

**Sularänniselvitys – raportti, 28.8.2019**

# Sulakourujen materiaalitutkimus

Kirjoittajat: Sanni Yli-Olli, Satu Tuurna, Aino Mäntyranta

Luottamuksellisuus: Luottamuksellinen

|                                                                                                                                                                                                       |                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Raportin nimi</b><br>Sulakourujen materiaalitutkimus                                                                                                                                               |                                             |
| <b>Asiakkaan nimi, yhteystiedot</b><br>Suomen Soodakattilayhdistys                                                                                                                                    | <b>Asiakkaan viite</b>                      |
| <b>Projektin nimi</b><br>PS18 Sularännit                                                                                                                                                              | <b>Projektin numero/lyhytnimi</b><br>121633 |
| <b>Tiivistelmä</b>                                                                                                                                                                                    |                                             |
| <div> <div> Espoo 28.8.2019<br/> <b>Laatija</b> </div> <div> <b>Hyväksyjä</b> </div> </div> <div> <div> Sanni Yli Olli<br/> Erikoistutkija </div> <div> Satu Tuurna<br/> Tiimipäällikkö </div> </div> |                                             |
| <b>VTT:n yhteystiedot</b><br>PL 1000, 02044 VTT, puh. 020-722111, sähköposti: <a href="mailto:etunimi.sukunimi@vtt.fi">etunimi.sukunimi@vtt.fi</a>                                                    |                                             |
| <b>Jakelu (asiakkaat ja VTT)</b><br>Asiakas 1 kpl<br>VTT (arkisto) 1 kpl                                                                                                                              |                                             |
| VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain<br>Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.                       |                                             |

## Sisällysluettelo

---

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 1. Toimeksiannon kuvaus ja tavoitteet ..... | 3  |
| 2. Menetelmät .....                         | 4  |
| 3. Tulokset .....                           | 5  |
| 3.1 Joutseno .....                          | 5  |
| 3.2 Kaukaa .....                            | 6  |
| 3.3 Kaukopää .....                          | 8  |
| 3.4 Kemi .....                              | 26 |
| 3.5 Kotkamills .....                        | 44 |
| 3.6 Kymi .....                              | 46 |
| 3.7 Oulu .....                              | 48 |
| 3.8 Pietarsaari .....                       | 65 |
| 3.9 Sunila .....                            | 82 |
| 3.10 Veitsiluoto .....                      | 84 |
| 3.11 Äänekoski .....                        | 86 |
| 4. Johtopäätökset ja yhteenveto .....       | 90 |



## 1. Toimeksiannon kuvaus ja tavoitteet

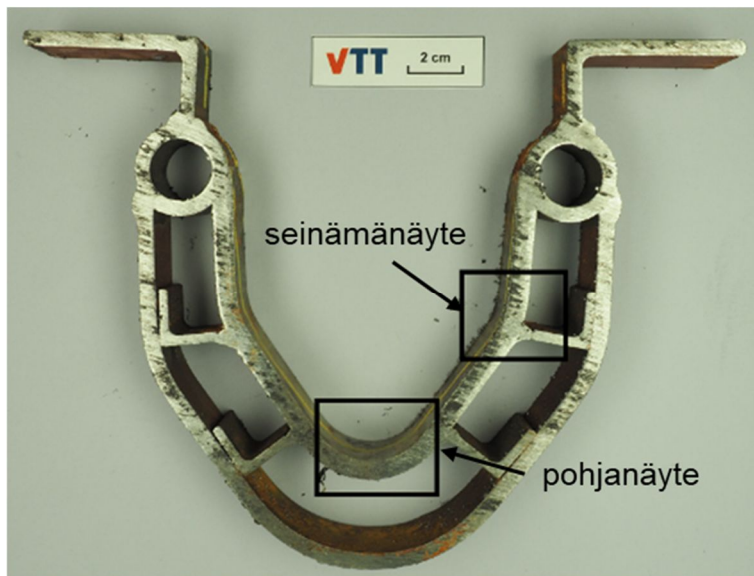
Tutkimuksen tavoitteena on selvittää soodakattiloiden sulakourujen turvallinen ajotavasta riippuva käyttöaika, sillä sulakourut eivät ole usealla laitoksella kestäneet suositeltua yhden vuoden ajojaksoa. Tätä varten kartoitetaan Suomen soodakattiloiden sulakourujen vaurioitumismekanismit metallurgisin keinoin ja selvitetään syyt erilaisten vaurioiden syntyyn eri kattiloilla. Tutkimuksessa tutkitaan erikseen sovituilta laitoksilta sulakouruja Suomen Soodakattilayhdistyksen kestoisuustyöryhmän ohjeistuksen mukaisesti. Sularänneistä kartoitetaan ja raportoidaan niissä ilmenevät vauriot, näiden mekanismi, sijainti ja syvyys. Tämän lisäksi tutkimuksen toisessa osassa vedetään tulokset yhteen ja selvitetään juurisyy vaurioihin yhdessä soodakattilayhdistyksen ja kattilakäyttäjien kanssa.

Taulukko 1. Tutkimuksiin toimitetut sulakourut

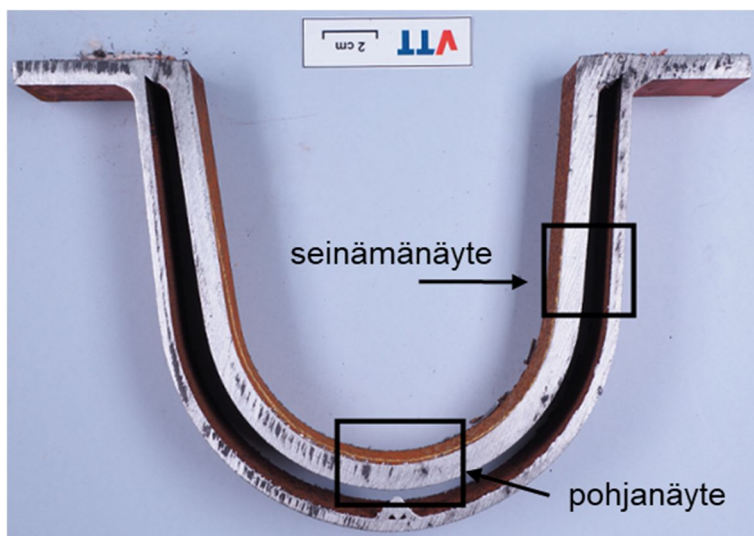
| Laitos      | Lukumäärä        | Kouru                                                                    | Keskiarvo-kuorma   | Veden lämpötila sisään/ulos | Virtausnopeus                      | Muuta                 |
|-------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Joutseno    | 2                | Andritz, pinnoitettu (laser)                                             |                    |                             |                                    |                       |
| Kaukaa      | 6                | Andritz, pinnoitettu (laser)                                             | 680 tka/vrk        | 59/65 °C                    | 2,2 l/s                            |                       |
| Kaukopää    | 2 (SK5, SK6)     | Andritz, compound (SK5)<br>Valmet, pinnoitettu pääty ja osa kourua (SK6) |                    | 50/54 °C (SK6)              | 2 l/s                              |                       |
| Kemi        | 2                | Valmet, pinnoitettu pääty ja osa kourua                                  | 500 tka/vrk        | 58/58 °C                    |                                    |                       |
| Kotkamills  | 2                | Andritz, pinnoitettu                                                     | 500 tka/vrk        | 78/83 °C                    | 2,7/2,8 l/s                        | Ei alipainetta        |
| Kymi        | 2                | Valmet, pinnoitettu pääty                                                |                    |                             |                                    |                       |
| Oulu        | 2                | Andritz, pinnoitettu                                                     | 515 tka/vrk        | 63/63 °C                    | 2 l/s                              |                       |
| Pietarsaari | 2 + 1 uusi       | Andritz, compound & laser                                                | 570 tka/vrk        | 51/53-53 °C                 | 2-2,5 l/s                          | Vaihtoväli 1,5 vuotta |
| Sunila      | 2 (SK10 ja SK11) | Musta pinnoitettu pääty ja osa kourua                                    | 415 ja 575 tka/vrk | 60/62 °C                    | max. 2,5 (SK10) ja 2,25 (SK11) l/s |                       |
| Veitsiluoto | 2 (1 ja 3)       | Andritz, pinnoitettu                                                     | 500 tka/vrk        | ulos 62 °C                  | 4 l/s                              |                       |
| Äänekoski   | 3 (5, 6 ja 7)    | Valmet, pinnoitettu pääty                                                | 710 tka/vrk        | 65/67 °C                    | 4 l/s                              |                       |

## 2. Menetelmät

Kaikki VTT:lle tutkimuksiin toimitetut sulakourut tutkittiin visuaalisesti ja dokumentoitiin. Näiden perusteella SKY:n kestoisuusryhmä päätti, minkä laitosten kourut tutkitaan tarkemmin. Kaikista tarkemmin tutkituista kouruista valmistettiin vähintään kaksi metallografista poikkileikkausnäytettä, yksi kourun pohjalta ja yksi kourun seinämältä (Kuva 1 ja Kuva 2), tämän lisäksi tarpeellisista kouruista valmistettiin näyte kourun jättöpäästä syöpymien kohdalta. Säröjen syvyydet ja sijainnit, materiaalien mikrorakenne sekä havaittujen sisäpuolisten kerrostumien paksuudet määritettiin. Tarvittaessa kerrostumia analysoitiin tarkemmin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) sekä siihen liitettyllä energiadiispersiivisellä röntgenanalyysaattorilla (EDX). Kovuudet määritettiin valituista poikkileikkausnäytteistä Vickers yksiköissä.



Kuva 1. Andritzin sulakourujen näytteidenottokohdat



Kuva 2. Valmetin sulakourujen näytteidenottokohdat

### 3. Tulokset

VTT:lle toimitettiin tutkimukseen sulakouruja 10 eri laitokselta, joista tarkemmin päätettiin tutkia Kaukopään (SK5 ja SK6), Oulun, Kemin ja Pietarsaaren sulakouruja. Alla kaikkien sulakourujen tulokset laitospöytäkohtaisesti.

#### 3.1 Joutseno

Tutkimuksiin toimitettiin kourut 2 ja 6, tästä eteenpäin nimetty Joutseno 2 ja Joutseno 6 (Kuva 3 ja Kuva 4). Kouruissa oli aiemmin havaittu ongelmia, joiden syyksi määriteltiin liian lämpimän veden aiheuttama säröily. Nyt tutkimuksiin toimitetuilla sulakouruilla oli takanaan vain noin 6 kuukauden ajojakso, minkä takia näissä ränneissä ei havaittu kuin pieniä säröjä sulakourun reunoilla.



Kuva 3. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru (Joutseno 2)





Kuva 4. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru (Joutseno 6)

### 3.2 Kaukaa

Tarkasteltavaksi toimitettiin kourut 1-6, joista tutkimuksiin valittiin kourut 3 ja 5, tästä eteenpäin Kaukaa 3 ja Kaukaa 5 (Kuva 5 ja Kuva 6). Kaukaalla oli edellisellä ajokaksolla ollut ongelmia suolakourujen kestävyysden kanssa, jonka vuoksi ne on jouduttu vaihtamaan. Näin ollen tutkimuksiin toimitetut sulakourut olivat olleet käytössä vain noin puoli vuotta. Visuaalisessa tarkastuksessa ei havaittu ongelmia sulakouruissa, ainoastaan pientä kulumista jättöpäässä.



Kuva 5. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru (Kaukaa 3)



Kuva 6. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kaukaa 5)

### 3.3 Kaukopää

Kaukopäästä tutkimuksiin toimitettiin kaksi kourua yksi SK5:lta ja yksi SK6:lta, tästä lähtien Kaukopää SK5 ja Kaukopää SK6 (Kuva 8). Kaukopää SK5:ssä havaittiin kourun seinämällä pieniä säröjä. Kaukopää SK6:ssa havaittiin jättöpäädyssä syöpymiä. Nämä kourut päätettiin tutkia tarkemmin.





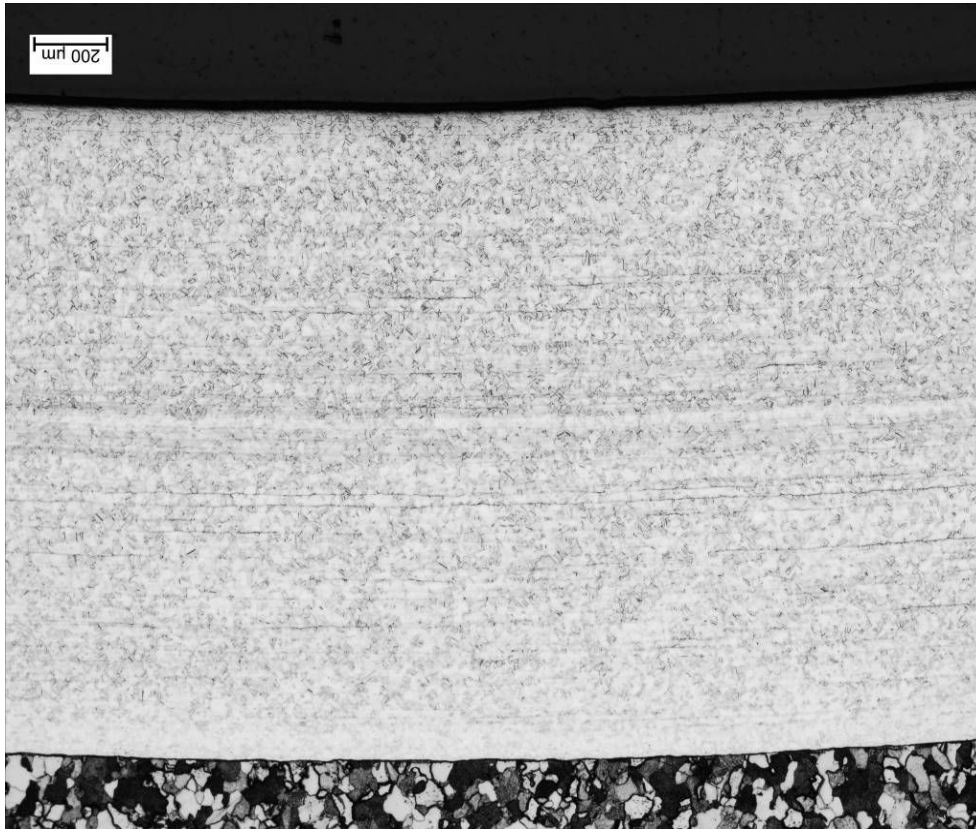
Kuva 7. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kaukopää SK5)



Kuva 8. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kaukopää SK6)

Kaukopää SK5 pohjalta tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin pinnoitteen puolella noin 55  $\mu\text{m}$  matkalla karbideja raerajoilla, sekä perusaineen puolella noin 200  $\mu\text{m}$  hiilenkatovyöhyke. Pinnoitteen ulkopinta oli verrattain tasainen ja siinä havaittiin vain hyvin matalia pieniä säröjä. Pojan sisäpinnalla havaittiin yhtenäinen < 10  $\mu\text{m}$  paksu oksidi, sekä satunnaisia noin 60  $\mu\text{m}$  kokoisia oksidisaarekkeita. Mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen (joskin perliitti-alueita oli verrattain vähän viitaten niukkahiilliseen seokseen) eikä siinä havaittu mikrorakenteen hajaantumista (Kuva 9 - Kuva 14).





Kuva 9. Kaukopää SK5 poikkileikkaus sulakourun pohjalta, pinnoite syövytetty



Kuva 10. Yksityiskohta Kuva 9

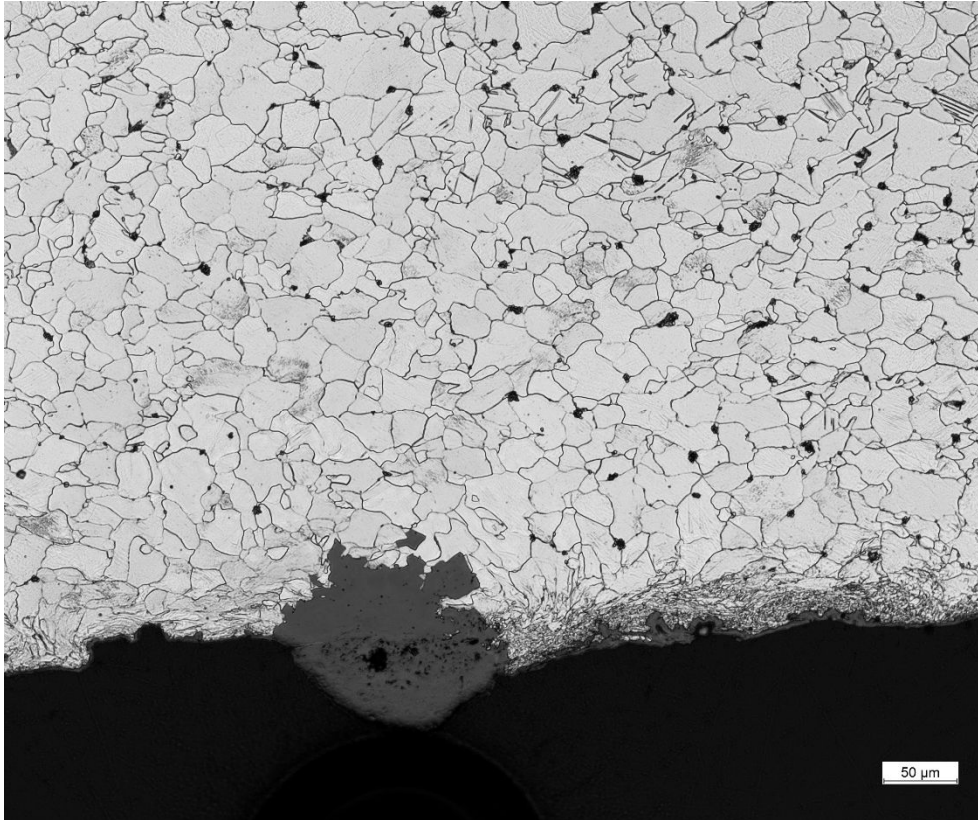


*Kuva 11. Kaukopää SK5 pinnoite-perusaine rajapinta sulakourun pohjalta, perusaine syövytetty*

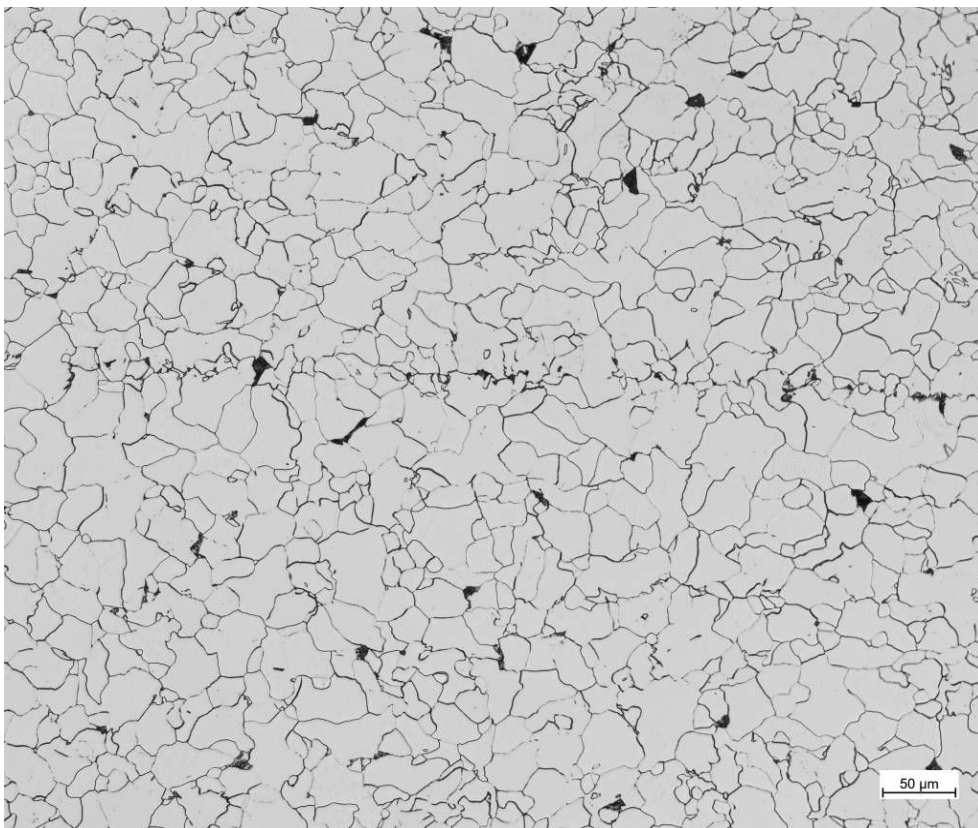


*Kuva 12. Kaukopää SK5, ulkopinta kourun pohjalta, syövyttämätön näyte*





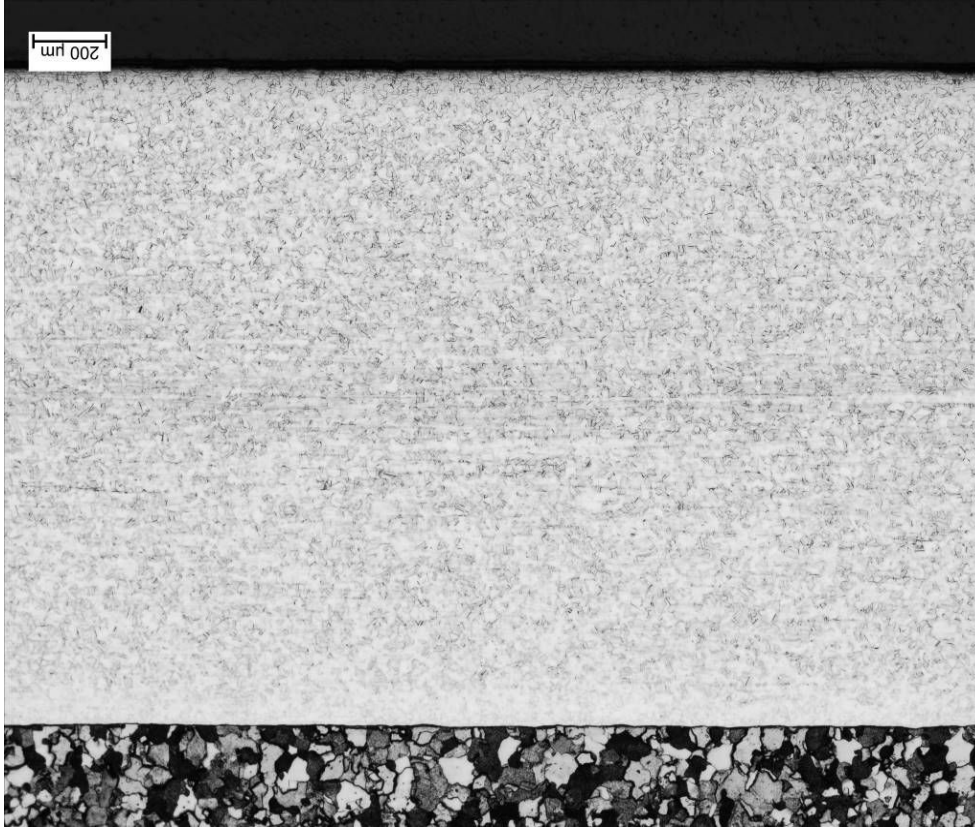
*Kuva 13. Kaukopää SK5, sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) kourun pohjalta*



*Kuva 14. Kaukopää SK5, perusaineen mikrorakenne kourun pohjalla*

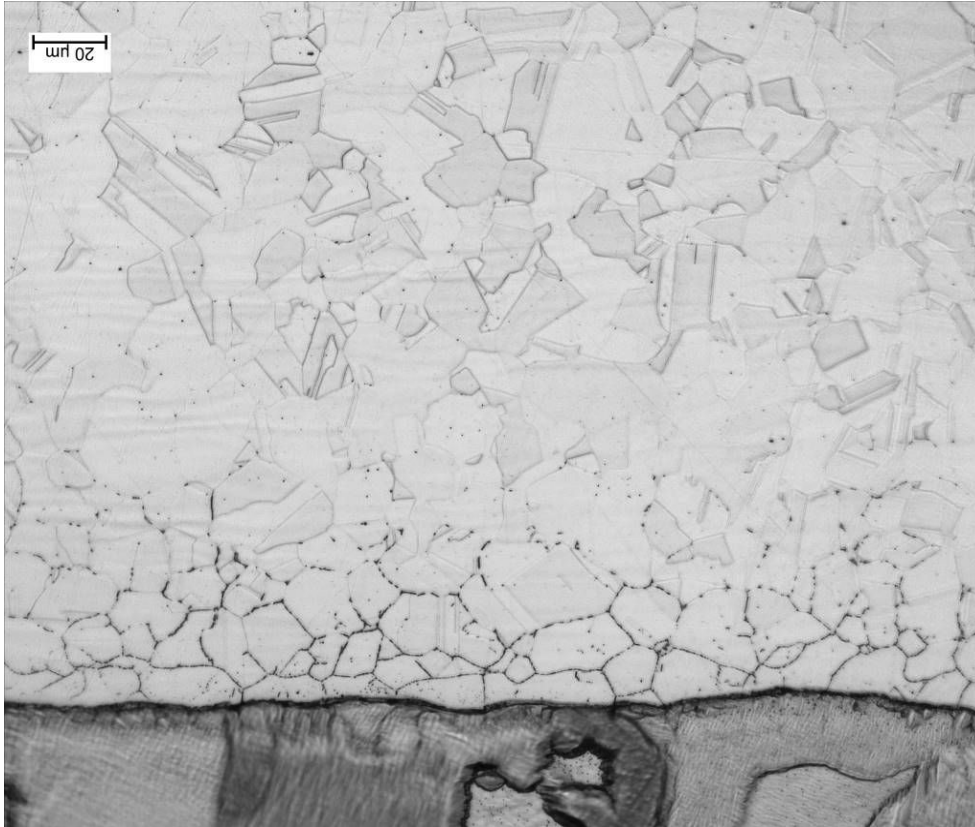
Kaukopää SK5 seinämältä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin pinnoitteen puolella noin 55 µm matkalla karbideja raerajoilla, sekä perusaineen puolella noin 200 µm hiilenkatovyöhyke. Pinnoitteen ulkopinta oli verrattain tasainen ja siinä havaittiin vain hyvin

matalia pieniä säröjä. Seinämän sisäpinnalla (vesikierron puoleisella pinnalla) havaittiin ohut  $< 10 \mu\text{m}$  yhtenäinen oksidikerros, ja lisäksi satunnaisia noin  $75 \mu\text{m}$  paksuja oksidisaarekkeita. Mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen (joskin perliittialueita oli verrattain vähän viitaten niukkahiiliseen seokseen) eikä siinä havaittu mikrorakeen hajaantumista (Kuva 15 - Kuva 20).



Kuva 15. Kaukopää SK5, poikkileikkaus kourun seinämältä, pinnoite ylhäällä syövytetty

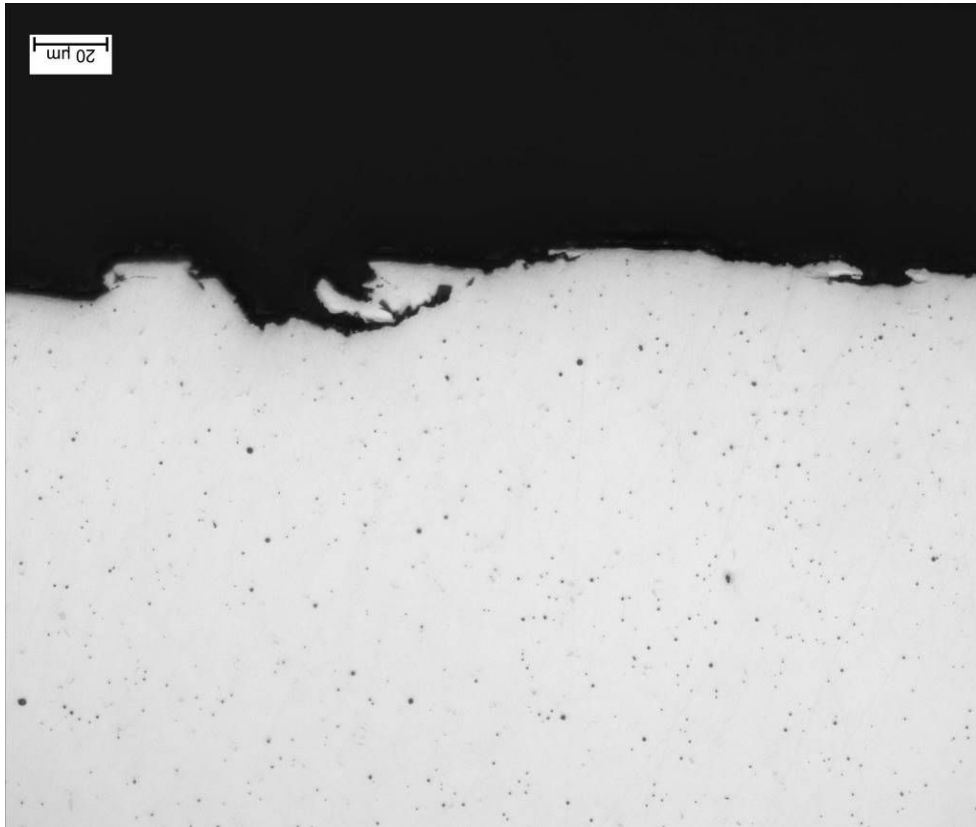




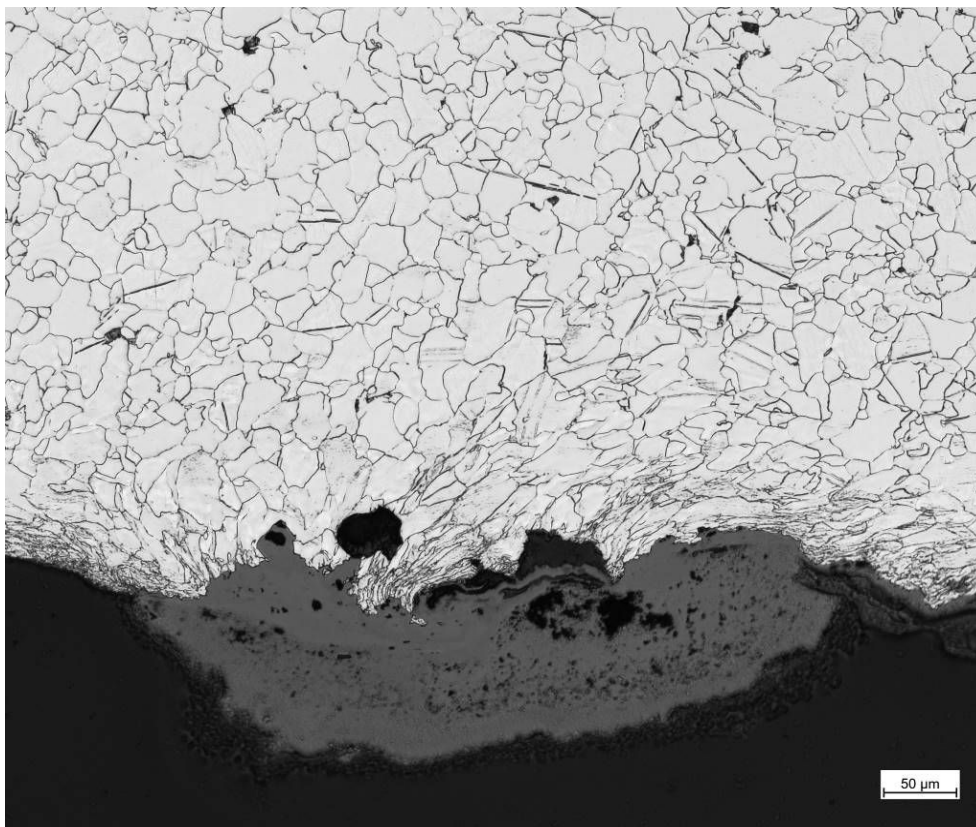
Kuva 16. Yksityiskohta Kuva 15



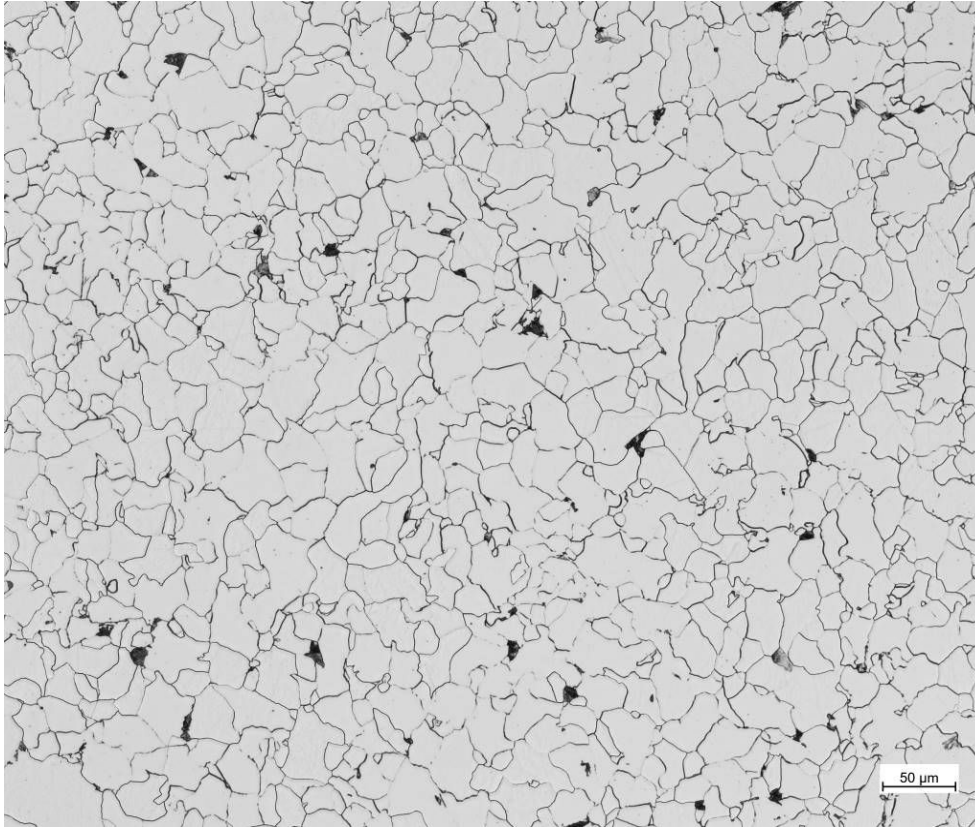
Kuva 17. Kaukopää SK5 pinnoite-perusaine rajapinta sulakourun seinämältä, perusaine syövytetty



Kuva 18. Kaukopää SK5, kourun ulkopinta seinämän kohdalla



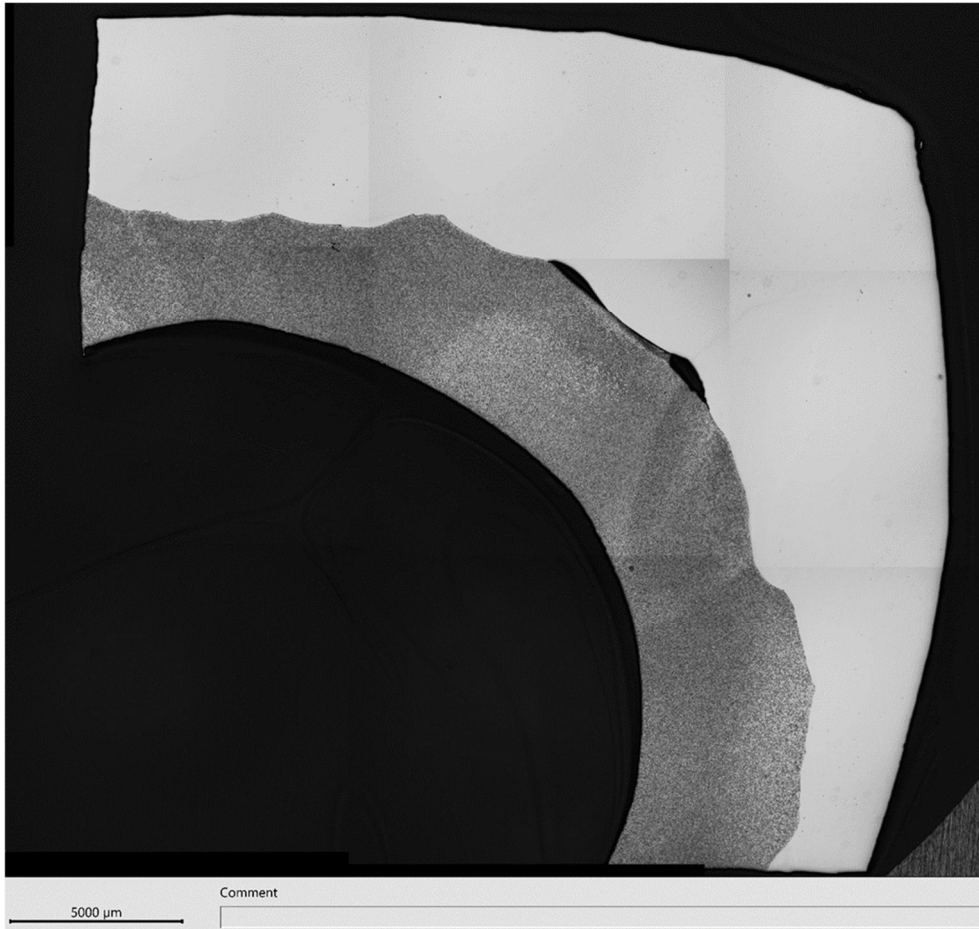
Kuva 19. Kaukopää SK5, sisäpinnan (vesikierron puoleinen pinta) oksidi



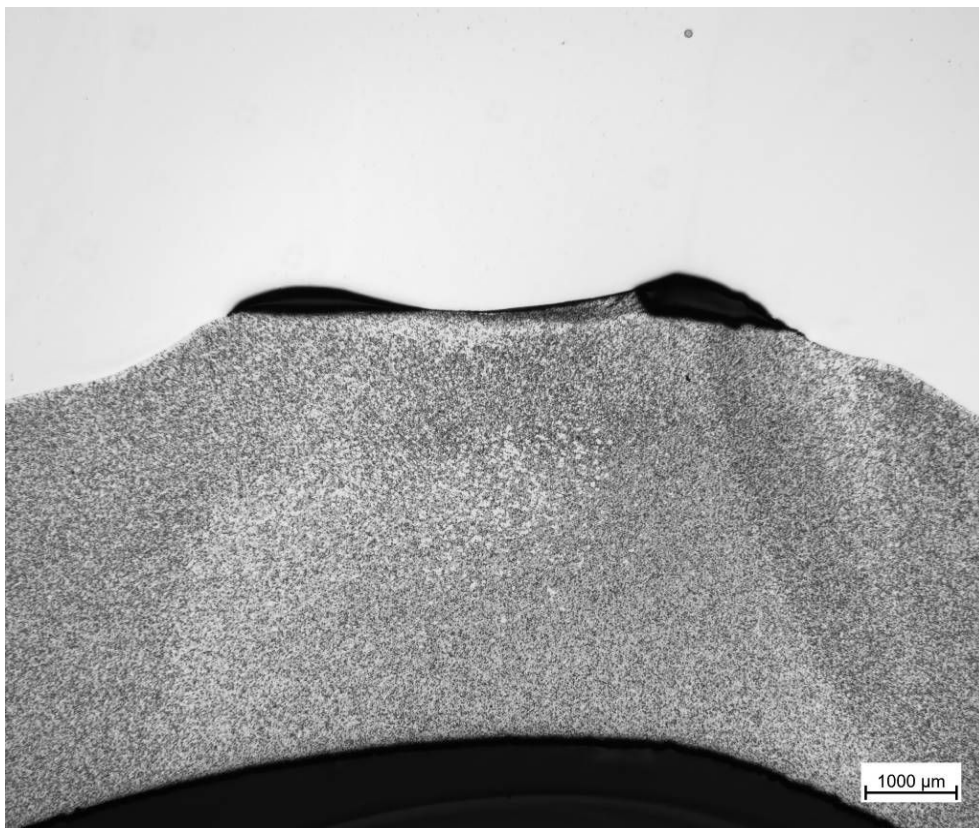
*Kuva 20. Kaukopää SK5, perusaineen mikrorakenne kourun seinämältä*

Kaukopää SK5 kourun jättöpään poikkileikkauksessa ei havaittu syöpymäkuoppia. Pinnoitteen ja perusaineen liitoksessa havaittiin tiukimmassa mutkakohdassa pari aluetta, jossa pinnoite ei ollut tarttunut perusaineeseen kiinni, liitoksen muuten ollessa tiivis ja yhtenäinen. Sisäpinnalla (vesikierron puoleisella pinnalla) ei havaittu merkittävää oksidia, ja ulkopinta oli sileä. Mikrorakenne perusaineessa oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu mikrorakenteen hajaantumista (Kuva 21 ja Kuva 22).





Kuva 21. Kaukopää SK5, sulakourun jättöpään poikkileikkaus, perusaine syövytetty



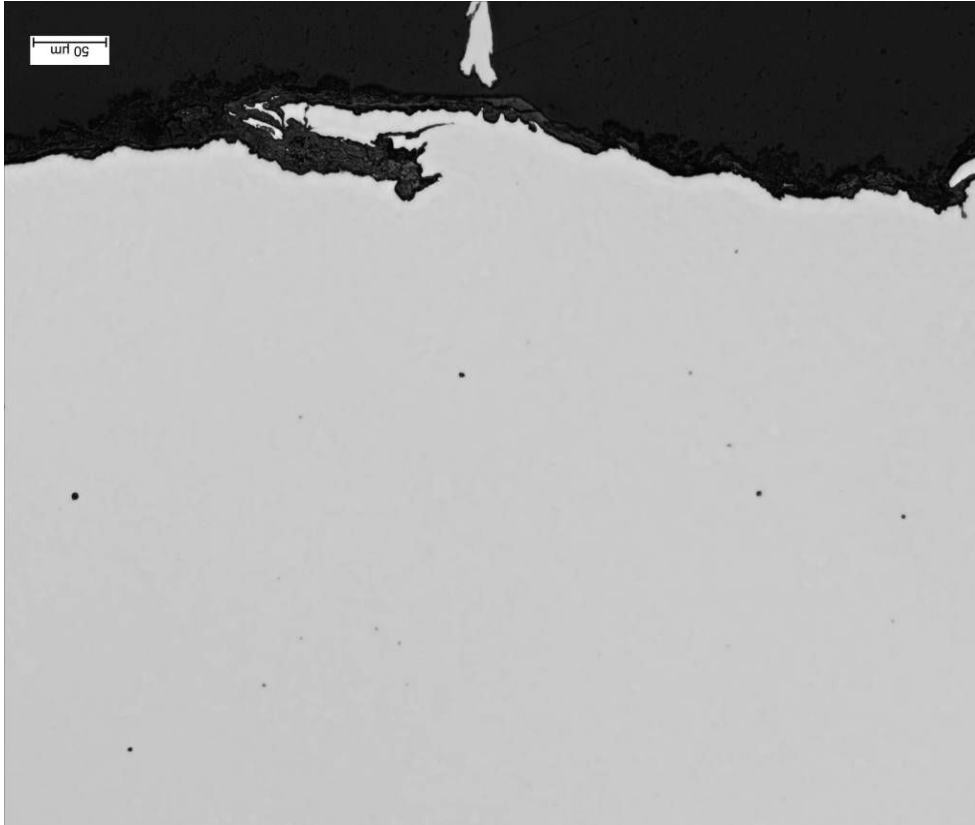
Kuva 22. Yksityiskohta Kuva 21



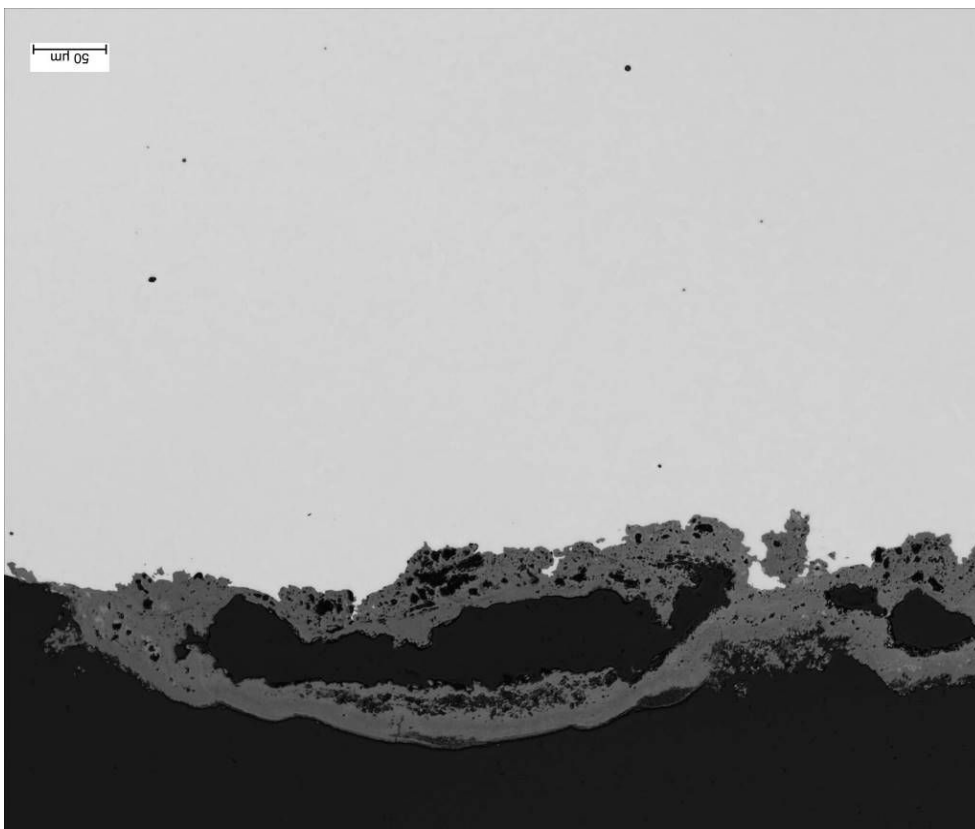
Kaukopää SK6 pohjalta tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin ulkopinnalla suolakerrostumia sekä hyvin pieniä matalia säröjä. Pohjan sisäpinnalla havaittiin <20 µm paksu yhtenäinen oksidi sekä laajoja noin 100 µm paksuja oksidisaarekkeita. Mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu mikrorakeen hajaantumista (Kuva 23 - Kuva 26).



