
Tilaaaja	Onnettomuustutkintakeskus Ratapihantie 9 00520 HELSINKI
Tilaus	Ismo Aaltonen, Jaakko Lajunen Päätös 25.04.2014 108/5L, Tarjouspyyntö 20.5.2014 126/5L VTT Expert Services Oy, Tilausvahvistus 10.6.2014
Yhteyshenkilö	VTT Expert Services Oy Tom E. Gustafsson Biologinkuja 7 PL1001, 02044VTT email:tom.e.gustafsson@vtt.fi

Alumiinisen siipituen (Comp Air 8, OH-XDZ) alapään materiaalin ja murtumisen tutkimus

Näyte Tilaaajan 9.6.2014 toimittama onnettomuuskoneen (Comp Air 8, OH-XDZ) alumiinisen siipituen alapää. Lisäksi toimitettiin 4.7.2014 vertailunäytteeksi kappale koneen valmistajalta saatua käyttämätöntä alumiinista siipituen alapään profiilia, kuvat 1 ja 2.



Kuva 1. Koneen OH-XDZ oikean puolen alumiinisen siipituen alapään kappale.



Kuva 2. Vertailunäytteeksi toimitettu käyttämätön siipituen kappale.

Saadut asiatiedot

Jämijärvellä 20.4.2014 tapahtui lento-onnettomuus, jossa laskuvarjohyppylennolla ollut Comp Air 8 (OH-XDZ) tuhoutui täysin. Komposiittirakenteinen lentokone paloi pahoin. Onnettomuuspaikalta löydettiin osin palaneita oikean siiven alumiinirakenteisia kiinnitysosia, joista oikeanpuolisen siipituen alapään kappale toimitettiin tutkimuksiin. Osa on ollut palossa ja osittain sulanut. Kuvassa 3 on esitetty onnettomuuskoneen työvalokuva. Kuvassa 4 on esitetty siipituen kiinnitys lentokoneen runkoon.

Tehtävä

Tutkimus koostui seuraavista osioista

- Kappaletta dokumentoitiin valokuvaamalla.
- Kappaleen murtopintoja ja muotoa tarkasteltiin silmämääräisesti stereomikroskoopilla (Stereo-OM) murtumissuuntien määrittämiseksi.
- Kappaleesta valmistettiin poikkileikkaushieitä mahdollisimman vaurioitumattomasta kohdasta ja murtopintaa vastaan kohtisuorassa suunnassa, joilla tutkittiin alumiinin mikrorakennetta optisella mikroskoopilla (OM).
- Murtopintojen ja rakenteen yksityiskohtia tutkittiin elektronimikroskoopilla (SEM) ja analysoitiin siihen liitettyllä röntgenanalyysointilaitteella (EDS).
- Kappaleen materiaalin koostumus määritettiin optisella emissiospektrometrillä (OES) mahdollisimman vähän vaurioituneelta alueelta otetusta näytteestä.
- Kappaleen materiaalin kovuus mitataan Vickers kovuuslukuina (HV).

Tutkimuksen tavoitteena oli mahdollisuuksien mukaan tarkastella siipituen alapään murtumismekanismeja. Erityisesti kiinnittiin huomiota tiedon saamiseen siitä, oliko tuen poikki- tai pituussuuntainen murtuminen tapahtunut tuen olleessa kylmänä vai tulipalon yhteydessä. Lisäksi pyrittiin arvioimaan vaikuttavien voimien suuntia ja analysoitiin siipituen materiaalia.

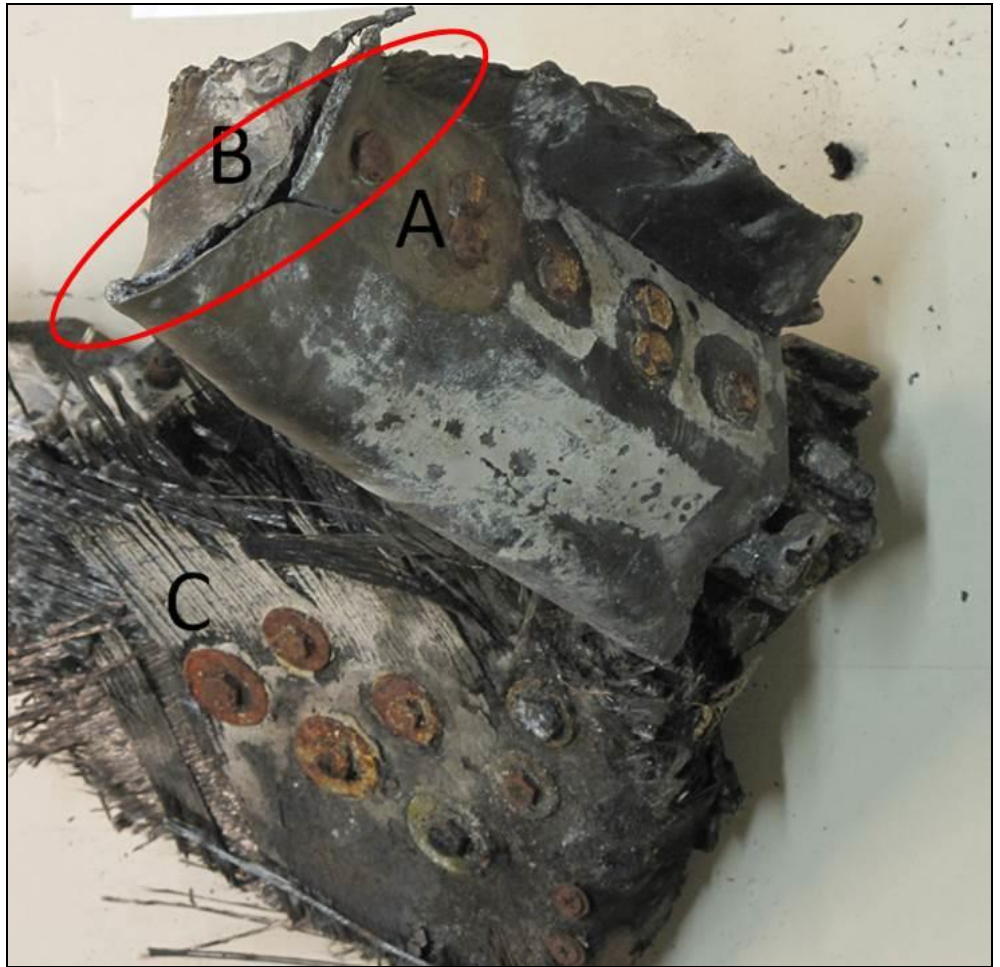


Kuva 3. Comp Air 8 ja sen oikean puoleisen siiven tuen alapää merkitty punaisella soikiolla.



