijauhetta. Standardin SFS-EN ISO 9934-1 mukaan kuivia magneettijauheita käytettäessä tarkastusherkkyyks on yleisesti ottaen heikompi [23, s. 16.]

Fluoresoivan jauheen käyttö voi kohteesta riippuen olla haasteellista yksin, kun tarkastuksessa tarvitaan erillistä erikoislamppua. Myös indikaatioiden kuvaaminen edellyttää fluoresenssin esiin tuovan linssin käyttöä. Vaikka fluoresoivan magneettijauhetarkastuksen käyttö suosi hieman vähävaloista ympäristöä, oli indikaatiot valoisassakin selvät.

7.4.2 Sulametallihauraus

Optim 960 QC teräksestä valmistetuissa levynäytteissä ei havaittu sulametallihaurautta, vaikka osa levyistä oli särmäty ohjeistetun minimisäteen alle [35, s. 7]. Myöskään polttoleikattuun reunaan ei syntynyt sulametallihaurautteen viittaavaa säröilyä. Optim 960 QC teräksen kuumasinkitys vaikuttaa toimivalta sinkittäessä puhtaalla sinkillä.

Tehtyjen kokeiden perusteella sulametallihauraus ei ole esteenä S500 Laser –teräksen kuumasinkitykselle puhtaassa tai nikkelseosteisessä sinkkikylvyssä. Vaikka näytteitä sinkittiin myös Aurajoki Oy:n padassa ilman sulametallihaurautta, ei tämän työn perusteella kuitenkaan voida varmuudella pois sulkea teräksen alttiutta sulametallihaurautteen teollisuudessa käytettävien muiden seosaineiden johdosta.

Optim 700 Plus teräksen alttius sulametallihauraudelle on riippuvainen käsittelystä, varsinkin katkaisutavasta. Sulametallihaurautta esiintyi vain laserleikatuissa ja kylmäsahatuissa päissä.

Vaikka sahauksista ei ole tarkempaa tietoa voidaan olettaa kuumasahauksen kuumentavan terästä aivan putken päässä niin, että teräksen sisäiset jännitystasot laskevat. Sulametallihauraudessa olennaista kuitenkin on teräksessä vaikuttavat jännitykset. Kylmäsahaus ei kuumenna terästä riittävästi sisäisten jännitysten alentamiseksi.

Termisessä leikkauksessa Optim 700 Plus leikkausreunaan muodostuu kapea pehmenyt vyöhyke. Kuitenkin leikkausprosessin lämpökäsittelistä vaikutuksista johtuen leikkauksen jälkeen muodostuu kova ferriittis-martensiittis-bainiittinen mikrorakenne [36, s.3]. Leikkauksen jäljen karmeneminen ja siitä aiheutuvat jännitykset luultavasti johtavat teräksen murtumiseen. Tulokset ovat yhtäläiset saksalaisten tekemän tutkimuksen mukaan [34, s. 66]

Jäähdytystavalla ei voida tämän työn perusteella olettaa olevan vaikutusta sulametallihaurauden esiintymiseen. Sinkkipadan nikkelipitoisuudella 0,1 % sinkityistä kylmäsahatuista putkista säröili vain vedessä sammutettu, mutta se ei vielä riitä osoittamaan sen johtuneen juuri sammutustavasta. Kuitenkin taulukosta 9 näkee, että säröjen pituus on ilmassa jäähdytetyissä putkissa pidempi verrattaessa veteen sammutettuihin. Särön eteneminen vaikuttaisi jatkuvan sinkistä noston jälkeen ja pysähtyvän kappaleen jäähdyttyä riittävästi. Säröjen syvyyksien vertailua jäähdytysten välillä ei voi tehdä saatujen tulosten perusteella. Syvyysmittauksia ei ole vertailukelpoisista kappaleista, joissa olisi sama katkaisumenetelmä ja sama sinkkipadan seostus.

Sinkkipadan nikkeliseostuksella ei ole ainakaan lieventävää vaikutusta sulametallihaurauteen. Tulosten perusteella vaikuttaisi että 0,05 %:n nikkeliseostus aiheuttaa eniten säröilyä, mutta myös 0,1 %:n seostuksella säröilyä esiintyi lähes yhtä paljon. Myös pisimmät säröt löytyivät 0,05 %:n seostuksella sinkityistä putkista. Kylmäsahatuissa putkissa nikkeliseostus näyttää altistavan sulametallihaurauteen, mutta tutkittavien muuttujien laajuuden vuoksi siitä ei saatu tarpeeksi näyttöä.

7.5 Jatkotutkimukset

Jatkotutkimuksia tulisi tehdä yksinkertaistettummin ja keskittyen syvemmin yhteen tai kahteen muuttujaan. Esimerkiksi kaikkien sinkityksessä yleisesti käytettyjen seosainesten vaikutusta sulametallihaurauteen kannattaisi tutkia vakioimalla kappaleen dimensiot kuten Euroopan komission yhteisen tutkimuskeskuksen (JRC) raportissa Hot-dip-zinc-coating of prefabricated structural steel components esitetään [37, s. 21]. Raportissa olevan testauslaitteiston kaltaisella järjestelyllä tutkittavia muuttujia ja parametreja, kuten sinkkipadan koostumusta ja teräksen jännitystilaa pystytään kontrolloimaan tarkasti. Koemenettelyllä saadaan vertailukelpoisia koetoistoja ja voidaan myös tuottaa numeerista tietoa kokeista ja sulametallihaurauteen vaikuttavista tekijöistä.

Lähteet

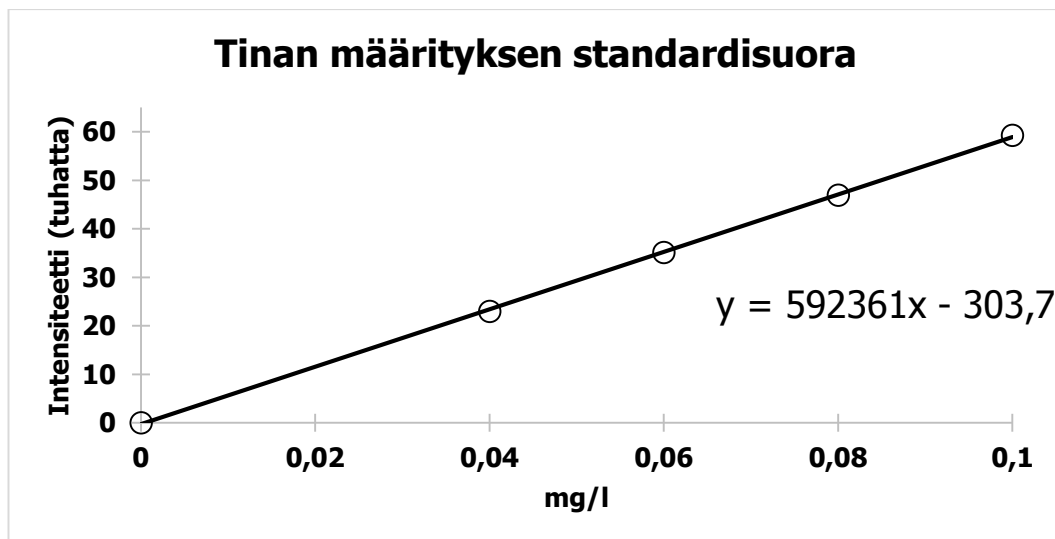
- [1] Mendala, J. 20012. Liquid metal embrittlement of steel with galvanized coatings. Department of Materials Technology, Silesian University of Technology. Katowice, Puola. Verkkodokumentti. Saatavana: http://iopscience.iop.org/1757-899X/35/1/012002/pdf/1757-899X_35_1_012002.pdf. Viitattu 5.11.2014.
- [2] Hertzberg, Richard, W. 1996. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. John Wiley & sons, inc. USA.
- [3] Rudd, W. J., Wen, S. W., Langenberg, P., Donnay, B., Voelling, A., Pinger, T., Feldmann, M., Carpio, J., Casado, J. A., Alvarez, J. A., Gutierrez-Solana, F. 2007. Failure mechanisms during galvanising. Final report. Research Fund for Coal and Steel. Directorate-General for Research. European Commission
- [4] Lämsä, Janne. Kiuru, Henri. 2012. Ultralujat rakenne- ja kulutusteräkset tärkeimmät ominaisuudet suunnittelulle. CASR-Steelpolis –verkostohanke (EAKR). Raahen Seudun Teknologiakeskus Oy. Oulun yliopisto.
- [5] SFS-EN ISO 10020. 2000. Teräslajien määritelmät ja luokittelu. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- [6] Ruukki. 2014. Optim QC rakenneteräkset. Verkkodokumentti. Saatavana: <http://www.ruukki.fi/Teras/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-QC-rakenneterakset>. Viitattu 20.3.2014.
- [7] Ahola, Kimmo. 2008. Konepajatyön laadun vaikutus teräsrakenteen kuumasinkitykseen. Opinnäytetyö. Satakunnan ammattikorkeakoulu.
- [8] Ylitalo, Juhani. 2013. LMAC ohje. Verkkodokumentti. Saatavana: http://www.teras-rakeneyhdistys.fi/fin/t_k_ja_jaostot/pintakasittelyjaosto/sinkitys/. Viitattu 20.3.2014.
- [9] Kiuru, Henri. 2012. Ultralujien terästen ominaisuuksien hyödyntäminen kone- ja teräsrakenteissa. CASR-Steelpolis –verkostohanke (EAKR). Tulevaisuuden tuotantoteknologiat –tutkimusryhmä. Oulun yliopisto.