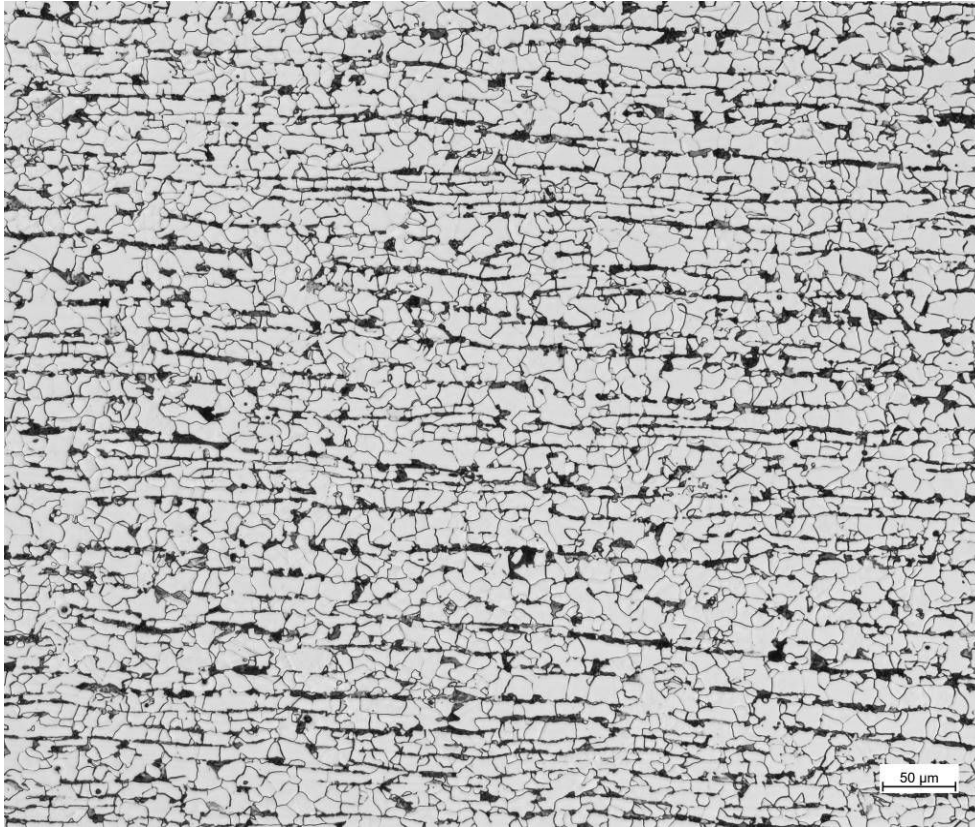
*Kuva 23. Kaukopää SK6, ulkopinnan kerrostumaa kourun pohjalla*



*Kuva 24. Kaukopää SK6, ulkopinnan kerrostumaa kourun pohjalla, syövyttämätön näyte*



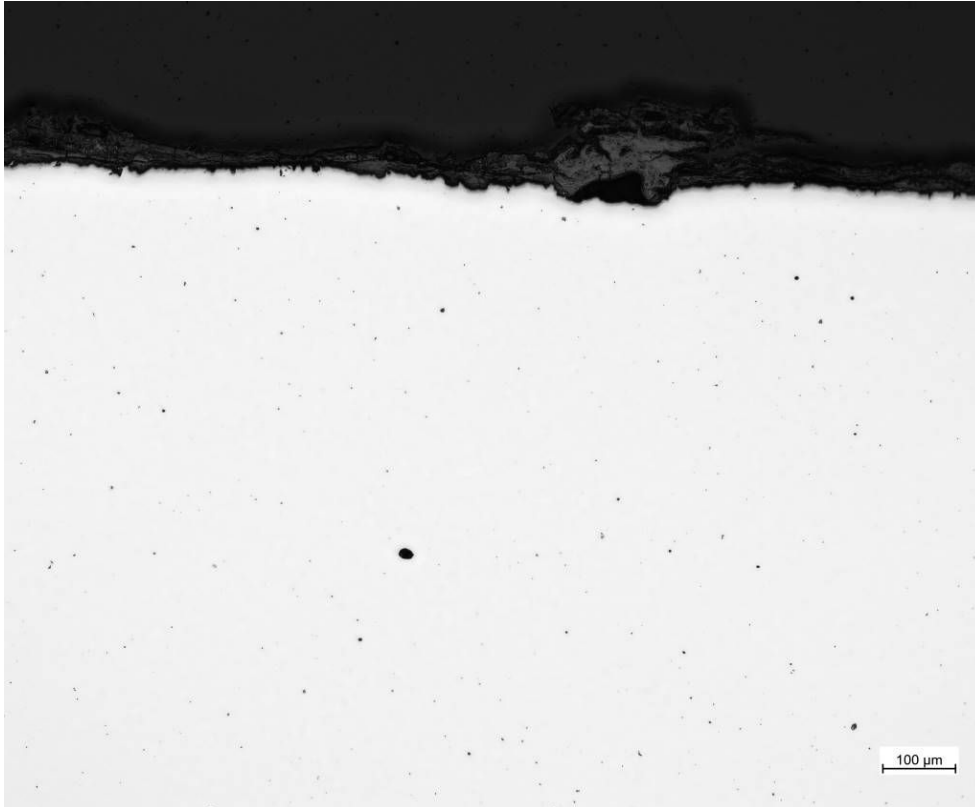
*Kuva 25. Kaukopää SK6, sisäpinnan (vesikierronpuoleinen pinta) oksidi kourun pohjalla*



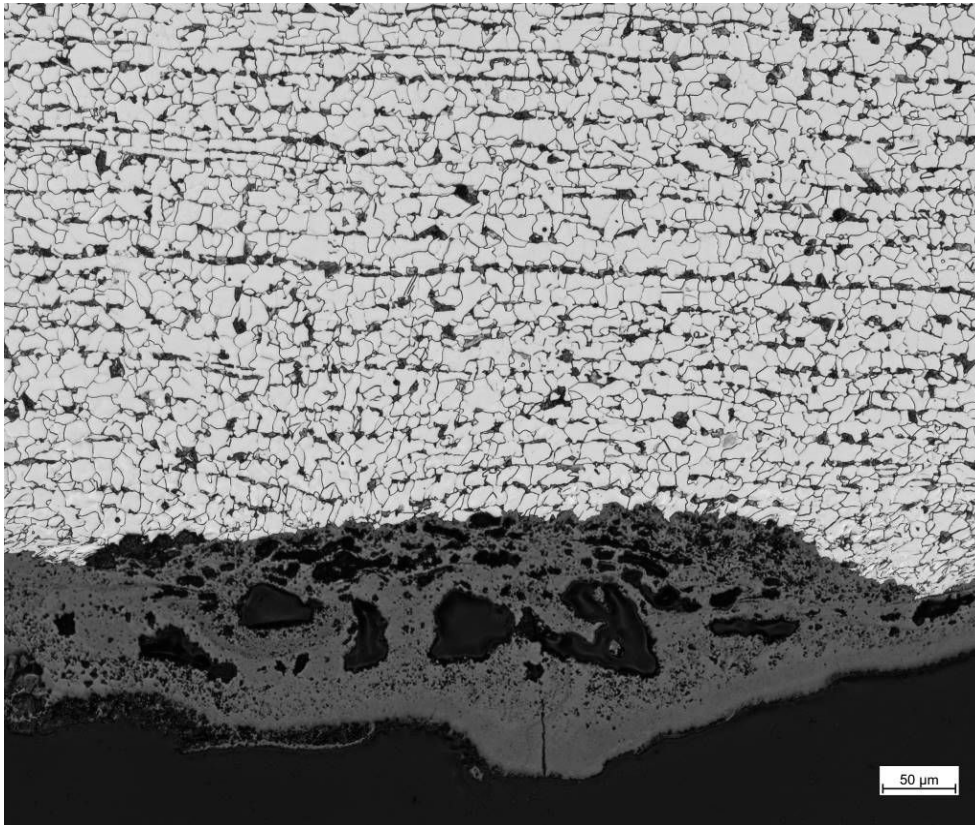
*Kuva 26. Kaukopää SK6, mikrorakenne kourun pohjalla*

Kaukopää SK6 seinämältä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin ulkopinnalla suolakerrostumia, säröjä ei havaittu poikkileikkauksen alueella. Pohjan sisäpinnalla havaittiin noin 30 μm paksu yhtenäinen oksidi sekä laajoja noin 120 μm paksuja oksidisaarekkeita. Mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu mikrorakeen hajaantumista (Kuva 27 - Kuva 29).

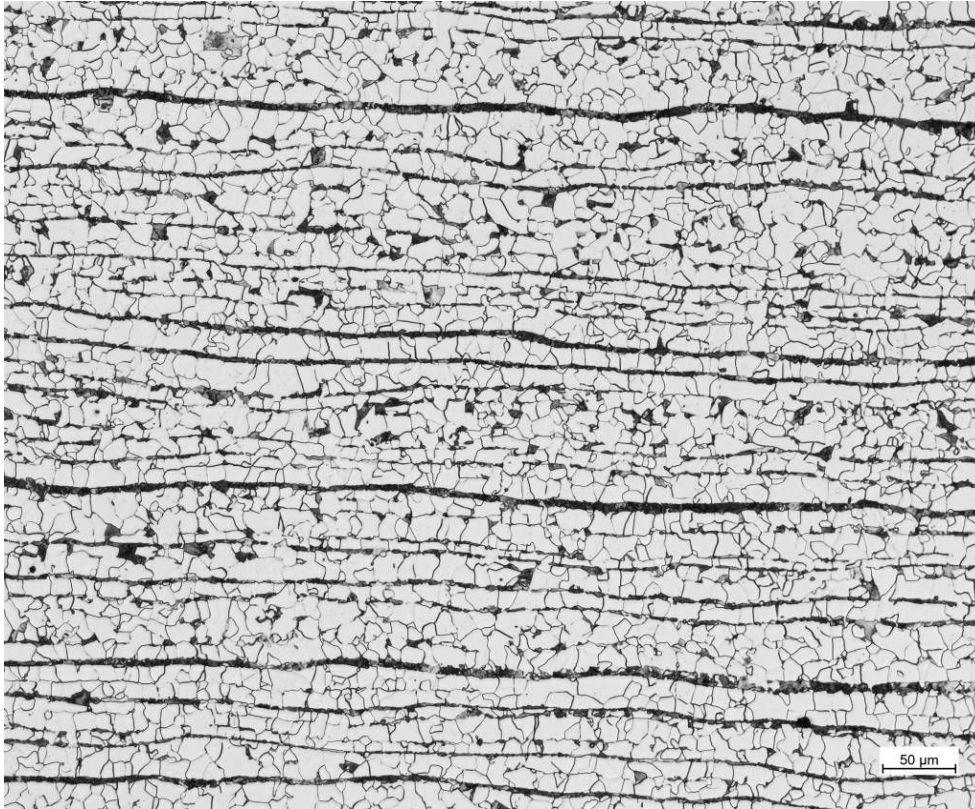




Kuva 27. Kaukopää SK6, ulkopinta kourun seinämällä, syövyttämätön näyte



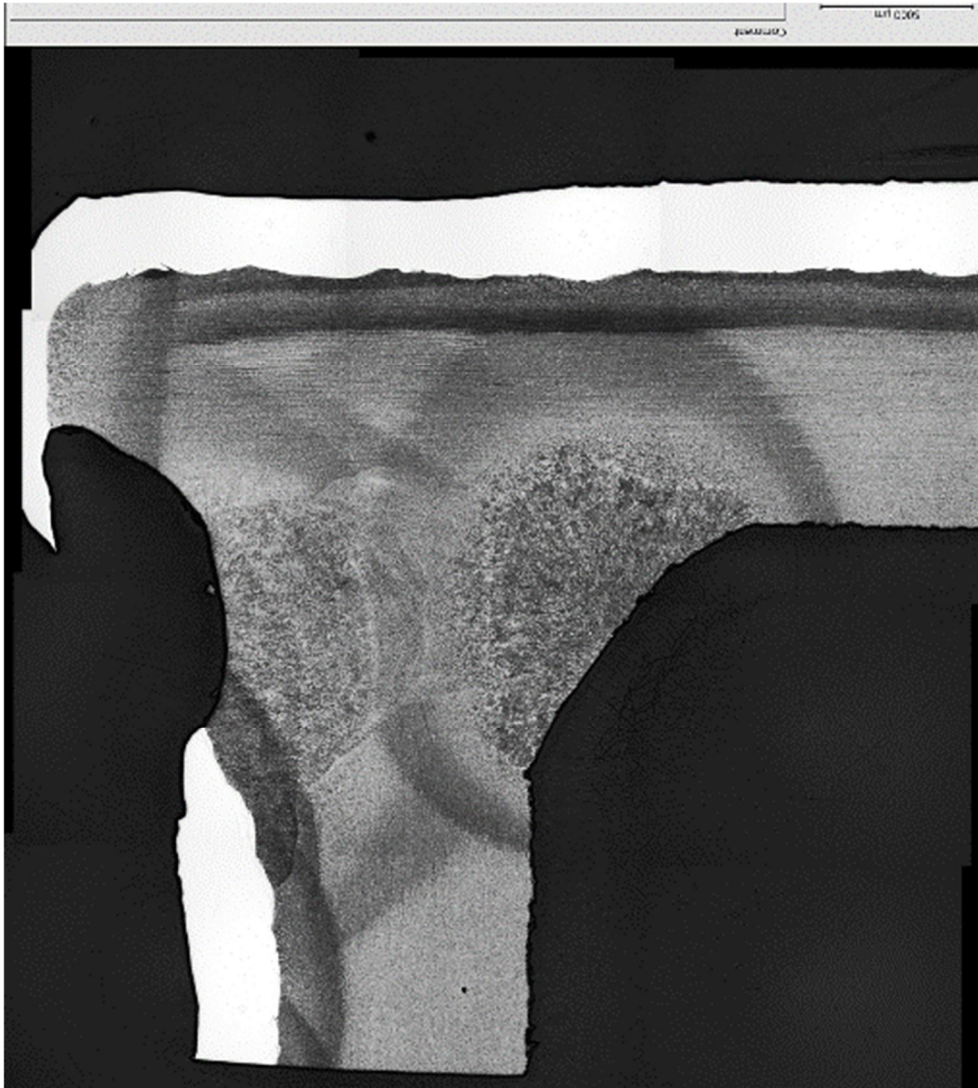
Kuva 28. Kaukopää SK6, sisäpinnan (vesikierron puoleinen pinta) oksidi kourun seinämältä



*Kuva 29. Kaukopää SK6, mikrorakenne kourun seinämältä*

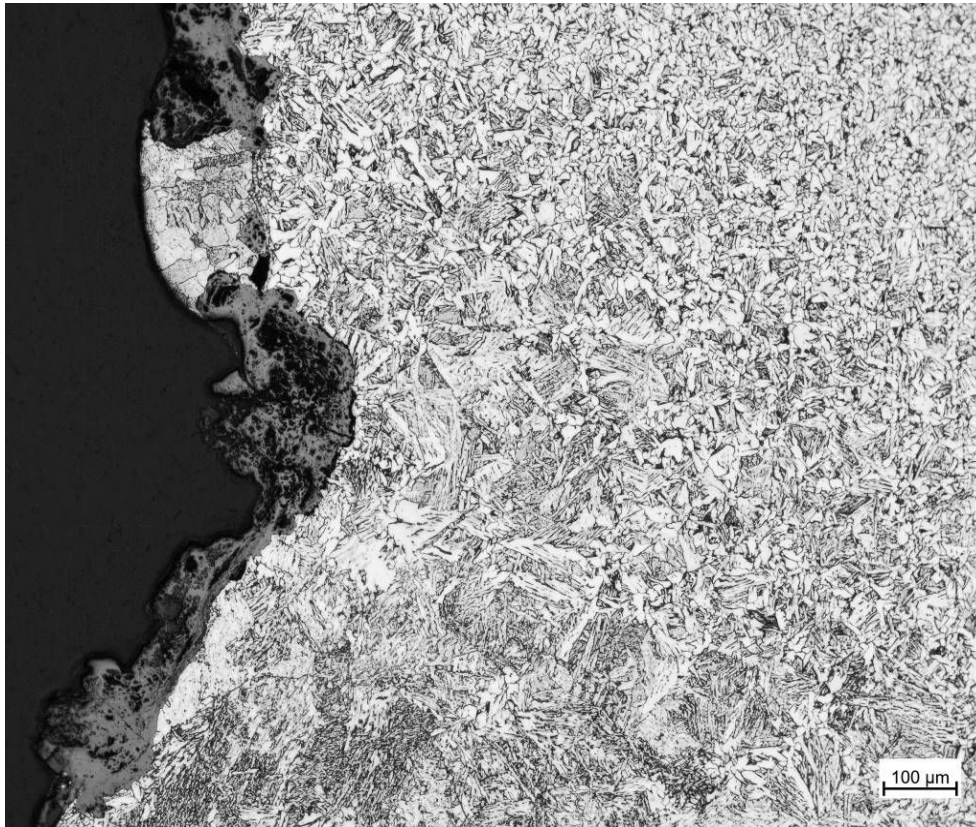
Kaukopää SK6:n jättöpään poikkileikkauksessa havaittiin suuri syöpymäkuoppa, joka ulottui syvälle pinnoitteen alle perusaineeseen. Pinnoitteen pinnalla ei havaittu jäämiä kerrostumista, mutta kuopan pohjalla perusaineen pinnalla havaittiin paksuhkoja kerrostumia, jotka sisälsivät rautaoksidin lisäksi pieniä määriä rikkiä. Mikrorakenne perusaineessa muutosvyöhykkeen ulkopuolella oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu merkkejä hajaantumisesta (Kuva 30 - Kuva 32).



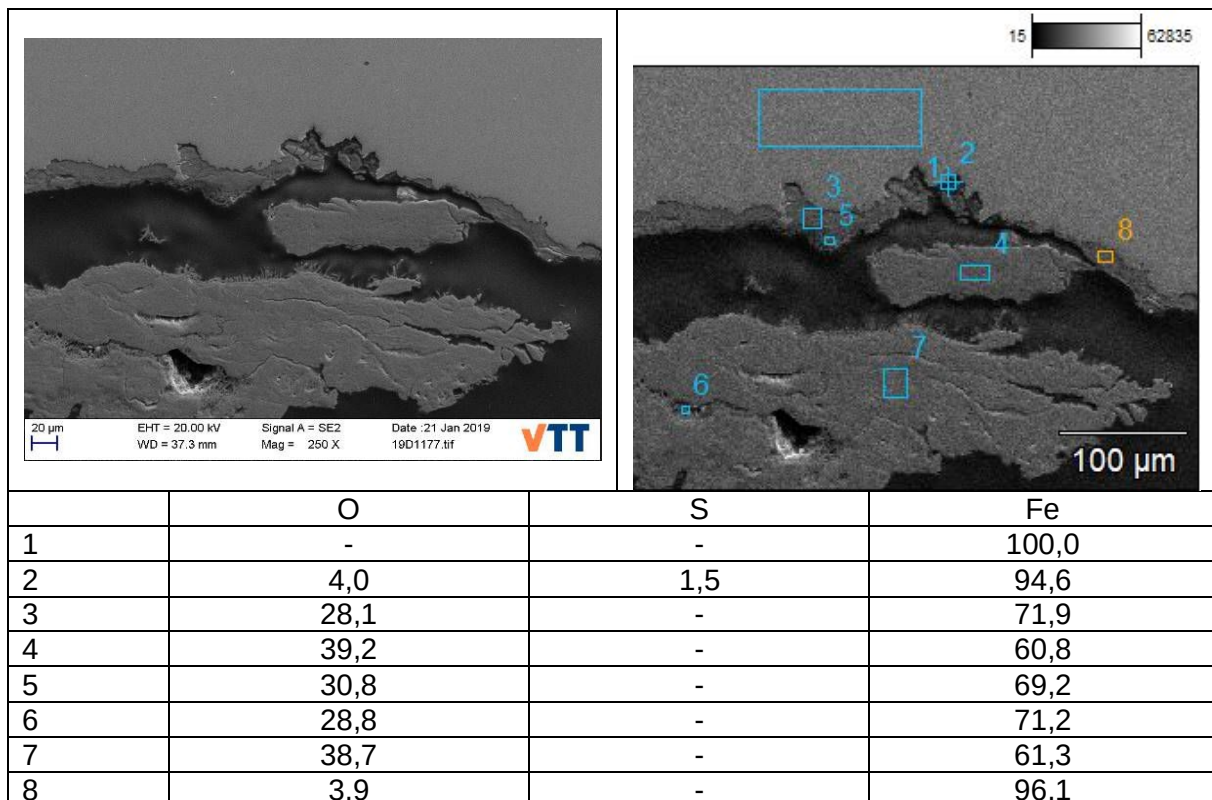


*Kuva 30. Kaukopää SK6 jättöpään poikkileikkaus*





Kuva 31. Kaukopää SK6, kerrostumaa jättöpään syöpymäkuopan pohjalla



Kuva 32. Kaukopää SK6, jättöpään syöpymässä olevan kerrostuman koostumus (paino-%)

### 3.4 Kemi

Tutkimuksiin toimitettiin sulakourut 3 ja 5, tästä eteenpäin Kemi 3 ja Kemi 5 (Kuva 33 ja Kuva 35). Visuaalisen tarkastuksen aikana kouruissa havaittiin säröjä molempien kourujen pohjalla (Kuva 34). Säröily oli voimakkaampaa ja syvempää kourussa 3, jossa sitä havaittiin myös pinnoitetussa päädyssä. Kemi 3 jättöpäädyssä havaittiin myös syöpymää.



Kuva 33. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kemi 3)





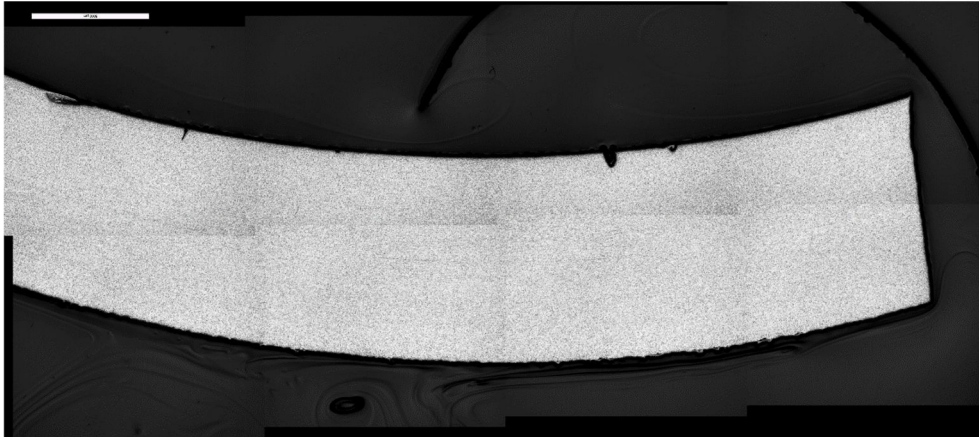
Kuva 34. Yksityiskohta Kemi 3 (Kuva 33)



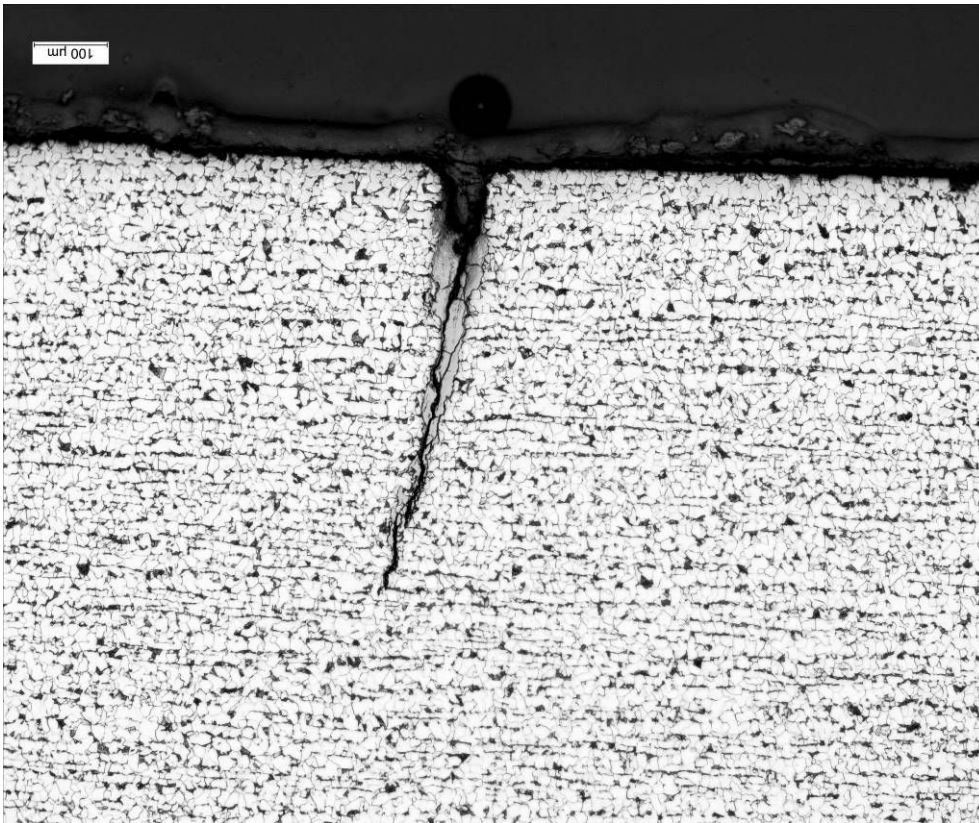
Kuva 35. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru (Kemi 5)

Kemin sulakouruille päätettiin tehdä tarkempi tutkimus. Kemi 3 sulakourun pohjalta tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin ulkopinnalla (sulan puoleinen pinta) säröjä sekä syvempiä kuoppia. Säröjen syvyys oli noin 150 - 575  $\mu\text{m}$ . Säröjen sisällä havaittiin oksidi/korroosiotuotetta. Kourun pohjalla sisäpinnalla havaittiin noin 75  $\mu\text{m}$  paksu oksidikerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 36 - Kuva 39).





Kuva 36. Kemi 3 poikkileikkaus kourun pohjalta

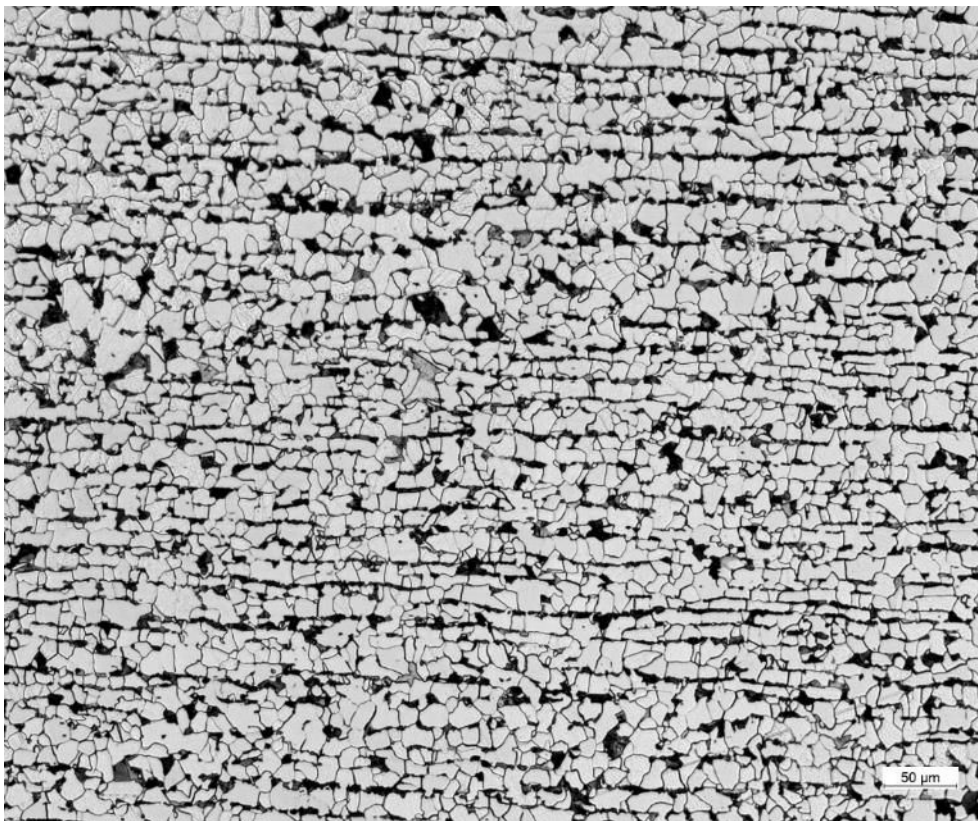


Kuva 37. Kemi 3 säröjä ulkopinnalla kourun pohjalla





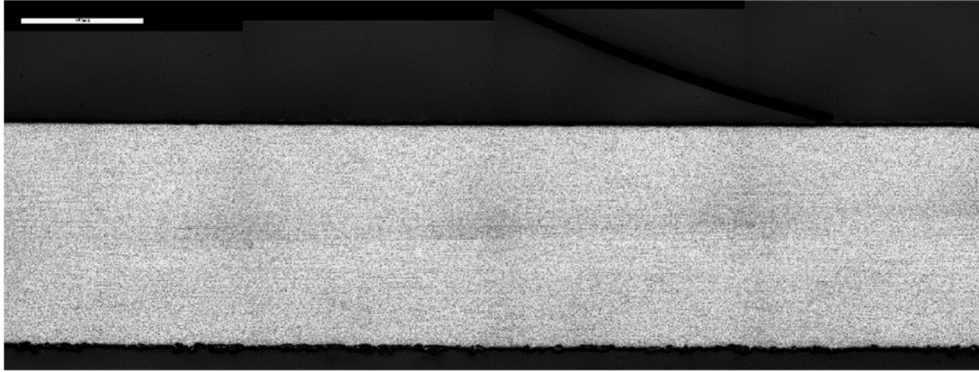
*Kuva 38. Kemi 3 sisäpinnan pohjanäytteen oksidi*



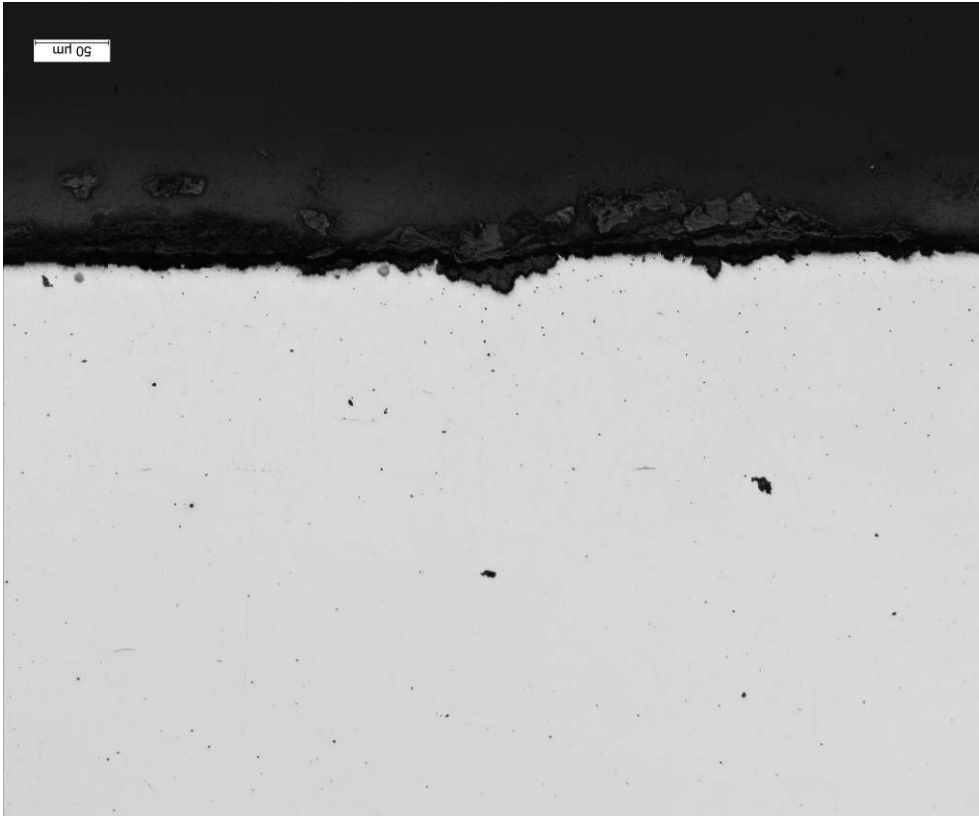
*Kuva 39. Kemi 3 mikrorakenne kourun pohjalta*

Kemi 3 sulakourun seinämältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli verrattain tasainen ja siinä havaittiin vain paikoitellen korroosiotuote/sulajäämiä. Kourun seinällä sisäpinnalla havaittiin noin 150 μm paksu oksidikerros. Kourun mikrorakenne oli

ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 40 - Kuva 43).

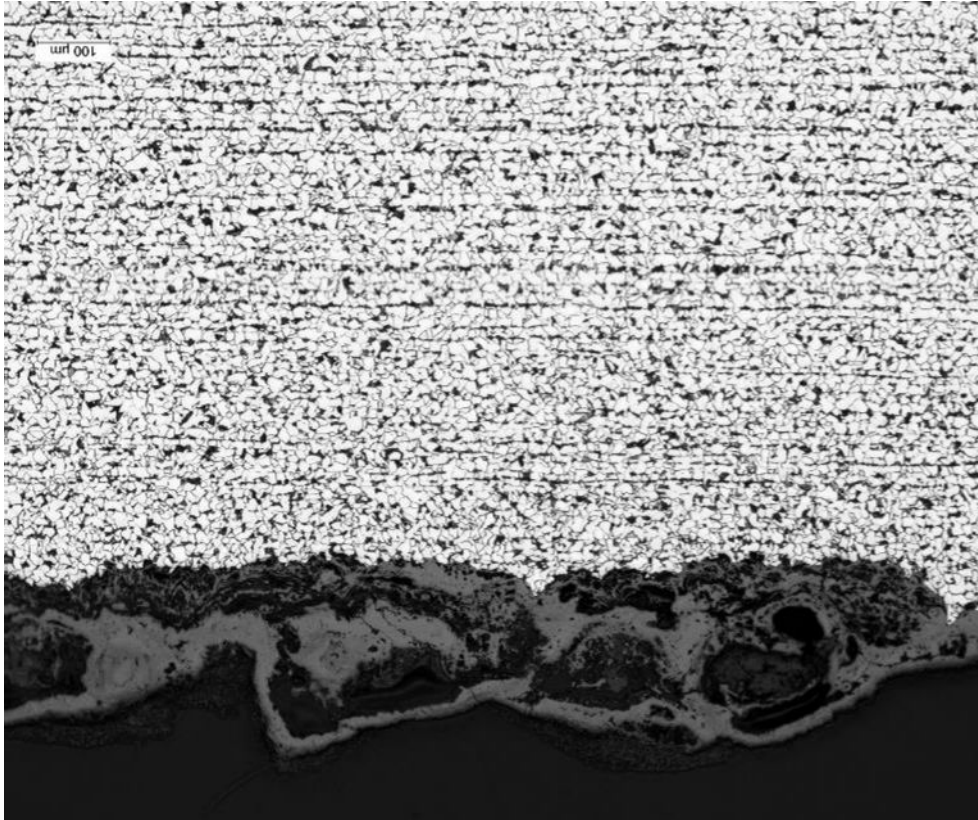


*Kuva 40. Kemi 3 poikkileikkaus kourun seinämältä, sisäpinta (vesikierronpuoleinen pinta) alhaalla*

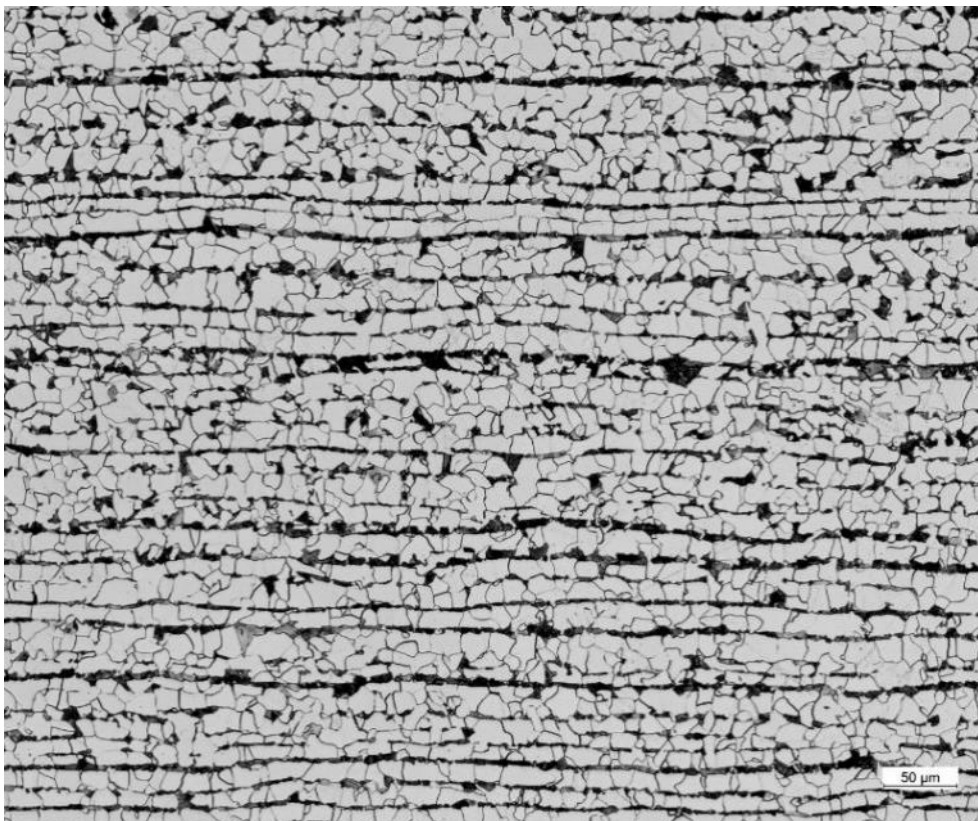


*Kuva 41. Kemi 3 ulkopintaa seinämältä*





Kuva 42. Kemi 3 sisäpinnan oksidi seinämän kohdalta



Kuva 43. Kemi 3 mikrorakenne seinämältä

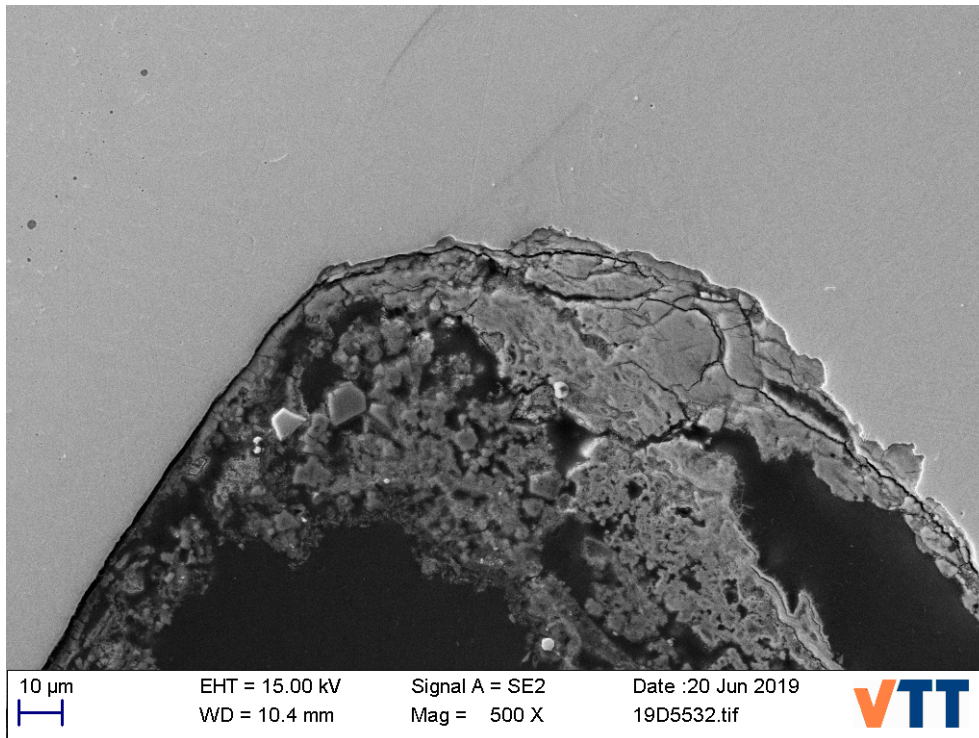
Kemi 3 sulakourun jättöpäädystä tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin syöpymää perusaineelle asti. Syöpymä sisälsi happea, magnesiumia, alumiinia, piitä, rikkiä, klooria, kalsiumia, kromia, mangaania, rautaa ja molybdeenia (Kuva 49). Tällä kohtaa sisäpinnalla

havaittiin noin 160 µm paksu oksidikerros, joka koostui hapestä, fluorista, alumiinista, piistä, rikistä, kloorista, titaanista, mangaanista ja raudasta (Kuva 50). Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen, ja siinä havaittiin lievää lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista muutosvyöhykkeen ulkopuolella (Kuva 44 - Kuva 48). Jättöpäädyn ulkopinnalla havaittiin ohuehko oksidikerros, joka koostui hapestä, raudasta, natriumista, magnesiumista, alumiinista, piistä, rikistä, kloorista, kalsiumista, kromista, mangaanista, raudasta ja nikkelistä (Kuva 51).

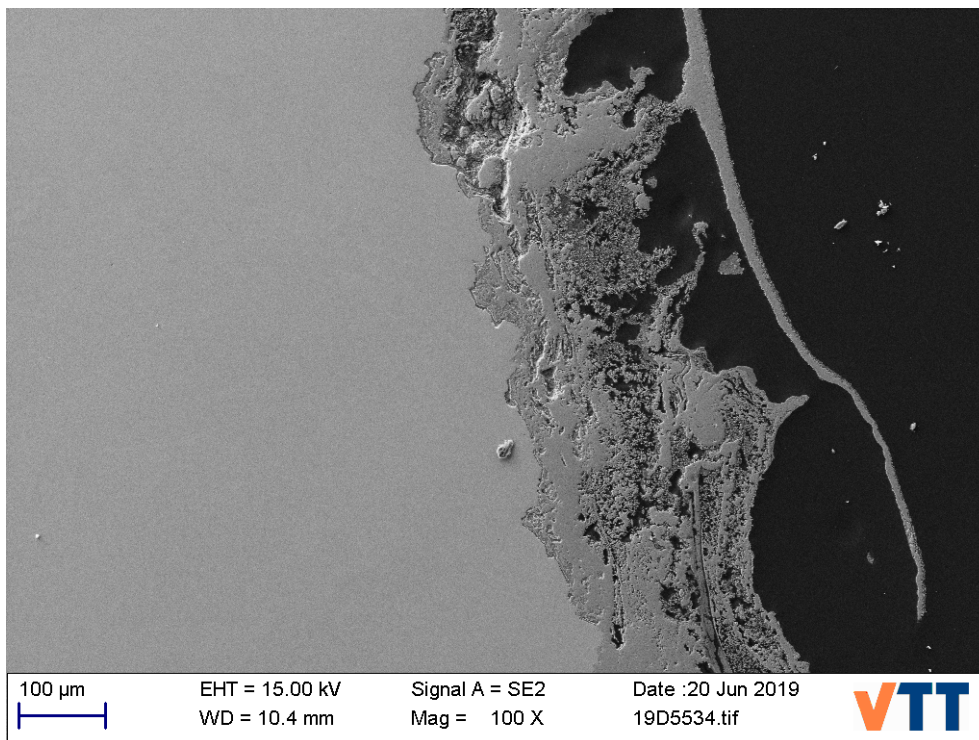


*Kuva 44. Kemi 3 sulakourun jättöpään poikkileikkaus*



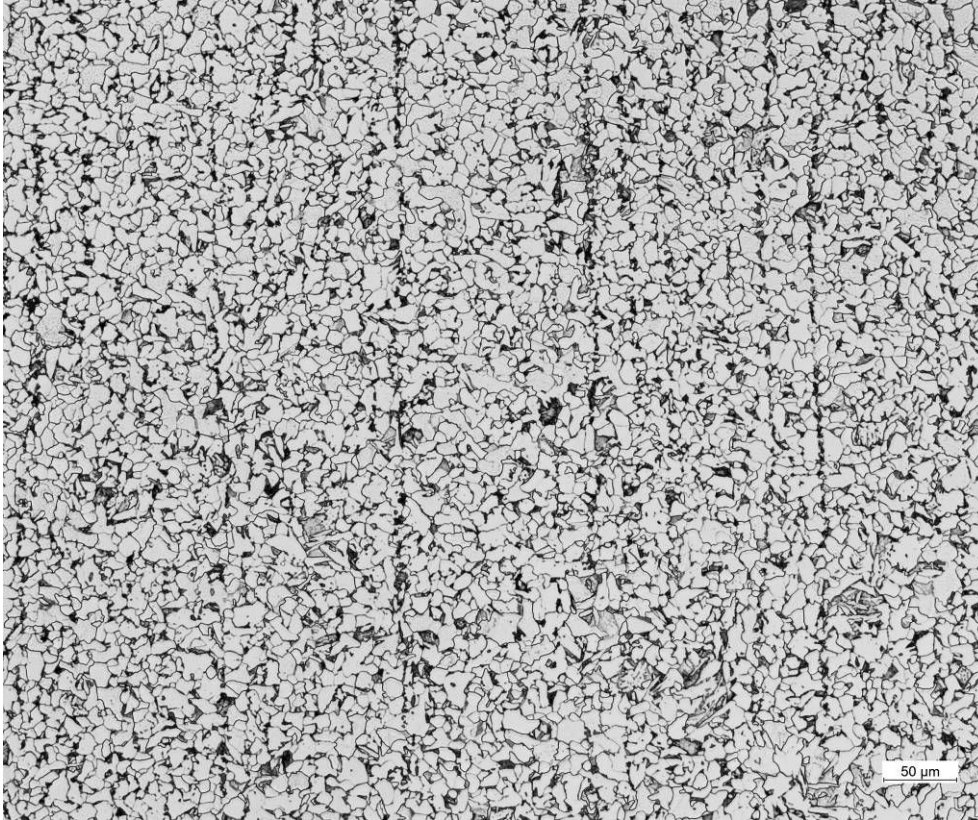


Kuva 45. Kemi 3, kerrostumaa pinnoitteen ja perusaineen rajalla

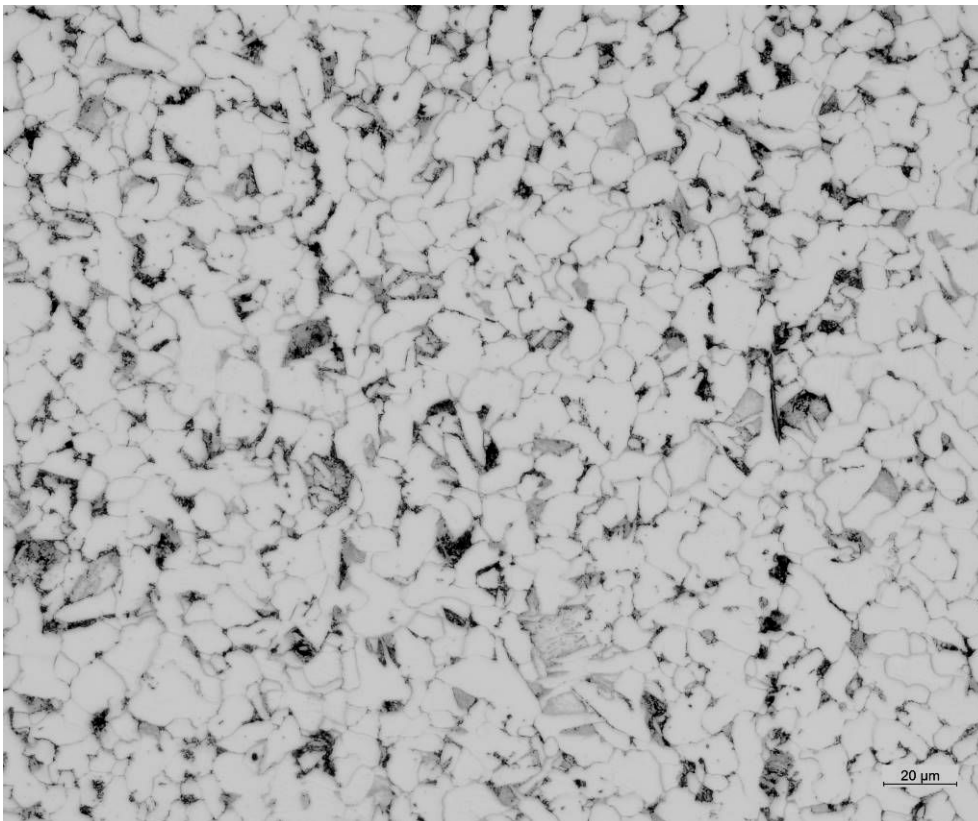


Kuva 46. Kemi 3, jättöpäädyn sisäpinnan (vesikierronpuoleinen pinta) oksidi

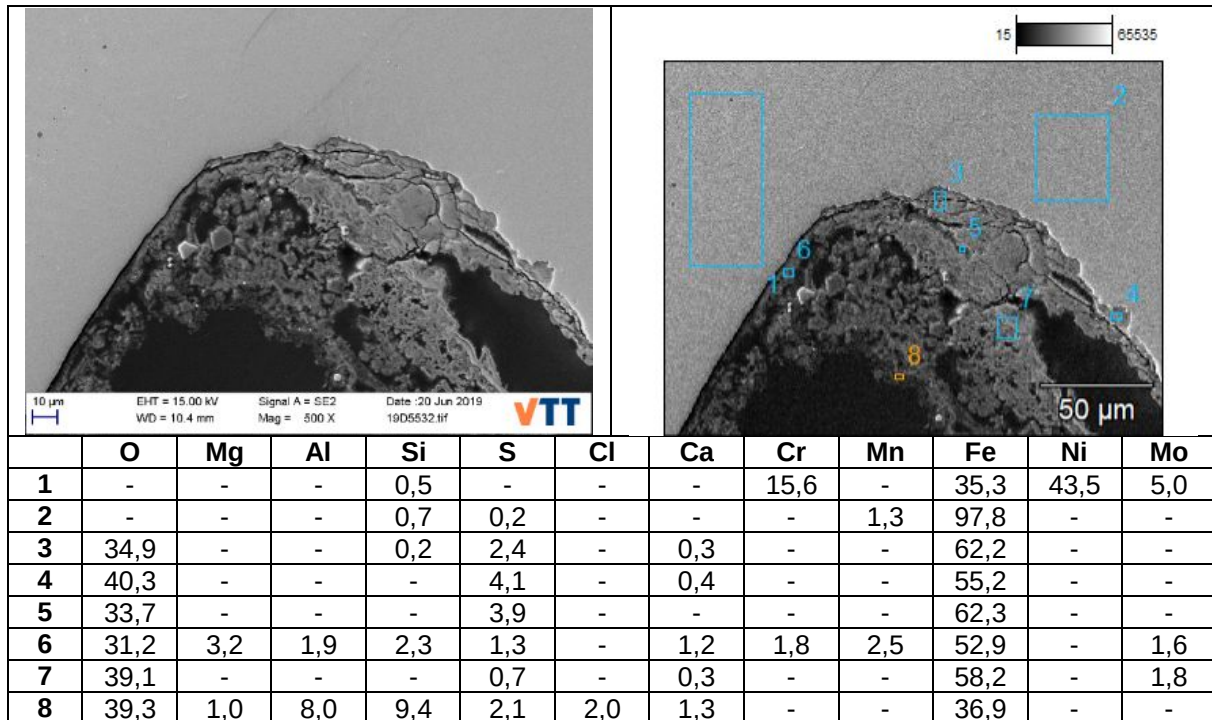




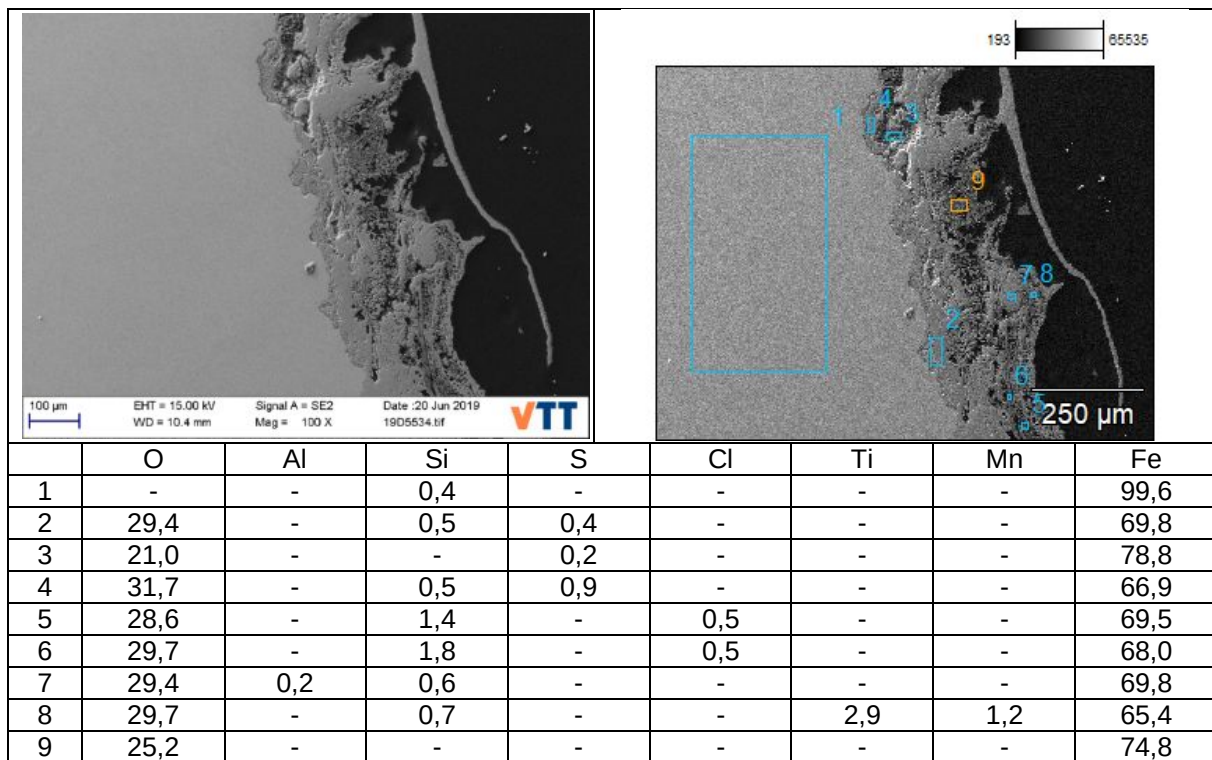
*Kuva 47. Kemi 3 jäätönpäädyn perusaineen mikrorakenne, muutosvyöhykkeen ulkopuolelta läheltä syöpynyttä kohtaa*