Kuva 4. Oikean puoleisen siiven tuen alapään kiinnitys runkoon.

Kuvissa 5 ja 6 on esitetty kuvia tutkittavasta kappaleesta eri suunnista. Tilaajan pyynnöstä tutkimukset keskitettiin kuvaan 5 merkityn soikion alueelle.



Kuva 5. Murtunut alumiinirakenne (A) tuen yläpintaa, (B) tuen vääntynyttä alapintaa ja (C) palanutta, taivutunutta lentokoneen lattiaa.



Kuva 6. Murtunut alumiinirakenne (A) tuen yläpintaa, (B) tuen alapintaa ja (C) palanutta, taivutunutta lentokoneen lattiaa.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

Kuvassa 7 on esitetty siipituen alapään murtunut alumiinirakenne. Kuvaan on merkitty tarkempaan rakenneanalyysiin leikatut näytepalat. Näytepalat valittiin murtumien yleisten piirteiden eroavuuden pohjalta. Avattu särö sijaitsee alueella, jolla murtuma muodostaa muista alueista poikkeavasti suoraviivaisesti kaartuvan murtopinta-alueen ilman merkittävää kuroutumaa tai taipumista. Murtopinta 1 on piirteiltään kuroutunut ja taipunut, mikä vastaa hyvin näytteessä esiintyneitä muita murtopintoja.



Kuva 7. Murtunut alumiinirakenne ja irtileikattujen näytepalojen paikat murtopinta 1 ja avattu särö.

Murtuneen siipituen materiaalin koostumus

Suoritus ja tulokset

Murtuneen siipituen ja vertailunäytteeksi toimitetun käyttämättömän siipituen materiaalien koostumukset määritettiin optisella emissiospektrometrillä (OES). Vertailusiipituen ja vauriokappaleen kovuuksia mitattiin Vickers-kovuulukuna (HV5) käyttäen 49,1N kuormaa. Vertailu- ja vauriosiipituen materiaaleista valmistettiin poikkileikkaushieet, joiden mikrorakenteita tutkittiin valomikroskoopilla (OM).

Murtuneen siipituen ja vertailunäytteen materiaalien koostumukset on esitetty taulukossa 1. Murtuneen siipituen materiaalin analysointiin valittiin näyte mahdollisimman vähän vaurioituneelta alueelta.

Koostumuksia verrattiin alumiinistandardissa EN573-3:2013(E) /1/ mainittuihin seoksiin, ja todettiin niiden vastaavan lähinnä EN-AW6106 (EN AW-ALMgSiMn) materiaalin koostumuksen nimellisarvoja, jotka ovat myös esitetty taulukossa 1.

Vertailusiipituen ja vauriokappaleen kovuudet on esitetty Taulukossa 2.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

Taulukko 1. Murtuneen ja vertailunäytteen materiaalien koostumukset (%).

Alkuaine	Vertailusiipituki	Murtunut siipituki	EN573-3:2013(E) /1/ EN-AW6106 EN AW-AlMgSiMn
Si	0,56	0,58	0,30-0,6
Fe	0,19	0,20	0,35
Cu	0,17	0,18	0,25
Mn	0,08	0,08	0,05-0,20
Mg	0,76	0,78	0,4-0,8
Ni	<0,01	<0,01	-
Cr	0,05	0,05	0,20
Zn	<0,01	<0,01	0,10
Ti	0,01	0,01	
Sn	<0,01	<0,01	
Pb	<0,01	<0,01	
Al	(loput)	(loput)	(loput)
Anal. n:o.	189/14	190/14	

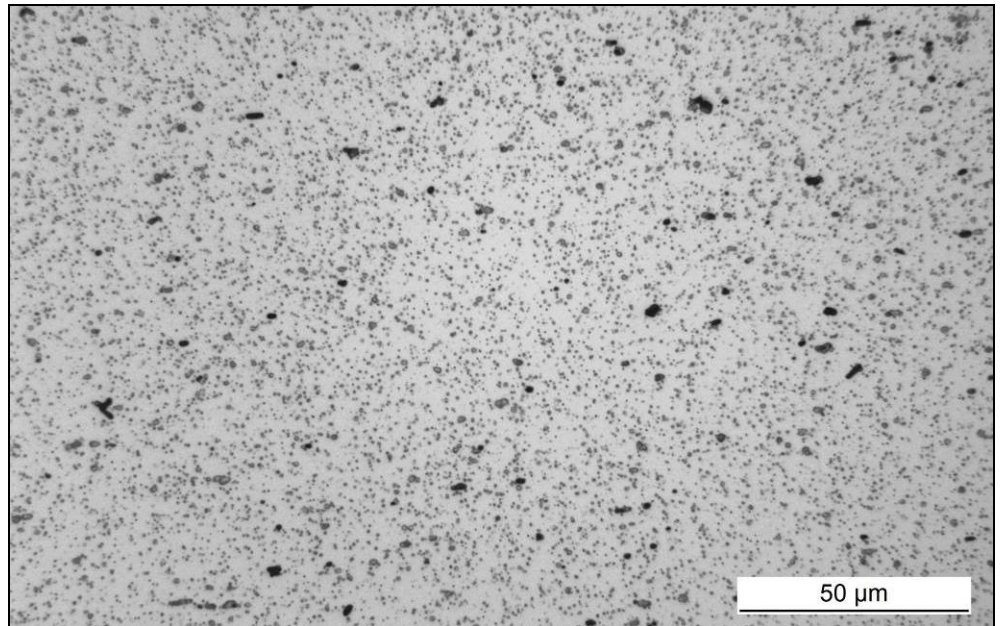
Taulukko 2. Vertailukappaleen ja murtuneen siipituen kovuudet (HV5).

Näyte	#1	#2	#3	#4	#5	keskiarvo
Vertailukappale	109	104	110	106	107	107,2
Vauriokappale	69,6	68,6	71,4	73,5	74,9	71,6

Käyttämättömän vertailukappaleen keskimääräinen kovuus (HV5) 107,2 vastaa standardin SFS-EN ISO 18265 /2/ mukaan Brinell-kovuuslukuina n. 95 ja murtolujuutena n. 320 MPa. Koostumuksen kovuuden sekä sitä kautta arvioitun murtolujuuden mukaan käyttämättömän vertailukappaleen materiaali vastaa lähinnä standardin EN-755-2:2013 (E) /3/ mukaista EN AW-6106 (EN AW-AlMgSiMn) mukaista seosta toimitustilassa T6.

