

Suomen Soodakattilayhdistys ry

Sulakourujen materiaalitutkimus

**Sanni Yli-Olli, Satu Tuurna, Aino Mäntyranta
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy**

18.2.2020

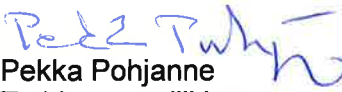
Raportti 2/2020

(16A0913-E0202)

Sulakourujen materiaalitutkimus

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

Luottamuksellisuus: Luottamuksellinen

Raportin nimi Sulakourujen materiaalitutkimus	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Suomen Soodakattilayhdistys	Asiakkaan viite
Projektin nimi PS18 Sularännit	Projektin numero/lyhytnimi 121633
Tiivistelmä Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää soodakattiloiden sulakouruissa havaittavia vaurioita ja niiden vaikutusta sulakourujen käytettävyyteen, koska on havaittu, että usealla laitoksella sulakourut eivät ole kestäneet suositeltua yhden vuoden ajojaksoa. Tässä tutkimuksessa kouruissa kouruosalla havaittiin säröjä sekä Andritzin että Valmetin valmistamissa sulakouruissa. Nämä säröt vastasivat termisen väsymisen säröjä. Valmetin sulakouruissa säröjä oli havaittavissa huomattavasti harvemmassa määrässä kuin Andritzin kouruissa tutkituilla ajojakson pituuksilla. Näissä havaitut säröt olivat sijoittuneet kourun pohjalle. Andritzin compound -kouruissa säröjä oli havaittavissa kourun seinämillä, ja tarkemmin tutkitut näytteet osoittivat säröjen etenevän pinnoitekerroksen läpi perusaineeseen. Andritzin laserpinnoitetuissa kouruissa havaittiin vähemmän säröilyä eikä näiden säröjen havaittu etenevän perusaineelle. Säröjen ilmentyminen eri kohtiin kourua eri valmistajan kouruilla on selitettävissä erilaisella rakenteella ja eri materiaaleilla. Termisen väsymisen säröjen syntyyn ja kasvuun vaikuttavat sulakourun rakenteen ja materiaalin lisäksi suuret lämpötilojen vaihtelut. Tämän lisäksi säröjen kasvua kiihdyttää liian korkea materiaaliämpötila. Joissain tapauksissa myös säröihin päässyt sula voi syövyttää materiaalia ja kiihdyttää säröjen kasvua. Tutkittujen kourujen ajoajat eri laitosten välillä vaihtelivat, joten yksiselitteisiä johtopäätöksiä särömäärien ja syöpymien synnystä eri tyyppisten sulakourujen välille ei voida tehdä. Jättöpäätyjen korroosion on aiheuttanut rikkipitoinen yhdiste. Osassa näytteistä pinnoitteen syöpymän muoto viittaisi enemmän sulan aiheuttamaan pyörteeseen, joka on kuluttanut pinnoitteen ja altistanut sen alla olevan perusaineen korroosiolle. Tämä ei kuitenkaan ollut yksiselitteisesti nähtävissä kaikissa näytteissä. Jättöpäätyjen syöpymiseen vaikuttavat tekijät materiaalin lisäksi ovat sen rakenne, epäjatkuvuuskohtat jättöpinnalla sekä päädyn lämpötila. Jättöpäätyjen syöpymisen estämiseksi on suositeltavaa hioa jättöpääty sulavalinjaiseksi niin, että sula pääsee virtaamaan liuottajaan hyvin eikä aiheuta pyörteitä päätyyn eikä pintaan jää epäjatkuvuuskohtia, joihin sulasta tai liuottajan höngästä aiheutuvat rikkiyhdisteet voisivat tunkeutua aiheuttaen korroosiota.	
Espoo 20.12.2019 Laatija  Satu Tuurna Tiimipäällikkö	Hyväksyjä  Pekka Pohjanne Tutkimuspäällikkö
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT, puh. 020-722111, sähköposti: etunimi.sukunimi@vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Asiakas 1 kpl, VTT (arkisto) 1 kpl	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

Sisällysluettelo

1. Toimeksiannon kuvaus ja tavoitteet	3
2. Menetelmät	4
3. Tulokset	5
3.1 Enocell	6
3.2 Joutseno	8
3.3 Kaukaa	10
3.4 Kaukopää	12
3.5 Kemi	30
3.6 Kotkamills	47
3.7 Kymi	49
3.8 Oulu	51
3.9 Pietarsaari	68
3.10 Rauma	85
3.11 Sunila	90
3.12 Veitsiluoto	92
3.13 Äänekoski	95
4. Johtopäätökset ja yhteenveto	98

1. Toimeksiannon kuvaus ja tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää soodakattiloiden sulakouruissa havaittavia vaurioita ja niiden vaikutusta sulakourujen käytettävyyteen, koska on havaittu, että usealla laitoksella sulakourut eivät ole kestäneet suositeltua yhden vuoden ajojaksoa. Tätä varten kartoitettiin Suomen soodakattiloiden sulakourujen vaurioitumismekanismeja metallurgisin keinoin ja pyrittiin selvittämään syitä erilaisten vaurioiden syntyyn eri laitoksilla. Tutkimuksessa tutkittiin tarkemmin sovituilta laitoksilta sulakouruja Suomen Soodakattilayhdistyksen (SKY) kestoisuustyöryhmän ohjeistuksen mukaisesti. Sulakouruista kartoitettiin ja raportoitiin niissä havaitut vauriot, näiden mekanismi, sijainti ja syvyys. Tämän lisäksi tehtiin tuloksien yhteenveto havainnoista yhdessä soodakattilayhdistyksen ja kattilakäyttäjien kanssa.

Taulukko 1. Tutkimuksiin toimitetut sulakourut

Laitos	Lukumäärä	Kouru	Kattilan keskiarvo-kuorma	Veden lämpötila sisään/ulos	Veden virtausnopeus	Muuta
Enocell	2	Andritz, pinnoitettu (laser)				
Joutseno	2	Andritz, pinnoitettu (laser)				
Kaukaa	6	Andritz, pinnoitettu (laser)	680 tka/vrk*	59/65 °C	2,2 l/s	ka** 75-80
Kaukopää	2 (SK5, SK6)	Andritz, compound (SK5) Valmet, pinnoitettu pääty ja osa kourua (SK6)	400/530 tka/vrk	50/54 °C (SK6)	2 l/s	ka 72
Kemi	2	Valmet, pinnoitettu pääty ja osa kourua	500 tka/vrk	58/58 °C		ka 81
Kotkamills	2	Andritz, pinnoitettu	500 tka/vrk	78/83 °C	2,7/2,8 l/s	ka 75 Ei alipainetta
Kymi	2	Valmet, pinnoitettu pääty				
Oulu	2	Andritz, pinnoitettu	515 tka/vrk	63/63 °C	2 l/s	ka 78-80
Pietarsaari	2 + 1 uusi	Andritz, compound & laser	570 tka/vrk	51/53-53 °C	2-2,5 l/s	ka 81-84 Vaihtoväli 1,5 vuotta
Rauma	2 + 1	Valmet, pinnoitettu pääty ja osa kourua				ka 80 2 kourua ajokaudelta 2018, ja 1 kaudelta 2019

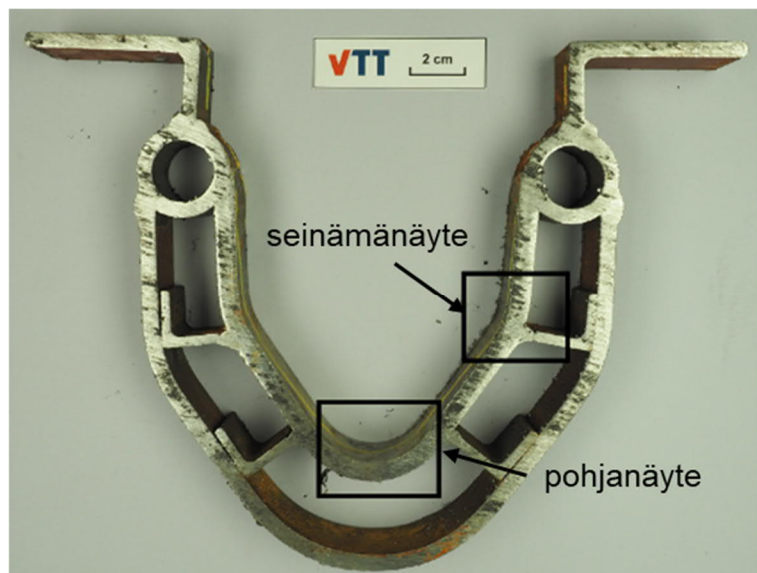
Sunila	2 (SK10 ja SK11)	Musta + pinnoitettu pääty ja osa kourua	415 ja 575 tka/vrk	60/62 °C	max. 2,5 (SK10) ja 2,25 (SK11) l/s	
Veitsiluoto	2 (1 ja 3)	Andritz, pinnoitettu	500 tka/vrk	ulos 62 °C	4 l/s	ka 74-80
Äänekoski	3 (5, 6 ja 7)	Valmet, pinnoitettu pääty	710 tka/vrk	65/67 °C	4 l/s	ka 80

*tka/vrk - kuiva-ainetonnia vuorokaudessa

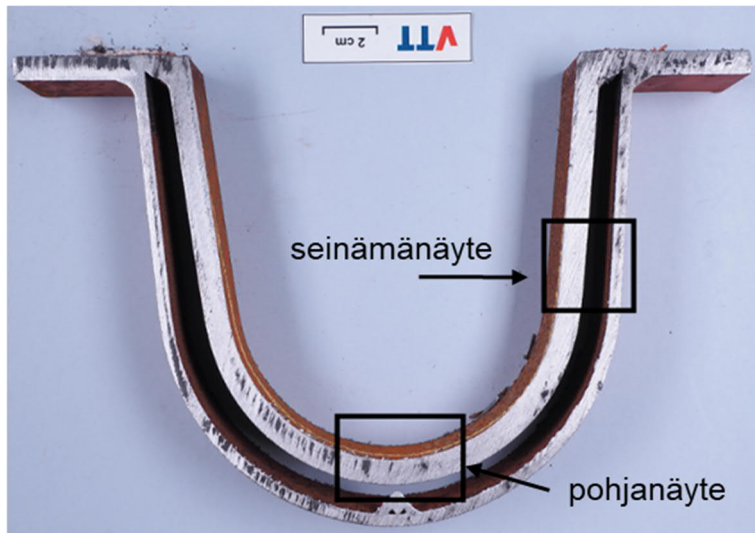
**ka - tuhallinen kuiva-aine

2. Menetelmät

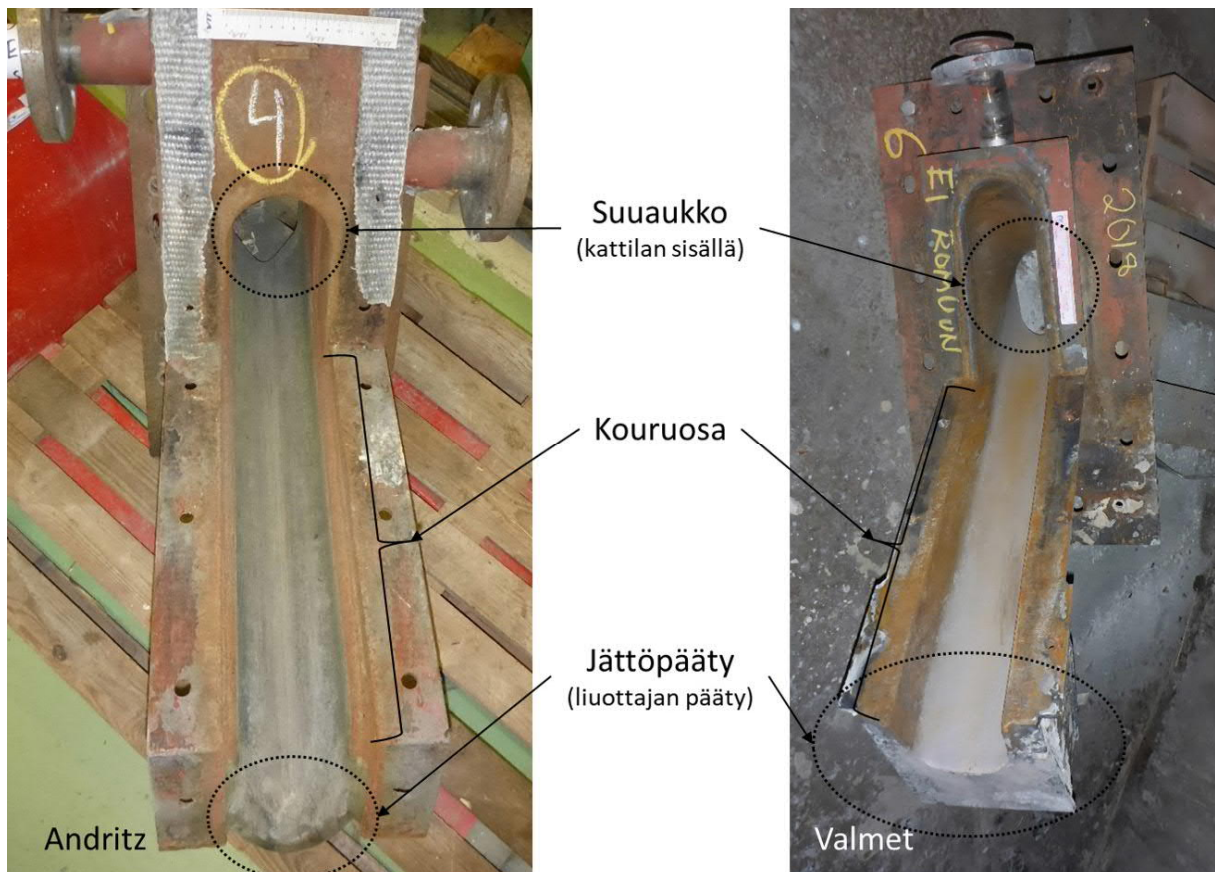
Kaikki VTT:lle tutkimuksiin toimitetut sulakourut tutkittiin visuaalisesti ja dokumentoitiin. Tutkimuksiin toimitettujen Andritzin kourujen keskimääräinen pituus suuaukosta jättöpäähän oli 770 mm ja Valmetin 900 mm, Sunilassa tästä poiketen kourujen pituudet SK11 1000 mm ja SK10 1500 mm. Visuaalisten tarkastusten pohjalta SKY:n kestoisuustyöryhmä päätti, minkä laitosten sulakourut 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 valituista kouruista valmistettiin näyte kourun jättöpäästä (Kuva 3) syöpymien kohdalta. Säröjen syvyydet ja sijainnit, materiaalien mikrorakenne sekä havaittujen sisäpuolisten kerrostumien paksuudet määritettiin. Tarvittaessa kerrostumia analysoidiin tarkemmin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM) sekä siihen liitettyllä energiadiispersiivisellä röntgenanalysaattorilla (EDX). Kovuudet määritettiin valituista poikkileikkausnäytteistä Vickers yksiköissä.



Kuva 1. Andritzin sulakourujen näytteiden ottokohdat



Kuva 2. Valmetin sulakourujen näytteiden ottokohdat



Kuva 3. Sulakourujen erityyppisiä jättöpäätyjä sekä suuaukko

3. Tulokset

VTT:lle toimitettiin tutkimukseen sulakouruja kolmeltatoista eri laitokselta, joista tarkempiin tutkimuksiin valittiin Kaukopään (SK5 ja SK6), Oulun, Kemin ja Pietarsaaren sulakourut. Seuraavissa kappaleissa on esitetty kaikkien sulakourujen tulokset laitoskohtaisesti.

3.1 Enocell

Tutkimuksiin toimitettiin Andritzin valmistamat laserpinnoitetut sulakourut 1 ja 4, tästä eteenpäin nimetty Enocell 1 ja Enocell 4 (Kuva 4 - Kuva 7). Kourut olivat olleet käytössä 12 kuukautta. Tutkimuksiin toimitetut kourut olivat erittäin hyvässä kunnossa. Kouruosalla ei havaittu säröjä eikä syöpymää havaittu jättöpäädystä. Ainoat havainnot olivat kourun rassauksen jättämät jäljet kouruosan seinämällä lähellä lähtöpäätä. Jäljet olivat selvemmät sulakourussa Enocell1 (Kuva 5 ja Kuva 7).



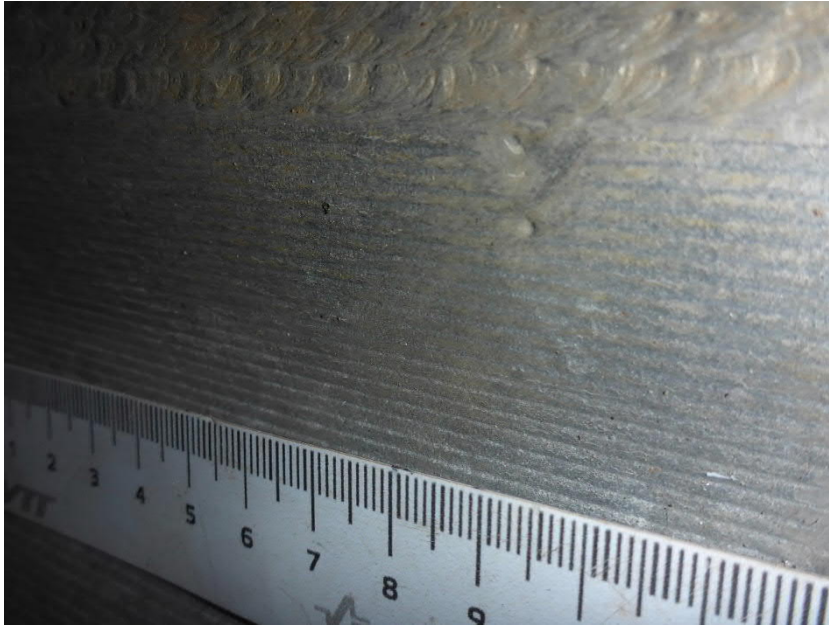
Kuva 4. Sulakouru Enocell1



Kuva 5. Rassauksen jättämiä jälkiä sulakourussa Enocell1



Kuva 6. Sulakouru Enocell 4



Kuva 7. Mahdollisia raskauksen jättämiä jälkiä noin 700 mm sulakourun alkupäästä

3.2 Joutseno

Tutkimuksiin toimitettiin Andritzin valmistamat laserpinnoitetut kourut 2 ja 6, tästä eteenpäin nimetty Joutseno 2 ja Joutseno 6 (Kuva 8 ja Kuva 9). Kouruissa oli aiemmin havaittu ongelmia, joiden syyksi on määritelty liian lämpimän jäähdytysveden aiheuttama säröily. Nyt tutkimuksiin toimitetuilla sulakouruilla oli takanaan vain noin kuuden kuukauden ajojakso, mikä osaltaan on voinut vaikuttaa siihen, ettei näissä kouruissa havaittu kuin pieniä säröjä sulakourun reunoilla.



Kuva 8. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru (Joutseno 2)



Kuva 9. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru (Joutseno 6). Havaitut säröalueet merkitty yllimpään kuvaan punaisilla suorakaiteilla.

3.3 Kaukaa

Kaukaalta tarkasteltavaksi toimitettiin Andritzin laserpinnoitetut kourut 1-6, joista tutkimuksiin valittiin kourut 3 ja 5, tästä eteenpäin Kaukaa 3 ja Kaukaa 5 (Kuva 10 ja Kuva 11). Kaukaalla oli edellisellä ajokaksolla ollut ongelmia Andritzin compound sulakourujen kestävyysden kanssa, jonka vuoksi ne oli jouduttu vaihtamaan kesken ajokautta. Näin ollen tutkimuksiin toimitetut sulakourut olivat olleet käytössä vain noin puoli vuotta. Visuaalisessa tarkastuksessa ei havaittu merkittäviä vaurioita sulakouruissa, ainoastaan pientä kulumista jättöpäässä.



Kuva 10. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru (Kaukaa 3)



Kuva 11. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kaukaa 5)

3.4 Kaukopää

Kaukopäästä tutkimuksiin toimitettiin kaksi kourua; yksi Andritzind compound -kouru SK5:lta sekä yksi jättöpäästä pinnoitettu Valmetin sulakouru SK6:lta, tästä lähtien Kaukopää SK5 ja Kaukopää SK6. Kyseiset sulakourut olivat olleet käytössä 12 kuukautta. Kaukopää SK5:ssä havaittiin kourun seinämällä pieniä säröjä (Kuva 12). Kaukopää SK6:ssa havaittiin jättöpäädysssä syöpymiä (Kuva 13). Nämä kourut valittiin tarkempaan tutkimukseen.



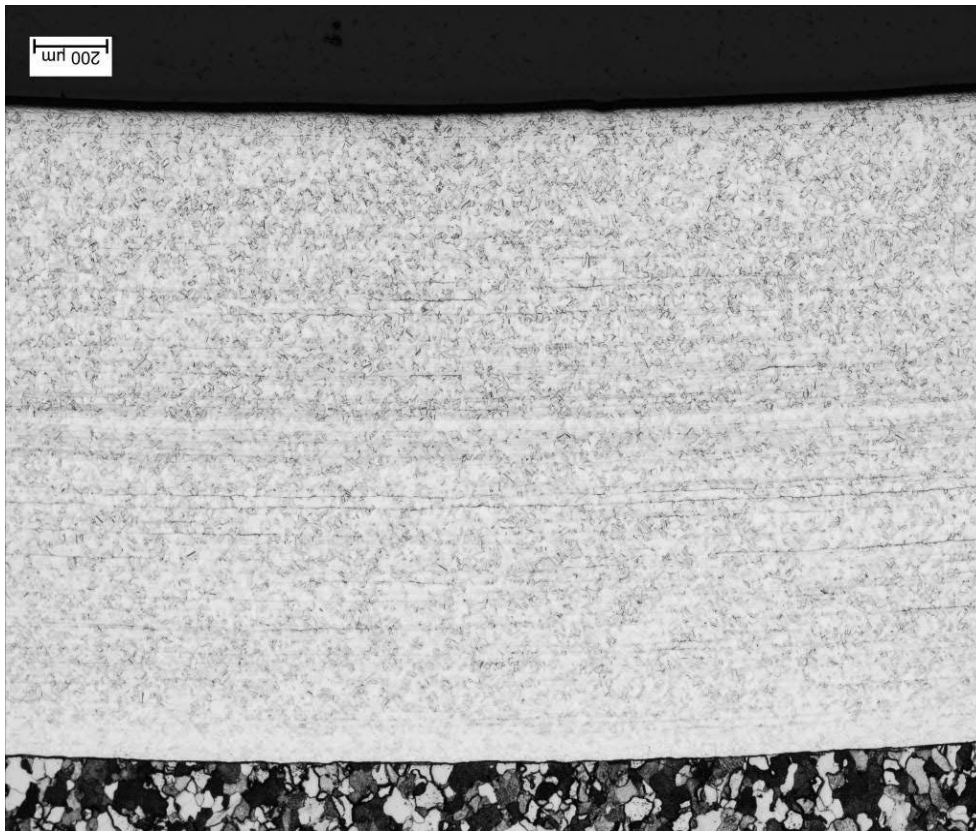
Kuva 12. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kaukopää SK5). Säröytyneet alueet merkitty yllimpään kuvaan punaisilla suorakaiteilla. Poikkileikkaushieiden paikat ovat merkitty kuvaan valkoisella katkoviivalla.



Kuva 13. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kaukopää SK6). Poikkileikkaushieiden paikat ovat merkitty vasempaan alakuvaan valkoisella katkoviivalla.

Kaukopää SK5 sulakourun pohjalta 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. Pohjan sisäpinnalla vesikierron puolella havaittiin yhtenäinen < 10 μm paksu oksidi sekä satunnaisia noin 60 μm kokoisia oksidisaarekkeitä. Perusaineen

mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen (joskin perliittialueita oli verrattain vähän viitaten niukkahiiliseen seokseen) eikä siinä havaittu mikrorakenteen hajaantumista (Kuva 14 - Kuva 19).



Kuva 14. Kaukopää SK5 poikkileikkaus sulakourun pohjalta, pinnoite ylhäällä syövytetty



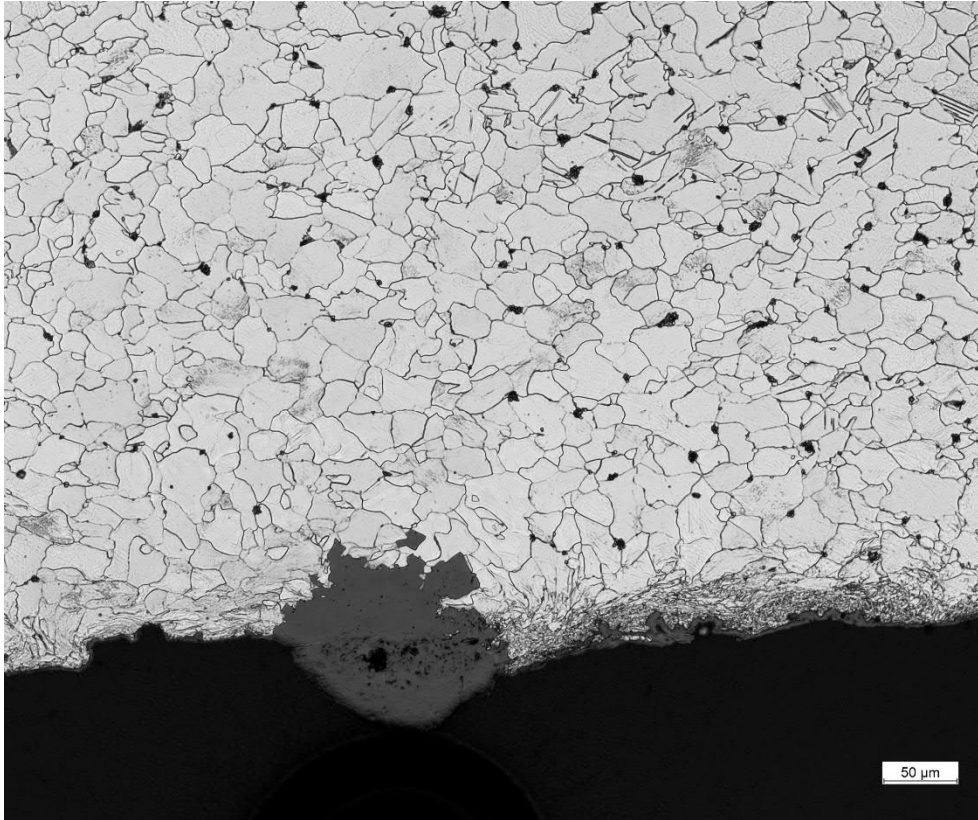
Kuva 15. Yksityiskohta Kuva 14



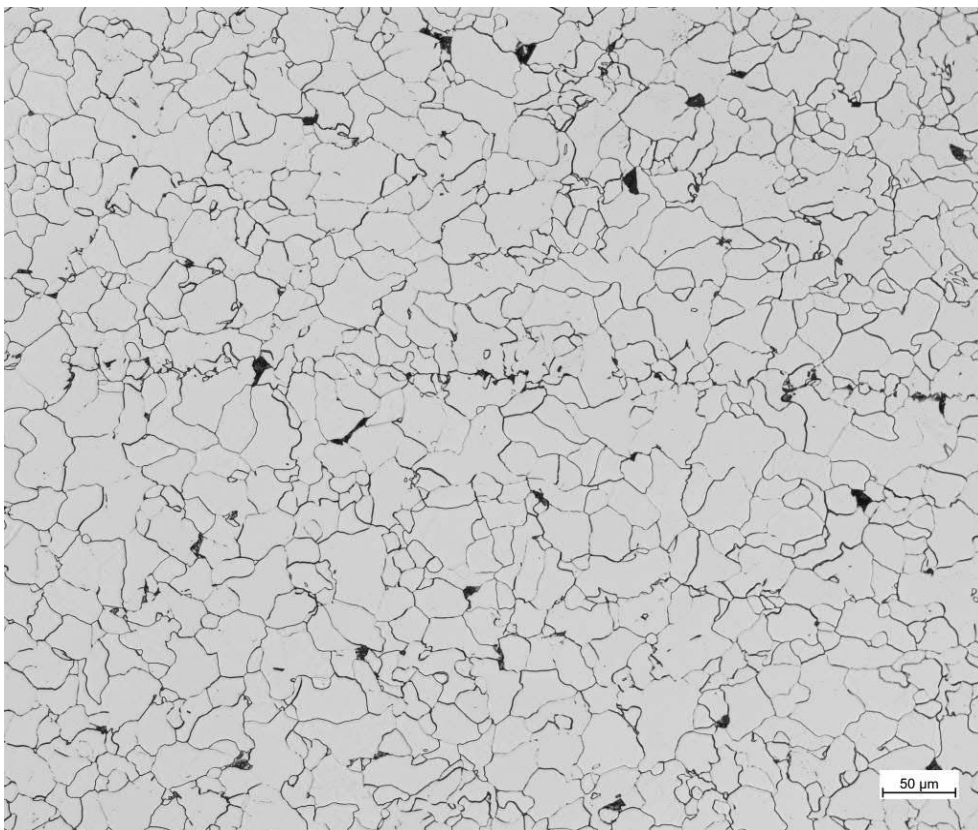
Kuva 16. Kaukopää SK5 pinnoite-perusainerajapinta sulakourun pohjalta, perusaine syövytetty



Kuva 17. Kaukopää SK5, ulkopinta kourun pohjalta, syövyttämätön näyte



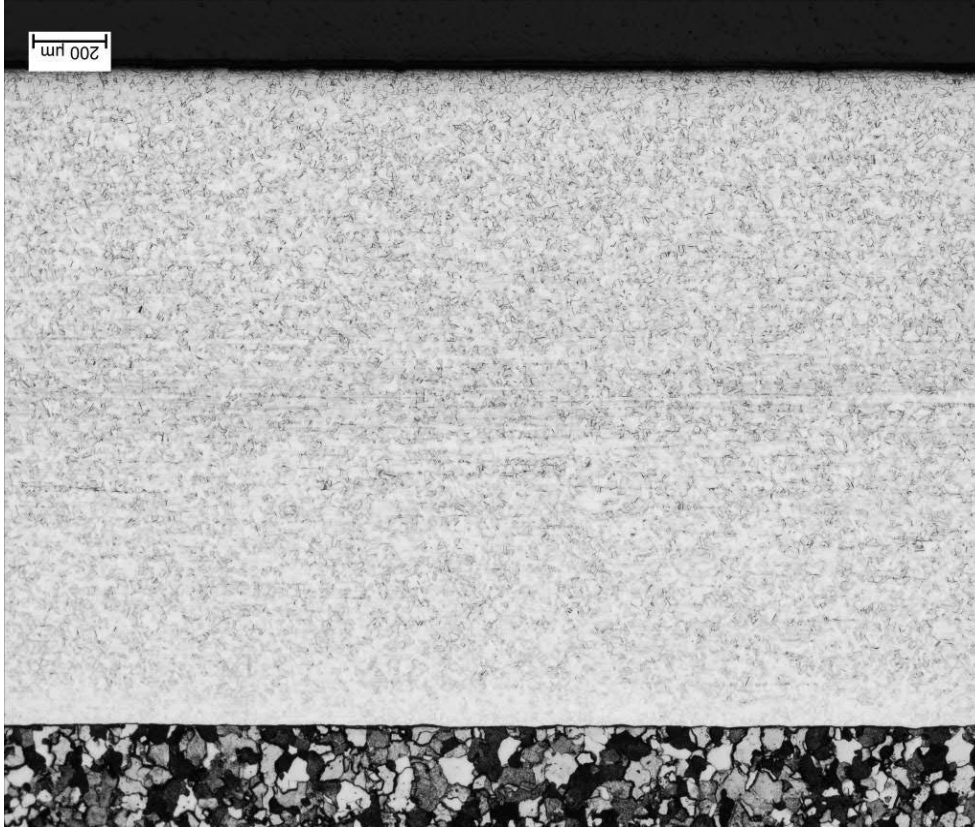
Kuva 18. Kaukopää SK5, sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) kourun pohjalta



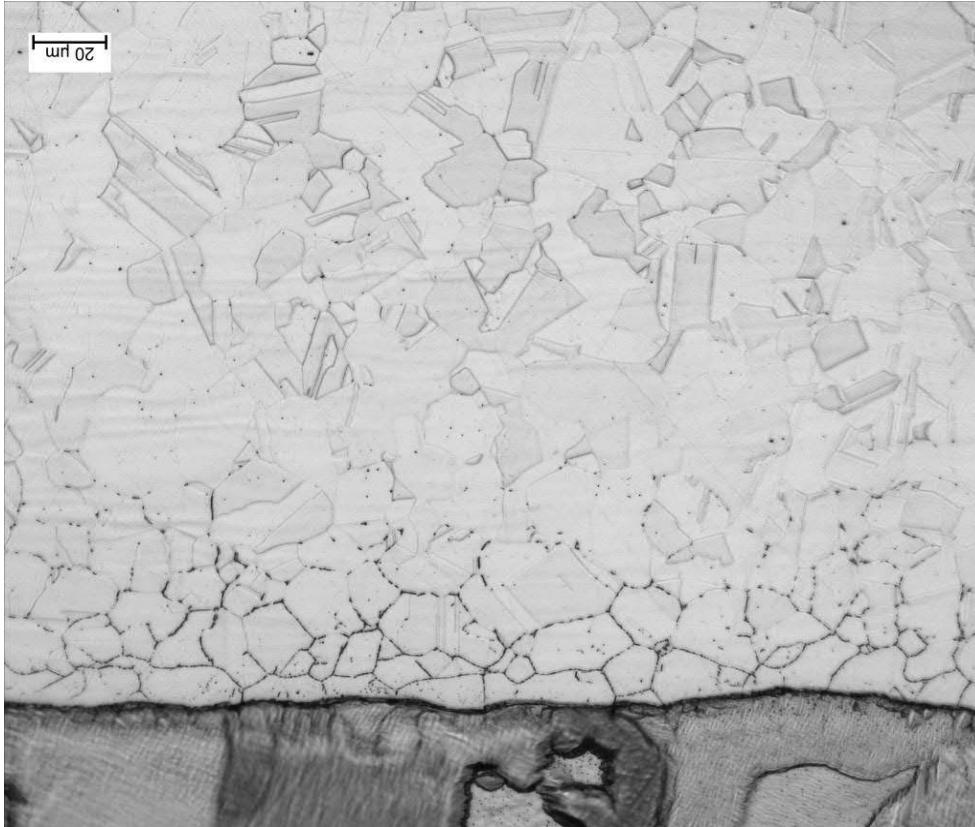
Kuva 19. Kaukopää SK5, perusaineen mikrorakenne kourun pohjalla

Kaukopää SK5 seinämältä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin pinnoitteen puolella noin 55 µm matkalla karbideja raerajoilla (Kuva 21) 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 (perliittialueiden vähäisyys viittaa niukkahiiliseen seokseen) eikä mikrorakenteessa havaittu hajaantumista (Kuva 20 - Kuva 25).