*Kuva 48. Yksityiskohta Kuva 47*

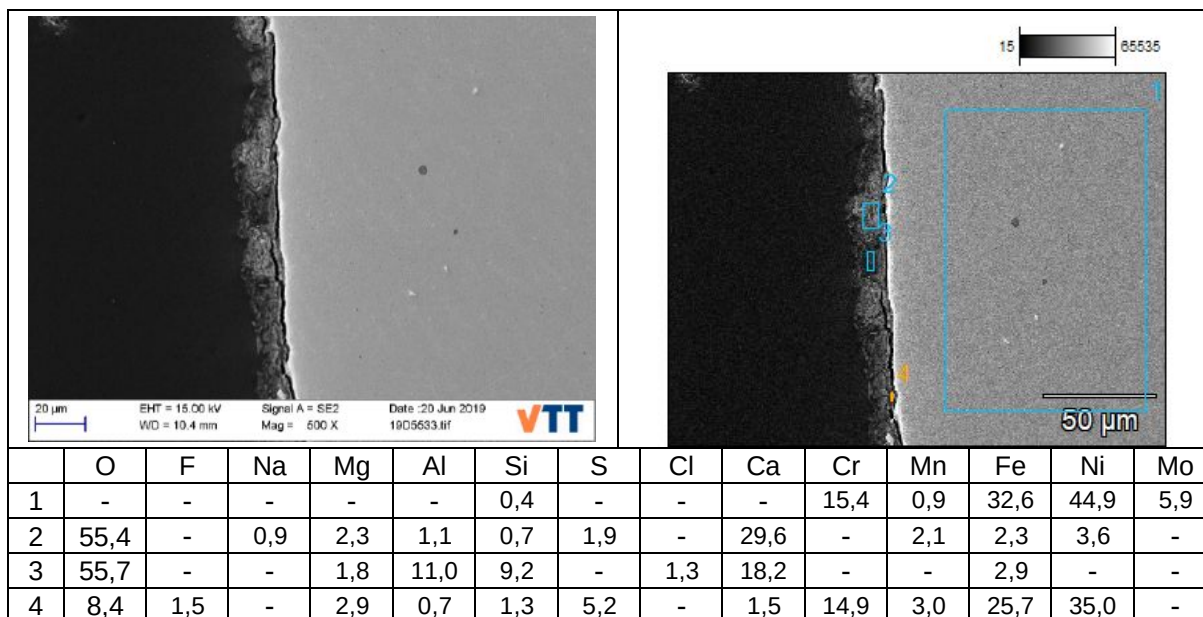


Kuva 49. Kemi 3 jättöpäädyn syöpymän koostumus (paino-%)



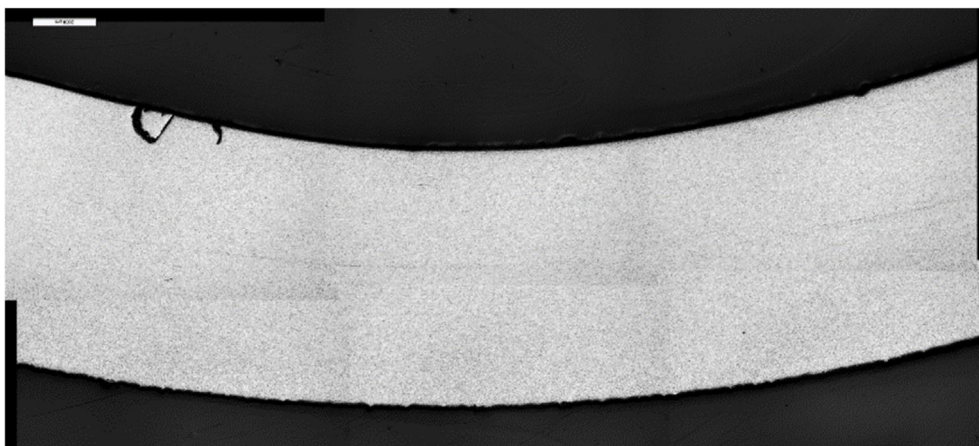
Kuva 50. Kemi 3 jättöpäädyn sisäpinnan oksidikerroksen koostumus (paino-%)





Kuva 51. Kemi 3 jättöpäädyn ulkopinnan oksidikerroksen koostumus (paino -%)

Kemi 5 sulakourun pohjalta tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin säröjä. Yksi yksittäinen noin 750 µm sekä pienempiä, joiden syvyys oli noin 50 - 100 µm. Säröjä oli harvemmassa kuin Kemi 3 sulakourun pohjalla. Säröjen sisällä havaittiin oksidi/korroosiotuotetta. Kourun pohjalla sisäpinnalla havaittiin noin 75 µm paksu oksidikerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 52 - Kuva 55).

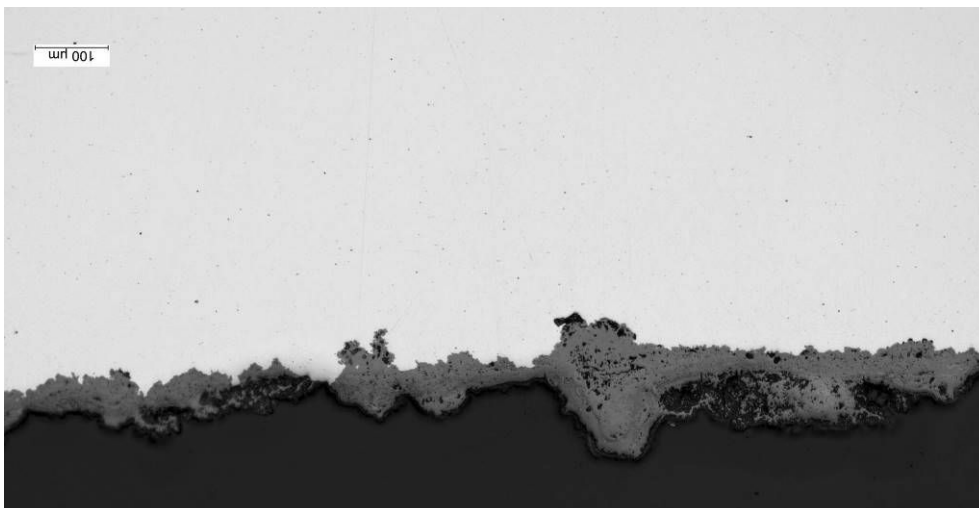


Kuva 52. Kemi 5 poikkileikkaus kourun pohjalta, sisäpinta (vesikierronpuoleinen pinta) alhaalla

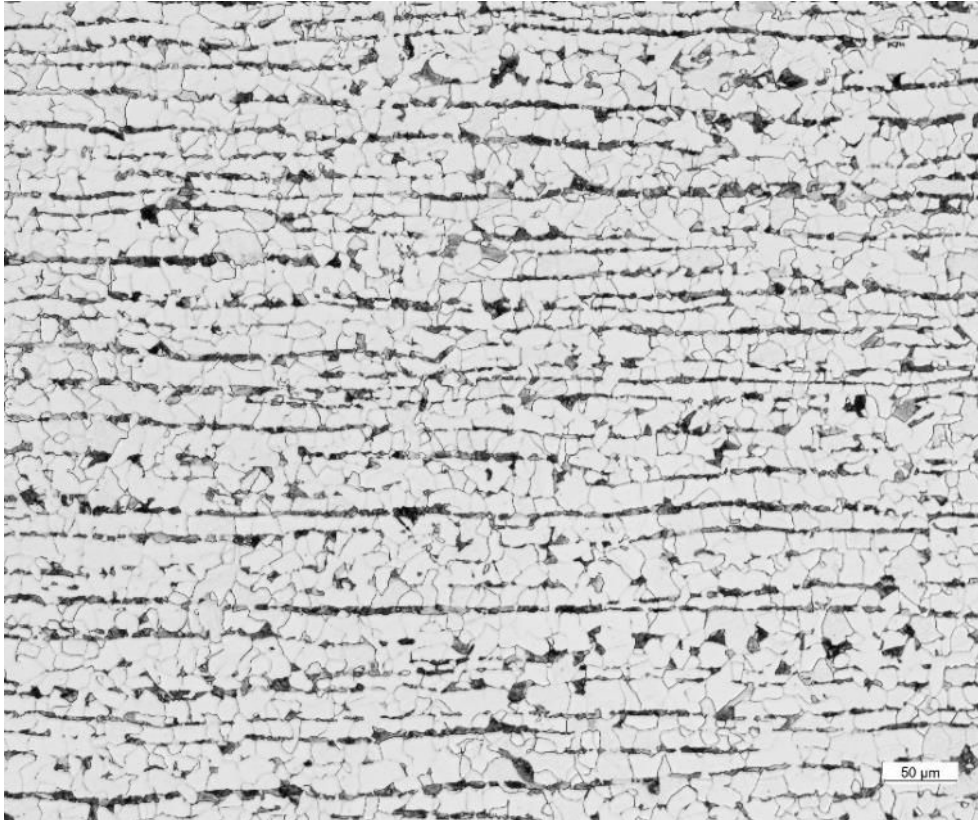




*Kuva 53. Kemi 5 särö kourun pohjan ulkopinnalla*

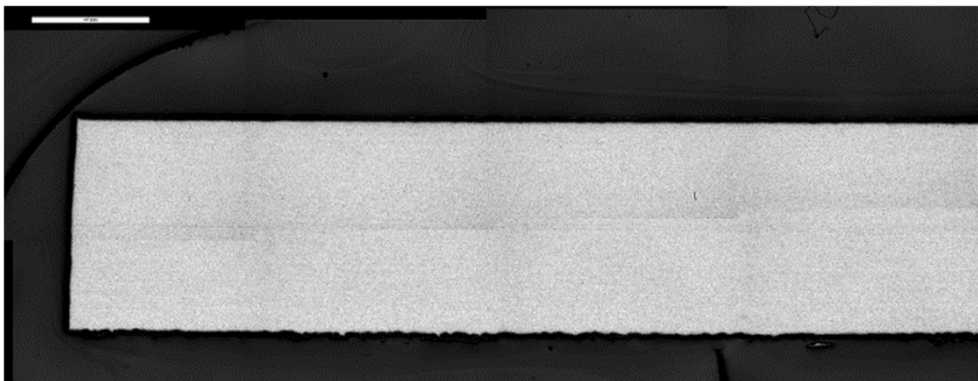


*Kuva 54. Kemi 5 särö kourun pohjan sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta)*



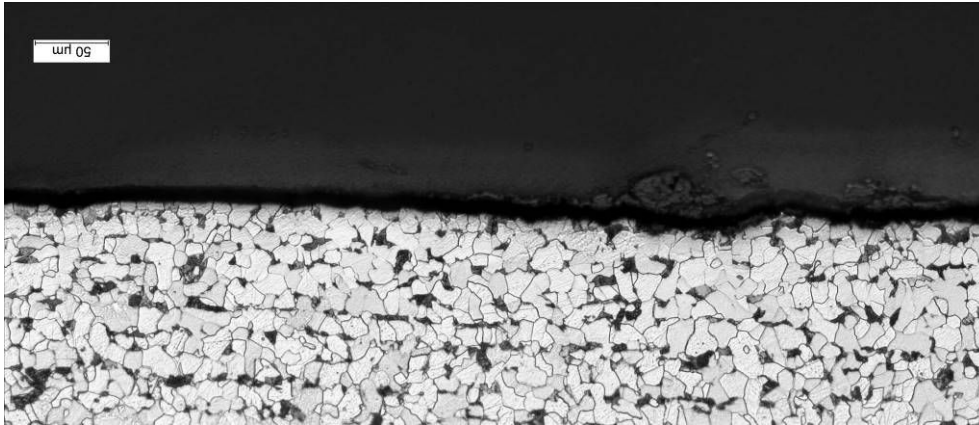
*Kuva 55. Kemi 5 mikrorakenne kourun pohjalta*

Kemi 5 sulakourun seinältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä havaittiin paikoitellen sulajäämiä. Pohjalla sisäpinnalla havaittiin noin 50 µm paksu oksidikerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 56 - Kuva 59).

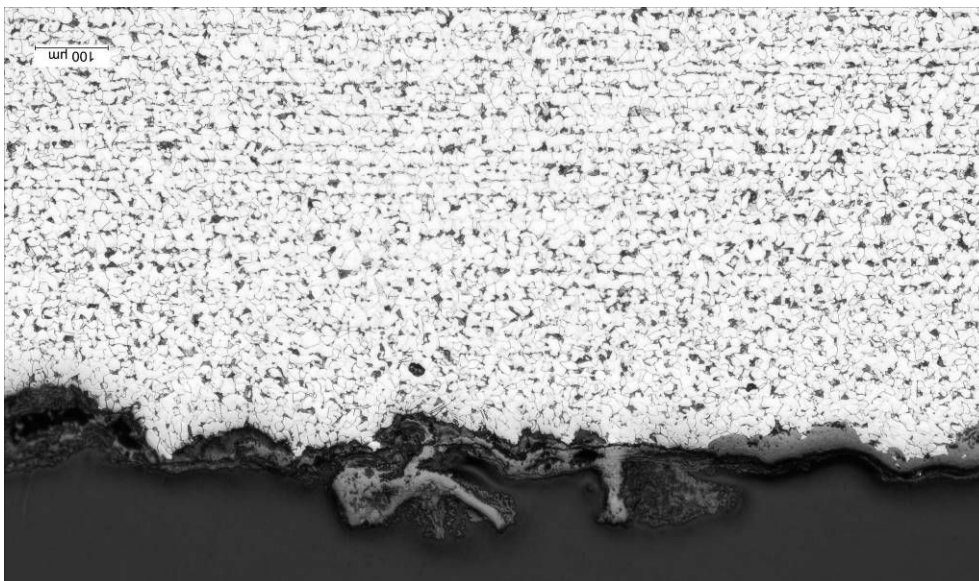


*Kuva 56. Kemi 5 poikkileikkaus seinämältä, kourun sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla*



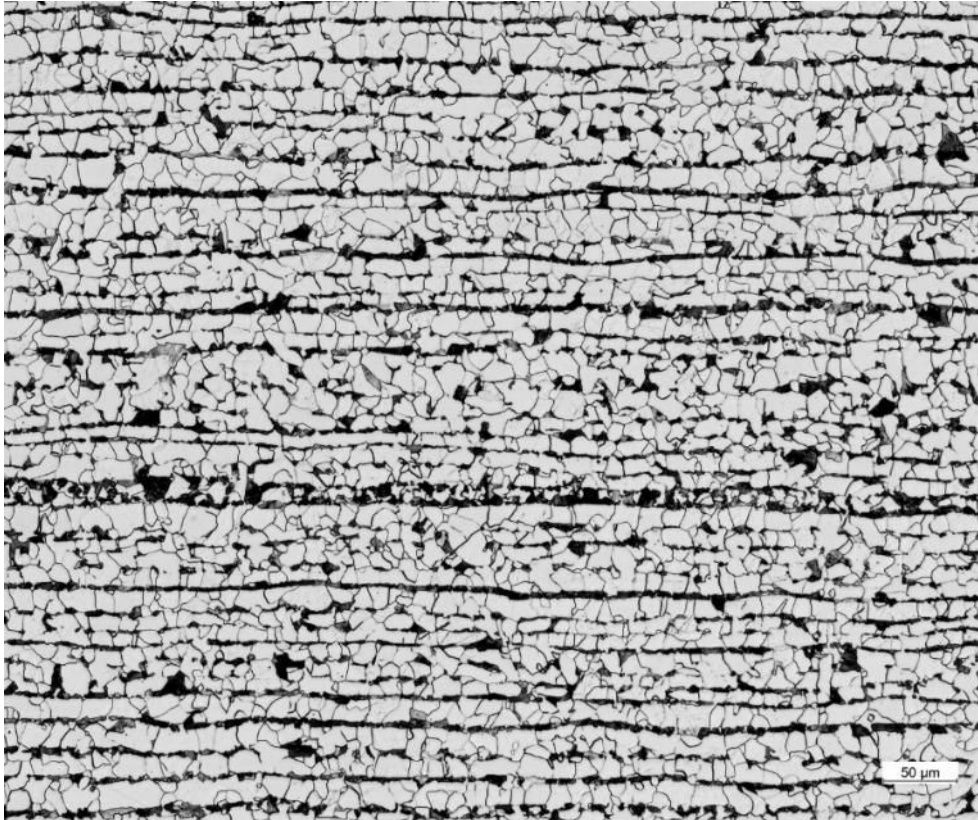


*Kuva 57. Kemi 5 seinämän ulkopinta*



*Kuva 58. Kemi 5 seinämän sisäpinnan (vesikierron puoleinen pinta) oksidi*



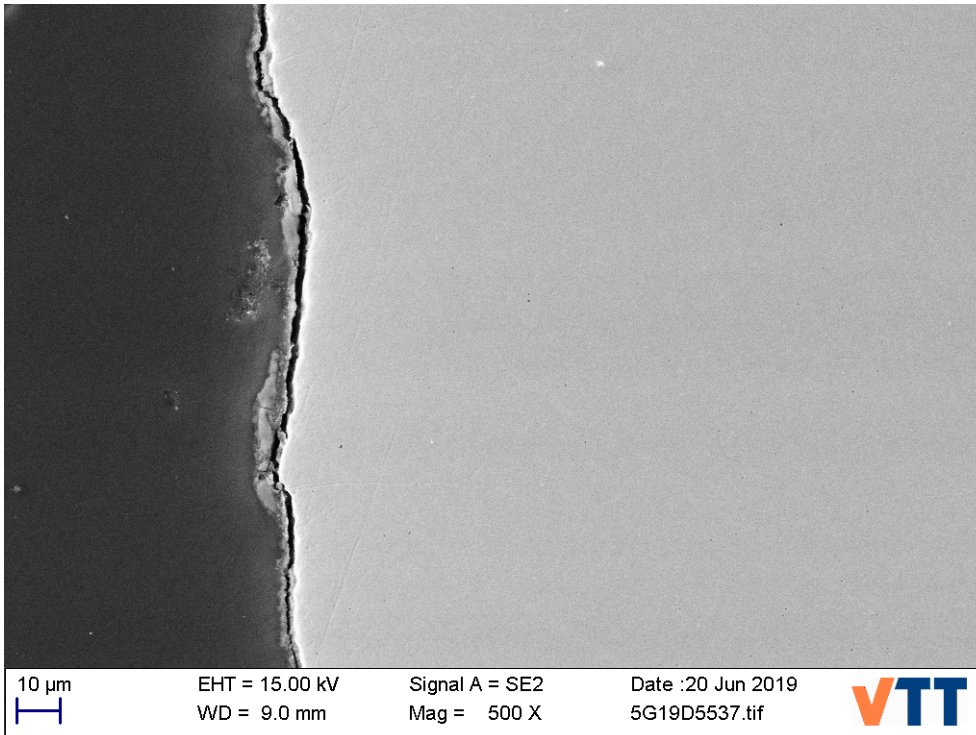


*Kuva 59. Kemi 5 mikrorakenne kourun seinämältä*

Kemi 5 sulakourun jättöpäädystä tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu kuoppamaista syöpymää. Ulkopinta oli hyvin tasainen ja sen pinnalla oli vain paikoitellen ohut oksidi/korroosiotuote kerros, joka sisälsi happea, fluoria, natriumia, magnesiumia, alumiinia, piitä, rikkiä, kaliumia, kalsiumia, kromia, rautaa, nikkeliä ja molybdeenia (Kuva 64). Tällä kohden sisäpinnalla havaittiin noin 80 μm paksu oksidikerros, joka koostui hapesta, rikistä, mangaanista ja raudasta (Kuva 65). Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen, eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista muutosvyöhykkeen ulkopuolella (Kuva 60 - Kuva 63).

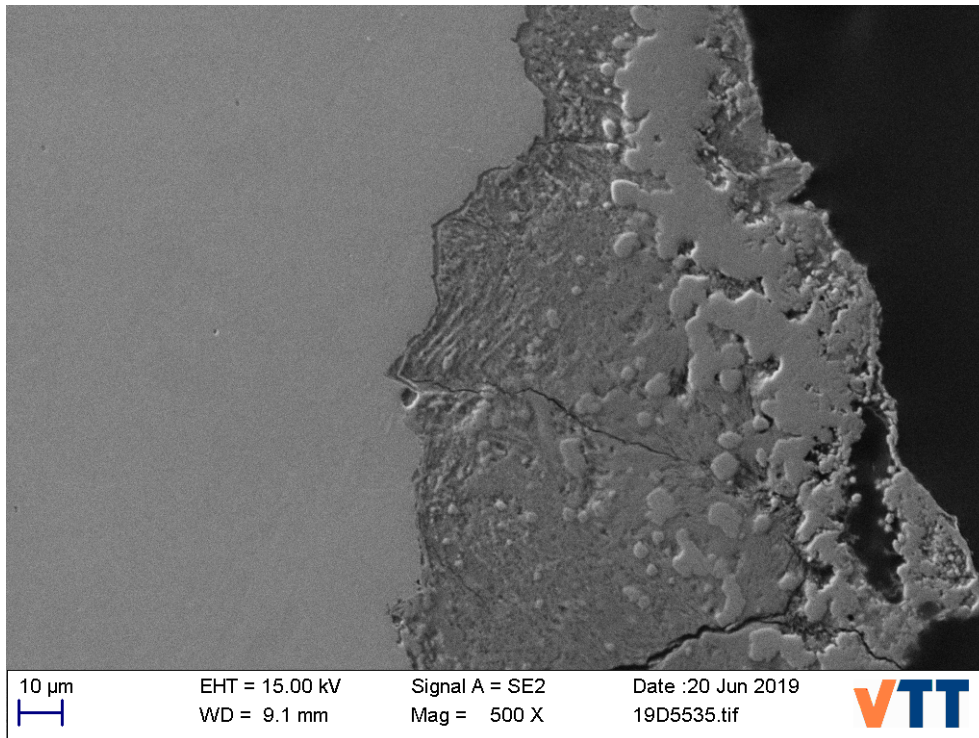


Kuva 60. Kemi 5 jättöpäädyn poikkileikkaus

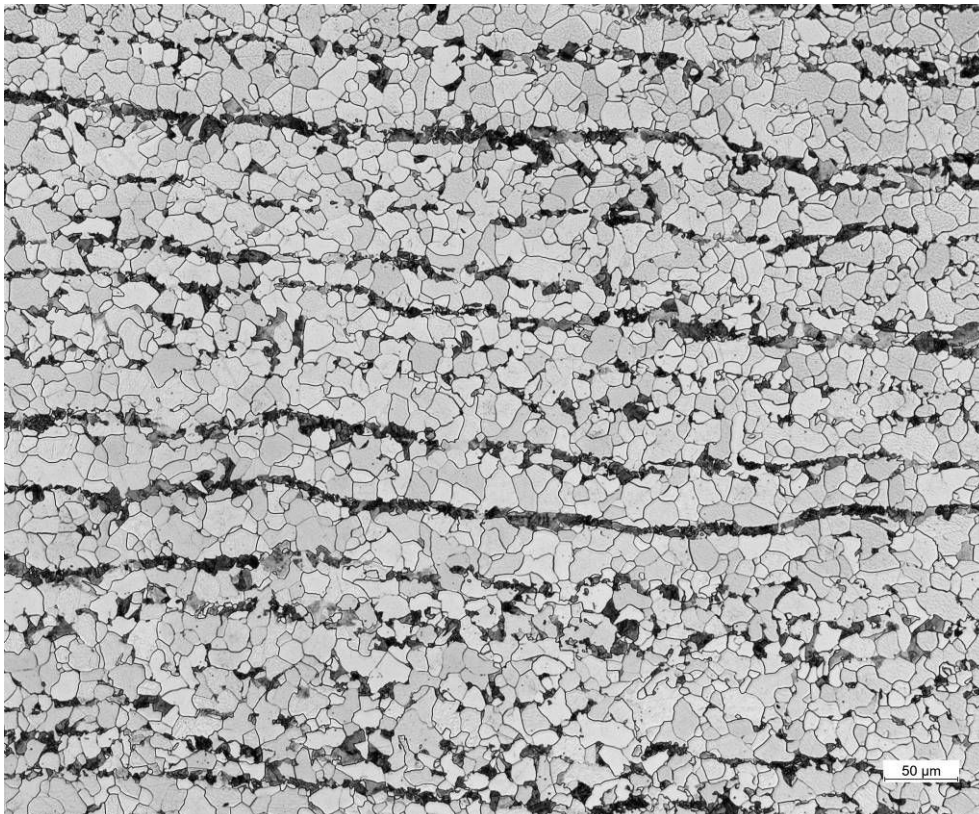


Kuva 61. Kemi 5 jättöpäädyn ulkopinta



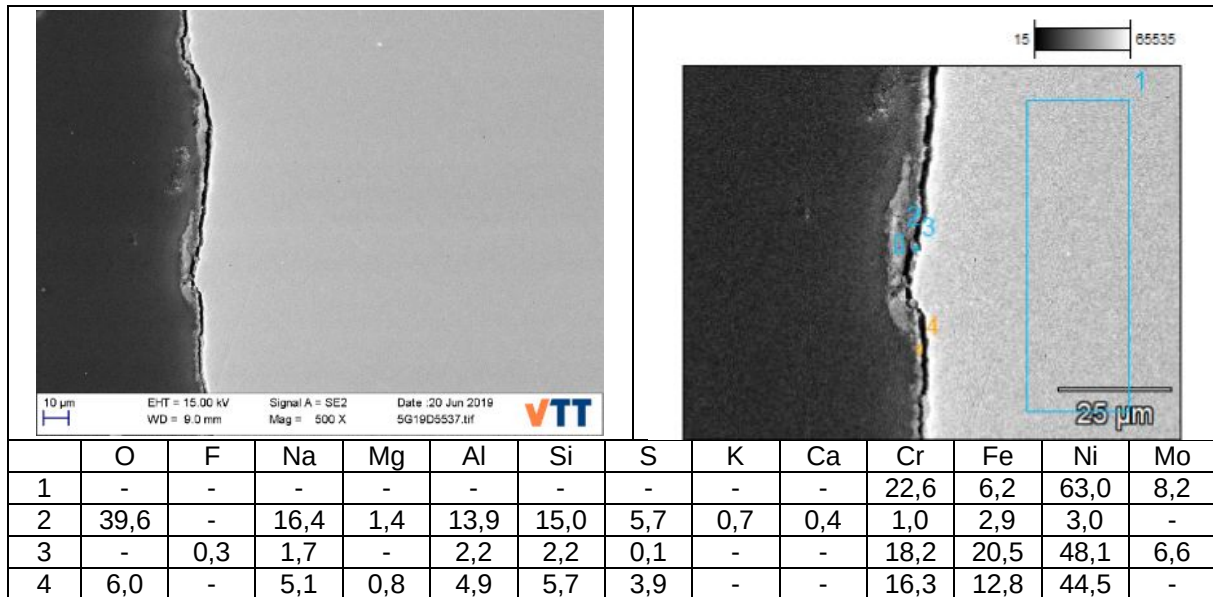


Kuva 62. Kemi 5 jättöpäädyn sisäpinnan oksidi

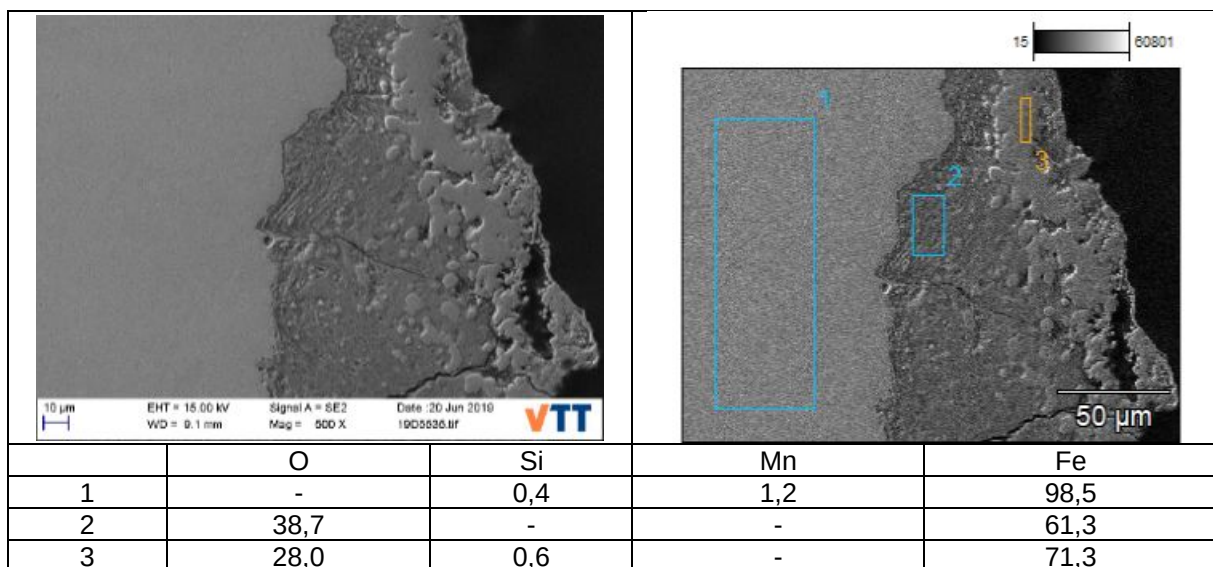


Kuva 63. Kemi 5 jättöpäädyn mikrorakenne



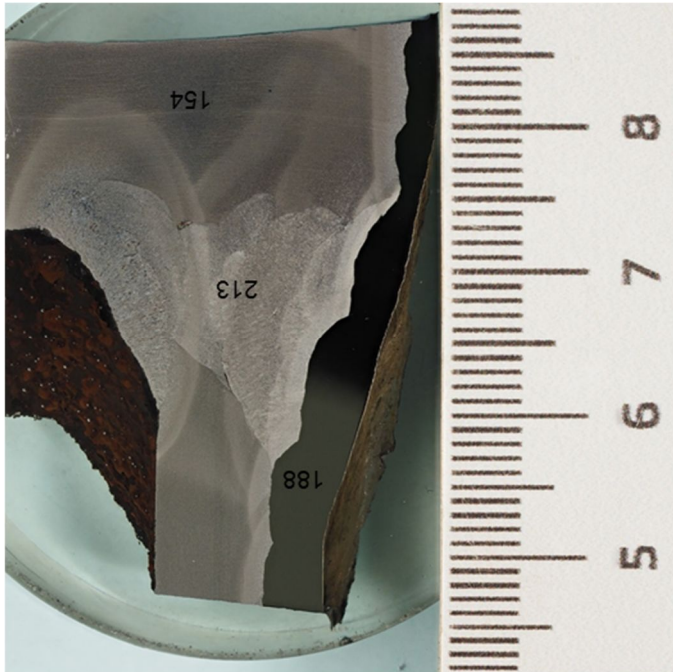


Kuva 64. Kemi 5 jättöpäädyn ulkopinnan oksidikerroksen koostumus (paino-%)



Kuva 65. Kemi 5 sisäpinnan oksidikerroksen koostumus (paino -%)

Kemiallisten analyysien lisäksi Kemi 5 sulakourun jättöpään poikkileikkauksesta määritettiin kovuudet perusaineelle oli  $188 \pm 12$  HV10 ja pinnoitteelle  $154 \pm 5$  HV10, muutosvyöhykkeellä taitekohdassa kovuus oli selvästi suurempi,  $213 \pm 13$  HV10 (Kuva 66).



Kuva 66. Kovuusmittauksien kohdat Kemi5 sulakourulle

### 3.5 Kotkamills

Tutkimuksiin toimitettiin oikea ja vasen sulakouru, tästä eteenpäin Kotkamills oikea ja Kotkamills vasen (Kuva 67 ja Kuva 68). Vasemmasta kourusta oli irrotettu pala ennen toimitusta. Visuaalisessa tarkastuksessa molemmissa kouruissa havaittiin runsaasti säröjä seinämällä.



Kuva 67. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kotkamills oikea)





Kuva 68. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kotkamills vasen)

### 3.6 Kymi

Tutkimuksiin toimitettiin sulakourut 6 ja 7, tästä eteenpäin Kymi 6 ja Kymi 7 (Kuva 67 ja Kuva 68). Visuaalisessa tarkastuksessa kummassakaan kourussa ei havaittu säröjä. Kymi 6 kourussa havaittiin jättöpäädyssä syöpymäkuoppia pinnoitteessa sekä perusaineessa. Tämän lisäksi kouruosan perusaine oli hieman syöpynyt pinnoiterajapinnassa (Kuva 69). Kymi 7 sulakourussa oli jättöpäädyssä nähtävissä pieniä syöpymäkuoppia (Kuva 70).



Kuva 69. Sulakouru Kymi 6





Kuva 70. Sulakouru Kymi 7

### 3.7 Oulu

Tutkimukseen toimitettiin kourut 1 ja 4, tästä lähtien Oulu 1 ja Oulu 4 (Kuva 71 - Kuva 73). Visuaalisessa tarkastuksessa havaittiin kourussa Oulu 4 säröjä seinämällä ja kourussa Oulu 1 jättöpäässä syöpymää.





Kuva 71. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru, Oulu 1



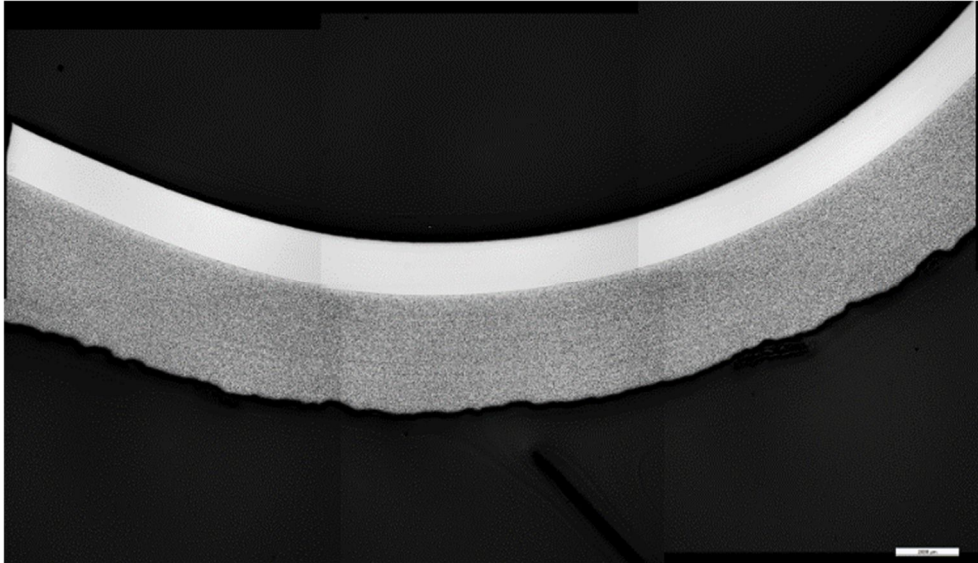
Kuva 72. Oulu 1 jättöpäädyn alapinta



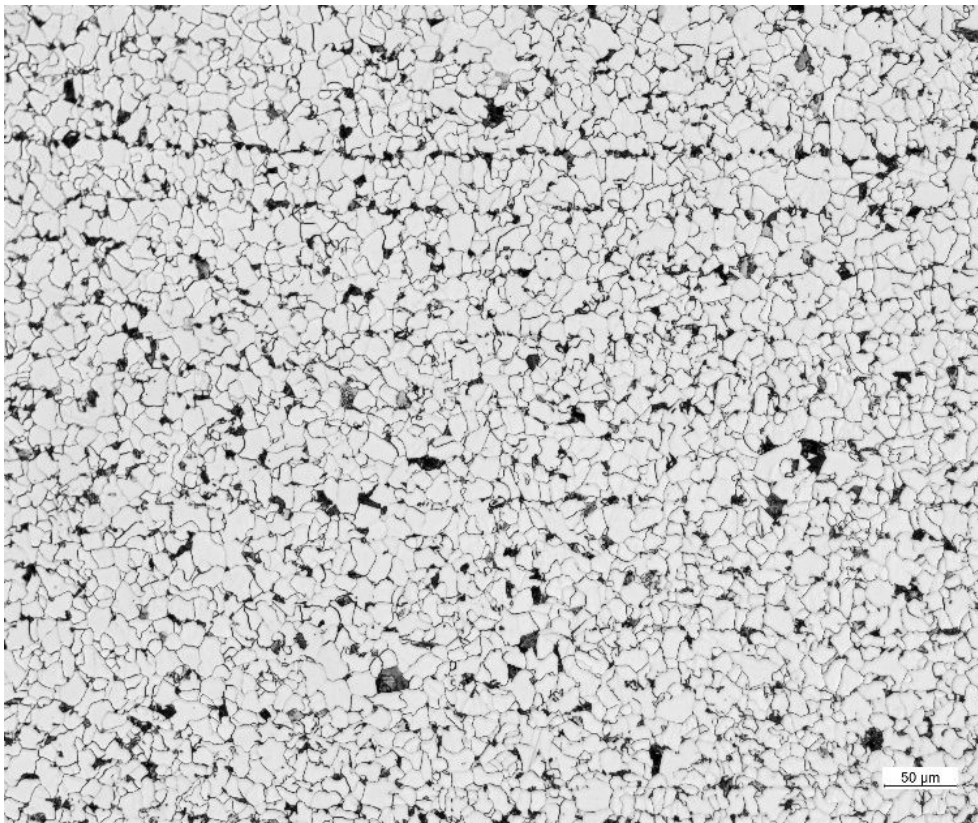
Kuva 73. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru, Oulu 4

Oulun sulakouruille tehtiin tarkempi tutkimus. Oulu 1 sulakourun pohjan poikkileikkaus ja mikrorakennekuvat on esitetty Kuva 74 - Kuva 76. Kourun pohjalla mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista. Oksidikerrosta ei kourun pohjalla ollut <20 mm paksu ja pinnoite-perusainerajapinnalla oli havaittavissa noin 140 mm paksuinen hiilenkatokerros.



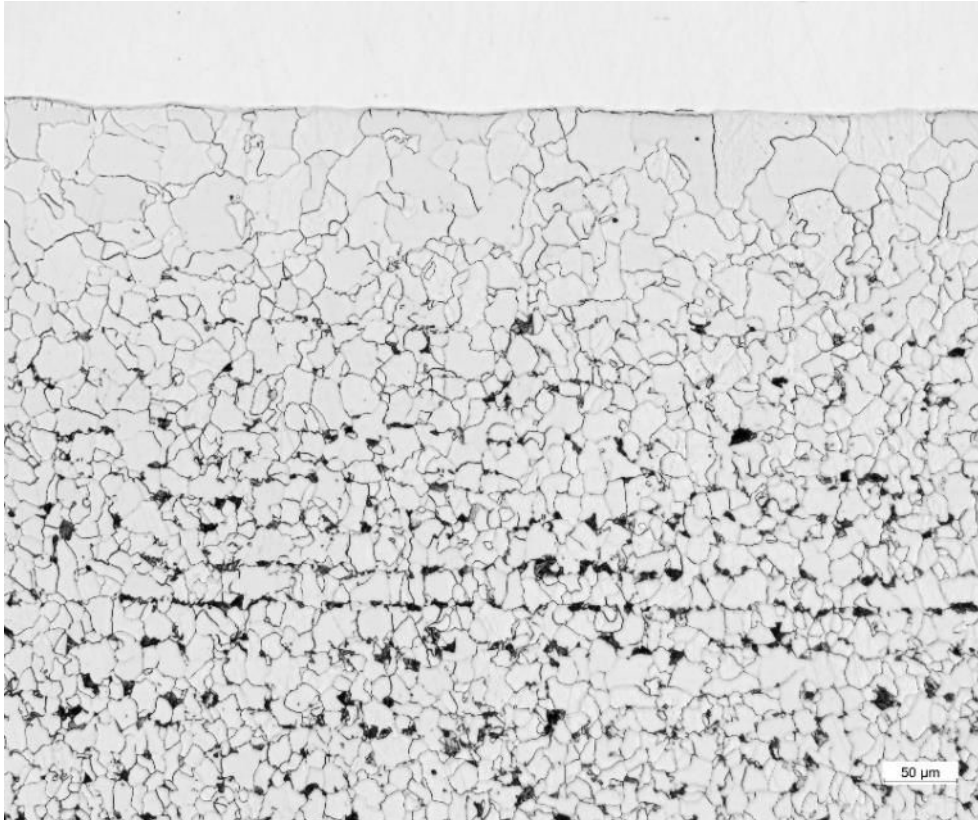


*Kuva 74. Oulu 1 poikkileikkaus kourun pohjalta, sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla*



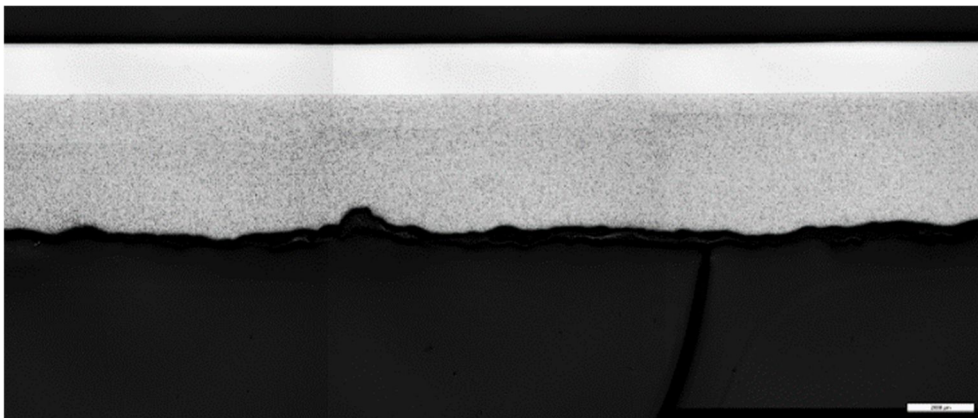
*Kuva 75. Oulu 1 perusaineen mikrorakenne kourun pohjalta*



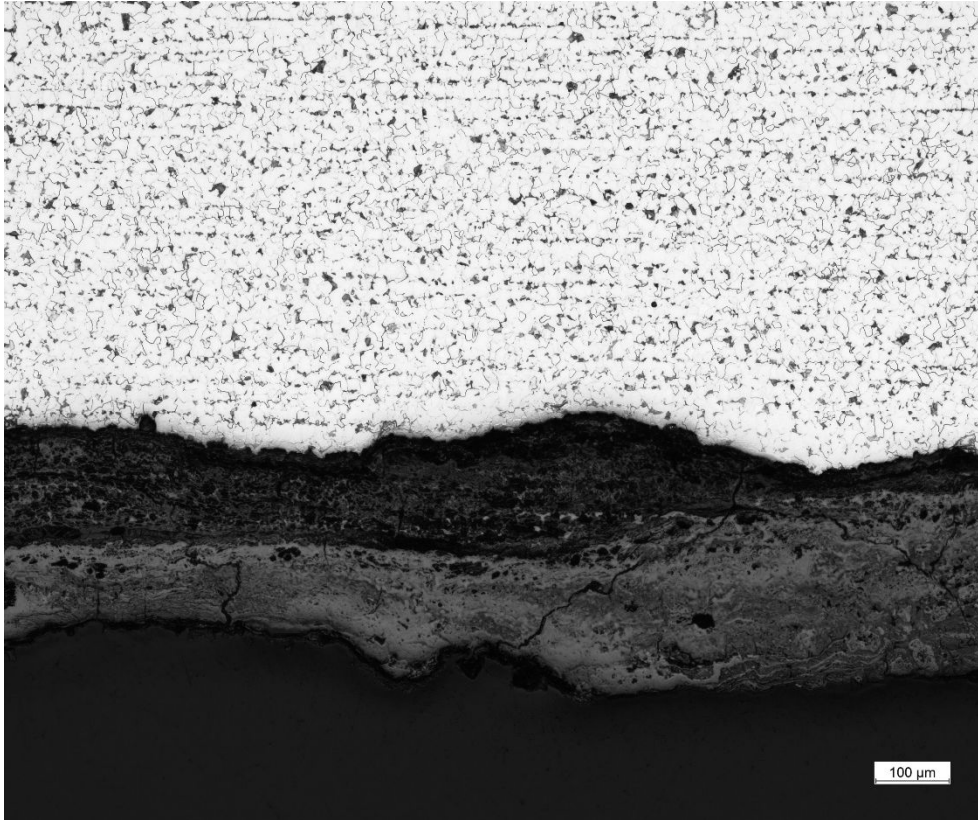


*Kuva 76. Oulu 1 pinnoite-perusainerajapinta kourun pohjalla*

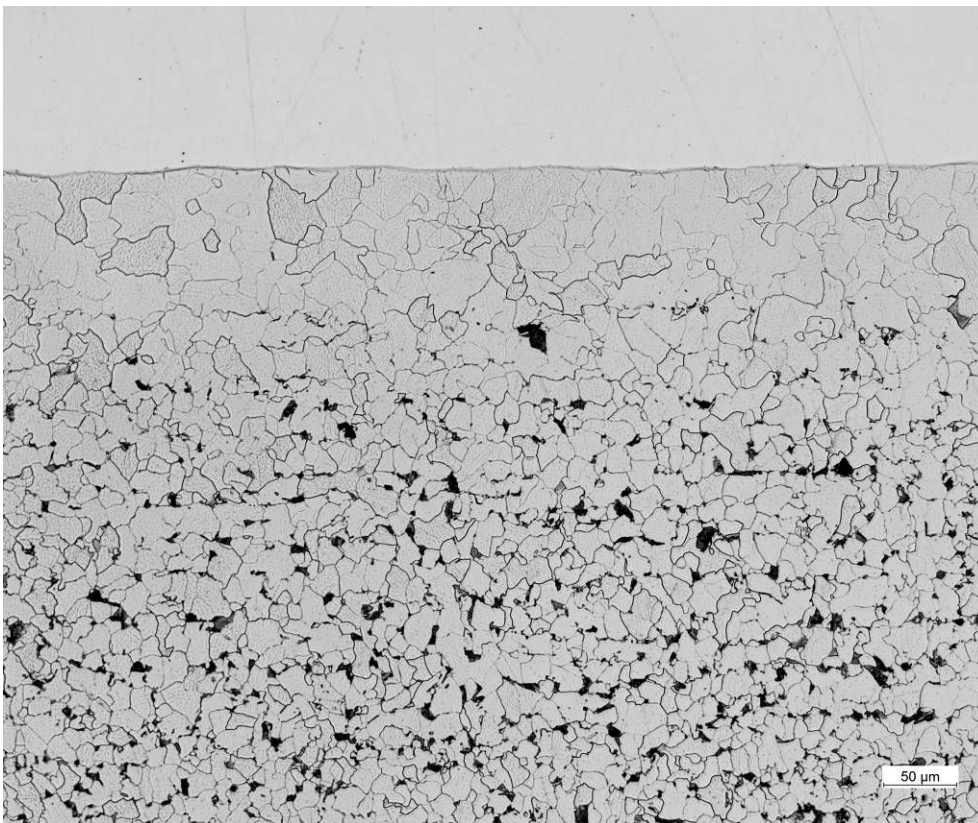
Oulu 1 sulakourun seinältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä havaittiin paikoitellen sulajäämiä. Sisäpinnalla (vesipiirin puoleisella pinnalla) havaittiin noin 220 μm paksu oksidikerros. Pinnoite-perusaine rajapinnalla havaittiin noin 80 μm paksu hiilenkatokerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 77 - Kuva 80)