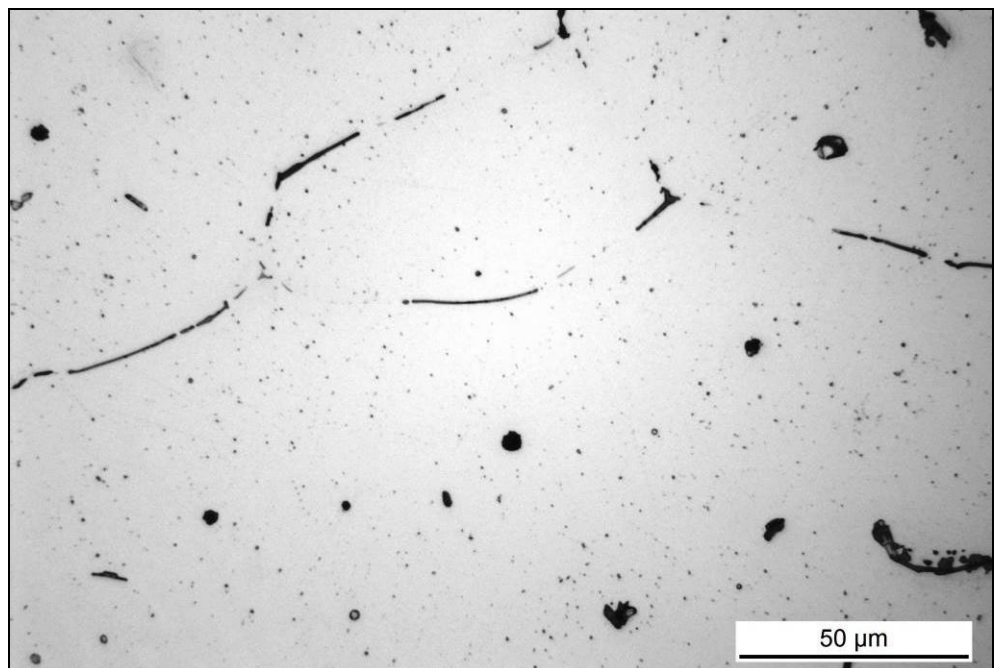
Kovuudeltaan vauriokappaleen murtunut siipituki on huomattavasti pehmeämpää kuin vertailukappale.

Vertailukappaleen ja murtuneen siipituen materiaalien poikkileikkaushieiden valomikroskooppikuvat on esitetty kuvissa 8 ja 9.



Kuva 8. Vertailukappaleen materiaalin poikkileikkauksen mikrorakenteen valomikroskooppikuva.

Vertailukappaleen mikrorakenne vastaa pursottamalla valmistetun EN AW-6106 (EN AW-AlMgSiMn) alumiiniseoksen rakennetta.



Kuva 9. Murtuneen siipituen materiaalin poikkileikkauksen mikrorakenteen valomikroskooppikuva.

Murtuneen siipituen materiaalin mikrorakenteesta havaittiin voimakasta rakeenkasvua ja raerajoille kertynyttä erkaumaa. Voimakas rakeenkasvu ja raerajaerkautuminen materiaalissa tapahtuvat korkeissa lämpötiloissa. Murtuneen siipituen materiaalin kovuus ja mikrorakenne ovat mitä ilmeisimmin muuttuneet lentokoneen maahan syöksyn jälkeisessä tulipalossa.

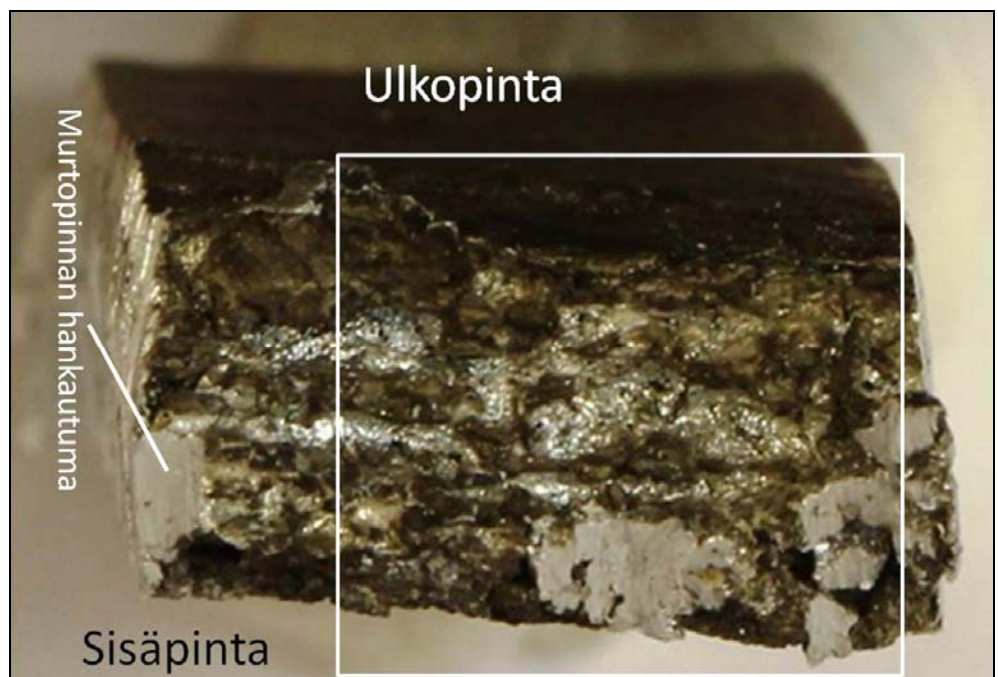
Murtopintojen tarkastelut

Suoritus ja tulokset

Murtopinnan tarkasteluja varten murtuneesta siipituen alaosaan leikattiin näyttepalat murtopinta 1 ja avattu särö kuvan 7 mukaisesti. Murtopintoja tarkasteltiin silmämääräisesti, ja niiden piirteitä tutkittiin stereomikroskoopilla (Stereo-OM). Murtopintojen yksityiskohtia tutkittiin elektronimikroskoopilla (SEM), ja analysoitiin siihen liitettyllä röntgenanalyysaattorilla (EDS). Murtopinnan kuvantamisessa käytettiin sekundäärielektroneja (SE) ja takaisinsirontaelektroneja (BE).