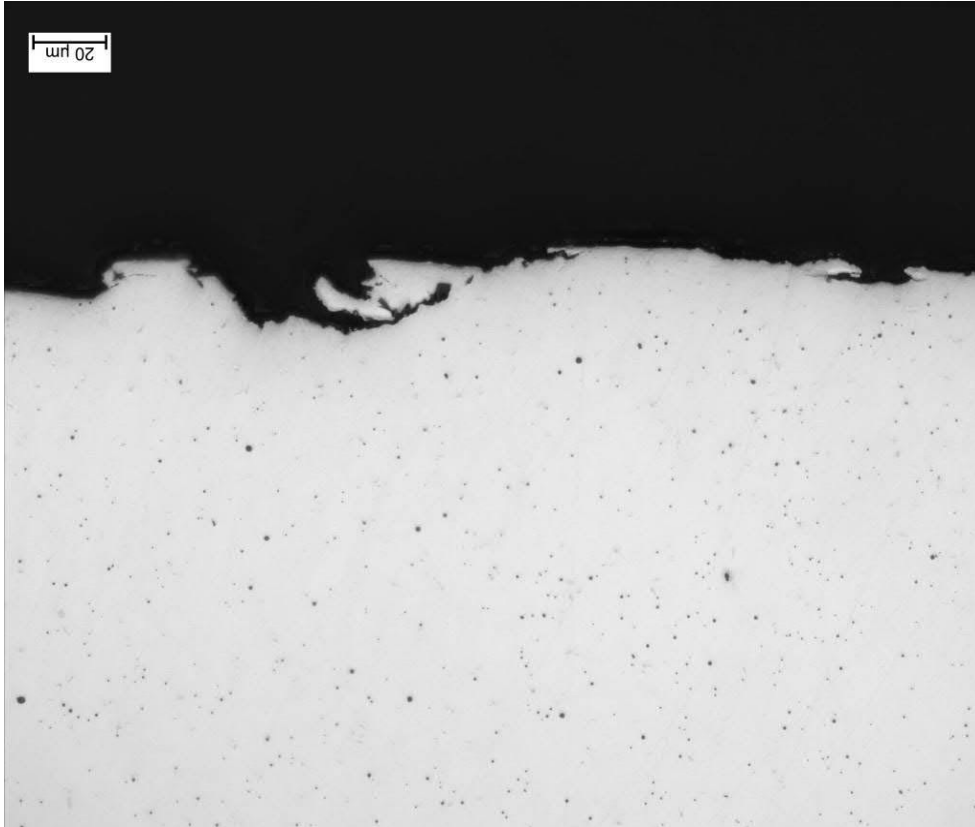
Kuva 20. Kaukopää SK5, poikkileikkaus kourun seinämältä, pinnoite ylhäällä syövytetty



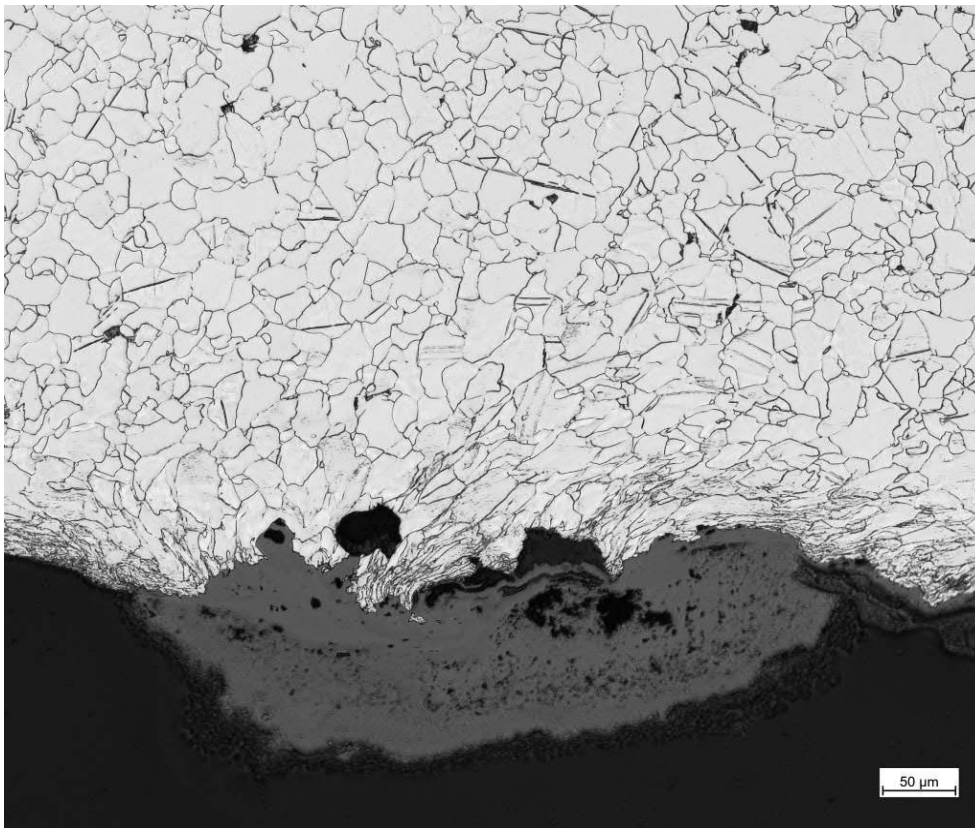
Kuva 21. Yksityiskohta Kuva 20



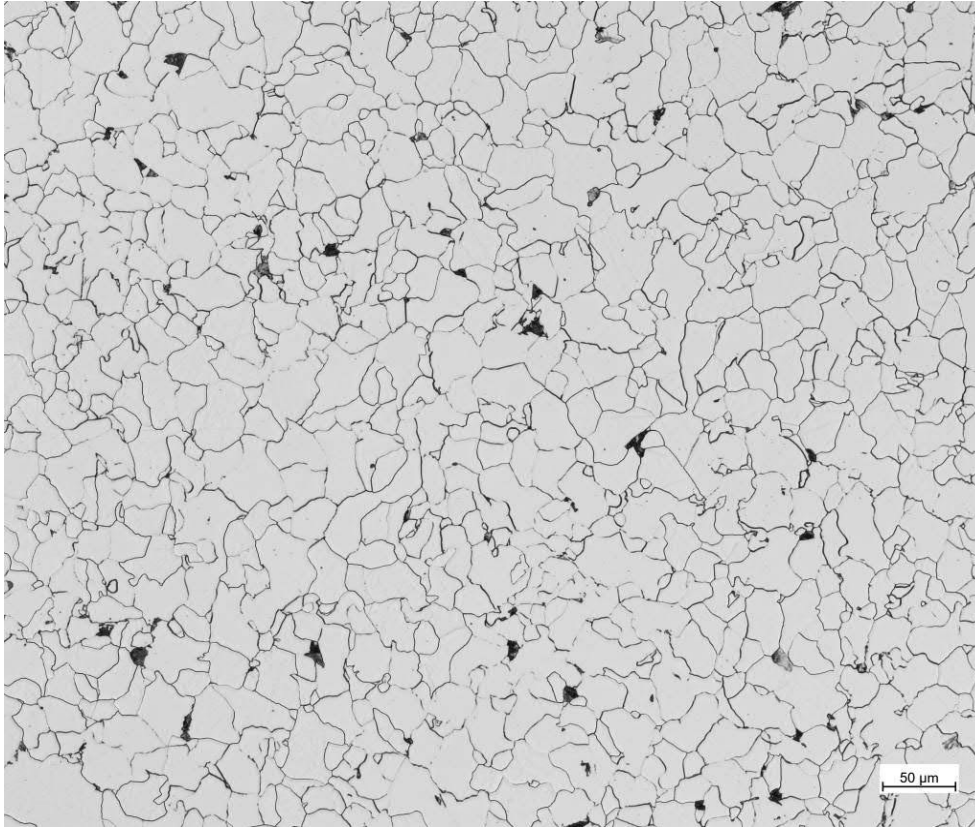
Kuva 22. Kaukopää SK5 pinnoite-perusainerajapinta sulakourun seinämältä, perusaine syövytetty



Kuva 23. Kaukopää SK5, kourun ulkopinta seinämän kohdalla

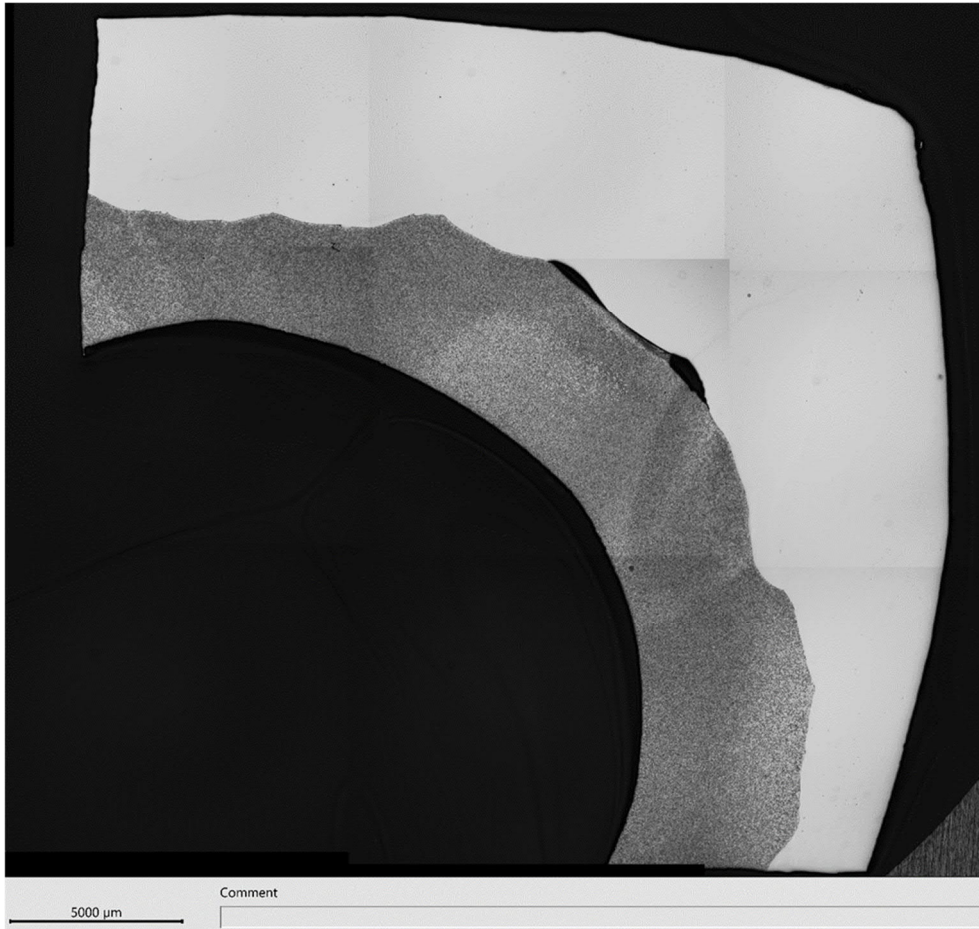


Kuva 24. Kaukopää SK5, sisäpinnan (vesikierron puoleinen pinta) oksidi

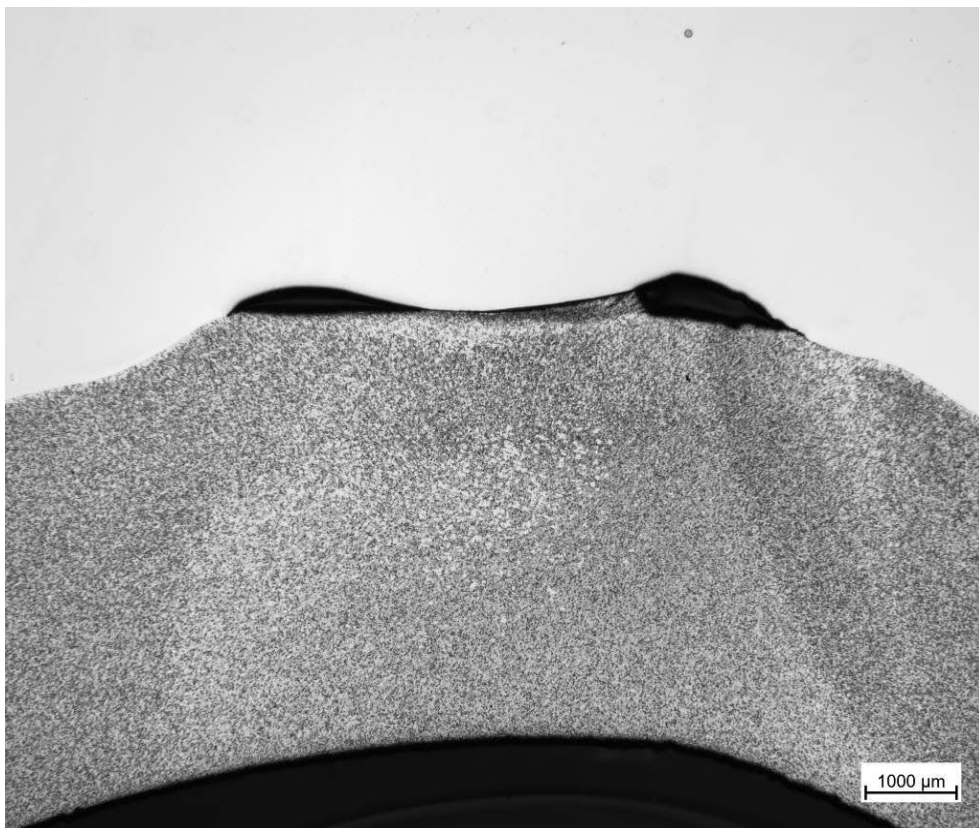


Kuva 25. Kaukopää SK5, perusaineen mikrorakenne kourun seinämältä

Kaukopää SK5 kourun jättöpään poikkileikkauksessa ei havaittu syöpymäkuoppia (Kuva 26 ja Kuva 27). Pinnoitteen ja perusaineen liitoksessa havaittiin tiukimmassa mutkakohdassa alue, 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.

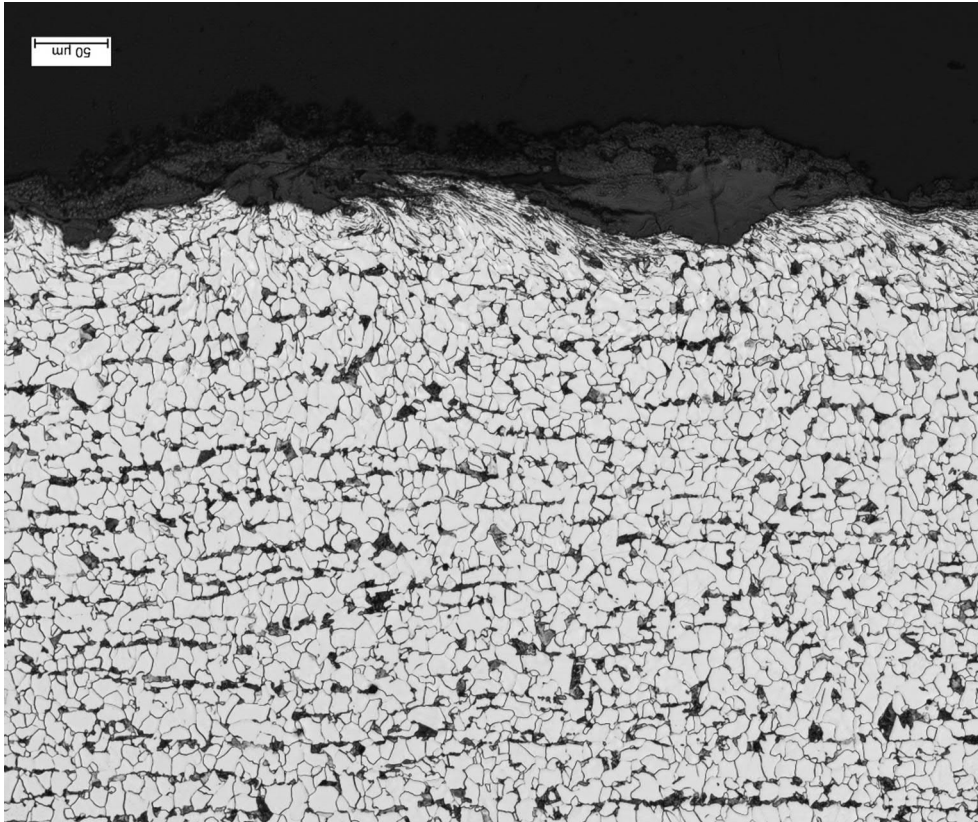


Kuva 26. Kaukopää SK5, sulakourun jättöpään poikkileikkaus, perusaine syövytetty



Kuva 27. Yksityiskohta Kuva 26

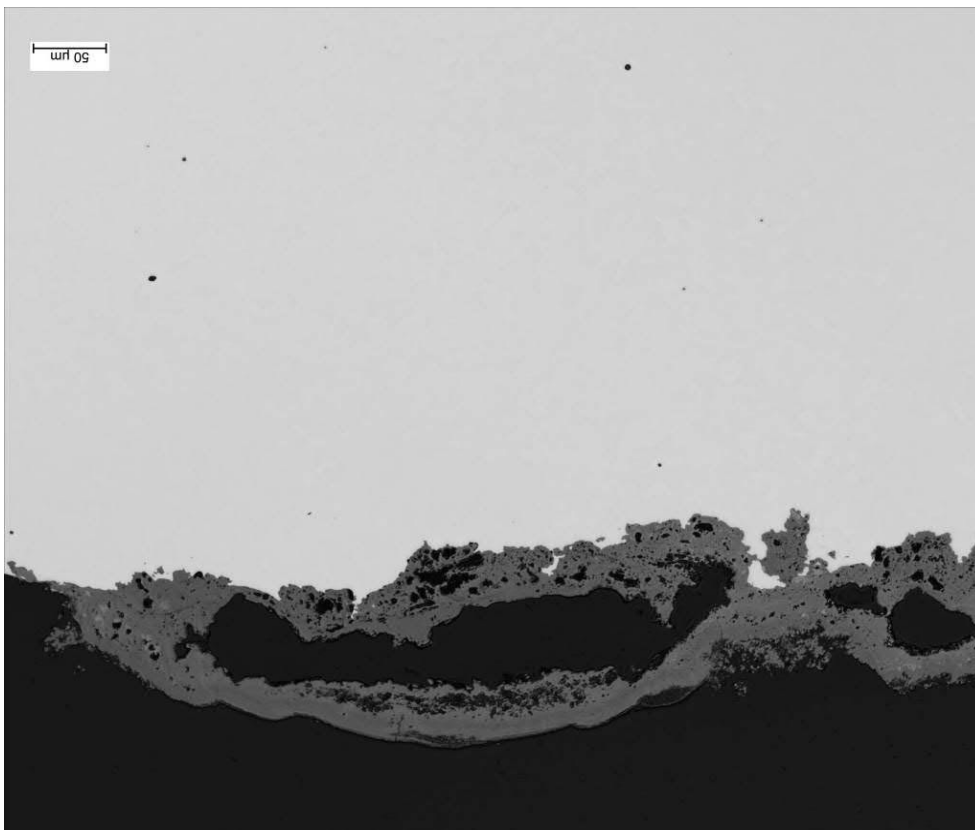
Kaukopää SK6 pinnoittamattomalta kourun pohjalta tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin ulkopinnalla suolakerrostumia sekä hyvin pieniä matalia säröjä (Kuva 28 ja Kuva 29). Pohjan sisäpinnalla vesikierron puolella havaittiin alle 20 µm paksu yhtenäinen oksidi sekä laajoja noin 100 µm paksuja huokoisia oksidisaarekkeita. Mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu mikrorakenteen hajaantumista (Kuva 30 ja Kuva 31).



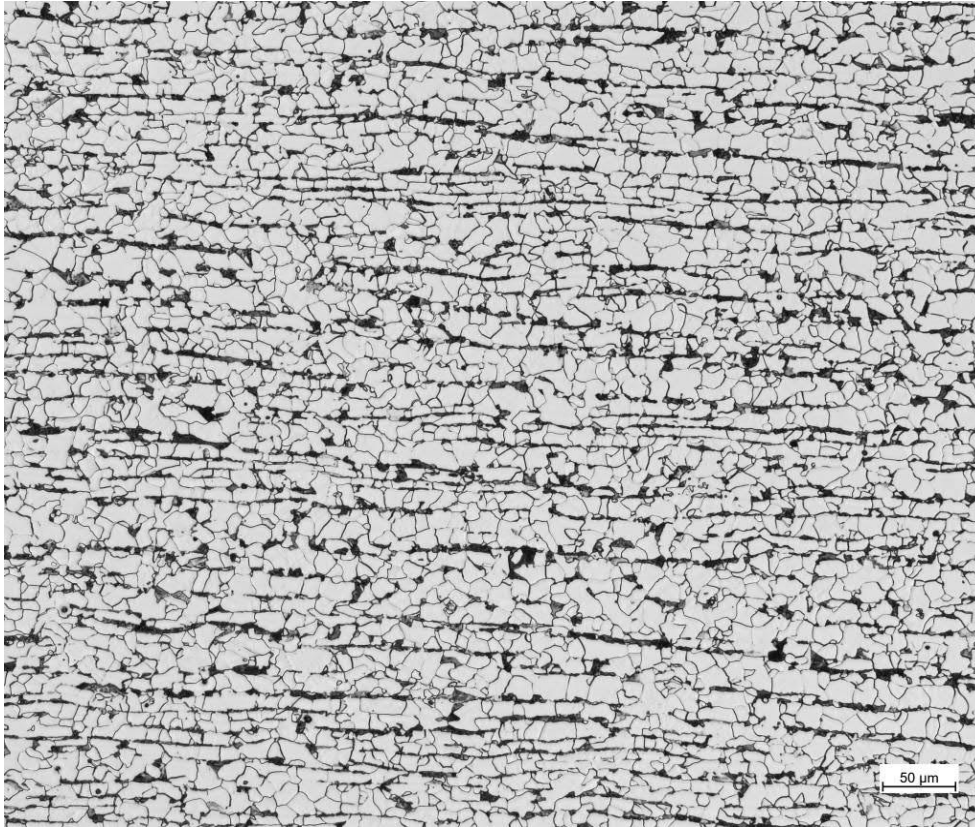
Kuva 28. Kaukopää SK6, ulkopinnan kerrostumaa kourun pohjalla



Kuva 29. Kaukopää SK6, ulkopinnan kerrostumaa kourun pohjalla, syövyttämätön näyte

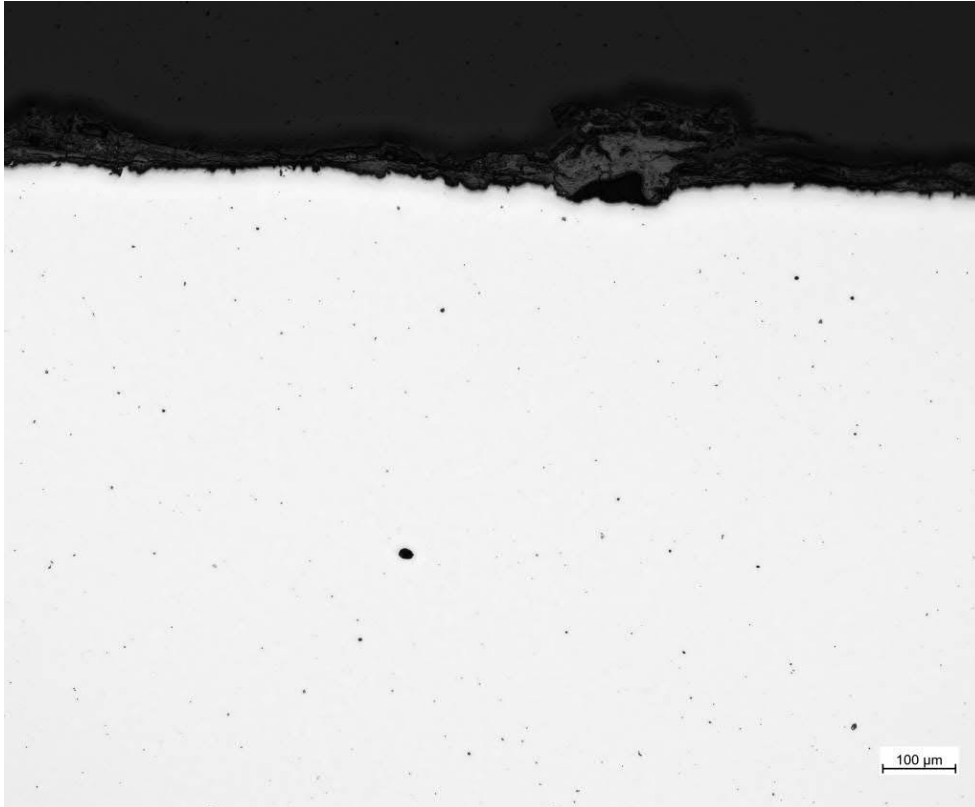


Kuva 30. Kaukopää SK6, sisäpinnan (vesikierron puoleinen pinta) oksidi kourun pohjalla

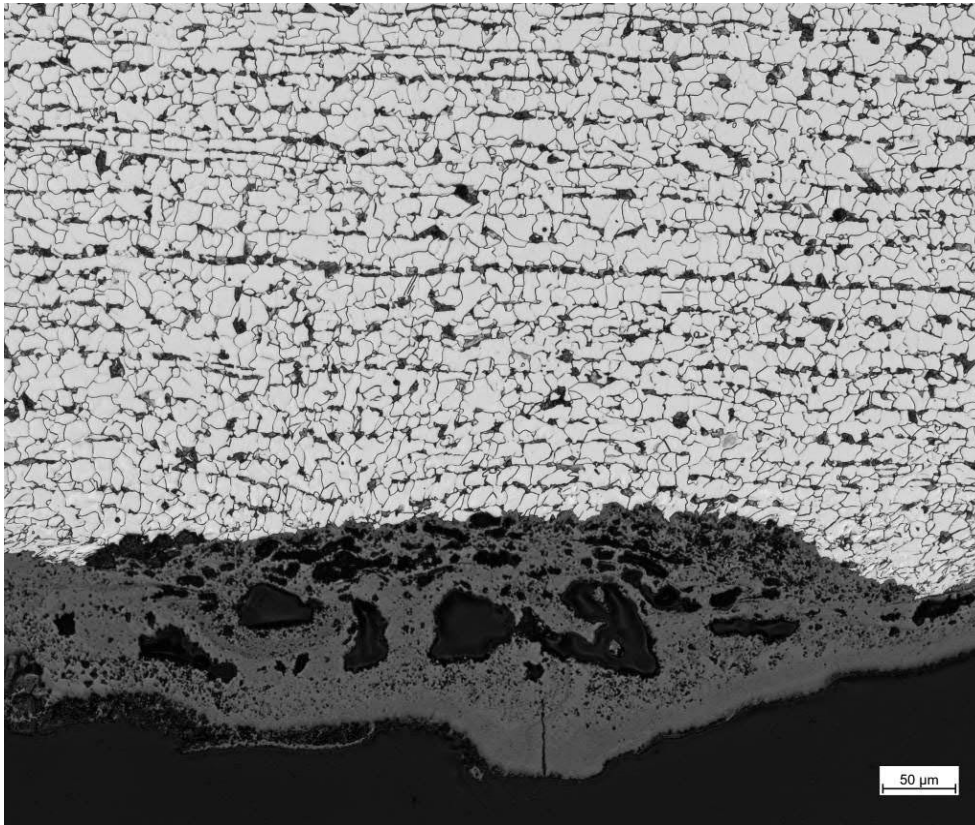


Kuva 31. Kaukopää SK6, mikrorakenne kourun pohjalla

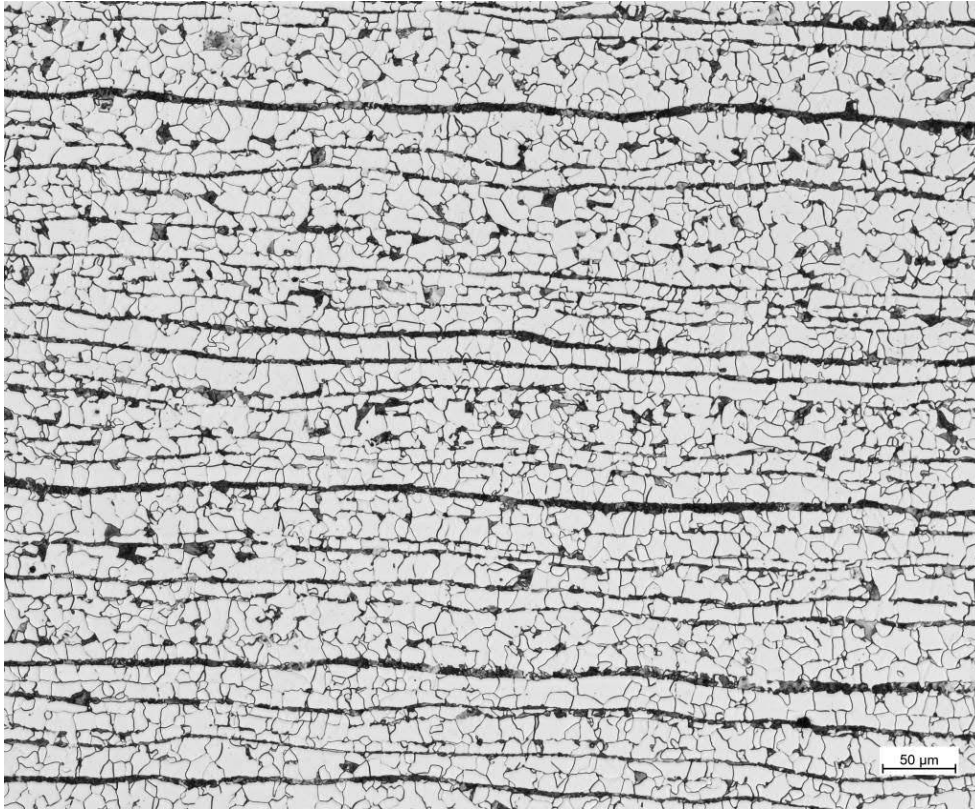
Kaukopää SK6 pinnoittamattomalta kourun seinämältä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin ulkopinnalla suolakerrostumia. Säröjä ei havaittu poikkileikkauksen alueella. Pohjan sisäpinnalla vesikierron puolella havaittiin noin 30 μm paksu yhtenäinen oksidi sekä laajoja noin 120 μm paksuja huokoisia oksidisaarekkeita. Mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu mikrorakenteen hajaantumista (Kuva 32 - Kuva 34).



Kuva 32. Kaukopää SK6, ulkopinta kourun seinämällä, syövyttämätön näyte

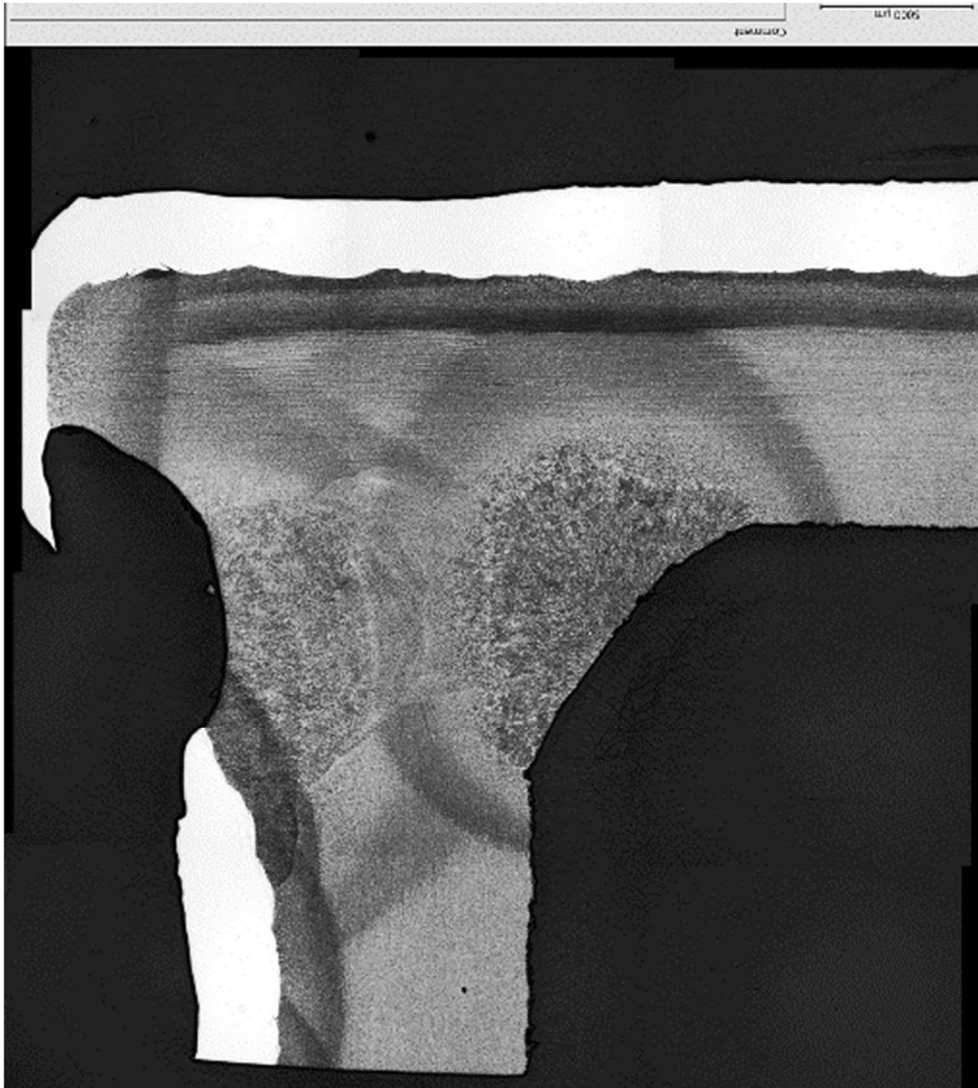


Kuva 33. Kaukopää SK6, sisäpinnan (vesikierron puoleinen pinta) oksidi kourun seinämältä

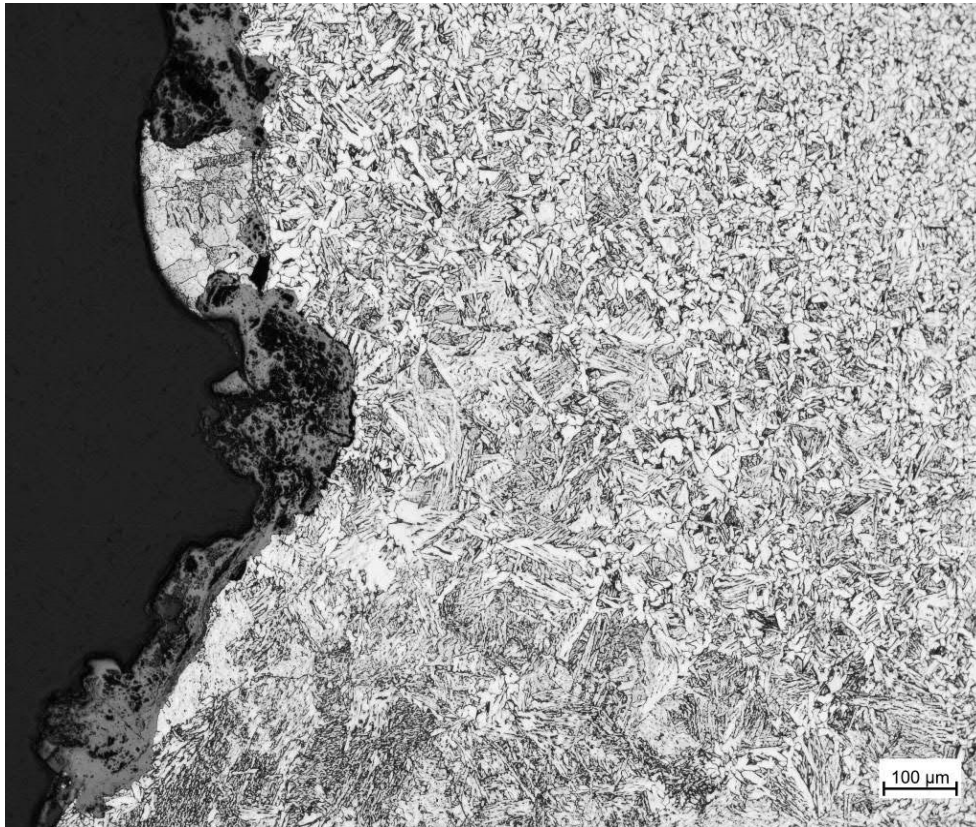


Kuva 34. Kaukopää SK6, mikrorakenne kourun seinämältä

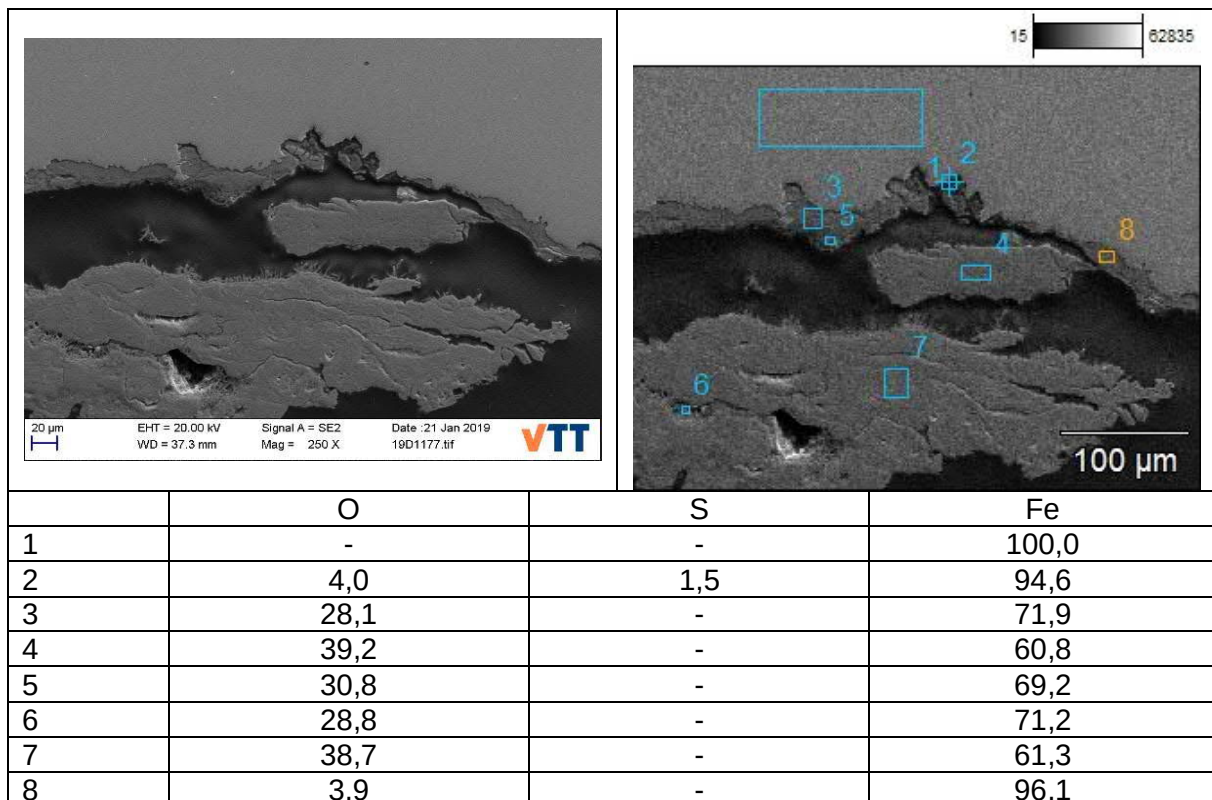
Kaukopää SK6:n pinnoitetun jättöpään poikkileikkauksessa havaittiin suuri syöpymäkuoppa, joka ulottui syväälle pinnoitteen alle perusaineeseen (Kuva 35). Pinnoitteen pinnalla ei havaittu jäämiä kerrostumista, mutta kuopan pohjalla perusaineen pinnalla havaittiin paksuhkoja kerrostumia, jotka sisälsivät rautaoksidin lisäksi pieniä määriä rikkiä. Mikrorakenne perusaineessa muutosvyöhykkeen ulkopuolella oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu merkkejä hajaantumisesta (Kuva 36 ja Kuva 37).



