



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Materiaaliopin laitos - Institute of Materials Science

Lepistö, T., Kanerva, T. ja Saarinen, T.

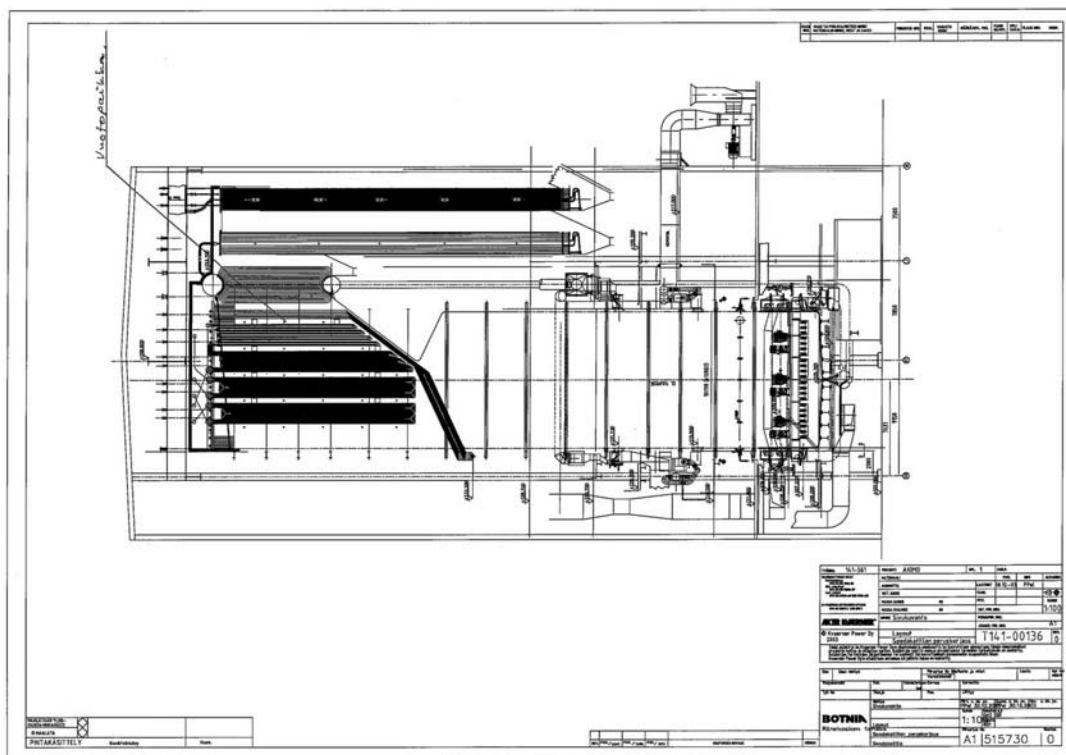
**Soodakattilan tarkastusluukun
verhoputken vaurioanalyysi**

Raportti 7/2004

Johdanto

Oy Metsä-Botnia Ab:n Äänekosken tehtaalla oli jouluseisokkiin menon yhteydessä, vuoden 2003 lopussa, todettu verhoputken ja keittopinnan (boileripannin välissä) vuoto. Tätä vuotoa ja sen esiintymiskohtaa, ns. tarkastusluukku, on havainnollistettu kattilapiirustuksella, Kuva 1 ja tarkastuksen yhteydessä otetulla kuvalla, Kuva 2. Vuotokohdan korjaus suoritettiin poistamalla tarkastusluukku kokonaan ja korvaamalla se neljällä suoralla putkella.

Vuotavassa putkessa silmämääräisestikin selvästi näkyvä murtuma oli suhteellisen pitkä kattaen lähes koko putken näkyvän osuuden. Muissa kolmessa tarkastusluukkuja ympäröivissä putkikäyrissä ei havaittu silmämääräisesti näkyviä murtumia. Koska kattilaputkien vuodot saattavat helposti johtaa kattilan alasajoon ja tätä kautta tuotannon keskeytymiseen, päätti Oy Metsä-Botnia Ab teettää vaurioselvityksen, jossa tarkastellaan vauriota ja sen mahdollisia syntyisiä. Tampereen teknillisen yliopiston Materiaaliopin laitokselle toimitettiin vaurioselvityksiä varten soodakattilan tarkastusluukun muodostava, korjauksen yhteydessä poistettu putkirakenne.



Kuva 1: Vuotokohdan sijainti soodakattilassa.



Kuva 2: Valokuva vuotokohdasta

Alustavat tarkastelut ja näytteenvalmistus

Vaurioselvityksiä varten toimitettu, korjauksen yhteydessä poistettu putkikanne on esitetty kuvassa 3. Tarkastusluukku, joka näkyy kuvan keskellä, on saatu aikaiseksi verhoputkia taivuttamalla. Luukun taakse on tehty metallikotelo (ei näy kuvassa), joka on täytetty keraamimateriaalilla.

Visuaalisessa tarkastelussa havaittiin helposti vuodon aiheuttanut murtuma, kuva 4. Se on suhteellisen pitkä kattaen lähes koko putken näkyvän osuuden. Muissa kolmessa tarkastusluukkuja ympäröivässä putkikäyrässä ei silmämääräisesti havaittu esiintyvän murtumia.

Tutkimukset aloitettiin hitsaamalla silmämääräisesti ehjäksi havaitun putken päät umpeen laipoilla, joissa oli kaasun syötön mahdollistavat liitokset. Putki



Kuva 3: Tutkittavaksi toimitettu putkirakenne.