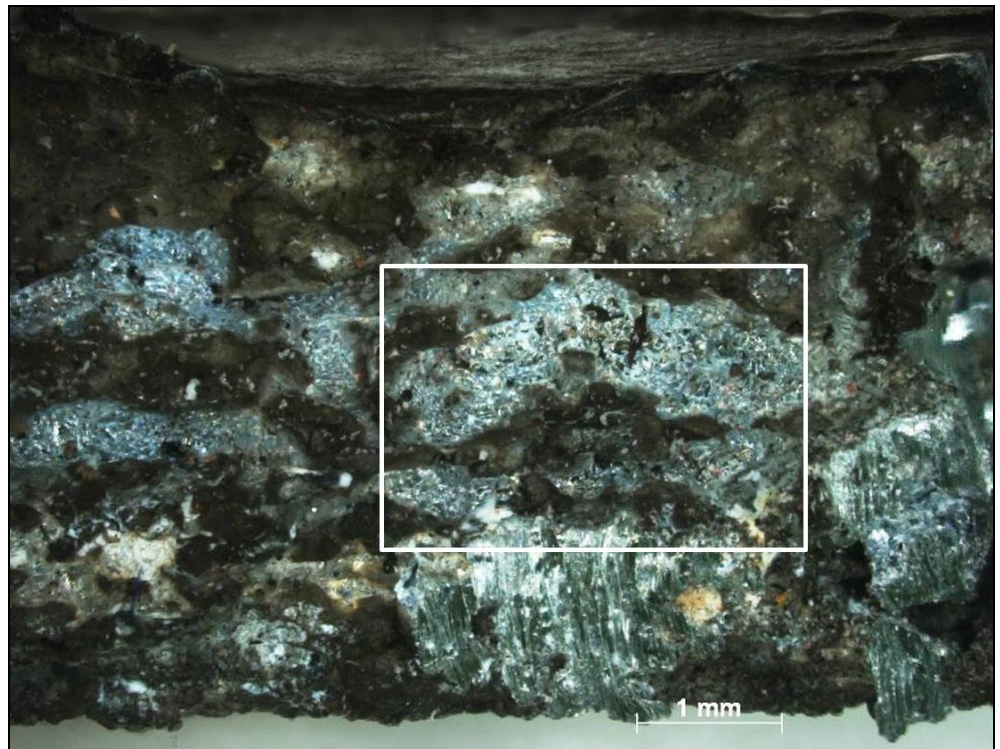
Murtopintanäyte 1 on esitetty kuvassa 10. Kuvaan on merkitty siipituen seinämän sisä- ja ulkopinta. Näytteen kuroutumisesta päätellen murtopinnan tähän kohtaan on kohdistunut seinämän suuntainen veto. Murtopinnan stereomikroskooppikuva on esitetty kuvassa 11. Murtopinnassa oli havaittavissa tummaa sakan peittämää murtopintaa ja kiiltävää metallimaisempaa murtopintaa. Murtopinnan piirteiden yksityiskohtaisempi kuva on esitetty kuvassa 12.

Sakkaisemman alueen BE-kuva on esitetty kuvassa 13 ja metallisen kiiltävemmän alueen SE-kuva on esitetty kuvassa 14. Vastaavasti näiden alueiden röntgenspektrit on esitetty kuvissa 15 ja 16.

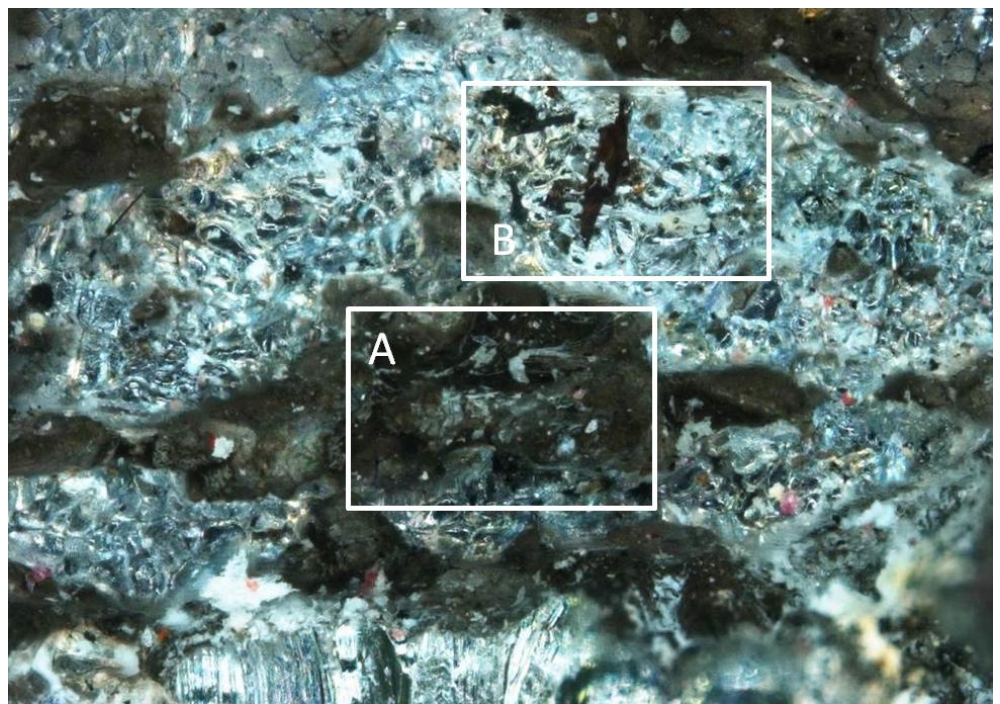


Kuva 10. Murtopintanäyte 1.