Kuva 35. Kaukopää SK6 jättöpään poikkileikkaus



Kuva 36. Kaukopää SK6, kerrostumaa jättöpään syöpymäkuopan pohjalla



Kuva 37. Kaukopää SK6, jättöpään syöpymässä olevan kerrostuman koostumus (paino-%)

3.5 Kemi

Kemistä tutkimuksiin toimitettiin Valmetin valmistamat jättöpäädystä pinnoitetut sulakourut 3 ja 5, tästä eteenpäin Kemi 3 ja Kemi 5 (Kuva 38 ja Kuva 40). Kourut olivat olleet käytössä noin 12 kuukautta. Kourujen jättöpäädyt sekä kourun pohja noin 110 mm matkalta päädyistä olivat pinnoitettuja. Visuaalisen tarkastuksen aikana kouruissa havaittiin säröjä molempien kourujen pohjalla (Kuva 39). Säröily oli voimakkaampaa ja syvempää kourussa 3, jossa sitä havaittiin myös pinnoitetussa päädyssä. Kemi 3 jättöpäädystä havaittiin myös syöpymää.



Kuva 38. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kemi 3). Säröytynyt alue on merkitty yllimpään kuvaan punaisilla suorakaiteilla. Poikkileikkaushieiden paikat ovat merkitty kuviin valkoisella katkoviivalla.



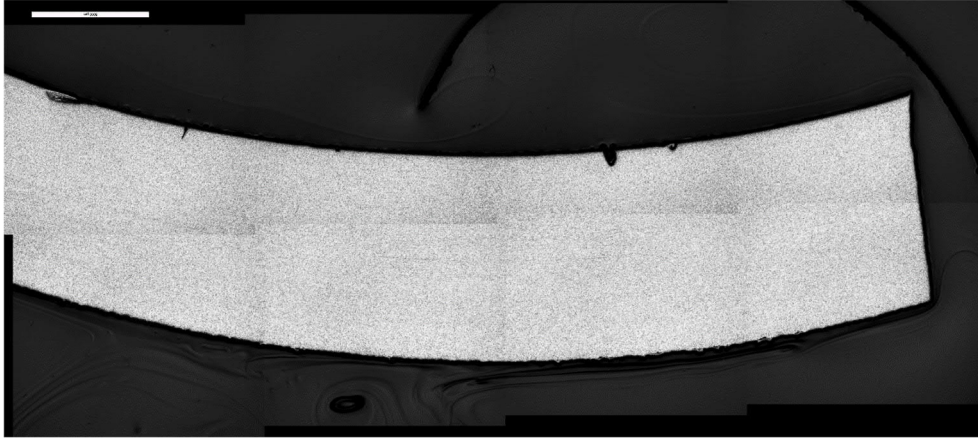
Kuva 39. Yksityiskohta Kemi 3



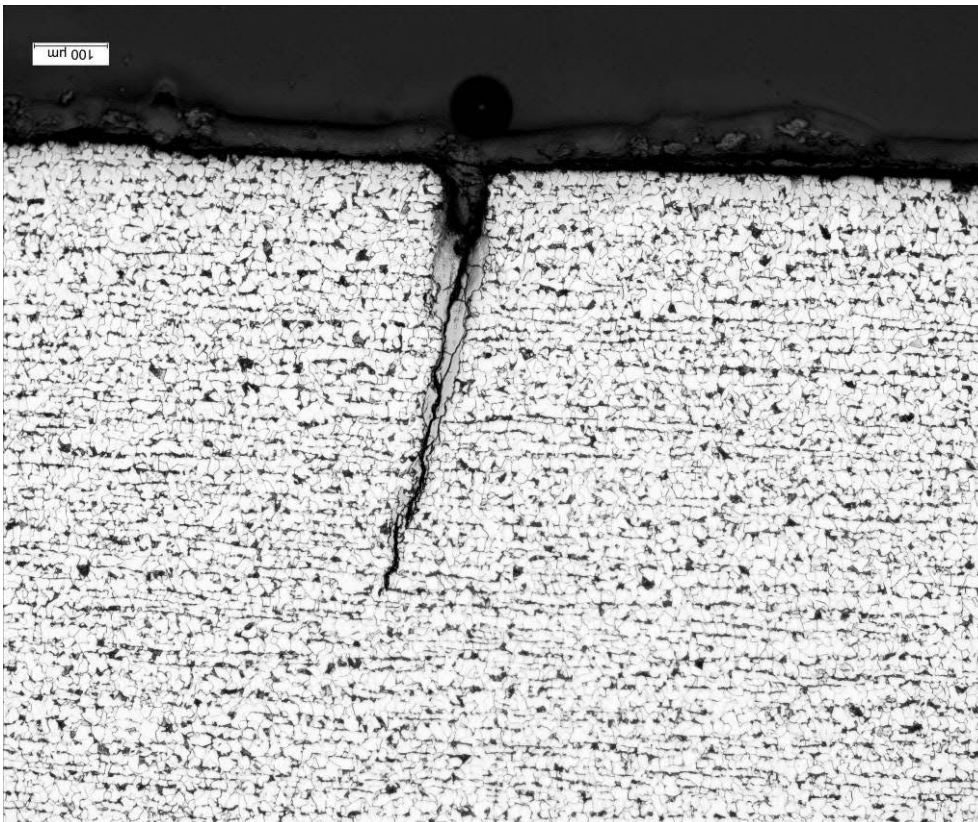
Kuva 40. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru (Kemi 5). Säröytyneet alueet merkitty ylimpään kuvaan punaisilla suorakaiteilla. Poikkileikkaushieiden paikat ovat merkitty kuviin valkoisella katkoviivalla.

Kemin sulakouruille tehtiin tarkempi tutkimus. Kemi 3 sulakourun pinnoittamattomalta pohjan alueelta tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin ulkopinnalla (sulan puoleinen pinta) säröjä sekä syvempiä kuoppia. Säröjen syvyys oli noin 150 - 575 μm (Kuva 41 ja Kuva 42).

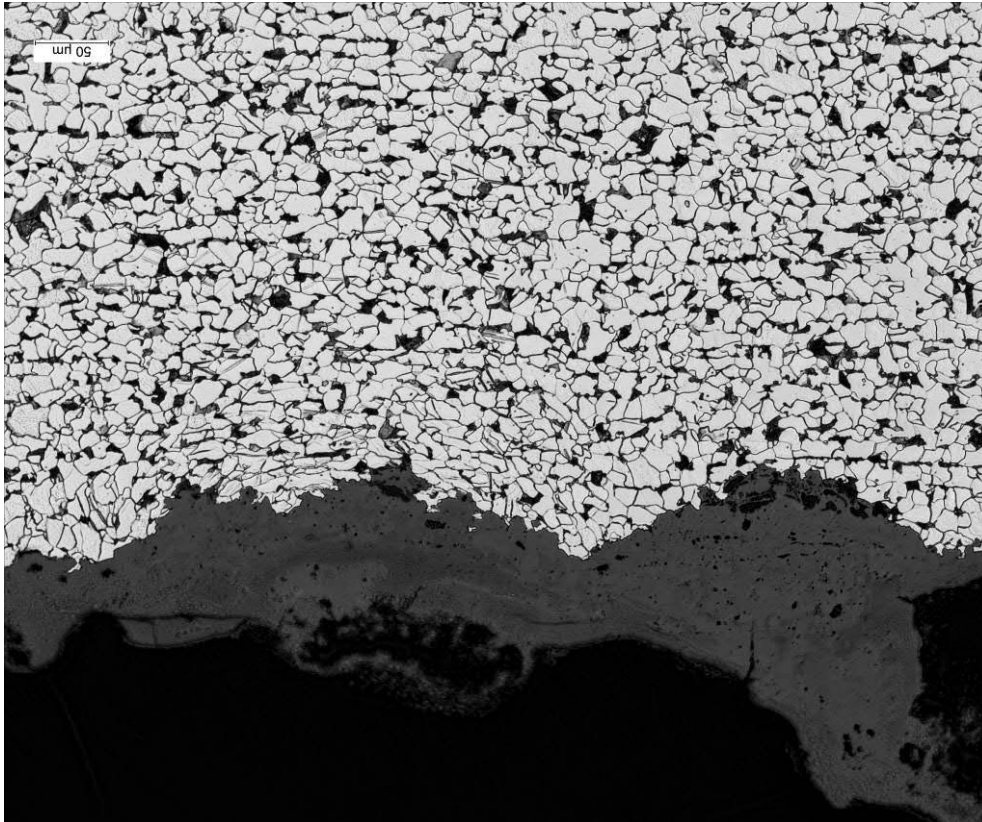
Säröjen sisällä havaittiin oksidi/korroosiotuotetta. Kourun pohjalla sisäpinnalla, vesikierron puolella, havaittiin noin 75 µm paksu oksidikerros (Kuva 43). Sulakourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 44).



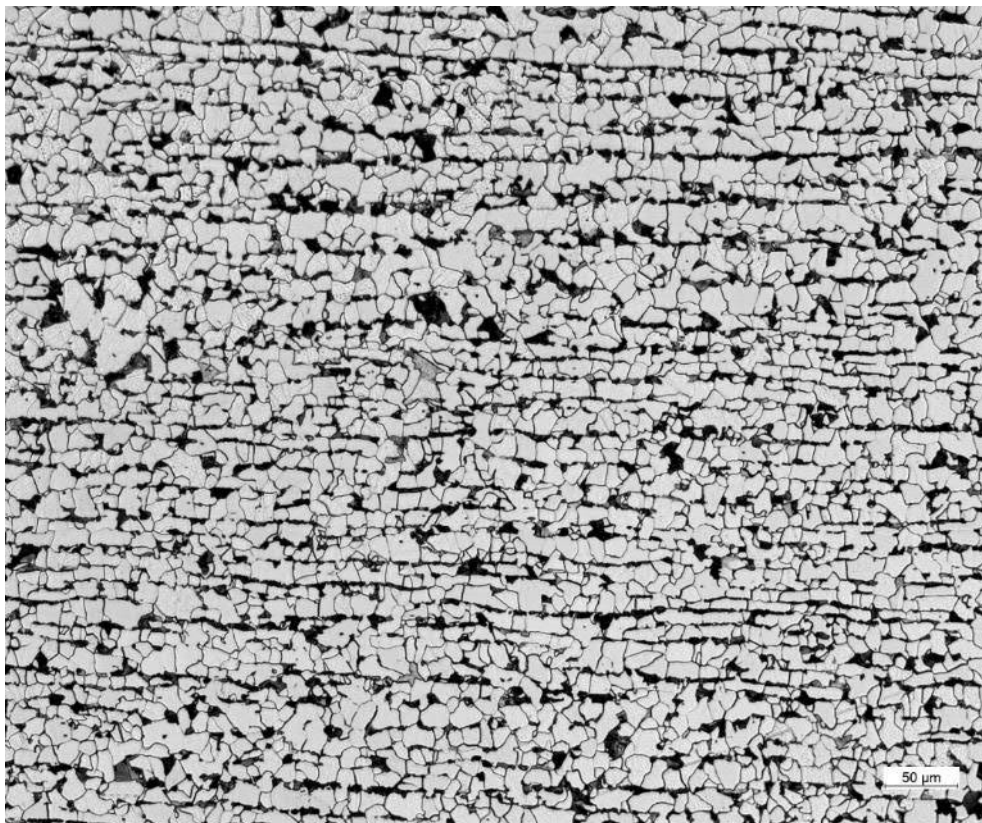
Kuva 41. Kemi 3 poikkileikkaus kourun pohjalta



Kuva 42. Kemi 3 säröjä ulkopinnalla kourun pohjalla



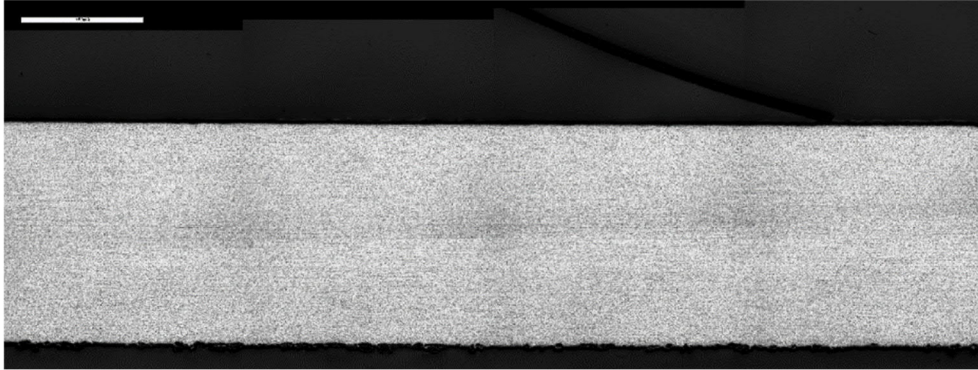
Kuva 43. Kemi 3 pohjanäytteen vesikierron puoleinen oksidi



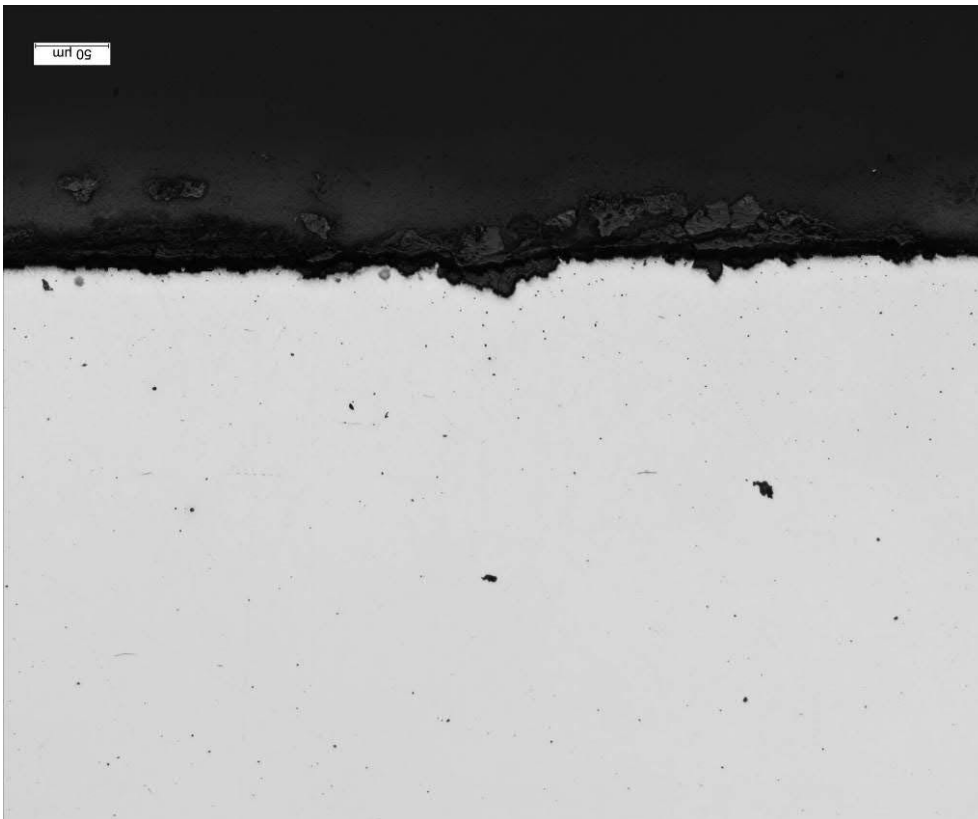
Kuva 44. Kemi 3 mikrorakenne kourun pohjalta

Kemi 3 sulakourun pinnoittamattomalta seinämältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli verrattain tasainen ja siinä havaittiin vain paikoitellen

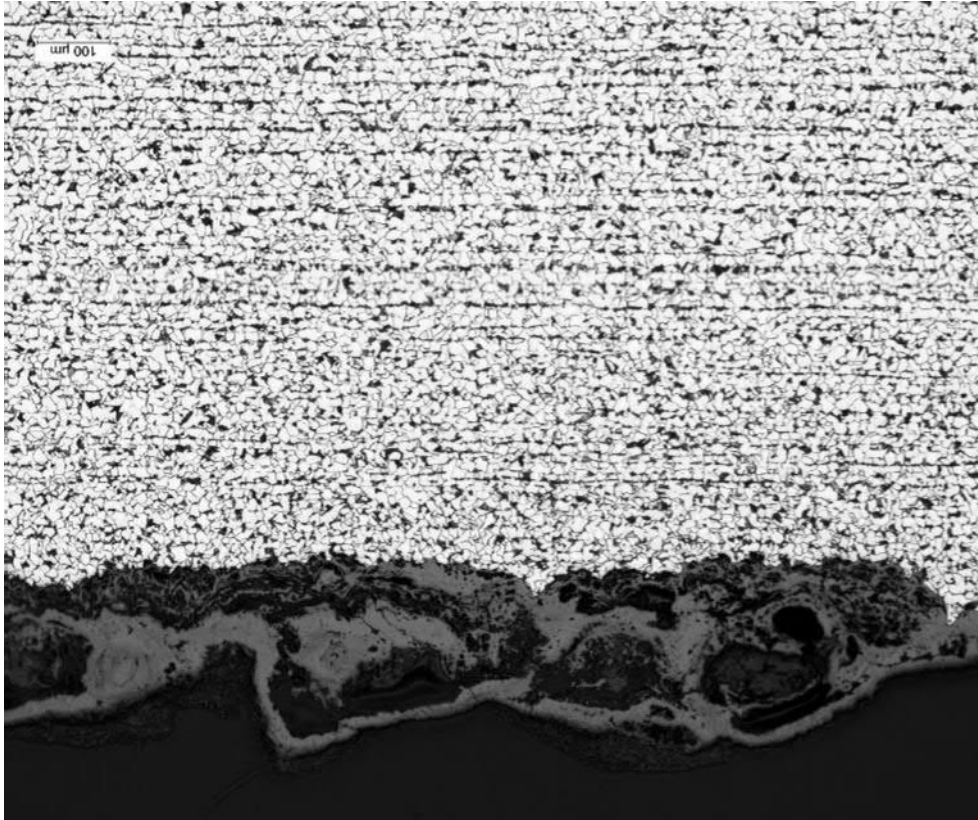
korroosiotuote/sulajäämiä (Kuva 45 ja Kuva 46). Kourun seinällä sisäpinnalla vesikierron puolella havaittiin noin 150 µm paksu huokoinen oksidikerros (Kuva 47). Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 48).



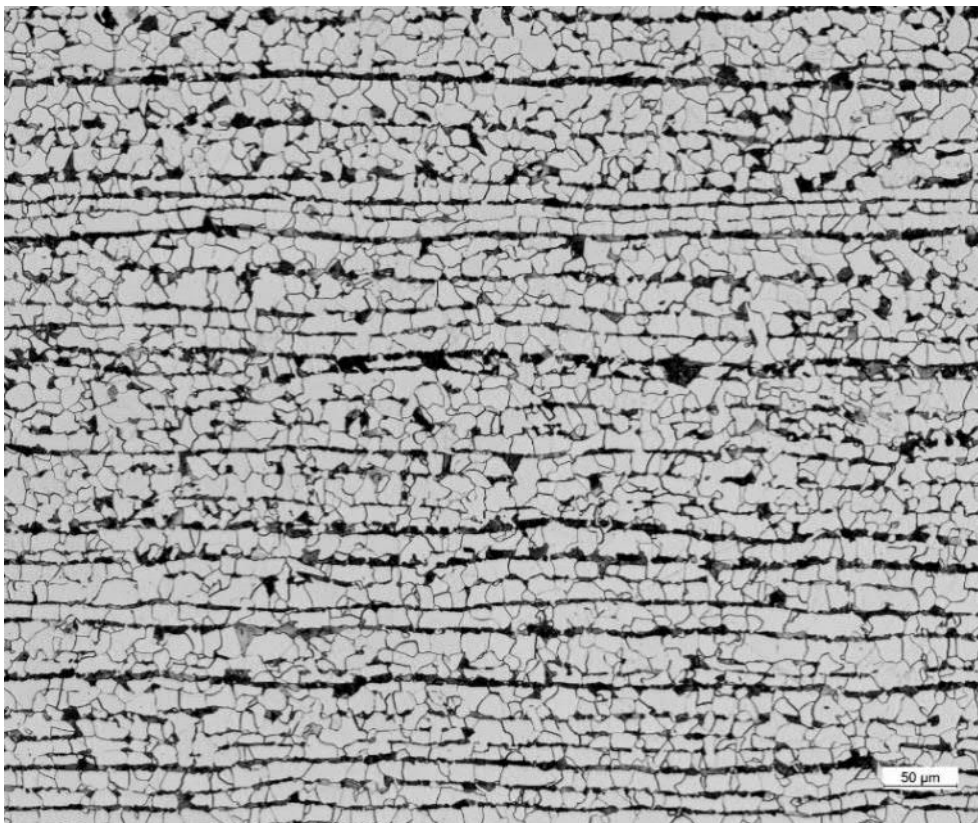
Kuva 45. Kemi 3 poikkileikkaus kourun seinämältä, sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla



Kuva 46. Kemi 3 ulkopintaa seinämältä



Kuva 47. Kemi 3 sisäpinnan oksidi seinämän kohdalta

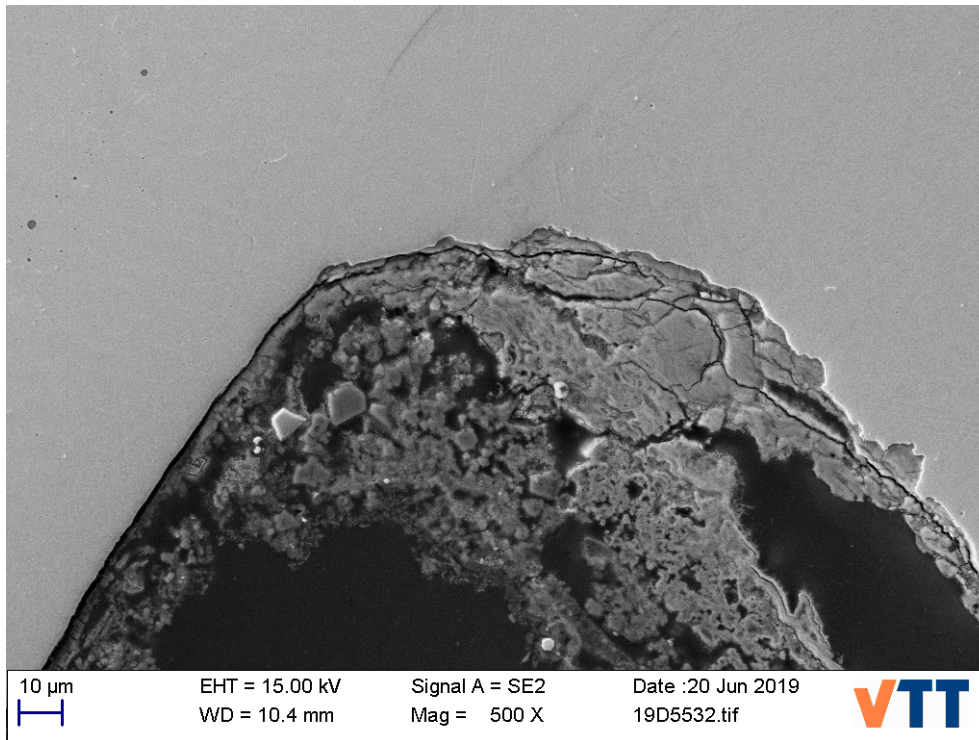


Kuva 48. Kemi 3 mikrorakenne seinämältä

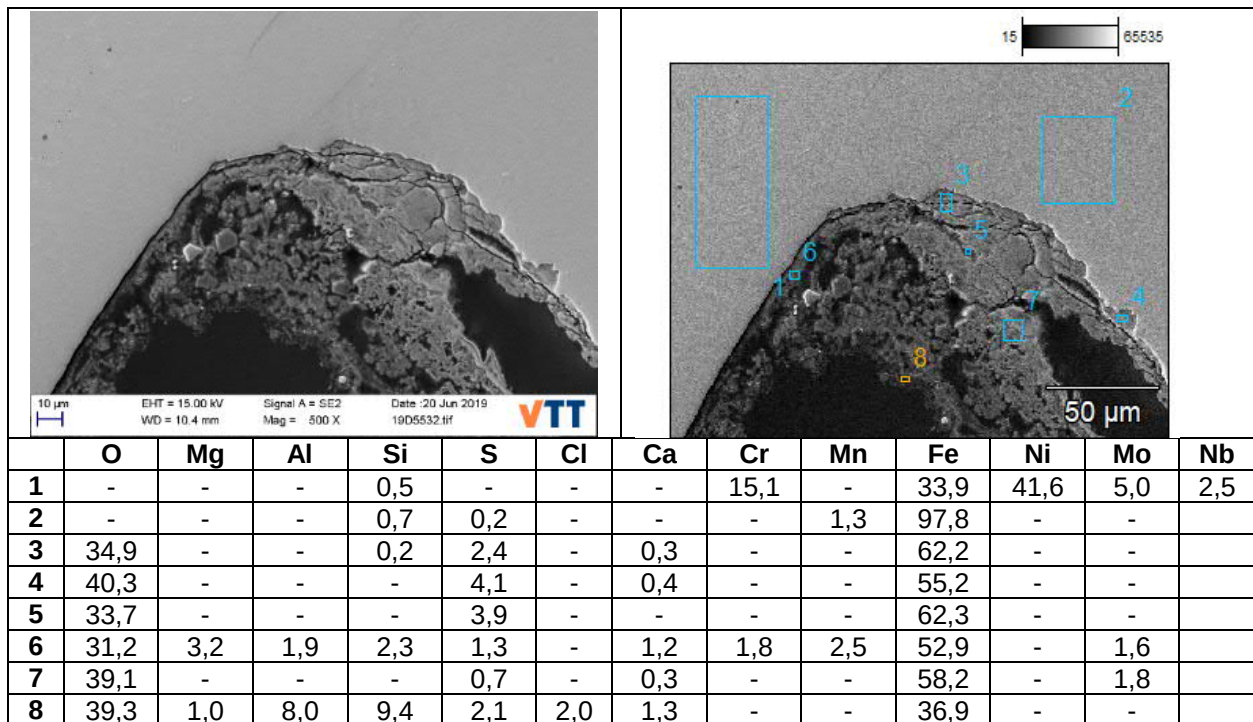
Kemi 3 sulakourun pinnoitetusta jättöpäädystä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin syöpymää perusaineeseen asti (Kuva 49). Syöpymä koostui pääosin raudan oksideista, lisäksi löytyi pieniä määriä magnesiumia, alumiinia, piitä, rikkiä, klooria, kalsiumia, kromia, mangaania ja molybdeenia (Kuva 51). Tällä kohtaa sisäpinnalla vesikierron puolella havaittiin noin 160 µm paksu rautaoksidikerros, josta analysoitiin lisäksi fluoria, alumiinia, piitä, rikkiä, klooria, titaania ja mangaania (Kuva 52 ja Kuva 53). Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen ja siinä havaittiin lievää lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista muutosvyöhykkeen ulkopuolella (Kuva 54 ja Kuva 55). Jättöpäädyn ulkopinnalla pinnoiteen pinnalla huokoisen suolakerrostuman alla havaittiin ohut raudan, nikkelin ja kromin sekaoksidi, jossa oli lisäksi natriumia, magnesiumia, alumiinia, piitä, rikkiä, klooria, kalsiumia ja mangaania (Kuva 56).



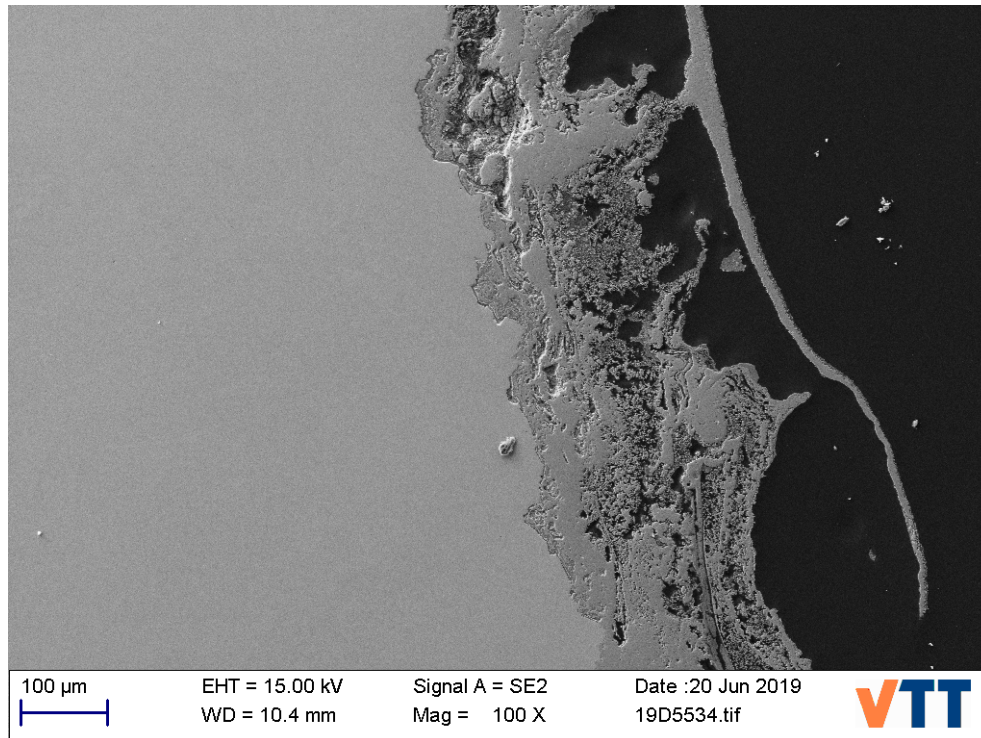
Kuva 49. Kemi 3 sulakourun jättöpään poikkileikkaus



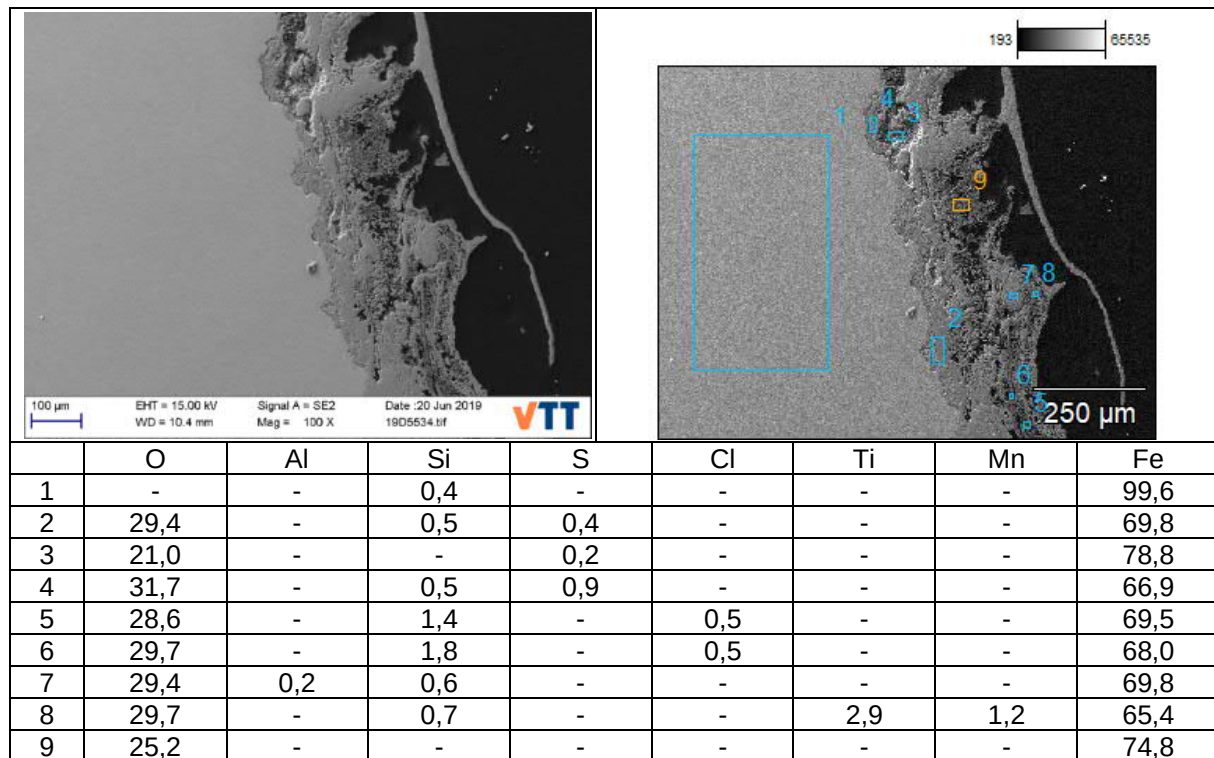
Kuva 50. Kemi 3, kerrostumaa pinnoitteen ja perusaineen rajalla



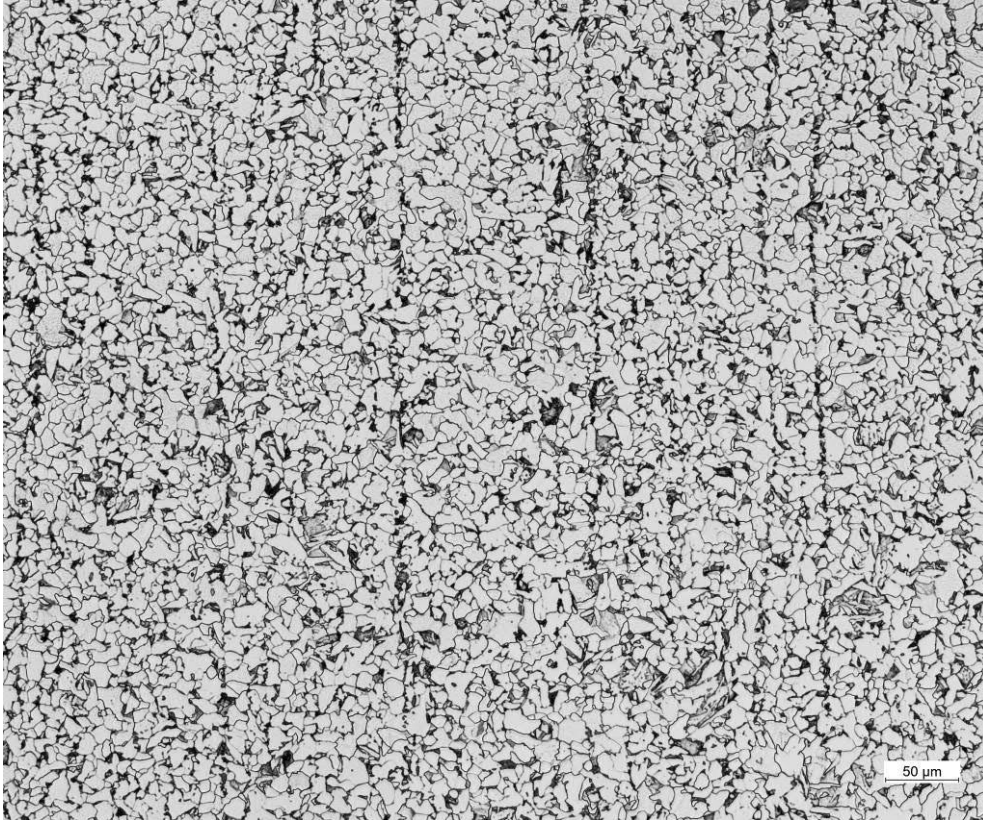
Kuva 51. Kemi 3 jäätöpään syöpymän koostumus (paino-%)



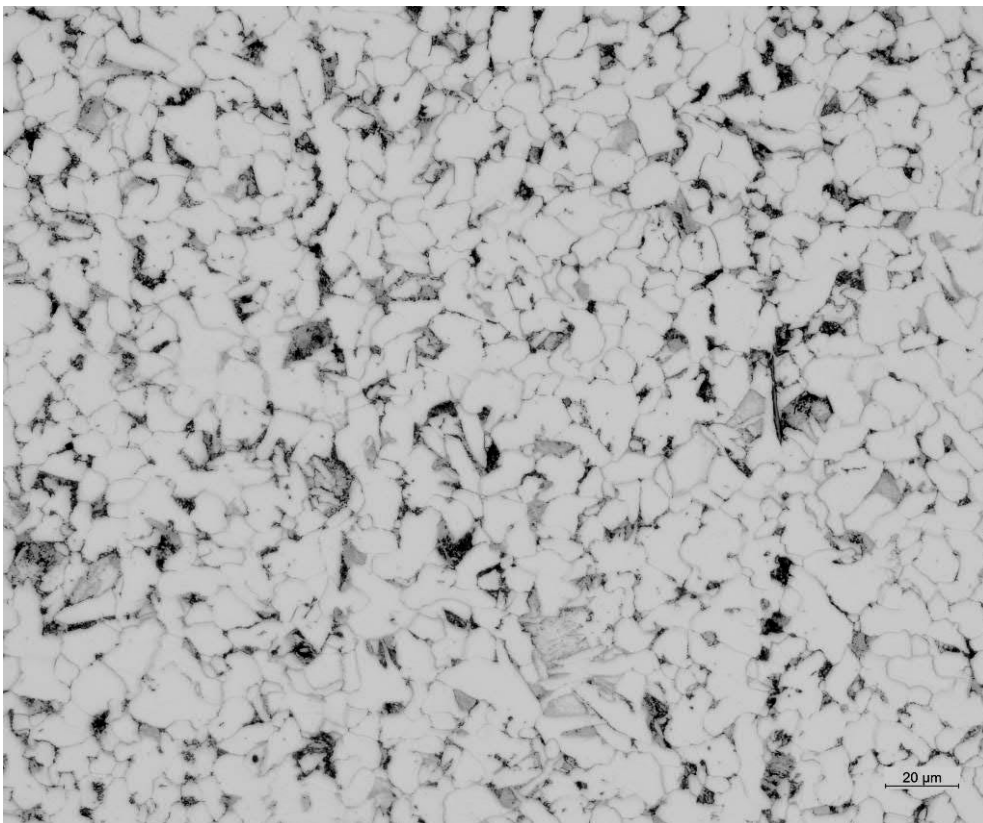
Kuva 52. Kemi 3, jättöpäädyn sisäpinnan (vesikierronpuoleinen pinta) oksidi