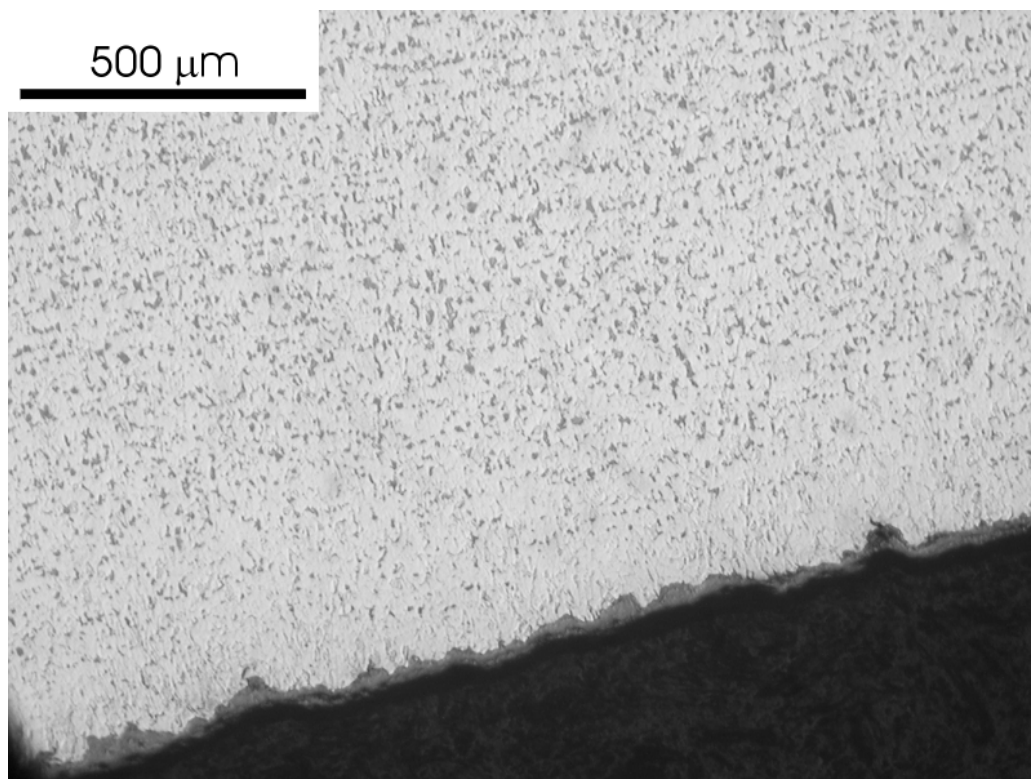
Kuva 4. Rikkoutunut putkikäyrä.

paineistettiin typpikaasulla. Paineistuksen yhteydessä putkessa ei todettu esiintyvän vuotoja. Vaurioitumattomia putkikäyriä tarkasteltiin vielä tunkeumanesteellä mahdollisten murtumien havaitsemiseksi. Näissä tarkasteluissa putkissa ei havaittu esiintyvän pintaan avautuvia murtumia.

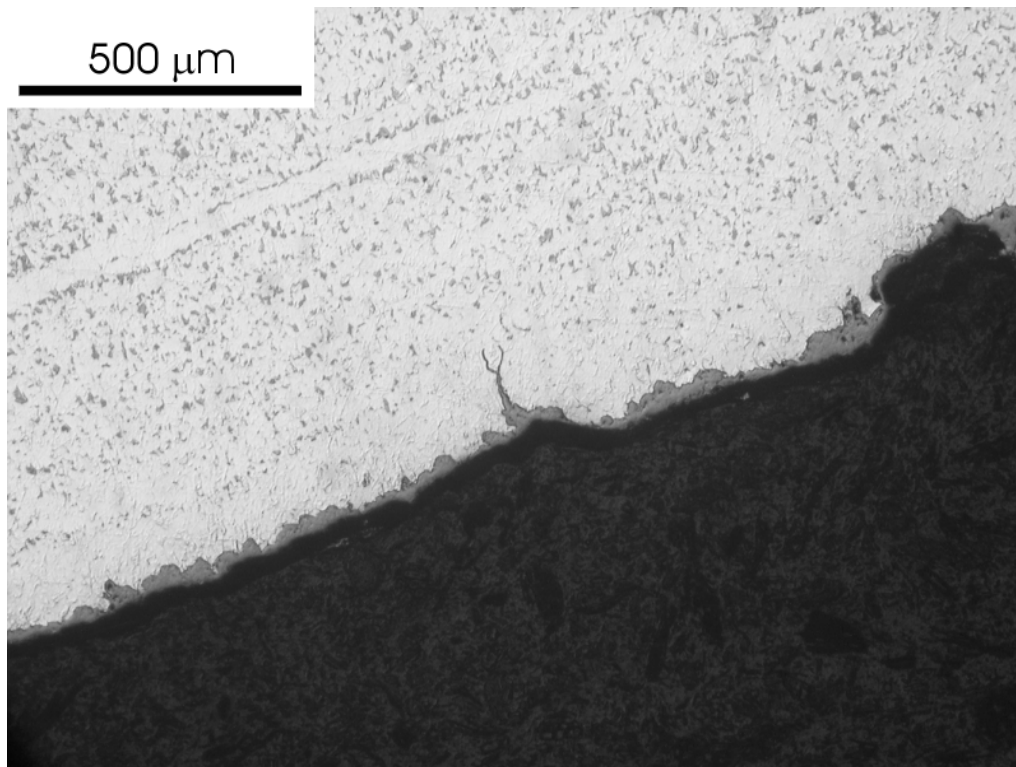
Tutkittavaksi toimitetusta tarkastusluukun muodostavasta putkirakenteesta irrotettiin yksityiskohtaisempia tarkasteluja varten näytepaloja sekä murtuneelta putkenosalta että ehjältä putkikäyrästä. Irrotetut näytepalat pilkottiin edelleen pienempiin osiin. Murtuneelta kohdalta irrotettua näytettä käytettiin murtopintatarkasteluissa. Murtuman molemmista päistä ja ehjältä putkimutkasta tehtiin poikkileikkaus hie mikrorakennetarkastelua varten..

Mikrorakennetarkastelut

Putken pituusakselin suuntaisesti valmistetusta poikkileikkaushieistä optisella mikroskoopilla otetut mikrorakennekuvat on esitetty kuvissa 5 ja 6. Suoritetujen mikrorakennetarkastelujen perusteella sekä ehjän putkikäyrän että rikkoutuneen putkikäyrän mikrorakenteet edustavat tämän tyyppisissä putkissa käytettävien materiaalien tyypillistä mikrorakennetta. Tarkastelluissa näytteissä ei todettu esiintyvän mitään mikrorakennevirheitä. Rakenteissa ei myöskään havaittu minkäänlaisia indikaatioita lämpötilan aiheuttamista mikrorakennemuutoksista.