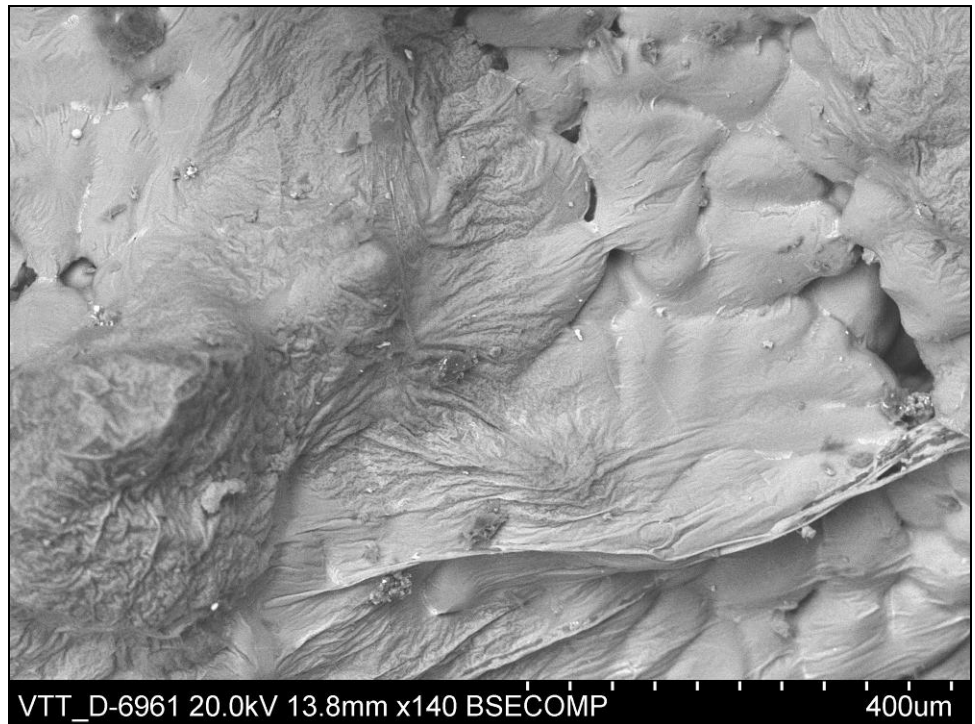
Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille



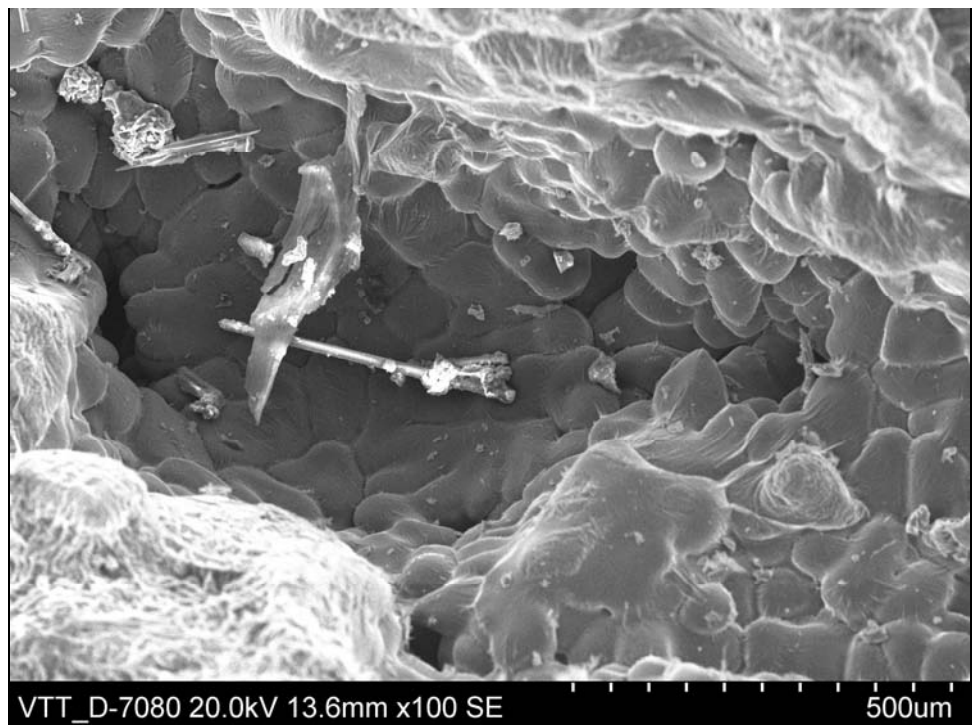
Kuva 11. Murtopintanäytteen 1 kuvaan 10 merkityn murtopinta-alueen stereomikroskooppikuva.



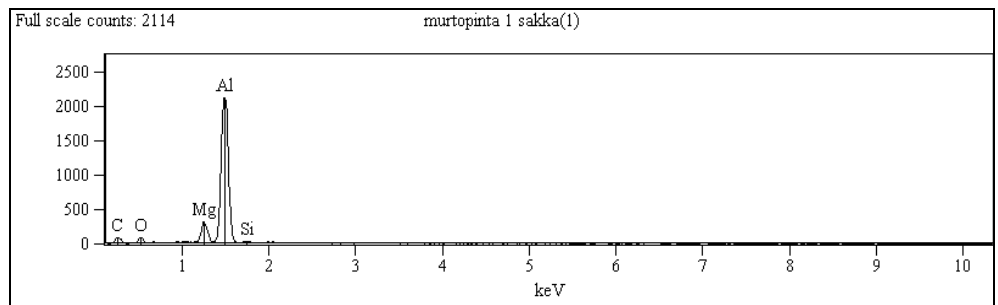
Kuva 12. Murtopintanäytteen 1 kuvaan 11 merkityn murtopinnan yksityiskohdan stereomikroskooppikuva.



Kuva 13. Murtopinnan kuvaan 12 merkityn sakkamaisen yksityiskohdan A takaisinsirontaelektronikuva (BEI).

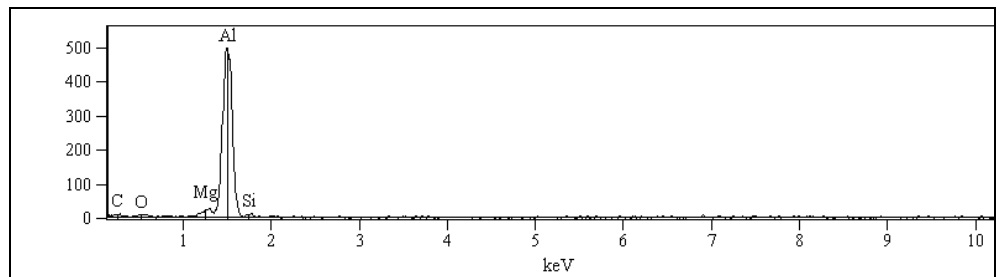


Kuva 14. Murtopinnan kuvaan 12 merkityn kiiltävän metallisen yksityiskohdan (B) sekundäärielektronikuva (SEI).



Kuva 15. Murtopinnan sakkaisemman alueen röntgenspektri (EDS).