*Kuva 77. Oulu 1 seinämän poikkileikkaus, vesipiirin puoleinen (sisäpinta) alhaalla*

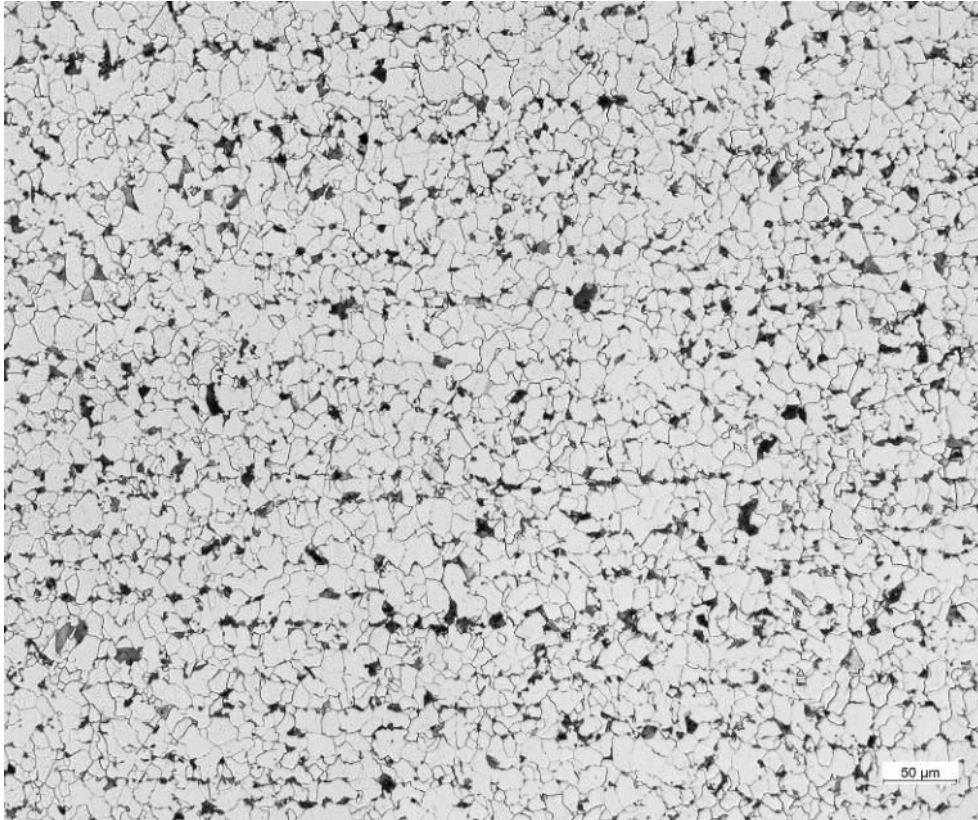


*Kuva 78. Oulu 1 sisäpinnan (vesipiirin puolinen pinta) oksidikerros kourun seinämällä*



*Kuva 79. Oulu 1, pinnoite-perusainerajapinta kourun seinämällä*



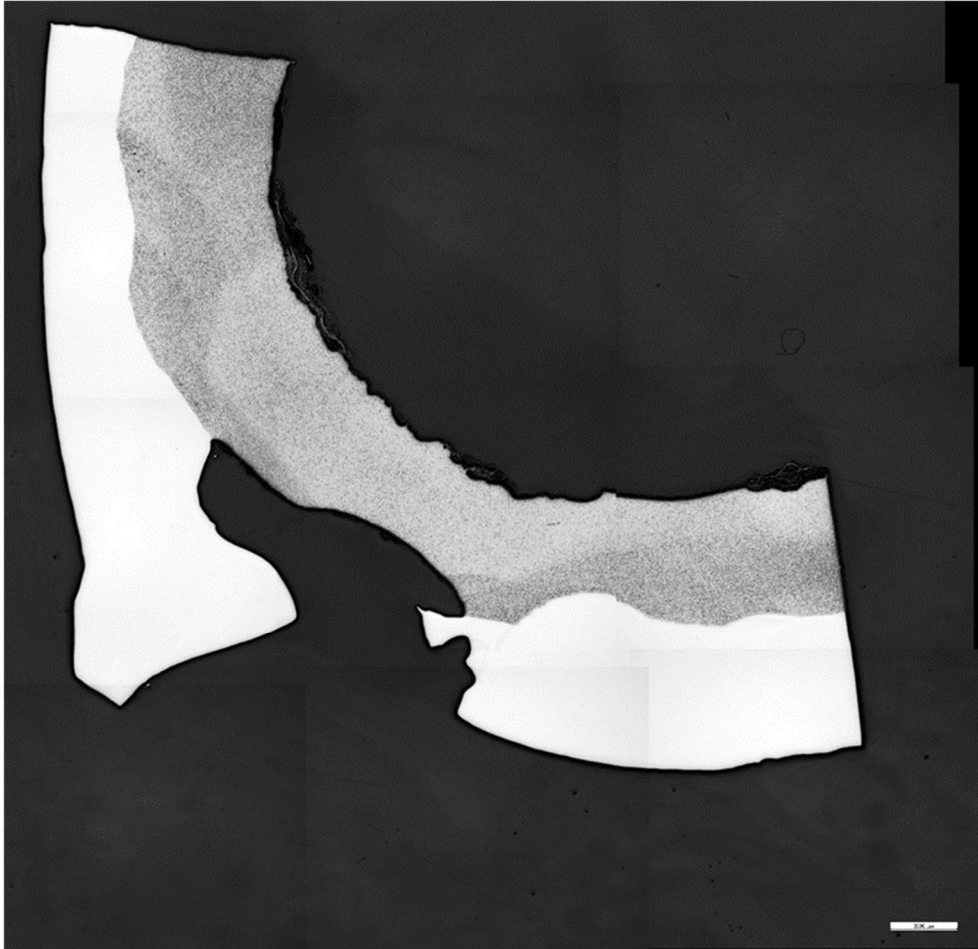


Kuva 80. Oulu 1, perusaineen mikrorakenne kourun seinämältä

Oulu 1 sulakourun jättöpäädystä tehdystä poikkileikkausnäytteessä havaittiin suuri kuoppamainen syöpymä. Syöpymäkuopan havaittiin yltävän reilusti perusaineen puolelle ja perusaineen pinnalla havaittiin paikoitellen paksuhkoa kerrostumaa, joka sisälsi rikkiä, magnesiumia ja natriumia, normaaleiden teräksen hapettumistuotteiden lisäksi. Pinnoitteen ulkopinta oli hyvin tasainen ja kuopassa pinnoitteen pinnalla oli vain paikoitellen pieniä korroosiotuotekerroksia, joka sisälsi magnesiumia, rikkiä, kaliumia, kalsiumia ja klooria, teräksen normaalien hapettumistuotteiden lisäksi. Tällä kohden sisäpinnalla (vesipiirin puolella) havaittiin noin 260  $\mu\text{m}$  paksu oksidikerros, joka sisälsi normaalien teräksen hapettumistuotteiden lisäksi pieniä määriä rikkiä. Jättöpäädystä kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen, eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista muutosvyöhykkeen ulkopuolella (Kuva 81-Kuva 88).

Kemiallisten analyysien lisäksi Oulu 1 sulakourun jättöpään poikkileikkauksesta määritettiin perusaineen kovuudeksi  $206 \pm 15$  HV10 ja pinnoitteen  $140 \pm 14$  HV10.

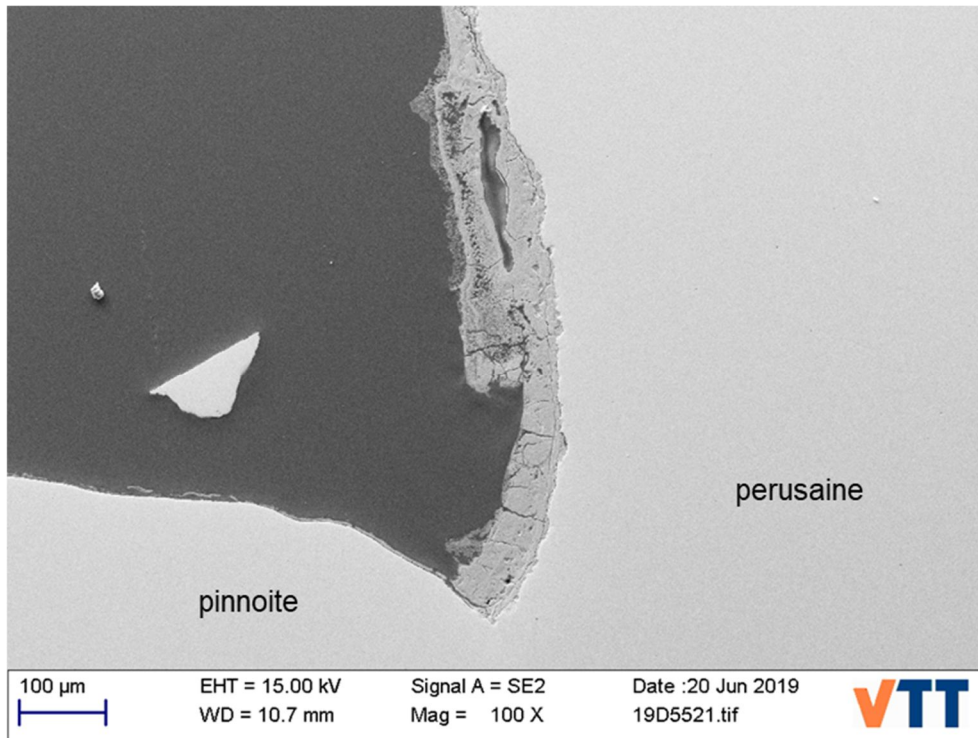




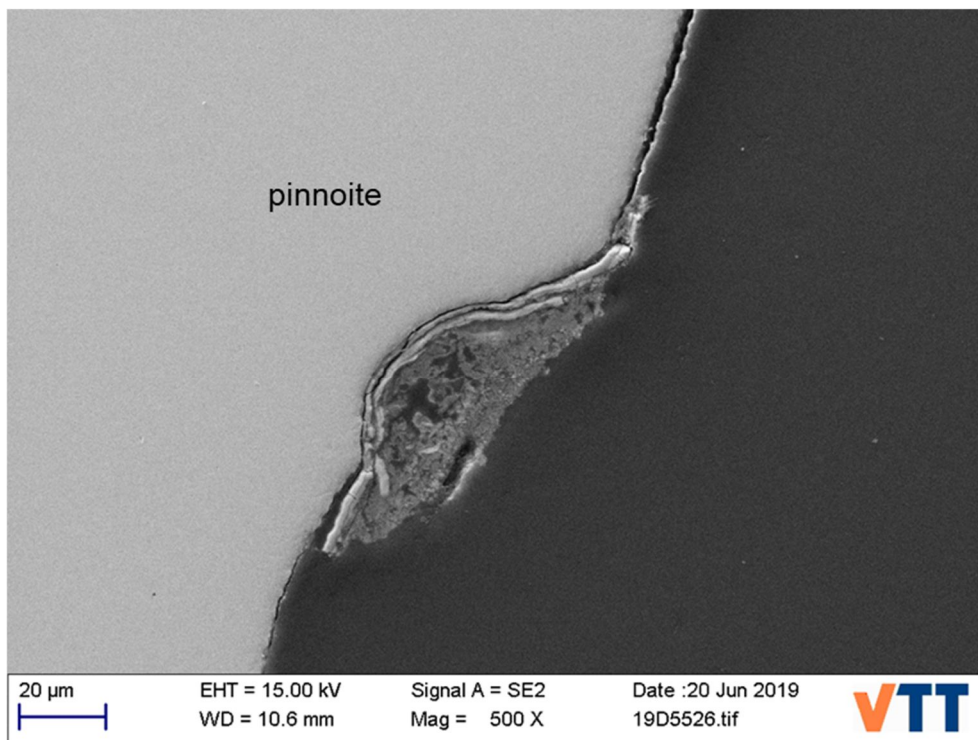
Kuva 81. Oulu1, jättöpäädyn poikkileikkaus



Kuva 82. Yksityiskohta Kuva 81

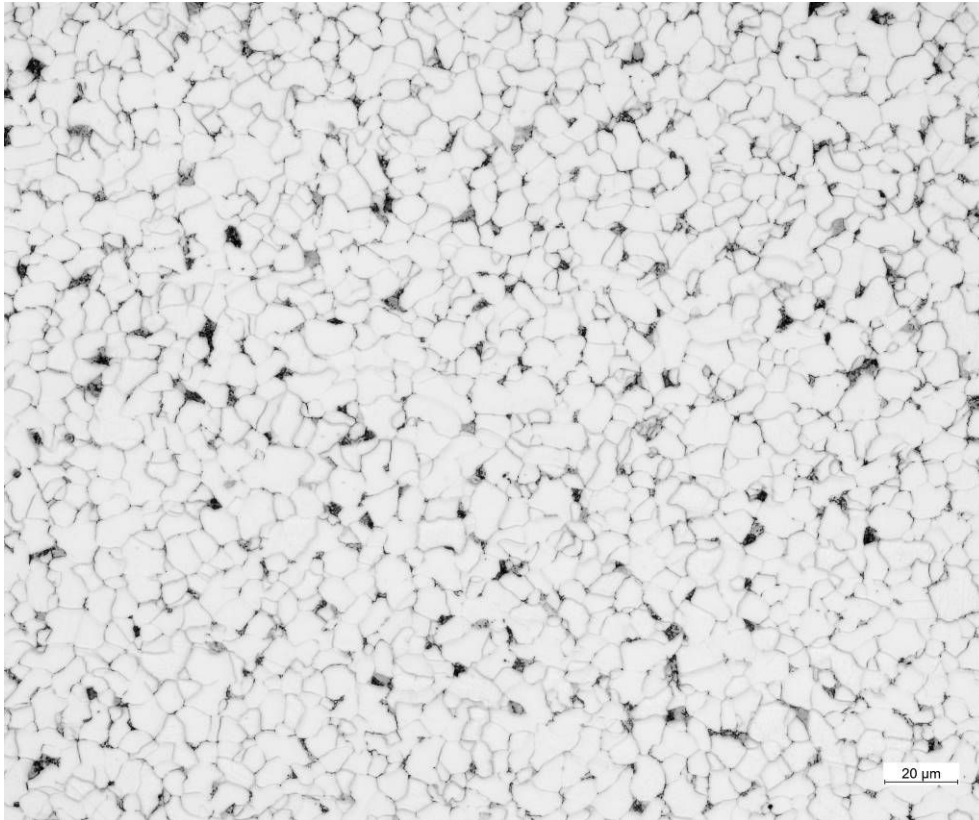


Kuva 83. Oulu1, jättöpäädyn syöpymäkuopan pohjalta

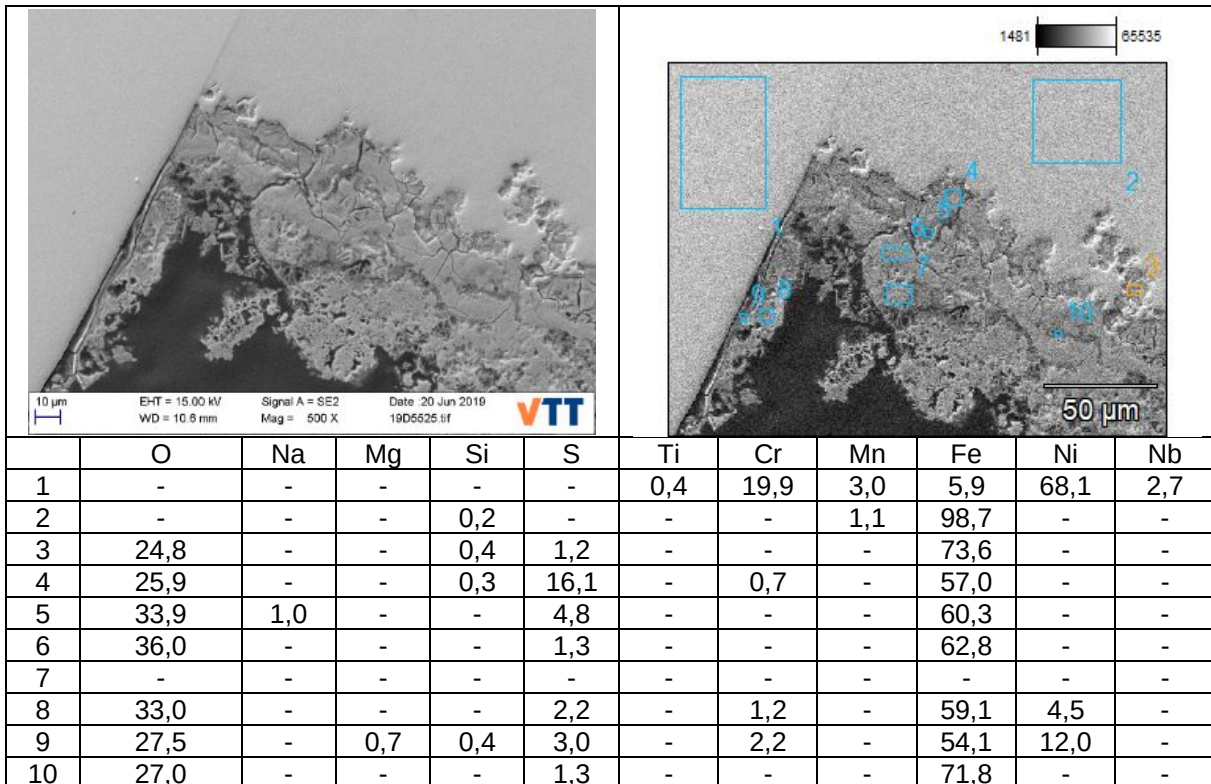


Kuva 84. Oulu1, jättöpäädyn syöpymäkuopasta kerrostumaa pinnoitteen päällä

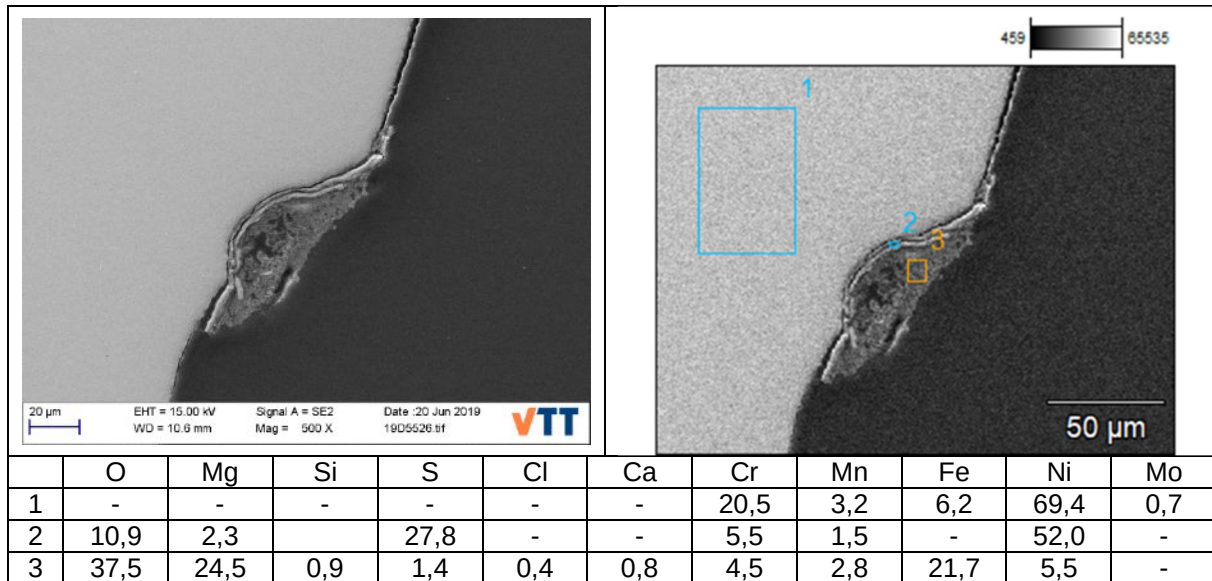




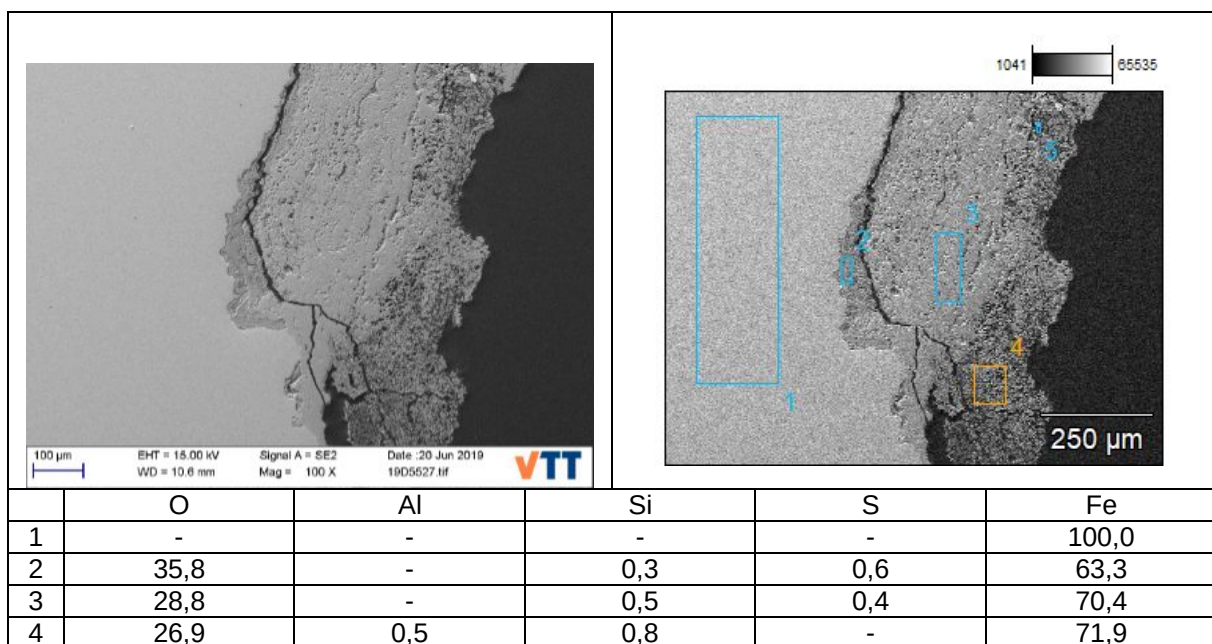
Kuva 85. Oulu 1, jättöpäädyn perusaineen mikrorakenne



Kuva 86. Oulu 1 jättöpäädyn syöpymäkuopan kerrostuman koostumus (paino-%)



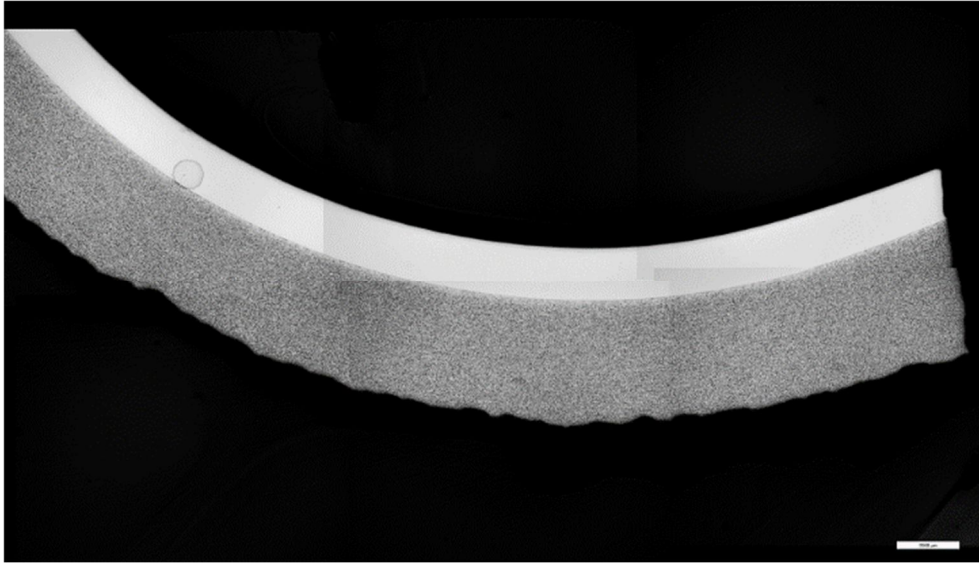
Kuva 87. Oulu 1, jättopäädyn syöpymäkuopan pinnoiteosan kerrostuman koostumus (paino-%)



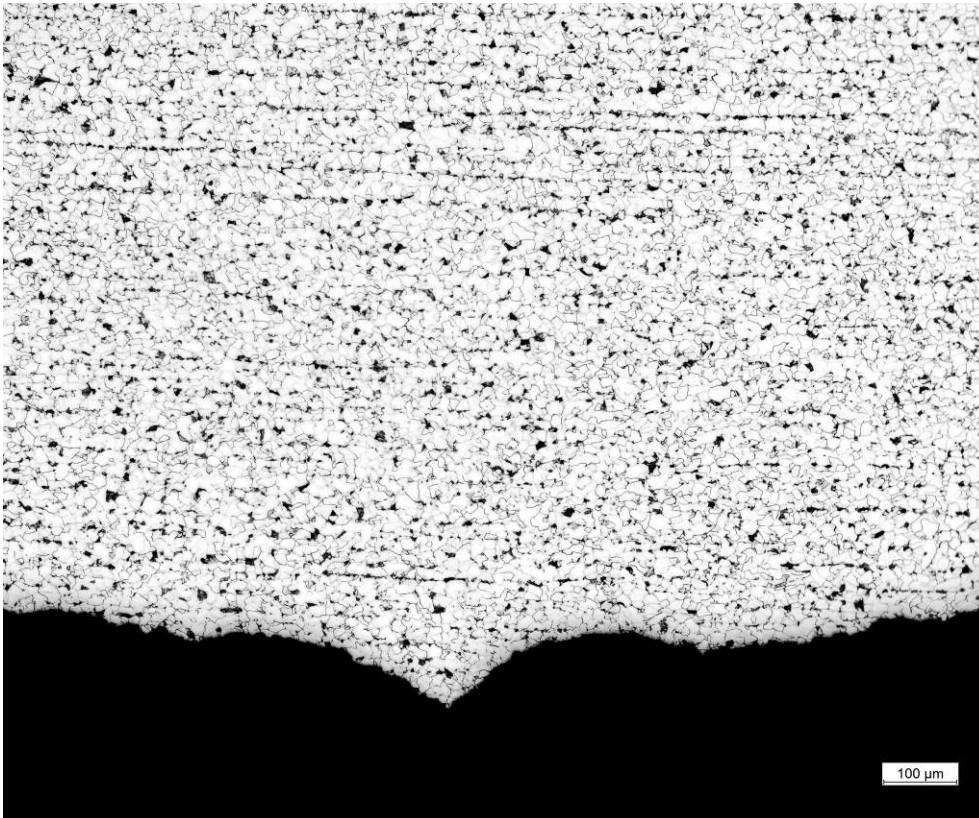
Kuva 88. Oulu 1, jättopäädyn sisäpinnan oksidikerroksen koostumus (paino-%)

Oulu 4 sulakourun pohjalta tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä havaittiin paikoitellen sulajäämiä. Vesikierron puoleisella pinnalla (sisäpinta) ei havaittu merkittävää oksidikerrosta. Pinnoite-perusainerajapinnalla havaittiin noin 120 µm paksu hiilenkatokerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 89 - Kuva 92).



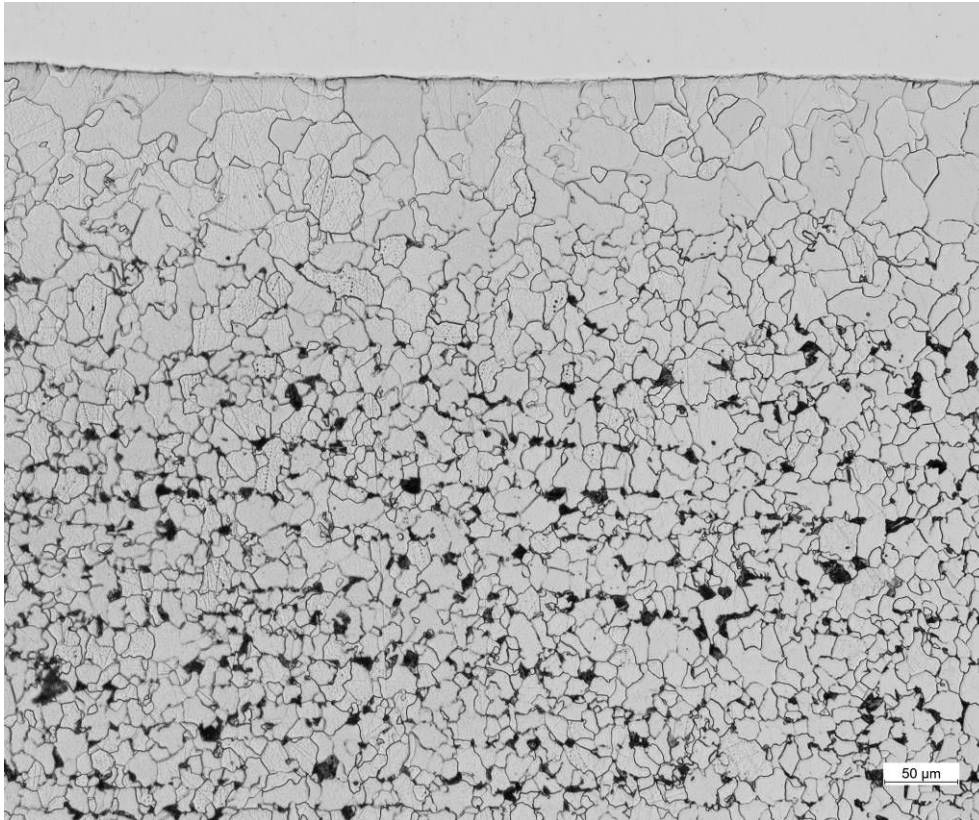


*Kuva 89. Oulu 4, kourun pohjan poikkileikkaus, sisäpinta alhaalla*

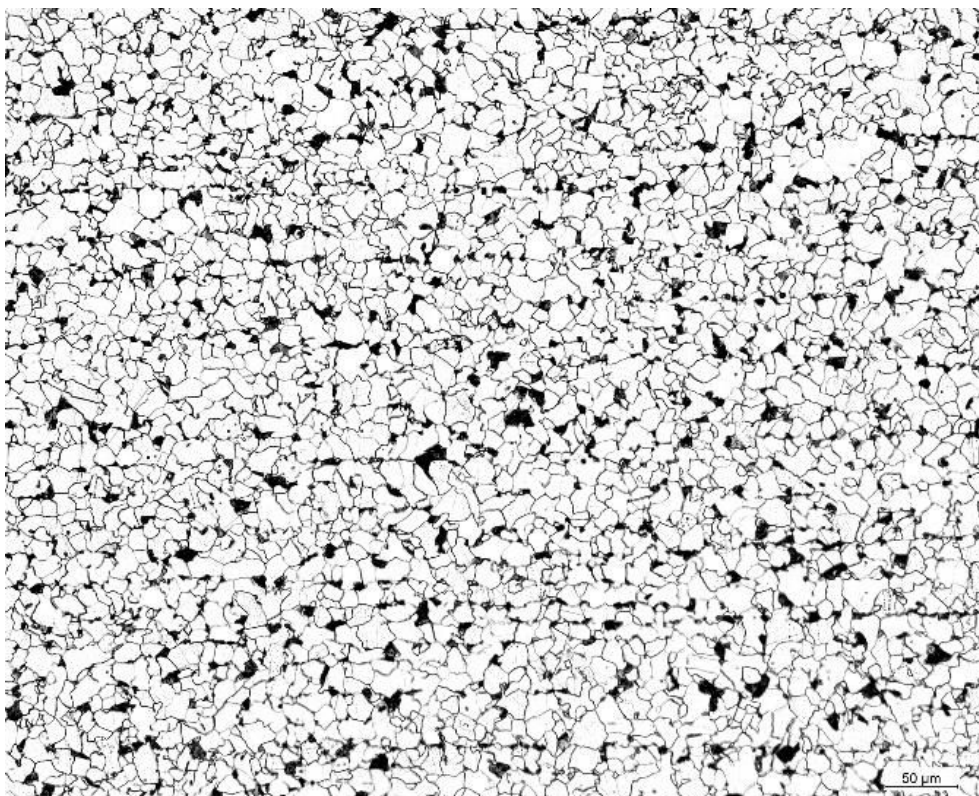


*Kuva 90. Oulu 4, sisäpinta (vesipiirin puoleinen pinta) kourun pohjalla*





*Kuva 91. Oulu 4, pinnoite-perusainerajapinta kourun pohjalla*

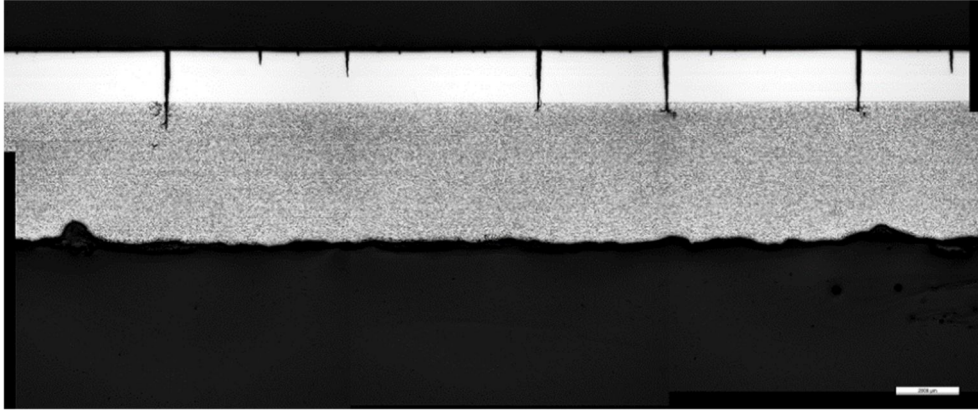


*Kuva 92. Oulu 4, perusaineen mikrorakenne kourun pohjalla*

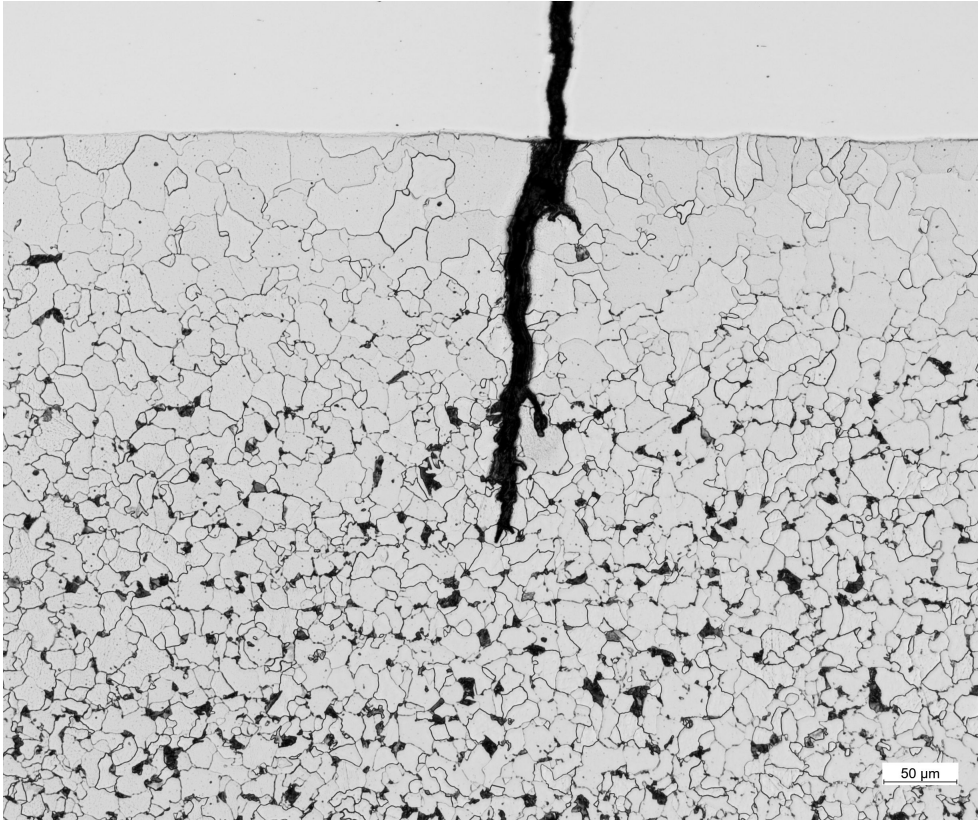
Oulu 4 sulakourun seinämältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin useita säröjä, joista pisimmät ulottuivat pinnoitteen läpi perusaineeseen. Syvimpien, perusaineeseen ulottuvien säröjen syvyys oli yli 2100 µm. Pisimmissä säröissä oli havaittavissa sivusäröjä ja oksidi/korroosiotuote perusaineen puolella. Kourun sisäpinnalla oli yhtenäinen noin 120 µm



paksu oksidi kerros, minkä lisäksi paikoitellen oli jopa noin 350  $\mu\text{m}$  syviä korroosiokuoppia. Pinnoite-perusaine rajapinnassa havaittiin noin 120  $\mu\text{m}$  paksu hiilenkatokerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 93 - Kuva 96).

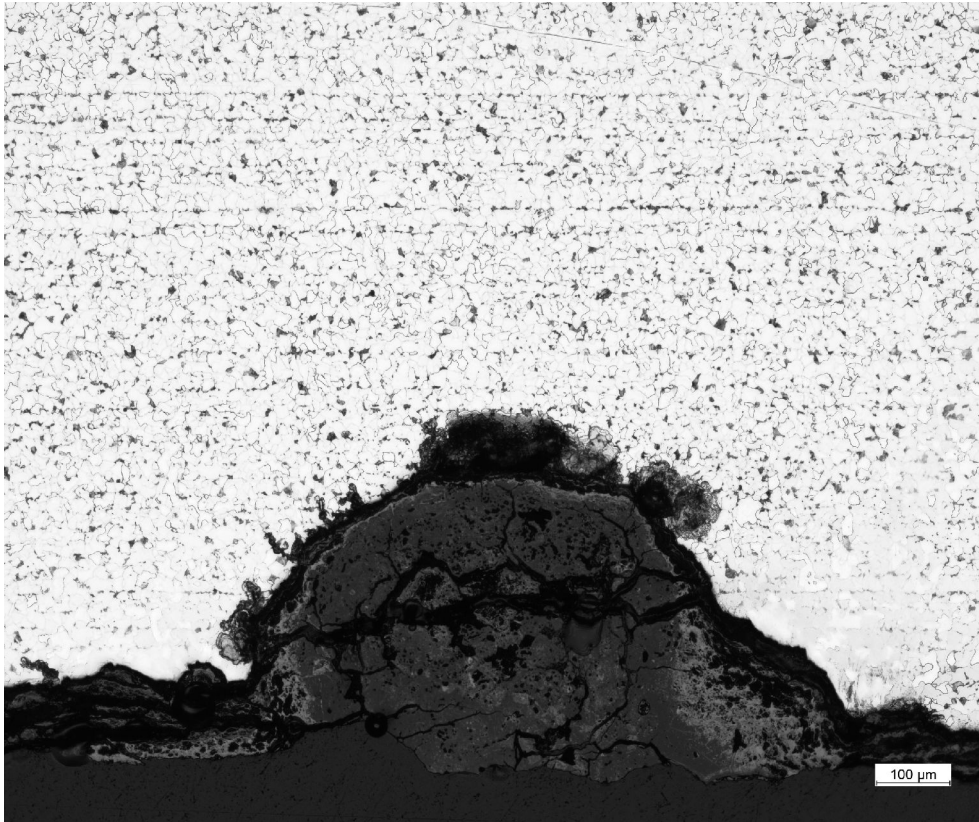


Kuva 93. Oulu 4, seinämän poikkileikkaus. Sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla

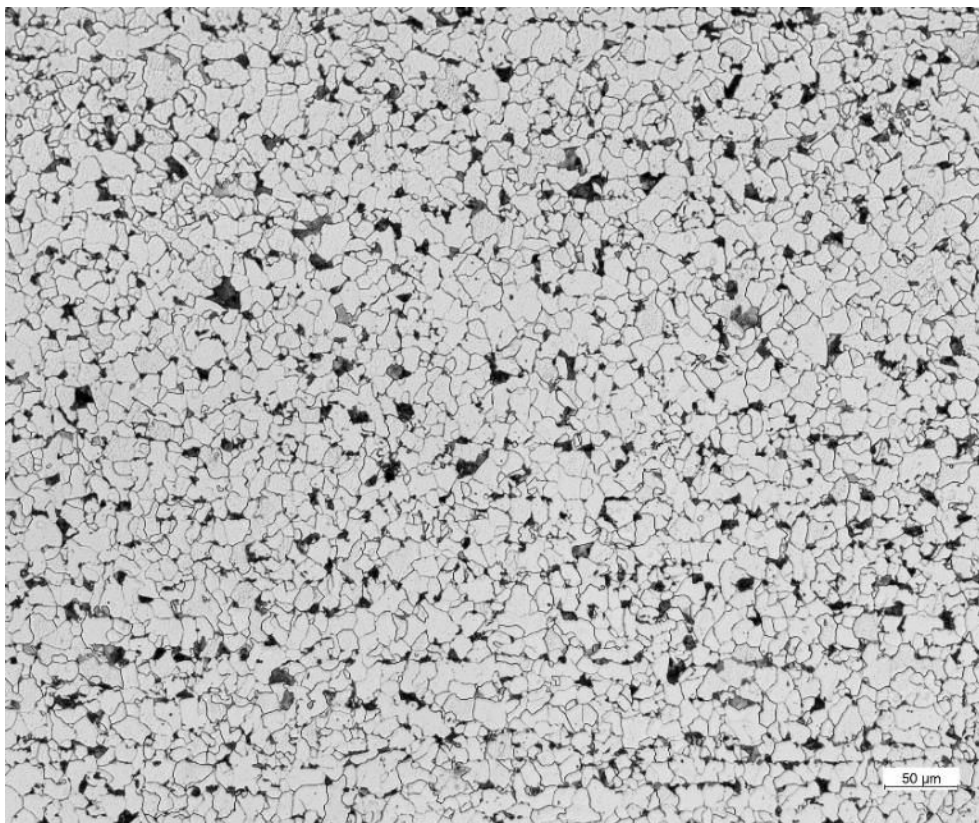


Kuva 94. Oulu 4, särön eteneminen perusaineeseen





*Kuva 95. Oulu 4, sisäpinta kourun seinämällä (syövyte tulvii, otetaan uusi kuva)*



*Kuva 96. Oulu 4, perusaineen mikrorakenne kourun seinämällä*

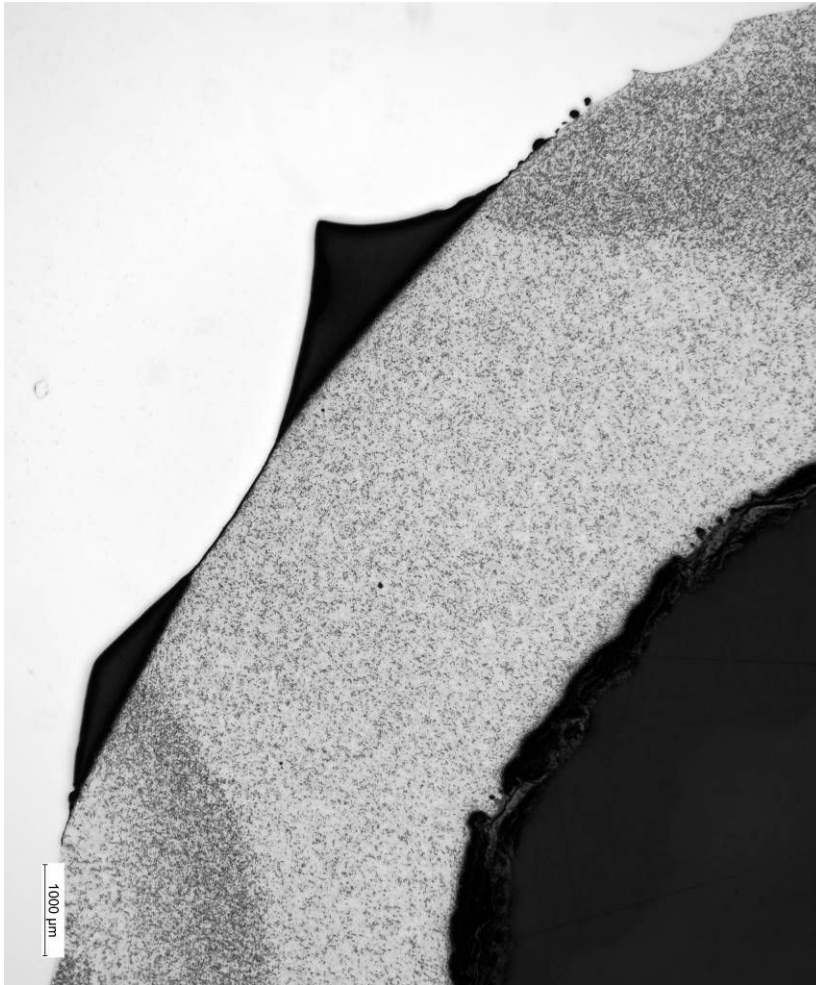
Oulu 4 kourun jättöpäädyssä ei havaittu syöpymäkuoppia. Pinnoitteen ja perusaineen välillä havaittiin jyrkimmän taitteen kohdalla valmistuksen aikaista liitoksen puutetta. Pinnoitteen puolella ei havaittu ollenkaan oksidia/kerrostumaa ja kourun vesipiirin puolella (sisäpinnalla)

havaittiin paikoitelle jopa noin 430  $\mu\text{m}$  paksu oksidi, joka sisälsi teräkselle tyypillisten hapettumistuotteiden lisäksi pieniä määriä rikkiä ja klooria. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 97 - Kuva 100).