- [10] Wallin, Torgny. 1991. Kuumasinkitys. Nordisk Förzinkningsförening / Suomen kuumasinkitsijät. ISBN 91-971327-0-5. Forssa: Auranen Oy.
- [11] Yleisohje. 2007. Kuumasinkityksen toimintaketju. Suomen kuumasinkitsijät ry. http://www.kuumasinkitys.fi/kuumasinkityksen_toimintaketju_yleisohje_1_2007.pdf. Viitattu 19.11.2014
- [12] Soininen, Raimo. 2007. Kuumaupotukset. EVTEK Materiaali- ja pintakäsittelytekniikan julkaisuja No 9.
- [13] Suomen Galvanotekninen Yhdistys. 1996. Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely, osa 1. Vantaa: Tummavuoren Kirjapaino Oy.
- [14] SFS-EN ISO 1461. 2009. Valurauta- ja teräskappaleiden kuumasinkkipinnoitteet. Spesifikaatiot ja testausmenetelmät. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- [15] SFS-EN ISO 1463. 2004. Metallien pinnoitteet. Paksuuden mittaus. Mikroskooppimenetelmä. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- [16] SFS-EN ISO 1460. 1995. Metalliset pinnoitteet. Rautapohjaisten materiaalien kuumasinkkipinnoitteet. Pinta-alamassan määrittäminen punnitusmenetelmällä. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- [17] Rakenteiden muotoilu kuumasinkityksen kannalta. Verkkodokumentti. Saatavilla: http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/t__k_ja_jaostot/pintakasittelyjaosto/sinkitys/. Viitattu 19.11.2014.
- [18] SFS-EN ISO 14713-1. 2009. Sinkkipinnoitteet. Ohjeet ja suositukset rauta- ja teräsrakenteiden korroosionestoon. Osa 1. Yleiset suunnitteluperiaatteet ja korroosionkestävyys. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- [19] Galvanized Rebar. 2005. Coating Properties. International Zinc Association. Verkkosivut. Saatavilla :http://www.galvanizedrebar.com/coating_properties.htm. Viitattu 19.11.2014.

- [20] Mix, Paul E. 2005. Introduction to Nondestructive Testing: A Training Guide. 2. painos. ISBN: 978-0-471-71913-7. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey.
- [21] Hoadley, Rick. "Magnet Man". A Gallery of Magnetic Fields. Verkkosivut. Saatavana: <http://www.coolmagnetman.com/maggallery.htm>. Viitattu 19.11.2014
- [22] Iowa State University. Magnetic Particle Inspection. Verkkosivut. Saatavana: <http://www.iprt.iastate.edu/assistance/nde/tools/magparticle>. Viitattu 19.11.2014.
- [23] SFS-EN ISO 9934-1. 2002. Rikkomaton aineenkoetus. Magneettijauh tarkastus. osa 1. Yleisohjeet. Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- [24] Suominen, Marko. 2011. NON DESTRUCTIVE TESTING: NDT-TARKASTAJAN AMMATTI JA REKRYTOINTI. Opinnäytetyö. Turun Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka.
- [25] Liquid Penetrant. Penetrant Inspection Process. Verkkosivut. Saatavana: <http://liquidpenetrant.com/penetrant-inspection-process/>. Viitattu 19.11.2014.
- [26] Koskinen, Kristian. 2014. Sinisellä valolla tehtävä NDT-tarkastus. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka.
- [27] Agilent MP-AES 4100. Käyttöohjekirja Metropolia Ammattikorkeakoulun laitteelle.
- [28] Agilent Technologies. Agilent 4100 MP-AES. Tekniset tiedot. Verkkodokumentti. Saatavana: http://hpst.cz/sites/default/files/uploaded_files/5990-8573en_4100_mp-aes_specs.pdf. Viitattu 19.11.2014.
- [29] Pugazhenty, L., Porter, Frank. 1991. Zinc Handbook: Properties, Processing, and Use In Design. ISBN 0824783409. New York, USA: Marcel Dekker, Inc.
- [30] Förell, Heidi. Sähköpostiviesti. 30.6.2014
- [31] SFS-EN ISO 2808. 2007. Maalit ja lakat. Kalvonpaksuuden määrittäminen. Suomen Standardisoimisliitto SFS.

- [32] Minkkinen, Jussi. Suullinen tiedonanto. 25.6.2014.
- [33] Erkkilä Jari. 2009. Erikoislujat kuumasinkityt teräsputkipalkit tulevaisuuden teräsrakenteissa (eLusiter). Loppuraportti projektissa tehdystä tutkimustyöstä.
- [34] Feldmann, Markus, Schäfer, D., Wolfgang, Bleck, Durst, A., Pohl, Michael, Luithle, Alexander, Schütz, Andreas, Triebert, Jürgen, Vormwald, Michael, Versch, Christian, Berger, Christina, Landgrebe, Rainer, Adelman, Jörg, Körber, Dominik, Keitel, Steffen, Schmeink, Helmut. Technologie und Sicherheitsgewinnung beim Feuerverzinken zum Ausbau der Marktposition des verzinkten Stahlbaus. FOSTA – Forschungsvereinigung Stahl e.V.
- [35] Ruukki. FLANGING, RAEX® WEARRESISTANT STEELS, ULTRAHIGH-STRENGTH OPTIM® QC STEELS. Verkkodokumentti. Saatavana: <http://www.ruukki.fi/~media/Files/Steel-products/Hot-rolled-steels-processing-instructions/Ruukki-Hot-rolled-steels-Processing-of-material-Flanging-Raex-and-Optim-QC.ashx>. Viitattu 30.11.2014
- [36] Ruukki. Terminen leikkaus ja kuumilla oikominen. Verkkodokumentti. Saatavana: <http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Kuumavalssatut%20-%20kasittelyohjeet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-Terminen-leikkaus-ja-kuumilla-oikominen.ashx>. Viitattu 7.11.2014.
- [37] Feldmann, M., Pinger, T., Schäfer, D., Pope, R., Smith, W., Sedlacek, G. 2010. Hot-dip-zinc-coating of prefabricated structural steel components. Joint Report. JRC Scientific and Technical Reports. Prepared under the JRC – ECCS cooperation agreement for the evolution of Eurocode 3.