Murtopintanäytteen 1 sakkaisemmalta pinnalta havaittiin alumiinin (Al) ja piin (Si) ohella magnesiumia (Mg) siten, että sitä on kertyneenä kalvoksi dendriittisesti jähmettyneen metallin pinnoilla.



Kuva 16. Murtopinnan metallisemman ja kiiltävämmän alueen röntgenspektri (EDS).

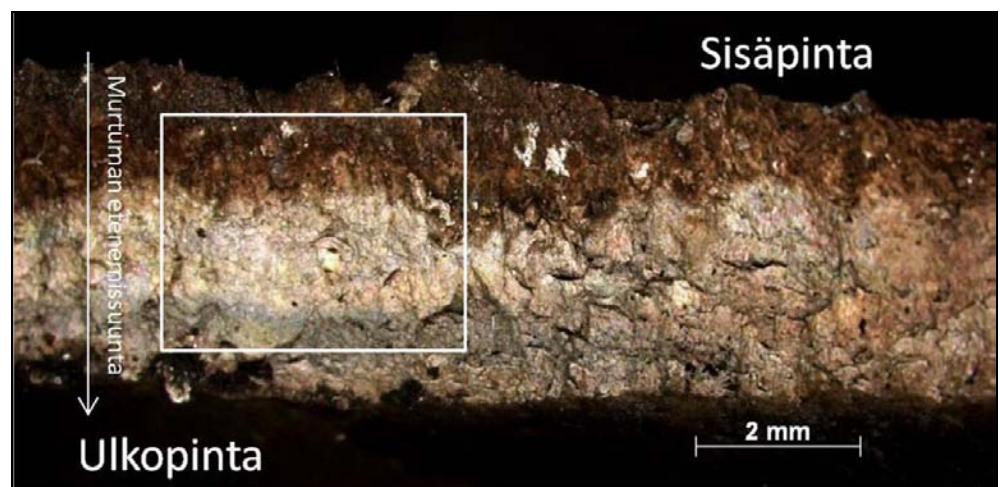
Murtopintanäytteen 1 metalliselta kiiltävältä pinnalta havaittiin alumiinin ja piin ohella vähemmän magnesiumia kuin kalvomaisilla sakka-alueilla.

Murtopinnan 1 yleispiirteiden ja yksityiskohtien tarkastelu mikroskooppisin menetelmin viittaa murtopinnan kuumentuneen aina sulaan tai osittain jähmeään tilaan asti. Tämä on todennäköisimmin tapahtunut koneen maahan syöksyn jälkeisessä tulipalossa.

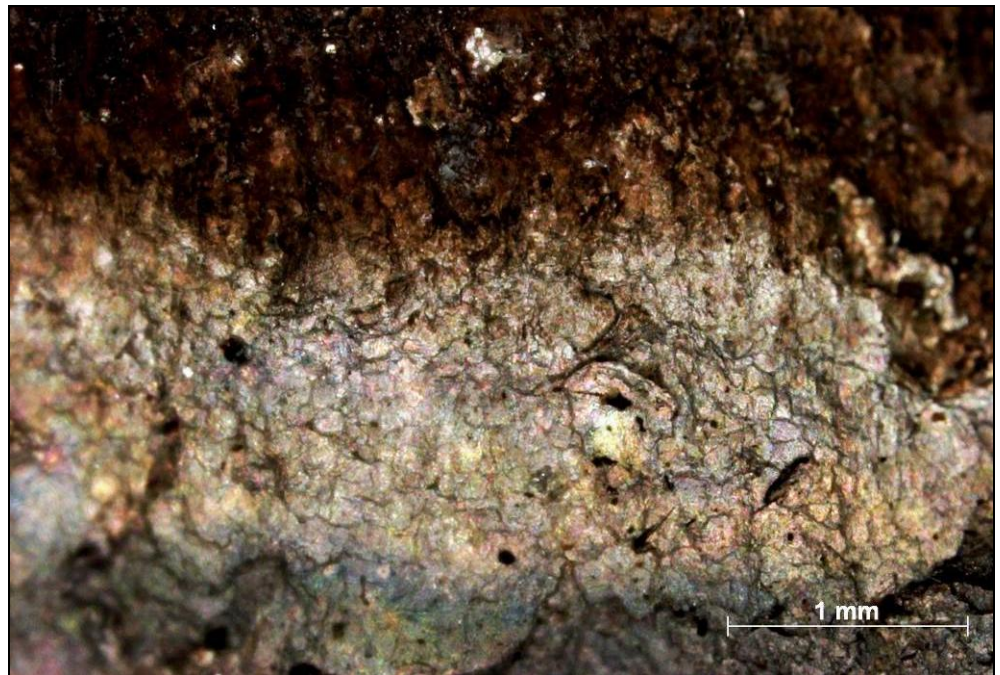
Avatun särön valokuva on esitetty kuvassa 17. Kuvaan on merkitty siipituen seinämän sisä- ja ulkopinta. Murtopinnassa on havaittavissa sisäpinnalta ydintyvä vanhempi särö. Särön murtopinnan stereomikroskooppikuva on esitetty kuvassa 18. Kuvaan on merkitty murtuman etenemissuunta. Murtuma on edennyt tuen seinämän sisäpinnalta ulkopintaa kohti. Särön murtopinnan yksityiskohtaisempi stereomikroskooppikuva on esitetty kuvassa 19.



Kuva 17. Avatun särön valokuva.