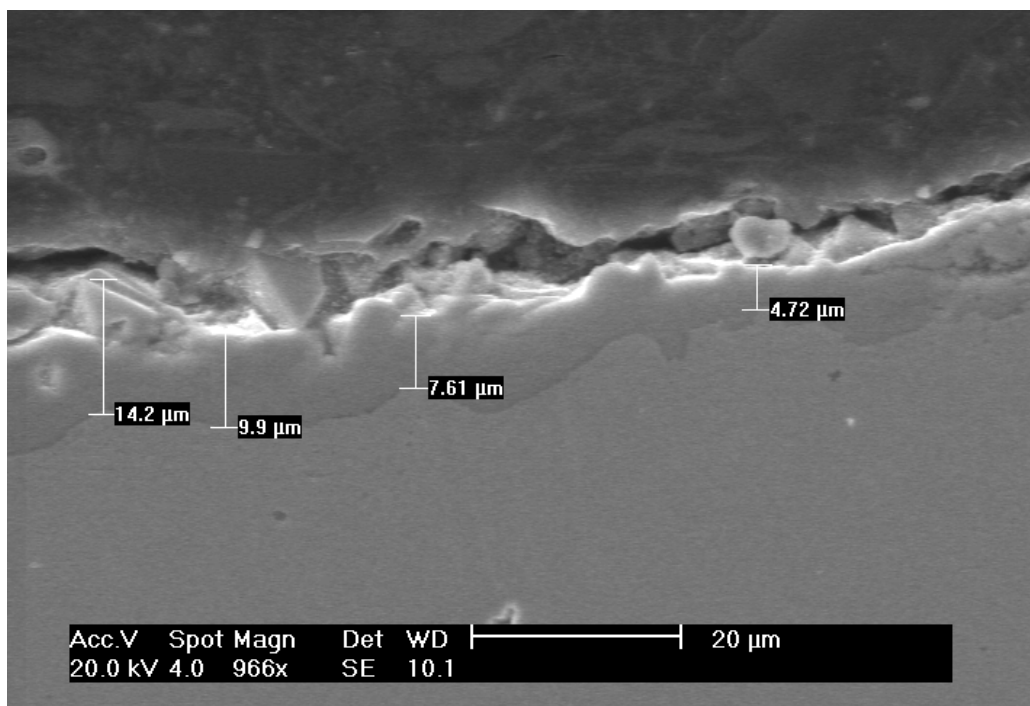
Kuva 5: Mikrorakennekuva ehjän putkikäyrän poikkileikkauksesta (sisäpinta kuvassa alhaalla).



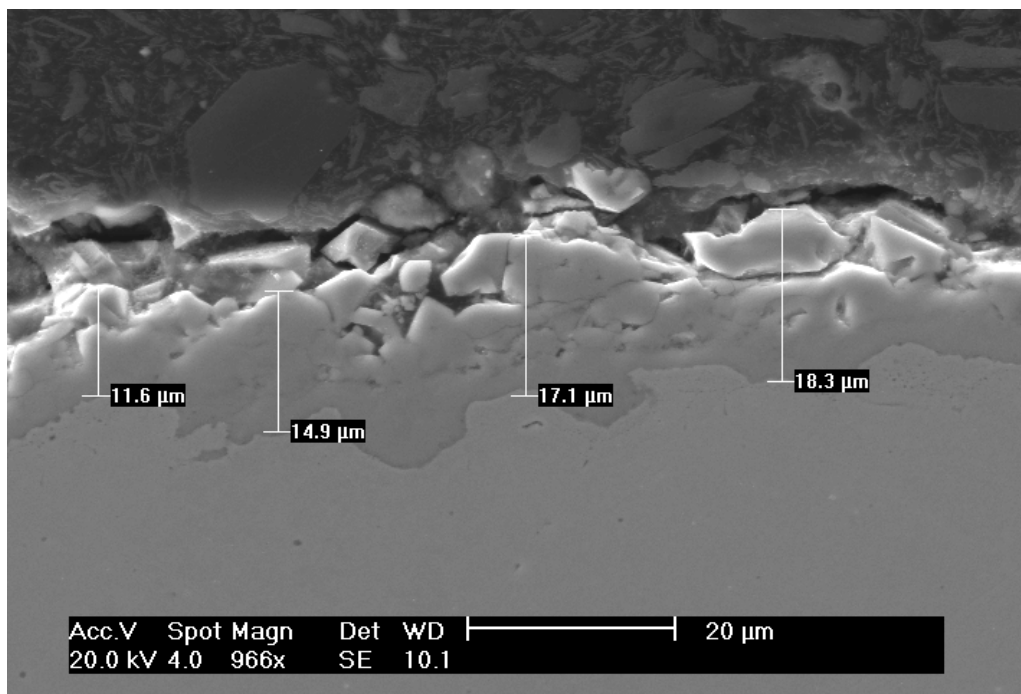
Kuva 6: Mikrorakennekuva rikkoutuneen putkikäyrän poikkileikkauksesta (sisäpinta kuvassa alhaalla).

Kuvissa 5 ja 6 näkyy putkien sisäpintaa peittävä magnetiittikerros tumman harmaana. Jotta tästä kerroksesta olisi saatu yksityiskohtaisempaa tietoa, tarkasteltiin näytteitä myös pyyhkäiselektronimikroskoopilla. Näiden tarkastelujen yhteydessä otetut kuvat on esitetty kuvissa 7 ja 8. Suoritettujen mittausten perusteella putkien sisäpinnalla olevan magnetiittikerroksen paksuus vaihteli ehjässä putkessa välillä $10\ \mu\text{m}$ - $18\ \mu\text{m}$, ja rikkoutuneessa putkessa puolestaan välillä $4\ \mu\text{m}$ - $15\ \mu\text{m}$. Ehjän putken arvoja on voidaan pitää täysin normaaleina. Sen sijaan rikkoutuneen putken arvot ovat normaalia pienempiä.

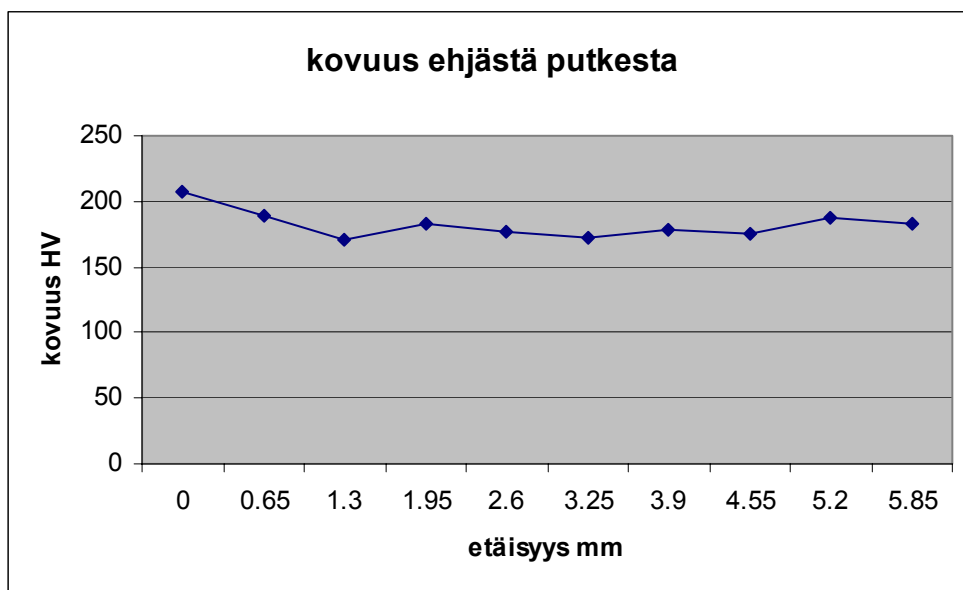
Mikrorakennetarkastelujen yhteydessä mitattiin myös putkien seinämävahvuudet ja kovuusjakaumat. Keskimääräiseksi seinämävahvuuden arvoksi saatiin sekä ehjälle että rikkoutuneelle putkelle 6,75 mm. Tämä arvo merkitsee sitä, että putkien seinämävahvuus ei ole käytön aikana muuttunut tavalla, joka voisi vaikuttaa putken rikkoutumiseen. Putkiseinämän poikkileikkauksesta mitatut kovuusjakaumat on eristetty kuvissa 9 ja 10. Mittauskäyrissä etäisyys 0 mm tarkoittaa putken ulkopintaa. Ehjän putken kovuusjakauma oli tasainen, keskimääräisen kovuuden ollessa noin 180 HV1. Sen sijaan murtuneessa putkessa kovuus vaihteli välillä 207 – 236 HV1. Syynä tähän voi olla joko se, että mittauskohta oli melko lähellä murtumaa, tai se että putki on jo alunperin ollut kovemmassa tilassa.