Sinkkikylvyn analysointi ja koostumus



Kuva 1. Tinan määrittämisen standardisuora

Laskutoimitus tinan prosentuaalisesta osuudesta näytteen massassa:

$$2969,66 = 592361x - 303,7$$

$$2969,66 + 303,7 = 592361x$$

$$3273,36 = 592361x$$

$$x = \frac{3273,36}{592361}$$

$$x = 5,526 \times 10^{-3}$$

Taulukko 1. Sinkkikylvystä määritetyt alkuainepitoisuudet

Tutkittu aine	Konsentraatio	Osuus sinkkikylvystä
Pb	0,03 mg/l	0,003 p-%
Ni	0,02 mg/l	0,002 p-%
Sn	$5,526 \times 10^{-3}$ mg/l	0,0005 p-%


HITSAUSKOEPÖYTÄKIRJA
DETAILS OF WELD TEST

Pöytäkirjan nro Report no	881	Työ nro Work no	298/14	Tilaaja Customer	Jussi Minkkinen&Heidi Förell
Paikka Location	Ruukki Metals, Raahe		Hitsausohje nro WPS no	Menetelmäkoepöytäkirjan nro WPAR no	
Valmistaja Manufacturer	Rautaruukki Oyj		Perusaine Parent material spec.	S400 Laser	
Hitsaaja Welder	Janne Ruotsalainen		Ainepaksuus Material thickness	5mm	
Hitsausprosessi Welding process	135, Mag-hitsaus		Ulkohalkaisija Outside diameter	---mm	
Liitosmuoto Joint type	I-railo		Liitoksen kuva Joint design	Hitsausjärjestys Welding sequence	
Hitsausasento Welding position	PA, jalkoasento				
Railon valmistus Edge preparation	koneistus				
Railon puhdistus Cleaning	---				
Silloitus Tacking	---				
Juurituki Backing	---				
Juuren avaus Back gouging	---				
Jälkikäsittely Post-weld treatment	---				

Hitsauksen suoritusarvot / Welding details

Palko Run	Prosessi Process	Lisäaineen mitat Size of filler metal mm	Hitsausvirta Current A	Kaarjännite Voltage V	Virtalaji/napaisuus Type of current/ polarity	Langansyöttö Wire feed m/min	Kuljetusnopeus Travel speed cm/min	Kaarienergia Arc energy kJ/mm	
1	135	1.0	165	19	DC+	6.4	21.85	~0.8	
Esikuumennus Preheat			°C		Palkojen välinen lämpötila Interpass temperature				°C
TIG-elektrodi, tyyppi/koko Tungsten electrode, type/size					Huom. Notes				päittäisliitos

Hitsausaineet / Welding Consumables

Kauppanimi ja lisäaineen luokittelu Trade name and classification of filler metal				ESAB OK Autorod 12.64 SFA/AWS A5.18: ER70S-6			
Suojakaasu/jauhe Shielding gas/fux	Mison 18	Juurikaasu Backing gas	---	Kaasun virtausnopeus Gas flow rate	18L/min		
Käsittely, kulfuus yms. Baking, drying etc.							

Jälkilämpökäsittely / PWHT
Lisätiedot / Other information

Menetelmäohje Method/spec.	---	Suutinetäisyys Stand off distance	14-17mm				
Lämpötila Temperature	---°C	Piiloaika Heating time	---	Sivuttalsillike (palon max. leveys) Weaving (max. width of run)	---		
Lisätiedot: esim. kuumennus- ja jäähtymisnopeudet Other information: heating and cooling rates etc.				Värähtely (amplitudi, taajuus, pysäytysaika) Oscillation (amplitude, frequency, dwell time)	---		
°C/min				Plasmahitsausarvot Plasma welding details	---		
°C/min				Sykehitsausarvot Pulse welding details	---		
Pvm Date	29.08.2014	Laatija Author	Janne Ruotsalainen		Poltinkuima / Torch angle	90°	

Hyväksyntä / Approval

Valmistaja Manufacturer	Tilaaja Customer	Valvoja tai testauksen suorittaja Examiner or test body
Päiväys ja allekirjoitus Date and signature	Päiväys ja allekirjoitus Date and signature	Päiväys ja allekirjoitus Date and signature

Hitsauspki.doc


HITSAUSKOEPÖYTÄKIRJA
DETAILS OF WELD TEST

Pöytäkirjan nro Report no	882	Työ nro Work no	298/14	Tilaaja Customer	Jussi Minkkinen&Heidi Förell
Paikka Location	Ruukki Metals, Raahe		Hitsausohje nro WPS no	Menetelmäkoepöytäkirjan nro WPAR no	
Valmistaja Manufacturer	Rautaruukki Oyj		Perusaine Parent material spec.	S400 Laser	
Hitsaaja Welder	Janne Ruotsalainen		Ainepaksuus Material thickness	5mm	
Hitsausprosessi Welding process	135, Mag-hitsaus		Ulkohalkaisija Outside diameter	---mm	
Liitosmuoto Joint type	T-liitos		Liitoksen kuva Joint design	Hitsausjärjestys Welding sequence	
Hitsausasento Welding position	PA, jalkoasento				
Railon valmistus Edge preparation	koneistus				
Railon puhdistus Cleaning	---				
Silloitus Tacking	---				
Juurituuli Backing	---				
Juuren avaus Back gouging	---				
Jälkikäsittely Post-weld treatment	---				

Hitsauksen suoritusarvot / Welding details

Palko Run	Prosessi Process	Lisäaineen mitat Size of filler metal mm	Hitsausvirta Current A	Kaarjännite Voltage V	Virtalaji/napaisuus Type of current/ polarity	Langansyöttö Wire feed m/min	Kuljetusnopeus Travel speed cm/min	Kaarenergia Arc energy kJ/mm	
1-3	135	1.0	167	19.1	DC+	6.4	23	~0.8	
Esikuumennus Preheat			°C		Palkojen välinen lämpötila Interpass temperature				°C
TIG-elektrodi, tyyppi/koko Tungsten electrode, type/size					Huom. Notes				T-liitos

Hitsausaineet / Welding Consumables

Kauppanimi ja lisäaineen luokittelu Trade name and classification of filler metal				ESAB OK Autorod 12.64 SFA/AWS A5.18: ER70S-6			
Suojakaasu/jauhe Shielding gas/fux	Mison 18	Juurikaasu Backing gas	---	Kaasun virtausnopeus Gas flow rate	18L/min		
Käsittely, kulfuus yms. Baking, drying etc.							

Jälkilämpökäsittely / PWHT
Lisätiedot / Other information

Menetelmäohje Method/spec.	---	Suutinetäisyys Stand off distance	14-17mm	
Lämpötila Temperature	---°C	Pitopaika Heating time	---	
Lisätiedot: esim. kuumennus- ja jäähtymisnopeudet Other information: heating and cooling rates etc.		Värähtely (amplitudi, taajuus, pysäytysaika) Oscillation (amplitude, frequency, dwell time)	---	
°C/min		Plasmahitsausarvot Plasma welding details	---	
°C/min		Sykehitsausarvot Pulse welding details	---	
Pvm Date	29.08.2014	Laatija Author	Janne Ruotsalainen	
Poltinkuiva / Torch angle		90°		

Hyväksyntä / Approval

Valmistaja Manufacturer	Tilaaja Customer	Valvoja tai testauksen suorittaja Examiner or test body
Päiväys ja allekirjoitus Date and signature	Päiväys ja allekirjoitus Date and signature	Päiväys ja allekirjoitus Date and signature

Hitsauspki.doc


HITSAUSKOEPÖYTÄKIRJA
DETAILS OF WELD TEST

Pöytäkirjan nro Report no	877	Työ nro Work no	298/14	Tilaaja Customer	Jussi Minkkinen&Heidi Förell
Paikka Location	Ruukki Metals, Raahe		Hitsausohje nro WPS no	Menetelmäkoepöytäkirjan nro WPAR no	
Valmistaja Manufacturer	Rautaruukki Oyj		Perusaine Parent material spec.	Optim 700 Plus	
Hitsaaja Welder	Janne Ruotsalainen		Ainepaksuus Material thickness	4mm	
Hitsausprosessi Welding process	135, Mag-hitsaus		Ulkohalkaisija Outside diameter	---mm	
Liitosmuoto Joint type	PA, jalkoasento		Liitoksen kuva Joint design	Hitsausjärjestys Welding sequence	
Railon valmistus Edge preparation	koneistus				
Railon puhdistus Cleaning	---				
Silloitus Tacking	---				
Juurituoli Backing	---				
Juuren avaus Back gouging	---				
Jälkikäsittely Post-weld treatment	---				

Hitsauksen suoritusarvot / Welding details

Palko Run	Prosessi Process	Lisäaineen mitat Size of filler metal mm	Hitsausvirta Current A	Kaarjännite Voltage V	Virtalaji/napaisuus Type of current/ polarity	Langansyöttö Wire feed m/min	Kuljetusnopeus Travel speed cm/min	Kaarienergia Arc energy kJ/mm	
1	135	1.0	170	20.2	DC+	6.9	41.81	~0.5	
Esikuumennus Preheat			°C		Palkojen välinen lämpötila Interpass temperature				°C
TIG-elektrodi, tyyppi/koko Tungsten electrode, type/size					Huom. Notes				nurkan yli hitsaus

Hitsausaineet / Welding Consumables

Kauppanimi ja lisäaineen luokittelu Trade name and classification of filler metal				Böhler X70-IG, AWS A5.28-05: ER110 S-G			
Suojakaasu/jauhe Shielding gas/flux	Mison 18	Juurikaasu Backing gas	---	Kaasun virtausnopeus Gas flow rate	18L/min		
Käsittely, kulfuus yms. Baking, drying etc.							