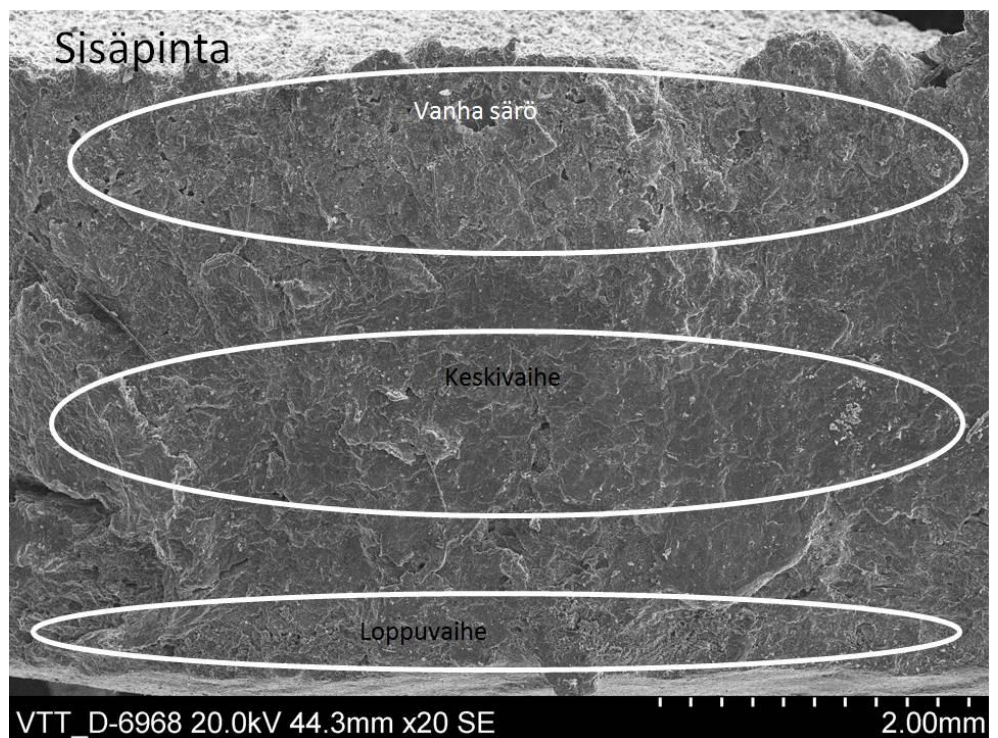


Kuva 18. Avatun särön murtopinnan kuvaan 17 merkityn alueen stereomikroskooppikuva.



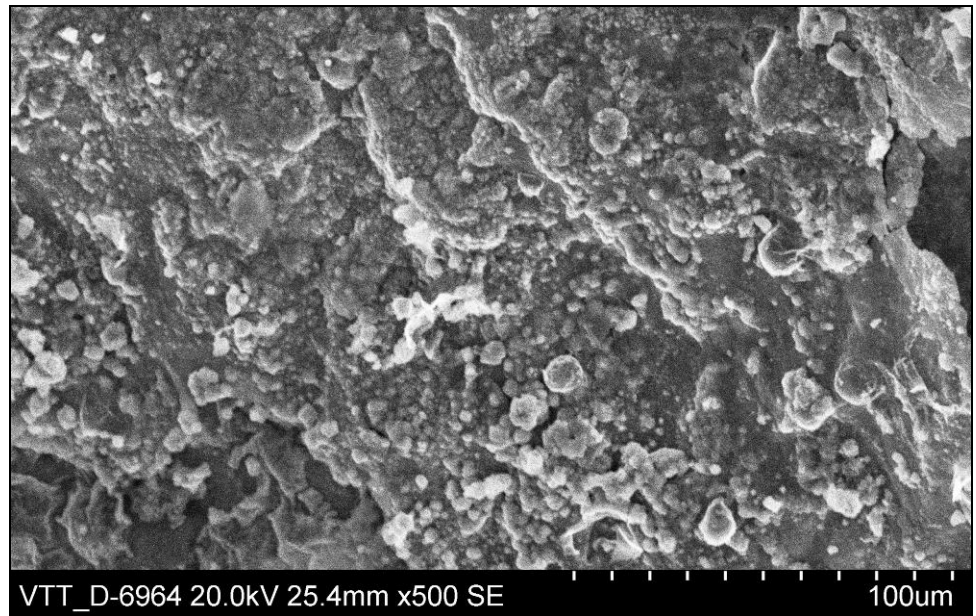
Kuva 19. Avatun särön murtopinnan kuvaan 18 merkityn yksityiskohdan stereomikroskooppikuva.

Avatun särön murtopinnan SE-kuva on esitetty kuvassa 20. Kuvaan on merkitty soikioilla havaittua vanhan särön aluetta, keski- ja loppuvaihetta. Vanhan särön pinnan yksityiskohdan SE-kuva on esitetty kuvassa 21. Vanhan särön pinnan röntgenspektri on esitetty kuvassa 22. Alumiinin, piin ja magnesiumin ohella havaittiin kalsiumia (Ca), hiiltä (C), happea (O) ja hieman klooria (Cl) ja sinkkiä (Zn).

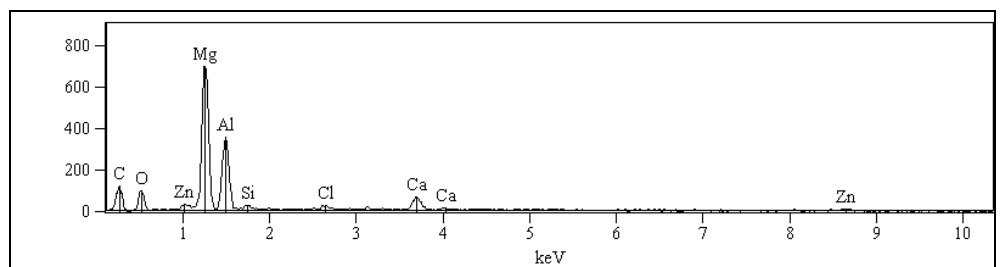


Kuva 20. Avatun särön murtopinnan SE-kuva.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

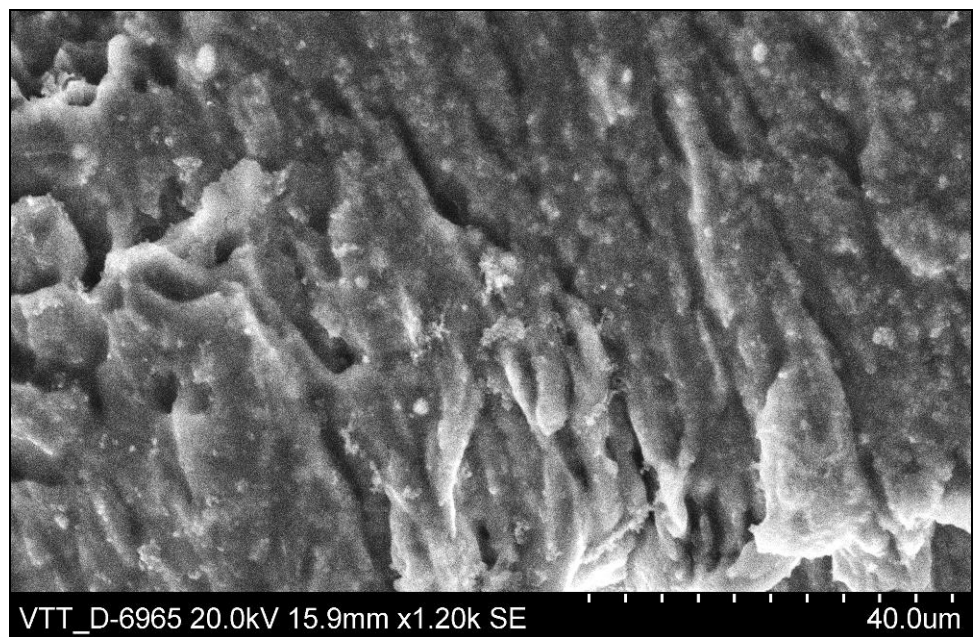


Kuva 21. Vanhan särön pinnan yksityiskohtan SE-kuva.