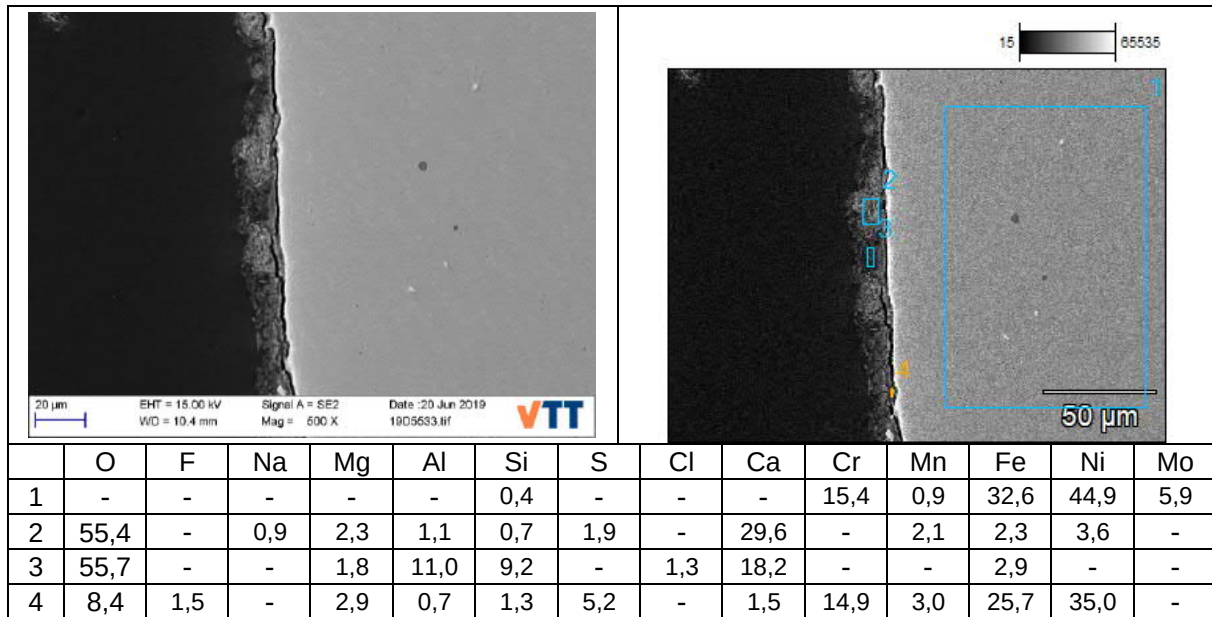
Kuva 53. Kemi 3 jättöpäädyn sisäpinnan oksidikerroksen koostumus (paino -%)



Kuva 54. Kemi 3 jättöpäädyn perusaineen mikrorakenne, muutosvyöhykkeen ulkopuolelta läheltä syöpynyttä kohtaa



Kuva 55. Yksityiskohta Kuva 54



Kuva 56. Kemi 3 jättöpäädyn ulkopinnan oksidikerroksen koostumus (paino -%)

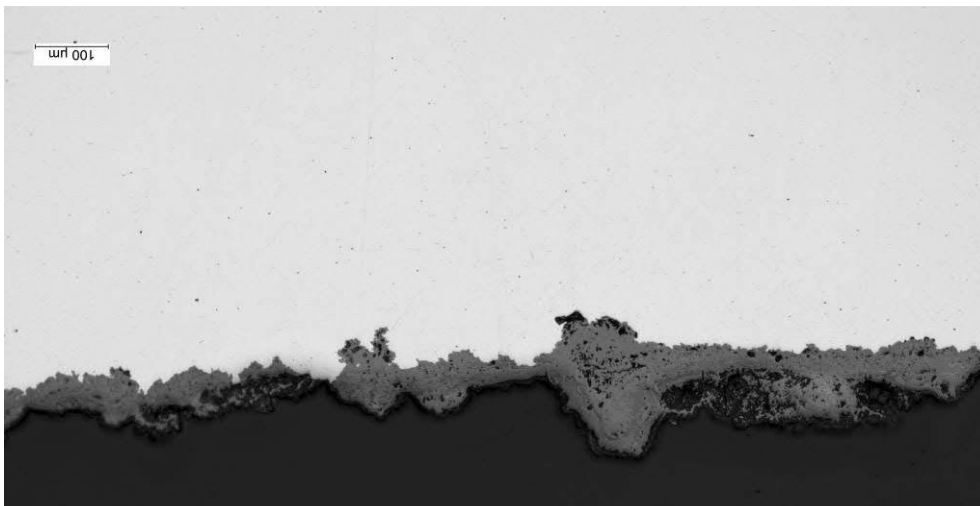
Kemi 5 sulakourun pohjan pinnoittamattomalta osalta tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin säröjä; yksittäinen noin 750 µm syvä särö sekä pienempiä säröjä, joiden syvyys oli noin 50 - 100 µm. Säröjä oli harvemmassa kuin Kemi 3 sulakourun pohjalla. Säröjen sisällä havaittiin oksidi/korroosiotuotetta. Kourun pohjalla sisäpinnalla, vesikierron puolella, havaittiin epätasainen noin 75 µm paksu oksidikerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 57 - Kuva 60).



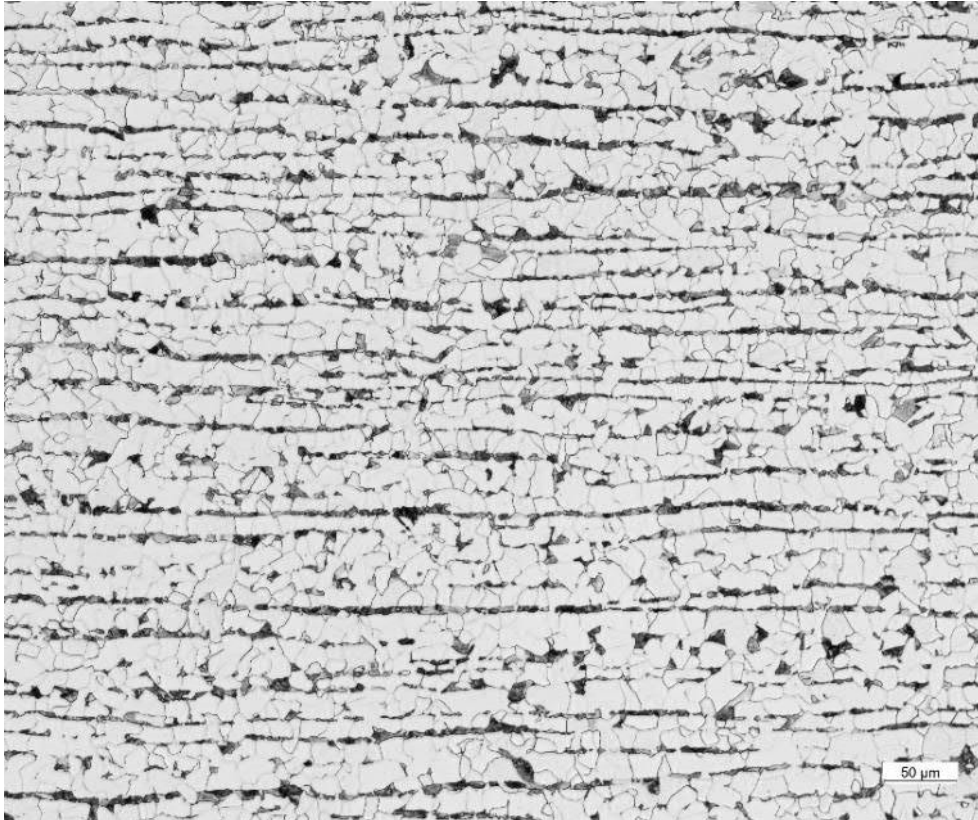
Kuva 57. Kemi 5 poikkileikkaus kourun pohjalta, sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla



Kuva 58. Kemi 5 särö kourun pohjan ulkopinnalla

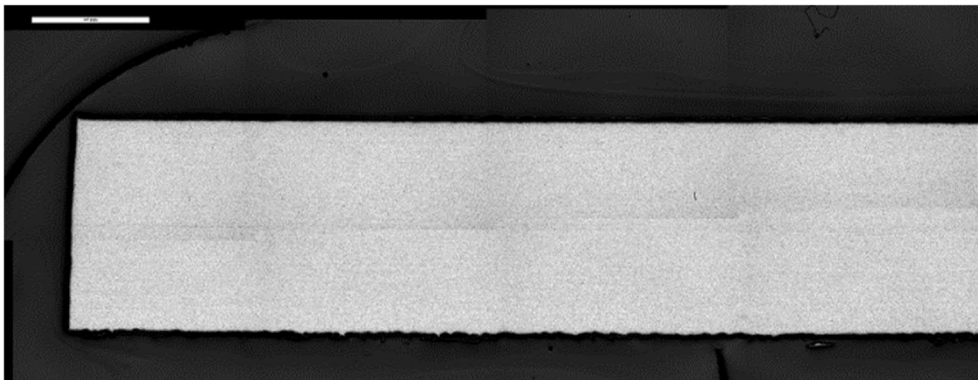


Kuva 59. Kemi 5 särö kourun pohjan sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta)

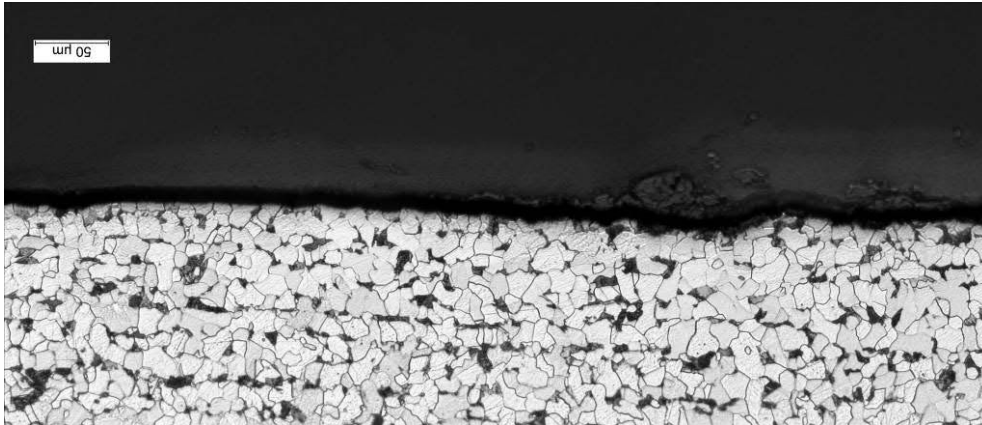


Kuva 60. Kemi 5 mikrorakenne kourun pohjalta

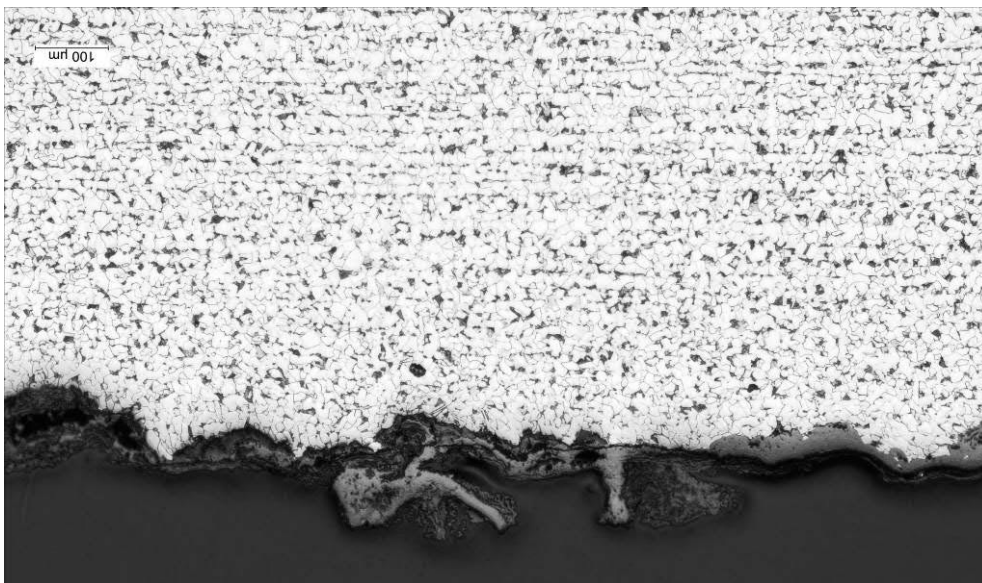
Kemi 5 sulakourun pinnoittamattomalta seinältä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä oli paikoitellen havaittavissa sulajäämiä. Pohjan sisäpinnalla havaittiin epätasainen noin 50 μm paksu oksidikerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 61 - Kuva 64).



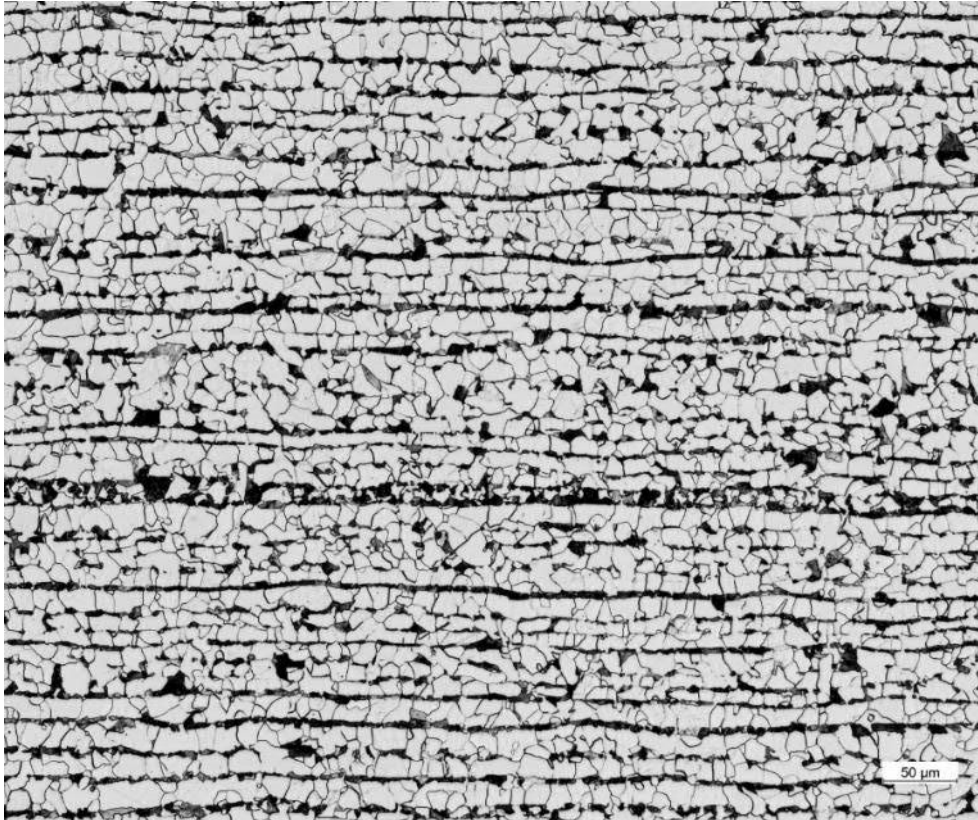
Kuva 61. Kemi 5 poikkileikkaus seinämältä, kourun sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla



Kuva 62. Kemi 5 seinämän ulkopinta



Kuva 63. Kemi 5 seinämän sisäpinnan (vesikierron puoleinen pinta) oksidi

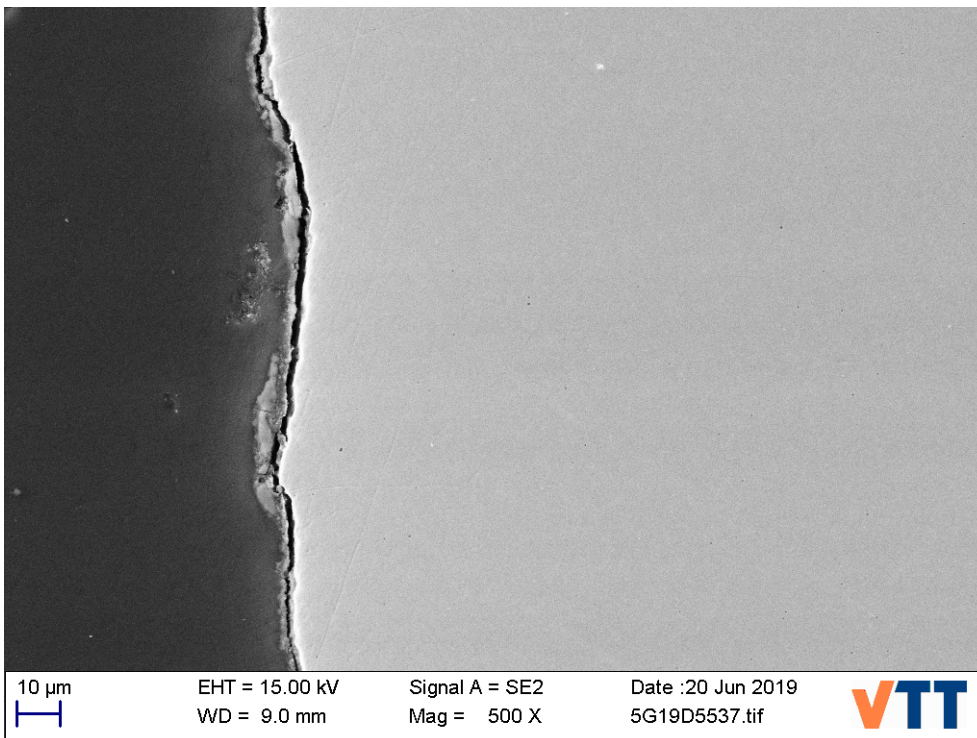


Kuva 64. Kemi 5 mikrorakenne kourun seinämältä

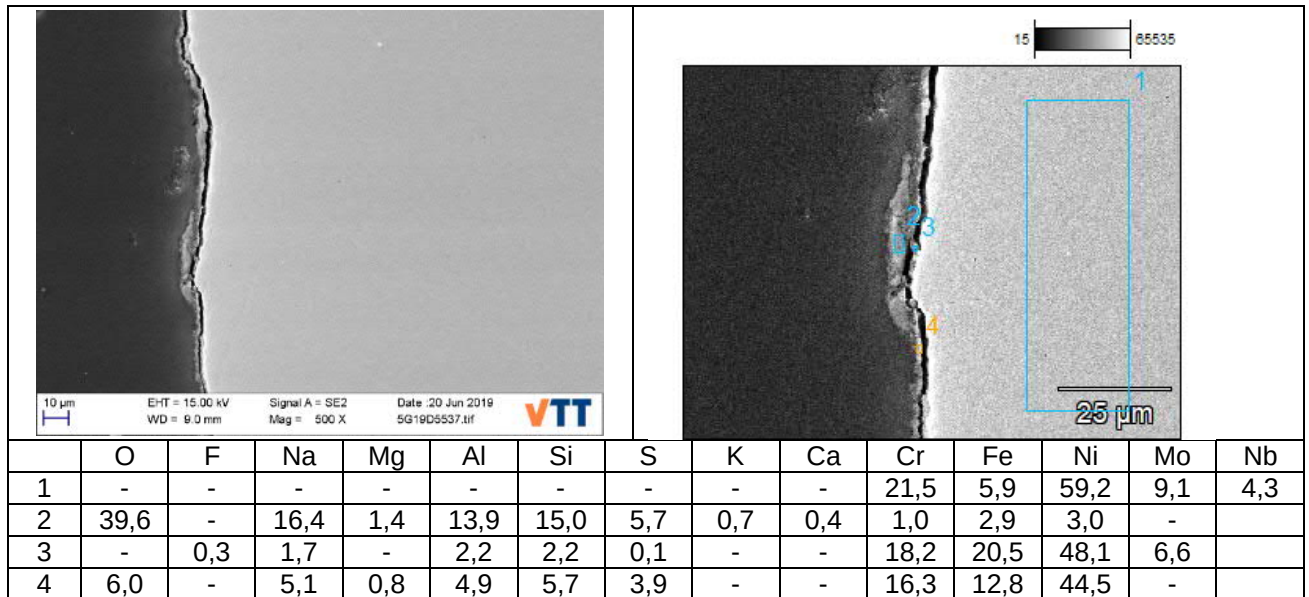
Kemi 5 sulakourun pinnoitetusta jättöpäädystä tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu vastaavanlaista kuoppamaista syöpymää, mikä havaittiin Kemi 3 kourussa (Kuva 65 ja Kuva 66). Ulkopinta oli hyvin tasainen ja sen pinnalla oli vain paikoitellen ohut oksidi/korroosiotuote kerros, joka sisälsi nikkelin, kromin ja raudan muodostama sekaoksidi, joka sisälsi lisäksi vaihtelevia määriä fluoria, natriumia, magnesiumia, alumiinia, piitä, rikkiä, kaliumia, kalsiumia ja molybdeenia (Kuva 67). Tällä kohden sisäpinnalla havaittiin noin 80 μm paksu kaksikerroksinen rautaoksidikerros, jonka uloimmassa osassa oli raudan lisäksi pieni määrä piitä (Kuva 68 ja Kuva 69). Sulakourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen, eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista muutosvyöhykkeen ulkopuolella (Kuva 70).



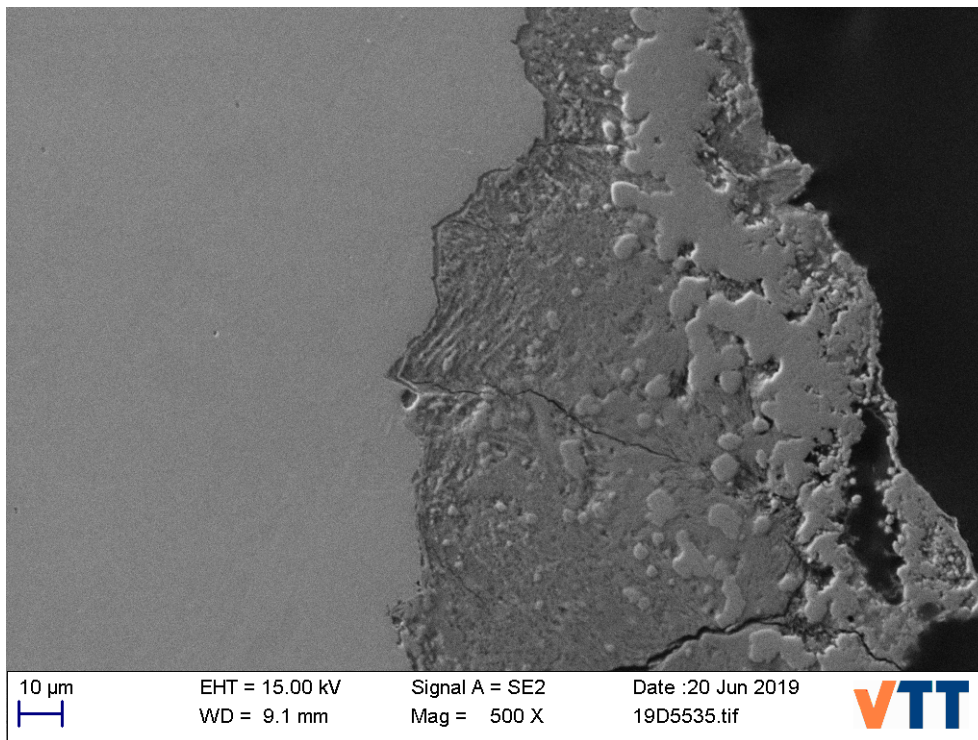
Kuva 65. Kemi 5 jättöpään poikkileikkaus



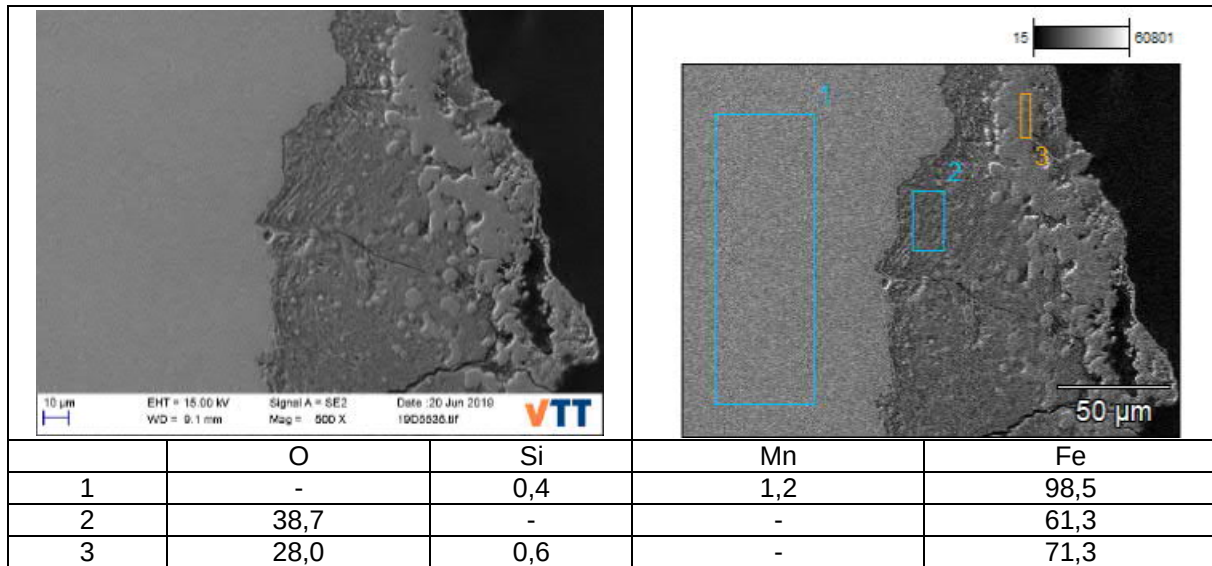
Kuva 66. Kemi 5 jättöpään ulkopinta



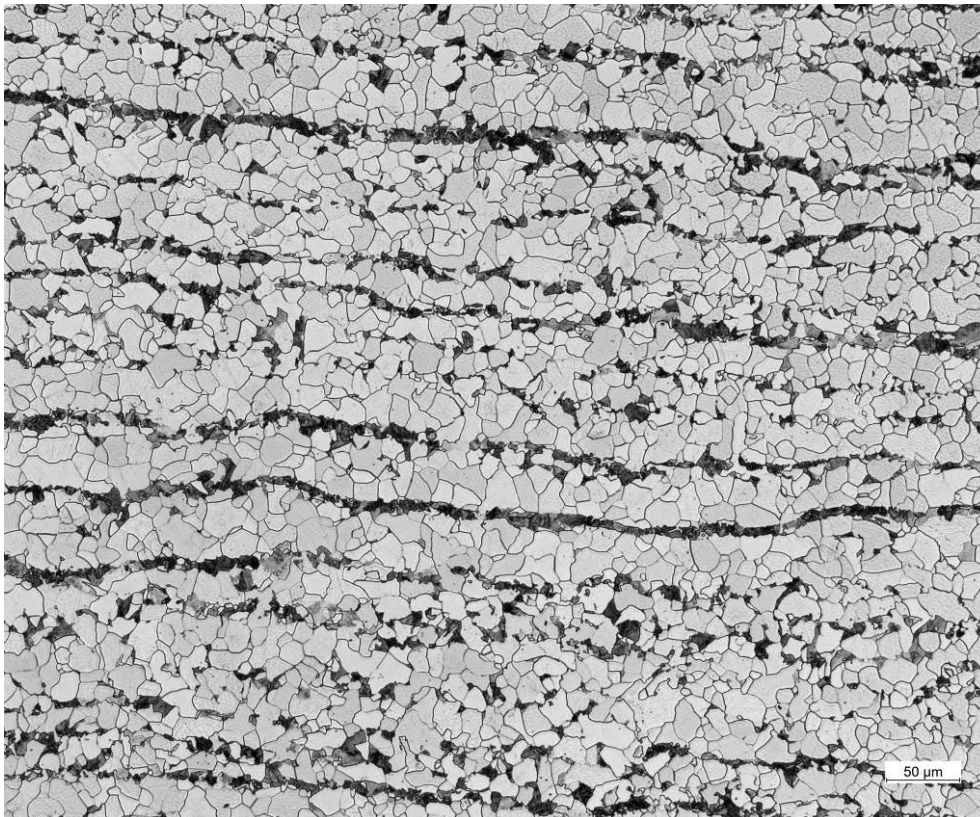
Kuva 67. Kemi 5 jättöpäädyn ulkopinnan oksidikerroksen koostumus (paino-%)



Kuva 68. Kemi 5 jättöpäädyn sisäpinnan oksidi



Kuva 69. Kemi 5 sisäpinnan oksidikerroksen koostumus (paino -%)



Kuva 70. Kemi 5 jättöpäädyn mikrorakenne

3.6 Kotkamills

Tutkimuksiin toimitettiin Andritzin valmistamat compound -kourut, tästä eteenpäin Kotkamills oikea ja Kotkamills vasen (Kuva 71 ja Kuva 72). Kourut olivat olleet käytössä vuoden ajan. Vasemmasta kourusta oli irrotettu pala ennen toimitusta. Visuaalisessa tarkastuksessa molemmissa kouruissa havaittiin runsaasti säröjä seinämillä.



Kuva 71. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kotkamills oikea). Säröytyneet alueet on merkitty yläkuvaan punaisilla suorakulmioilla.



Kuva 72. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Kotkamills vasen). Säröytyneet alueet on merkitty ylimpään kuvaan punaisilla suorakulmioilla.

3.7 Kymi

Tutkimuksiin toimitettiin sulakourut 6 ja 7, tästä eteenpäin Kymi 6 ja Kymi 7 (Kuva 71 ja Kuva 72). Kourut olivat Valmetin toimittamat ja olivat olleet käytössä 12 kuukautta. Kourujen jättöpäädyst sekä kourun pohja noin 100 mm matkalta päädystä olivat pinnoitettuja. Visuaalisessa tarkastuksessa kummassakaan kourussa ei havaittu säröjä. Kymi 6 kourussa havaittiin jättöpäädystä syöpymäkuoppia pinnoitteessa sekä perusaineessa. Tämän lisäksi

kouruosan perusaine oli hieman syöpynyt pinnoiterajapinnassa (Kuva 73). Kymi 7 sulakourussa oli jättöpäädyssä nähtävissä pieniä syöpymäkuoppia (Kuva 74).



Kuva 73. Sulakouru Kymi 6. Syöpymäkohdat merkitty punaisella.



Kuva 74. Sulakouru Kymi 7. Syöpymäalueet merkitty punaisella.

3.8 Oulu

Tutkimuksiin toimitettiin Andritzin valmistamat compound -kourut 1 ja 4, tästä lähtien Oulu 1 ja Oulu 4 (Kuva 75 - Kuva 77). Kourut olivat olleet käytössä 24 kuukautta. Visuaalisessa

tarkastuksessa kourussa Oulu 1 havaittiin jättöpäässä syöpymää ja kourussa Oulu 4 säröjä seinämillä.



Kuva 75. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru, Oulu 1. Näytteiden ottopaikat on merkitty valkoisilla katkoviivoilla kuviin.

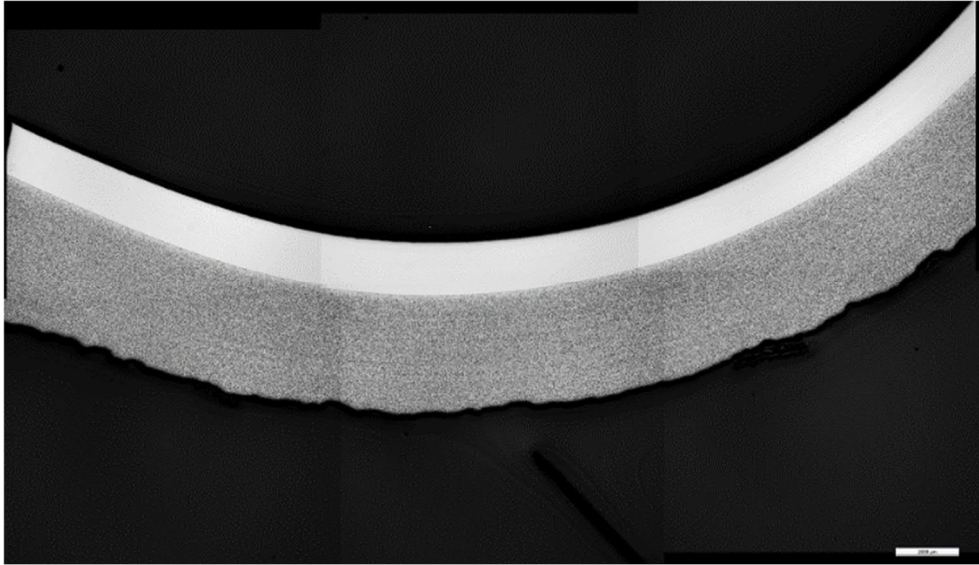


Kuva 76. Oulu 1 jättöpäädyn alapinta. Pinnoite syöpynyt puhki paljastaen perusaineen.

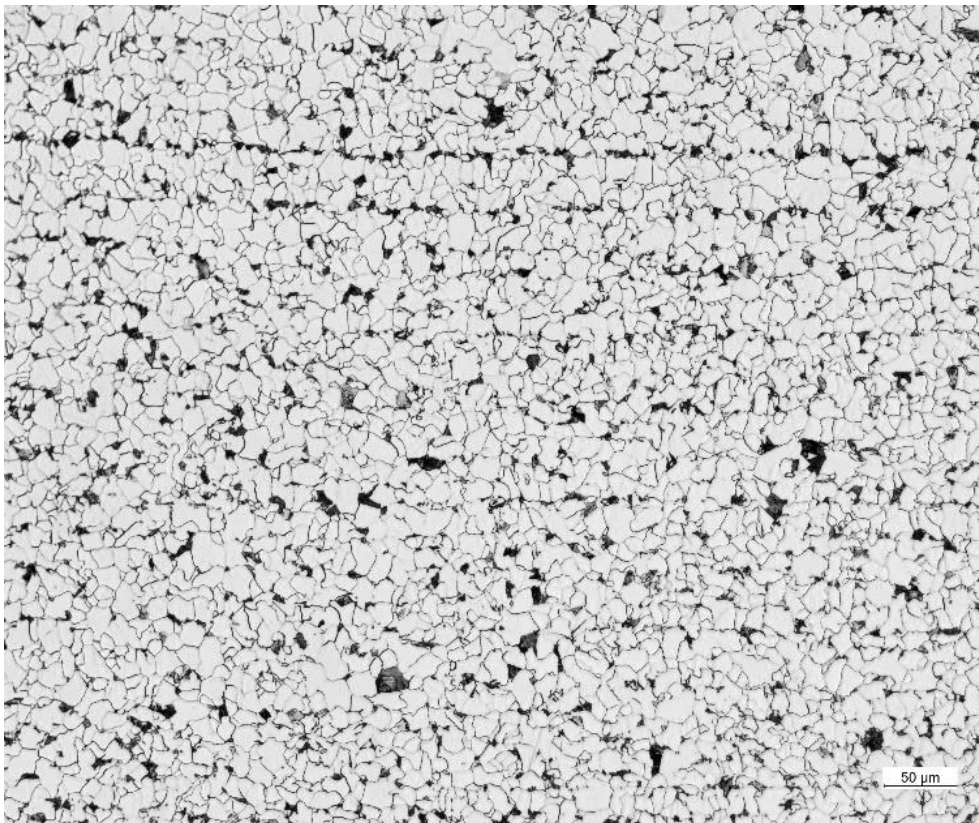


Kuva 77. Tutkimuksiin toimitettu sulakouru, Oulu 4. Säröytyneet alueet onmerkitty yllimpään kuvaan punaisilla suorakaiteilla. Jättöpään poikkileikkausnäyte on tehty valkoisen katkoviivan kohdalta.