Jälkilämpökäsittely / PWHT
Lisätiedot / Other information

Menetelmäohje Method/spec.	---	Suutinetäisyys Stand off distance	14-17mm				
Lämpötila Temperature	---°C	Piiloaika Heating time	---	Sivuttalsillike (palon max. leveys) Weaving (max. width of run)	---		
Lisätiedot: esim. kuumennus- ja jäähtymisnopeudet Other information: heating and cooling rates etc.				Värähtely (amplitudi, taajuus, pysäytysaika) Oscillation (amplitude, frequency, dwell time)	---		
°C/min				Plasmahitsausarvot Plasma welding details	---		
°C/min				Sykehitsausarvot Pulse welding details	---		
Pvm Date	29.08.2014	Laatija Author	Janne Ruotsalainen		Poltinkuima / Torch angle	90°	

Hyväksyntä / Approval

Valmistaja Manufacturer	Tilaaja Customer	Valvoja tai testauksen suorittaja Examiner or test body
Päiväys ja allekirjoitus Date and signature	Päiväys ja allekirjoitus Date and signature	Päiväys ja allekirjoitus Date and signature

Hitsauspki.doc


HITSAUSKOEPÖYTÄKIRJA
DETAILS OF WELD TEST

Pöytäkirjan nro Report no	878	Työ nro Work no	298/14	Tilaaja Customer	Jussi Minkkinen&Heidi Förell
Paikka Location	Ruukki Metals, Raahe		Hitsausohje nro WPS no	Menetelmäkoepöytäkirjan nro WPAR no	
Valmistaja Manufacturer	Rautaruukki Oyj		Perusaine Parent material spec.	Optim 700 Plus	
Hitsaaja Welder	Janne Ruotsalainen		Ainepaksuus Material thickness	4mm	
Hitsausprosessi Welding process	135, Mag-hitsaus		Ulkohalkaisija Outside diameter	---mm	
Liitosmuoto Joint type	I-raio		Liitoksen kuva Joint design	Hitsausjärjestys Welding sequence	
Hitsausasento Welding position	PA, jalkoasento				
Railon valmistus Edge preparation	koneistus				
Railon puhdistus Cleaning	---				
Silloitus Tacking	---				
Juurituki Backing	---				
Juuren avaus Back gouging	---				
Jälkikäsittely Post-weld treatment	---				

Hitsauksen suoritusarvot / Welding details

Palko Run	Prosessi Process	Lisäaineen mitat Size of filler metal mm	Hitsausvirta Current A	Kaarjännite Voltage V	Virtalaji/napaisuus Type of current/ polarity	Langansyöttö Wire feed m/min	Kuljetusnopeus Travel speed cm/min	Kaarienergia Arc energy kJ/mm	
1	135	1.0	163	18.8	DC+	6.0	32.20	~0.5	
Esikuumennus Preheat		°C			Palkojen välinen lämpötila Interpass temperature		°C		
TIG-elektrodi, tyyppi/koko Tungsten electrode, type/size				Huom. Notes					
---				päättäisliitos					

Hitsausaineet / Welding Consumables

Kauppanimi ja lisäaineen luokittelu Trade name and classification of filler metal				Böhler X70-IG, AWS A5.28-05: ER110 S-G			
Suojakaasu/jauhe Shielding gas/fux	Mison 18	Juurikaasu Backing gas	---	Kaasun virtausnopeus Gas flow rate	18L/min		
Käsittely, kuivaus yms. Baking, drying etc.							

Jälkilämpökäsittely / PWHT
Lisätiedot / Other information

Menetelmäohje Method/spec.	---	Suutinetäisyys Stand off distance	14-17mm	
Lämpötila Temperature	---°C	Pitopaika Heating time	---	
Lisätiedot: esim. kuumennus- ja jäähtymisnopeudet Other information: heating and cooling rates etc.		Värähtely (amplitudi, taajuus, pysäytysaika) Oscillation (amplitude, frequency, dwell time)	---	
°C/min		Plasmahitsausarvot Plasma welding details	---	
°C/min		Sykehitsausarvot Pulse welding details	---	
Pvm Date	29.08.2014	Laatija Author	Janne Ruotsalainen	
Poltinkuiva / Torch angle		90°		

Hyväksyntä / Approval

Valmistaja Manufacturer	Tilaaja Customer	Valvoja tai testauksen suorittaja Examiner or test body
Päiväys ja allekirjoitus Date and signature	Päiväys ja allekirjoitus Date and signature	Päiväys ja allekirjoitus Date and signature

Hitsauspki.doc

Kooste putkien sahausista

Hyvinkään sahausket:

Materiaali	Putkimitta	Sahaus	kappalemäärä	Sahaus mitta	Muuta	Lähetys
S500 Laser	80x80x5	Vannesahaus tai laserleikkaus	8	200mm pitkä	Merkintä kumpi pää kuumasahattu (Putkitekniikalla tehty sahaus on kuumasahattu)	Metropolia
S500 Laser	80x80x5	Vannesahaus	8	200mm pitkä	Kylmäsahattu	Metropolia
S500 Laser	80x80x5	Laserleikkaus	8	200mm pitkä	Laserleikattu	Metropolia
S500 Laser	80x80x5	Laserleikkaus (hitsaukseen)	16	150mm pitkä	(hitsaukseen päätteisliitos)	Raahen T&K labra
S500 Laser	80x80x5	Laserleikkaus (hitsaukseen)*	8+8 (valuma- aukolla + ilman)	200mm pitkä	(hitsaukseen T- liitos Beta=1)	Raahen T&K labra
S500 Laser	80x80x5	Laserleikkaus (hitsaukseen)	8	200mm pitkä	(Nurkkaan hitsaus)	Raahen T&K labra
S500 Laser	Tarve yhteensä		64 kpl			
Optim 700 plus	80x80x4	Vannesahaus tai laserleikkaus	8	200mm pitkä	Merkintä kumpi pää kuumasahattu (Putkitekniikalla tehty sahaus on kuumasahattu)	Metropolia
Optim 700 plus	80x80x4	Vannesahaus	8	200mm pitkä	Kylmäsahattu	Metropolia
Optim 700 plus	80x80x4	Laserleikkaus	8	200mm pitkä	Laserleikattu	Metropolia
Optim 700 plus	80x80x4	Laserleikkaus (hitsaukseen)	16	150mm pitkä	(hitsaukseen päätteisliitos)	Raahen T&K labra
Optim 700 plus	80x80x4	Laserleikkaus (hitsaukseen)*	8+8 (valuma- aukolla + ilman)	200mm pitkä	(hitsaukseen T- liitos Beta=1)	Raahen T&K labra
Optim 700 plus	80x80x4	Laserleikkaus (hitsaukseen)	8	200mm pitkä	(Nurkkaan hitsaus)	Raahen T&K labra
Optim 700 plus	Tarve yhteensä		64 kpl			

* Katso kuvasta, jotta saadaan valuma-aukot oikein. [viimeisenä kuva t-liitoksesta, josta selviää putken valuma-aukkojen kohdat. Putki mitat eivät ole oikein]

Raahen labran osoite:
Johanna Vehkalahti
Tutkimuskeskus/C-halli
Rautaruukintie 155
92101 Raaha