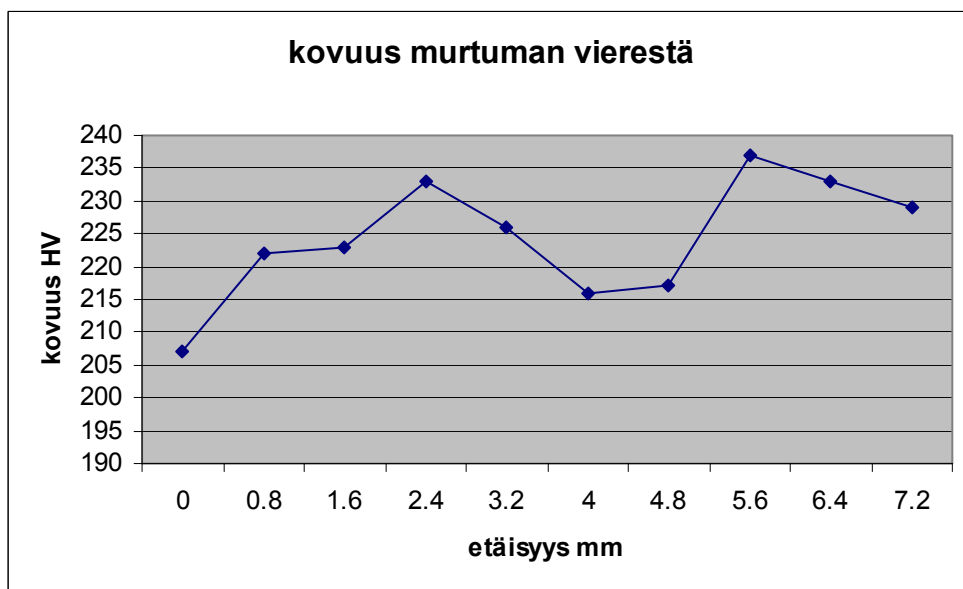
Kuva 7: SEM-kuva rikkoutuneen putken poikkileikkauksesta putken sisäpinnalta.



Kuva 8: SEM-kuva ehjän putken poikkileikkauksesta putken sisäpinnalta.



Kuva 9: Ehyen putken poikkileikkauksesta mitattu kovuusjakauma (kuvaajas-
sa etäisyys 0 mm = ulkopinta).

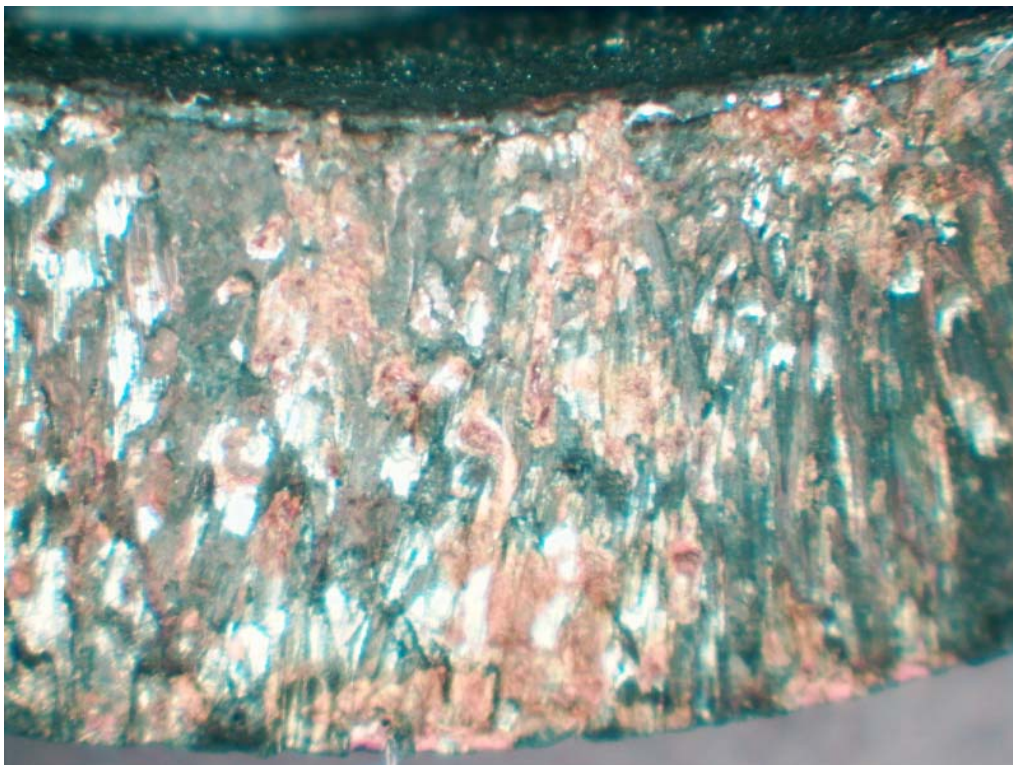


Kuva 10: Rikkoutuneen putken poikkileikkauksesta mitattu kovuusjakauma
(kuvaajassa etäisyys 0 mm = ulkopinta).