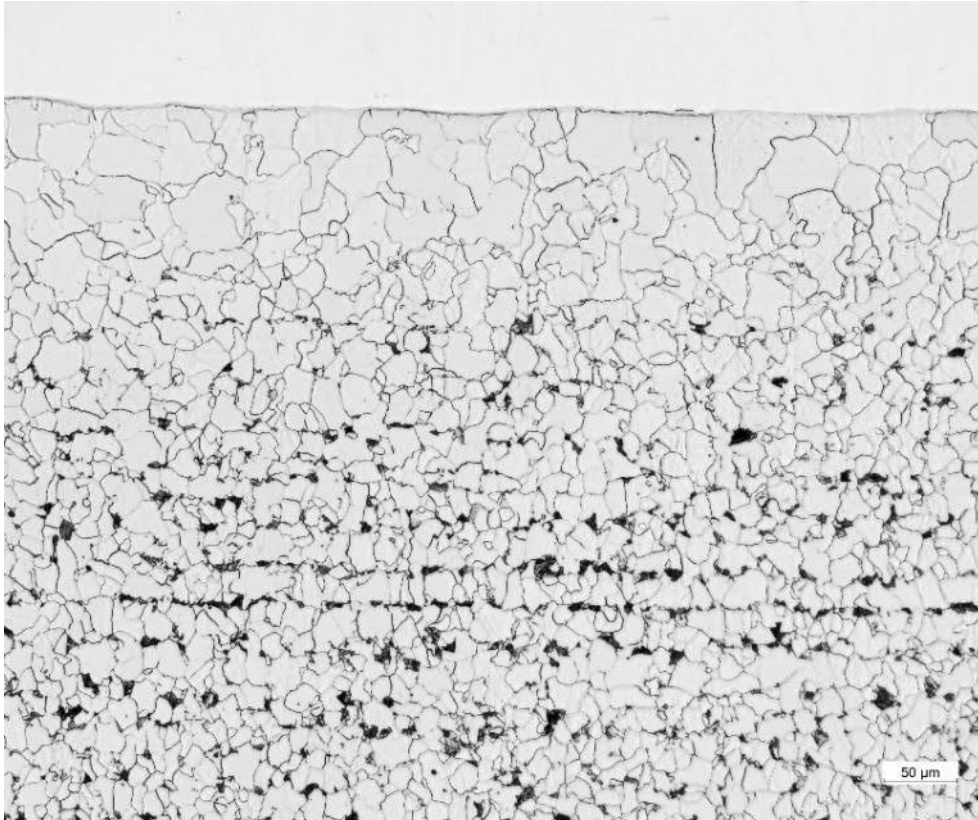
Oulun sulakouruille tehtiin tarkempi tutkimus. Oulu 1 sulakourun pohjan poikkileikkaus ja mikrorakennekuvat on esitetty Kuva 78 - Kuva 80. Kourun pohjalla mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista. Oksidikerroksen paksuus kourun pohjalla oli alle 20 μm ja pinnoite-perusainerajapinnalla oli havaittavissa noin 140 μm paksuinen hiilenkatovyöhyke.



Kuva 78. Oulu 1 poikkileikkaus kourun pohjalta, sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla

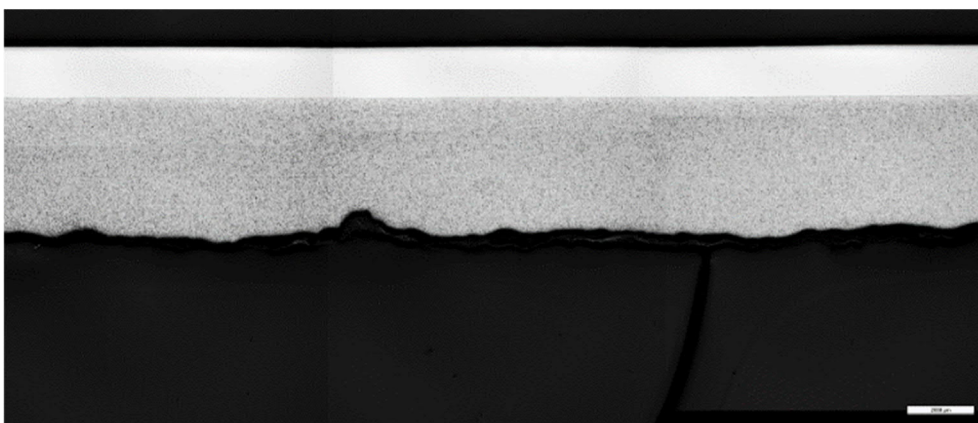


Kuva 79. Oulu 1 perusaineen mikrorakenne kourun pohjalta

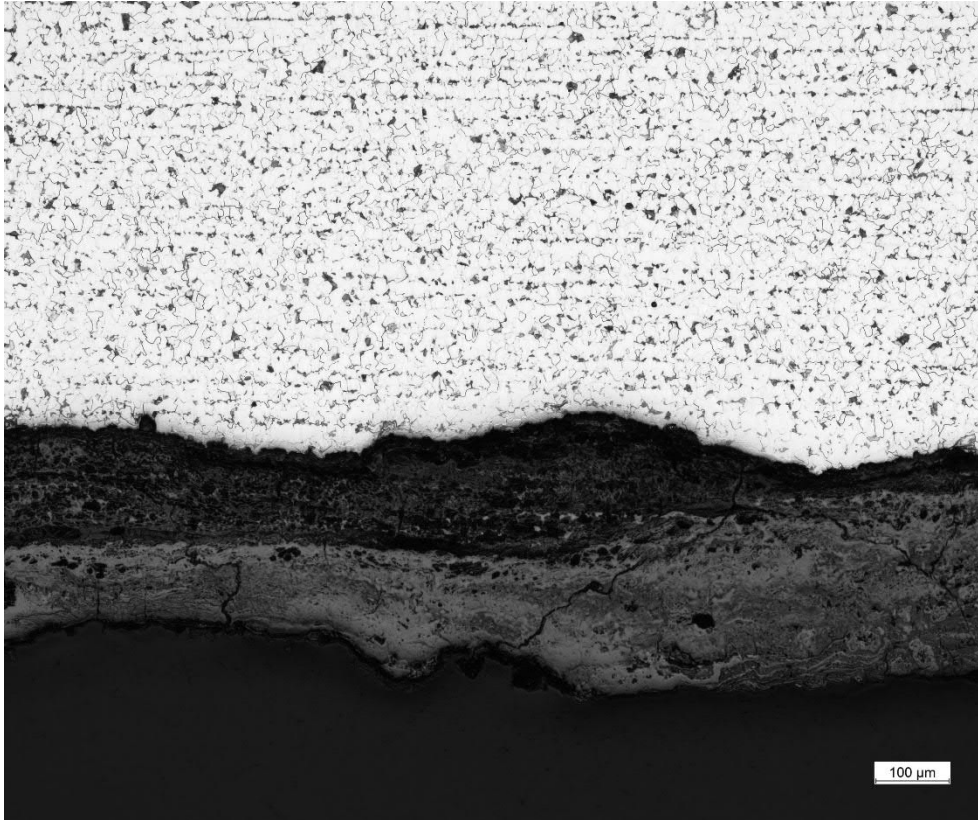


Kuva 80. Oulu 1 pinnoite-perusainerajapinta kourun pohjalla

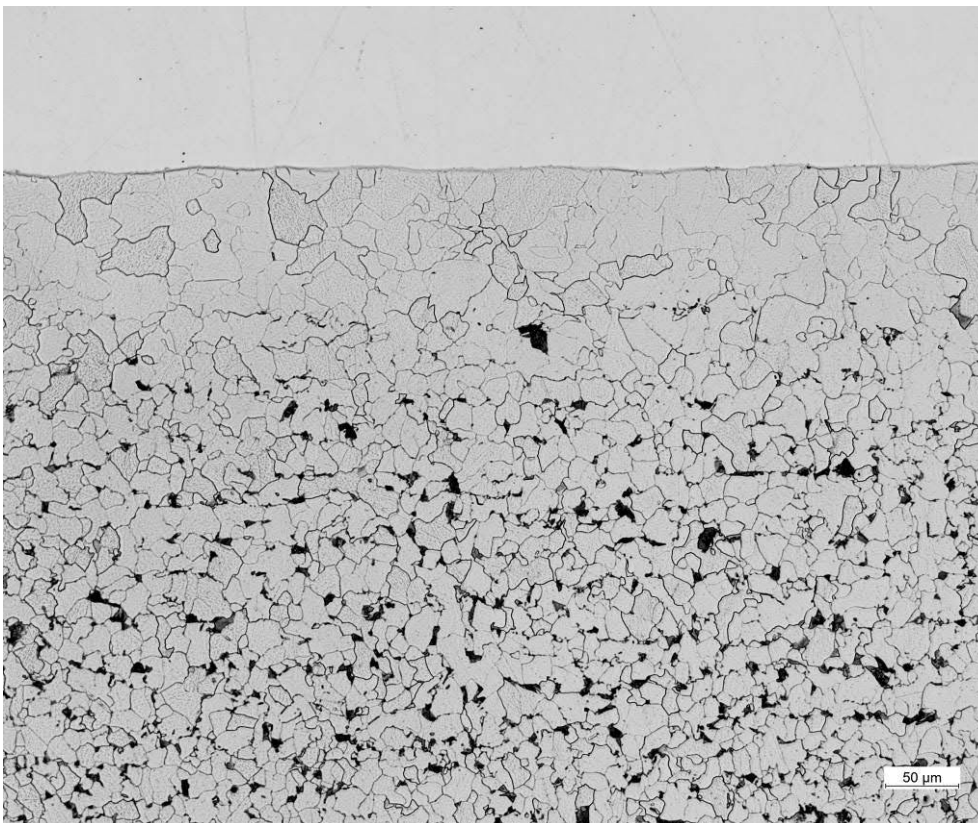
Oulu 1 sulakourun seinältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä oli nähtävissä paikoitellen sulajäämiä. Sisäpinnalla, vesikierron puoleisella pinnalla, havaittiin noin 220 μm paksu epähomogeeninen oksidikerros. Pinnoite-perusainerajapinnalla havaittiin noin 80 μm paksu hiilenkatokerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 81 - Kuva 84)



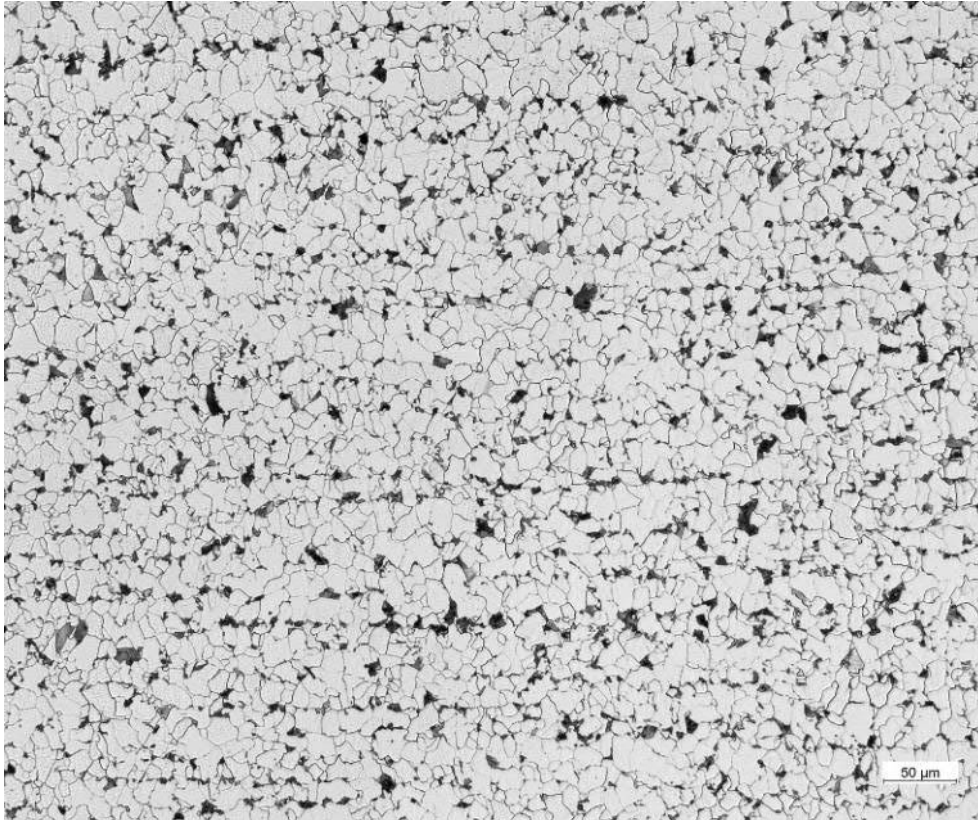
Kuva 81. Oulu 1 seinämän poikkileikkaus, vesipiirin puoleinen (sisäpinta) alhaalla



Kuva 82. Oulu 1 sisäpinnan (vesipiirin puoleinen pinta) oksidikerros kourun seinämällä

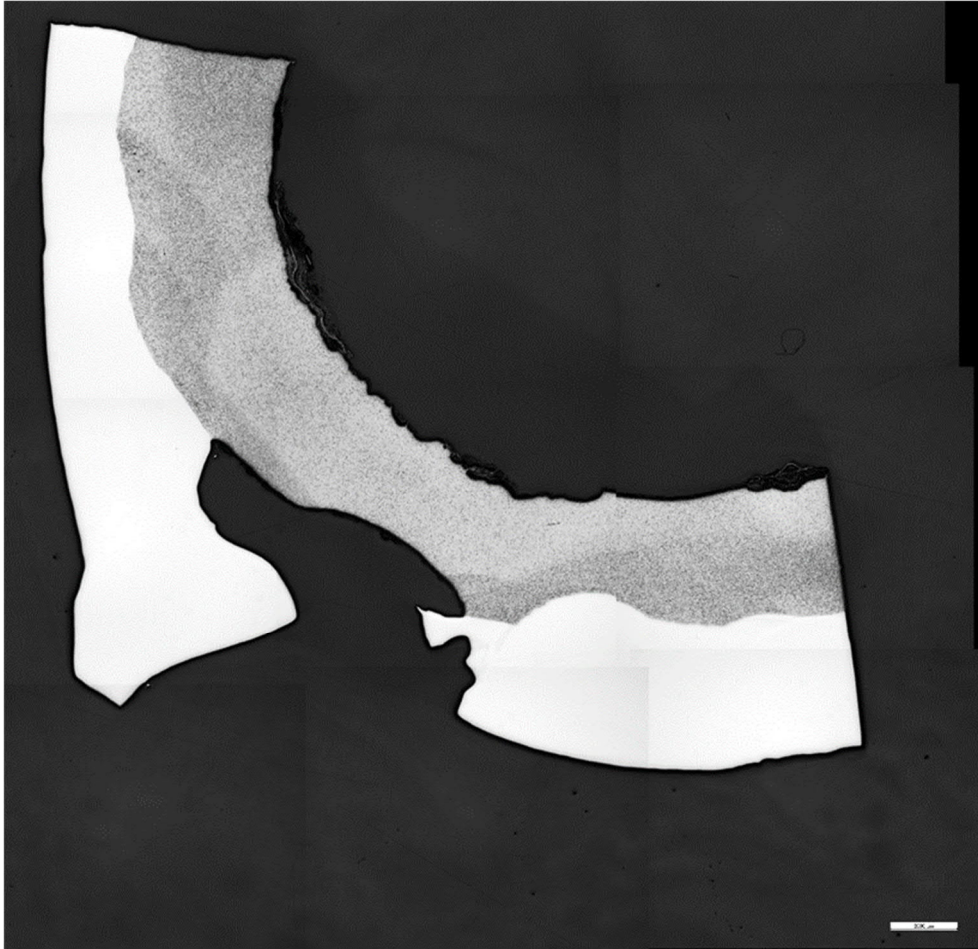


Kuva 83. Oulu 1, pinnoite-perusainerajapinta kourun seinämällä



Kuva 84. Oulu 1, perusaineen mikrorakenne kourun seinämältä

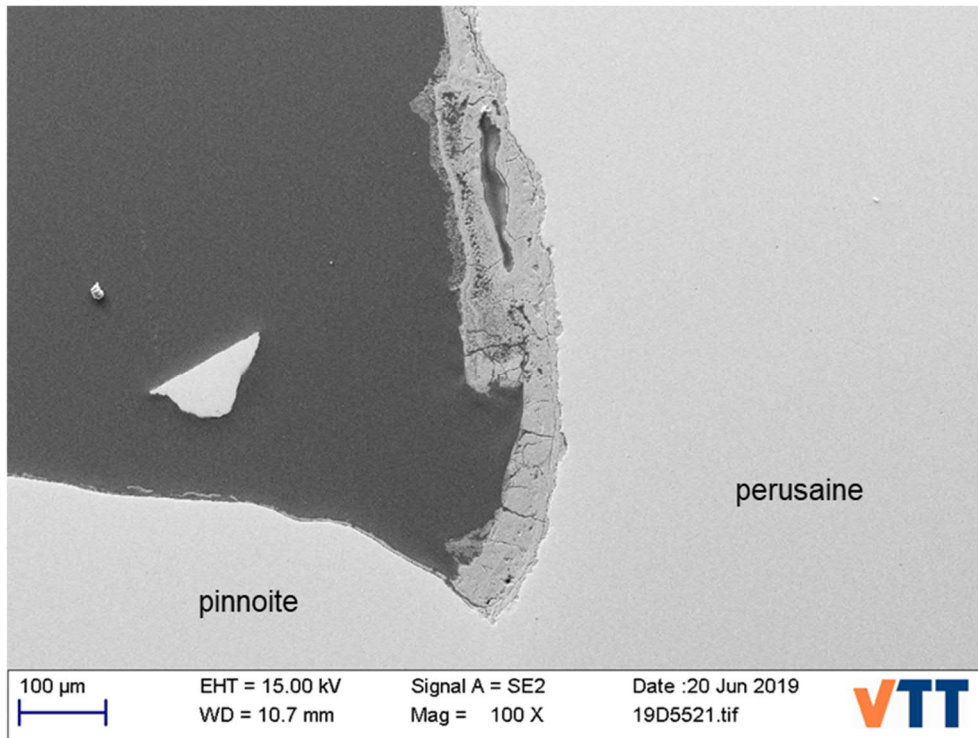
Oulu 1 sulakourun jättöpäädystä tehdystä poikkileikkausnäytteessä havaittiin suuri kuoppamainen syöpymä. Syöpymäkuoppa ylettyi reilusti perusaineen puolelle (Kuva 85, Kuva 86) ja perusaineen pinnalla havaittiin paikoitellen paksuhkoa, huokoista kerrostumaa, joka sisälsi rikkiä, magnesiumia ja natriumia normaaleiden teräksen hapettumistuotteiden lisäksi (Kuva 87, Kuva 88). Pinnoitteen ulkopinta oli hyvin tasainen. Syöpymäkuopassa pinnoitteen pinnalla oli vain paikoitellen pieniä korroosiotuotekerroksia, joka sisälsi teräksen normaalien hapettumistuotteiden lisäksi magnesiumia, rikkiä, kaliumia, kalsiumia ja klooria. Tällä kohden sisäpinnalla, vesikierron puolella, havaittiin noin 260 μm paksu oksidikerros, joka sisälsi normaalien teräksen hapettumistuotteiden lisäksi pieniä määriä rikkiä (Kuva 90, Kuva 91). Jättöpäädystä kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista muutosvyöhykkeen ulkopuolella (Kuva 92).



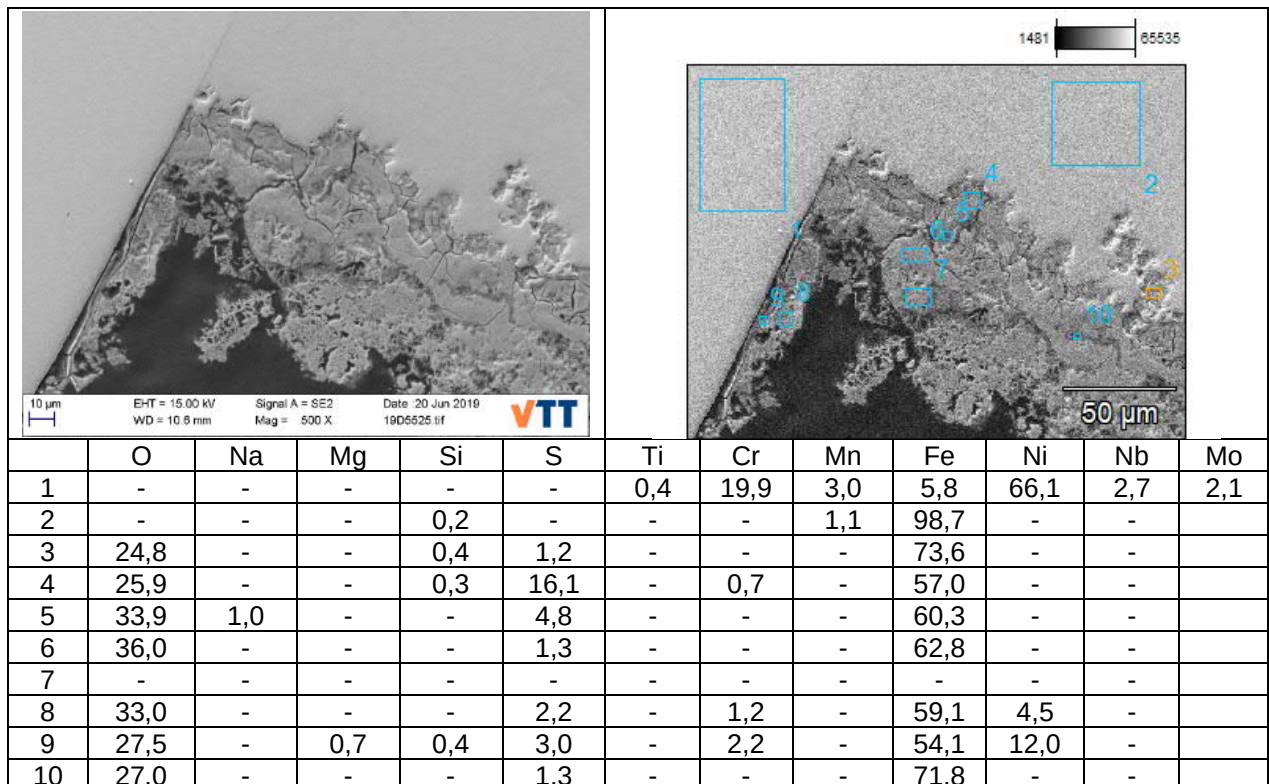
Kuva 85. Oulu1, jättöpäädyn poikkileikkaus



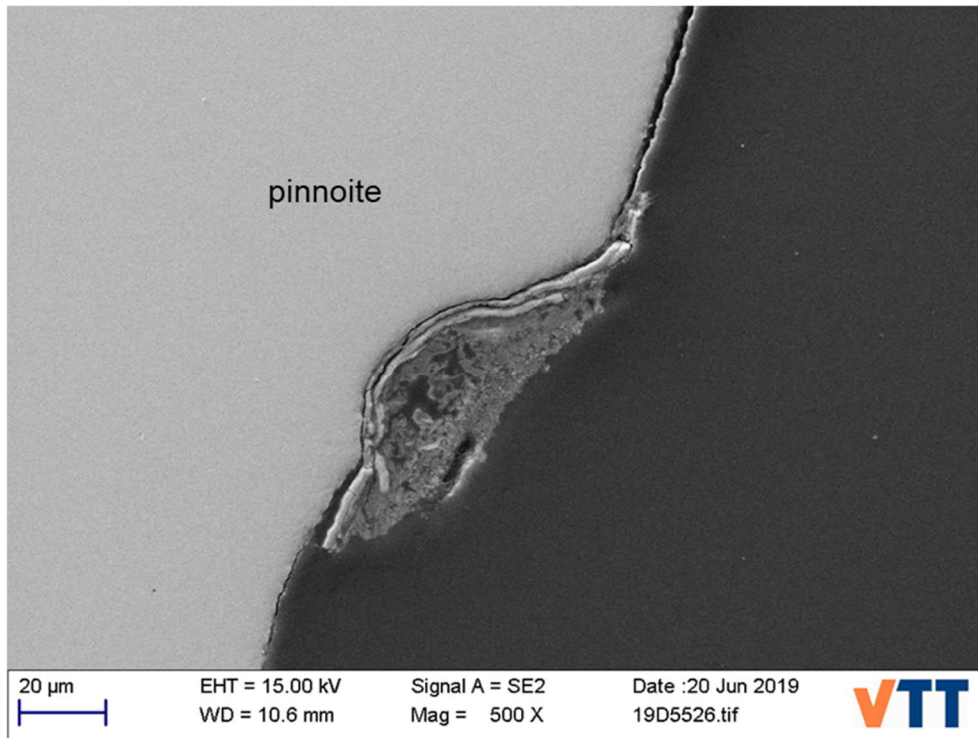
Kuva 86. Yksityiskohta Kuva 85



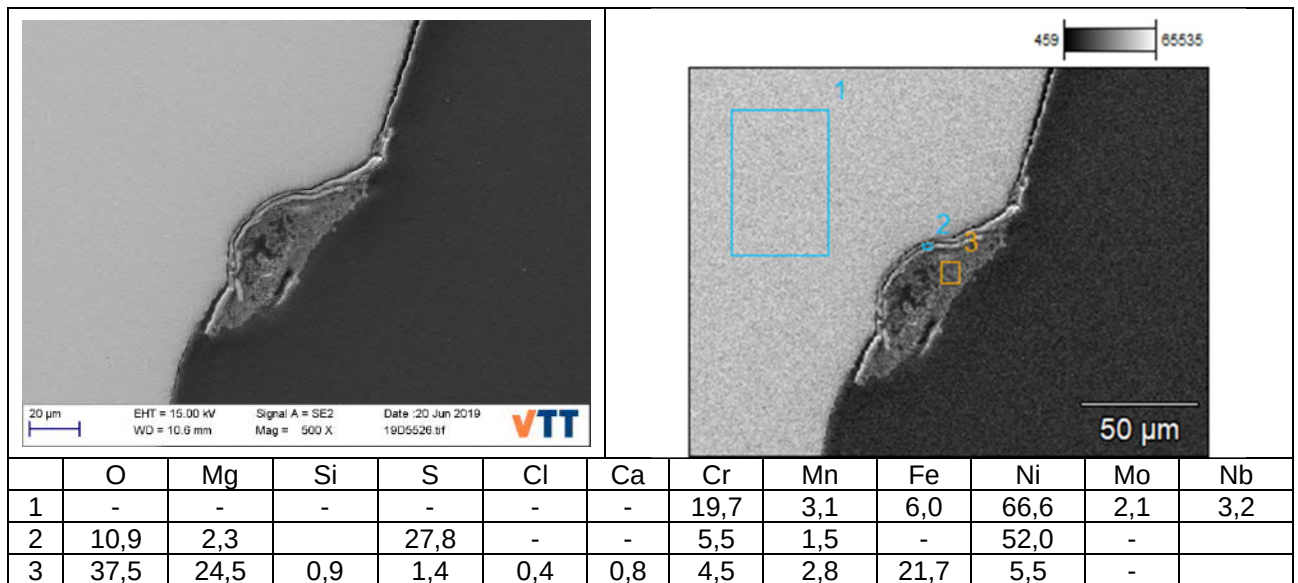
Kuva 87. Oulu1, jättöpäädyn syöpymäkuopan pohjalta



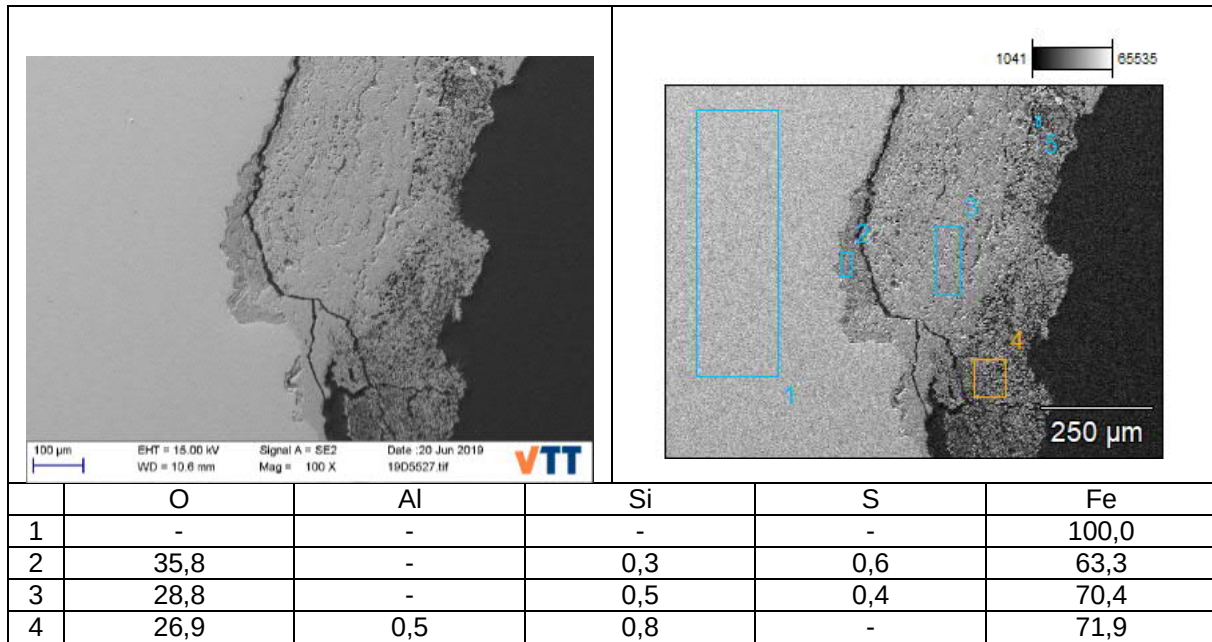
Kuva 88. Oulu 1 jättöpäädyn syöpymäkuopan kerrostuman koostumus (paino-%)



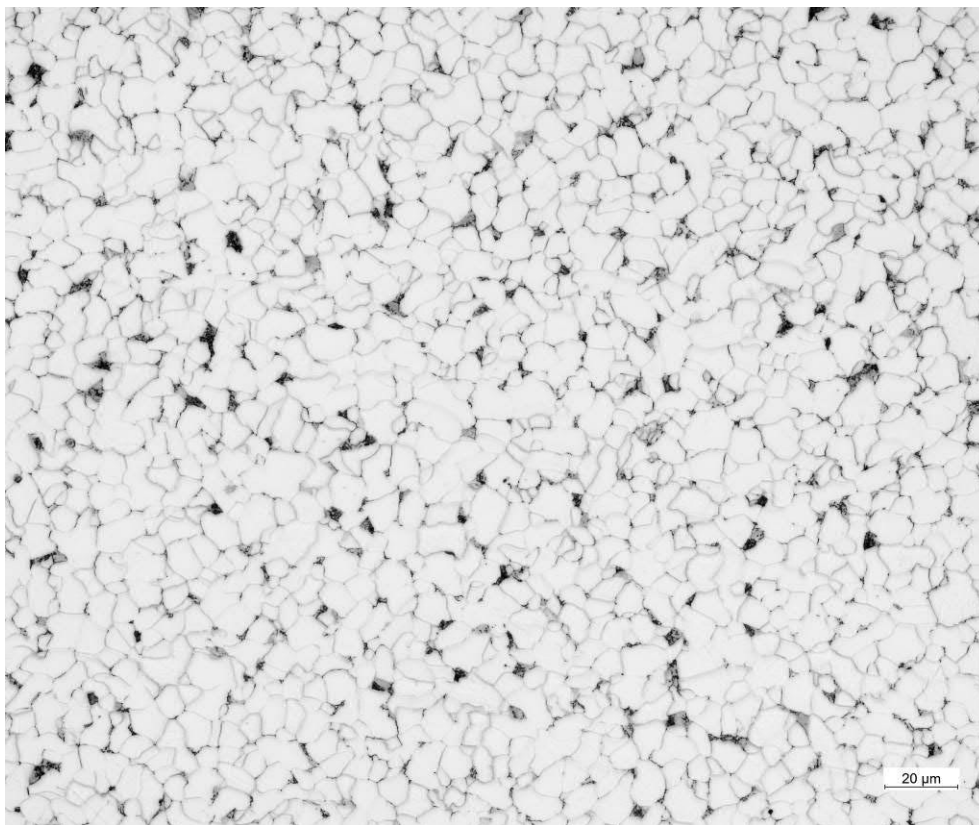
Kuva 89. Oulu 1, jättöpäädyn syöpymäkuopasta kerrostumaa pinnoitteen päällä



Kuva 90. Oulu 1, jättöpäädyn syöpymäkuopan pinnoiteosan kerrostuman koostumus (paino-%)

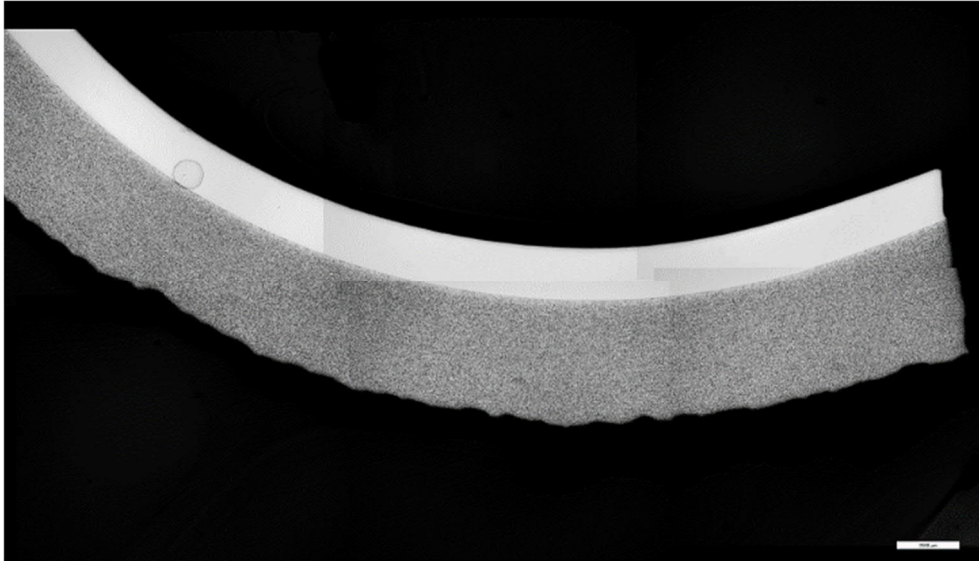


Kuva 91. Oulu 1, jättöpäädyn sisäpinnan oksidikerroksen koostumus (paino-%)

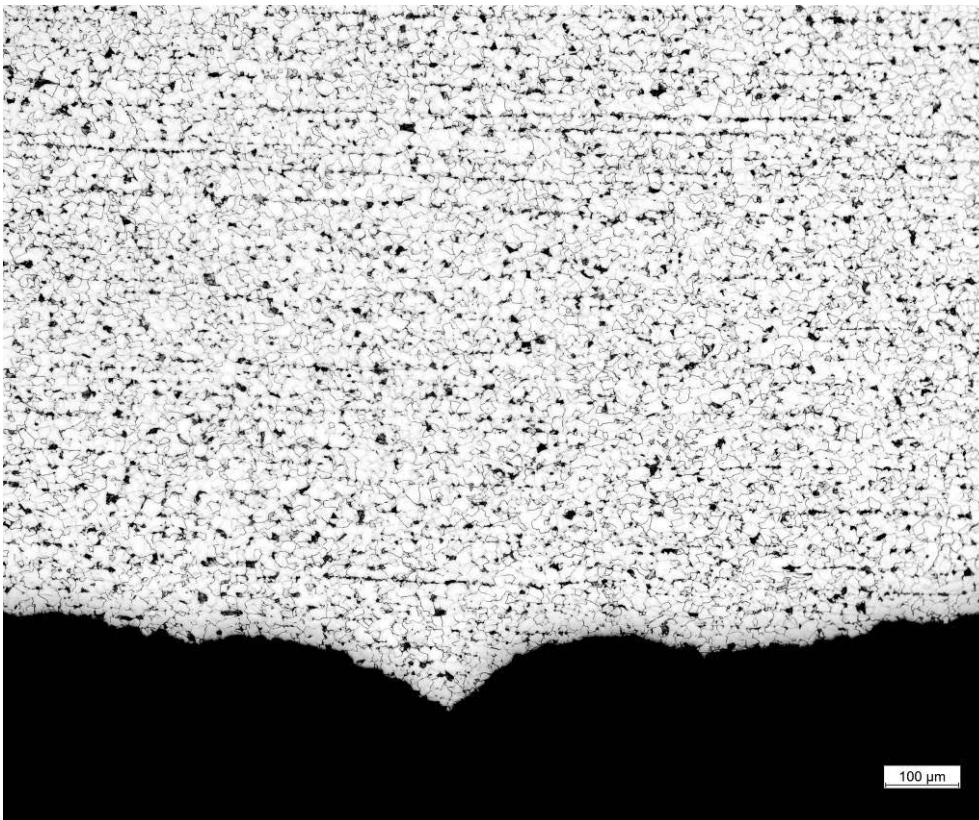


Kuva 92. Oulu 1, jättöpäädyn perusaineen mikrorakenne

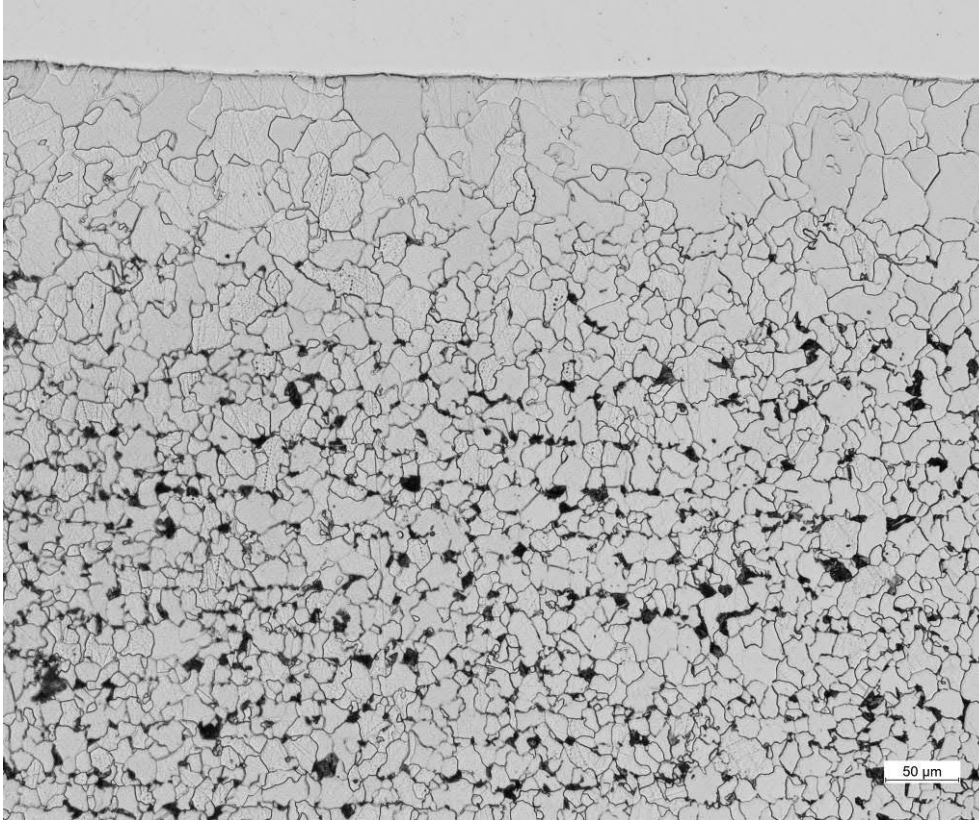
Oulu 4 sulakourun pohjalta tehdyssä poikkileikkausnäytteessä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä oli paikoitellen havaittavissa sulajäämiä. Vesikierron puoleisella pinnalla (sisäpinta) ei havaittu merkittävää oksidikerrosta, vaikkakin pinta on melko epätasainen viitaten pinnan hapettumiseen. Pinnoite-perusainerajapinnalla havaittiin noin 120 μm paksu hiilenkatovyöhyke. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 93 - Kuva 96).