0,05 % nikkelseostuksen analyysi

METROPOLIA AMMATTIKORKEAKOULU
KEMIAN LABORATORIO

Rajala NikkeliISO.mpws

Method Settings:

Element	Wavelength (nm)	Label	Type	Background Correction	Calibration Fit
Ni	352.454	Ni	Analyte	Auto	Linear Weighted

Replicates: 3 Rinse time (s): N/A

Calibration Correlation Coefficient Limit: 0.95 Rinse time fast pump: N/A

Pump Speed (rpm): 15 Air Injection Mode: Off

Blank Subtraction: On Standard addition: Off

Sample Introduction: Manual Reagent Blank: Off

Stabilization time (s): 15 QC Active: Off

Sample Uptake Time (s): 15 Reslope: Off

Sample uptake fast pump: On

Settings per element:

Label (Wavelength nm)	Type	Read Time (s)	Viewing position	Nebulizer Pressure (kPa)
Ni (352.454)	Analyte	3	0	240

Calibration parameters:

Label (Wavelength nm)	Minimum Concentration	Maximum Concentration	Calibration Error
Ni (352.454)	0 mg/L	2.2 mg/L	5 %

Sequence table:

Sample Label	Weight (g)	Volume (mL)	Dilution
Sample 1	1.0	1.0	1.0

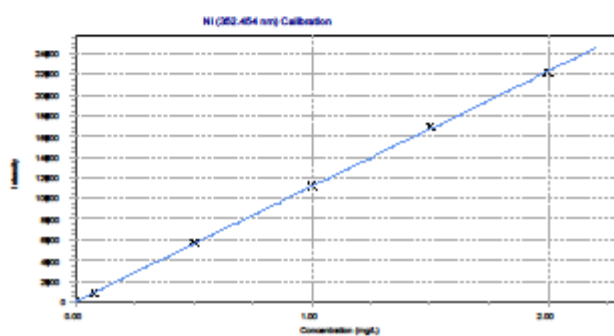
METROPOLIA AMMATTIKORKEAKOULU
KEMIAN LABORATORIO

Rajala NikkeliISO.mpws

Results:

Label	Date Time	Element Label (nm)	Concentration	Unit	SD	%RSD
Blank	31.7.2014 11:48:15	Ni (352.454 nm)	0.00 !	mg/L	N/A	N/A
Standard 1	31.7.2014 11:49:03	Ni (352.454 nm)	0.08	mg/L	N/A	N/A
Standard 2	31.7.2014 11:50:04	Ni (352.454 nm)	0.50 !	mg/L	N/A	N/A
Standard 3	31.7.2014 11:50:59	Ni (352.454 nm)	1.00 !	mg/L	N/A	N/A
Standard 4	31.7.2014 11:51:56	Ni (352.454 nm)	1.50 !	mg/L	N/A	N/A
Standard 5	31.7.2014 11:52:52	Ni (352.454 nm)	2.00 !	mg/L	N/A	N/A
Sample 1	31.7.2014 11:53:56	Ni (352.454 nm)	0.54 !	mg/L	0.01	0.94

Calibration Curves:



Ni (352.454 nm)
Intensity = 11135.71 * Concentration + 0.80
Correlation coefficient: 0.99993

Standards	Intensity	Method Concentration	Actual Concentration	% Error
Blank	-0.01	0.00	0.00	N/A
Standard 1	891.85	0.08	0.08	0.00
Standard 2	5732.82	0.50	0.51	2.00
Standard 3	11300.09	1.00	1.01	1.00
Standard 4	16898.85	1.50	1.52	1.33
Standard 5	22216.85	2.00	2.00	0.00

0,1 % nikkeliseostuksen analyysi

METROPOLIA AMMATTIKORKEAKOULU
KEMIAN LABORATORIO

Rajala NikkeliISO.mpws

Method Settings:

Element	Wavelength (nm)	Label	Type	Background Correction	Calibration Fit
Ni	352.454	Ni	Analyte	Auto	Linear Weighted

Replicates: 3 Rinse time (s): N/A

Calibration Correlation Coefficient Limit: 0.95 Rinse time fast pump: N/A

Pump Speed (rpm): 15 Air Injection Mode: Off

Blank Subtraction: On Standard addition: Off

Sample Introduction: Manual Reagent Blank: Off

Stabilization time (s): 15 QC Active: Off

Sample Uptake Time (s): 15 Reslope: Off

Sample uptake fast pump: On

Settings per element:

Label (Wavelength nm)	Type	Read Time (s)	Viewing position	Nebulizer Pressure (kPa)
Ni (352.454)	Analyte	3	0	240

Calibration parameters:

Label (Wavelength nm)	Minimum Concentration	Maximum Concentration	Calibration Error
Ni (352.454)	0 mg/L	2.2 mg/L	5 %

Sequence table:

Sample Label	Weight (g)	Volume (mL)	Dilution
Sample 1	1.0	1.0	1.0

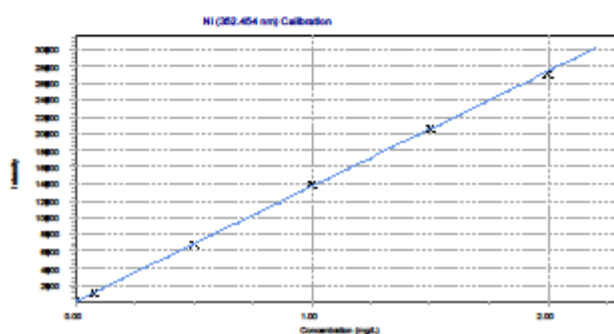
METROPOLIA AMMATTIKORKEAKOULU
KEMIAN LABORATORIO

Rajala NikkeiISO.mpws

Results:

Label	Date Time	Element Label (nm)	Concentration	Unit	SD	%RSD
Blank	4.8.2014 14:39:34	Ni (352.454 nm)	0.00	mg/L	N/A	N/A
Standard 1	4.8.2014 14:40:29	Ni (352.454 nm)	0.08	mg/L	N/A	N/A
Standard 2	4.8.2014 14:41:29	Ni (352.454 nm)	0.50	mg/L	N/A	N/A
Standard 3	4.8.2014 14:42:27	Ni (352.454 nm)	1.00	mg/L	N/A	N/A
Standard 4	4.8.2014 14:43:27	Ni (352.454 nm)	1.50	mg/L	N/A	N/A
Standard 5	4.8.2014 14:44:23	Ni (352.454 nm)	2.00	mg/L	N/A	N/A
Sample 1	4.8.2014 14:45:24	Ni (352.454 nm)	0.96	mg/L	0.00	0.17

Calibration Curves:



Standards	Intensity	Method Concentration	Actual Concentration	% Error
Blank	0.06	0.00	0.00	N/A
Standard 1	1057.13	0.08	0.08	0.00
Standard 2	6884.59	0.50	0.50	0.00
Standard 3	13887.03	1.00	1.02	2.00
Standard 4	20580.84	1.50	1.51	0.67
Standard 5	27082.04	2.00	1.98	1.00

Sinkittyjen putkinäytteiden käsittelytiedot

Taulukko 1. Kuuma- ja kylmäsahattujen putkien käsittelytiedot

	Kuuma-/kylmäsaha	Peittausaika	Kastoaika	Jäähd.	Kalvonpaksuus	
C1	500	0:35:00	6 min.	Vesi	76,89	µm
C2	500	0:55:00	6 min.	Ilma	76,67	µm
C3	700	0:35:00	6 min.	Vesi	132,55	µm
C4	700	0:35:00	6 min.	Ilma	134,92	µm
C5	700	0:35:00	6 min.	Vesi	108,08	µm
C6	700	0:35:00	6 min.	Ilma	131,49	µm
C7	500	0:30:00	6 min.	Vesi	74,07	µm
C8	500	0:45:00	6 min.	Ilma	71,68	µm
C9	700	2:00:00	6 min.	Vesi	101,78	µm
C10	500	2:00:00	6 min.	Vesi	62,77	µm
C11	700	2:00:00	6 min.	Ilma	95,41	µm
C12	500	2:00:00	6 min.	Ilma	61,8	µm
C13	500	0:00:00	6 min.	Ilma	69	µm
C14	500	0:00:00	6 min.	Vesi	68,1	µm
C15	700	0:00:00	6 min.	Ilma	129,91	µm
C16	700	0:00:00	6 min.	Vesi	121,65	µm