Murtopinta- ja murtumatarkastelut

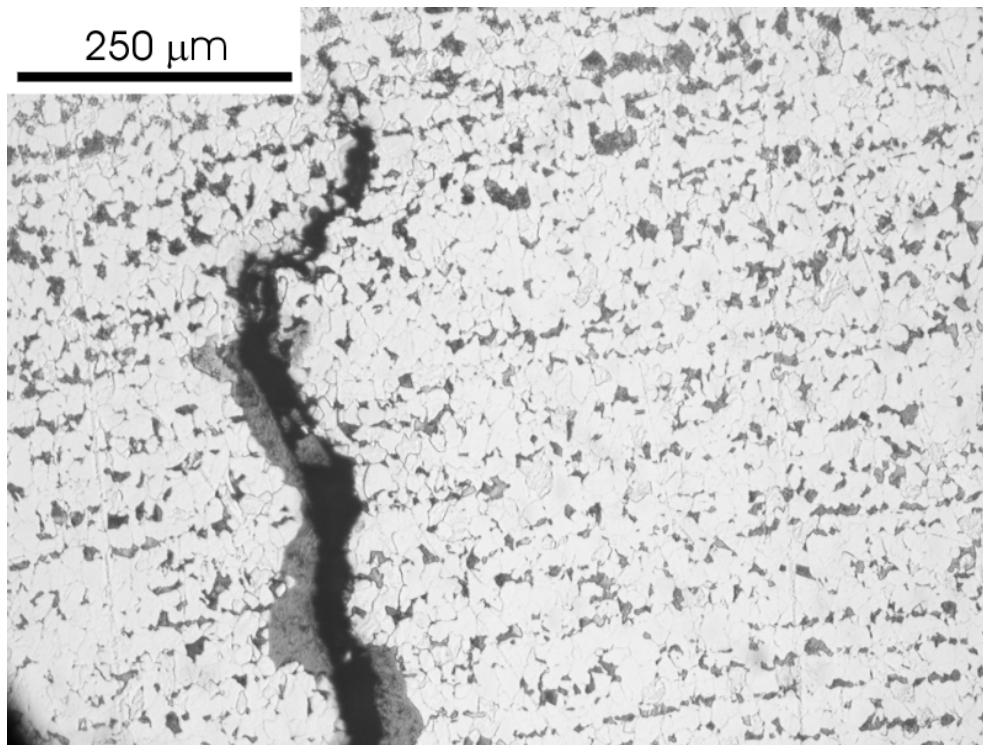
Rikkoutuneelta putkenosalta irrotettuja näytteitä tarkasteltiin visuaalisesti, optisella stereomikroskoopilla, optisella metallimikroskoopilla sekä pyyhkäisy-elektronimikroskoopilla. Näissä tarkasteluissa pyrittiin selvittämään sekä murtumismekanismi että murtumissy.

Stereomikroskooppitarkastelujen yhteydessä kävi selvästi ilmi se, että murtopinta ei voi luokitella mihinkään perusmurtumatyyppiin kuuluvaksi. Murtopinnalla esiintyi kohtalaisen paljon hapettuneita alueita, mutta myöskin lähes metallinhohtoisia alueita, kuva 11. Yleisilmeeltään murtopintaa voi luonnehtia urautuneeksi, ikään kuin putken sisäosista ulkopinnalle tapahtuneen virtauksen aikaansaamaksi.

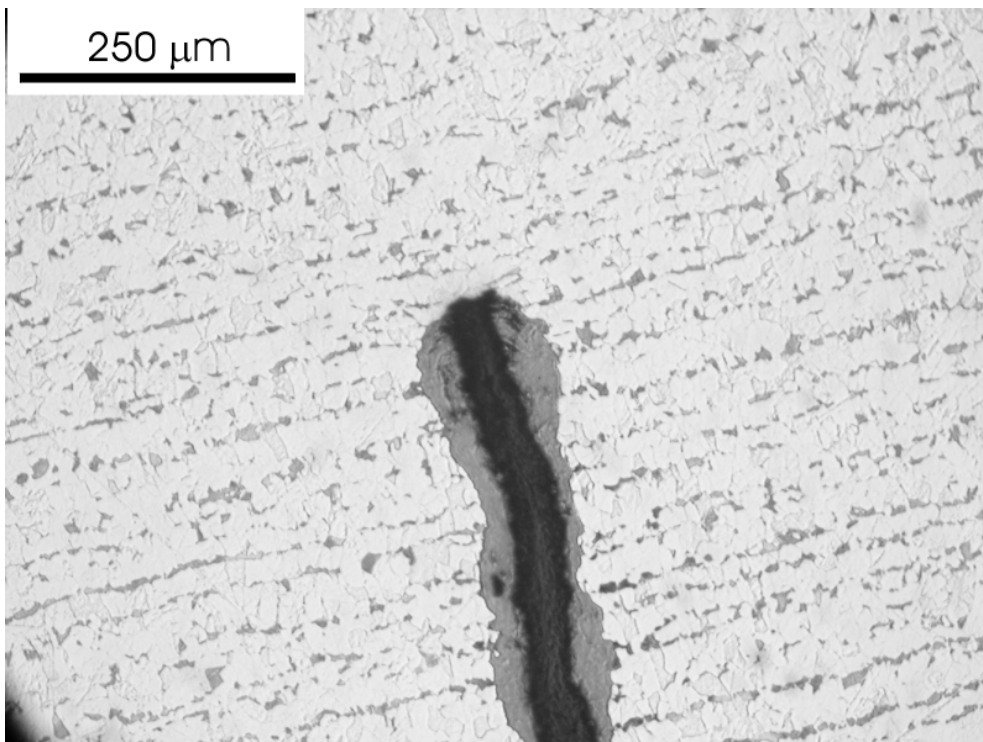


Kuva 11: Optisella stereomikroskoopilla otettu kuva murtopinnasta

Murtuman kohdalta valmistetuista poikkileikkaushieistä voitiin havaita se, että murtuma on mitä ilmeisimmin edennyt putken sisäosasta kohti ulkopintaa. Murtuma on suhteellisen leveä, mikä viittaa siihen, että korroosiolla on ollut tietyn asteinen rooli vaurion synnyssä. Kuvissa 12 ja 13 on esitetty optisella mikroskoopilla murtuman kohdalta valmistetusta poikkileikkaushieistä otetut kuvat.