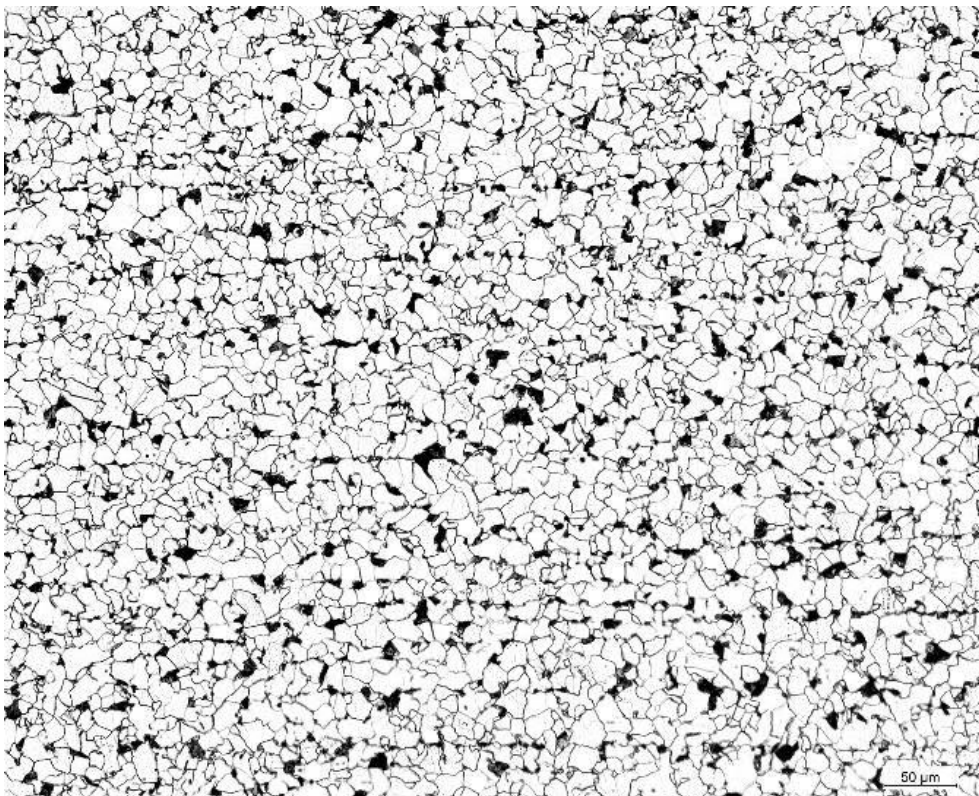
Kuva 93. Oulu 4, kourun pohjan poikkileikkaus, sisäpinta alhaalla



Kuva 94. Oulu 4, sisäpinta (vesipiirin puoleinen pinta) kourun pohjalla



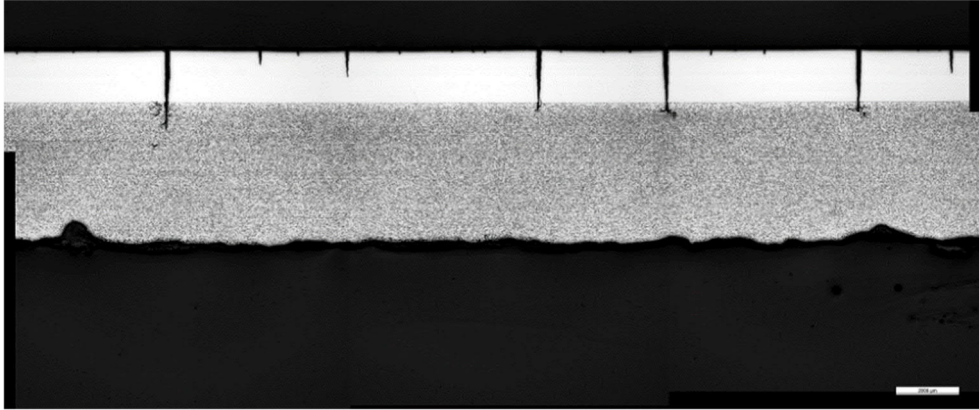
Kuva 95. Oulu 4, pinnoite-perusainerajapinta kourun pohjalla



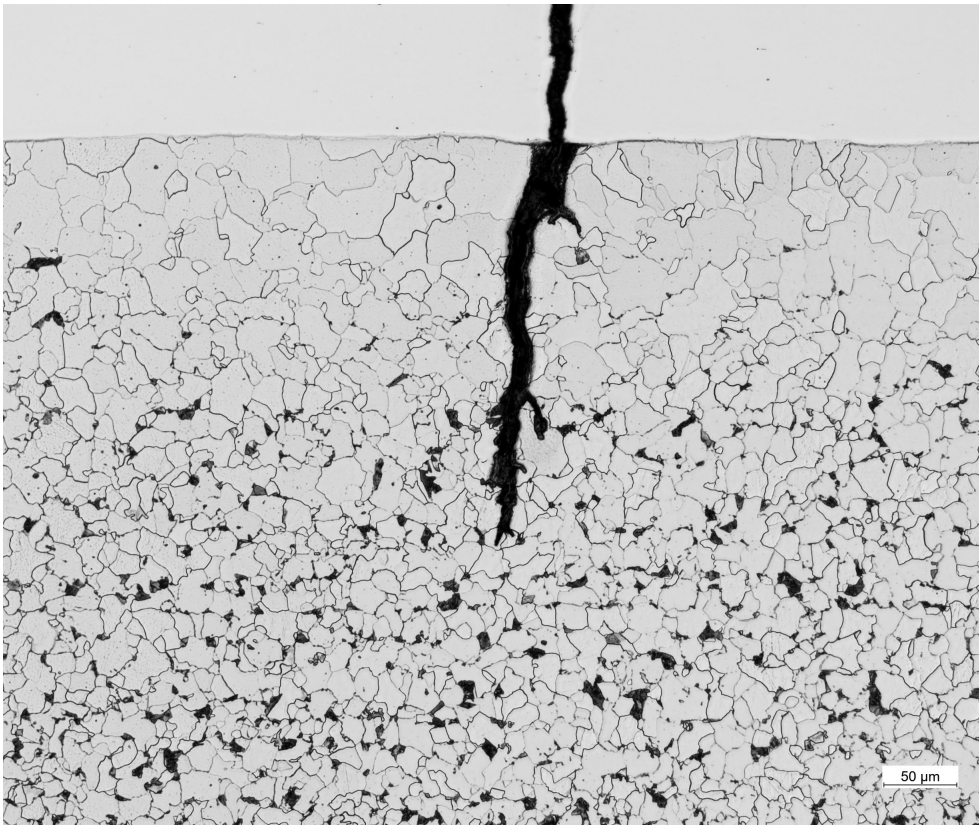
Kuva 96. Oulu 4, perusaineen mikrorakenne kourun pohjalla

Oulu 4 sulakourun seinämältä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin useita säröjä, joista pisimmät ulottuivat pinnoitteen läpi perusaineeseen (Kuva 97, Kuva 98). Syvimpien, perusaineeseen ulottuvien, säröjen syvyys oli yli 2100 μm. Pisimmissä säröissä oli havaittavissa sivusäröjä ja oksidia/korroosiotuotetta perusaineen puolella. Kourun sisäpinnalla

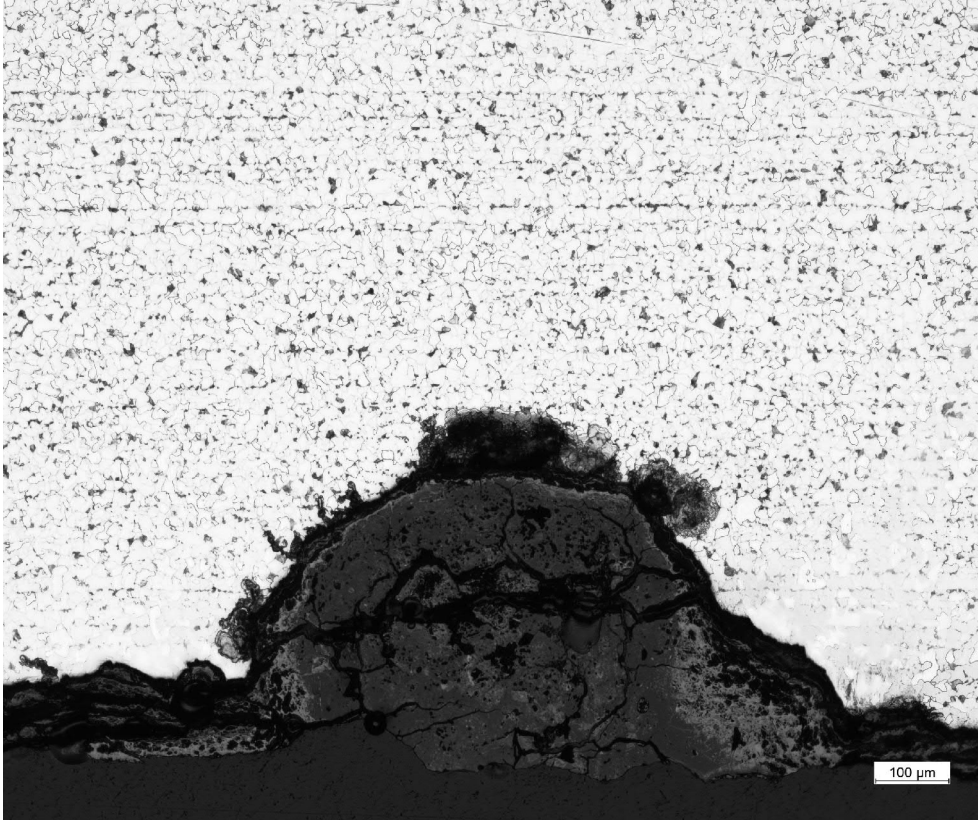
oli yhtenäinen noin 120 µm paksu oksidikerros, jonka lisäksi paikoitellen oli jopa noin 350 µm syviä korroosiokuoppia (Kuva 99). Pinnoite-perusainerajapinnassa havaittiin noin 120 µm paksu hiilenkatovyöhyke. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 100).



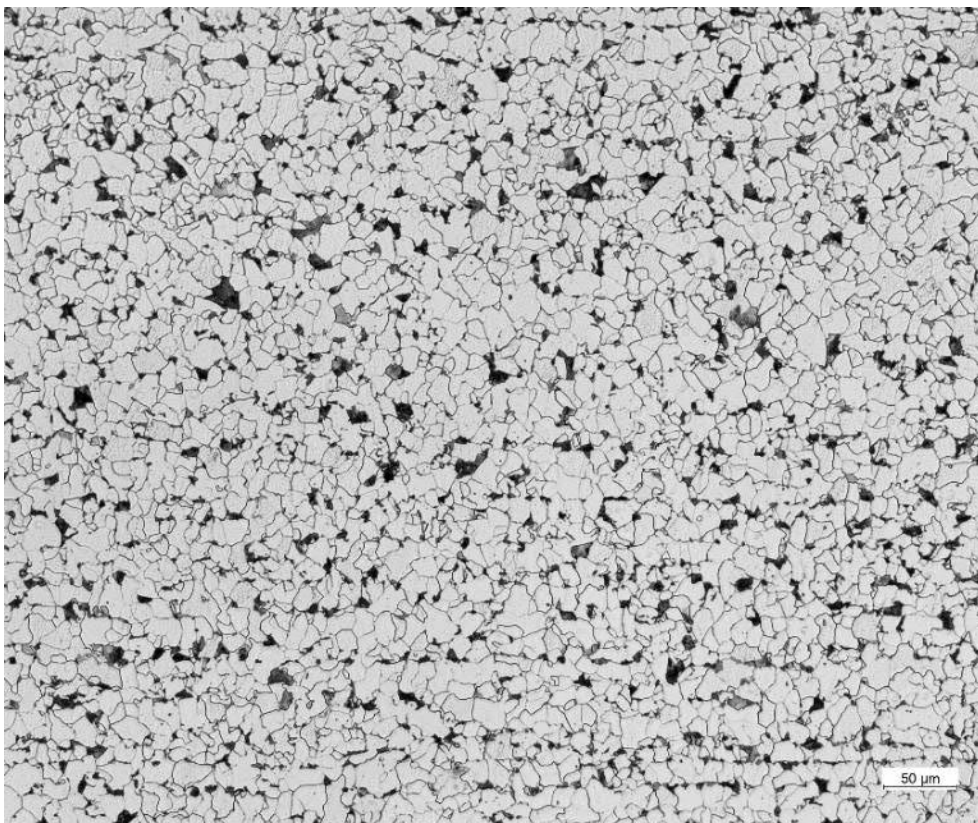
Kuva 97. Oulu 4, seinämän poikkileikkaus. Sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla



Kuva 98. Oulu 4, särön eteneminen perusaineeseen



Kuva 99. Oulu 4, sisäpinta kourun seinämällä



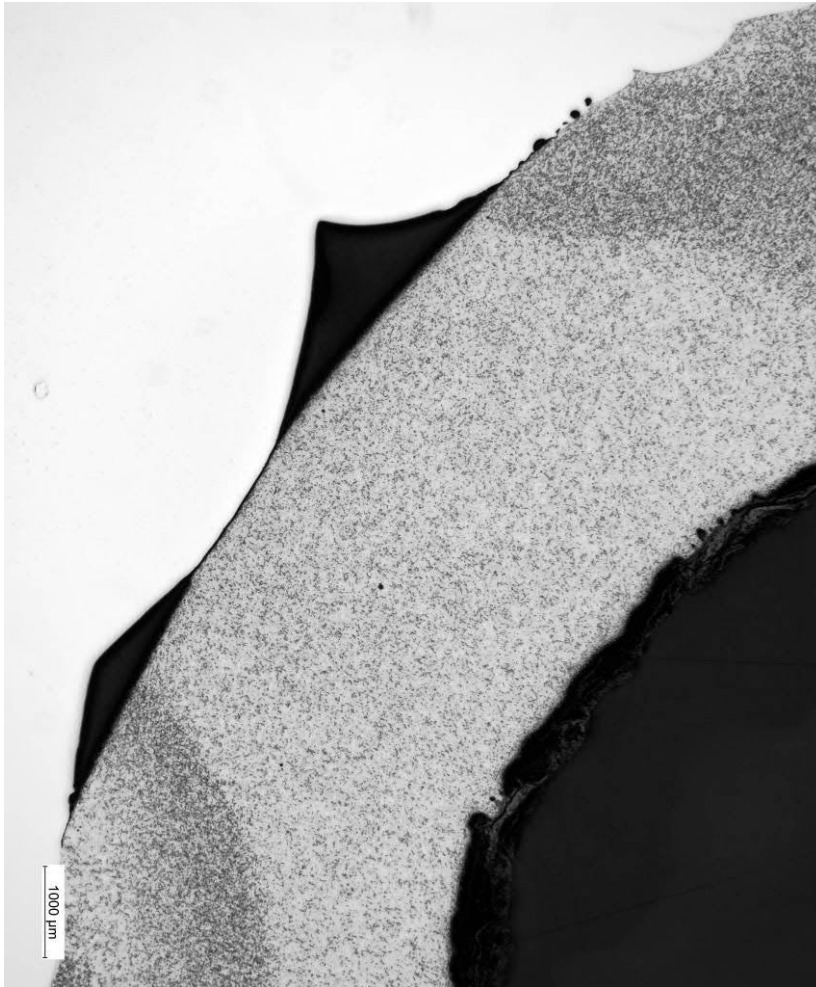
Kuva 100. Oulu 4, perusaineen mikrorakenne kourun seinämällä

Oulu 4 kourun jättöpäädyssä ei havaittu syöpymäkuoppia. Pinnoitteen ja perusaineen välillä havaittiin jyrkimmän taitteen kohdalla valmistuksen aikaista liitoksen puutetta (Kuva 101, Kuva

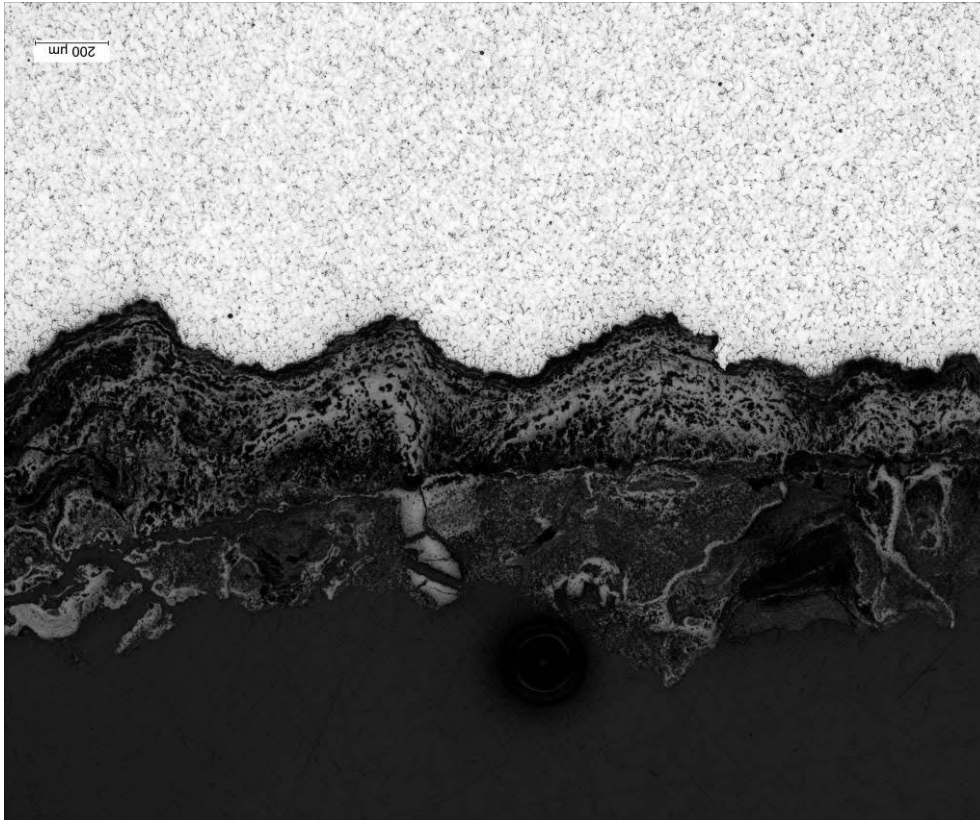
102). Pinnoitteen pinnassa ei ollut havaittavissa ollenkaan oksidia tai kerrostumaa. Sulakourun vesipiirin puolella, sisäpinnalla, havaittiin paikoitellen jopa noin 430 µm paksu epähomogeeninen oksidi, joka sisälsi teräkselle tyypillisten hapettumistuotteiden lisäksi pieniä määriä rikkiä ja klooria (Kuva 103 - Kuva 104). Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista.



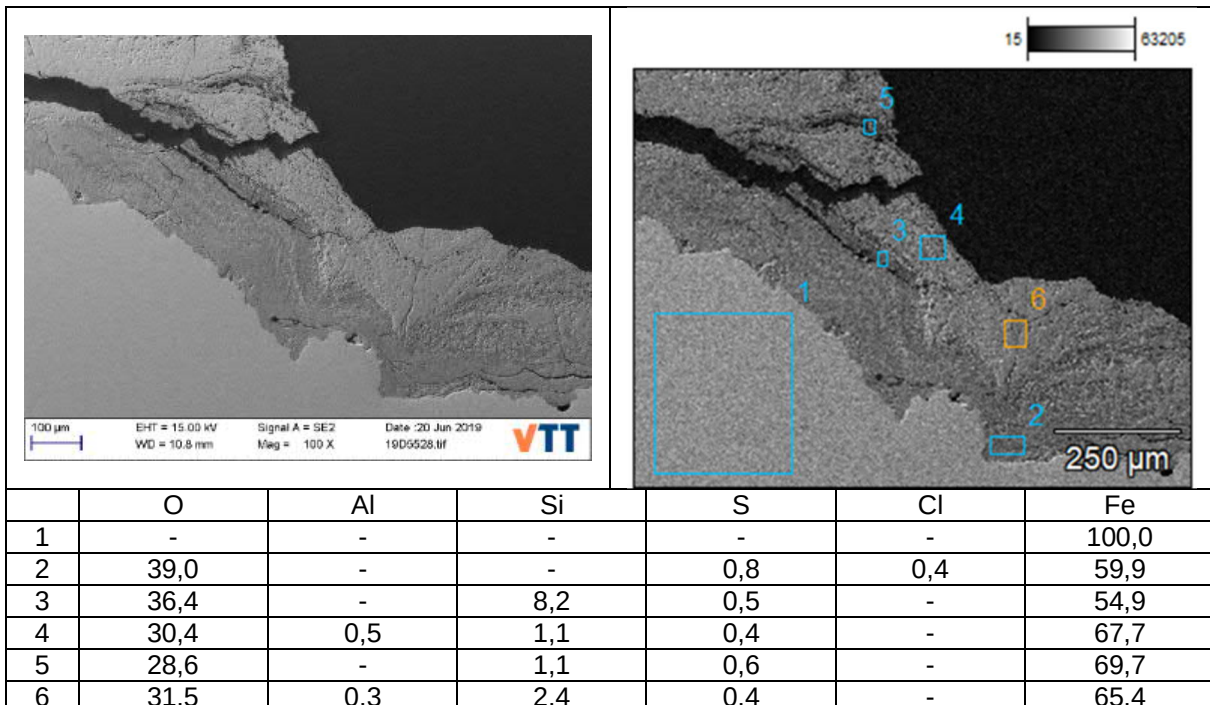
Kuva 101. Oulu 4, jättöpäädyn poikkileikkaus



Kuva 102. Yksityiskohta Kuva 101



Kuva 103. Oulu 4, sisäpinnan oksidi, jättöpäädyn kohdalla



Kuva 104. Oulu 4, jättöpäädyn sisäpinnan oksidikerroksen koostumus (paino-%)

3.9 Pietarsaari

Tutkimuksiin toimitettiin Andritzin valmsitamia kouruja; kaksi käytössä ollut (Pietarsaari X ja Pietarsaari Y) ja yksi uusi kouru (Kuva 105 - Kuva 107). Näistä Pietarsaari X ja uusi kouru olivat compound -rakenteisia, ja Pietarsaari Y laserpinnoitettu. Kourujen ajojakso oli 1,5 vuotta.

Aikaisemman käytön aikana kourujen jättöpää oli syöpynyt kaksi kertaa peräkkäin seisokkien välissä. Syöpymien syyksi löydettiin liuottajan liian korkea pinta, jonka vuoksi kourujen päädyt pinnoitettiin. Alun kahden vuoden ajojaksoista huolimatta 14 vuoden aikana ongelmia on ollut kaksi kertaa. Visuaalisessa tarkastuksessa käytössä olleessa kourussa Pietarsaari X havaittiin runsaasti säröjä kourun seinämällä. Kourussa Pietarsaari Y havaittiin vain pieniä säröjä satunnaisesti.



Kuva 105. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Pietarsaari X). Säröytyneet alueet on merkitty ylläpään kuvaan punaisilla suorakaiteilla. Poikkileikkaushieen paikka on merkitty kuvaan valkoisella katkoviivalla.

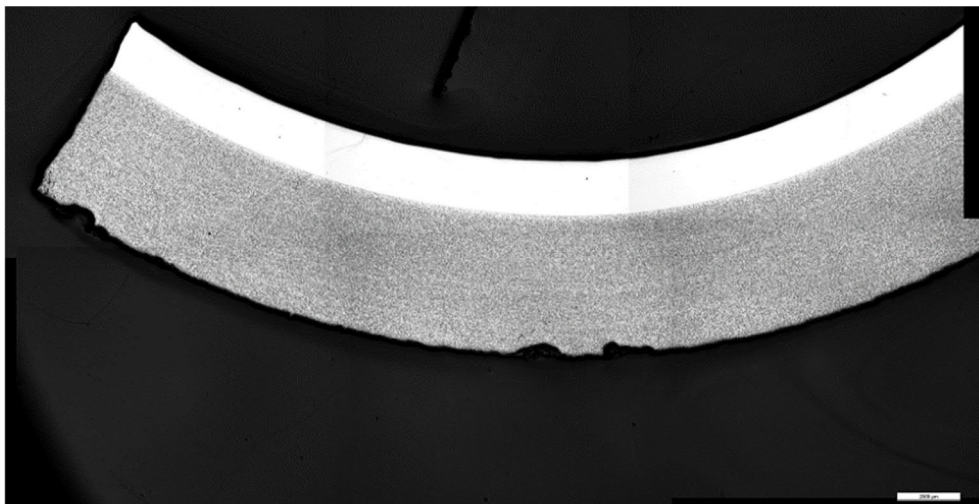


Kuva 106. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Pietarsaari Y). Säröytyneet alueet merkitty yllimpään kuvaan punaisilla suorakaiteilla. Poikkileikkaushieen paikka on merkitty kuvaan valkoisella katkoviivalla.

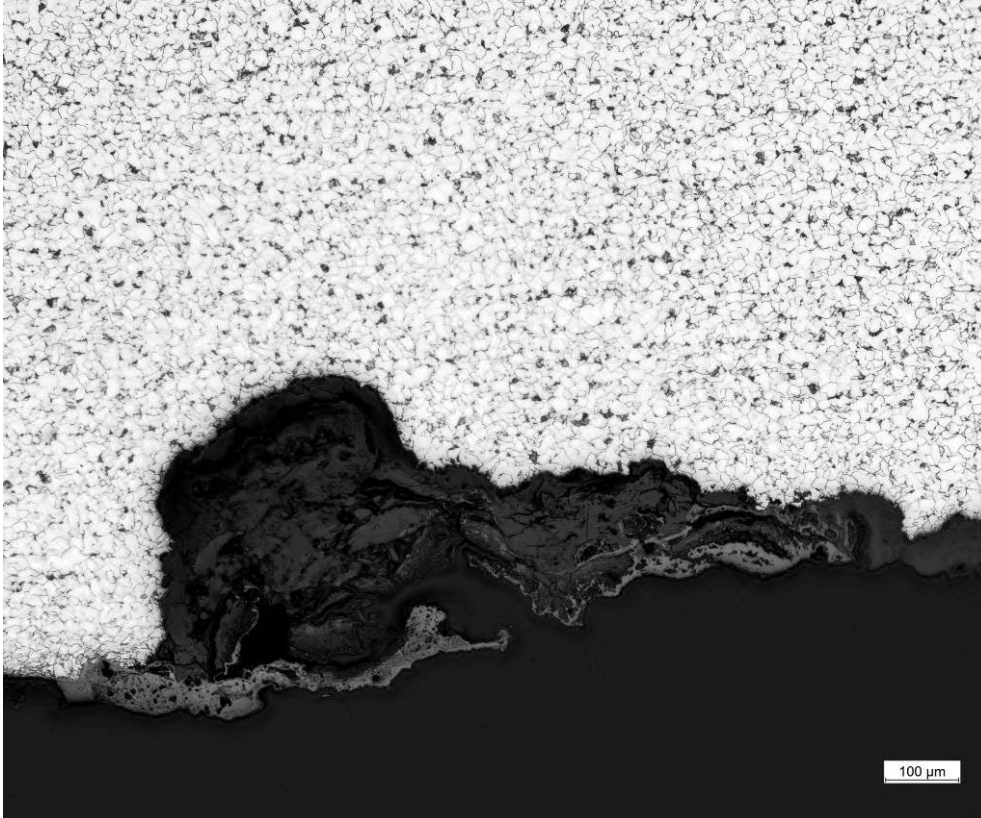


Kuva 107. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Pietarsaari uusi). Poikkileikkauksen kohta on merkitty vasemmalle yläkuvaan valkoisella katkoviivalla.

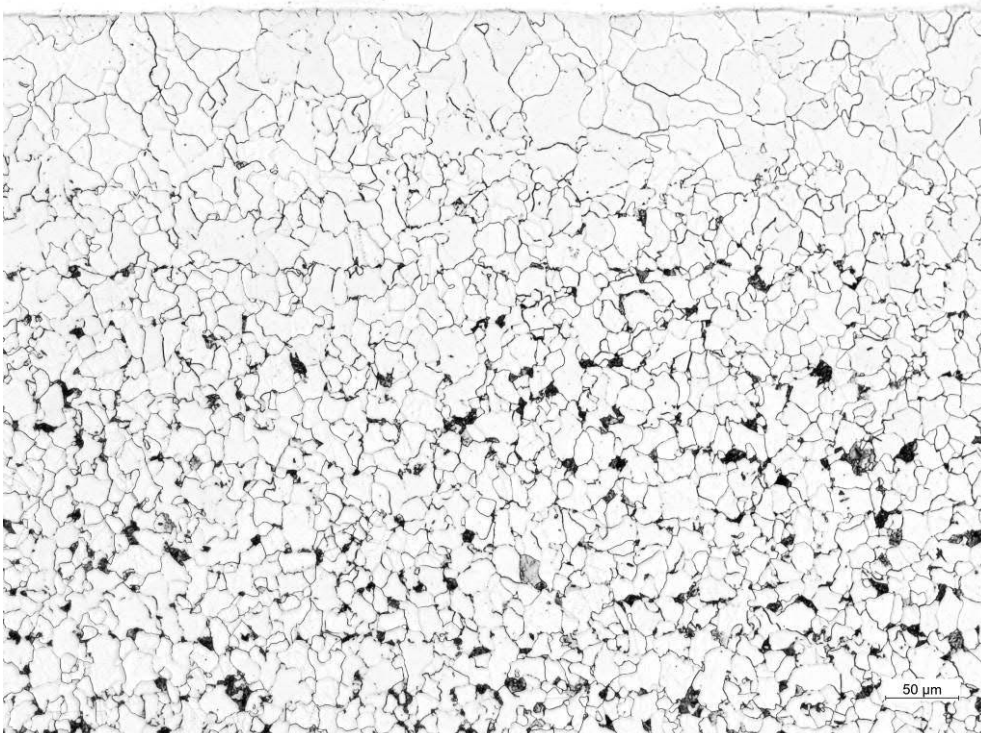
Pietarsaari X sulakourun pohjalta tehdyssä poikkileikkauksnäytteessä ei havaittu säröjä. Ulkopinta oli tasainen ja siinä oli paikoitellen havaittavissa sulajäämiä. Vesikierron puoleisella pinnalla, sisäpinta, havaittiin yhtenäinen noin 40 μm paksu oksidikerros sekä noin 220 μm syviä syöpymäkuoppia. Pinnoite-perusainerajapinnalla havaittiin noin 95 μm paksu hiilenkatokerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 108- Kuva 111).



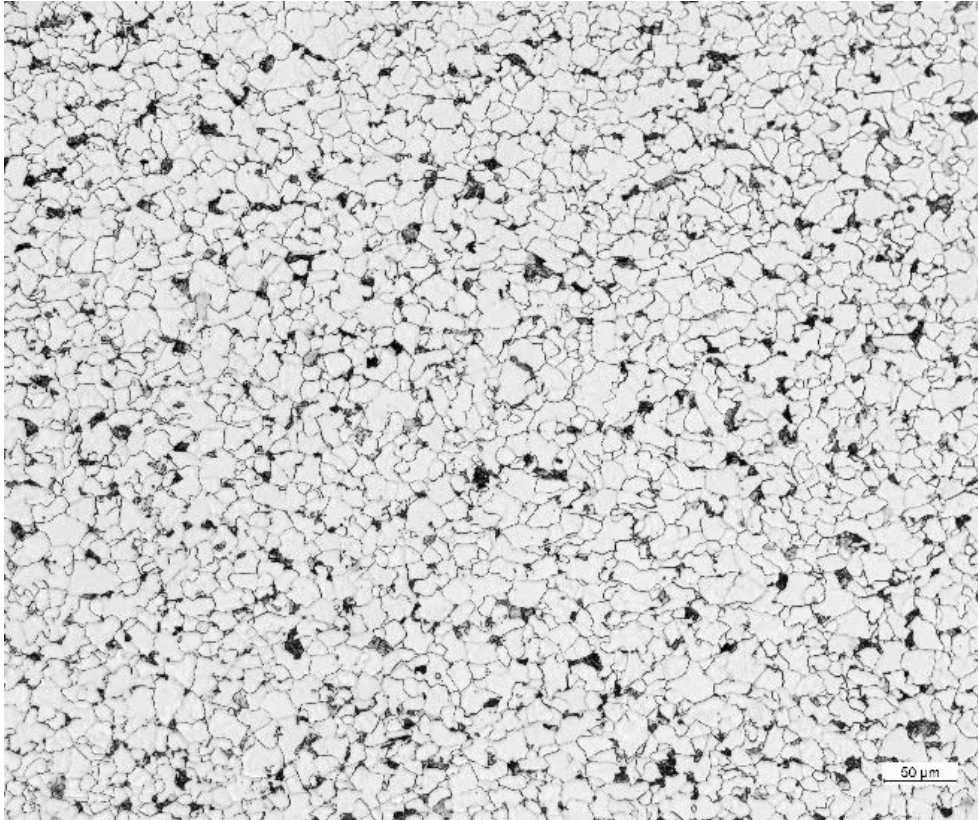
Kuva 108. Pietarsaari X, kourun pohjan poikkileikkaus



Kuva 109. Pietarsaari X, sisäpinta (vesipiirin puoleinen pinta) kourun pohjalla

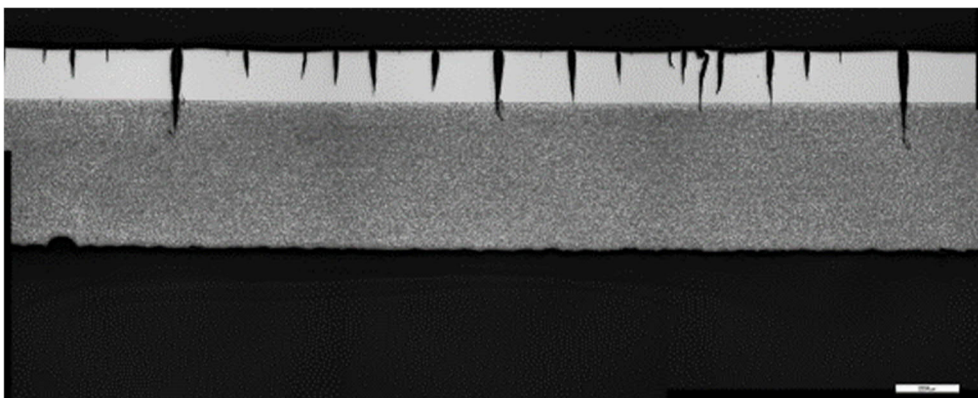


Kuva 110. Pietarsaari X, pinnoite-perusainerajapinta kourun pohjalta

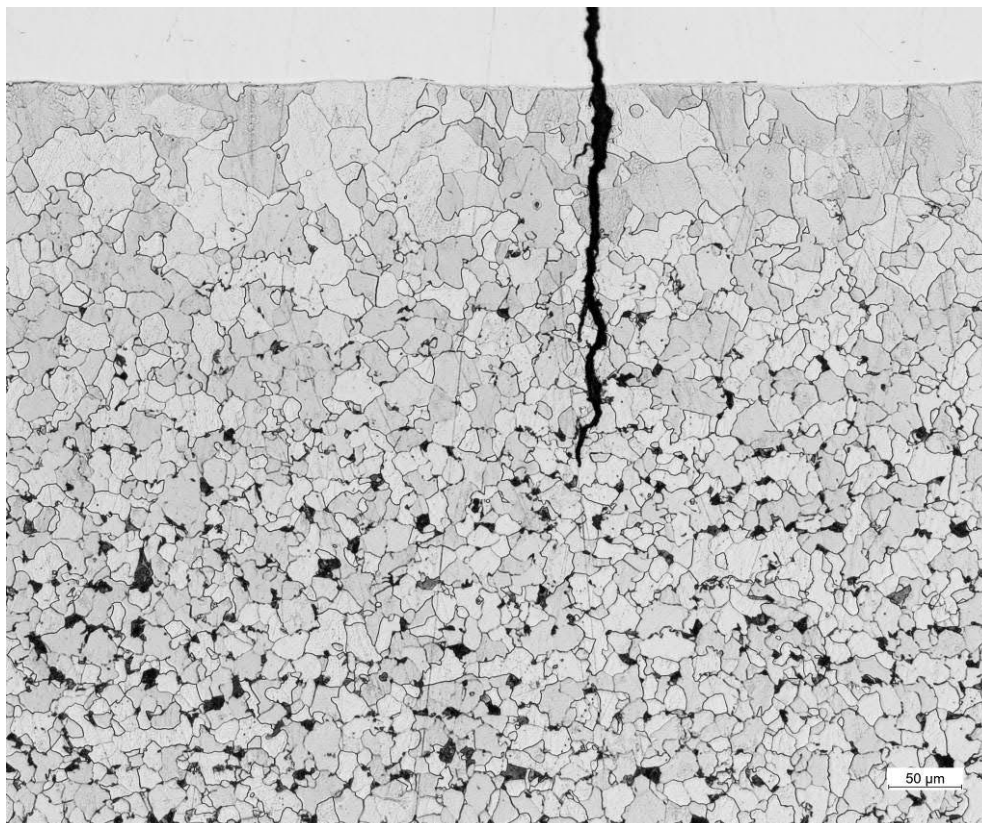


Kuva 111. Pietarsaari X, mikrorakenne kourun pohjalta

Pietarsaari X sulakourun seinämältä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä havaittiin useita säröjä, joista pisimmät ulottuivat pinnoitteen läpi perusaineeseen (Kuva 112). Syvimpien, perusaineeseen ulottuvien säröjen syvyys oli yli 3000 μm . Osassa pisimmissä säröissä oli havaittavissa sivusäröjä ja osassa perusaine oli alkanut syöpyä pinnoitteen alla (Kuva 113, Kuva 114). Kourun sisäpinnalla ei havaittu yhtenäistä oksidikerrosta, mutta paikallisia oksidisaarekkeita ja noin 60 μm syviä korroosiokuoppia (Kuva 115). Pinnoite-perusainerajapinnassa havaittiin noin 110 μm paksu hiilenkatokerros. Kourun mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 116).