Taulukko 2. Laserleikattujen putkien käsittelytiedot

	Laserleikatut	Peittausaika	Kastoaika	Jäähd.	Kalvonpaksuus	
D1	500	0:30:00	6 min.	Vesi	71,02	µm
D2	500	1:05:00	6 min.	Ilma	75,11	µm
D3	700	0:50:00	6 min.	Vesi	133,93	µm
D4	700	0:40:00	6 min.	Ilma	129,21	µm
D5	500	0:30:00	6 min.	Vesi	68,01	µm
D6	500	0:45:00	6 min.	Ilma	69,66	µm
D7	700	0:35:00	6 min.	Vesi	111,44	µm
D8	700	0:40:00	6 min.	Ilma	113,78	µm
D9	700	2:00:00	6 min.	Vesi	95,81	µm
D10	500	2:00:00	6 min.	Vesi	66,3	µm
D11	700	2:00:00	6 min.	Ilma	87,66	µm
D12	500	2:00:00	6 min.	Ilma	65,26	µm
D13	500	0:00:00	6 min.	Ilma	69,54	µm
D14	500	0:00:00	6 min.	Vesi	77,45	µm
D15	700	0:00:00	6 min.	Ilma	128,43	µm
D16	700	0:00:00	6 min.	Vesi	130,29	µm

Taulukko 3. Päittäisliitos-putkien käsittelytiedot

	Päittäisliitos	Peittausaika	Kastoaika	Jäähd.	Kalvonpaksuus
E1	700	3:05:00	6 min.	Ilma	138,3 μm
E2	700	1:50:00	6 min.	Vesi	141,9 μm
E3	500	1:50:00	6 min.	Ilma	70,7 μm
E4	500	1:45:00	6 min.	Vesi	74,0 μm
E5	500	0:35:00	6 min.	Vesi	66,7 μm
E6	500	0:45:00	6 min.	Ilma	69,8 μm
E7	700	0:35:00	6 min.	Vesi	105,3 μm
E8	700	0:45:00	6 min.	Ilma	109,4 μm
E9	500	2:30:00	6 min.	Vesi	70,8 μm
E10	700	2:30:00	6 min.	Vesi	105,1 μm
E11	700	2:30:00	6 min.	Ilma	95,7 μm
E12	500	2:30:00	6 min.	Ilma	69,2 μm
E13	500	0:00:00	6 min.		72,6 μm
E14	500	0:00:00	6 min.		73,2 μm
E15	700	0:00:00	6 min.		137,3 μm
E16	700	0:00:00	6 min.		133,3 μm

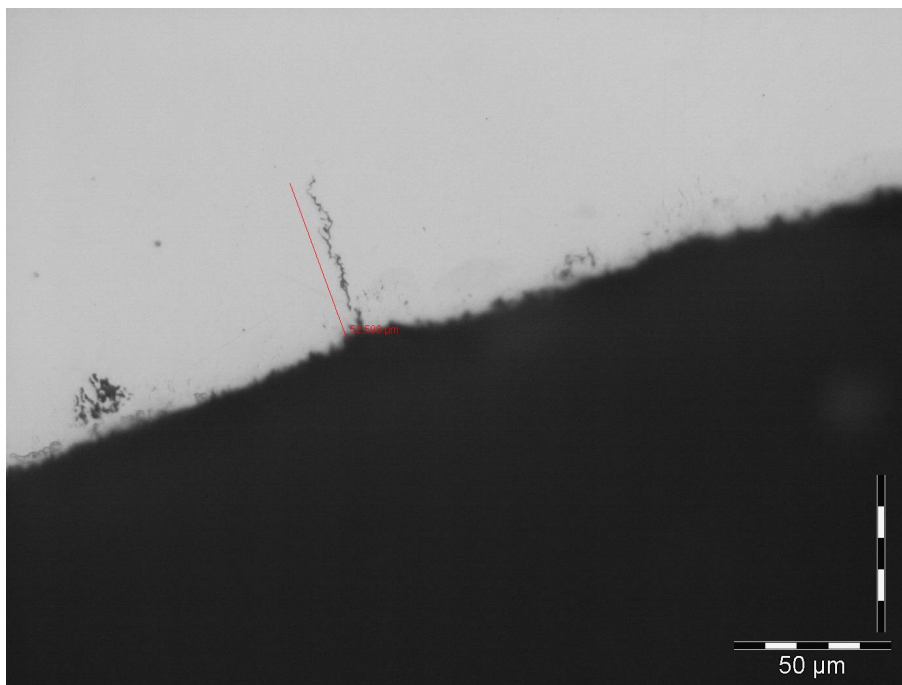
Taulukko 4. T-liitos-putkien käsittelytiedot

	T-liitos (nurkkaan hitsaus)	Peittausaika	Kastoaika	Jäähd.	Kalvonpaksuus
G1	700	1:26:00	6 min.	Ilma	57,9 μm
G2	700	1:50:00	6 min.	Vesi	67,9 μm
G3	500	1:40:00	6 min.	Ilma	63,3 μm
G4	500	1:45:00	6 min.	Vesi	127,8 μm
G5	500	0:35:00	6 min.	Vesi	120,6 μm
G6	500	0:45:00	6 min.	Ilma	0,0 μm
G7	700	0:25:00	6 min.	Vesi	71,5 μm
G8	700	0:45:00	6 min.	Ilma	61,3 μm
G9	700	2:25:00	6 min.	Vesi	129,1 μm
G10	500	2:35:00	6 min.	Vesi	123,7 μm
G11	700	2:20:00	6 min.	Ilma	70,6 μm
G12	500	2:30:00	6 min.	Ilma	66,8 μm
G13	500	0:00:00	6 min.		111,2 μm
G14	500	0:00:00	6 min.		111,2 μm
G15	700	0:00:00	6 min.		90,8 μm
G16	700	0:00:00	6 min.		67,8 μm

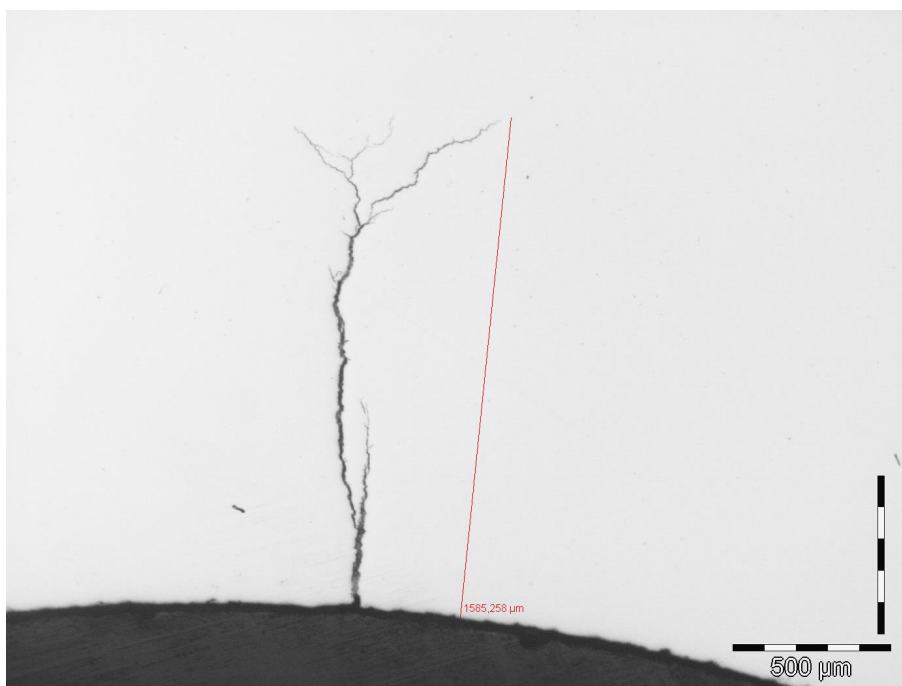
Taulukko 5. Nurkkaan hitsattujen putkien käsittelytiedot