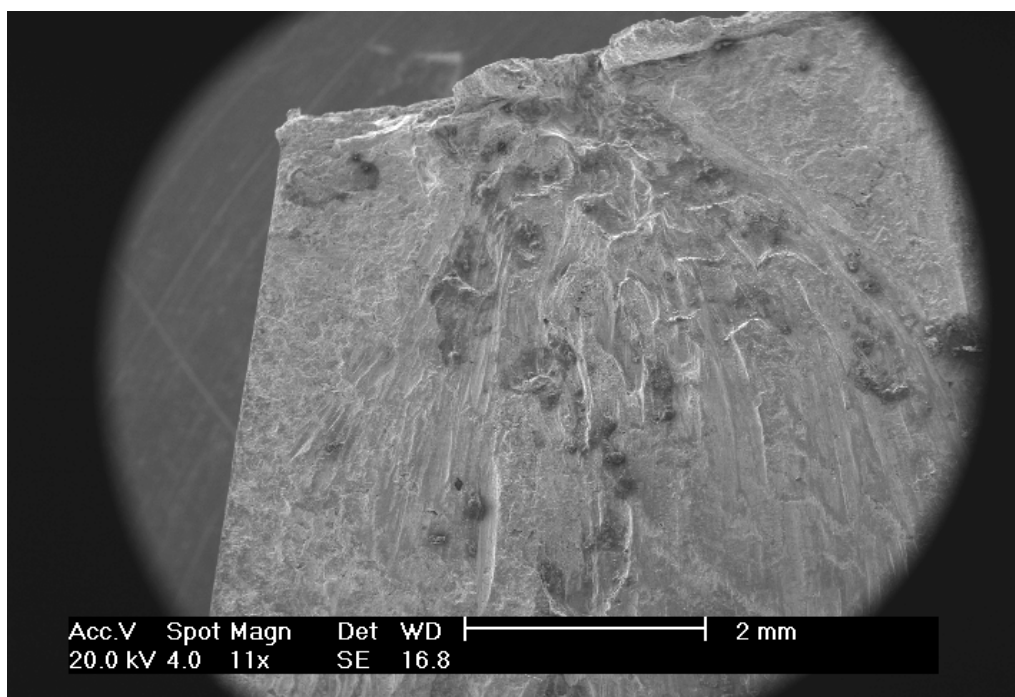


Kuva 12: Optinen mikrorakennekuva murtumasta. Putken ulkoreuna on kuvan yläosassa.



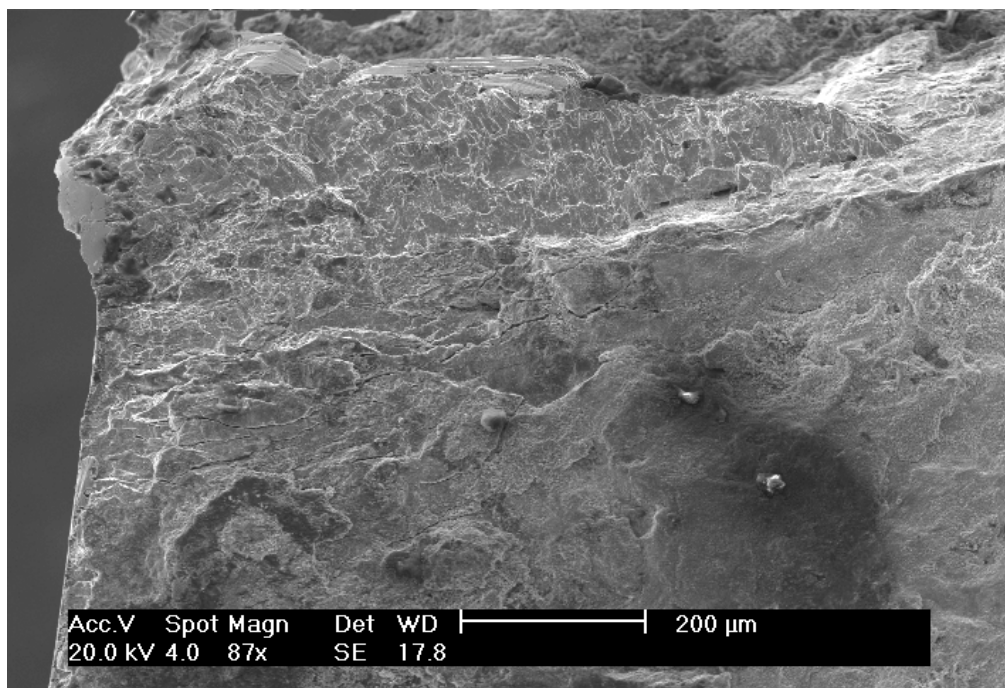
Kuva 13: Optinen mikrorakennekuva putken ulkopinnalla olevasta murtumasta.

Yksityiskohtaisemmat murtopintatarkastelut suoritettiin pyyhkäisyelektronimikroskoopilla. Yleisilmeeltään tarkastellut murtopinnat olivat suhteellisen tasaisia, niillä esiintyi selkeitä virtauskuvioita, ja hienoimmat yksityiskohdat puuttuivat niistä lähes kokonaan. Kuvassa 14 on esitetty SEM:llä pienellä suurennoksella otettu yleiskuva murtopinnasta. Putken sisäreuna näkyy kuvassa ylhäällä. Tummempana näkyvät alueet ovat oksidia. Putken sisäreunassa on noin 0,3 mm:n levyinen, muuta murtopintaa ylempänä oleva alue, joka tarkkaan katsoen näkyy myös optisessa stereomikroskooppikuvassa, Kuva 11. Kuvassa 14 näkyvät hyvin selvästi myös virtauskuviot, jotka tässä tapauksessa muodostavat viuhkamaisen kuvion. Putken sisäpinnassa virtaus on keskitynyt pienelle alueelle ja levinnyt siitä delta-maiseksi putken ulkopintaa läheystyessään.