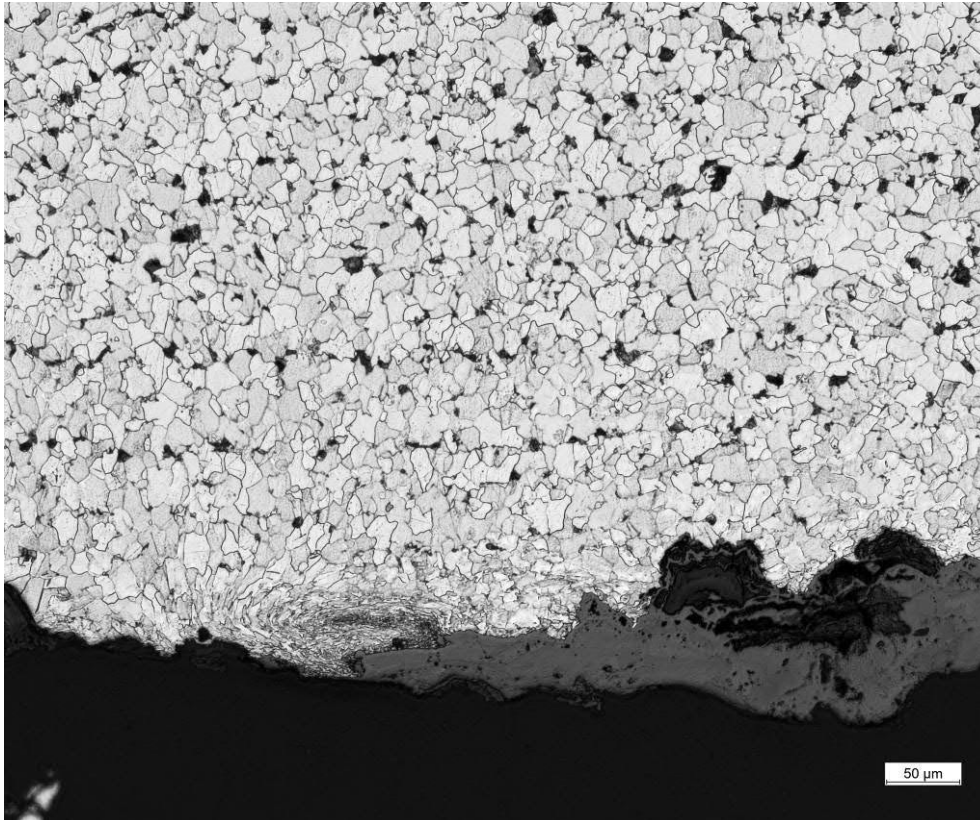
Kuva 112. Pietarsaari X, kourun seinämän poikkileikkaus



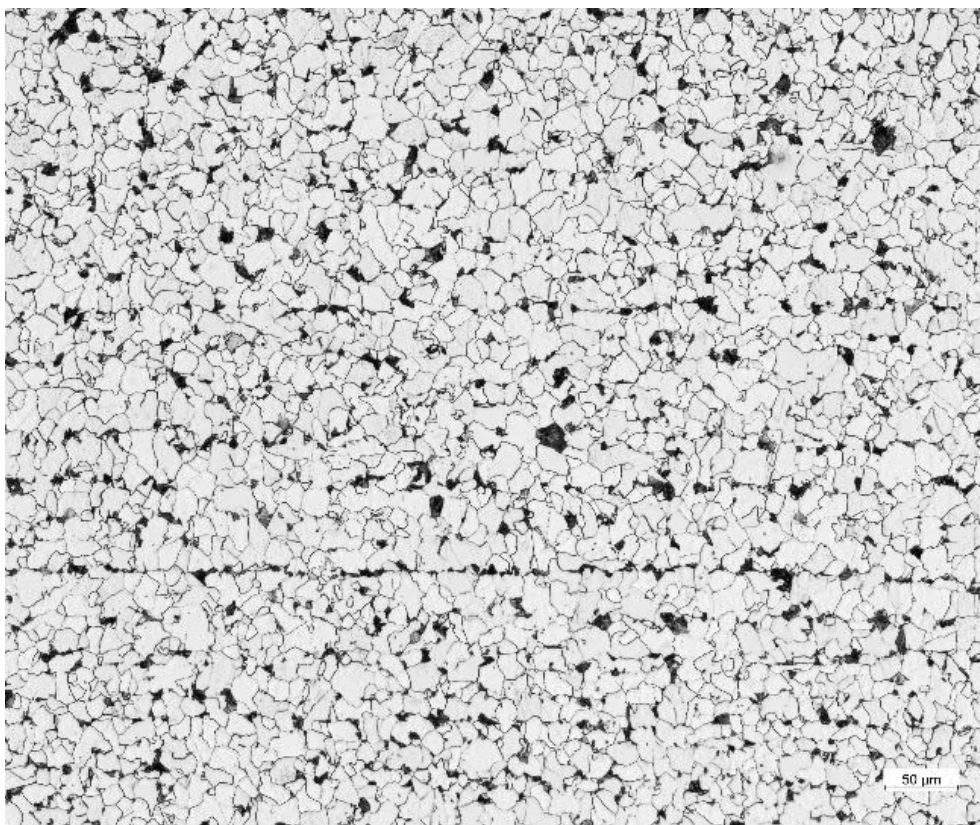
Kuva 113. Pietarsaari X, särön eteneminen perusaineessa kourun seinämällä



Kuva 114. Pietarsaari X, särön eteneminen perusaineessa kourun seinämällä



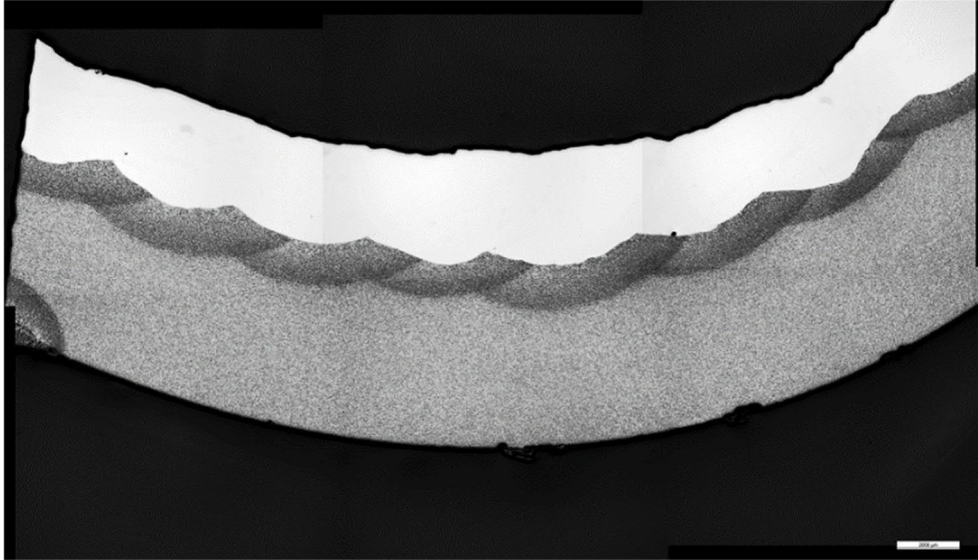
Kuva 115. Pietarsaari X, sisäpinnan oksidikerros kourun seinämällä



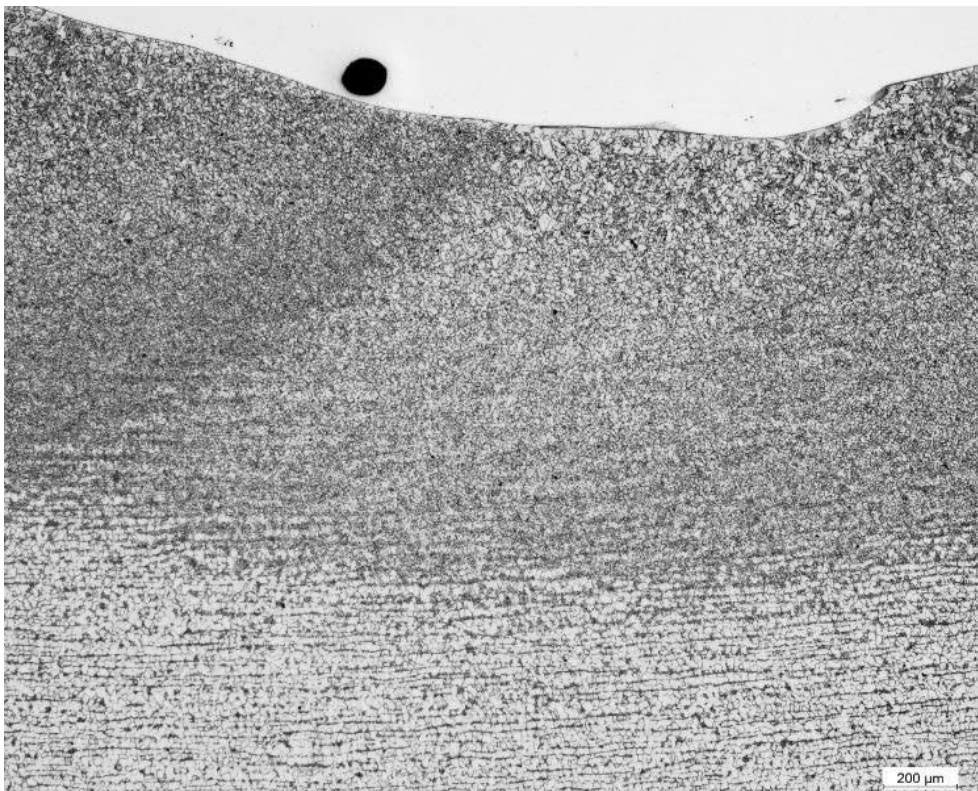
Kuva 116. Pietarsaari X, perusaineen mikrorakenne kourun seinämällä

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

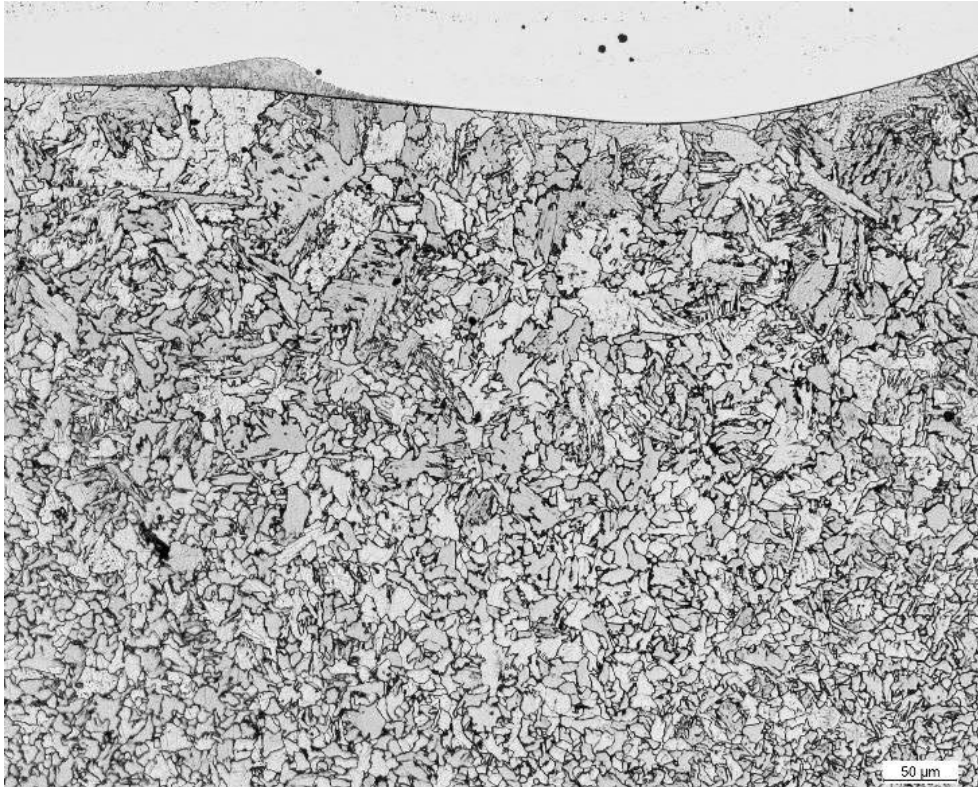
oli yhtenäinen alle 20 µm paksu oksidikerros sekä paikoitellen noin 200 µm syviä syöpymäkuoppia. Pinnoitteen aiheuttama muutosvyöhyke oli noin 900 µm paksu ja sen alla kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä ollut havaittavissa lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 117-Kuva 121).



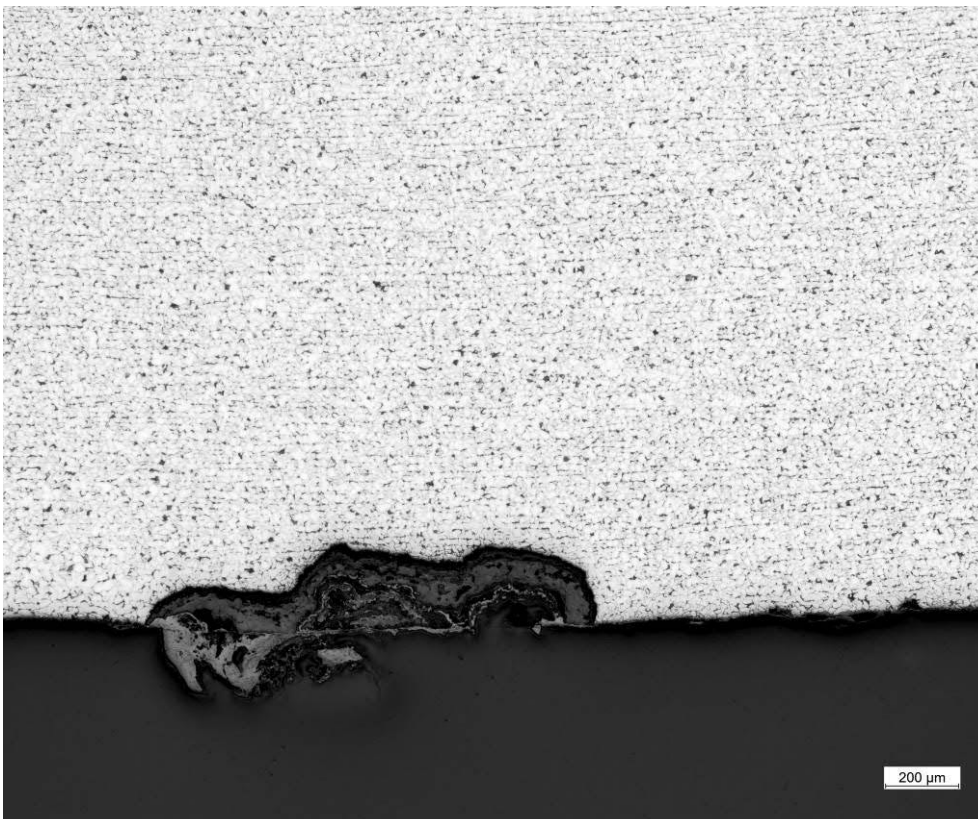
Kuva 117. Pietarsaari Y, kourun pohjan poikkileikkaus. Sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla



Kuva 118. Pietarsaari Y, muutosvyöhyke



Kuva 119. Pietarsaari Y muutosvyöhyke

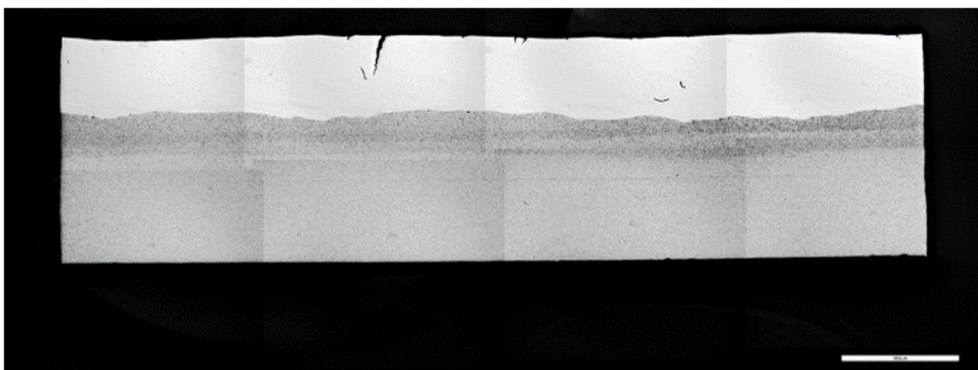


Kuva 120. Pietarsaari Y, sisäpinnan oksidi kourun pohjan kohdalta

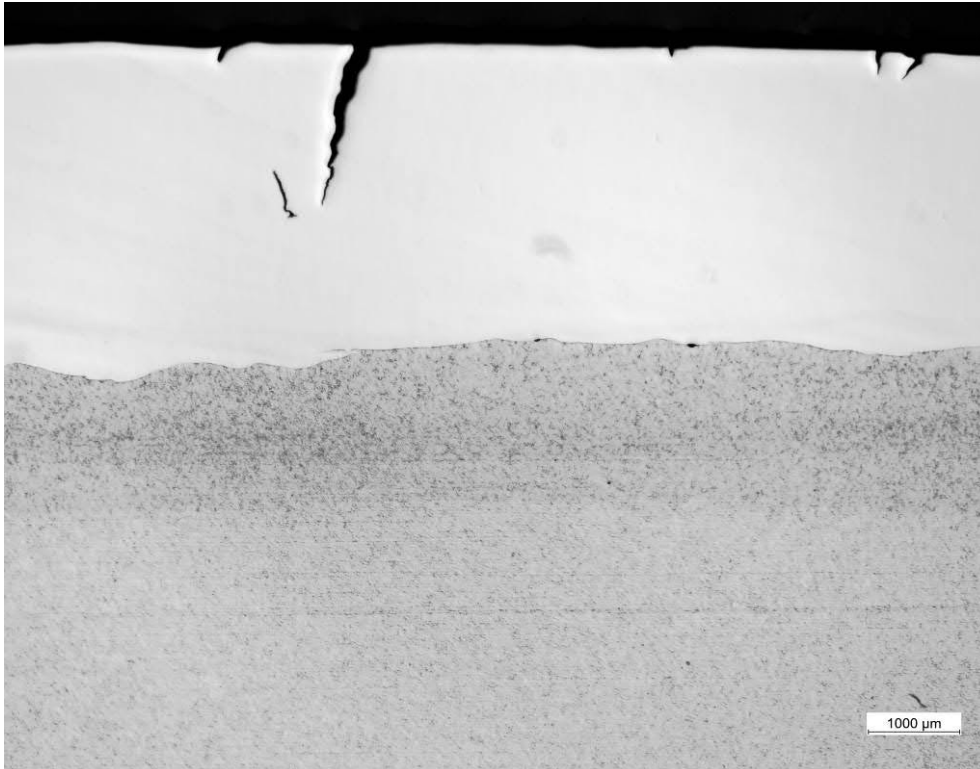


Kuva 121. Pietarsaari Y, perusaineen mikrorakenne kourun pohjalta

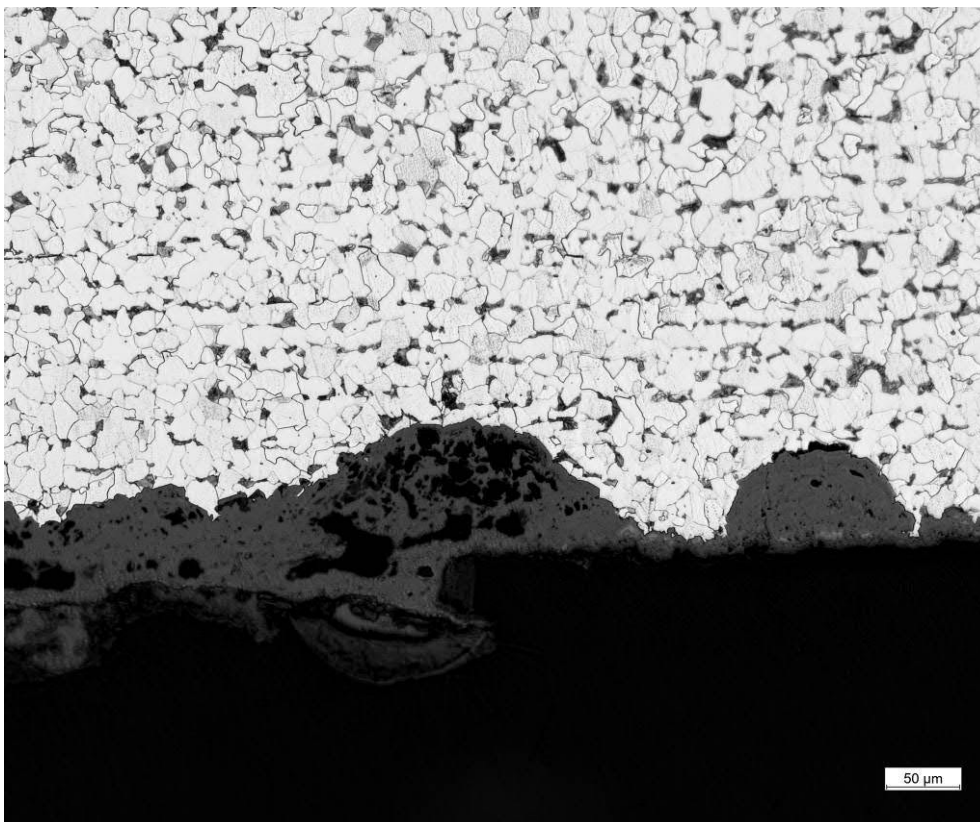
Pietarsaari Y sulakourun seinämältä tehdystä poikkileikkausnäytteestä havaittiin satunnaisia säröjä, jotka eivät ulottuneet perusaineeseen (Kuva 122, Kuva 123). Useimmat säröistä olivat lyhyitä ulottuen noin 150 μm syvyyteen, yhden ollessa pidempi noin 1,8 mm. Kourun sisäpinnalla oli alle 20 μm paksu yhtenäinen oksidikerros, jonka lisäksi havaittiin hieman paksumpia huokoisia oksidisaarekkeitä ja noin 40 - 60 μm syviä korroosiokuoppia. Muutosvyöhykkeen paksuus vaihteli myös seinämällä noin 900 - 1050 μm välillä. Kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen eikä siinä havaittu lämpökuorman aiheuttamaa rakenteen hajaantumista (Kuva 124 - Kuva 126).



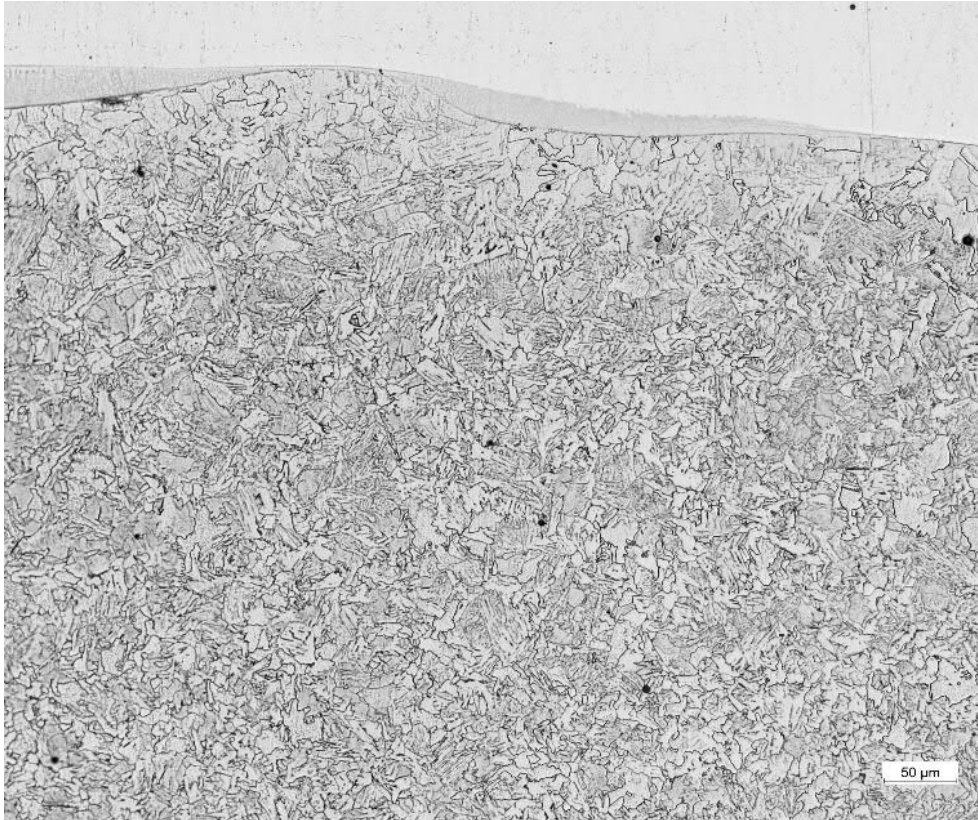
Kuva 122. Pietarsaari Y, poikkileikkaus kourun seinämältä. Sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla



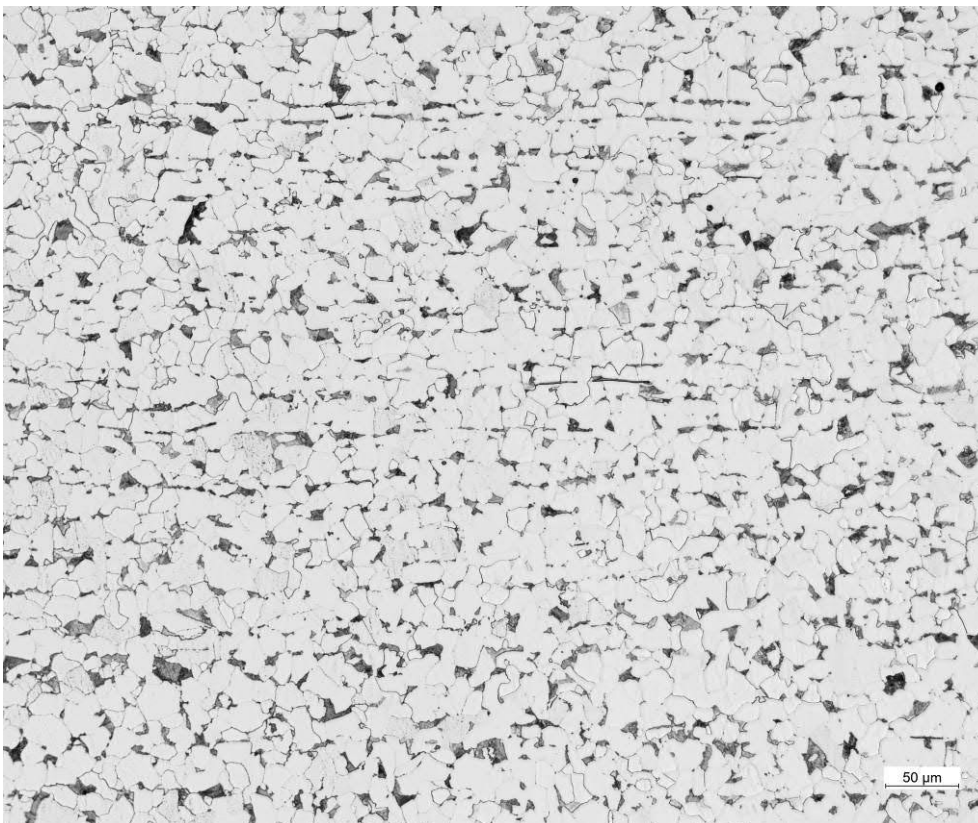
Kuva 123. Pietarsaari Y, särön kasvua pinnoitteessa kourun seinämällä



Kuva 124. Pietarsaari Y, sisäpinnan oksidi kourun seinämällä



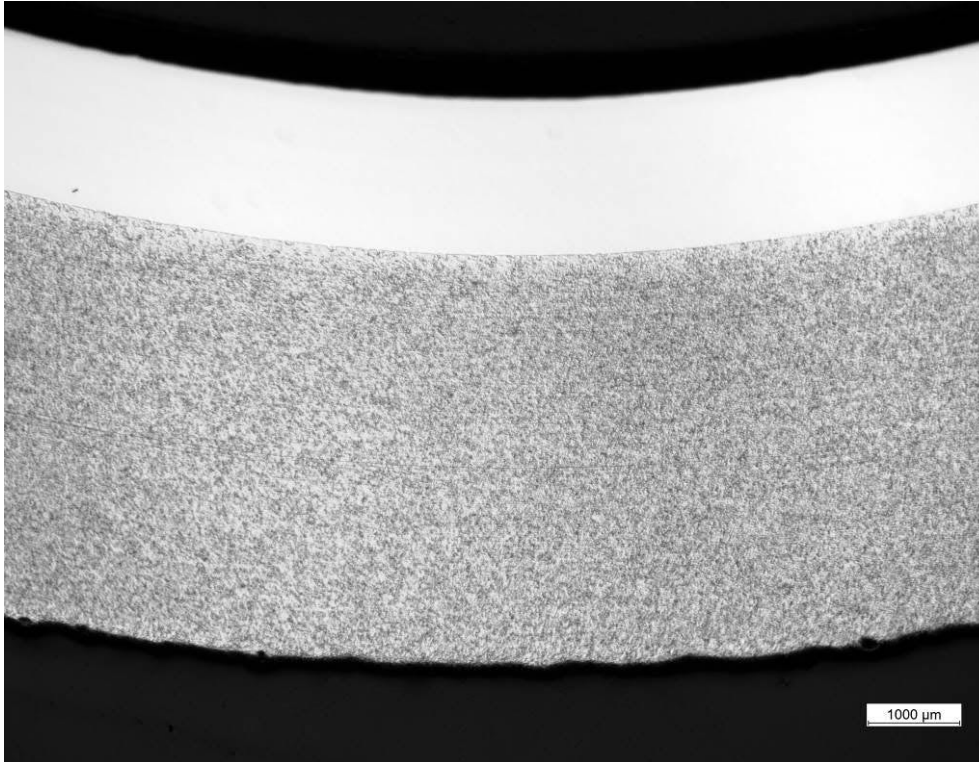
Kuva 125. Pietarsaari Y, muutosvyöhyke kourun seinämällä



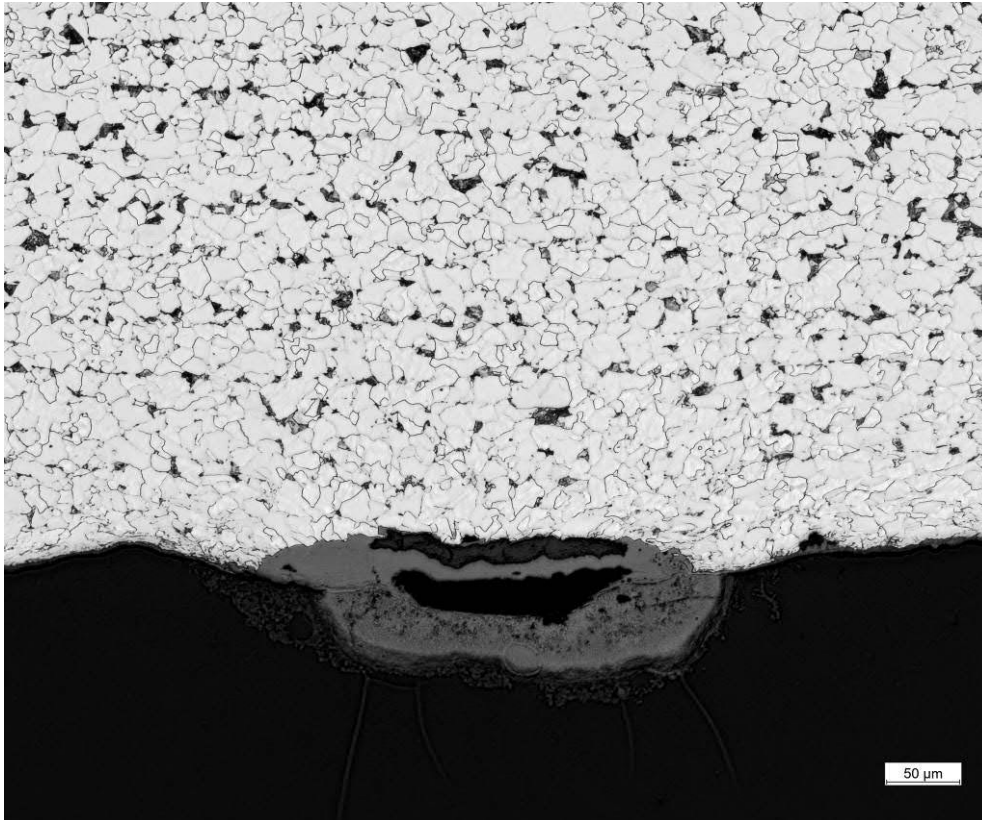
Kuva 126. Pietarsaari Y, perusaineen mikrorakenne kourun seinämällä

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

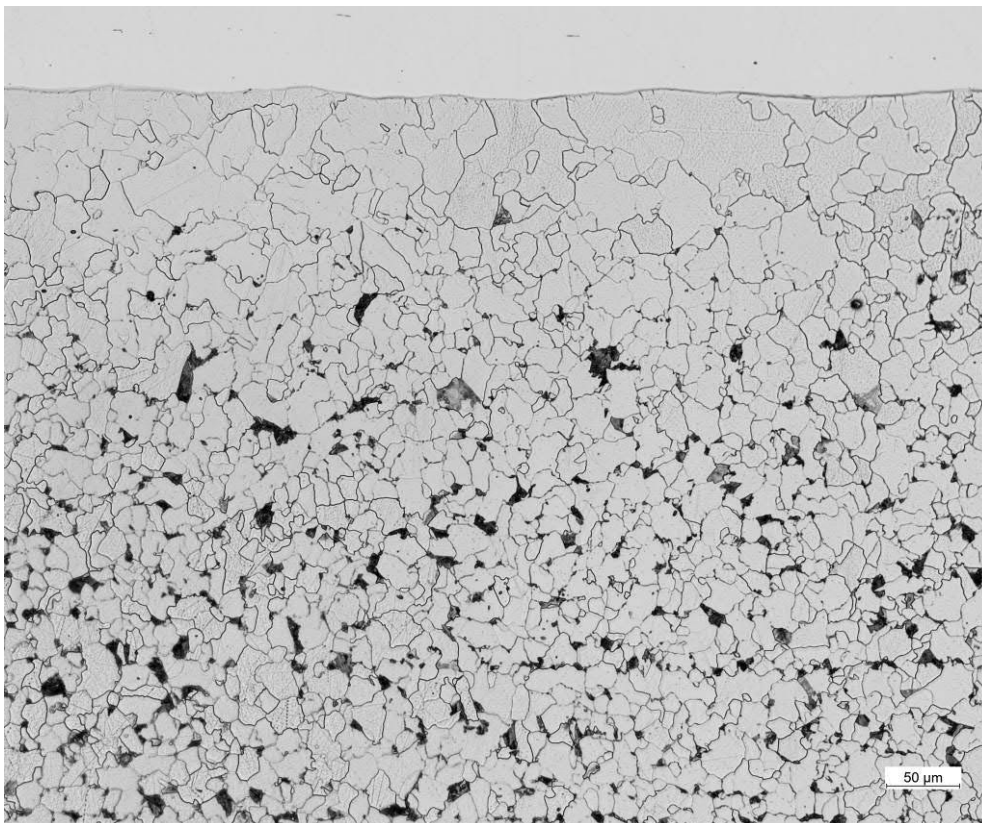
oli yksittäisiä, epähomogeenisia, noin 50 µm paksuja oksidisaarekkeitä. Pinnoite-perusainerajapinta yli tiivis ja yhtenäinen. Perusaineen puolella havaittiin tyypillinen noin 95 µm paksu hiilenkatokerros. Kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen (Kuva 127 - Kuva 130).