	Nurkkaan hitsaus (pelkkä putki)	Peittausaika	Kastoaika	Jäähd.	Kalvonpaksuus
H1	500	0:30:00	6 min.	Vesi	70,9 µm
H2	500	0:30:00	6 min.	Ilma	75,2 µm
H3	700	0:30:00	6 min.	Ilma	138,2 µm
H4	700	0:35:00	18 min.	Vesi	289,4 µm
H5	700	0:30:00	6 min.	Vesi	130,0 µm
H6	700	0:45:00	6 min.	Ilma	129,1 µm
H7	500	0:40:00	6 min.	Vesi	72,8 µm
H8	500	0:40:00	6 min.	Ilma	72,7 µm
H9	700	2:05:00	6 min.	Vesi	109,0 µm
H10	500	2:05:00	6 min.	Vesi	65,6 µm
H11	700	2:00:00	6 min.	Ilma	108,7 µm
H12	500	2:00:00	6 min.	Ilma	62,9 µm
H13	500	0:00:00	6 min.		72,4 µm
H14	500	0:00:00	6 min.		69,6 µm
H15	700	0:00:00	6 min.		140,5 µm
H16	700	0:00:00	6 min.		139,2 µm

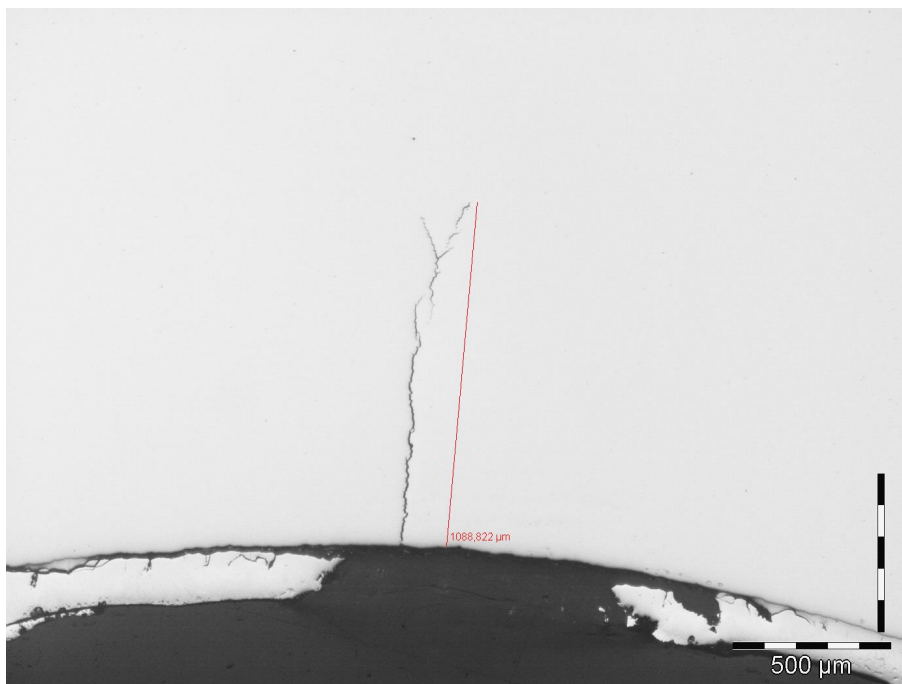
Mikroeakennekuvia säröistä



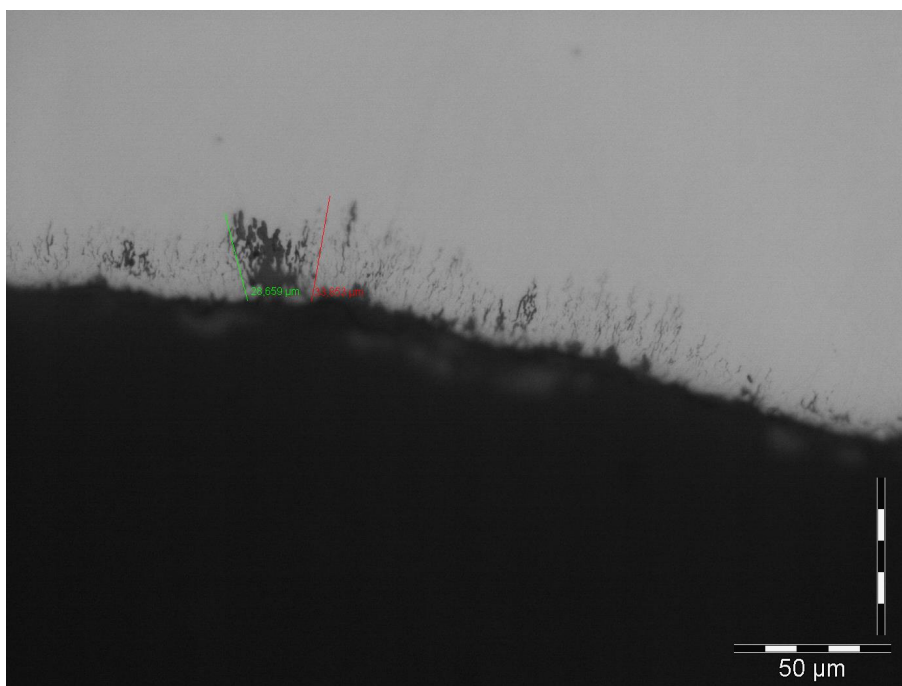
Mikrorakennekuva kappaleen C5 säröstä. Särön syvyys 52,6 µm.



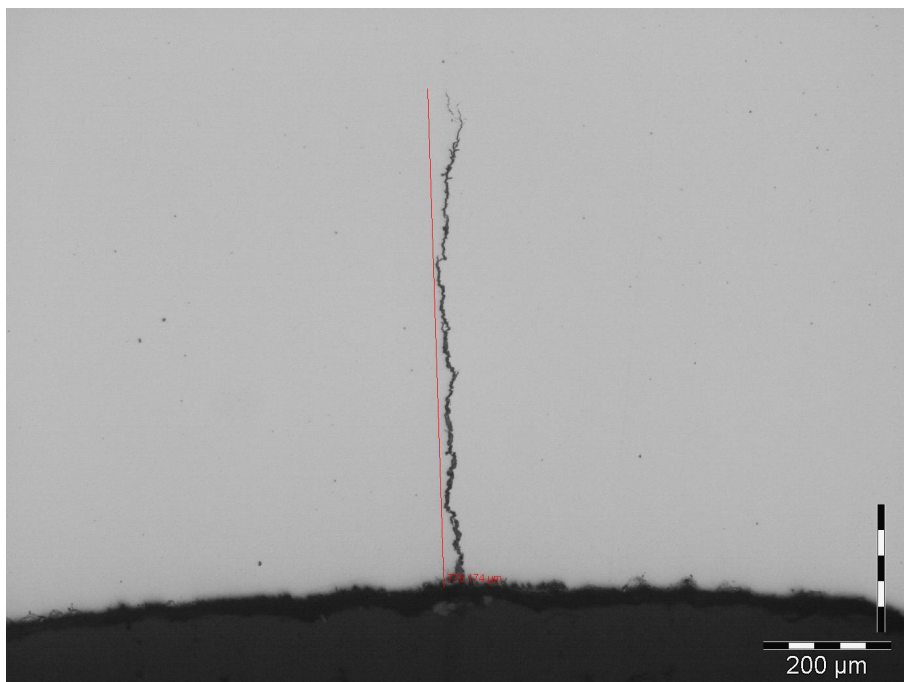
Mikrorakennekuva kappaleen C6 säröstä. Särön syvyys 1585,3 µm.