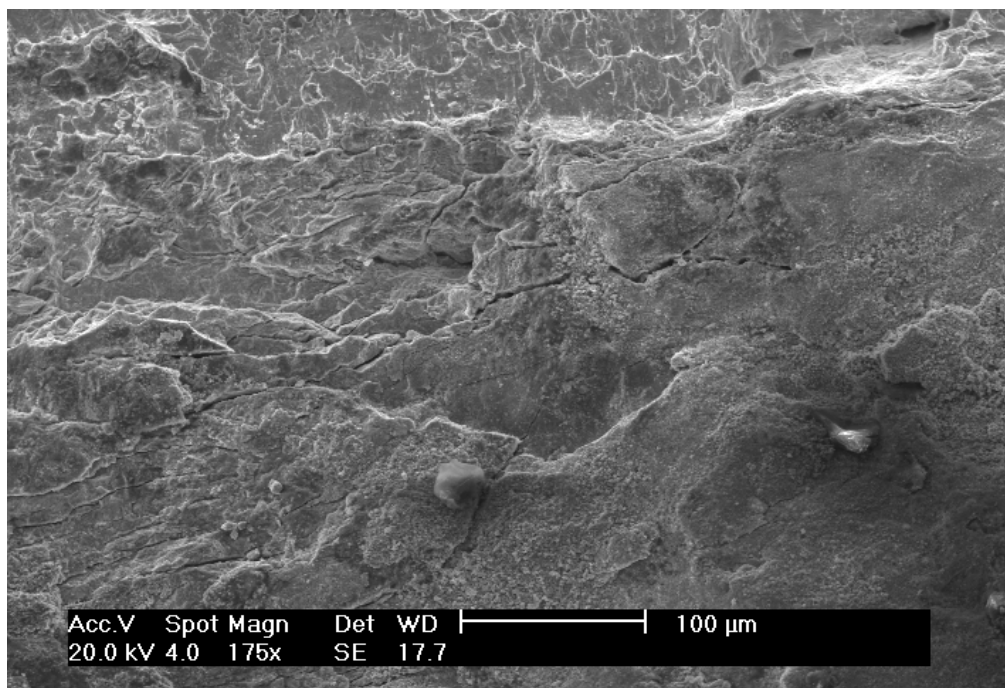


Kuva 14: SEM-kuva murtopinnasta

Yksityiskohtaisempia SEM-kuvia murtopinnoista on esitetty kuvissa 15 ja 16. Nämä molemmat kuvat on otettu kuvan 14 esittämältä alueelta. Niiden mukaisesti murtopinta on suhteellisen tasainen, mikä osoittaa seinämän läpi tapahtuneen melko voimakasta virtausta. Murtopinnalla näkyy kuitenkin tietyillä kohdin yksityiskohtia, joiden perusteella voi olettaa, että vaurion syntyyn on vaikuttanut myös väsyttävä kuormitus. Näiden yksittäisten alueiden vähyydestä johtuen on mahdotonta arvioida väsyttävän kuormituksen tasoa. Myös murto-
tuman etenemissuunnan päättely pelkästään SEM-murtopintakuvien perusteella on hyvin hankalaa, siksi tehokkaasti virtaus on muuttanut murtopinnan alkuperäisiä ominaispiirteitä.



Kuva 15: SEM-kuva murtopinnasta, yksityiskohta kuvan 14 yläkulmasta.



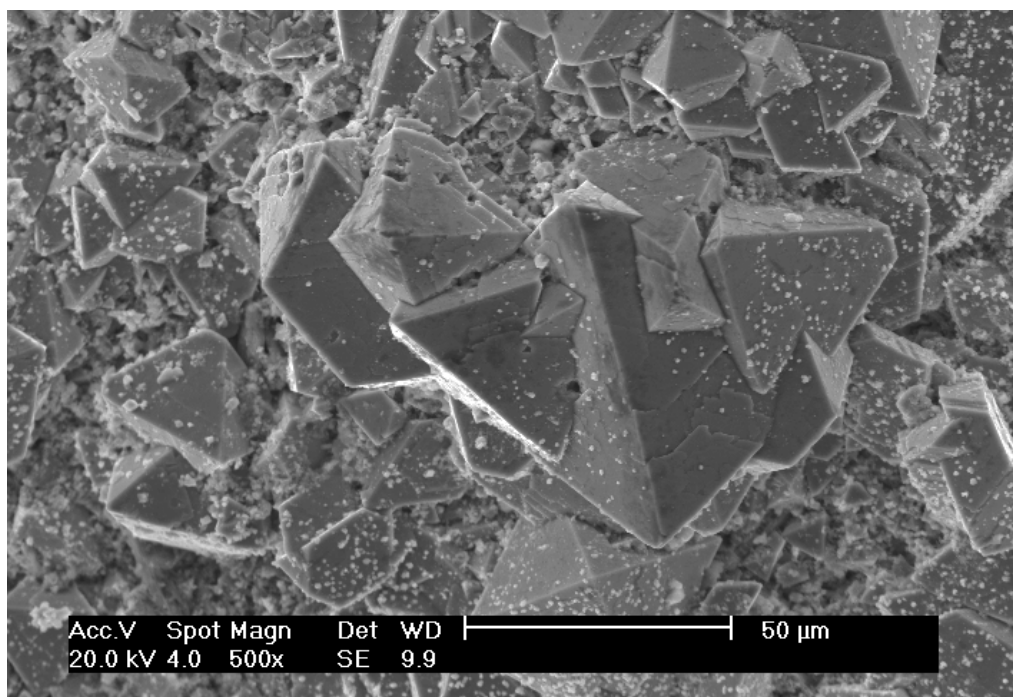
Kuva 16: SEM-kuva murtopinnasta, yksityiskohta kuvasta 15.