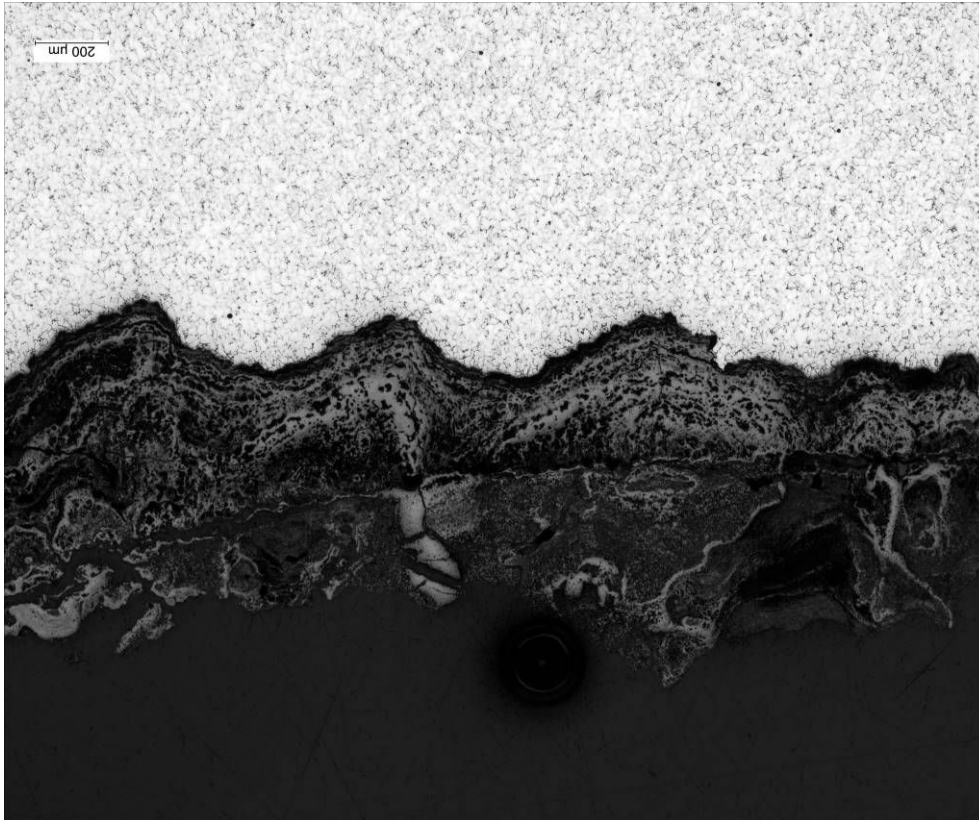


Kuva 97. Oulu 4, jättöpäädyn poikkileikkaus

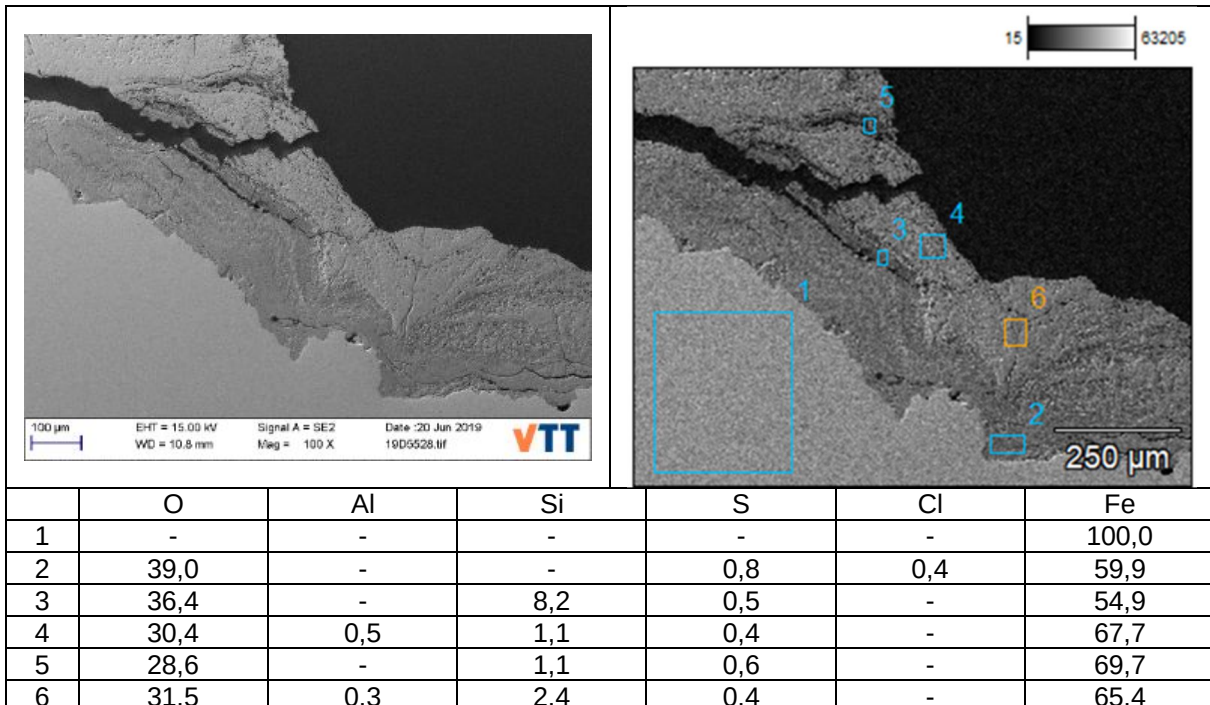




Kuva 98. Yksityiskohta Kuva 97



Kuva 99. Oulu 4, sisäpinnan oksidi, jättöpäädyn kohdalla



Kuva 100. Oulu 4, jättöpäädyn sisäpinnan oksidikerroksen koostumus (paino-%)

### 3.8 Pietarsaari

Tutkimuksiin toimitettiin kaksi käytössä ollutta kourua (Pietarsaari X ja Pietarsaari Y) ja yksi uusi kouru (Kuva 101, Kuva 102 ja Kuva 103). Näistä Pietarsaari X, ja uusi kouru olivat compound rakenteisia, ja Pietarsaari Y laserpinnoitettu. Kourujen vaihtoväli on 1,5 vuotta.



Aikaisemman käytön aikana kourujen suuaukko oli syöpynyt kaksi kertaa peräkkäin seisokin välissä. Syöpymien syyksi löydettiin liuottajan liian korkea pinta, jonka vuoksi kourujen pääty pinnoitettiin. Alun kahden vuoden ajoajasta huolimatta, 14 vuoden aikana ongelmia on ollut kaksi kertaa. Visuaalisessa tarkastuksessa käytössä olleessa kourussa Pietarsaari X havaittiin runsaasti säröjä kourun seinämillä, kourussa Pietarsaari Y havaittiin vain pieniä säröjä satunnaisemmin.



Kuva 101. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Pietarsaari X)



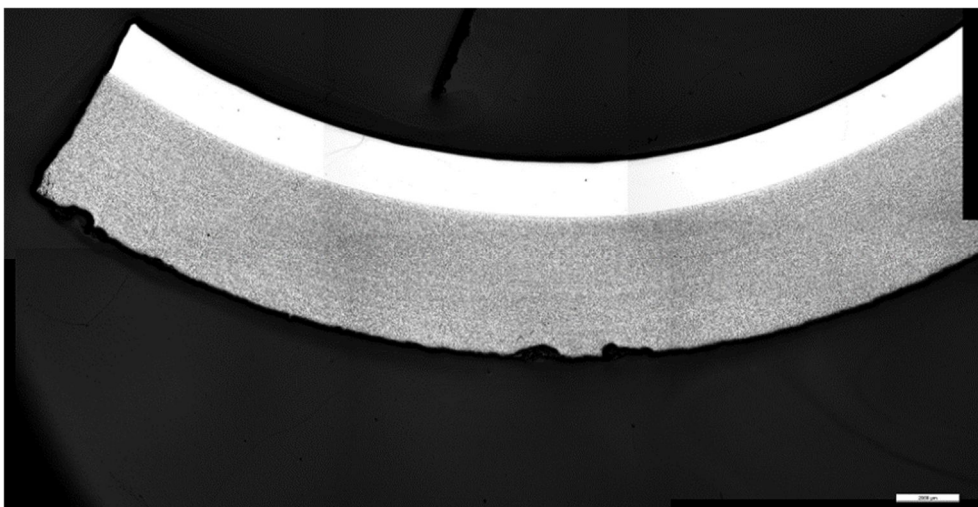
Kuva 102. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Pietarsaari Y)



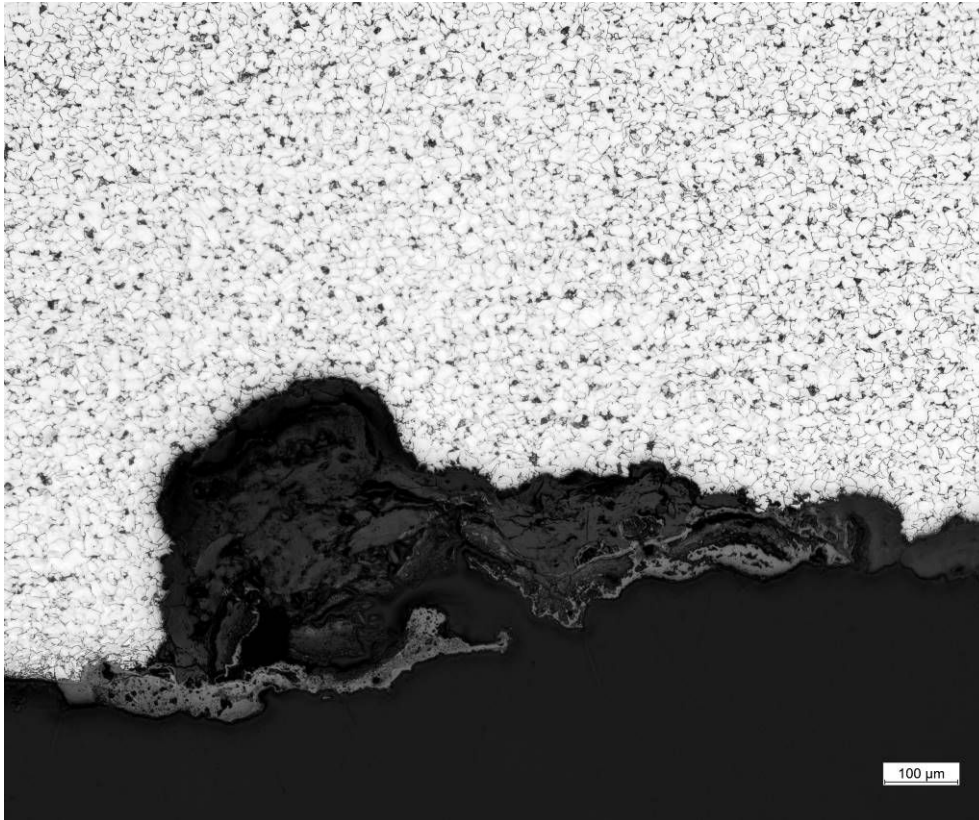


Kuva 103. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Pietarsaari uusi)

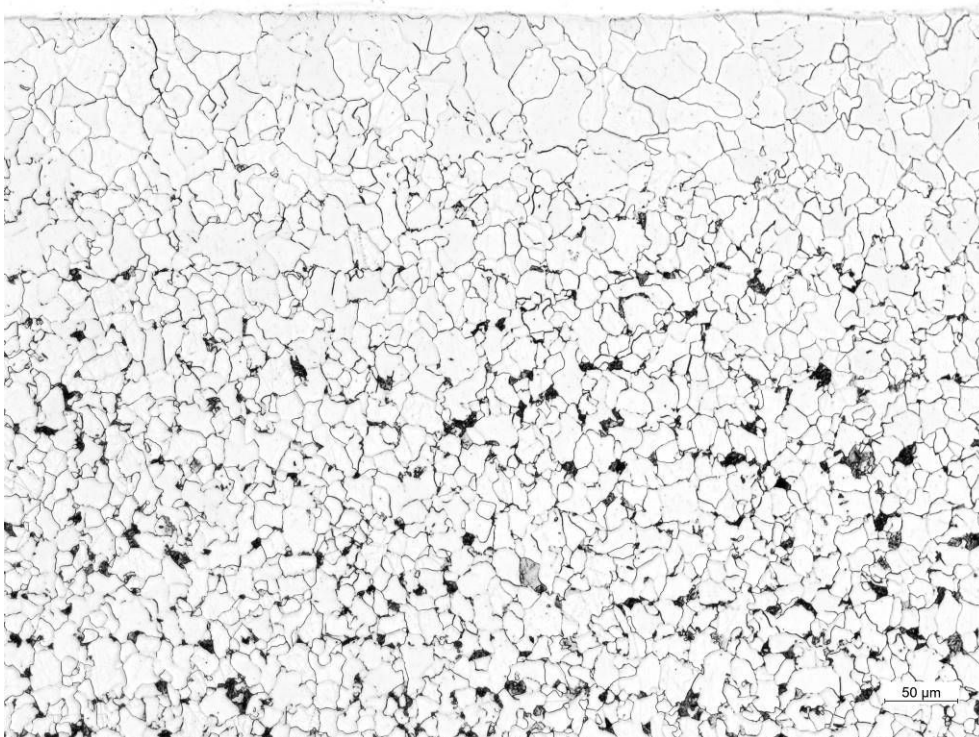
Pietarsaari X sulakourun pohjalta tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä havaittiin paikoitellen sulajäämiä. Vesikierron puoleisella pinnalla (sisäpinta) havaittiin yhtenäinen noin 40  $\mu\text{m}$  paksu oksidikerros sekä noin 220  $\mu\text{m}$  syviä syöpymäkuoppia. Pinnoite-perusainerajapinnalla havaittiin noin 95  $\mu\text{m}$  paksu hiilenkatokerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 104- Kuva 107).



Kuva 104. Pietarsaari X, kourun pohjan poikkileikkaus

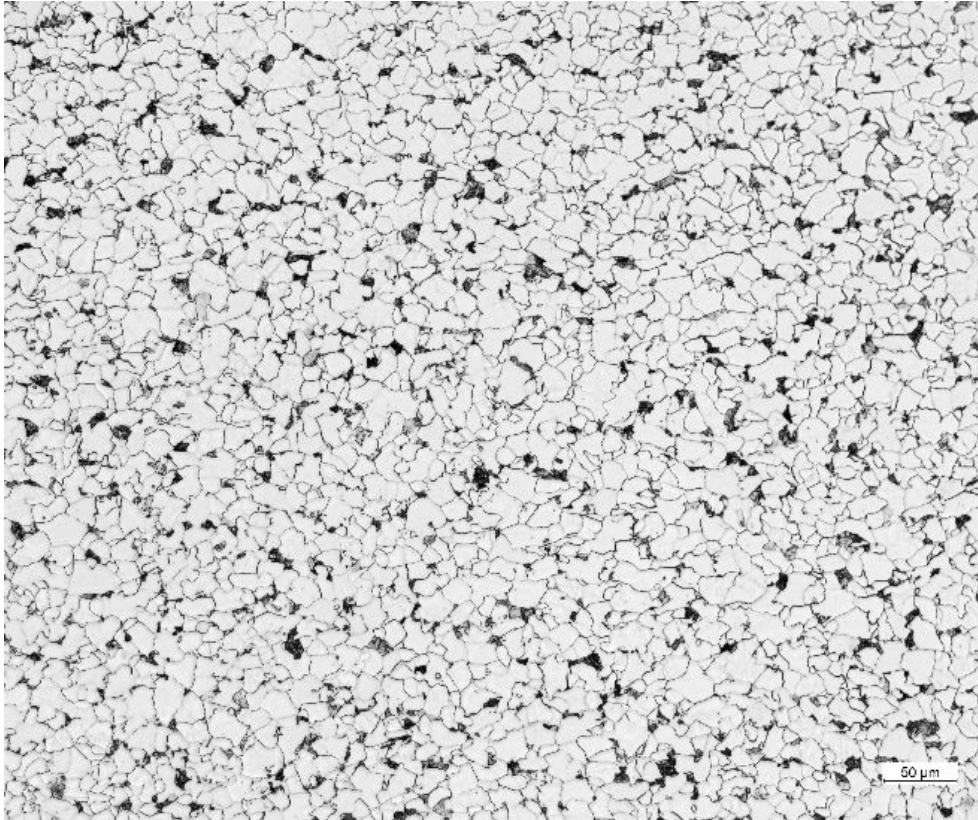


*Kuva 105. Pietarsaari X, sisäpinta (vesipiirin puoleinen pinta) kourun pohjalla*



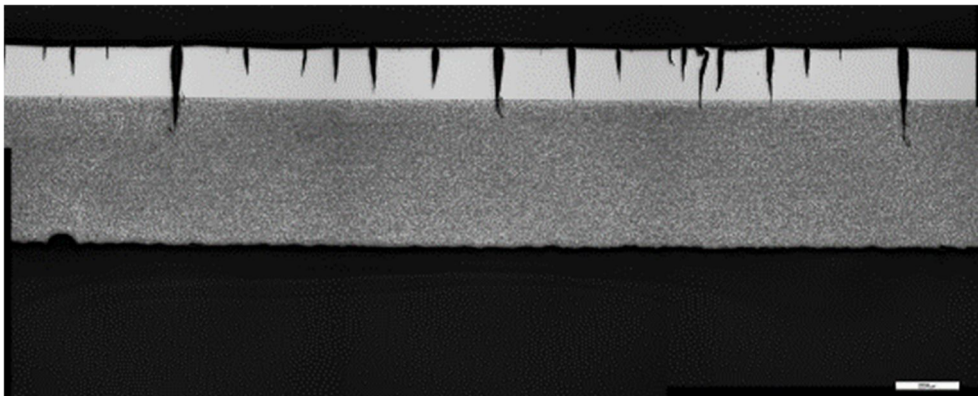
*Kuva 106. Pietarsaari X, pinnoite-perusainerajapinta kourun pohjalta*



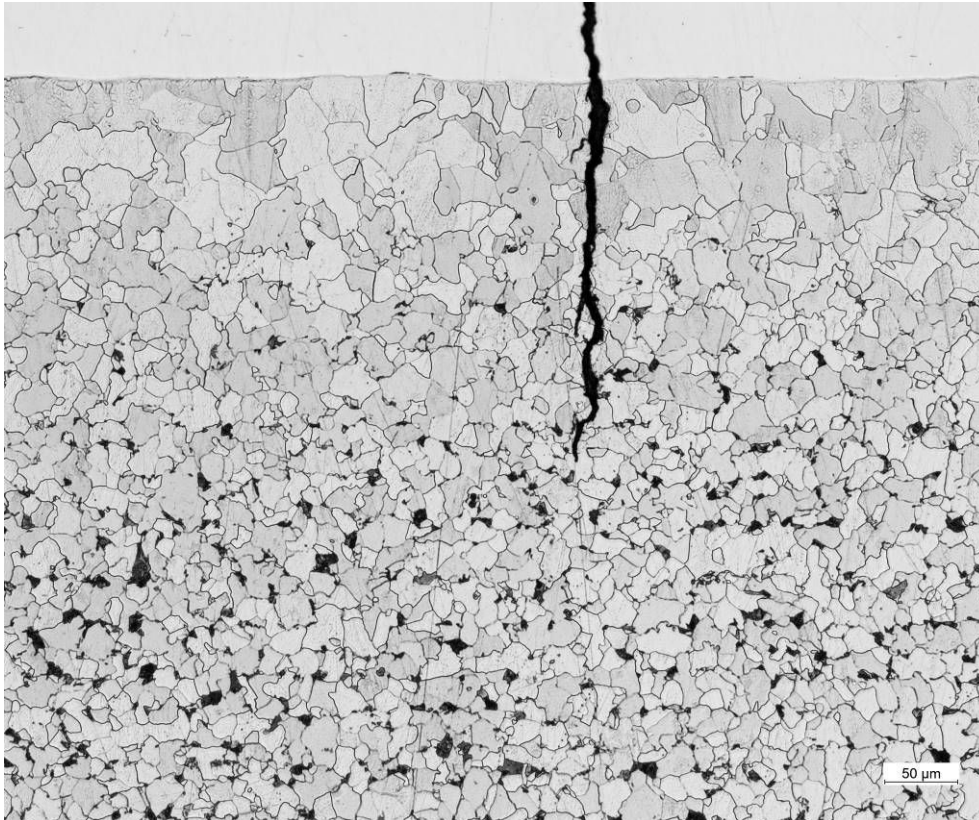


Kuva 107. Pietarsaari X, mikrorakenne kourun pohjalta

Pietarsaari X sulakourun seinämältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin useita säröjä, joista pisimmät ulottuivat pinnoitteen läpi perusaineeseen. Syvimpien, perusaineeseen ulottuvien säröjen syvyys oli yli 3000  $\mu\text{m}$ . Osassa pisimmissä säröissä oli havaittavissa sivusäröjä, ja osassa perusaine oli alkanut syöpyä pinnoitteen. Kourun sisäpinnalla ei havaittu yhtenäistä oksidikerrosta, mutta paikallisia oksidi saarekkeitä ja noin 60  $\mu\text{m}$  syviä korroosiokuoppia. Pinnoite-perusainerajapinnassa havaittiin noin 110  $\mu\text{m}$  paksu hiilenkatokerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 108 - Kuva 112).



Kuva 108. Pietarsaari X, kourun seinämän poikkileikkaus

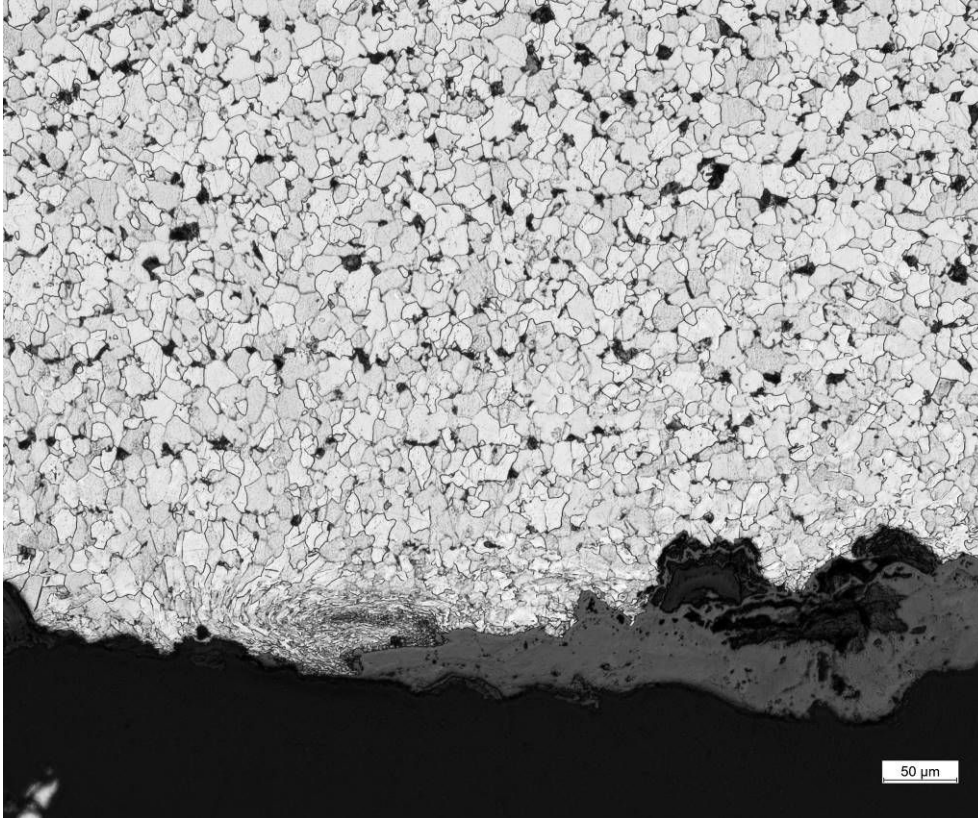


Kuva 109. Pietarsaari X, särön eteneminen perusaineessa kourun seinämällä

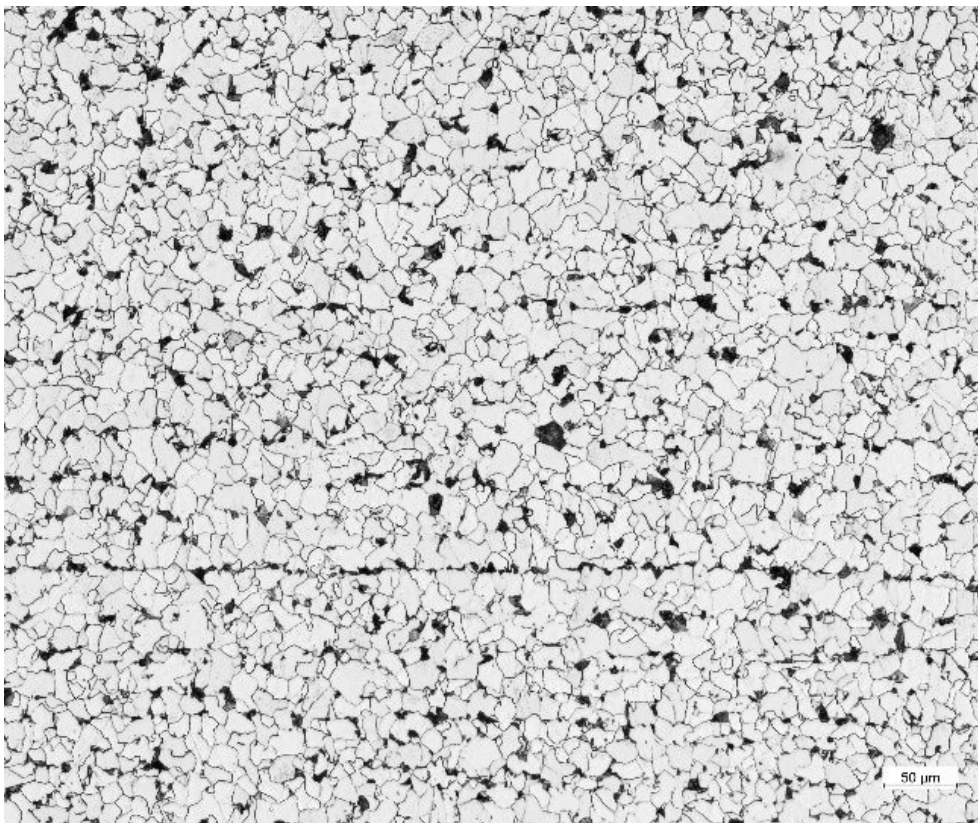


Kuva 110. Pietarsaari X, särön eteneminen perusaineessa kourun seinämällä





*Kuva 111. Pietarsaari X, sisäpinnan oksidikerros kourun seinämällä*

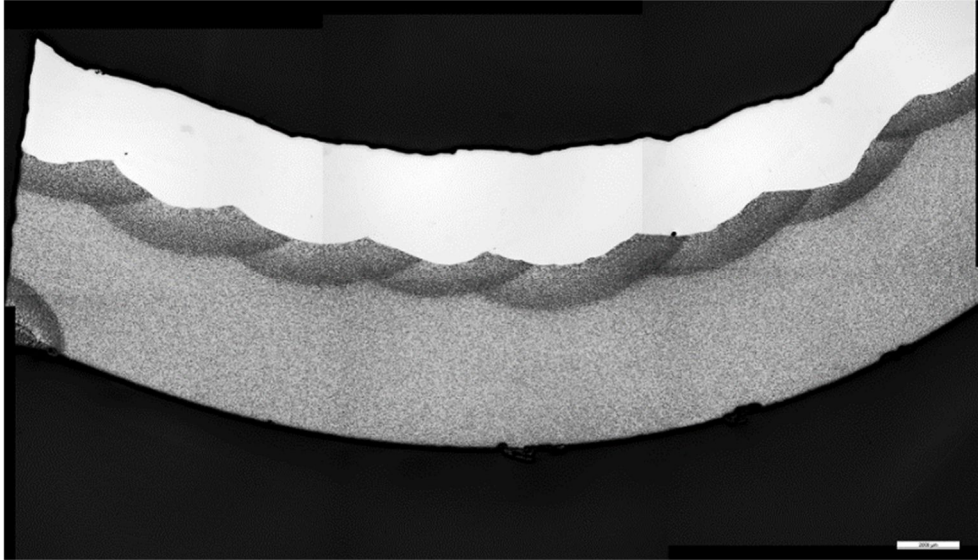


*Kuva 112. Pietarsaari X, perusaineen mikrorakenne kourun seinämällä*

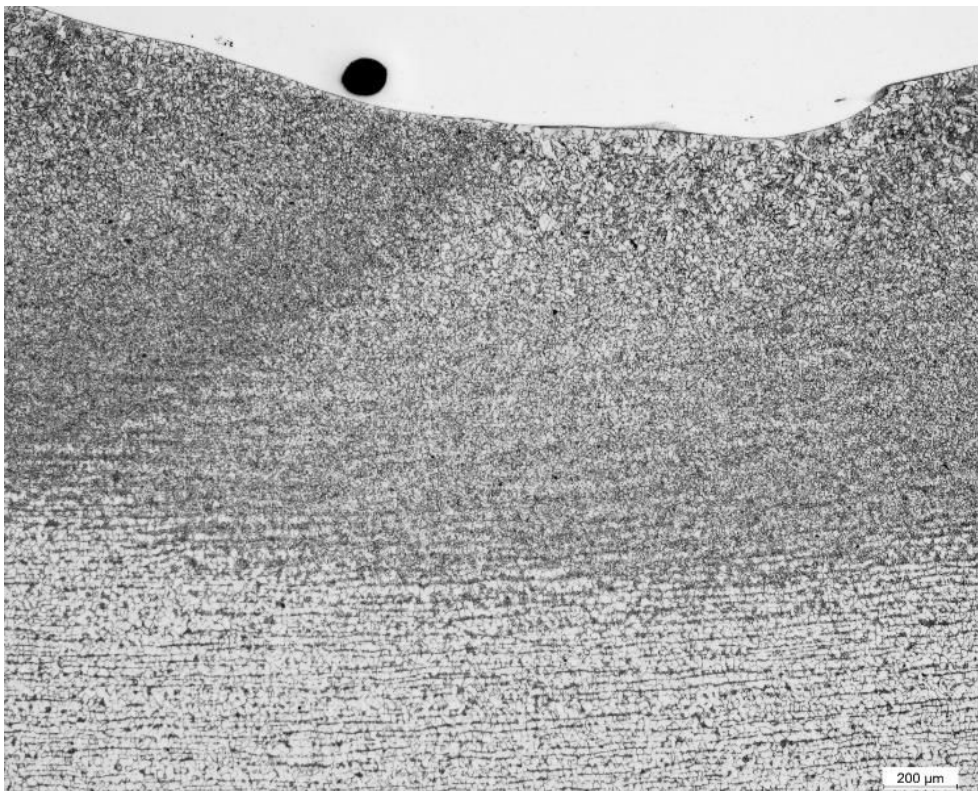
Pietarsaari Y sulakourun pohjalta tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä havaittiin paikoitellen sulajäämiä. Vesikierron puoleisella pinnalla



(sisäpinta) havaittiin yhtenäinen alle 20 µm paksu oksidikerros sekä paikoitellen noin 200 µm syviä syöpymäkuoppia. Pinnoitteen aiheuttama muutosvyöhyke oli noin 900 µm paksu ja sen jälkeen kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 113-Kuva 117).

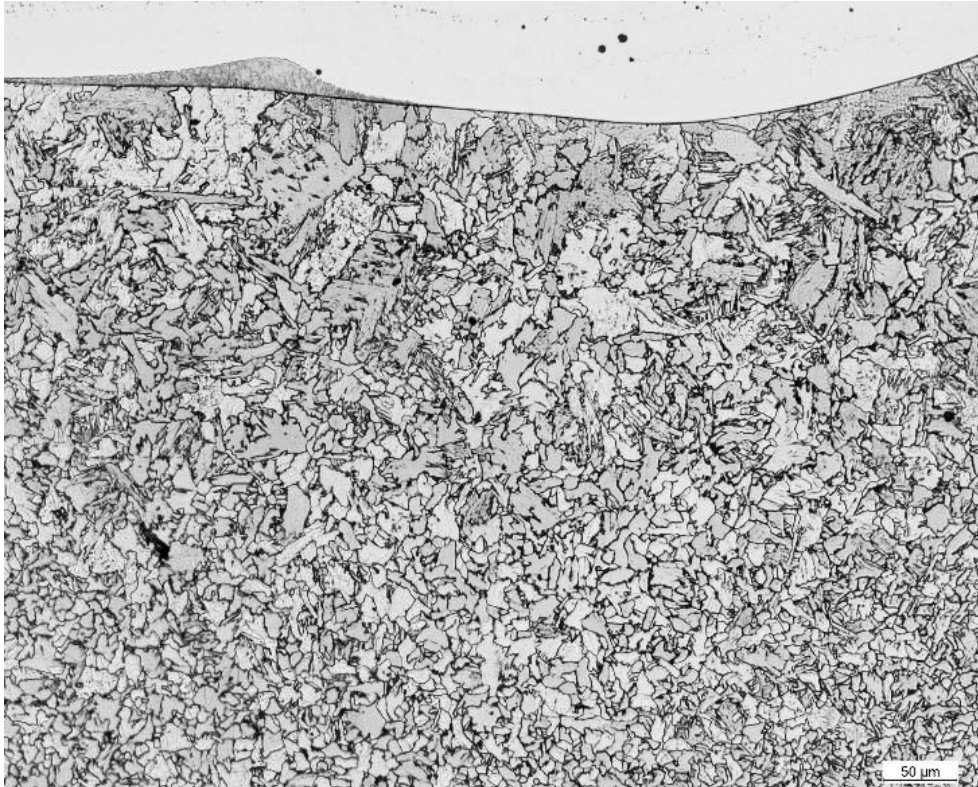


Kuva 113. Pietarsaari Y, kourun pohjan poikkileikkaus. Sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla

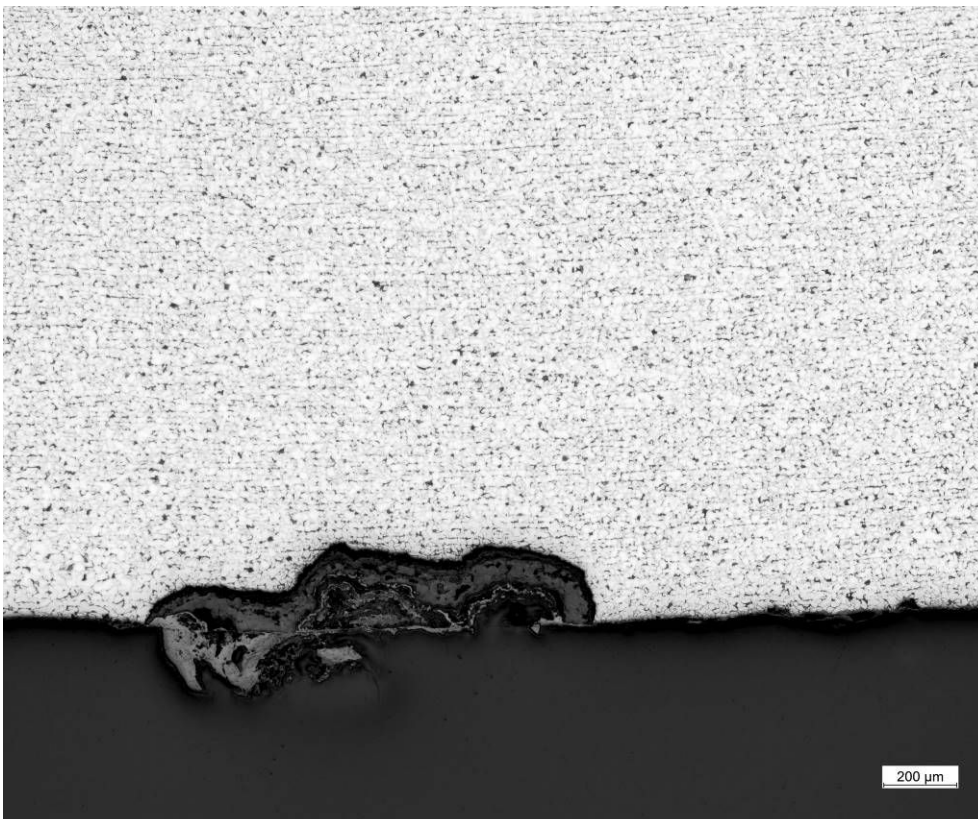


Kuva 114. Pietarsaari Y, muutosvyöhyke





Kuva 115. Pietarsaari Y muutosvyöhyke



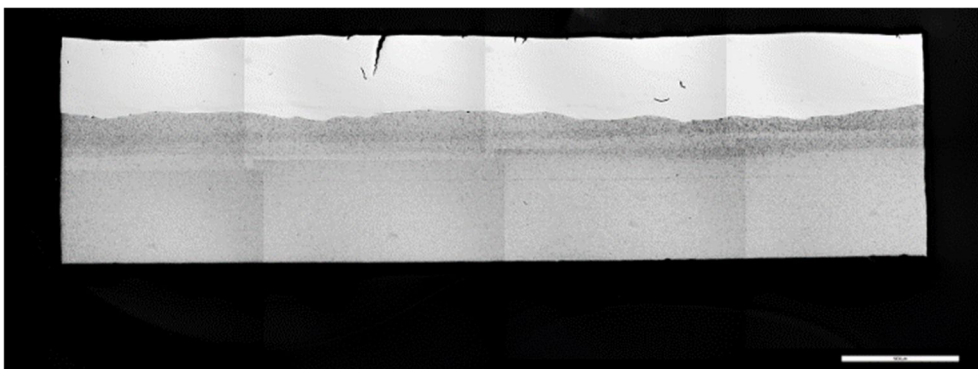
Kuva 116. Pietarsaari Y, sisäpinnan oksidi kourun pohjan kohdalta





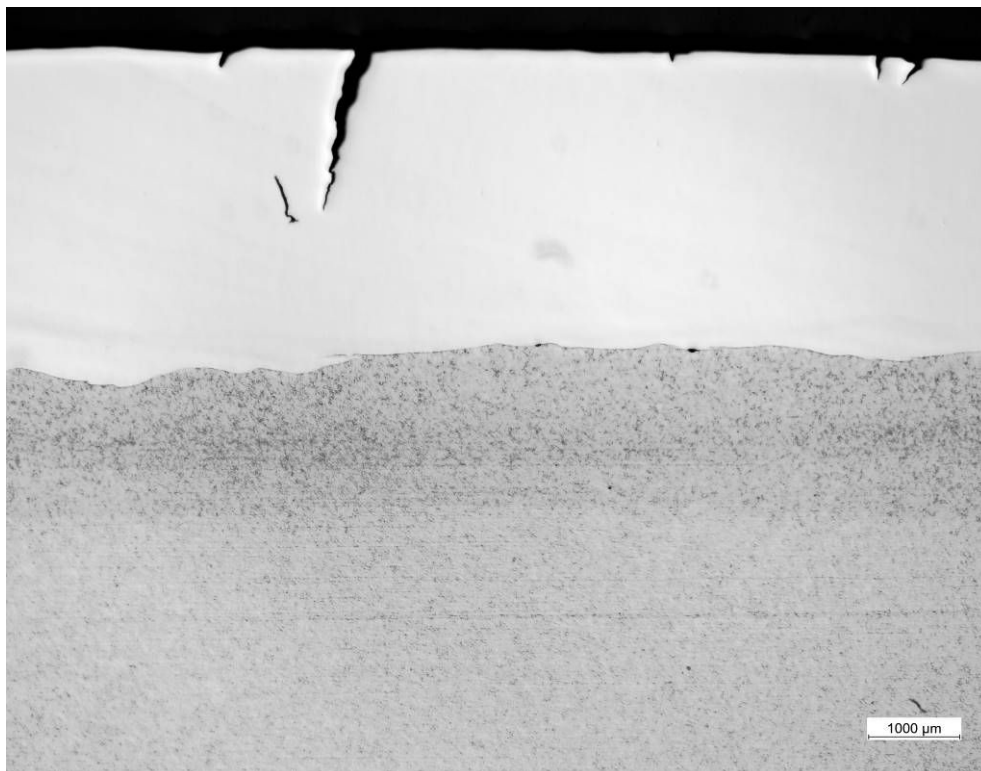
*Kuva 117. Pietarsaari Y, perusaineen mikrorakenne kourun pohjalta (pitää ottaa uusi kuva, tämä osittain muutosvyöhykkeeltä)*

Pietarsaari Y sulakourun seinämältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin satunnaisia säröjä, jotka eivät ulottuneet perusaineeseen. Useimmat säröistä olivat lyhyitä noin 150  $\mu\text{m}$ , ja yksi pidempi noin 1,8 mm. Osassa pisimmissä säröissä oli havaittavissa sivusäröjä, ja osassa perusaine oli alkanut syöpyä pinnoitteen. Kourun sisäpinnalla oli alle 20  $\mu\text{m}$  paksu yhtenäinen oksidikerros, jonka lisäksi havaittiin hieman paksumpia oksidisaarekkeita ja noin 40 - 60  $\mu\text{m}$  syviä korroosiokuoppia. Muutosvyöhykkeen paksuus vaihteli myös seinämällä noin 900 - 1050  $\mu\text{m}$  välillä. Kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 118 - Kuva 122).

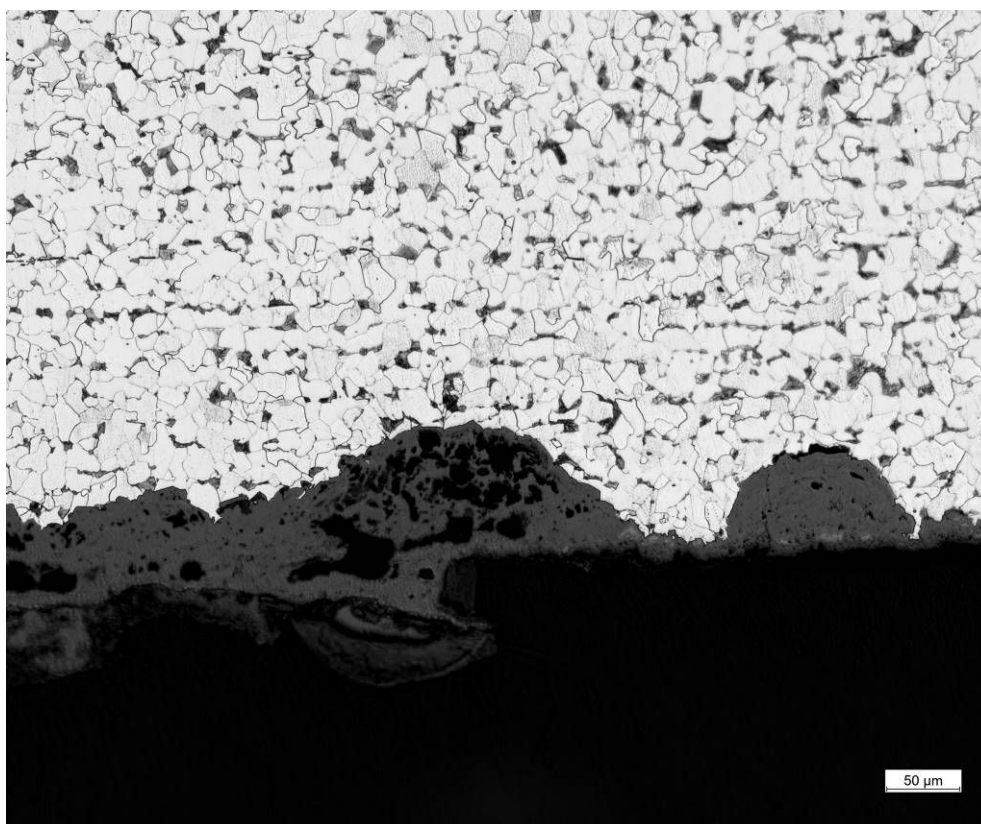


*Kuva 118. Pietarsaari Y, poikkileikkaus kourun seinämältä. Sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla*

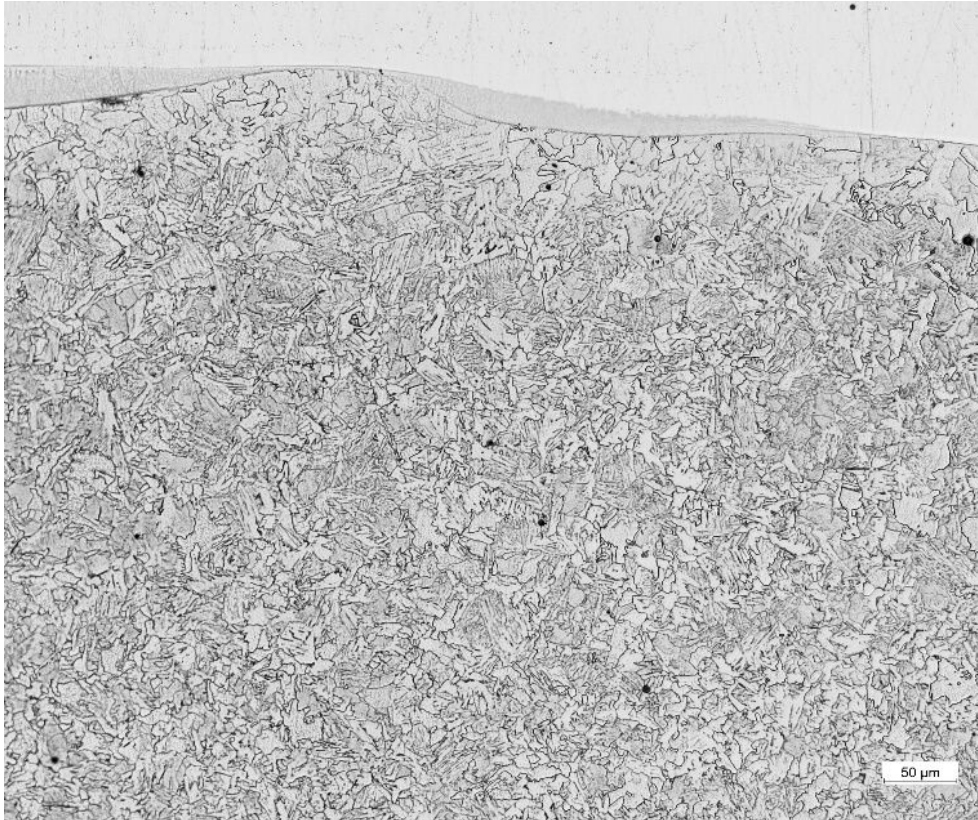




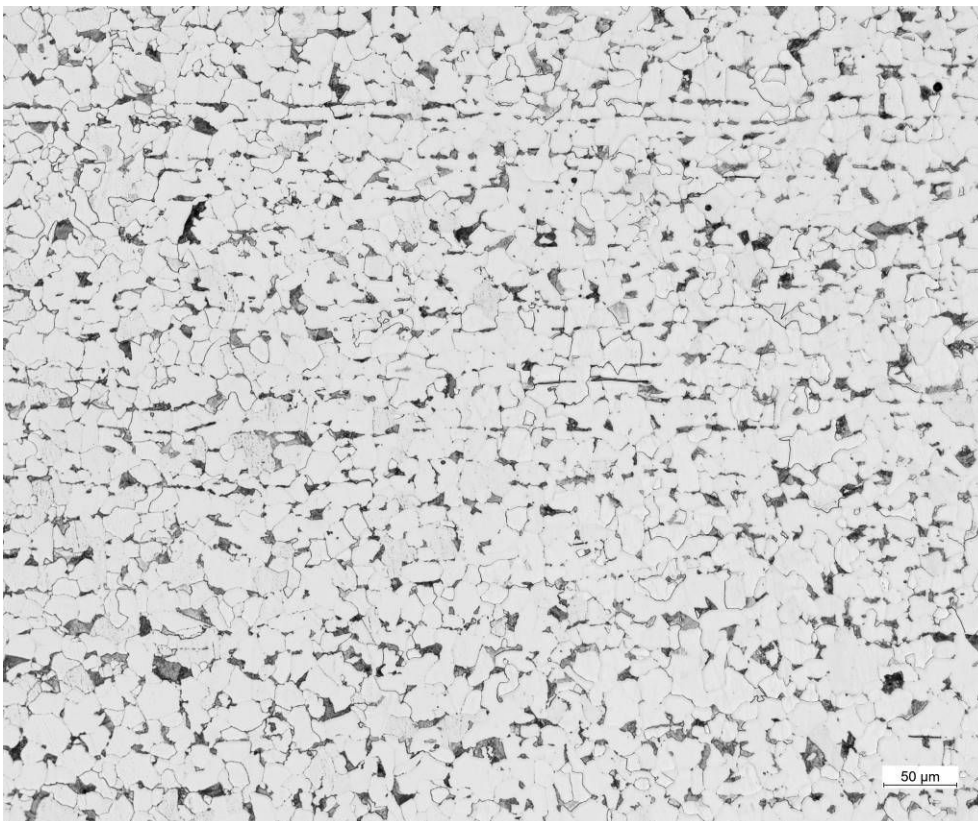
*Kuva 119. Pietarsaari Y, särön kasvua pinnoitteessa kourun seinämällä*



*Kuva 120. Pietarsaari Y, sisäpinnan oksidi kourun seinämällä*



Kuva 121. Pietarsaari Y, muutosvyöhyke kourun seinämällä

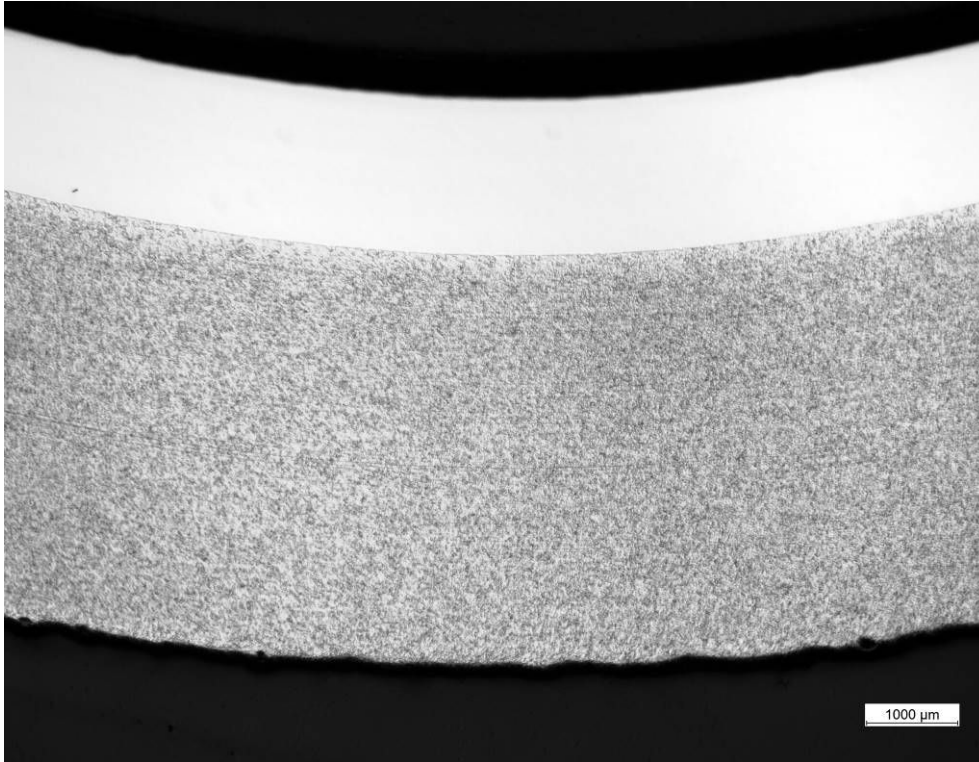


Kuva 122. Pietarsaari Y, perusaineen mikrorakenne kourun seinämällä

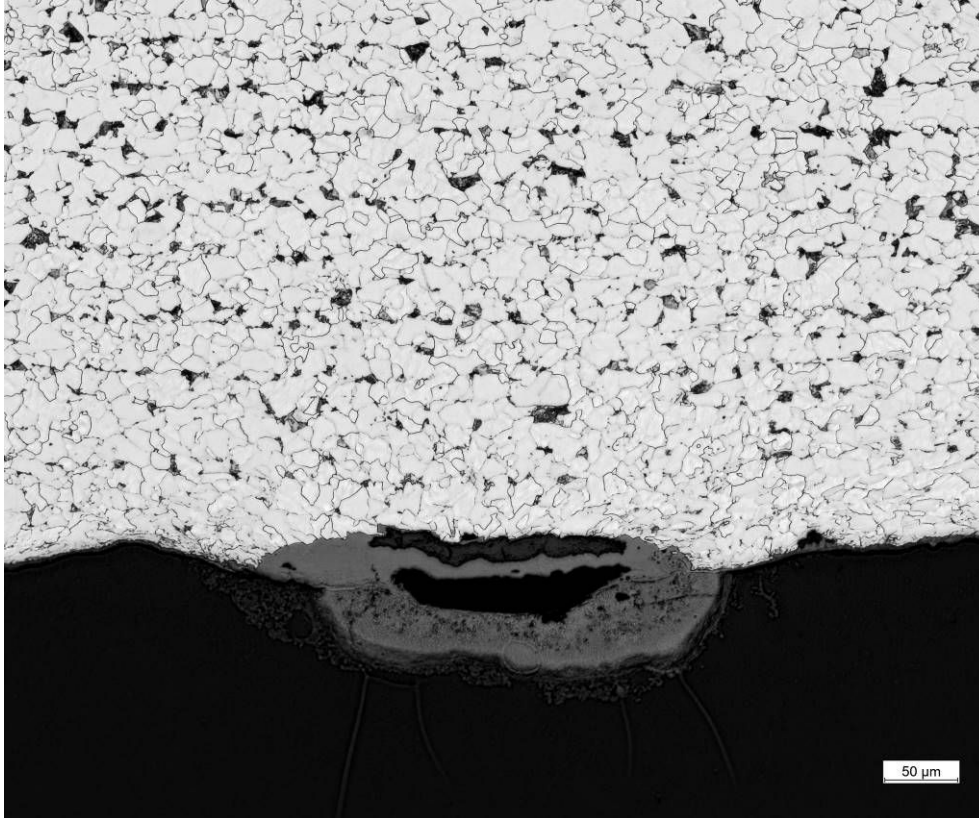
Pietarsaaren uuden sulakourun pohjalta tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä havaittiin paikoitellen sulajäämiä. Vesikierron puoleisella pinnalla



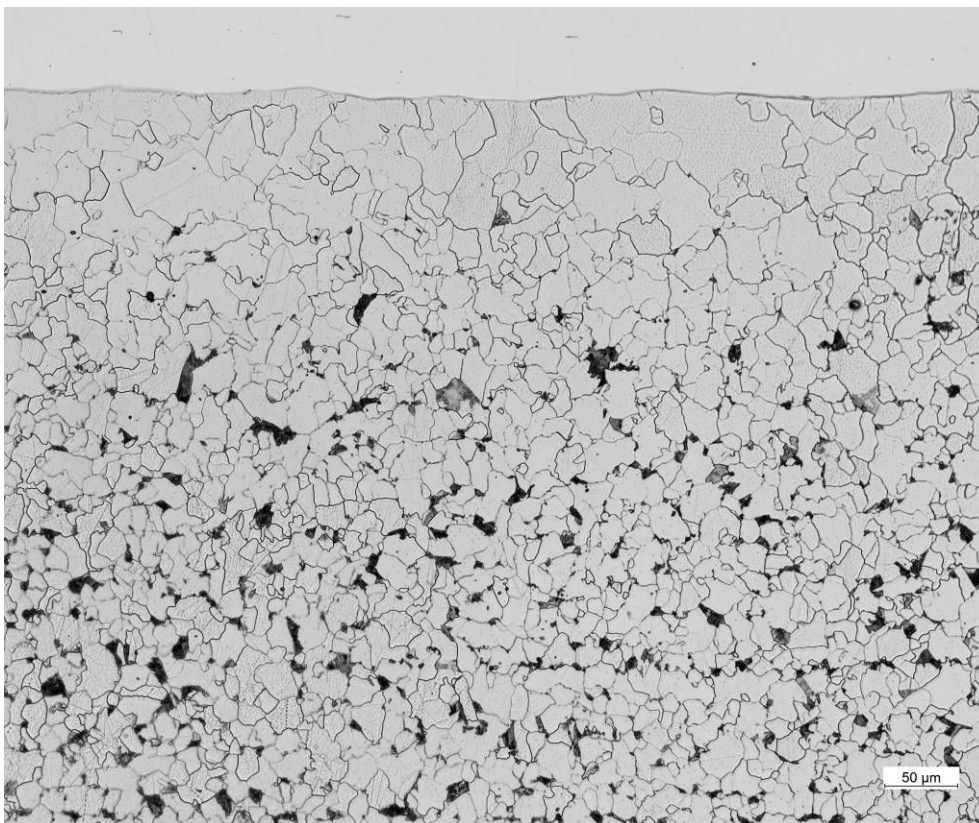
(sisäpinta) havaittiin yksittäisiä noin 50  $\mu\text{m}$  paksuja oksidisaarekkeitä. Pinnoite-perusainerajapinta yli tiivis ja yhtenäinen, ja perusaineen puolella havaittiin tyypillinen noin 95  $\mu\text{m}$  paksu hiilenkatokerros. Kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen (Kuva 123 - Kuva 126).