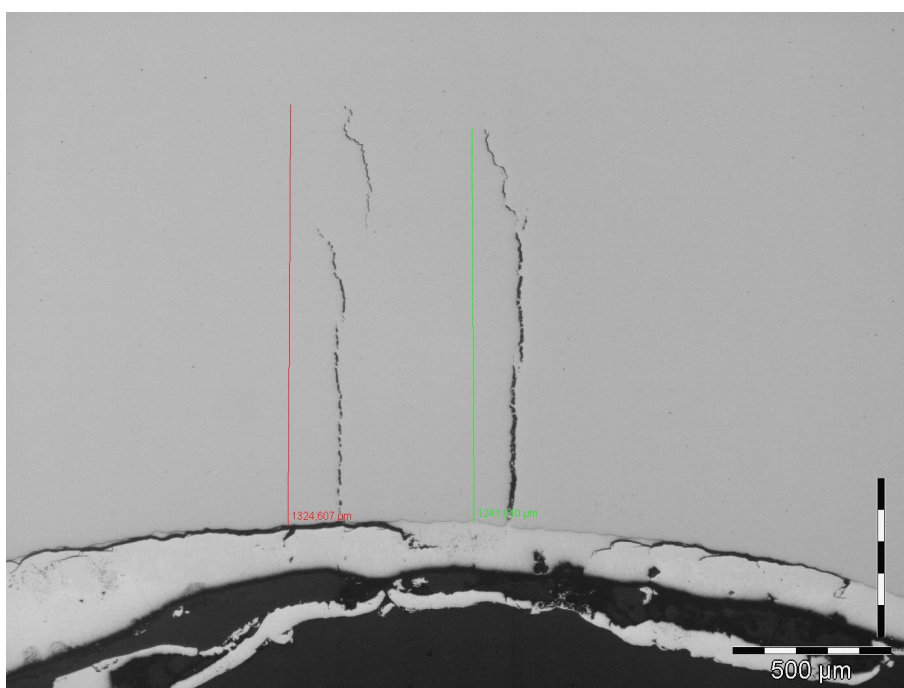
Mikrorakennekuva kappaleen C9 säröstä. Särön syvyys 1088,8 μm.



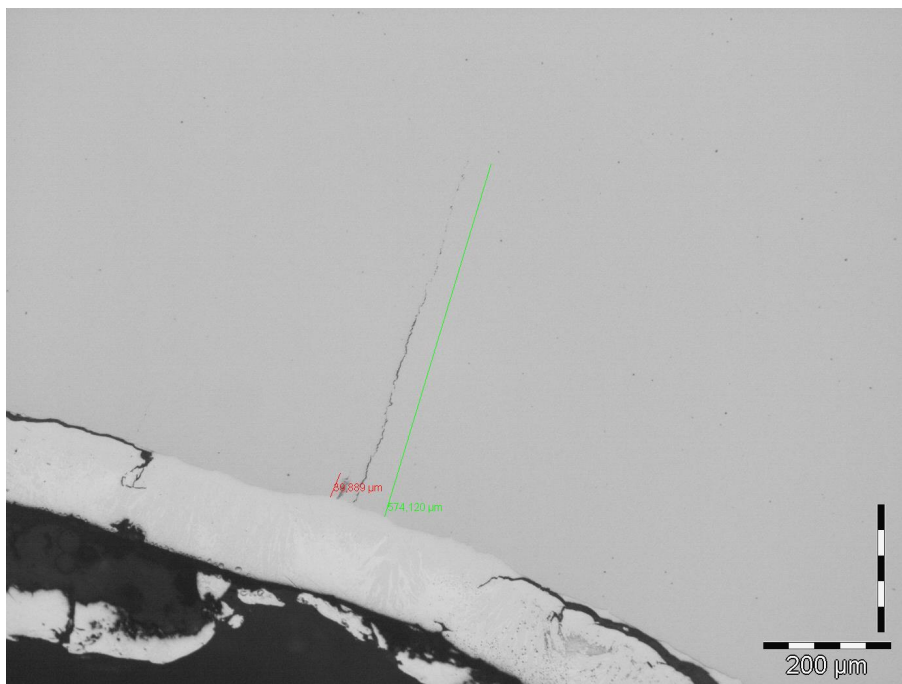
Mikrorakennekuva kappaleen C15 säröstä. Särön syvyys 28,7 / 33,9 μm.



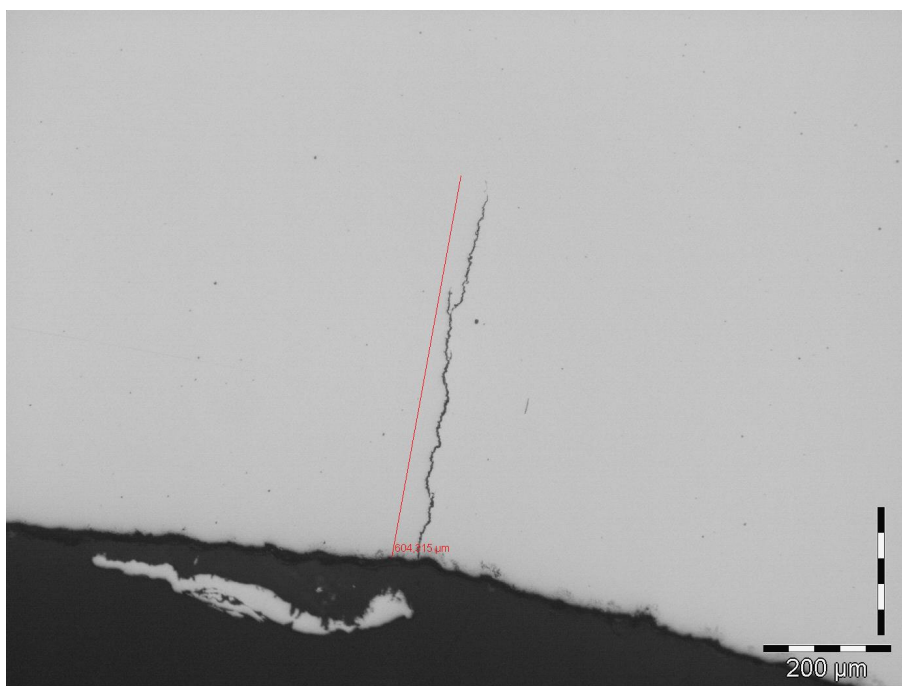
Mikrorakennekuva kappaleen D4 säröstä. Särön syvyys 778,2 μm.



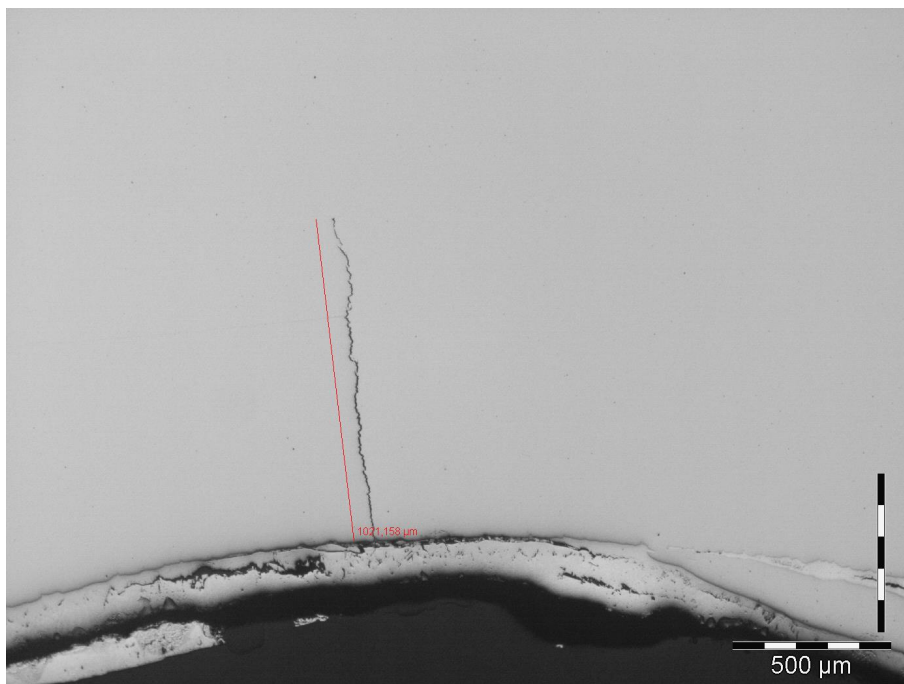
Mikrorakennekuva kappaleen D7 säröstä. Säröjen syvyydet 1324,6 μm ja 1241,8 μm.



Mikrorakennekuva kappaleen D7 säröstä. Särön syvyys 574,1 μm



Mikrorakennekuva kappaleen D11 säröstä. Särön syvyys 604,3 μm.



Mikrorakennekuva kappaleen D16 säröstä. Särön syvyys 1021,2 µm.