Putken ulko- ja sisäpinta

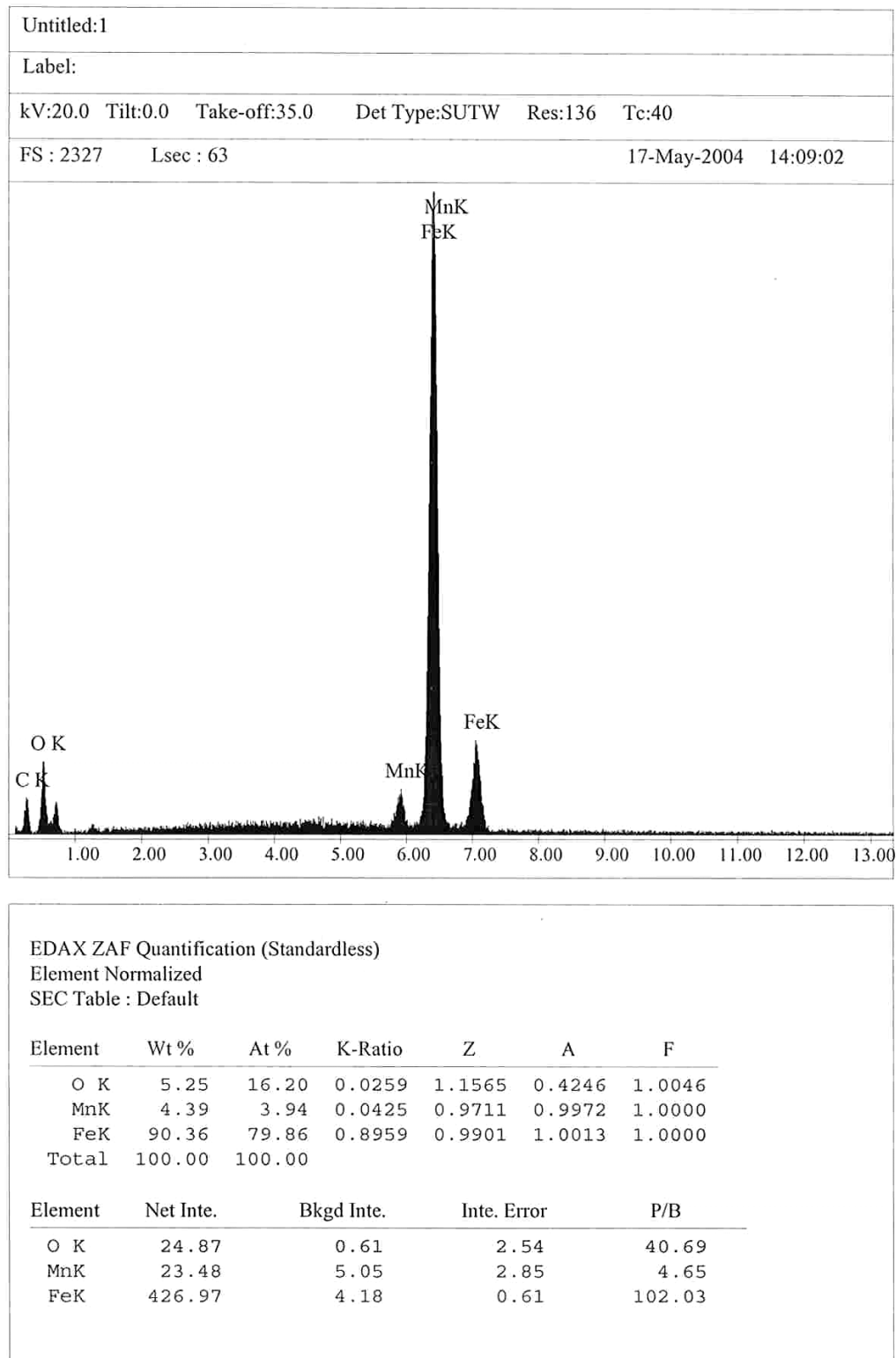
Putkien, sekä rikkoutuneen että ehyiden, ulkopinnat olivat korrodoituneet jonkin verran, ei kuitenkaan kovin pahoin. Kaikissa tarkastelluissa putkissa esiintyi ulkopinnalla pistekorroosiota. Sen määrässä ei ollut eroa rikkoutuneen putken ja ehyiden putkien välillä.

Ehyiden putkien sisäpintaa peitti magnetiittikerros, jonka keskimääräinen paksuus oli SEM tarkastelujen perusteella noin 15 μm . Makroskooppisesti tarkasteltuna pinta oli homogeeninen.

Rikkoutuneen putken sisäpintaa peitti magnetiittikerros, jonka keskimääräinen paksuus oli SEM tarkastelujen perusteella noin 10 μm . Makroskooppisesti tarkasteltuna pinta oli epähomogeeninen. Optisella stereomikroskoopilla tarkasteltuna sisäpinnalla esiintyi kohtia, jossa oli paljon pieniä, optisesti heijastavia kiteitä. SEM-tarkastelun perusteella nämä kiteet olivat särmikkäitä ja kooltaan luokkaa 30 - 60 μm . Valtaosa näistä kiteistä oli agglomeroitunut suuremmaksi kokonaisuudeksi. Kuvassa 17 on esitetty SEM-kuva näistä havaituista kiteistä. Kiteiden koostumuksen selvittämiseksi niistä otettiin SEM:iin liitettyllä EDS-laitteistolla alkuaineanalyysi, kuva 18. Sen perusteella kiteet olivat rautaoksidia. Kiteiden pienestä koosta johtuen niiden kvantitatiivinen analysointi osoitautui hankalaksi. Aikaisempien kokemusten perusteella voidaan olettaa, että nämä kiteet ovat magnetiittia.



Kuva 17: SEM-kuva rikkoutuneen putken sisäpinnalta.



Kuva 18: EDS-analyysi kuvan 17 yksityiskohdasta.

-

• Yhteenveto

Tässä vaurioselvitystyössä suoritettujen tarkastelujen perusteella on tarkastusluukun verhoputken rikkoutumisen todennäköisimpänä syynä ollut putkimateriaalin väsyminen yhdistyneenä samanaikaisesti tapahtuneeseen korroosioon. Väsyttävän kuormituksen ovat putkeen aiheuttaneet primäärisesti kattilan ylös- ja alasajot sekä mahdollisesti myös käytön aikana tapahtuneet toiminta- ja käyttöolosuhteiden vaihtelut. Korroosio-olosuhteiden pitäisi yleisesti ottaen pysyä kattilalaitoksissa vakioina. Näyttää kuitenkin ilmeiseltä, että tässä tapauksessa olosuhteet ovat ainakin vaurioituneella kohdalla olleet sellaiset, että ”vesikemia” on poikennut normaalista tilanteesta.

Rikkoutuneen putken vaurioituminen on suoritettujen tarkastelujen perustella alkanut mitä todennäköisemmin putkikäyrän sisäpinnalta. Tätä käsitystä tukevat sekä murtopinta- että hieistä tehdyt poikkipintatarkastelut. Näiden tarkastelujen suorittamista haitsi oleellisella tavalla se, että murtopinta oli kauttaaltaan putkiseinämän läpi tapahtuneen virtauksen tasoittama. Tämä tasoittuminen indikoi sitä, että tarkasteltu putki oli rikkoutunut jo käytön aikana, eikä vasta alasajovaiheessa, niin kuin vaurioselvitystehtävää annettaessa oletettiin.

Tämän vaurioselvityksen perusteella voidaan vastaavanlaisten vaurioiden estämiseksi toimia seuraavasti:

1. Poistetaan tarpeettomina pidettävät tarkistusluukut ja korvataan ne suorilla putkenosilla. Tämä on ehdottomasti paras vaihtoehto, koska se yksinkertaistaa putkirakennetta ja minimoi näin ollen haitallisten jännitysten muodostumisen.
2. Suoritetaan tarkastusluukun verhoputkien käyräosien NDT-tarkastus aina sopivan tilaisuuden tullen. Näissä tarkastuksissa tulee huomioida se, että murtuma alkaa hyvin todennäköisesti putken sisäpinnalta.
3. Jatketaan toimintaa ilman mitään toimenpiteitä. Tällöin oletusarvona on, että rikkoutuminen oli, kattilan ikä huomioon ottaen, tilastollisesti odotettavissa ollut tapahtuma. Tämän tutkimuksen tulokset tukevat tämän suuntaista johtopäätelmää. On kuitenkin huomioitava se, että murtuman yksityiskohdista ei läpivirtauksesta johtuen saatu yksityiskohtaista tietoa, ja tässä mielessä tämä vaihtoehto on ehdottomasti huonoin.