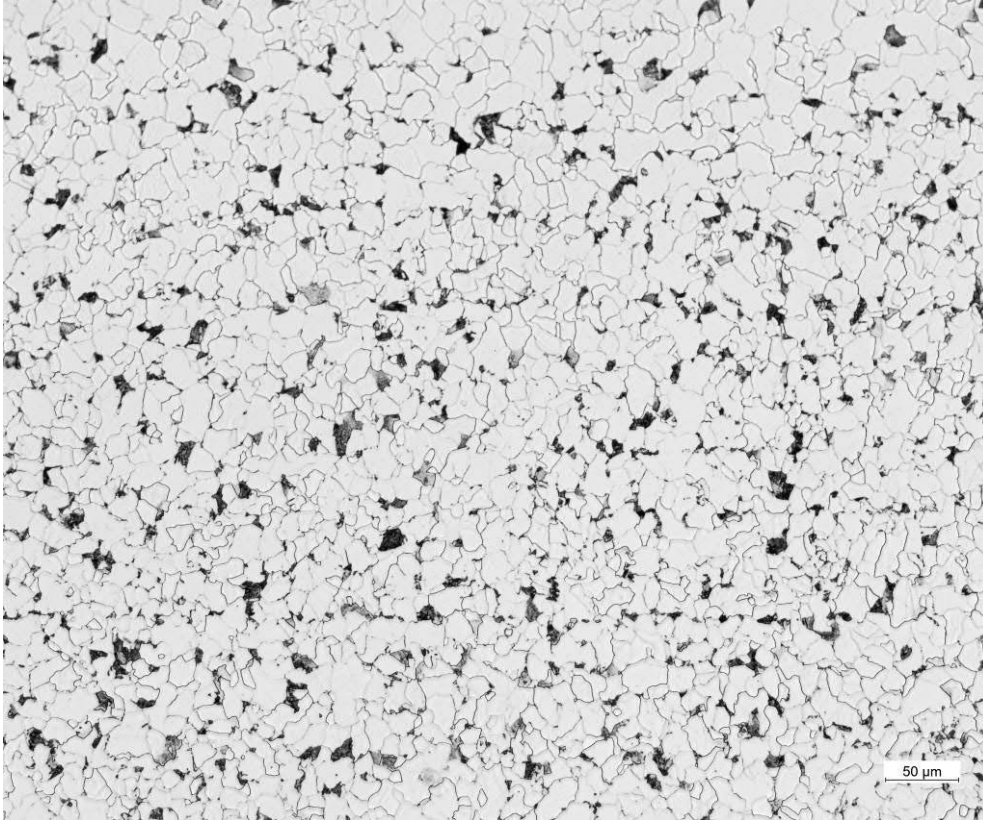
Kuva 127. Pietarsaaren uuden sulakourun poikkileikkaus. Sisäpinta (vesikierron puoleinen pinta) alhaalla



Kuva 128. Pietarsaaren uuden sulakourun sisäpinta pohjalta



Kuva 129. Pietarsaaren uuden sulakourun pinnoite-perusaineenrajapinta kourun pohjalta

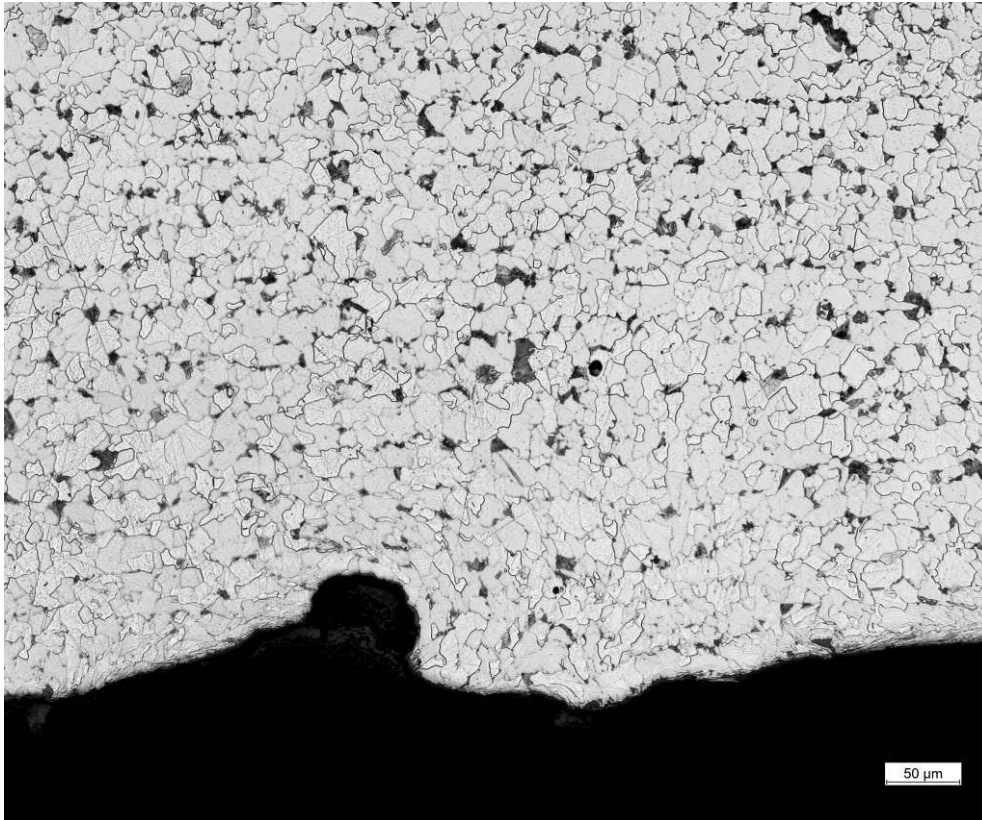


Kuva 130. Pietarsaaren uuden kourun perusaineen mikrorakenne kourun pohjalla

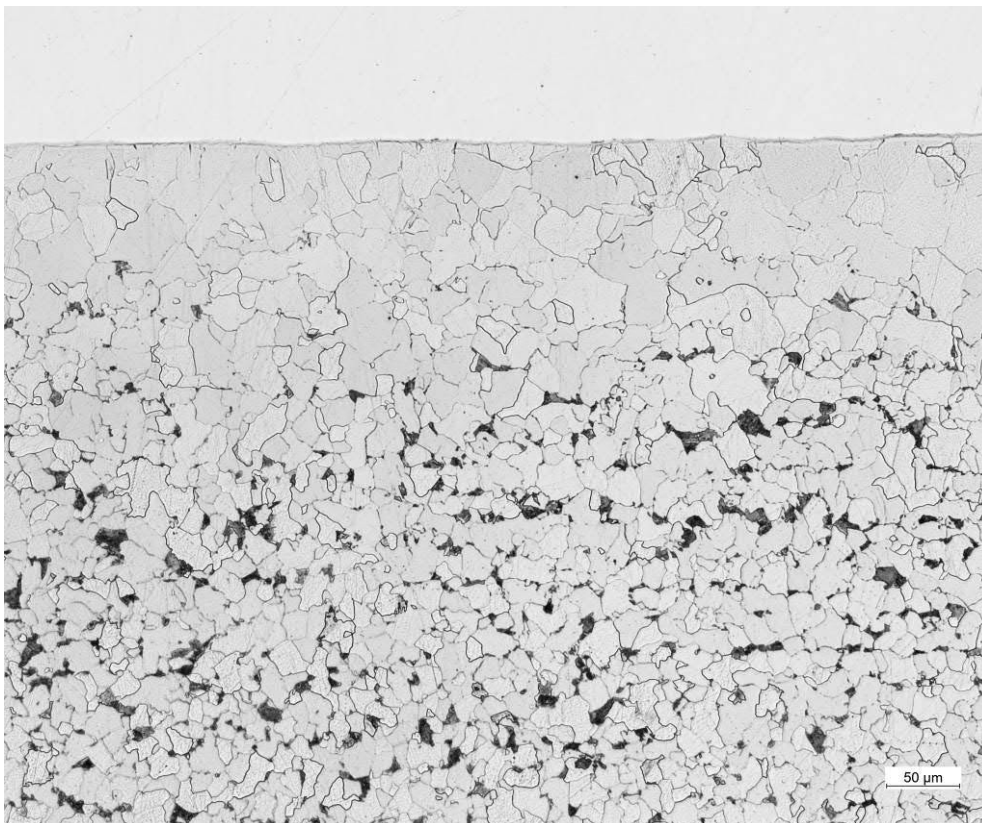
Pietarsaaren uuden sulakourun seinämältä tehdyssä poikkileikkausnäytteessä oli tiivis pinnoite, joka oli hyvin kiinnittynyt perusaineeseen poikkileikkauksen kohdalta. Kourun sisäpinnalla ei ollut havaittavissa oksidikerrosta, ainoastaan pientä valmistuksen aiheuttamaa epätasaisuutta. Pinnoite-perusainerajapinnassa havaittiin noin 110 µm paksu hiilenkatokerros. Kourun perusaineen mikrorakenne oli ferriittis-perliittinen (Kuva 131 - Kuva 134).



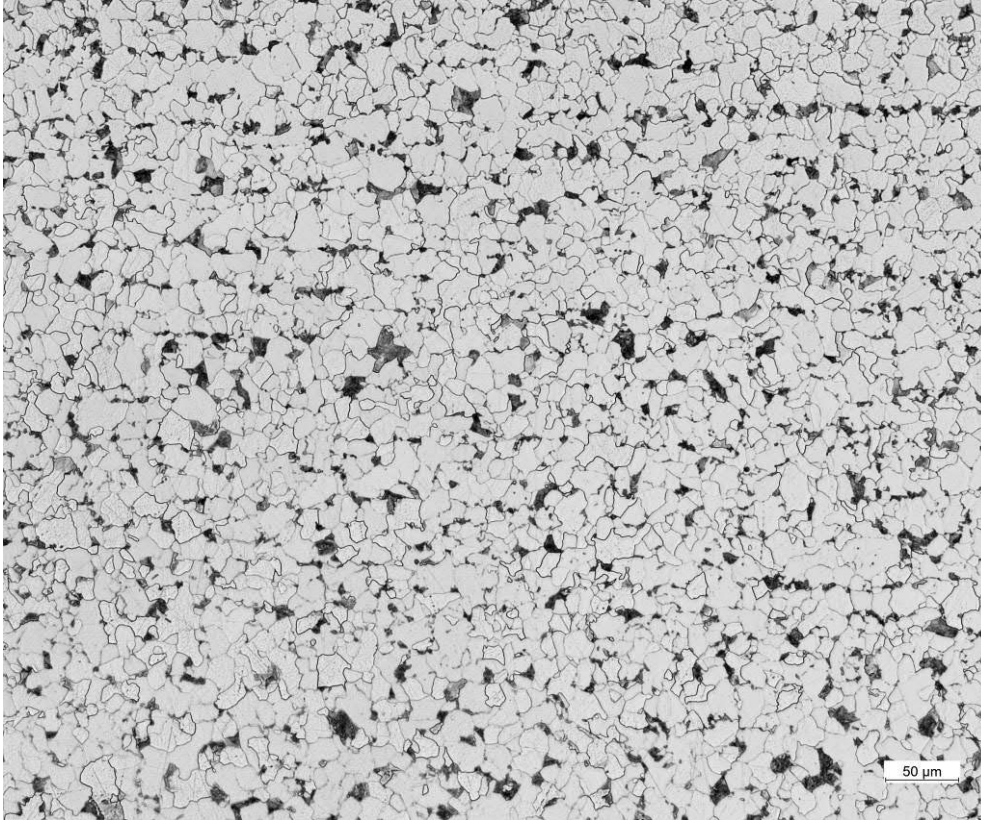
Kuva 131. Pietarsaaren uuden sulakourun poikkileikkaus seinämältä



Kuva 132. Pietarsaaren uuden sulakourun sisäpinta (vesikierron puoleisella pinta)



Kuva 133. Pietarsaaren uuden kourun pinnoite-perusainerajapinta kourun seinämältä



Kuva 134. Pietarsaaren uuden sulakourun perusaineen mikrorakenne kourun seinämältä

3.10 Rauma

Rauman sulakouruille Rauma 1, Rauma 3 ja Rauma 6 tehtiin visuaalinen tarkastus MF Rauman tiloissa. Valmetin valmistamista kouruista 2 (Rauma 1 ja Rauma 6) olivat ajokaudelta 2017-2018 ja näistä kouruista oli pinnoitettu vain jättöpääty. Kouru Rauma 3 oli ajokaudelta 2018-2019, tästä oli pinnoitettu jättöpäädyn lisäksi noin 7 cm kourun pohjaa. Kouruista Rauma 1 oli hyvässä kunnossa eikä siinä ollut havaittavissa säröjä tai merkittävää syöpymistä jättöpäädystä. Kuoruissa Rauma 3 ja Rauma 6 oli havaittavissa syöpymää jättöpäädissä, joka oli selvästi syvempää ajokaudella 2018-2019 käytössä olleella kourulla Rauma 3. Syöpymät sijaitsivat samoilla kohdilla ja syöpymä oli molemmissa kouruissa syvempää kourun oikealla puolella jättöpäädystä katsottuna.



Kuva 135. Sulakouru Rauma 1



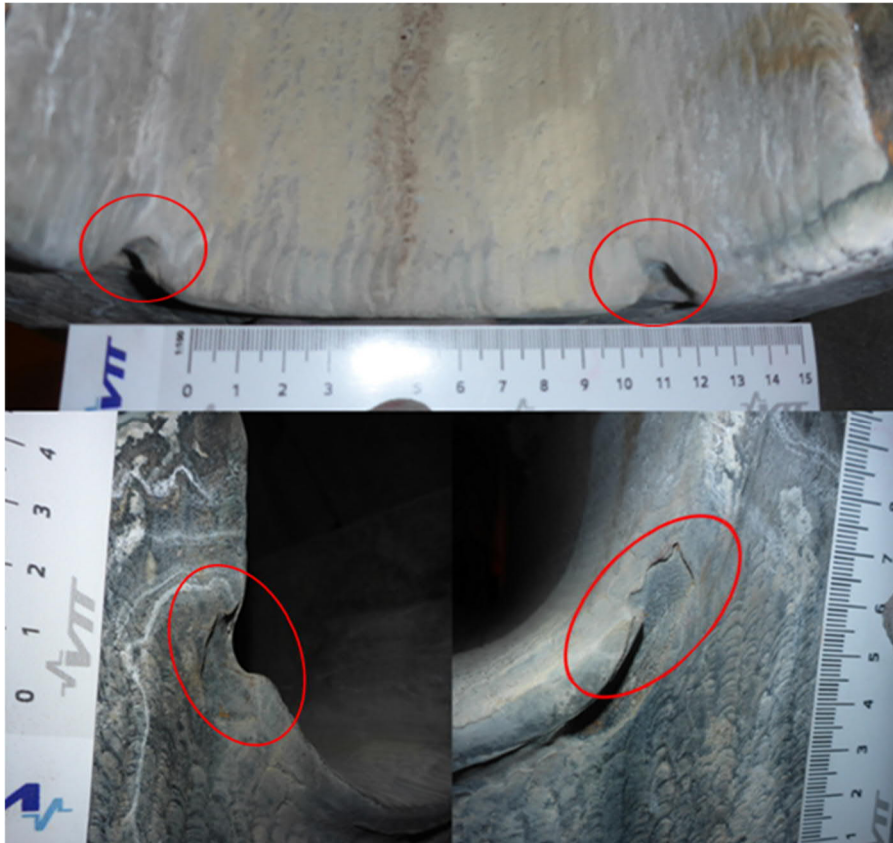
Kuva 136. Sulakouru Rauma 6



Kuva 137. Sulakourun Rauma 6 jättöpääty



Kuva 138. Sulakouru Rauma 3



Kuva 139. Sulakourun Rauma 3 jättöpääty, syöpymäkuopat ympyröity

3.11 Sunila

Sunilasta tutkimuksiin toimitettiin kaksi Valmetin kourua, SK10:stä ja SK11:sta, tästä eteenpäin Sunila SK10 ja Sunila SK11 (Kuva 140 ja Kuva 141). Kourujen ajoaika oli ollut 12 kuukautta. Kourujen jättöpäädyt sekä osa kourun pohjasta olivat pinnoitettuja. Visuaalisessa tarkastuksessa havaittiin syöpymiä Sunila SK11:n jättöpäässä. Sunilassa on aiemmin ollut suuria ongelmia sulakourujen pohjan säröilyn kanssa ja kokeilussa on ollut useita eri materiaaliratkaisuita. Kuitenkin nyt tutkimuksiin tulleet kourut olivat verrattain hyvässä kunnossa.



Kuva 140. Tutkimukseen toimitettu kouru (Sunila SK10)



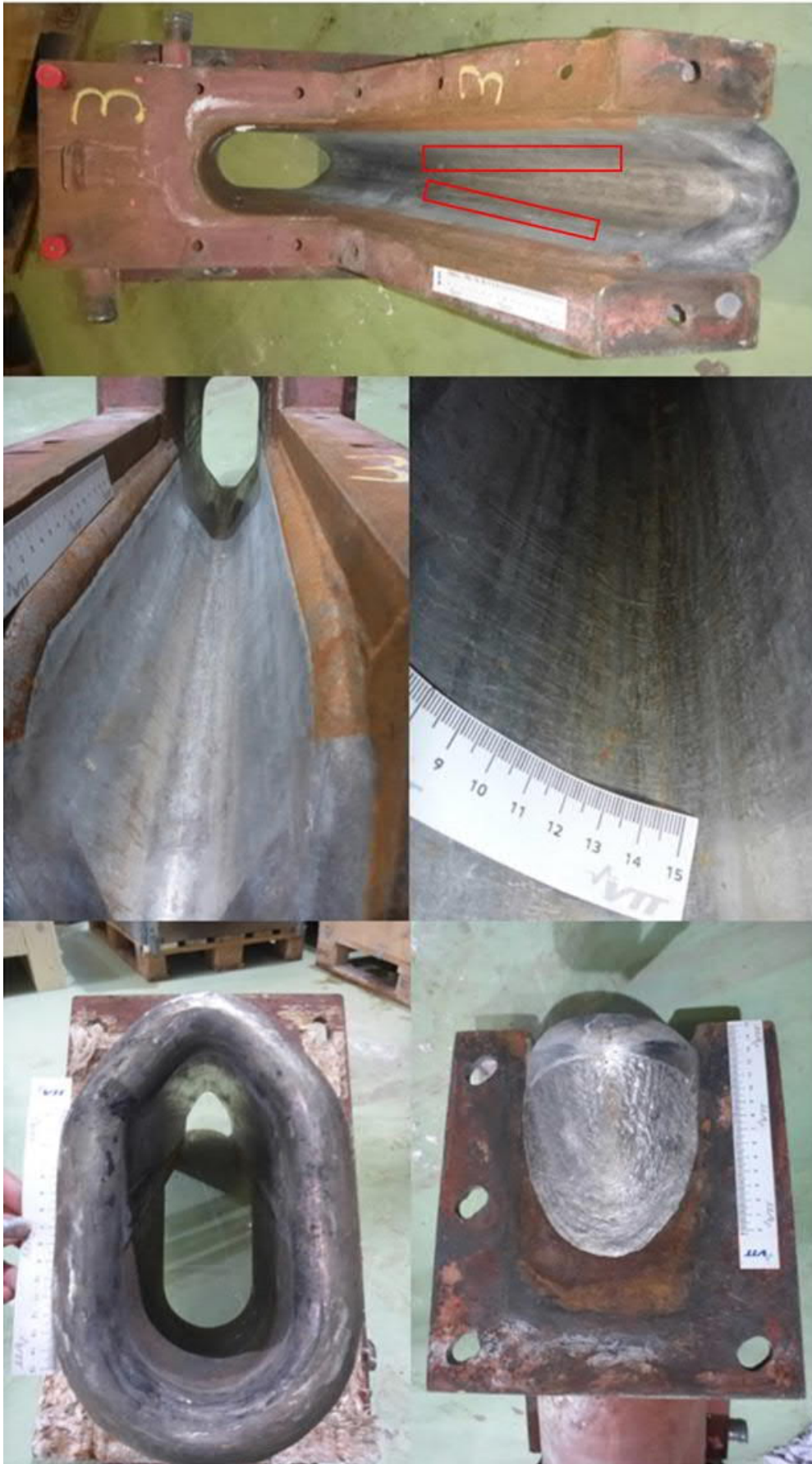
Kuva 141. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Sunila SK11)

3.12 Veitsiluoto

Veitsiluodosta tutkimuksiin toimitettiin Andritzin compound kourut 1 ja 3, tästä eteenpäin Veitsiluoto 1 ja Veitsiluoto 3 (Kuva 142 ja Kuva 143). Visuaalisessa tarkastuksessa sulakourujen kouruosissa havaittiin säröjä.



Kuva 142. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Veitsiluoto 1). Säröytyneet alueet on merkitty yllimpäin kuvaan punaisilla suorakaiteilla.



Kuva 143. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Veitsiluoto 3). Säröytyneet alueet on merkitty ylläpään kuvaan punaisilla suorakaiteilla.

3.13 Äänekoski

Äänekoskelta tutkimuksiin toimitettiin kourut 5, 6 ja 7, tästä lähtien Äänekoski 5, Äänekoski 6 ja Äänekoski 7 (Kuva 144 - Kuva 146). Valmetin valmistamissa sulakouruissa oli hitsauspinnoite ainoastaan jättöpäädyssä, ei kouruosalla. Kaikkien kourujen jättöpäädyssä havaittiin syöpymiä. Tämän lisäksi tulpatussa kourussa, Äänekoski 6, havaittiin säröjä kourun pohjalla lähellä jättöpäätä.



Kuva 144. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Äänekoski 5)



Kuva 145. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Äänekoski 6). Säröytynyt alue on merkitty yllimpään kuvaan punaisella suorakaiteella.



Kuva 146. Tutkimuksiin toimitettu kouru (Äänekoski 7)

4. Johtopäätökset ja yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää soodakattiloiden sulakouruissa havaittavia vaurioita ja niiden vaikutusta sulakourujen käytettävyyteen, koska on havaittu, että usealla laitoksella sulakourut eivät ole kestäneet suositeltua yhden vuoden ajojaksoa.

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

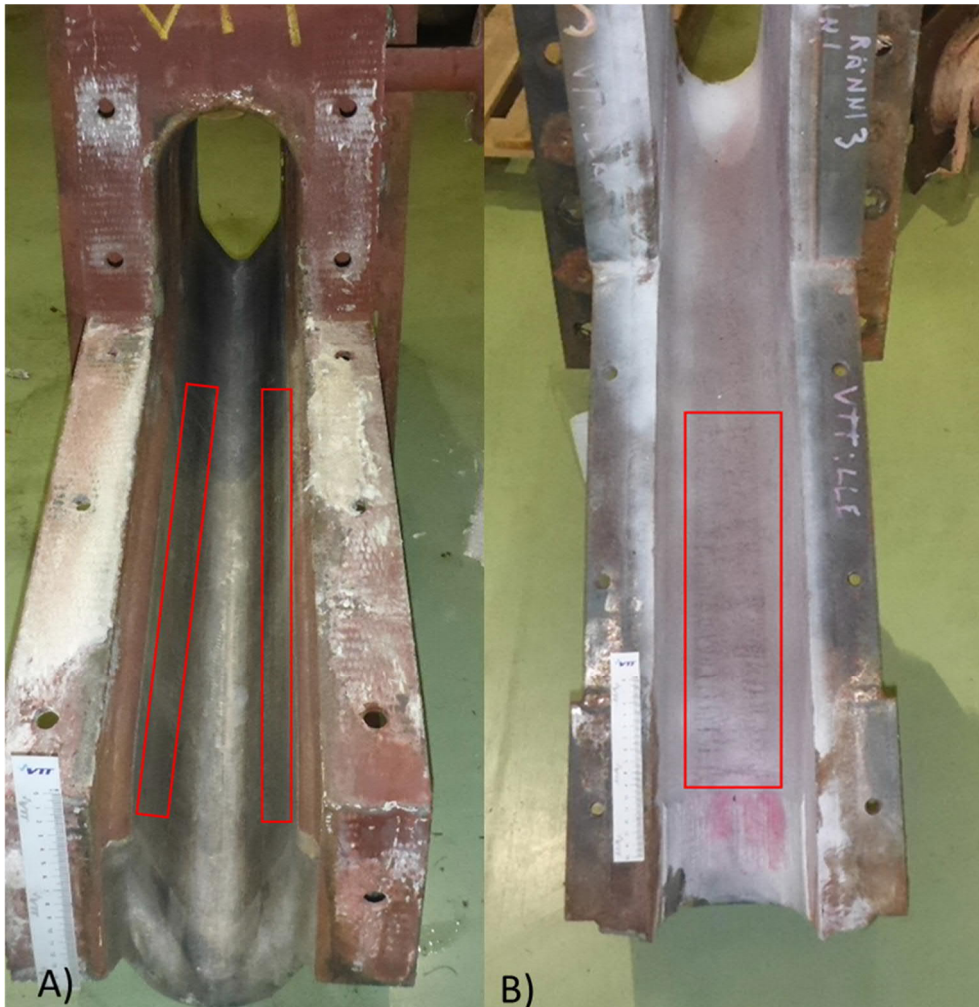
Missään tutkimuksiin lähetetyssä sulakourussa ei havaittu suurempaa syöpymää tai säröilyä kourun suuaukon ympäristössä. Tarkemmin tutkituissa sulakouruissa ei pääosin havaittu mikrorakenteen hajaantumista, joka olisi viitannut siihen, että kourun materiaaliin olisi käytössä kohdistunut liian suuri lämpökuorma. Poikkeus tähän oli kourun Kemi 3 jättöpääty, jonka perusaineessa havaittiin hyvin lievää mikrorakenteen hajaantumista. Mikrorakenteen hajaantuminen ilmenee aluksi perliitin lamellien katkeiluna ja vähitellen etenevänä palloutumisena ja palloutuneiden karbidien karmeneminen. Tosin mikrorakenteen hajaantumisnopeus on riippuu mm. rakeiden koosta, lämpötilasta että ajasta. Näin ollen hetkellinen lämpötilapiikin aiheuttama ylikuumeneminen ei vielä aiheuta ferriittisperliittisen mikrorakenteen hajaantumista, vasta pidempi aikainen ylikuumeneminen (hiiliteräksillä > 400°C) saa aikaan rakennemuutoksia.

Taulukko 2. Yhteenveto tutkimuksen havainnoista

Laitos	Kouru	Ajoaika	Kouruosa Säröjä	Jättöpääty	Huomioita
Enocell 1 & 4	Andritz - laserpinnoitettu	12kk	OK	OK	Rassausjälkiä
Joutseno 2 & 6	Andritz - laserpinnoitettu	6kk	Satunnaisia pieniä säröjä kourun seinämällä	OK	Lyhyt ajojakso
Kaukaa 3 & 5	Andritz - laserpinnoitettu	6kk	OK	Pientä kulumaa jättöpäädysssä	Lyhyt ajojakso
Kaukopää -SK5	Andritz - compound	12kk	Satunnaisia pieniä säröjä kourun seinämällä	OK	kuiva-aine% 72, 400 kuorma
Kaukopää -SK6	Valmet - pääty & osa kourua pinnoitettu	12kk	Satunnaisia pieniä säröä kourun pohjalla	Suuri syöpymä	kuiva-aine% 72, 533 kuorma
Kemi 3	Valmet - pääty & osa kourua pinnoitettu	12kk	Säröjä kourun pohjalla max. 575µm	Suuria syöpymiä perusaineeseen asti	kuiva-aine% 81, 500 kuorma
Kemi 5	Valmet - pääty & osa kourua pinnoitettu	12kk	Säröjä kourun pohjalla max. 750µm	OK	Jättöpääty jouheva

Kotkamills oikea & vasen	Andritz - compound	12kk	Runsaasti säröjä kourun seinämällä	OK	
Kymi 6	Valmet- pääty & osa kourua pinnoitettu	12kk	OK	Suuria syöpymiä	
Kymi 6	Valmet - pääty & osa kourua pinnoitettu	12kk	OK	Pientä syöpymää	Päädyn jouhevampi rakenne
Oulu 1	Andritz - compound	24kk	OK	Syöpymää	
Oulu 3	Andritz - compound	24kk	Säröjä kourun seinämällä >2100 µm	OK	
Pietarsaari X	Andritz - compound	18kk	Säröjä kourun seinämällä >3000 µm	OK	Useat säröt etenivät perusaineeseen
Pietarsaari Y	Andritz - laserpinnoitettu.	18kk	Säröjä kourun seinämällä max. 1800 µm	OK	Säröt vain pinnoitteessa
Pietarsaari uusi	Andritz - compound	18kk			
Rauma 1 & 6	Valmet - pääty pinnoitettu	12kk	OK	Syöpymää	
Rauma 3	Valmet - pääty & osa kourua pinnoitettu	12kk	OK	Suuria syöpymiä	
Sunila SK10	Valmet - pääty & osa kourua pinnoitettu	12kk	OK	OK	Jouheva pääty
Sunila SK11	Valmet - pääty & osa kourua pinnoitettu	12kk	OK	Syöpymää	
Veitsiluoto 1 & 3	Andritz, pinnoitettu	12kk	Runsaasti säröjä kourun seinämällä	OK	
Äänekoski 5,6 & 7	Valmet - pääty pinnoitettu	8kk	Säröjä kouruosalla lähellä jättöpäättyä tulpatussa kourussa Äänekoski 6	Syöpymää	Pinnoite puuttuu kouruosalta - ei verrattavissa suoraan muihin kouruihin

Tässä tutkimuksessa kuoruissa kouruosalla havaittiin säröjä sekä Andritzin että Valmetin valmistamissa sulakouruissa (Kuva 147). Nämä säröt vastasivat termisen väsymisen säröjä. Valmetin sulakouruissa säröjä oli havaittavissa huomattavasti harvemmassa määrässä kuin Andritzin kouruissa. Näissä havaitut säröt olivat sijoittuneet kourun pohjalle. Andritzin compound -kouruissa säröjä oli havaittavissa kourun seinämillä, ja tarkemmin tutkitut näytteet osoittivat säröjen etenevän pinnoitekerroksen läpi perusaineeseen. Andritzin laserpinnoitetuissa kouruissa havaittiin vähemmän säröilyä eikä näiden säröjen havaittu etenevän perusaineelle. Säröjen ilmentyminen eri kohtiin kourua eri valmistajan kouruilla on selitettävissä sekä erilaisella rakenteella (sekä ulkoinen rakenne että virtauskanavisto) että eri materiaaleilla. Termisen väsymisen säröjen syntyyn ja kasvuun vaikuttavat sulakourun rakenteen ja materiaalin lisäksi suuret lämpötilojen vaihtelut, eli suuret kuorman vaihtelut ja sulasyökset. Tämän lisäksi säröjen kasvua kiihdyttää liian korkea materiaali­lämpötila (liian kuuma jäähdysvesi ja tästä seuraavat paksut eristävät oksidit). Joissain tapauksissa myös säröihin päässyt sula voi syövyttää materiaalia ja kiihdyttää säröjen kasvua. Tutkittujen kourujen ajoajat eri laitosten välillä vaihtelivat, joten yksiselitteisiä johtopäätöksiä särö­määrien ja syöpymien synnystä eri tyyppisten sulakourujen välille ei voida tehdä.



Kuva 147. Havaittujen säröjen sijainti a) Andritzin ja b) Valmetin kouruissa

Tutkittujen sulakourujen jättöpäädyissä havaittiin eroosio-korroosion aiheuttamia syöpymiä lähinnä Valmetin sulakouruissa. Andritzin kouruissa havaittiin vain yhdessä vakavampaa syöpymää ja muissa vain pientä kulumaa. Valmetin jättöpäädyissä syöpymät olivat suurempia ja yleisemmin Kuvan 148 osoittamissa kohdissa. Havaittiin myös, että jättöpäädyt, joissa ei havaittu syöpymää, olivat rakenteeltaan hieman sulavalinjaisempia. Andritzin sulakourujen jättöpääty on rakenteeltaan erilainen; tässä tutkimuksissa havaitussa yhdessä syvässä syöpymässä havaittiin, että syöpymä on lähtenyt liikkeellä kahden hitsipalon rajapinnalta. On

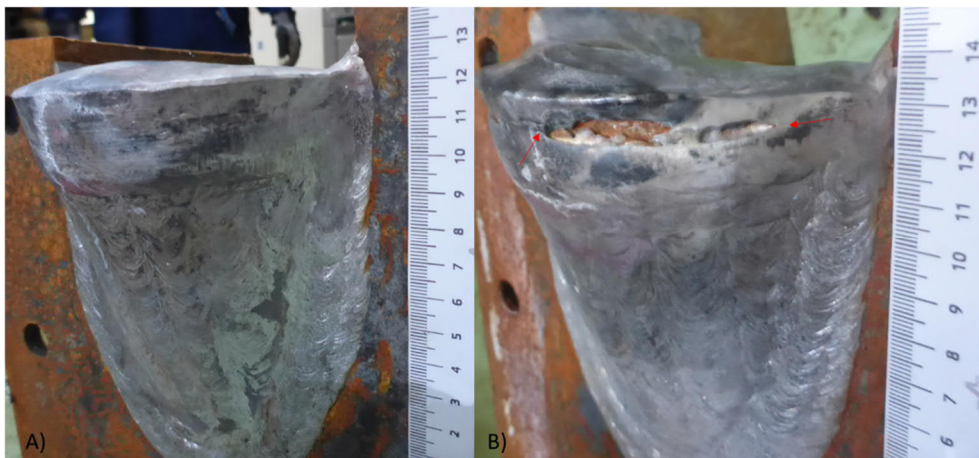
siis mahdollista, että tällä kohden on ollut rakenteessa epäjatkuvuuskohta ja/tai materiaalissa heikompi kohta, josta syöpyminen on päässyt ydintymään ja jatkamaan kasvuaan pinnoitteen läpi perusaineelle (Kuva 149).

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

Jättöpäätyjen eroosio-korroosioon vaikuttavat tekijät materiaalin lisäksi ovat sen rakenne, epäjatkuvuuskohdat jättöpinnalla ja päädyn lämpötila sekä sulan määrä, virtausnopeus ja viskositeetti. Jättöpäätyjen syöpymisen estämiseksi on suositeltavaa hioa jättöpääty jouhevaksi niin, että sula pääsee virtaamaan liuottajaan hyvin eikä aiheuta pyörteitä päätyyn eikä pintaan jää epäjatkuvuuskohtia, joihin sulasta tai liuottajan höngästä aiheutuvat rikkiyhdisteet voisivat tunkeutua aiheuttaen korroosiota. Tämän lisäksi on sulan virtauksen pysyttävä tasaisena, riippuen kuorman ja viskositeetin vaihteluista.



Kuva 148. Valmetin sulakourun jättöpääty a) jouhevampi jättöpinta, ja b) jyrkempi jättöpinta. Myös yleisimmät syöpymien ilmentymispaikat merkitty



Kuva 149. Andritzin jättöpäädystä havaittu suuri syöpymä a) vaurioitumaton (Oulu 4) ja b) syöpynyt (Oulu 1)

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY, RAPORTTISARJA

- 1/2019 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Konemestaripäivä 24.1.2019, esitelmät
Scandic Laajavuori, Jyväskylä, Metsä Fibre Oy, Äänekosken Biotuotetehdas
(16A0913-E0194) 24.1.2019
- 2/2019 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Vuosikertomus 2018
(16A0913-E0195) 11.4.2019
- 3/2019 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattila-alan yhteistoiminta
Pöytäkirja. Vuosikokous 11.4.2019, Lapland Hotels Bulevardi, Helsinki
(16A0913-E0196) 11.4.2019
- 4/2019 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Soodakattilapäivä 31.10.2019
Sokos hotelli Presidentti, Helsinki (16A0913-E0197) 31.10.2019
- 5/2019 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Mustalipeän polttomenetelmät Suomen soodakattiloissa 2018
Esa Vakkilainen, LUT-yliopisto
(16A0913-E0198) 1.11.2019
- 6/2019 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Non-process elements in the recovery cycle of six Finnish kraft pulp mills
Camilla Karlemo, Åbo Akademi
(16A0913-E0199) 1.11.2019
- 7/2019 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Evaluation of three different gas phase chemistry mechanisms for
predicting NO_x emission formation in recovery boilers
Markus Engblom, Åbo Akademi
(16A0913-E0200) 1.11.2019

SUOMEN SOODAKATTILAYHDISTYS RY, RAPORTTISARJA

- 1/2020 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Konemestaripäivä 23.1.2020, esitelmät
Sokos hotelli Lappee, Lappeenranta, UPM-Kymmene Oyj, Kaukaan tehtaat
(16A0913-E0201) 23.1.2020
- 2/2020 Suomen Soodakattilayhdistys ry
Sulakourujen materiaalitutkimus
Sanni Yli-Olli, Satu Tuurna, Aino Mäntyranta, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
(16A0913-E0202) 18.2.2020