*Kuva 123. Pietarsaaren uuden sulakourun poikkileikkaus. Sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla*

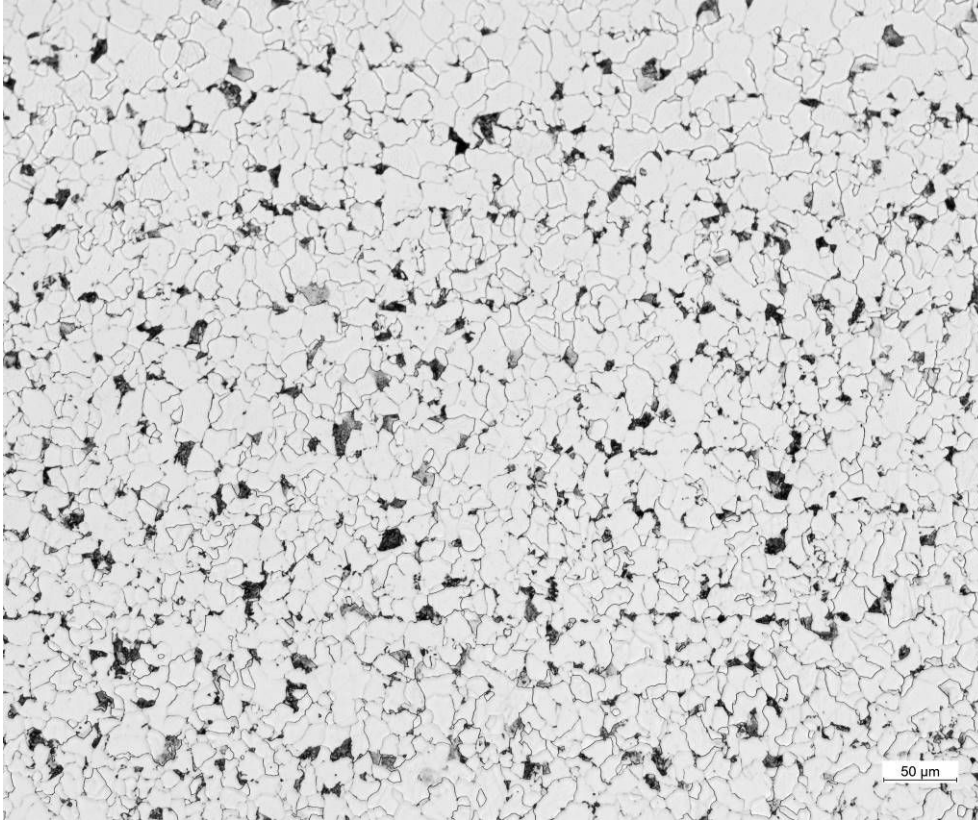


*Kuva 124. Pietarsaaren uuden sulakourun sisäpinta pohjalta*



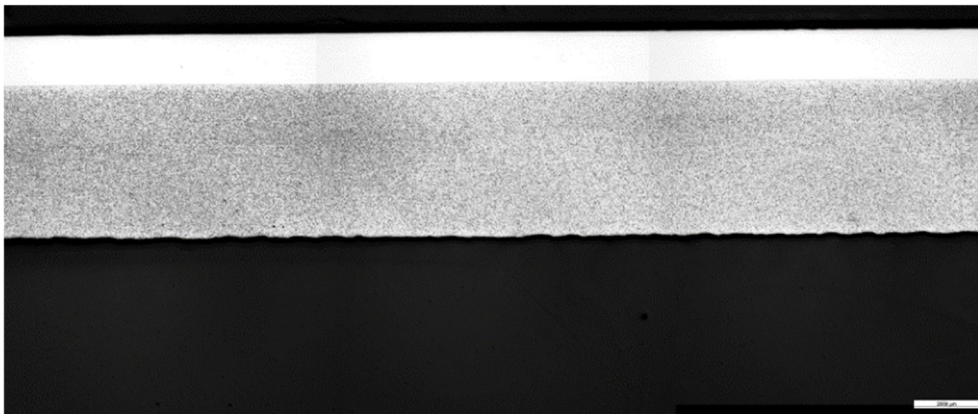
*Kuva 125. Pietarsaaren uuden sulakourun pinnoite-perusaineenrajapinta kourun pohjalta*



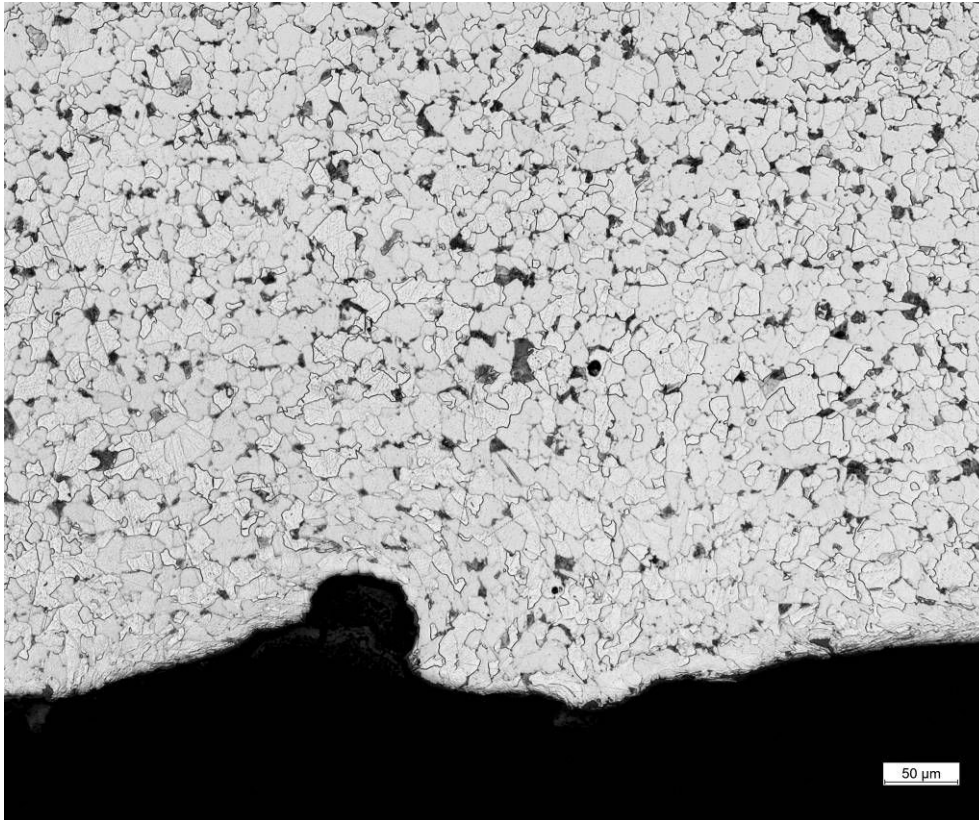


*Kuva 126. Pietarsaaren uuden kourun perusaineen mikrorakenne kourun pohjalla*

Pietarsaaren uuden sulakourun seinämältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin tiivis pinnoite, joka oli hyvin kiinnittynyt perusaineeseen poikkileikkauksen kohdalta. Kourun sisäpinnalla ei havaittu yhtenäistä oksidikerrosta, ainoastaan pientä valmistuksen aiheuttamaa epätasaisuutta. Pinnoite-perusainerajapinnassa havaittiin noin 110 µm paksu hiilenkatokerros. Kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen (Kuva 127 - Kuva 130).



*Kuva 127. Pietarsaaren uuden sulakourun poikkileikkaus seinämältä*

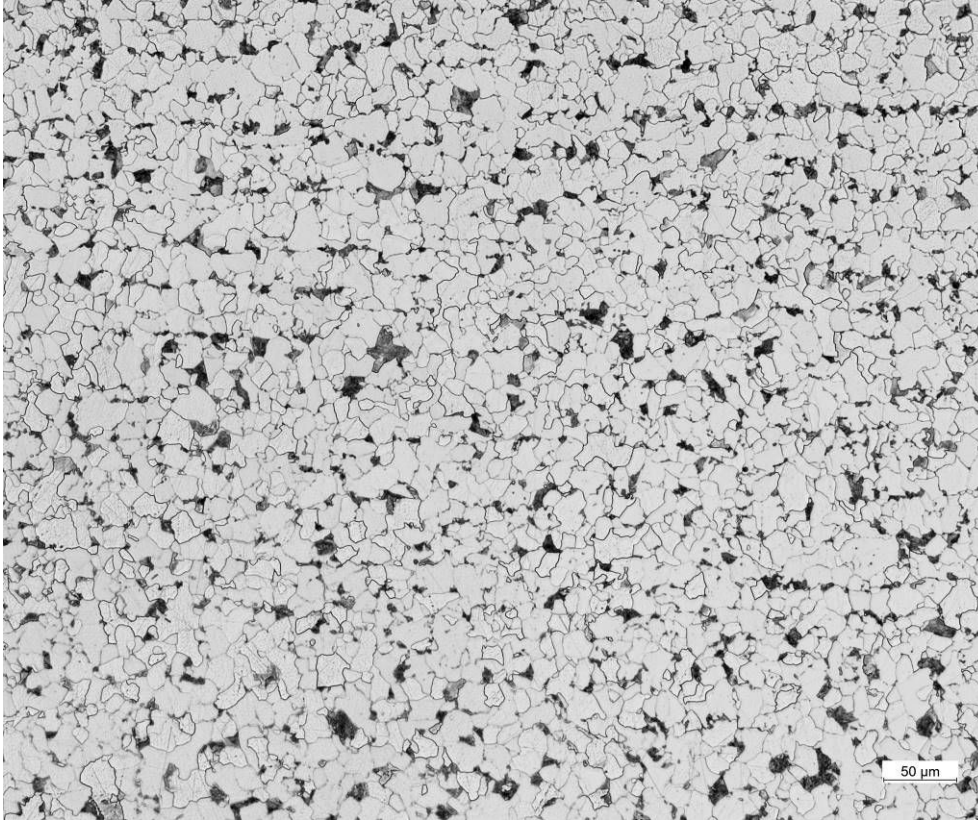


*Kuva 128. Pietarsaaren uuden sulakourun sisäpinta (vesikierron puoleisella pinta)*



*Kuva 129. Pietarsaaren uuden kourun pinnoite-perusainerajapinta kourun seinämältä*





*Kuva 130. Pietarsaaren uuden sulakourun perusaineen mikrorakenne kourun seinämältä*

### 3.9 Sunila

Sunilasta tutkimukseen toimitettiin kaksi kourua, SK10:stä ja SK11:sta, tästä eteenpäin Sunila SK10 ja Sunila SK11 (Kuva 131 ja Kuva 132). Visuaalisessa tarkastuksessa havaittiin syöpymiä Sunila SK11:n jättöpäässä.



Kuva 131. Tutkimukseen toimitettu kouru (Sunila SK10)





Kuva 132. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Sunila SK11)

### 3.10 Veitsiluoto

Veitsiluodosta tutkimuksiin toimitettiin kourut 1 ja 3, tästä eteenpäin Veitsiluoto 1 ja Veitsiluoto 3 (Kuva 133 ja Kuva 134). Visuaalisessa tarkastuksessa sulakourujen kouruosissa havaittiin säröjä.



Kuva 133. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Veitsiluoto 1)





Kuva 134. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Veitsiluoto 3)

### 3.11 Äänekoski

Äänekoskelta tutkimuksiin toimitettiin kourut 5, 6 ja 7, tästä lähtien Äänekoski 5, Äänekoski 6 ja Äänekoski 7 (Kuva 135, Kuva 136 ja Kuva 137). Sulakouruissa oli hitsauspinnoite jättöpäädyssä, mutta se puuttui kouruosalta. Kaikkien kourujen jättöpäädyssä havaittiin

syöpymiä. Tämän lisäksi tulpatussa kourussa Äänekoski 6, havaittiin säröjä kourun pohjalla lähellä jättöpäätä.



Kuva 135. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Äänekoski 5)





Kuva 136. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Äänekoski 6)



Kuva 137. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Äänekoski 7)



## 4. Johtopäätökset ja yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää soodakattiloiden sulakourujen turvallinen ajotavasta riippuva käyttöaika, sillä sulakourut eivät ole usealla laitoksella kestäneet suositeltua yhden vuoden ajojaksoa.

Tutkimuksessa tutkittiin visuaalisesti sulakouruja 11 eri laitokselta, joista Kaukopään, Kemin, Oulun ja Pietarsaaren kouruille tehtiin tarkempi metallurginen tutkimus. Tutkimuksissa tehtyjä havaintoja on tiivistetty Taulukossa 2.

Missään tutkimuksiin lähetetyssä sulakourussa ei havaittu suurempaa syöpymää tai säröilyä kourun suuaukon ympäristössä. Tämän lisäksi missään tarkemmin tutkituissa sulakouruissa ei havaittu mikrorakenteen hajaantumista, joka viittaisi siihen, että kourun materiaaliin olisi käytössä kohdistunut liian suuri lämpökuorma.

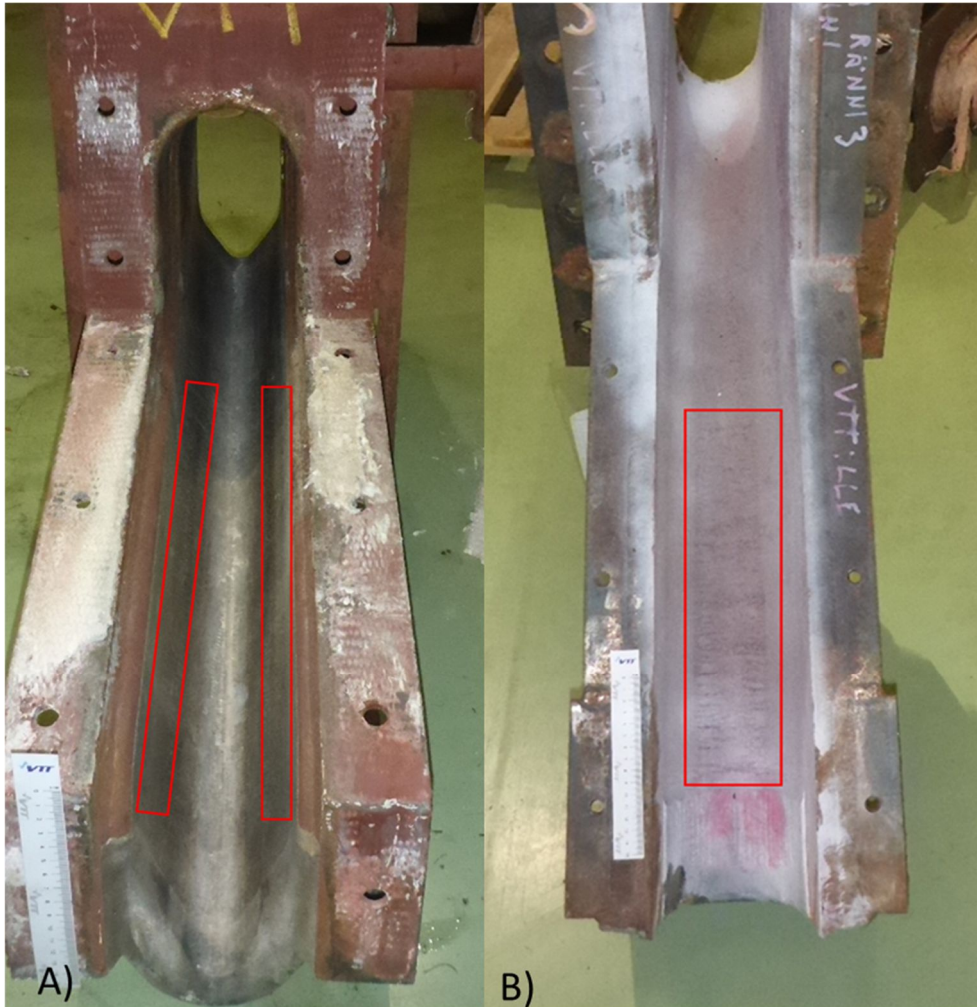
*Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksen havainnoista*

| Laitos                         | Kouru                                    | Ajoaika | Kouruosa<br>Säröjä                                   | Jättöpääty                        | Huomioita                       |
|--------------------------------|------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Joutseno<br>2 & 6              | A -laserp.                               | 6kk     | Satunnaisia<br>pieniä säröjä<br>kourun<br>seinämällä | OK                                | Lyhyt ajojakso!                 |
| Kaukaa<br>3 & 5                | A -laserp.                               | 6kk     | OK                                                   | Pientä<br>kulumaa<br>jättöpäädysä | Lyhyt ajojakso!                 |
| Kaukopää<br>-SK5               | A - compound                             | 12kk    | Satunnaisia<br>pieniä säröjä<br>kourun<br>seinämällä | OK                                |                                 |
| Kaukopää<br>-SK6               | V - pääty & osa<br>kourua<br>pinnoitettu | 12kk    | Satunnaisia<br>pieniä säröä<br>kourun<br>pohjalla    | Suuri<br>syöpymä                  |                                 |
| Kemi 3                         | V - pääty & osa<br>kourua<br>pinnoitettu | 12kk    | Säröjä<br>kourun<br>pohjalla max.<br>575µm           | Suuria<br>syöpymiä                |                                 |
| Kemi 5                         | V - pääty & osa<br>kourua<br>pinnoitettu | 12kk    | Säröjä<br>kourun<br>pohjalla max.<br>750µm           | OK                                | Jättöpääty<br>jouheva           |
| Kotkamills<br>oikea &<br>vasen | A - compound                             | 12kk    | Runsaasti<br>säröjä kourun<br>seinämällä             | OK                                |                                 |
| Kymi 6                         | V - pääty & osa<br>kourua<br>pinnoitettu | 12kk    | OK                                                   | Suuria<br>syöpymiä                |                                 |
| Kymi 6                         | V - pääty & osa<br>kourua<br>pinnoitettu | 12kk    | OK                                                   | Pientä<br>syöpymää                | Hieman<br>jouhevampi<br>rakenne |
| Oulu 1                         | A - compound                             | 12kk    | OK                                                   | Syöpymää                          |                                 |
| Oulu 3                         | A - compound                             | 12kk    | Säröjä<br>kourun                                     | OK                                |                                 |

|                      |                                          |      |                                                                                           |          |                                                                                      |
|----------------------|------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                      |                                          |      | seinämällä<br>>2100 µm                                                                    |          |                                                                                      |
| Pietarsaari<br>X     | A - compound                             | 18kk | Säröjä<br>kourun<br>seinämällä<br>>3000 µm                                                | OK       | Useat säröt<br>etenivät<br>perusaineeseen                                            |
| Pietarsaari<br>Y     | A - laserp.                              | 18kk | Säröjä<br>kourun<br>seinämällä<br>max. 1800<br>µm                                         | OK       | Säröt vain<br>pinnoitteessa                                                          |
| Pietarsaari<br>uusi  | A - compound                             | 18kk |                                                                                           |          |                                                                                      |
| Sunila<br>SK10       | V - pääty & osa<br>kourua<br>pinnoitettu | 12kk | OK                                                                                        | OK       | Jouheva pääty                                                                        |
| Sunila<br>SK11       | V - pääty & osa<br>kourua<br>pinnoitettu | 12kk | OK                                                                                        | Syöpymää |                                                                                      |
| Veitsiluoto<br>1 & 3 | Andritz,<br>pinnoitettu                  | 12kk | Runsaasti<br>säröjä kourun<br>seinämällä                                                  | OK       |                                                                                      |
| Äänekoski<br>5,6 & 7 | V - pääty<br>pinnoitettu                 | 18kk | Säröjä<br>kouruosalla<br>lähellä<br>jättöpäättyä<br>tulpatussa<br>kourussa<br>Äänekoski 6 | Syöpymää | Pinnoite puuttuu<br>kouruosalta - ei<br>verrattavissa<br>suoraan muihin<br>kouruihin |

Kouruosalla havaittiin säröjä sekä Andritzin että Valmetin valmistamissa sulakouruissa (Kuva 138). Nämä säröt vastasivat termisen väsymisen säröjä. Valmetin sulakouruissa säröjä oli havaittavissa huomattavasti harvemmassa määrässä kuin Andritzin. Näissä havaitut säröt olivat sijoittuneet kourun pohjalle. Andritzin compound kouruissa säröjä oli havaittavissa kourun seinämällä, ja tarkemmin tutkitut näytteet osoittivat säröjen etenevän pinnoitekerroksen läpi perusaineeseen. Andritzin laserpinnoitetuissa kouruissa havaittiin vähemmän säröilyä, eikä näiden säröjen havaittu etenevän perusaineelle. Säröjen ilmentyminen erikohtiin kourua eri valmistajan kouruilla on selitettävissä sekä erilaisella rakenteella (sekä ulkoinen että virtauskanavisto), sekä eri materiaaleilla. Termisen väsymisen säröjen synty ja kasvuun vaikuttavat sulakourun rakenteen ja materiaalin lisäksi suuret lämpötilojen vaihtelut, eli suuret kuorman vaihtelut ja sulasyöksyt. Tämän lisäksi säröjen kasvua kiihdyttää liian kuuma materiaalilämpötila (liian kuuma vesi, ja siitä syntyneet paksut eristävät oksidit). Joissain tapauksissa myös säröihin päässyt sula voi syövyttää materiaalia ja kiihdyttää säröjen kasvua.





Kuva 138. Havaittujen säröjen sijainti a) Andritzin ja b) Valmetin kouruissa

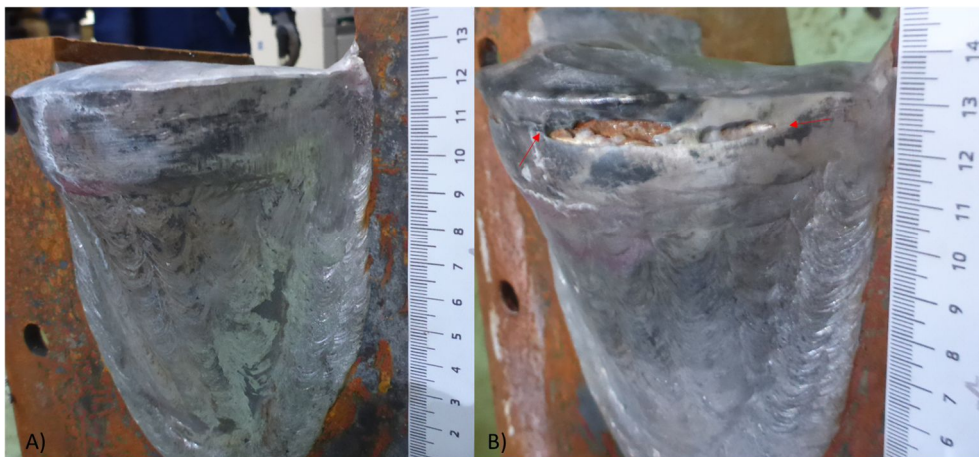
Jättöpäädyissä havaittiin syöpyä lähinnä Valmetin sulakouruissa, Andritzin kouruissa havaittiin vain yhdessä vakavaa syöpymää ja muissa vain pientä kulumaa. Valmetin jättöpäädyissä syöpymät olivat suurimpia ja yleisemmin Kuva 139 kohdissa. Havaittiin myös, että jättöpäädyt, joissa ei havaittu syöpymää olivat rakenteeltaan hieman jouhevampia. Andritzin sulakourujen jättöpäädyt on rakenteeltaan erilainen, tutkimuksissa havaitussa yhdessä pahassa syöpymässä havaittiin, että syöpymä on lähtenyt liikkeellä kahden hitsauspalon rajapinnalta. On siis mahdollista että tällä kohden on ollut rakenteessa epäjatkuvuuskohta ja/tai materiaalissa heikompi kohta, josta syöpyminen on päässyt ydintymään ja jatkamaan kasvuaan pinnoitteen läpi perusaineelle (Kuva 140).

Korroosion jättöpäädyissä oli aiheuttanut rikki pitoinen yhdiste. Tulosten perusteella ei voida sanoa, onko se peräisin liuottajan höngästä vai sulasta. Osassa poikkileikkausnäytteistä syöpymän yli, pinnoitteen syöpymän muoto viittaisi enemmän sulan aiheuttamaan pyörteeseen joka on kuluttanut ensin pinnoitteen ja altistanut sen alla olevan perusaineen korroosiolle. Tämä ei kuitenkaan ollut yksiselitteisesti nähtävissä kaikissa näytteissä, vaikka minkään jättöpäädyn poikkileikkauksen pinnoiteosalla ei havaittu merkittävän isoja korroosiotuotekerroksia.

Jättöpäädyjen syöpymiseen vaikuttavat tekijät materiaalin lisäksi ovat sen rakenne, epäjatkuvuuskohtat jättöpinnalla sekä päädyn lämpötila. Jättöpäädyjen syöpymisen estämiseksi on suositeltavaa hioa jättöpäädy jouhevaksi, niin että sula pääsee hyvin virtaamaan liuottajaan eikä aiheuta pyörteitä päädyyn eikä pintaan jää epäjatkuvuuskohtia joihin sulasta tai liuottajan höngästä aiheutuvat rikkiyhdisteet voisivat lukkiintua aiheuttamaan korroosiota.



Kuva 139. Valmetin sulakourun jättöpääty a) jouhevampi jättöpinta, ja b) jyrkempi jättöpinta. Myös yleisimmät syöpymien ilmentymispaikat merkitty



Kuva 140. Andritzin jättöpäädyssä havaittu suuri syöpymä a) vaurioitumaton (Oulu 4) ja b) syöpynyt (Oulu 1)



**Putken kuorinta ja S0-linjaus – raportti 1.5.2019**



Timo Kauppi, IWE, TkL

**TEKNINEN RAPORTTI**  
2019-05-01

Luottamuksellinen  
Versio 1.0

**Komponentin putken pinnoitehitsin tunkeuman vaikutus päittäishitsin  
mekaanisiin ominaisuuksiin**





Timo Kauppi, IWE, TkL

**TEKNINEN RAPORTTI**  
2019-05-01

Luottamuksellinen  
Versio 1.0

**VERSIOHISTORIA**

| Versio | tila       | pvm       | tekijä      | selite                                                                                 | katselmointi |
|--------|------------|-----------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 1.0    | Hyväksytty | 1.5.2019  | Timo Kauppi | Muokattu asiakkaan kommenttien perusteella                                             | -            |
| 0.3    | Luonnos    | 17.4.2019 | Timo Kauppi | Dokumentti lähetetty asiakkaalle katselmoitavaksi                                      | asap         |
| 0.2    | Luonnos    | 15.4.2019 | Timo Kauppi | Dokumenttia täydennetty Tampereella 4.4.2019 pidetyn palaverin kommenttien perusteella |              |
| 0.1    | Luonnos    | 20.3.2019 | Timo Kauppi | dokumentti luotu                                                                       | -            |



## **SISÄLLYSLUETTELO**

|       |                                        |    |
|-------|----------------------------------------|----|
| 1     | JOHDANTO .....                         | 1  |
| 2     | KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT .....     | 2  |
| 2.1   | Kompound putket .....                  | 2  |
| 2.1.1 | Sandvik 4L7 .....                      | 2  |
| 2.1.2 | Sandvik 3R12.....                      | 3  |
| 2.1.3 | Sanicro 38.....                        | 4  |
| 2.2   | Hitsauslisäaineet.....                 | 5  |
| 2.2.1 | OK Tigrod 13.09.....                   | 5  |
| 2.2.2 | OK 67.60 .....                         | 6  |
| 2.2.3 | NICRO 31/27.....                       | 6  |
| 2.1   | Koehitsaukset .....                    | 7  |
| 2.2   | Testaus .....                          | 8  |
| 2.2.1 | Korotetun lämpötilan vetokokeet .....  | 8  |
| 2.2.2 | Iskukokeet .....                       | 8  |
| 2.2.3 | Kovuusmittaukset.....                  | 9  |
| 2.2.4 | Tunkeuma .....                         | 9  |
| 2.2.5 | Mikrorakenne .....                     | 10 |
| 2.2.6 | Hitsin ferriittipitoisuus .....        | 10 |
| 2.2.7 | Hitsiaineen kemiallinen koostumus..... | 10 |
| 2.3   | Testauksen laadunvarmistus.....        | 11 |





|     |                                                          |    |
|-----|----------------------------------------------------------|----|
| 3   | VAATIMUKSET .....                                        | 12 |
| 3.1 | Venymisraja korotetuissa lämpötiloissa .....             | 12 |
| 3.2 | Iskuenergia .....                                        | 12 |
| 3.3 | Kovuudet.....                                            | 13 |
| 3.4 | Tunkeuman syvyys .....                                   | 14 |
| 3.5 | Hitsin ferriittipitoisuus.....                           | 14 |
| 4   | TULOKSET .....                                           | 15 |
| 4.1 | Kemiallinen koostumus.....                               | 15 |
| 4.2 | Korotetun lämpötilan venymisraja .....                   | 15 |
| 4.3 | Iskukokeet.....                                          | 16 |
| 4.4 | Kovuudet.....                                            | 17 |
| 4.5 | Pinnoitteen hitsin tunkeuma .....                        | 17 |
| 4.1 | Mikrorakenne .....                                       | 18 |
| 4.2 | Pinnoitteen hitsin ferriittipitoisuus .....              | 23 |
| 4.3 | Hitsiaineen kemiallinen koostumus .....                  | 23 |
| 5   | TULOSTEN TARKASTELU.....                                 | 25 |
| 5.1 | Hitsin lujuuteen ja sitkeyteen vaikuttavat tekijät ..... | 25 |
| 5.2 | Pinnoitteen hitsin ferriittipitoisuus .....              | 27 |
| 5.3 | Martensiitin muodostuminen.....                          | 30 |
| 5.4 | Hitsiaineen kemiallinen koostumus .....                  | 36 |
| 5.5 | Lisäainesuositus .....                                   | 37 |
| 5.6 | Jatkotutkimukset.....                                    | 38 |



Timo Kauppi, IWE, TkL

**TEKNINEN RAPORTTI**  
2019-05-01

Luottamuksellinen  
Versio 1.0

|   |                      |    |
|---|----------------------|----|
| 6 | JOHTOPÄÄTÖKSET ..... | 39 |
| 7 | LÄHDELUETTELO .....  | 40 |





## **1 JOHDANTO**

Tässä teknisessä raportissa käydään läpi compound putkille tehtyjen hitsauskokeiden tulokset ja niiden analysointi. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää täyttyvätkö standardin SEF-EN 12952-6:2011 liitteen A vaatimukset, kun compound putken päittäishitsissä pinnoitteen hitsi tunkeutuu ferriittiseen painetta kantavaan sisäosaan.

Tutkimus tehtiin aikavälillä 1.1. – 30.4.2019. Tutkimuksen päätoteuttajana toimi Oulun yliopiston Materiaali- ja konetekniikan tutkimusyksikkö. Koehitsaukset tehtiin Nordic Power Service Oy:n toimesta Varkaudessa. Tutkimuksen tilaaja oli Suomen Soodakattilayhdistys ry.



## 2 KOEMATERIAALIT JA MENETELMÄT

### 2.1 *Kompound putket*

Projektissa tutkittiin kahden tyyppisen komposiittiputken jatkohitsien ominaisuuksia.

Komposiittiputkien materiaalit olivat: 1. Sandvik 3R12 ja Sandvik 4L7 ja 2. Sanicro 38 ja Sandvik 4L7.

#### 2.1.1 Sandvik 4L7

Molemmissa putkissa oleva ferriittinen painetta kantava osa Sandvik 4L7 teräs vastaa saumatonta painelaiteteräsputkea P265GH (EN 1.0425). Se on yleisesti käytetty seostamaton saumaton painelaiteteräsputki, jonka tekniset toimitusehdot on määritelty standardissa SFS-EN 10216-2:2014. Teräs on teknisen raportin CEN ISO/TR 15608:2017 ryhmittelyn mukaisesti ryhmään 1.1 kuuluva. Standardin mukainen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 2.1, mekaaniset ominaisuudet taulukossa 2.2 ja venymisrajan  $R_{p0.2}$  vähimmäisvaatimukset korotetuissa lämpötiloissa taulukossa 2.3.

Taulukko 2.1 – Saumattoman P265GH painelaiteteräsputken kemiallinen koostumus. (SFS-EN 10216-2 2014, 24)

| Teräslaji   |                   | C      | Si     | Mn     | P<br>max | S<br>max | Cr     | Mo     | Ni     | Altot   | Cu     | Nb      | Ti max | V      | Cr+Cu+Mo+<br>Ni |
|-------------|-------------------|--------|--------|--------|----------|----------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|-----------------|
| Nimike      | Numero-<br>tunnus |        |        |        |          |          |        |        |        |         |        |         |        |        |                 |
| P265GH      | 1.0425            | ≤ 0.20 | ≤ 0.40 | ≤ 1.40 | ≤ 0.025  | ≤ 0.010  | ≤ 0.30 | ≤ 0.08 | ≤ 0.30 | ≥ 0.020 | ≤ 0.30 | ≤ 0.020 | 0.04   | ≤ 0.02 | ≤ 0.70          |
| Sandvik 4L7 | 1.0425            | ≤ 0.20 | 0.3    | 0.7    | ≤ 0.025  | ≤ 0.020  | -      | -      | -      | -       | -      | -       | -      | -      | -               |

Taulukko 2.2 - Saumattoman P265GH painelaiteteräsputken mekaaniset ominaisuudet. (SFS-EN 10216-2 2014, 30)

| Teräslaji |                   | Lujuusominaisuudet huoneenlämpötilassa                                    |  |             |             |              |                |                            | Iskusitkeysominaisuudet a), b) |                                                              |    |     |    |    |
|-----------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------|--|-------------|-------------|--------------|----------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------|----|-----|----|----|
| Nimike    | Numero-<br>tunnus | Ylempi myötöraja tai venymisraja ReH tai Rp0.2 seinämänpaksuudella T min. |  |             |             |              | Murtolujuus Rm | Murtovenymä A min. %a), h) |                                | Keskimääräinen iskuenergia vähintään KV h) J lämpötilassa °C |    |     |    |    |
|           |                   | T ≤ 16                                                                    |  | 16 < T ≤ 40 | 40 < T ≤ 60 | 60 < T ≤ 100 |                | l                          |                                | l                                                            |    |     | t  |    |
|           |                   | MPa                                                                       |  | MPa         | MPa         | MPa          |                |                            |                                | 20                                                           | 0  | -10 | 20 | 0  |
| P265GH    | 1.0425            | 265                                                                       |  | 255         | 245         | -            | 410...570      | 23                         | 21                             | -                                                            | 40 | 28  | -  | 27 |



Taulukko 2.3 - Saumattoman P265GH painelaiteteräsputken venymisrajan  $R_{p0.2}$  vähimmäisarvot korotetuissa lämpötiloissa. (SFS-EN 10216-2 2014, 32)

| Teräslaji |               | T<br>mm | Venymisrajan $R_{p0.2}$ vähimmäisarvot MPa lämpötilassa °C |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|---------------|---------|------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nimike    | Numero-tunnus |         | 100                                                        | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 600 |
| P195GH    | 1.0348        | ≤ 16    | 175                                                        | 165 | 150 | 130 | 113 | 102 | 94  | –   | –   | –   | –   |
| P235GH    | 1.0345        | ≤ 60    | 198                                                        | 187 | 170 | 150 | 132 | 120 | 112 | 108 | –   | –   | –   |
| P265GH    | 1.0425        | ≤ 60    | 226                                                        | 213 | 192 | 171 | 154 | 141 | 134 | 128 | –   | –   | –   |

### 2.1.2 Sandvik 3R12

Sandvik 3R12 vastaa saumatonta austeniittista ruostumatonta X2CrNi19-11 (EN 1.4306) painelaiteteräsputkea, jonka tekniset toimitusehdot on määritelty standardissa SFS-EN 10216-5:2014. Teräs on teknisen raportin CEN ISO/TR 15608:2017 ryhmittelyn mukaisesti ryhmään 8.1 kuuluva. Standardin mukainen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 2.4, mekaaniset ominaisuudet taulukossa 2.5 ja venymisrajan  $R_{p0.2}$  vähimmäisvaatimukset korotetuissa lämpötiloissa taulukossa 2.6.

Taulukko 2.4 - Saumattoman austeniittisen ruostumattoman X2CrNi19-11 painelaiteteräsputken kemiallinen koostumus. (SFS-EN 10216-5 2014, 20)

| Teräslaji    |               | C      | Si     | Mn     | P       | S       | N      | Cr          | Ni          |
|--------------|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|-------------|-------------|
| Nimike       | numero-tunnus |        |        |        |         |         |        |             |             |
| X2CrNi19-11  | 1.4306        | ≤ 0.03 | ≤ 1.00 | ≤ 2.00 | ≤ 0.040 | ≤ 0.015 | ≤ 0.10 | 18.0 - 20.0 | 10.0 - 12.0 |
| Sandvik 3R12 | 1.4306        | ≤ 0.03 | 0.5    | 1.3    | ≤ 0.030 | ≤ 0.015 | -      | 18.5        | 10.0        |



Taulukko 2.5 – Saumattoman X2CrNi19-11 painelaiteteräsputken mekaaniset ominaisuudet. (SFS-EN 10216-5 2014, 28)

| Teräslaji   |                   | Lujuusominaisuudet huoneenlämpötilassa |                                 |                                    |                          |    | Iskusitkeys- ominaisuudet                                           |    |    |
|-------------|-------------------|----------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------|----|---------------------------------------------------------------------|----|----|
|             |                   | Venymisraja                            |                                 | Murto-<br>lujuus<br>R <sub>m</sub> | Murtovenymä<br>A min (%) |    | Vähimmäis- iskuenergia KV2 J<br>Huoneen-<br>lämpötilassa<br>-196 °C |    |    |
| Nimike      | Numero-<br>tunnus | R <sub>p0,2</sub><br>min<br>MPa        | R <sub>p1,0</sub><br>min<br>MPa |                                    | l                        | t  | l                                                                   | t  | t  |
| X2CrNi19-11 | 1.4306            | 180                                    | 215                             | 460...680                          | 40                       | 35 | 100                                                                 | 60 | 60 |

Taulukko 2.6 - Saumattoman austeniittisen ruostumattoman X2CrNi19-11 painelaiteteräsputken venymisrajan R<sub>p0,2</sub> ja R<sub>p1,0</sub> vähimmäisarvot korotetuissa lämpötiloissa. (SFS-EN 10216-5 2014, 34)

| Teräslaji   |        | R <sub>p0,2</sub> , min MPa<br>lämpötilassa (°C) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | R <sub>p1,0</sub> , min MPa<br>lämpötilassa (°C) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|--------|--------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|             |        | 50                                               | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 50  | 100                                              | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 550 | 50  | 100 |
| X2CrNi19-11 | 1.4306 | 165                                              | 145 | 130 | 118 | 108 | 100 | 94  | 89  | 85  | 81  | 80  | 200 | 180                                              | 160 | 145 | 135 | 127 | 121 | 116 | 112 | 109 | 108 | 200 | 180 |

### 2.1.3 Sanicro 38

Sanicro 38 vastaa modifioitua Alloy 825 Ni-Fe-Cr seosta, joka on erittäin rankkoihin korroosio-olosuhteisiin kehitetty teräs. Se vastaa eurooppalaista W.Nr. 2.4858 terästä. Teräs on teknisen raportin CEN ISO/TR 15608:2017 ryhmittelyn mukaisesti ryhmään 45 kuuluva. Standardin mukainen ja Sandvik Sanicro 38 tyyppillinen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 2.7 ja standardin ASTM B424 mukaiset mekaaniset ominaisuudet taulukossa 2.8.

Taulukko 2.7 – Sanicro 38 tyyppillinen kemiallinen koostumus.

| Teräslaji      |        | C<br>max | Si     | Mn     | Cr        | Ni        | Cu      | Ti      |
|----------------|--------|----------|--------|--------|-----------|-----------|---------|---------|
| Sulatus<br>n:o | UNS    |          |        |        |           |           |         |         |
| ASTM B 424     | N08825 | 0.05     | ≤ 0.50 | ≤ 1.00 | 19.5-23.5 | 38.0-46.0 | 1.5-3.0 | 0.6-1.2 |
| Sanicro 38     | N08825 | 0.030    | ≤ 0.50 | 0.80   | 20.0      | 38.0      | 1.7     | 0.7     |



Taulukko 2.8 – UNS N08825 teräksen mekaaniset ominaisuudet. (ASTM B424 2005)

| Teräslaji  | R <sub>p0,2</sub><br>min<br>MPa | R <sub>m</sub><br>min<br>MPa | Murtovenymä<br>A min<br>% |
|------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| UNS N08825 | 241                             | 586                          | 30                        |

## 2.2 Hitsauslisäaineet

Koehitsauksissa käytettiin kolmea (3) lisäainetta:

- OK Tigrod 13.09 ja OK 67.60 Sandvik 3R12 / 4L7 putkille (6 kpl)
- OK Tigrod 13.09 ja Lincoln NiCro 31/27 Sanicro 38 / Sandvik 4L7 putkille (6 kpl)  
sekä Sandvik 3R12/4L7 putkille (6 kpl)

### 2.2.1 OK Tigrod 13.09

OK Tigrod 13.09 on molybdeenillä seostettu hitsauslanka kuumalujien terästen TIG-hitsaukseen. Luokittelumerkintä on EN ISO 21952-A W MoSi. (ESAB a 2019)

Standardin mukainen ja valmistajan ilmoittama tyypillinen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 2.9. Standardin mukainen puhtaan hitsiaineen myötölujuus R<sub>p0.2</sub> on vähintään 355 MPa.

Taulukko 2.9 – OK Tigrod 13.09 puhtaan hitsiaineen kemiallisia koostumuksia. (ESAB a 2019)

| kemiallinen<br>koostumus<br>ISO 21952-A | C         | Si        | Mn        | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo        |
|-----------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|------|------|-----------|
| MoSi                                    | 0.08-0.15 | 0.50-0.80 | 0.70-1.30 | 0.020 | 0.020 | –    | –    | 0.40-0.60 |
| OK Tigrod 13.09                         | 0.094     | 0.61      | 1.09      | -     | -     | 0.05 | 0.05 | 0.45      |





### 2.2.2 OK 67.60

OK 67.60 on hapan-rutiilipäälysteinen 23Cr-13Ni-seosteinen ruostumaton, ns. yliseostettu (309L), hitsauspuikko. Se on tarkoitettu ensi sijassa seostamattoman tai niukkaseosteisen teräksen hitsaukseen ruostumattomaan teräkseen eli musta/ruostumaton-eripariliitosten hitsaukseen. Luokittelumerkintä on EN ISO 3581-A E 23 12 L R 3 2. (ESAB b 2019)

Standardin ja ainestodistuksen mukaiset kemialliset koostumukset on annettu taulukossa 2.10. Standardin mukainen hitsiaineen myötölujuus  $R_{p0.2}$  on vähintään 320 MPa.

Hitsiaineen ferriittipitoisuus FN = 10 – 22.

Taulukko 2.10 - OK 67.60 kemiallinen koostumus. (ESAB b 2019)

| kemiallinen koostumus ISO 3581-A | C     | Si   | Mn   | P      | S      | Cr        | Ni        | Mo    | FN    |
|----------------------------------|-------|------|------|--------|--------|-----------|-----------|-------|-------|
| E 23 12 L R 3 2                  | ≤0.04 | ≤1.2 | ≤2.5 | ≤0.030 | ≤0.025 | 22.0-25.0 | 11.0-14.0 | ≤0.75 | 10-22 |
| OK 67.60                         | 0.03  | 0.8  | 0.9  | -      | -      | 23.7      | 12.4      | -     | 15    |

### 2.2.3 NICRO 31/27

Hapan-rutiili päälysteinen, täysin austeniittinen lisäaine Mo ja Cu seosteisten Ni-Cr-Fe – seosteisten terästen hitsaukseen. Luokittelumerkintä on EN ISO 3581-A E 27 31 4 Cu L R 12. Standardin mukainen ja valmistajan ilmoittama tyypillinen kemiallinen koostumus on annettu taulukossa 2.11. Standardin mukainen puhtaan hitsiaineen myötölujuus  $R_{p0.2}$  on vähintään 240 MPa. Hitsiaineen ferriittipitoisuus FN = 0.

Taulukko 2.11 – NICRO 31/27 puhtaan hitsiaineen kemiallisia koostumuksia.

| kemiallinen koostumus ISO 3581-A | C     | Si   | Mn   | P      | S      | Cr        | Ni        | Mo      | Cu        | FN |
|----------------------------------|-------|------|------|--------|--------|-----------|-----------|---------|-----------|----|
| E 27 31 4 L R 12                 | ≤0.04 | ≤1.2 | ≤2.5 | ≤0.030 | ≤0.025 | 26.0-29.0 | 30.0-33.0 | 3.0-4.5 | 0.60-1.50 | -  |
| Lincoln NICRO 31/27              | 0.02  | 0.9  | 0.8  | -      | -      | 27.1      | 31.0      | 3.5     | 0.9       | 0  |



## 2.1 Koehitsaukset

Tutkimuksia varten hitsattiin 18 koehitsiä. Tavoitteena oli saada aikaan päittäishitsejä, joissa pinnoitteen hitsin tunkeuma  $S_0$  – alueelle on 1 – 1.5 mm. Hitsaukset tehtiin Nordic Power Service Oy:n toimesta Varkaudessa. Koehitsit numeroitiin juoksevilla numerolla 1 – 18 (ks. taulukko 2.12). Jatkossa viitataan koehitsin juoksevaan numeroon.

Taulukko 2.12 – Koehitsit ja niiden identifiointi.

| n:o | ID    | lisäaine | putki    | asento |
|-----|-------|----------|----------|--------|
| 1   | NPS10 | 67.60    | Compound | PC     |
| 2   | NPS10 | 67.60    | Compound | PH     |
| 3   | NPS10 | NiCro    | Compound | PC     |
| 4   | NPS10 | NiCro    | Compound | PH     |
| 5   | NPS10 | NiCro    | Sanicro  | PC     |
| 6   | NPS10 | NiCro    | Sanicro  | PH     |
| 7   | NPS70 | 67.60    | Compound | PC     |
| 8   | NPS70 | 67.60    | Compound | PH     |
| 9   | NPS70 | NiCro    | Compound | PC     |
| 10  | NPS70 | NiCro    | Compound | PH     |
| 11  | NPS70 | NiCro    | Sanicro  | PC     |
| 12  | NPS70 | NiCro    | Sanicro  | PH     |
| 13  | NPS71 | 67.60    | Compound | PC     |
| 14  | NPS71 | 67.60    | Compound | PH     |
| 15  | NPS71 | NiCro    | Compound | PC     |
| 16  | NPS71 | NiCro    | Compound | PH     |
| 17  | NPS71 | NiCro    | Sanicro  | PC     |
| 18  | NPS71 | NiCro    | Sanicro  | PH     |

Hitsaukset tehtiin alustavien hitsausohjeiden pWPS 141-111-04 ja pWPS 141-111-06 mukaan. Putkien päät kuorittiin mittaan 4.19 mm, mikä vastaa Kymin soodakattilan  $S_0$  –mittaa.

Koehitsauksista ei taltioitu toteutuneita hitsausarvoja. Alustavien hitsausohjeiden perusteella lämmöntuonti vaihteli taulukossa 2.12 annettujen arvojen mukaisesti. Taulukon



viimeiseen sarakkeeseen on laskettu  $t_{8/5}$  ajat standardin SFS-EN 1011-2:2011 liitteessä D annetun kaavan mukaisesti:

$$t_{8/5} = (4300 - 4,3T_0) \times 10^5 \times \frac{Q^2}{d^2} \times \left( \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right) \times F_2 \quad (1)$$

missä päittäisliitoksen muotokerroin  $F_2 = 0.9$ .

Taulukko 2.13 – Koehitsauksien ohjeelliset lämmöntuonnit ja niistä lasketut  $t_{8/5}$  -ajat.

| pWPS       | materiaali | hitsaus-prosessi | lisäaine [mm] | hitsaus-asento | palko | Q [kJ/mm] | $t_{8/5}$ [s] |
|------------|------------|------------------|---------------|----------------|-------|-----------|---------------|
| 141-111-04 | 3R12/4L7   | 141              | 2.4           | PC             | 1-3   | 0.50-1.31 | 5.0-35.0      |
| 141-111-04 | 3R12/4L7   | 111              | 2.5           | PC             | 4-n   | 0.23-0.58 | 1.2-6.7       |
| 141-111-04 | 3R12/4L7   | 111              | 2.0           | PC             | 4-n   | 0.18-0.54 | 0.6-5.9       |
| 141-111-04 | 3R12/4L7   | 141              | 2.4           | PH             | 1-3   | 0.50-1.31 | 5.0-35.0      |
| 141-111-04 | 3R12/4L7   | 111              | 2.5           | PH             | 4-n   | 0.42-1.25 | 3.5-31.7      |
| 141-111-04 | 3R12/4L7   | 111              | 2.0           | PH             | 4-n   | 0.36-1.26 | 2.6-32.1      |
| 141-111-06 | San38/4L7  | 141              | 2.4           | PC             | 1-3   | 0.57-1.31 | 6.5-35        |
| 141-111-06 | San38/4L7  | 111              | 2.5           | PC             | 4-n   | 0.28-0.56 | 1.6-6.3       |
| 141-111-06 | San38/4L7  | 141              | 2.4           | PH             | 1-3   | 0.57-1.31 | 6.5-35        |
| 141-111-06 | San38/4L7  | 111              | 2.5           | PH             | 4-n   | 0.46-1.08 | 4.3-23.3      |

## 2.2 Testaus

### 2.2.1 Korotetun lämpötilan vetokokeet

Korotetun lämpötilan ( $T = 380^\circ\text{C}$ ) hitsin poikittaiset vetokokeet tehtiin DEKRA Industrial Oy:n rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa Oulussa. Vetokokeet tehtiin standardin SFS-EN ISO 6892-2:2011 mukaisesti.

### 2.2.2 Iskukokeet

Iskukokeet tehtiin DEKRA Industrial Oy:n rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa Oulussa. Niissä käytettiin standardin SFS-EN ISO 148-1:2016 mukaisia 5 mm paksuja

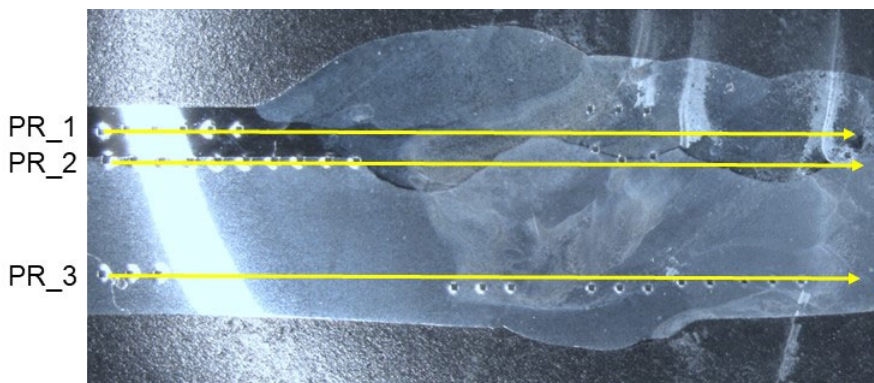




erikoiskoesauvoja. Lovi oli hitsiaineessa (VWT 0/1 tyyppin sauvat) standardin SFS-EN ISO 9016:2012 vaatimusten mukaisesti. Iskukokeet tehtiin lämpötilassa  $T = 20^{\circ}\text{C}$  ja  $T = 0^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.3 Kovuusmittaukset

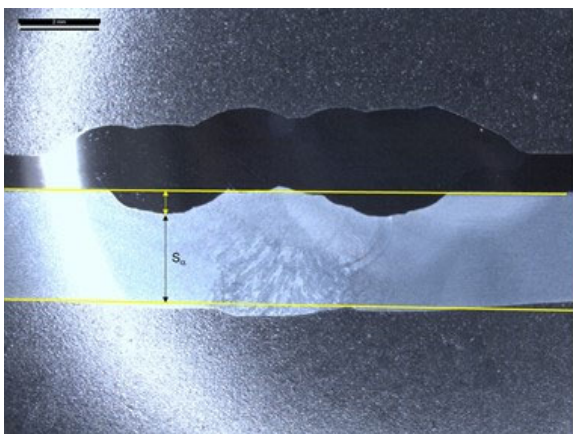
Kovuusmittaukset tehtiin Lapin ammattikorkeakoulun Kemin materiaalien tutkimuslaboratoriossa. Kovuudet mitattiin standardien SFS-EN ISO 9015-1:2011 ja SFS-EN ISO 6507-1:2018 mukaisesti 98.07 N koevoimalla (HV10). Mittauksissa tehtiin kolme (3) painumariviä (ks. kuva 2.1).



Kuva 2.1 – Kovuusmittausten painumarivit (PR).

### 2.2.4 Tunkeuma

Pinnoitteen hitsin tunkeuma määritettiin stereomikroskoopilla otetuista kuvista kuvan 2.2 mukaisesti mittaamalla ferriittisen painetta kantavan osuuden paksuus  $S_{\alpha}$  millimetreinä ja laskemalla sen ero  $\Delta S_0$  vaatimuksena olevaan vähimmäisseinämänpaksuuteen  $S_0$  ( $\Delta S_0 = S_0 - S_{\alpha}$ ).



Kuva 2.2 – Pinnoitteen hitsin tunkeuman  $S_\alpha$  mittaus.

### 2.2.5 Mikrorakenne

Hitseistä leikattiin poikkileikkausnäytteitä mikrorakennetarkasteluja varten. Näytteet valettiin Struersin Polyfast kuumavaluaineeseen. Näytteet hiottiin, kiillotettiin ja syövytettiin kahdessa vaiheessa: 1. 3% Nitaliin upottamalla ja 2. elektrolyyttisesti 10N NaOH vesiliuoksessa ( $U = 3 \text{ V}$ ,  $T = \text{RT}$ ).

Mikrorakenteet tutkittiin ja valokuvattiin Leica IDM 5000M käänteismikroskoopilla.

### 2.2.6 Hitsin ferriittipitoisuus

Hitsiaineen ferriittipitoisuus määritettiin kuva-analyysiohjelmistolla (ImageJ ver. 1.52a) elektrolyyttisesti syövytetystä hieestä otetutuista mikrokuvista. Ferriittipitoisuudet määritettiin myös Fischer Ferritscope mittarilla standardin SFS-EN ISO 8249:2018 vaatimusten mukaisesti.

### 2.2.7 Hitsiaineen kemiallinen koostumus

Hitsiaineen kemiallinen koostumus määritettiin optisella emissiospektrometrilla (OES) DEKRA Industrial Oy:n Turun testauslaboratoriossa. Kemiallinen koostumus määritettiin



kaikista OK 67.60 lisäaineella hitsatuista koehitseistä (koehitsit nro 1, 2, 7, 8, 13 ja 14) ja neljästä (4) NICRO 31/27 lisäaineella hitsatusta koehitsistä (koehitsit nro 5, 6, 15 ja 16).

### **2.3 Testauksen laadunvarmistus**

Lapin ammattikorkeakoululla tehdyissä testauksissa noudatettiin kansainvälistä ISO/IEC 17025:2005 laboratoriestandardia.





### 3 VAATIMUKSET

Testituloksille olivat voimassa seuraavat vaatimukset.

#### 3.1 Venymisraja korotetuissa lämpötiloissa

Venymisrajan  $R_{p0.2}$  vähimmäisarvot on määritelty standardissa SFS-EN 10216-2:2014 taulukossa 5.

Taulukko ei anna täsmällistä arvoa  $T = 380^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa (ks. taulukko 2.3). Se voidaan 97.8% prosentoin varmuudella laskea lämpötilavälillä  $100 - 450^{\circ}\text{C}$  kaavasta:

$$\sigma = -71.13 \times \ln(T) + 561.96 = 139 \text{ MPa}$$

Tästä seuraa vaatimus koehitsien venymisrajalle lämpötilassa  $T = 380^{\circ}\text{C}$ , jossa:

$$R_{p0.2} \geq 139 \text{ MPa.}$$

#### 3.2 Iskuenergia

Standardissa SFS-EN 12952-6:2011 on vaatimus Charpy-V iskukokeille kohdassa 6.2.2.4:

Ferriittisille teräksille:

Charpy-V -iskukoe hitsiaineessa

- keskiarvon vähimmäisarvo: hitsausohjeen hyväksyntään käytetylle perusaineelle määritetty keskimääräinen arvo koelämpötilassa (huoneen lämpötila)
- pienin yksittäinen arvo: yksi yksittäinen arvo voi olla alhaisempi kuin keskimääräisen arvon tulee vähintään olla, mutta se ei saa olla alhaisempi kuin 70 % keskimääräisen arvon vähimmäisarvosta.



Standardin SFS-EN 10216-2:2014 vaatimus Charpy-V kokeessa rekisteröitävälle poikittaiselle iskuenergialle  $KV_2$  lämpötilassa  $T = 0^\circ\text{C}$  on 27 J. Koska testauksessa käytettiin 5 mm paksuja erikoiskoesauvoja pitää kokeessa määritetty iskuenergia ( $KV_p$ ) muuttaa lasketuksi iskuenergiaksi ( $KV_c$ ) käyttäen seuraavaa kaavaa:

$$KV_c = \frac{10 \times KV_p}{w}$$

missä

$KV_c$  on laskettu iskuenergia, J

$KV_p$  on määritetty iskuenergia, J

w on koesauvan leveys, mm (SFS-EN 10216-2 2014, 60)

Lasketun iskuenergian  $KV_c$  on täytettävä esitetty vaatimus, eli:

$$KV_c \geq \frac{10 \times KV_p}{w} \geq 27 \text{ J}$$

### 3.3 Kovuudet

Standardissa SFS-EN 12952-6:2011 on esitetty kovuudelle vaatimus kohdassa 6.2.2.5:

”Riippuen perusaineesta ja siitä, vaaditaanko standardin EN 12952-5:2011 kohdan 10.4. mukaan hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely, tulee kovuusarvojen olla kuten standardissa EN ISO 15614-1:2004 määritetään.”

Standardissa SFS-EN ISO 15614-1:2004 on annettu seuraava vaatimus: Teräsryhmä 1, lämpökäsittelemätön, kovuuden enimmäisarvo on 380 HV10. Teräsryhmille 8 ja 45 ei ole vaatimuksia.



### **3.4 Tunkeuman syvyys**

Pinnoitteen hitsin tunkeuman syvyys ferriittiseen painetta kantavaan putken sisäosaan ja hitsiin mitattiin syövytetystä poikkileikkaushieestä.

Standardin SFS-EN 12952-6:2011 liitteessä A annetaan seuraavat vaatimukset pinnoitteen hitsin tunkeumalle ferriittiseen painetta kantavaan sisäosaan tai hitsiin:

- Pinnoitteen hitsi voi tunkeutua lasketun ferriittiseen painetta kantavaan sisäosaan vähimmäispaksuuteen asti seuraavissa tapauksissa:
  - a) lisääineen ja hitsiaineen lujuus- ja sitkeysominaisuudet täyttävät ferriittisen painetta kantavan sisäosan materiaaliominaisuudet;
  - b) hitsausohjeiden hyväksyntä vastaa standardin EN ISO 15614-1 sekä standardissa EN 12952 esitettyjä lisävaatimuksia;
  - c) pinnoitteen hitsin enimmäistunkeuma laskettuun ferriittisen painetta kantavan sisäosan vähimmäispaksuuteen on 1.5 mm;
  - d) ennen tuotantoa tehdään työkoe. Käsinhitsauksessa jokainen hitsaaja tekee työkokeen. Mekanisoidussa hitsauksessa tehdään yksi työkoe kutakin hitsausohjetta kohti;
  - e) rikkomaton aineenkoetus suoritetaan päällehitsauksen jälkeen standardin EN 12952 mukaisesti.

Ferriittisen painetta kantavan putken osan vähimmäispaksuuden arvo pitää olla:

$$S_0 \geq 4.19 \text{ mm.}$$

### **3.5 Hitsin ferriittipitoisuus**

ASME BPVC.II.D.C-2015 kohdassa A-207 on käyty läpi ruostumattomille teräksille tyypillistä haurausilmiötä 475°C – haurautta, joka vaikuttaa ensisijaisesti ferriittisten ja austeniittis-ferriittisten ruostumattomien terästen iskusitkeyteen heikentäen sitä. Hitsin ferriittipitoisuudelle on esitetty suositukset ASME Section IID taulukossa A-360.





## 4 TULOKSET

### 4.1 Kemiallinen koostumus

Ainestodistusten perusteella perusaineiden ja hitsauslisäaineiden kemialliset koostumukset olivat standardien vaatimusten mukaisia.

### 4.2 Korotetun lämpötilan venymisraja

Koehitsien vetokokeiden tulokset on annettu taulukossa 4.1. Taulukon mukaan kaikkien koehitsien korotetun lämpötilan venymislujuus ( $R_{p0.2}$ ) täytti kohdassa 3.1 määritellyt vaatimukset. Jokainen liitos murtui perusaineesta ja venymisraja oli keskimäärin n. 60% vaatimusta ( $R_{p0.2} \geq 139$  MPa) suurempi. Sitkeyttä kuvaava murtovenymän (A) arvo oli keskimäärin 29% ja vaihtelu välillä 25 – 33%.

Taulukko 4.1 – Koehitsien korotetun lämpötilan ( $T = 380^\circ\text{C}$ ) venymislujuus ( $R_{p0.2}$ ), murtolujuus ( $R_m$ ) ja murtovenymä (A).

| n:o | ID    | lisäaine | putki          | asento | murtumis<br>kohta | $R_{p0.2}$<br>[MPa] | $R_m$<br>[MPa] | A<br>[%] |
|-----|-------|----------|----------------|--------|-------------------|---------------------|----------------|----------|
| 1   | NPS10 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | PA                | 200                 | 438            | 28       |
| 2   | NPS10 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | PA                | 226                 | 428            | 30       |
| 3   | NPS10 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | PA                | 243                 | 417            | 30       |
| 4   | NPS10 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | PA                | 219                 | 446            | 29       |
| 5   | NPS10 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | PA                | 220                 | 468            | 33       |
| 6   | NPS10 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | PA                | 218                 | 459            | 30       |
| 7   | NPS70 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | PA                | 200                 | 463            | 25       |
| 8   | NPS70 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | PA                | 207                 | 422            | 28       |
| 9   | NPS70 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | PA                | 223                 | 438            | 27       |
| 10  | NPS70 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | PA                | 224                 | 434            | 29       |
| 11  | NPS70 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | PA                | 220                 | 463            | 29       |
| 12  | NPS70 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | PA                | 212                 | 448            | 31       |
| 13  | NPS71 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | PA                | 210                 | 423            | 27       |
| 14  | NPS71 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | PA                | 223                 | 431            | 28       |
| 15  | NPS71 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | PA                | 204                 | 423            | 30       |
| 16  | NPS71 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | PA                | 230                 | 442            | 28       |
| 17  | NPS71 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | PA                | 265                 | 455            | 27       |
| 18  | NPS71 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | PA                | 237                 | 457            | 28       |



### 4.3 Iskukokeet

Koehitsien iskukoetulosten keskiarvot on annettu taulukossa 4.2. Täydelliset tulokset on esitetty erillisessä liitteessä (LIITE 1). Taulukon perusteella kaikkien koehitsien  $KV_c$  - arvo on selvästi vaatimusta (27 J) suurempi.

Taulukko 4.2 – Koehitsien iskukoetulosten keskiarvot testauslämpötiloissa  $T = 20^\circ\text{C}$  ( $KV_c@20^\circ\text{C}$ ) ja  $T = 0^\circ\text{C}$  ( $KV_c@0^\circ\text{C}$ ).

| n:o | ID    | lisäaine | putki          | asento | $KV_c$<br>@20°C<br>[J] | $KV_c$<br>@0°C<br>[J] |
|-----|-------|----------|----------------|--------|------------------------|-----------------------|
| 1   | NPS10 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 152                    |                       |
| 2   | NPS10 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 130                    |                       |
| 3   | NPS10 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 176                    |                       |
| 4   | NPS10 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 133                    | 130                   |
| 5   | NPS10 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 161                    |                       |
| 6   | NPS10 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 153                    |                       |
| 7   | NPS70 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 141                    | 169                   |
| 8   | NPS70 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 135                    | 103                   |
| 9   | NPS70 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 167                    |                       |
| 10  | NPS70 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 164                    |                       |
| 11  | NPS70 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 161                    | 146                   |
| 12  | NPS70 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 142                    |                       |
| 13  | NPS71 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 162                    |                       |
| 14  | NPS71 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 150                    |                       |
| 15  | NPS71 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 169                    |                       |
| 16  | NPS71 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 161                    | 179                   |
| 17  | NPS71 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 144                    |                       |
| 18  | NPS71 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 136                    |                       |

k.a. 152 145

Iskukokeet tehtiin väärinkäsityksen takia ensin huoneenlämpötilassa ( $T = 20^\circ\text{C}$ ), vaikka standardissa SFS-EN 10216-2:2011 vaatimus on annettu lämpötilassa  $T = 0^\circ\text{C}$ . Koska ferriittisen teräksen iskutkeys on herkkä lämpötilalle ja iskuenergian arvo voi muuttua lämpötilan laskiessa  $20^\circ\text{C}$ , tehtiin viidelle koehitsille lisäkokeet lämpötilassa  $T = 0^\circ\text{C}$ .



Taulukon 4.2 viimeisellä rivillä esitetyt lasketun iskuenergian  $KV_c$  keskiarvot molemmissa testauslämpötiloissa. Alemmassa lämpötilassa ( $T = 0^\circ\text{C}$ ) testattujen sauvojen  $KV_c$ :n keskiarvo on n. 95% ylemmässä lämpötilassa ( $T = 20^\circ\text{C}$ ). Tämän tuloksen perusteella voidaan todeta, että koehitsien iskutikeys täyttää vaatimukset.

#### 4.4 Kovuudet

Kovuusmittausten painumarivien kovuuden keskiarvot on annettu taulukossa 4.3. Täydelliset kovuusmittaustulokset on annettu erillisessä liitteessä (LIITE 2). Kovuudet vaihtelivat välillä 137 – 196 HV10. Kaikki arvot olivat standardin SFS-EN ISO 15614-1:2004 määrittelemän enimmäisarvon (380 HV10) alapuolella.

Taulukko 4.3 – Koehitsien keskimääräiset kovuudet.

| n.o | ID    | lisäaine | putki          | asento | PR_1<br>HAZ_1 | PR_1<br>hitsi | PR_1<br>HAZ_2 | PR_2<br>HAZ_1 | PR_2<br>hitsi | PR_2<br>HAZ_2 | PR_3<br>HAZ_1 | PR_3<br>hitsi | PR_3<br>HAZ_2 |
|-----|-------|----------|----------------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1   | NPS10 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 149           | 196           | 151           | 165           | 193           | 172           | 152           | 172           | 155           |
| 2   | NPS10 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 164           | 185           | 168           | 162           | 178           | 170           | 149           | 179           | 150           |
| 3   | NPS10 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 170           | 170           | 173           | 165           | 169           | 178           | 144           | 157           | 144           |
| 4   | NPS10 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 171           | 170           | 164           | 168           | 166           | 177           | 148           | 168           | 151           |
| 5   | NPS10 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 159           | 176           | 158           | 168           | 173           | 163           | 146           | 151           | 144           |
| 6   | NPS10 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 163           | 173           | 166           | 169           | 160           | 166           | 151           | 168           | 149           |
| 7   | NPS70 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 149           | 188           | 154           | 172           | 183           | 165           | 144           | 159           | 137           |
| 8   | NPS70 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 158           | 185           | 180           | 177           | 183           | 176           | 144           | 163           | 148           |
| 9   | NPS70 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 165           | 182           | 178           | 193           | 173           | 167           | 152           | 183           | 155           |
| 10  | NPS70 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 140           | 175           | 161           | 160           | 146           | 163           | 140           | 150           | 142           |
| 11  | NPS70 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 147           | 171           | 144           | 163           | 171           | 163           | 147           | 172           | 148           |
| 12  | NPS70 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 170           | 174           | 173           | 169           | 161           | 168           | 148           | 164           | 146           |
| 13  | NPS71 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 161           | 185           | 179           | 180           | 191           | 168           | 142           | 158           | 137           |
| 14  | NPS71 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 175           | 186           | 182           | 180           | 188           | 186           | 151           | 153           | 146           |
| 15  | NPS71 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 162           | 181           | 173           | 181           | 179           | 179           | 143           | 157           | 146           |
| 16  | NPS71 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 173           | 177           | 181           | 184           | 180           | 190           | 150           | 175           | 151           |
| 17  | NPS71 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 183           | 190           | 177           | 175           | 183           | 179           | 155           | 161           | 153           |
| 18  | NPS71 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 162           | 167           | 164           | 172           | 172           | 176           | 153           | 156           | 145           |

#### 4.5 Pinnoitteen hitsin tunkeuma

Koehitseistä mitatut  $S_\alpha$  – arvot ja siitä laskettu eromitta ( $\Delta S_0$ ) sallittuun arvoon ( $S_0 = 4.19$  mm) on annettu taulukossa 4.4. Kun eromitta  $\Delta S_0 < 0$ , on pinnoitteen hitsi tunkeutunut yli minimipaksuuden painetta kantavaan ferriittiseen osaan. Tunkeuma  $S_0$  – alueelle vaihteli





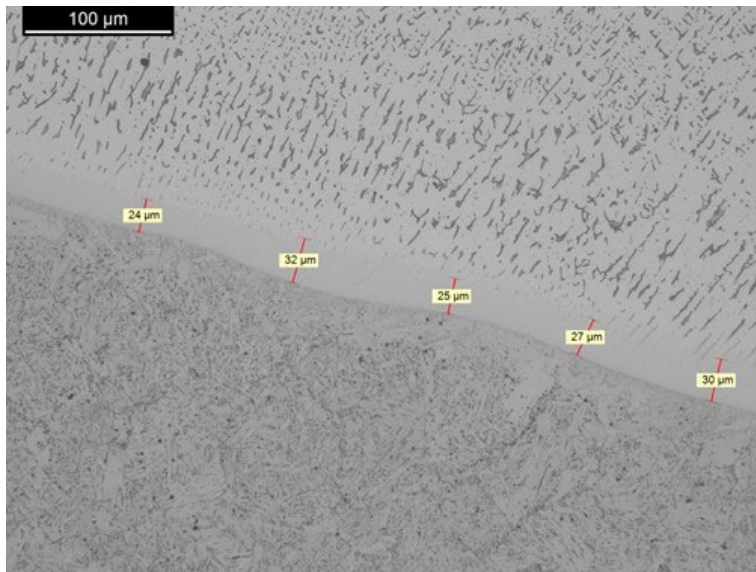
välillä 0 – 1.06 mm. Asennossa PH hitsattujen koehitsien tunkeuma oli suurempi, mikä oli odotettavissa, koska lämmöntuonti on pienempi asennossa PC.

Taulukko 4.4 – Koehitsien pinnoitehitsin tunkeumaa kuvaavat mitat  $S_\alpha$  ja  $\Delta S_0$ .

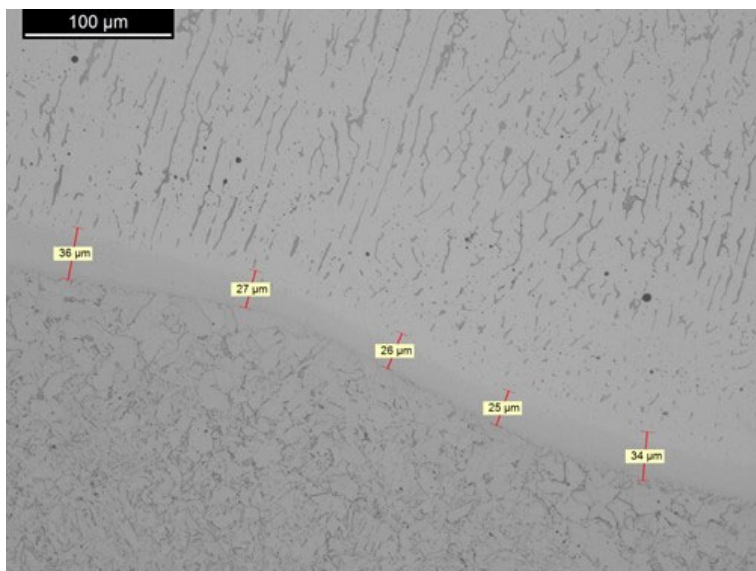
| n:o | ID    | lisäaine | putki          | asento | $S_\alpha$<br>mm | $\Delta S_0$<br>mm |
|-----|-------|----------|----------------|--------|------------------|--------------------|
| 1   | NPS10 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 4.01             | -0.18              |
| 2   | NPS10 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 3.94             | -0.25              |
| 3   | NPS10 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 4.25             | 0.06               |
| 4   | NPS10 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 3.87             | -0.32              |
| 5   | NPS10 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 4.14             | -0.05              |
| 6   | NPS10 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 4.11             | -0.08              |
| 7   | NPS70 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 4.12             | -0.07              |
| 8   | NPS70 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 3.67             | -0.52              |
| 9   | NPS70 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 3.87             | -0.32              |
| 10  | NPS70 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 3.72             | -0.47              |
| 11  | NPS70 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 3.79             | -0.40              |
| 12  | NPS70 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 3.13             | -1.06              |
| 13  | NPS71 | 67.60    | 3R12/4L7       | PC     | 3.96             | -0.23              |
| 14  | NPS71 | 67.60    | 3R12/4L7       | PH     | 3.86             | -0.33              |
| 15  | NPS71 | NiCro    | 3R12/4L7       | PC     | 4.21             | 0.02               |
| 16  | NPS71 | NiCro    | 3R12/4L7       | PH     | 4.15             | -0.04              |
| 17  | NPS71 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PC     | 3.94             | -0.25              |
| 18  | NPS71 | NiCro    | Sanicro 38/4L7 | PH     | 3.56             | -0.63              |

#### 4.1 Mikrorakenne

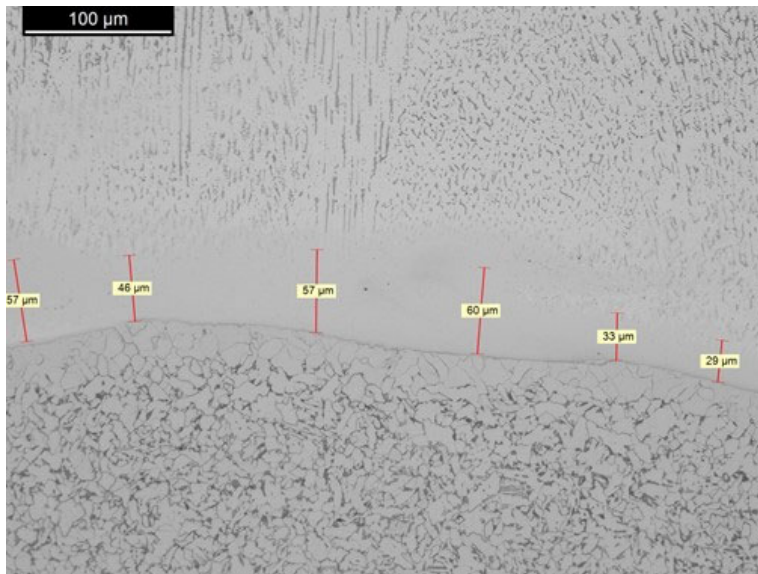
Mikrorakennetutkimuksella selvitettiin mahdollisen martensiittialueen esiintymistä ja sen leveyttä OK 67.60 lisäaineella hitsatuista koehitseistä. Kuvissa 4.1 – 4.6 on esitetty 3R12/4L7 putkien hitsiaineen OK 67.60 / OK 13.09 palkojen välinen sularaja. Kaikissa koehitseissä esiintyi syöpymätön alue sularajasta pinnoitteen hitsiin päin mentäessä. Kuvissa on nähtävissä alueen leveyttä kuvaavat mittajanat.



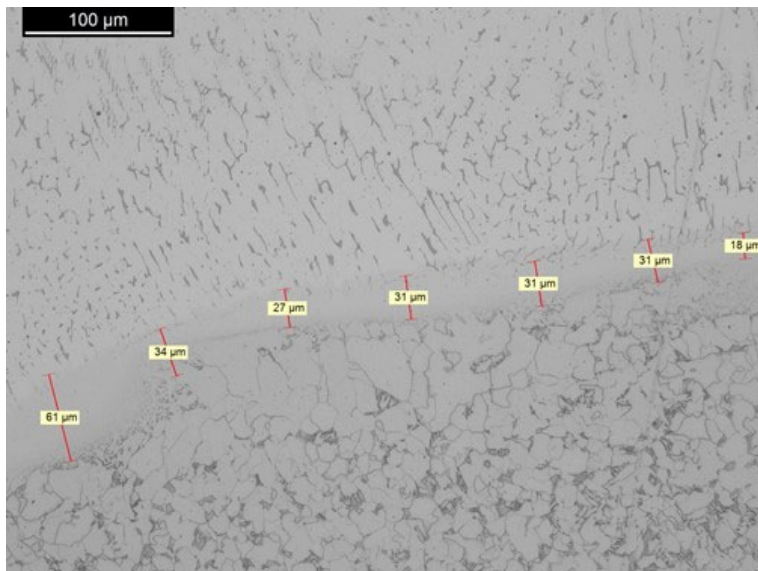
Kuva 4.1 – Koehitsi nro 1, OK 67.60 / OK 13.09 palkojen rajapinta.



Kuva 4.2 – Koehitsi nro 2, OK 67.60 / OK 13.09 palkojen rajapinta.

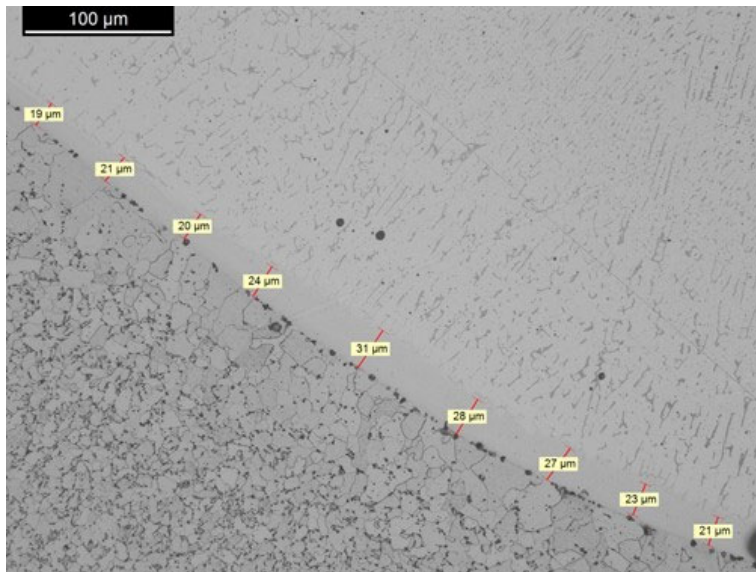


Kuva 4.3 - Koehitsi nro 7, OK 67.60 / OK 13.09 palkojen rajapinta.

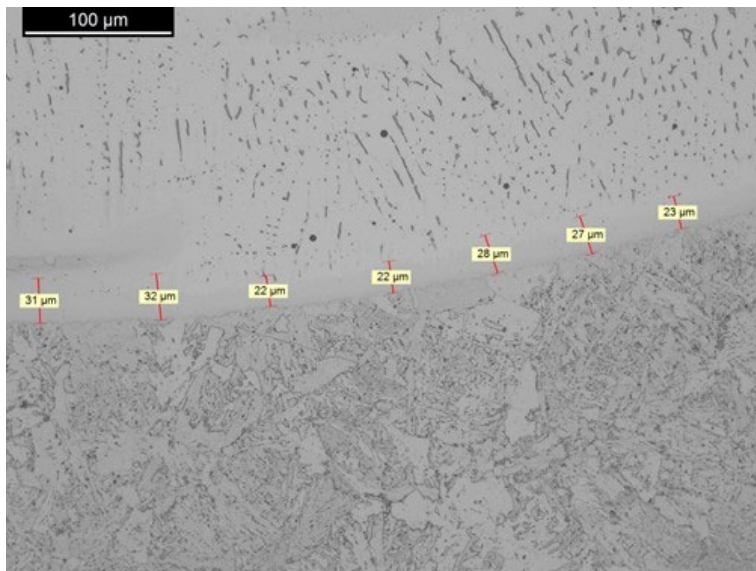


Kuva 4.4 - Koehitsi nro 8, OK 67.60 / OK 13.09 palkojen rajapinta.





Kuva 4.5 - Koehitsi nro 13, OK 67.60 / OK 13.09 palkojen rajapinta.



Kuva 4.6 - Koehitsi nro 14, OK 67.60 / OK 13.09 palkojen rajapinta.



Vyöhykkeen leveys määritettiin kuvien mukaisesti käänteismikroskoopin kuva-analysointiohjelmistolla. Mittaustulokset on annettu taulukossa 4.5. Leveys vaihteli välillä 13 – 104  $\mu\text{m}$ .

Taulukko 4.5 – Syöpymättömän vyöhykkeen leveydet.

| Näyte / wöhykkeen leveys [µm] |     |     |      |     |      |      |
|-------------------------------|-----|-----|------|-----|------|------|
| 1                             | 2   | 7   | 8    | 13  | 14   |      |
| 24                            | 36  | 18  | 61   | 19  | 31   |      |
| 32                            | 27  | 20  | 34   | 21  | 32   |      |
| 25                            | 26  | 19  | 27   | 20  | 22   |      |
| 27                            | 25  | 17  | 31   | 24  | 22   |      |
| 30                            | 34  | 17  | 31   | 31  | 28   |      |
| 26                            |     | 57  | 31   | 28  | 27   |      |
| 26                            |     | 56  | 18   | 27  | 23   |      |
| 25                            |     | 57  | 27   | 23  | 50   |      |
| 23                            |     | 60  | 32   | 21  | 59   |      |
| 24                            |     | 33  | 42   | 25  | 61   |      |
|                               |     | 29  | 33   | 21  | 60   |      |
|                               |     | 20  | 24   | 20  | 52   |      |
|                               |     | 22  | 23   | 19  | 37   |      |
|                               |     | 22  | 22   | 16  | 44   |      |
|                               |     | 20  | 20   | 16  | 45   |      |
|                               |     | 18  | 23   | 13  | 70   |      |
|                               |     | 19  | 28   | 68  | 66   |      |
|                               |     | 104 | 25   | 62  | 29   |      |
|                               |     | 71  | 27   | 44  | 76   |      |
|                               |     | 48  | 26   | 31  | 84   |      |
|                               |     | 44  | 32   | 30  |      |      |
|                               |     | 41  | 45   | 21  |      |      |
|                               |     |     | 46   | 20  |      |      |
|                               |     |     | 41   | 19  |      |      |
|                               |     |     | 35   | 18  |      |      |
|                               |     |     | 32   | 20  |      |      |
|                               |     |     | 26   | 20  |      |      |
|                               |     |     | 27   | 22  |      |      |
|                               |     |     |      | 27  |      |      |
|                               |     |     |      | 23  |      |      |
|                               |     |     |      | 24  |      |      |
| k.a.:                         | 26  | 30  | 37   | 31  | 26   | 46   |
| haj.                          | 2.8 | 5.0 | 23.0 | 9.2 | 12.0 | 19.4 |

NICRO 31/27 lisäaineella hitsatuissa näytteissä ei esiintynyt vastaavanlaista syöpymätöntä aluetta.



## 4.2 Pinnoitteen hitsin ferriittipitoisuus

Ferritscopella mitatut ja metallografisten mittausten perusteella määritetyt ferriittipitoisuudet on annettu taulukossa 4.4. Lisäaineella 67.60 hitsatuissa koehitseissä ferriittipitoisuus vaihteli Ferritscope mittausten perusteella välillä 4.1 – 14.9% ja metallografisten mittausten perusteella välillä 8.4 – 29.7%. Lisäaineella NICRO 31/27 hitsatuissa koehitseissä ferriittipitoisuus vaihteli välillä 0.26 – 0.79%.

Taulukko 4.6 – Koehitsien  $\delta$ -ferriittipitoisuudet.

| n:o | ID    | lisäaine | putki    | asento | $\delta$ - % |         |
|-----|-------|----------|----------|--------|--------------|---------|
|     |       |          |          |        | FS           | mikrok. |
| 1   | NPS10 | 67.60    | Compound | PC     | 9.0          | 29.7    |
| 2   | NPS10 | 67.60    | Compound | PH     | 11.6         | 28.6    |
| 3   | NPS10 | NiCro    | Compound | PC     | 0.4          |         |
| 4   | NPS10 | NiCro    | Compound | PH     | 0.3          |         |
| 5   | NPS10 | NiCro    | Sanicro  | PC     | 0.3          |         |
| 6   | NPS10 | NiCro    | Sanicro  | PH     | 0.4          |         |
| 7   | NPS70 | 67.60    | Compound | PC     | 14.1         | 24.2    |
| 8   | NPS70 | 67.60    | Compound | PH     | 14.9         | 29.0    |
| 9   | NPS70 | NiCro    | Compound | PC     | 0.4          |         |
| 10  | NPS70 | NiCro    | Compound | PH     | 0.3          |         |
| 11  | NPS70 | NiCro    | Sanicro  | PC     | 0.3          |         |
| 12  | NPS70 | NiCro    | Sanicro  | PH     | 0.4          |         |
| 13  | NPS71 | 67.60    | Compound | PC     | 4.1          | 23.2    |
| 14  | NPS71 | 67.60    | Compound | PH     | 6.1          | 8.4     |
| 15  | NPS71 | NiCro    | Compound | PC     | 0.5          |         |
| 16  | NPS71 | NiCro    | Compound | PH     | 0.5          |         |
| 17  | NPS71 | NiCro    | Sanicro  | PC     | 0.8          |         |
| 18  | NPS71 | NiCro    | Sanicro  | PH     | 0.3          |         |

## 4.3 Hitsiaineen kemiallinen koostumus

OES – analyysitulokset on annettu taulukossa 4.7. Lisäaineella OK 67.60 hitsattujen liitosten hitsiaineen hiilipitoisuus vaihteli välillä 0.034 – 0.044 p-%, kromipitoisuus välillä 20.8 – 23.2 p-% ja nikkelipitoisuus välillä 10.7 – 11.9 p-%. Kromiekvivalentin arvo vaihteli välillä 21.84 – 24.30 ja nikkeliekvivalentin arvo välillä 12.39 – 13.61. Koehitseissä nro 13 ja





14 hitsiaineen kromipitoisuus jäi alle standardin SFS-EN ISO 3581:2016 vaatimuksen (%Cr = 22.0 – 25.0). Tämä johtui todennäköisesti hitsin jähmettymisen yhteydessä tapahtuvasta seosaineiden suotautumisesta.

Lisäaineella NICRO 31/27 hitsattujen liitosten hitsiaineen hiilipitoisuus vaihteli välillä 0.026 – 0.038 p-%, kromipitoisuus välillä 22.52 – 25.39 p-% ja nikkelpitoisuus välillä 26.85 – 30.34 p-%. Kromiekvivalentin arvo vaihteli välillä 26.29 – 29.50 ja nikkeliyekvivalentin arvo välillä 28.33 – 31.63. Hitsiaineiden kromi- ja nikkelpitoisuudet jäivät alle standardin SFS-EN ISO 3581:2016 vaatimuksen.

Taulukko 4.7 – Hitsiaineiden OES – analyysitulokset.

| n:o | ID    | lisäaine | asento | %C    | %Si   | %Mn   | %Cr    | %Mo   | %Ni    | %Nb   | %Ti   | Crekv. | Niekv. |
|-----|-------|----------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 1   | NPS10 | 67.60    | PC     | 0.041 | 0.671 | 0.870 | 22.960 | 0.090 | 11.940 | 0.010 | 0.017 | 24.06  | 13.61  |
| 2   | NPS10 | 67.60    | PH     | 0.039 | 0.654 | 0.831 | 23.200 | 0.091 | 11.900 | 0.012 | 0.016 | 24.28  | 13.49  |
| 5   | NPS10 | NiCro    | PC     | 0.031 | 0.760 | 0.725 | 25.260 | 3.008 | 30.340 | 0.044 | 0.023 | 29.43  | 31.63  |
| 6   | NPS10 | NiCro    | PH     | 0.038 | 0.690 | 0.687 | 22.520 | 2.737 | 26.850 | 0.005 | 0.024 | 26.29  | 28.33  |
| 7   | NPS70 | 67.60    | PC     | 0.034 | 0.648 | 0.869 | 23.230 | 0.089 | 11.780 | 0.013 | 0.017 | 24.30  | 13.23  |
| 8   | NPS70 | 67.60    | PH     | 0.039 | 0.574 | 0.825 | 22.940 | 0.097 | 11.320 | 0.016 | 0.016 | 23.91  | 12.90  |
| 13  | NPS71 | 67.60    | PC     | 0.044 | 0.599 | 0.804 | 20.820 | 0.117 | 10.670 | 0.014 | 0.014 | 21.84  | 12.39  |
| 14  | NPS71 | 67.60    | PH     | 0.041 | 0.610 | 0.812 | 22.150 | 0.098 | 10.820 | 0.013 | 0.016 | 23.17  | 12.46  |
| 15  | NPS71 | NiCro    | PC     | 0.026 | 0.774 | 0.727 | 25.390 | 2.928 | 29.110 | 0.049 | 0.023 | 29.50  | 30.25  |
| 16  | NPS71 | NiCro    | PH     | 0.030 | 0.746 | 0.755 | 24.380 | 2.853 | 28.670 | 0.050 | 0.023 | 28.38  | 29.95  |



## 5 TULOSTEN TARKASTELU

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko compoundputkien pinnoitteen hitsin tunkeumalla vaikutusta liitoksen lujuuteen. Kattilaputkistandardin SFS-EN 12952-6:2011 kohdassa A.2.2.2.1 on seuraava vaatimus: ”Tunkeuma ei saa olla olennaisesti ferriittisen painetta kantavan sisäosan pinnan alapuolella. Ilman tunkeumaa olevan alueen täytyy aina olla vähimmäispaksuuden suuruinen. Pinnoitteen hitsi voi tunkeutua lasketun ferriittiseen painetta kantavaan sisäosaan vähimmäispaksuuteen asti, jos lisäaineen ja hitsiaineen lujuus- ja sitkeysominaisuudet täyttävät ferriittisen painetta kantavan sisäosan materiaaliominaisuudet ja pinnoitteen hitsin enimmäistunkeuma laskettuun ferriittisen painetta kantavan sisäosan vähimmäispaksuuteen on 1.5 mm.”

### ***5.1 Hitsin lujuuteen ja sitkeyteen vaikuttavat tekijät***

Luvun 4.2 tulosten perusteella voidaan todeta, että hitsausasennolla (PC/PH) tai tunkeumalla ei ollut vaikutusta liitosten lujuuteen, koska kaikki vetosauvat murtuivat perusaineesta. Korotetun lämpötilan ( $T=380^{\circ}\text{C}$ ) vetolujuus ( $R_{p0.2}$ ) vaihteli välillä 200 – 265 MPa ja oli keskimäärin 60% vaatimusta (131 MPa) korkeampi.

Jos asiaa tarkastellaan ottamalla huomioon lisäaineiden ja perusaineen huoneenlämpötilan lujuudet, havaitaan että murtuman sijainti hitsiaineessa on erittäin epätodennäköistä. Taulukossa 5.1 on annettu standardien ja ainestodistusten mukaiset lujuudet. Ainoastaan NICRO 31/27 lisäaineen standardin mukainen myötölujuus on yhtä suuri kuin sitä vastaavan perusaineen Sanicro 38. Lisäaineiden ainestodistusten mukaiset myötölujuudet ovat 40 – 60% korkeampia kuin putken perusaineen. Tämän perusteella on erittäin epätodennäköistä, että hitsin vetokokeessa vetosauva alkaisi myötymään hitsiaineesta.

Menetelmäkokeessa hitsiliitoksen murtolujuuden pitää olla vähintään sama kuin perusaineen. Taulukon 5.1 ainestodistusten arvojen perusteella lisäaineilla on 20 – 30%

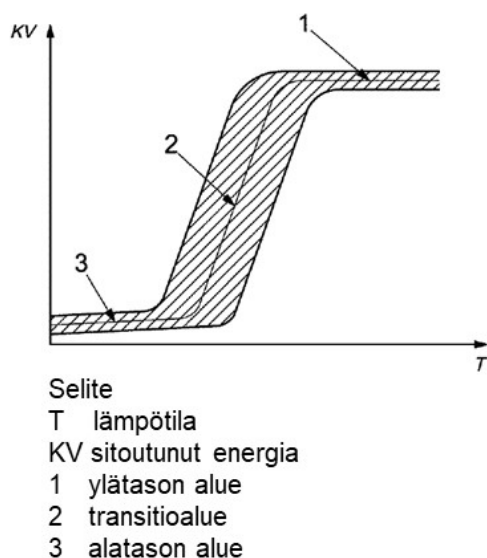


suuremmat murtolujuudet eli vetosauvan murtuminen hitsin vetokokeessa tapahtuu todennäköisesti perusaineen puolelta.

Taulukko 5.1 – Testattujen perus- ja lisäaineiden mekaanisia ominaisuuksia.

| Teräs/lisäaine   | std        | standardin vaatimus |                |           | ainestodistus       |                |          |
|------------------|------------|---------------------|----------------|-----------|---------------------|----------------|----------|
|                  |            | $R_{p0.2}$<br>[MPa] | $R_m$<br>[MPa] | A<br>[%]  | $R_{p0.2}$<br>[MPa] | $R_m$<br>[MPa] | A<br>[%] |
| 4L7 (P265GH)     | EN 10216-2 | $\geq 265$          | 410 - 570      | $\geq 25$ | -                   | -              | -        |
| 3R12 (EN 1.4306) | EN 10216-5 | $\geq 215$          | 460 - 680      | $\geq 40$ | -                   | -              | -        |
| Sanicro 38       | UNS N08825 | $\geq 241$          | $\geq 586$     | $\geq 30$ | -                   | -              | -        |
| 3R12/4L7         | -          | -                   | -              | -         | 292                 | 503            | 39       |
| San38/4L7        | -          | -                   | -              | -         | 316                 | 490            | 34       |
| OK 13.09         | EN 21952-A | $\geq 355$          | $\geq 510$     | $\geq 22$ | 490                 | 600            | 30       |
| OK 67.60         | ISO 3581-A | $\geq 350$          | $\geq 550$     | $\geq 25$ | 470                 | 580            | 32       |
| NICRO 31/27      | ISO 3581-A | $\geq 240$          | $\geq 500$     | $\geq 25$ | 440                 | 640            | 38       |

Koehitsien iskutkeys oli hyvä. Iskuenergian arvot ( $KV_c = 130 - 176$ ) ovat selkeästi terästen iskutkeysikäytymistä kuvaavan sitoutunut energia/lämpötila kuvaajan ylätasoon alueella (ks. kuva 5.1).



Kuva 5.1 – Sitoutunut energia/lämpötila kuvaaja. (SFS-EN ISO 148-1 2016, 23)





## 5.2 Pinnoitteen hitsin ferriittipitoisuus

Metallografisten mittausten perusteella OK 67.60 lisäaineella hitsatuissa koehitseissä ferriittipitoisuus vaihteli välillä n. 8 – 30%. Mittaukset tehtiin myös Fischerin Ferritscope mittarilla, jolloin pitoisuudet olivat paljon matalampia ja olivat välillä 4 – 15%.

Metallografinen määrittystapa on tarkempi ja luotettavampi analysointimenetelmä. Ainetta rikkovana menetelmänä sillä on kuitenkin rajoituksensa ja se on huomattavasti työläämpi tehdä kuin Ferritscope mittausta.

NICRO 31/27 lisäaineella hitsatuista koehitseistä mittausta tehtiin vain Ferritscopella, ferriittipitoisuus oli kaikissa tapauksissa alle 0.8%.

Austeniittisten ruostumattomien terästen hitsauslisäaineissa on normaalisti deltaferriittiä, koska se vähentää merkittävästi kuumahalkeiluriskiä. Hitsissä oleva deltaferriitti voi kuitenkin altistaa hitsin nk. 475°C – hauraudelle, jonka johdosta materiaalin sitkeys heikkenee paikallisesti.

Hitsiaineen ferriittipitoisuutta voidaan arvioida erilaisten ferriittidiagrammien (mm. Schaeffler, DeLong, Bystram ja WRC1992) avulla.

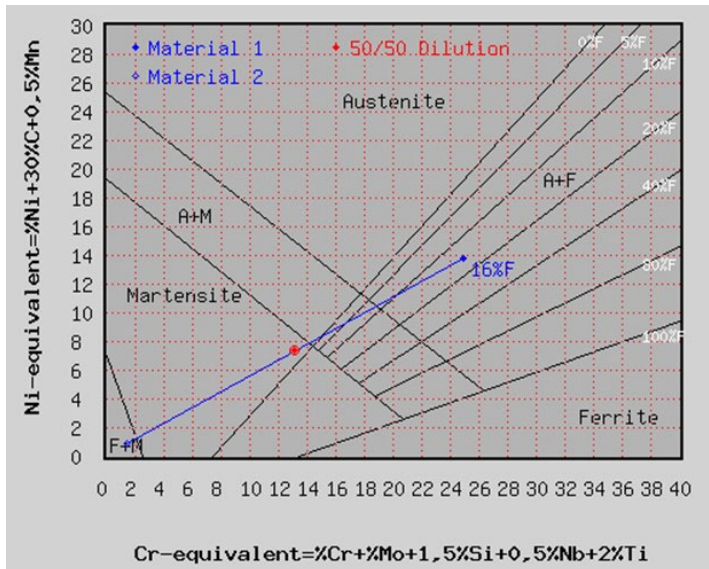
Kuvassa 5.2 on esitetty OK 67.60 (ISO 3581-A E 23 12 L R 3 2) lisäaineen sijainti Schaeffler – diagrammissa. kemiallisesta koostumuksesta lasketut kromi- ja nikkeliekvivalentin arvot ovat:  $Cr_{ekv.} = 24.9$  ja  $Ni_{ekv.} = 13.75$ . Kuvan mukaan hitsiaineessa on n. 16% deltaferriittiä.

Hitsin jäähtymisnopeus vaikuttaa merkittävästi syntyvän  $\delta$ -ferriitin määrään. Kuvassa 5.3 on esitetty lämmöntuonnin vaikutus  $\delta$ -ferriitin määrään ER 308L tyyppisellä lisäaineella, jonka kemiallisesta koostumuksesta lasketut kromi- ja nikkeliekvivalentin arvot ovat:  $Cr_{ekv.} = 20.0$  ja  $Ni_{ekv.} = 12.0$ . (Sejc 2011)

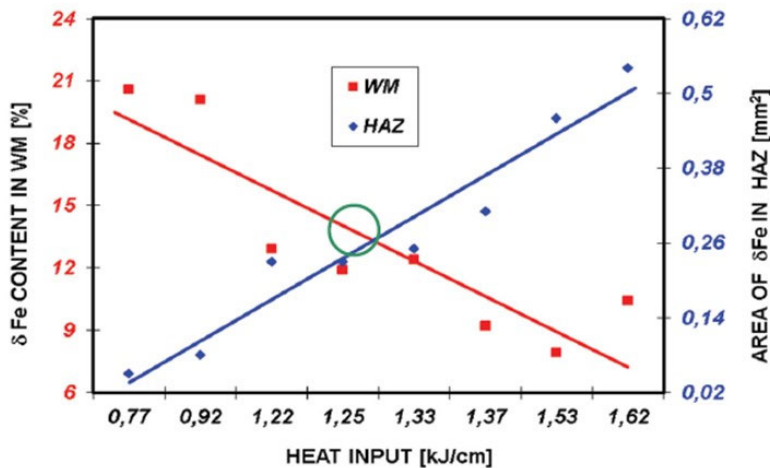
Alustavien hitsausohjeiden perusteella 3R12/4L7 putkien tapauksessa pinnoitteen hitsin lämmöntuonnit saavat vaihdella välillä 0.18-1.26 kJ/mm. Kuvan 5.3 mukaan  $\delta$ -



ferriittipitoisuus kasvaa, kun lämmöntuonti pienenee ollen n. 20% kuvan pienimmällä lämmöntuonnin arvolla  $Q = 0.77 \text{ kJ/mm}$ .



Kuva 5.2 – 3R12/4L7 putken hitsin ferriittipitoisuus (Material 1 = OK 67.60, Material 2 = OK TIGROD 13.09).



Kuva 5.3 – Lämmöntuonnin vaikutus ER 308L tyyppisen lisäaineen  $\delta$ -ferriittipitoisuuteen. (Sejc 2011, 14)

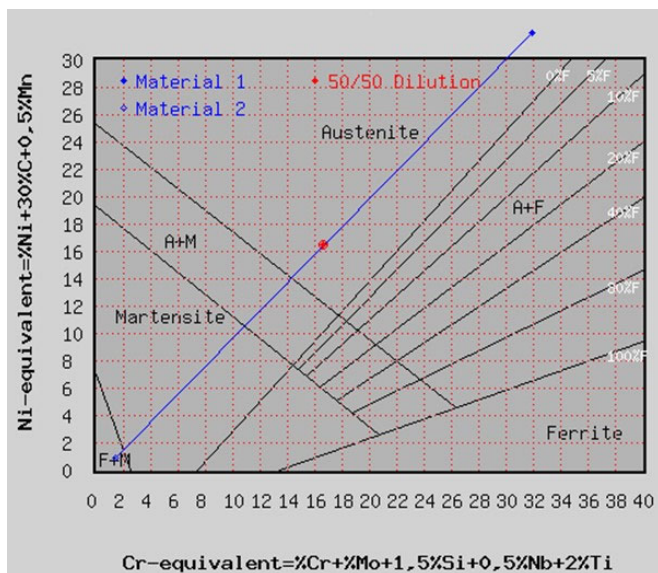


ASME Section IID mukaiset  $\delta$ -ferriittipitoisuuden suositusarvot on annettu taulukossa 5.2. Lämpötilan kasvaessa sallittu  $\delta$ -ferriittipitoisuus pienenee. Kattila-alueella sen pitäisi olla taulukon mukaan alle 20%, kun lämpötila on luokkaa 380°C. Tämän perusteella hitsauksessa pitäisi välttää pientä lämmöntuontia.

Taulukko 5.2 – Sallitun  $\delta$  – ferriittipitoisuuden ohjearvot. (ASME 2011, 863)

| $\delta\%$ | lämpötila, °C |     |     |     |     |     |            |
|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|------------|
|            | 260           | 315 | 370 | 425 | 480 | 540 | $\geq 595$ |
| 0          | -             | -   | -   | -   | -   | -   | C          |
| 5          | -             | -   | -   | -   | -   | -   | C          |
| 10         | -             | -   | -   | -   | C   | C   | C          |
| 15         | -             | -   | -   | C   | C   | C   | C          |
| 20         | -             | -   | C   | C   | C   | C   | C          |
| 25         | -             | C   | C   | C   | C   | C   | C          |
| 30         | -             | C   | C   | C   | C   | C   | C          |
| 35         | C             | C   | C   | C   | C   | C   | C          |
| 40         | C             | C   | C   | C   | C   | C   | C          |

Kuvan 5.3 perusteella NICRO 31/27 lisäaineella hitsattaessa  $\delta$  – ferriittiä ei muodostu.



Kuva 5.4 – Sanicro 38/4L7 putken hitsin ferriittipitoisuus (Material 1 = OK NICRO 31/27, Material 2 = OK TIGROD 13.09).

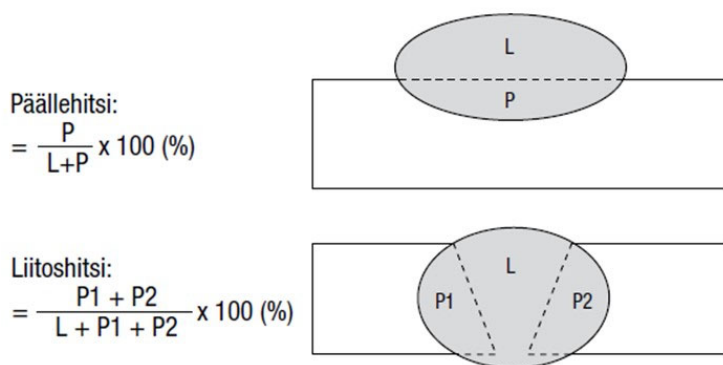




### 5.3 Martensiitin muodostuminen

Austeniittisen ruostumattoman ja ferriittisen C-Mn teräksen välisessä sekaliitoksessa on olemassa riski siihen, että hitsiaineeseen muodostuu martensiittia. Kirjallisuuden ja kokemukseräisen tiedon perusteella martensiitin syntyminen sekoittumisvyöhykkeelle voi aiheuttaa liitoksen säröilyä korkean lämpötilan käytössä. Gittos ja Gooch havaitsivat tutkimuksessaan martensiitin aiheuttavan säröilyä hitsin sivutaivutuskokeessa (Mäkelä 2019; Gittos ja Gooch 1992, 469).

Hitsiaineen koostumus ja mikrorakenne määräytyvät sulaneiden perusaineiden koostumuksista ja sulaneen lisääineen koostumuksesta sekoittumisasteen osoittamassa suhteessa. Sekoittumisasteella tarkoitetaan sulaneiden perusaineiden osuutta hitsiaineessa (ks. kuva 5.5). Sekoittumisella ja sekoittumisasteella on eripariliitosten hitsauksessa paljon suurempi merkitys kuin samapariliitosten hitsauksessa, koska se vaikuttaa merkittävästi syntyvän hitsiaineen koostumukseen ja siten ominaisuuksiin. (Lukkari ym. 2016, 334-335)

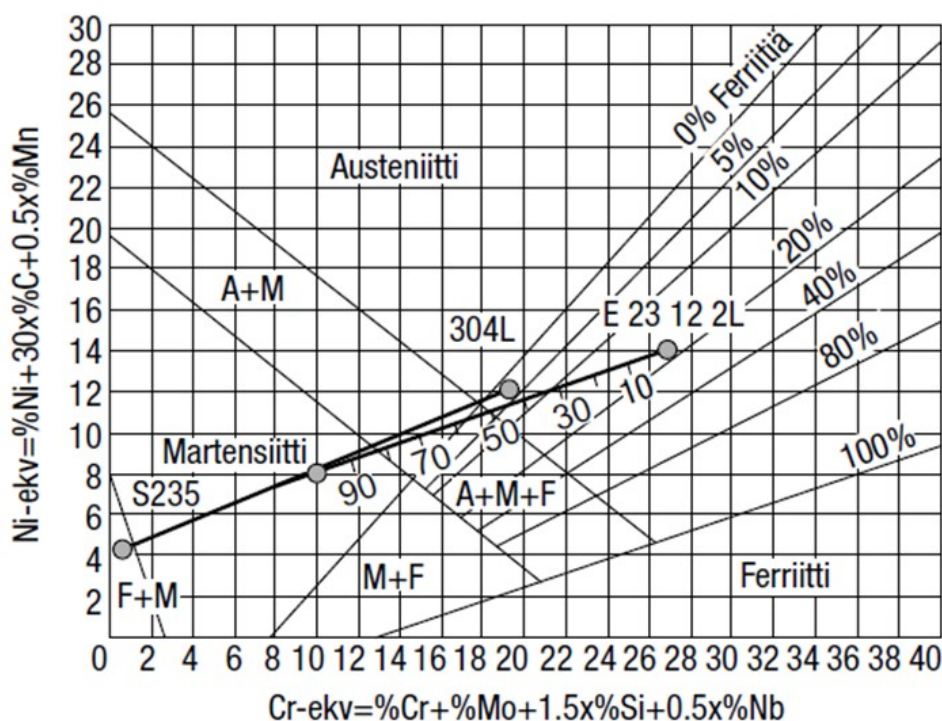


Kuva 5.5 – Sekoittumisaste. (Lukkari ym. 2016, 334)

Sekoittumisaste riippuu hitsausprosessista ja on TIG – hitsaukselle (prosessi 141) 20 – 40% ja puikkohitsaukselle (prosessi 111) 15 – 30%.



Ferriittipitoisuuden lisäksi Schaefflerin diagrammilla voidaan ennustaa hitsiaineen koostumusta. Diagrammiin sijoitetaan tällöin perusaineiden ja lisäaineen pisteet paikoilleen. Diagrammissa eriparihitsiainetta kuvaava piste sijaitsee viivalla, joka yhdistää käytettävän lisäaineen ja perusaineiden pisteiden yhdistysjanan. Eriparihitsiaineen paikka tällä viivalla riippuu sekoittumisasteesta, jota numerot (= %-luvut) kuvassa esittävät. Jos sekoittumisaste on esim. tyypillinen 30%, niin kuvassa 5.6 hitsiaineen mikrorakenne on austeniittinen, jossa on noin 10% ferriittiä. (Lukkari ym. 2016, 337)

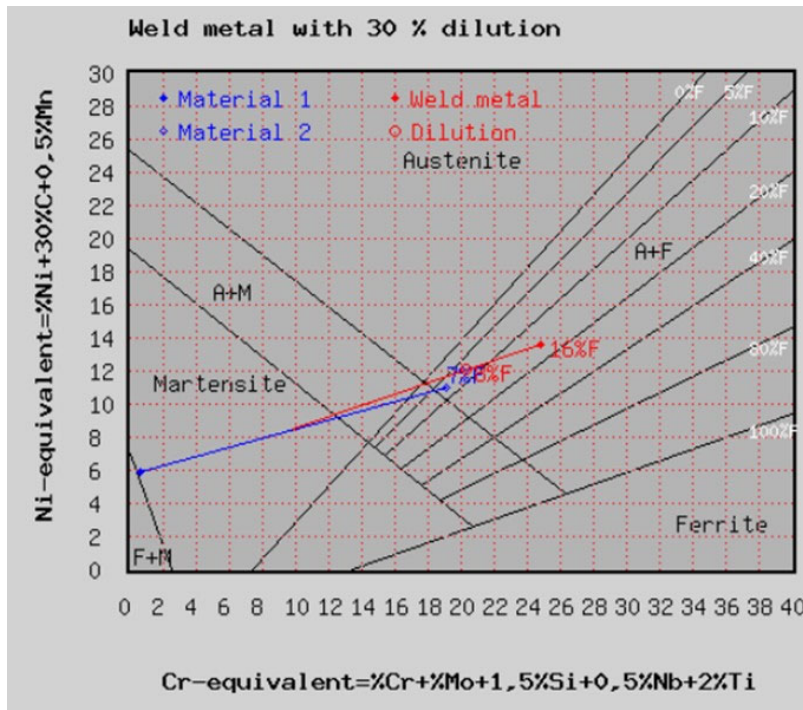


Kuva 5.6 - Eriparihitsin koostumuksen muodostuminen Schaefflerin diagrammissa.

Sekoittumisasteen pienentyessä martensiitin syntymisen todennäköisyys kasvaa ja päinvastoin.



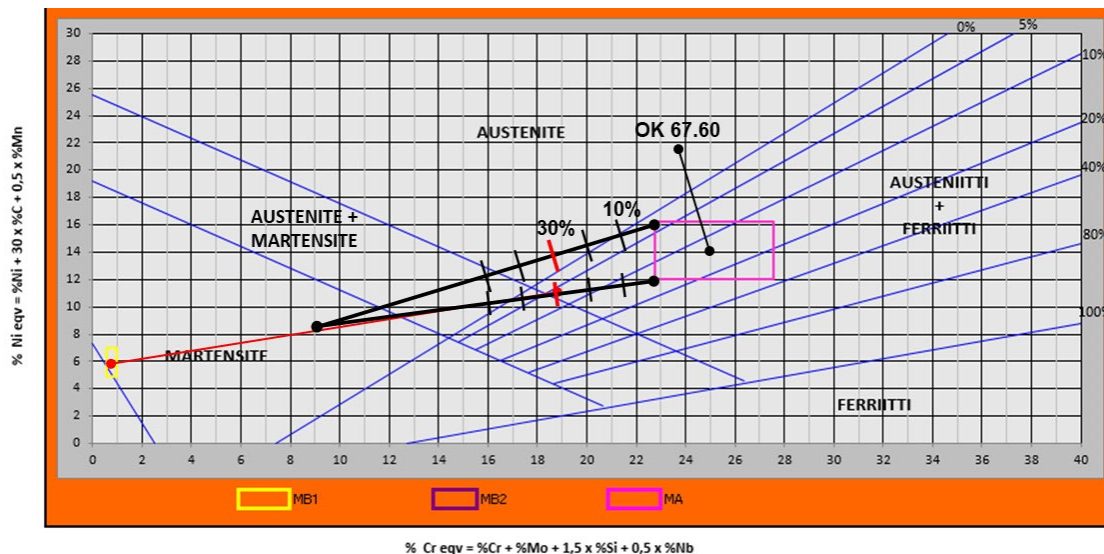
Jos käytetään enimmäissekoittumisastetta (30%) ja tehdään sen perusteella Schaefflerin diagrammi ainestodistusten mukaisilla kemiallisilla koostumuksilla, saadaan kuvan 5.6 mukainen tulos. Eli martensiittia voi syntyä hitsiaineeseen suurilla sekoittumisasteilla.



Kuva 5.7 – Ainestodistusten mukaisilla koostumuksilla laskettu Schaefflerin diagrammi, sekoittumisasteen ollessa 30% (Material 1 = 4L7, Material 2 = 3R12, Weld metal = OK 67.60).

Kuvassa 5.8 on esitetty, miten lisääineen standardin SFS-EN ISO 3581:2016 mukainen koostumuksen vaihtelu vaikuttaa hitsiaineen mikrorakenteeseen. Kuvan perusteella on epätodennäköistä, että liitokseen syntyy martensiittia sekoittumisasteen ollessa 30% tai vähemmän. Tämä merkitsee sitä, että esim. prosessilla 141 hitsattaessa lisääineen koostumuksen ollessa standardin alarajalla, martensiitin syntyminen on huomioitava vakavana riskinä.



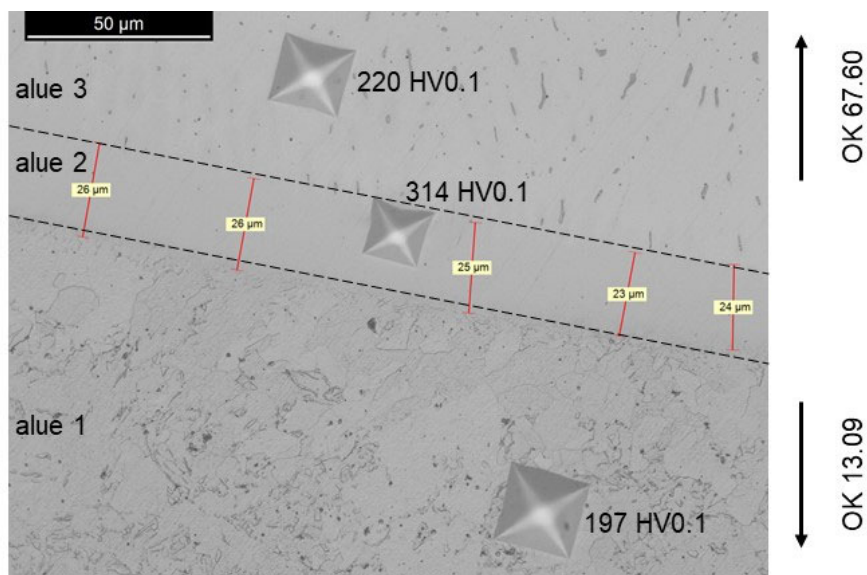


Kuva 5.8 – Lisäaineen standardin mukaisen koostumusvaihtelun vaikutus hitsiaineen mikrorakenteeseen.

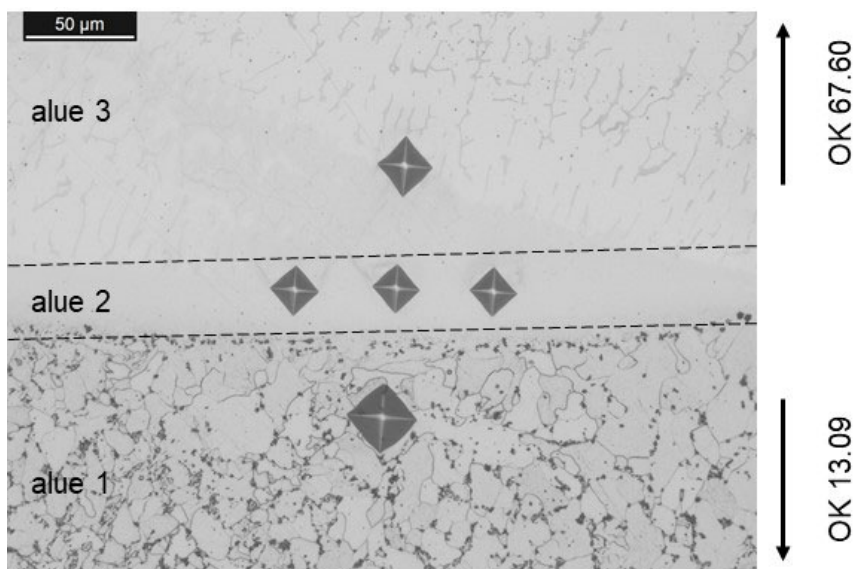
Mikrorakennetarkastelu osoitti, että OK 67.60 lisäaineella hitsattujen näytteiden mikrorakenteessa oli vyöhyke, joka ei syöplynyt kummallakaan käytetyllä syövytteellä (ks. luku 4.1). Tästä vyöhykkeestä tehtiin mikrokovuusmittauksia, jotka osoittivat, että kovuus oli siinä huomattavasti korkeampi kuin ympäristössä. Kuvassa 5.9 nähdään kyseinen vyöhyke, jonka leveys on luokkaa 25 µm. Kuvan mukaan vyöhykkeen kovuus on 314 HV0.1, kun taas kovuudet sen vieressä ovat huomattavasti pienempiä. Tämän perusteella mikrorakenne on tällä kohdalla epähomogeeninen ja kovuudessa on huomattavaa eroa.

Kirjallisuuden mukaan martensiitti aiheuttaa suurta vaihtelua mikrorakenteessa ja liitoksen mekaanisissa ominaisuuksissa. Tämä puolestaan kasvattaa riskiä liitoksen ennenaikaisiin vaurioihin korkean lämpötilan käytössä. (DuPont ja Kusko 2007, 51)

Kaikista OK 67.60 lisäaineella hitsatuista näytteistä (näytteet 1, 2, 7, 8, 13 ja 14) mitattiin mikrokovuudet kuvan 5.10 periaatteen mukaisesti.



Kuva 5.9 – Syöpymätön vyöhyke OK 13.09/OK 67.60 sularajalla.



Kuva 5.10 – Mikrokovuusmittausten paikoituksen periaate.



Mikrokovuusmittausten tulokset on annettu taulukossa 5.3, jonka mukaan vyöhykkeen 2 kovuus vaihteli välillä 259 – 405 HV0.1. Tämä on selvä osoitus siitä, että mikrorakenteeseen on muodostunut martensiittia lisäaineiden väliseen osittain sekoittuneeseen vyöhykkeeseen. Tulos vastaa mm. DuPont ja Kusko, Nelson ym. sekä Gittos ja Gooch havaintoja. (DuPont ja Kusko 2007; Nelson ym. 1998; Gittos ja Gooch 1992)

Taulukko 5.3 – Mikrokovuusmittausten tulokset.

| näyte | kovuus<br>[HV0.1] |     |     |
|-------|-------------------|-----|-----|
|       | 1                 | 2   | 3   |
| 1     | 197               | 313 | 220 |
| 1     |                   | 310 |     |
| 1     |                   | 305 |     |
| 1     |                   | 327 |     |
| 2     | 198               | 316 | 213 |
| 2     |                   | 405 |     |
| 2     |                   | 396 |     |
| 2     |                   | 338 |     |
| 7     | 192               | 326 | 225 |
| 7     |                   | 389 |     |
| 7     |                   | 363 |     |
| 8     | 166               | 259 | 200 |
| 8     |                   | 263 |     |
| 8     |                   | 276 |     |
| 13    | 176               | 336 | 233 |
| 13    |                   | 329 |     |
| 13    |                   | 322 |     |
| 14    | 173               | 350 | 252 |
| 14    |                   | 310 |     |
| 14    |                   | 294 |     |
| k.a.: | 184               | 326 | 224 |
| haj.: | 14                | 40  | 18  |

Tehtyjen tutkimusten perusteella ei voida esittää sitä, mitkä tekijät vaikuttavat martensiittialueen syntymiseen ja sen laajuuteen. Kirjallisuuden perusteella





sekoittumisaste on olennainen muuttuja, mutta muillakin hitsausparametreilla on vaikutusta. On selvää, että martensiitin aiheuttama mikrorakenteen ja mekaanisten ominaisuuksien epähomogeenisuus on riski pitkäaikaisessa käytössä ja todennäköisesti lyhentää rakenteen elinikää. Ilmiön tarkempi analysointi vaatisi lisätutkimuksia ja toisenlaisen koematriisin.

NICRO 31/27 lisäaineella hitsatuissa näytteissä samasta kohdasta mitatut mikrokovuudet olivat n. 200 HV0.1 eli sekoittumisvyöhykkeessä ei ollut martensiittia. Tämä tukee mikrorakennetutkimuksen havaintoja. Kuvan 5.4 perusteella martensiitin muodostumiseen vaadittaisiin yli 50% sekoittumisaste. Puikkohitsauksella tällainen ei ole mahdollista. TIG – hitsauksella siihen on olemassa riski. Eri hitsausprosesseille tyypilliset sekoittumisasteet ovat (Lukkari ym. 2016, 335):

- puikkohitsaus (111): 15-30 %
- täytelankahitsaus ilman suojakaasua (114): 15-35 %
- jauhekaarhitsaus (12): 30-70 %
- MIG/MAG-umpilankahitsaus (131 ja 135): 25-40 %
- MAG-jauhetäytelankahitsaus (136): 15-35 %
- MAG-metallitäytelankahitsaus (138): 20-40 %
- TIG-hitsaus lisäaineella (141): 20-40 %
- TIG-hitsaus ilman lisäainetta (142): 100 %

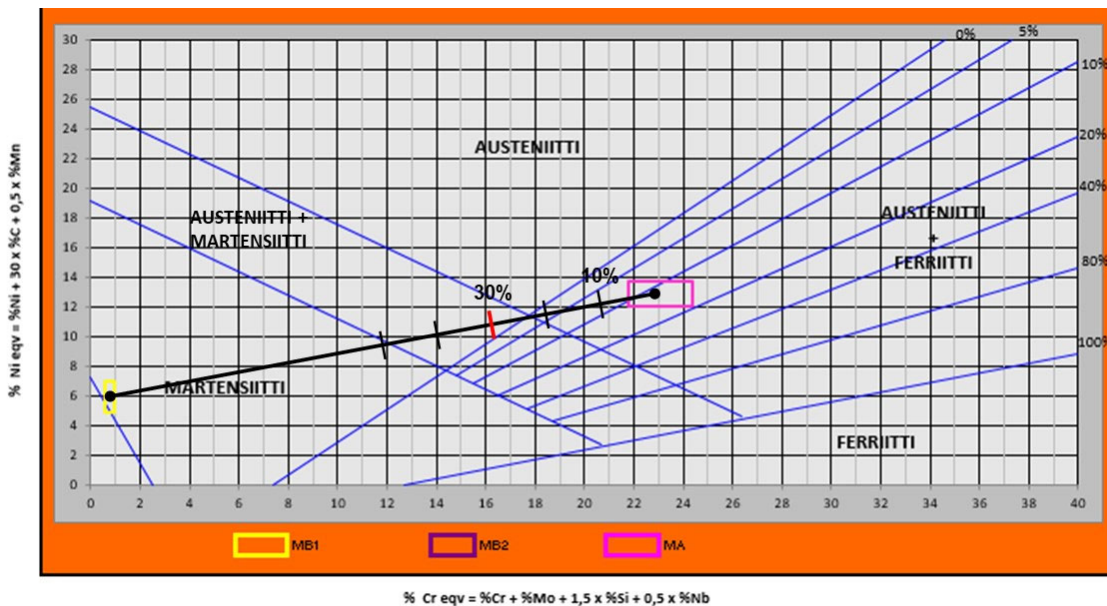
#### **5.4 Hitsiaineen kemiallinen koostumus**

Hitsiaineen kemiallisen koostumuksen analysointi osoitti sen, että seosaineiden pitoisuudet vaihtelivat hitseissä. Lisäaineella OK 67.60 hitsattujen pinnoitteiden kromipitoisuus oli OES – analyysien perusteella koehitsissä nro 13 alle standardin salliman alarajan (%Cr = 22.0). Tehtyjen tutkimusten perusteella tälle ei voida esittää selvää syytä. Kromi rikastuu jähmettymisen yhteydessä muodostuvaan  $\delta$ -ferriittiin, mikä johtaa paikallisiin koostumuseroihin. Periaatteessa on mahdollista, että OES – analysaattorin



polttojälki osuu sellaiseen alueeseen, jossa on vähän deltaferriittiä ja analyysin kromipitoisuus jää tästä syystä keskimääräistä matalammaksi. Asian tarkempi selvittäminen vaatisi jatkotutkimuksia.

Mitattujen kemiallisten koostumusten perusteella lasketut kromiekvivalentin arvot vaihtelivat välillä 21.84 – 24.30 ja nikkeliequivivalentin arvot välillä 12.39 – 13.61. Kuvassa 5.11 on esitetty mikä on sekoittumisvyöhykkeen odotettu mikrorakenne näillä kromi- ja nikkeliequivivalentin vaihteluväleillä. Kuvan perusteella martensiitin syntyminen sekoittumisvyöhykkeeseen on todennäköistä käytetyllä lisäaineella, minkä myös koehitsien mikrorakennetarkastelu osoitti.



Kuva 5.11 – Koehitsien todennäköinen mikrorakenne eri sekoittumisasteilla.

## 5.5 Lisäainesuositus

Tulosten perusteella 3R12/4L7 putkille käytettävä ISO 3581-A E 23 12 L R 2 32 tyyppinen lisäaine (OK 67.60) voi aiheuttaa hitsiliitoksen mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä



sekoittumisvyöhykkeelle muodostuvan martensiitin takia. Tämä puolestaan kasvattaa riskiä hitsiliitoksen käytönaikaiseen säröilyyn. Hitsausparametrien optimointi martensiitin syntymisen välttämiseksi vaatisi jatkotutkimuksia.

Kun käytetään ISO 3581-A E 27 31 4 L R 12 tyyppistä lisäainetta, kuten NICRO 31/27, martensiitin muodostumisesta ei ole vaaraa. Tätä lisäainetta käytettäessä myöskään korkean  $\delta$ -ferriittipitoisuuden aiheuttamista riskeistä ei ole vaaraa. Tässä tutkimuksessa osa 3R12/4L7 putkien hitsauksista tehtiin onnistuneesti NICRO 31/27 lisäaineella, joten sen käytölle ei ole mitään esteitä.

## **5.6 Jatkotutkimukset**

Tehtyjen tutkimusten päätulos oli se, että pinnoitteen hitsin tunkeumalla ei ollut vaikutusta päittäishitsin lujuuteen ja sitkeyteen. Tämä johtui kuitenkin siitä, että kaikki testatut hitsit murtuivat vetokokeessa perusaineesta. Mikrorakennetutkimuksessa löydettiin OK 67.60 lisäaineella hitsatuissa näytteissä eripariliitoksen rajapinnalta kapea martensiittinen vyöhyke, joka nostaa halkeiluriskiä käytön aikana. OK 67.60 lisäaineella hitsatussa liitoksessa hitsiaineen deltaferriittipitoisuudella voi olla vaikutusta hitsin sitkeyteen 475°C haurauden vuoksi.

Nämä havainnot huomioiden on syytä tutkia lisää seuraavia aiheita:

1. Hitsiaineen koostumuksen ja lämmöntuonnin vaikutus eripariliitoksen rajaviivalla esiintyvään martensiittivyöhykkeeseen sekä hitsiaineen deltaferriittipitoisuuteen.
2. Hitausarvojen vaikutus hitsiaineen kemialliseen koostumukseen.
3. Käyttöiän vaikutus putkien hitsin mikrorakenteeseen ja sitkeyteen.
4. Pinnoitteen hitsin tunkeuman vaikutus hitsiaineen lujuuteen ja sitkeyteen erikoisvetokoesauvoja testaamalla (muodonmuutoksen ohjaaminen hitsiaineeseen).





## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli selvittää vaikuttaako compound putken pinnoitteen hitsin tunkeuma painetta kantavaan ferriittiseen putken osaan liitoksen lujuuteen, siten että standardin SFS-EN 12952-2:2011 kohdan A.2.2.2.1 vaatimukset eivät täyty. Tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan todeta seuraavaa:

1. Pinnoitteen hitsin tunkeumalla ei ollut vaikutusta korotetun lämpötilan venymislujuuteen, koehitsit olivat keskimäärin 60% standardin vaatimusta lujempia.
2. Koehitsien murtovenymät ja iskusitkeys olivat vaatimusten mukaisia.
3. Mekaanisien ominaisuuksien puolesta pinnoitteen hitsi voi tunkeutua painetta kantavaan ferriittiseen osaan standardin SFS-EN 12952-6:2011 liitteen A sallimissa rajoissa eli pinnoitteen hitsin enimmäistunkeuma laskettuun ferriittisen painetta kantavan sisäosan vähimmäispaksuuteen ( $S_0$ ) saa olla enintään 1.5 mm.
4. OK 67.60 lisäaineella hitsattaessa riskinä on martensiitin muodostuminen ferriittisen perus- ja/tai hitsiaineen sularajan viereen sekoittumisvyöhykkeelle, mikä heikentää liitoksen korkean lämpötilan ominaisuuksia ja kasvattaa käytönaikaisen säröilyn riskiä.
5. Toisena riskinä OK 67.60 lisäaineen käytössä on liian korkea hitsin  $\delta$ -ferriittipitoisuus, joka haurastuttaa hitsiaineen 475°C – haurauden takia.
6. Hitsin kestävyys kannalta on järkevintä käyttää E 27 31 4 L R 12 tyyppistä lisäainetta (esim. Lincoln Electricin NICRO 31/27) molemmille 3R12/4L7 ja Sanicro38/4L7 putkille.



## 7 LÄHDELUETTELO

- ASME. 2011. Boiler and Pressure Vessel Code. Section II. Part D.
- ASTM. 2005. B424. Standard Specification for Ni-Fe-Cr-Mo-Cu Alloy (UNS N08825 and UNS N08221)\* Plate, Sheet, and Strip.
- DuPont J. N., Kusko C.S. Technical Note: Martensite Formation in Austenitic/Ferritic Dissimilar Alloy Welds. Welding Journal. 2007. pp. 51 – 54.
- ESAB a. 2019. OK Tigrod 13.09. Tekniset tiedot. Web-sivu. Luettu 14.3.2019. <URL>: <https://www.esab.fi/fi/fi/products/filler-metals/tig-rods-gtaw/low-alloy-rods/ok-tigrod-13-09.cfm>
- ESAB b. 2019. OK 67.60. Tekniset tiedot. Web-sivu. Luettu 10.3.2019. <URL>: <https://www.esab.fi/fi/fi/products/filler-metals/covered-stick-electrodes-smaw/stainless-steel-electrodes/ok-67-60.cfm>
- Gittos M. F., Gooch T. G. The Interface below Stainless Steel and Nickel-Alloy Claddings. Welding Research Supplement. December. 1992. pp. 461 – 472.
- Lukkari J., Kyröläinen A., Kauppi T. Hitsauksen materiaalioppi. Osa 2. SHY ry. 2016. 380 s.
- Nelson T. W., Lippold J. C., Mills M. J. Investigation of boundaries and structures in dissimilar metal welds. Science and Technology of Welding and Joining. 1998. Vol. 3. No. 5. pp. 249 – 255.
- Mäkelä K. Luottamuksellinen tiedonanto. 4.4.2019. Tampere.
- SEJČ P., KUBÍČEK R. Influence of Heat Input on the Content of Delta Ferrite in the Structure of 304L Stainless Steel GTA Welded Joints. SCIENTIFIC PROCEEDINGS 2011. Faculty of Mechanical Engineering. STU. Bratislava. DOI: 0.2478/v10228-011-0002-3.
- SFS-EN ISO 148-1. 2016. Metallien Charpyn iskukoe. Osa 1: Menetelmä.
- SFS-EN 10216-2. 2014. Saumattomat painelaiteteräsputket. Tekniset toimitusehdot. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräsputket.
- SFS-EN 10216-5. 2014. Saumattomat painelaiteteräsputket. Tekniset toimitusehdot. Osa 5: Ruostumattomat teräsputket.



Timo Kauppi, IWE, TkL

## TEKNINEN RAPORTTI 2019-05-01

Luottamuksellinen  
Versio 1.0

Timo Kauppi (Lic. Tech.), IWE FI-00630  
[Welding Metallurgy & Failure Analysis](#)  
[University lecturer](#) / Principal Lecturer  
[University of Oulu](#) / [Lapland University of Applied Sciences](#)  
[Materials and Mechanical Engineering](#) / Arctic Natural Resources and Economy

Tel. +358 50 325 8331, +358 50 438 1287  
[timo.a.kauppi@oulu.fi](mailto:timo.a.kauppi@oulu.fi), [timo.kauppi@lapinamk.fi](mailto:timo.kauppi@lapinamk.fi)



Arctic Steel and Mining –  
Excellence in Metallurgy

Oulun yliopisto, materiaali- ja tuotantotekniikan tutkimusyksikkö, Pentti Kaiterankatu 1, Linnanmaa



**Putken kuorinta ja S0-linjaus – KTR kommentit raporttiin 17.6.2019**



17.6.2019

**Laajemmat/yleiset kommentit:**

- Raportista tulisi heti alusta selvittää, mihin sitä sovelletaan; eli koskee soodakattilan seinäputkia (lämpötila-alue) ja kun tunkeudutaan S0-alueelle (viittaus standardin vaatimuksiin). Sekä mitkä olivat tutkimustoimenpiteet.
- Tarkempi kuvaus koejärjestelystä
  - Hitsausparametrit olisi hyvä olla - ja/tai ainakin maininta, että tässä tutkimuksessa tarkoituksellisesti "mentiin vähän yli", koska haettiin pahinta mahdollista tilannetta kenttäolosuhteissa
  - Miten palot hitsattiin (eli esim. sekoittuminen sekä seostamattomaan perusaineeseen, että compound-kerrokseen ja/tai edellisen kierroksen päällehitsauslisäaineeseen).
  - Valokuvia koekappaleista ja näytteen irrotuksesta
- Valokuvia myös metallurgisista tutkimuksista
  - molempien hitsauslisäaineiden poikkileikkauksia
  - NiCr 31/27 kuvat puuttuvat kokonaan!!
- NiCr 31/27 -lisäaineella hitsatessa kovuusmittaukset myös hitsin ja perusaineen rajalta (onko myös siellä korkeammat kovuudet).
- Haurausilmiöiden käsittely tulisi rajoittaa seinäputkien lämpötila-alueelle. Tässä tapauksessa on puhuttu lämpötilasta 380°C, mutta että ollaan lämpötiloissa alle 400°C.
- Mikäli 475°C hauraus mainitaan, tulee siitä selvittää, mikä lämpötila-alue on kyseessä (esim. 400...516°C lähteestä riippuen) ja että se ei koske tätä tapausta.
- Martensiitin suhteen pitää erottaa kaksi ilmiötä
  - Riski, että hitsiaineeseen muodostuu martensiittia sekoittumisasteen kasvaessa (vt. Schaeffler-diagrammi) - ja millä ehdoilla tämä on todennäköistä
  - Epäily, että martensiittia muodostuu ~20 µm vyöhykkeelle perusaineen ja hitsiaineen rajalle OK67.60 lisäaineelle hitsatessa.
    - Koska martensiittia ei ole syövytetty esiin, voidaan puhua epäilystä (viitaten tutkimukseen 1992).
    - HUOM! Kyseissä tutkimuksissa viitattiin, että myös nikkelipohjaisella lisäaineella syntyi martensiittia rajapinnalle (tosin ohuempi kerros). Ja siitä ei ole mitään mainintaa.
- Hitsin rajalla havaittu ~20µm paksu vyöhyke, josta mitattiin korkeita kovuuksia - yleisesti tiedetään, että hitsauksessa ja myös compound-putkella seostamattoman teräksen hiili diffundoituu hitsiaineeseen ja alueelle muodostuu kromi-karbideja, jotka nostavat kovuutta. Ei voi kutsua martensiitiksi, kun ei ole syövyttämällä varmistettu. (Mahdollisuuteen voi viitata 1992 tutkimuksen perusteella, mutta silloin täytyy tasapuolisuuden nimissä mainita myös havainnot nikkelipohjaisen lisäaineen suhteen.)
- Isompaan kuvaan merkintä, mistä kohdista tätä vyöhykettä löytyy.
- Schaeffler-analyysissä pitäisi olla johdonmukainen. Eli selvittää ensin, mitkä oletukset on tehty (esim. eripariliitos 50:50 ja hitaus lisäaineella) ja käyttää samaa oletusta kaikissa laskennoissa.
- Hitsauslisäaineiden kuumalujuudet: joko maininta kuumalujuudesta ko. lämpötilassa (lähde) tai maininta, että niitä ei käsitelty tässä.
- Liitteitä 1&2 ei ollut mukana

**Kommentit johtopäätöksiin:**

- Alkuun maininta taas mihin sovelletaan (seinäputket ja kun tunkeudutaan S0-alueelle jne.) ja "tehtyjen tutkimusten osalta..."



17.6.2019

- Mitä tutkimuksia tehtiin ja miten ne peilaavat vaatimuksiin: esim. S0 alueella tunkeuma oli alle 1,5 mm, iskutitkeyskokeet ja vetokokeet tuloksineen, vertaus hitsauslisäaineiden spekkeihin (esim. lujuudet tai niiden puutteet huoneen/korotetussa lämpötilassa)
- Muut havainnot: esim. kova vyöhyke Ok 67.60 hitsissä (maininnalla, että ei tutkittu mitä se oli ja että ei ole tietoa sen käytännön vaikutuksesta), myös lisättynä mitä kovuuksia NiCro 31/27 havaittiin vastaavassa kohdassa
- Schaeffler-analyysin tulokset ja esim. että vaikka tässä tutkimuksessa ei havaittu martensiittia, se voi olla riskinä suurilla sekoittumisasteilla (OK. 67.60) jne...

**Ylläolevan lisäksi joitakin yksityiskohtaisempia kommentteja:**

- Sivu 7, Tehtaan nimeä (Kymi) ei tulisi mainita raportissa (jos ei ole lupaa). Voidaan viitata, että käytettiin erään meneillään olevan projektin laskennallista seinämävahvuutta. (HUOM! Ei siis ole yleinen laskennallinen seinämävahvuus.)
- Sivulla 7, "Tavoitteena oli saada aikaan päittäishitsejä, joissa pinnoitteen hitsin tunkeuma S0 – alueelle on 1 – 1.5 mm." Eikö tavoitteena ollut **selvittää** kuinka paljon tunkeudutaan S0 alueelle? (eli ei mentäisi S0 alueelle yli 1,5 mm)
- Sivulla 7, että putkien päät kuorittiin mittaan 4,19 mm. Tähän tarkennus kuorittiin niin, että seinämä oli minimissään 4,19 mm (vai kuorittiin kauttaaltaan 4,19 mm)
- Sivulla 7 myös pieni näppäilyvirhe alareunassa – pitäisi varmaan viitata taulukkoon 2.13
- Tunkeuman määrittäminen: Sivulla 9 kaava  $\Delta S_0 = S_0 - S_\alpha$ , jossa  $S_\alpha$  olisi ferriittinen osuus hitsauksen jälkeen (Huom! kuva 10 kuvatekstissä virhe).
- Mutta sivulla 17 4.5. Pinnoitteen hitsin tunkeuma: "Koehitseistä mitatut  $S_\alpha$  – arvot ja siitä laskettu eromitta ( $\Delta S_0$ ) sallittuun arvoon ( $S_0 = 4.19$  mm) on annettu taulukossa 4.4. Kun eromitta  $\Delta S_0 < 0$ , on pinnoitteen hitsi tunkeutunut yli minimipaksuuden painetta kantavaan ferriittiseen osaan." Eli ilmeisesti yllä olevan kaavan pitäisi olla  $\Delta S_0 = S_\alpha - S_0$ ?
- Sivulla 23 ja 24 hitsiaineen testatut kemialliset koostumukset ovat alle "standardin". Asiaa on pohdittu myös sivulla 36. Mutta eikö ole aika odotettavaakin, että kemiallinen koostumus on alle standardin, jos ollaan hitsattu mustan päälle ja sekoittumista tapahtunut? Myös maininta mistä kohtaa mittaus on tehty.
- Sivulla 31 alareunassa: "sekoittumisasteen pienentyessä martensiitin syntymisen todennäköisyys kasvaa ja päinvastoin" Schaefflerin mukaan martensiitin syntymisen todennäköisyys kasvaa kun sekoittuminen **kasvaa** mustasta.
- Schaefflerin diagrammeissa (Sivu 33 ja kuva 5.8. ja s 37 kuva 5.11) on epäloogisuutta. Kuvassa 5.8 on oletettu että päälle hitsatessa "perusaineena" on "eripariliitos" jossa mustaa ja myös compound-kerrosta tai kirkasta hitsiainetta (osuudet 50:50), mutta kuvassa 5.11 oletettu että hitsataan puhtaasti mustan päälle. Ensimmäisessä martensiitin muodostuminen ei ole todennäköistä 30% sekoittumisella ja toisessa on.
- Raportissa oli tehty johtopäätös, että lähelle hitsin rajapintaa muodostuu martensiittia (~20 µm kerros), koska alue ei syöpynyt ja kovuudet olivat korkeat (~290-400 HV). Kyseessä on kerros, johon on muodostunut kromikarbida – eli lämmöntuonnin seurauksena mustasta perusaineesta on diffundoitunut hiiltä ruostumattomaan, jolloin siihen on muodostunut kova karbidipitoinen vyöhyke. Ja mustan puolella on havaittavissa hiilenkatokerros. Martensiitti pitäisi syövyttää esiin sen läsnäolon varmistamiseksi.

Vielä ferriittimittauksesta: Mikäli luotettavuutta arvioidaan, tulisi siinä huomioida miten mittari ja kuva-analyysi eroavat toisistaan - eli mitta-alueen suuruus (esim. HAZ alue on pieni, jolloin mittari mittaa suuremmalta alueelta).