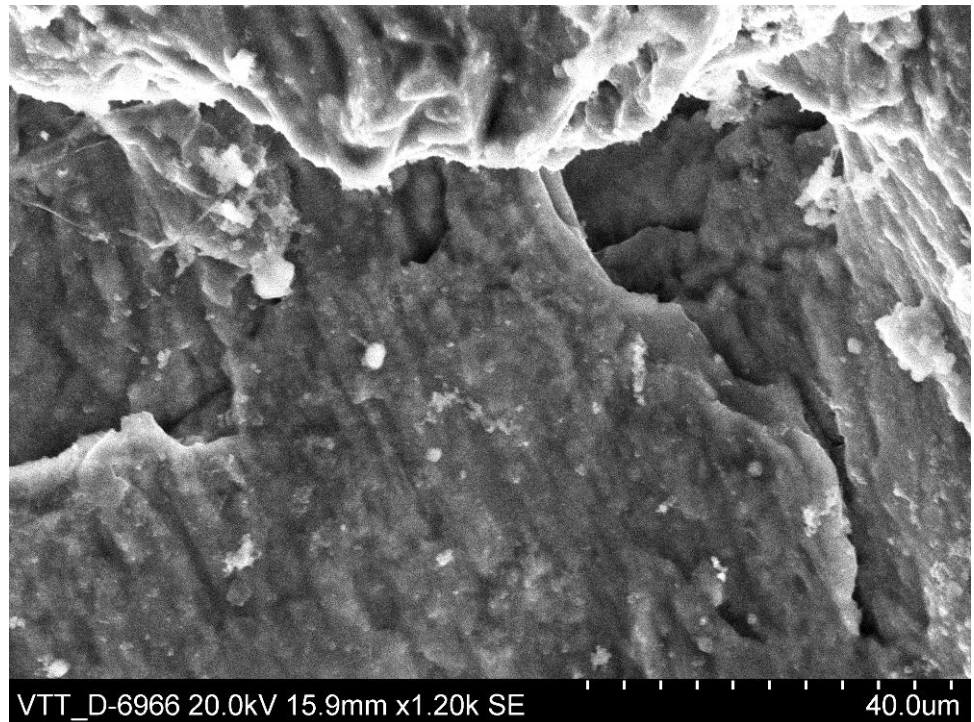


Kuva 22. Vanhan särön pinnan röntgenspektri (EDS).

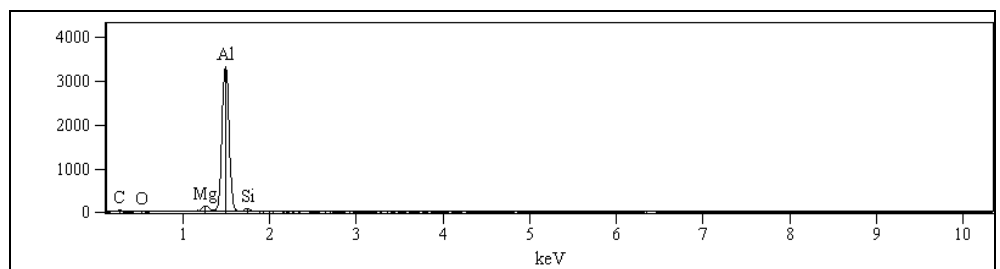
Avatun särön pinnan keskivaiheen yksityiskohtaisempia SE-kuvia on esitetty kuvissa 23 ja 24. Keskivaiheen pinnan röntgenspektri on esitetty kuvassa 25.



Kuva 23. Avatun särön pinnan keskivaiheen yksityiskohtaisempi SE-kuva.



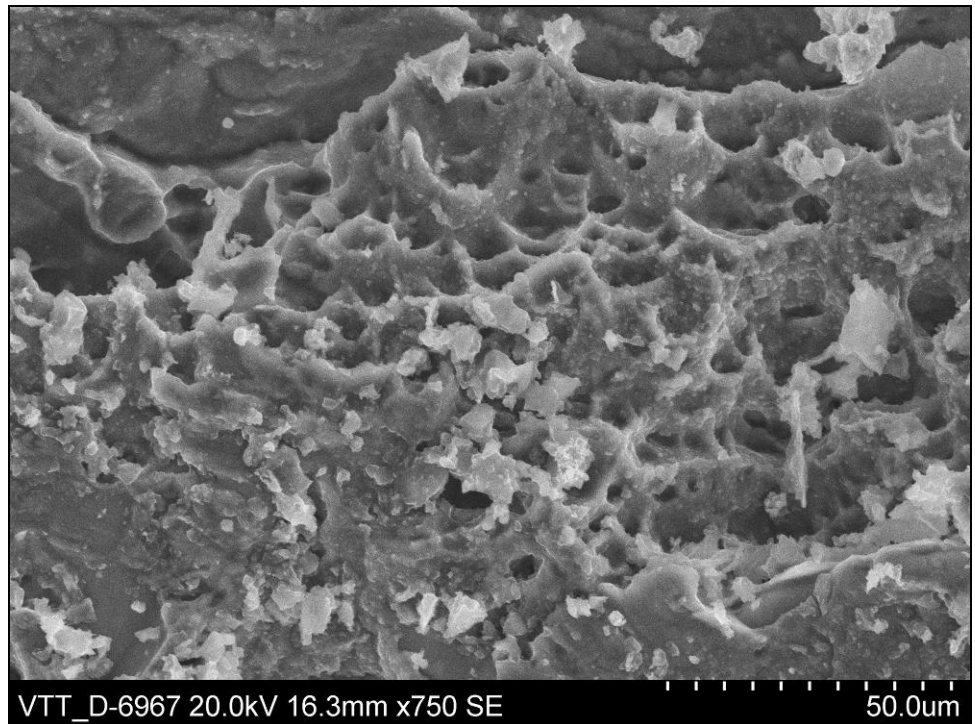
Kuva 24. Avatun särön pinnan keskivaiheen yksityiskohtaisempi SE-kuva.



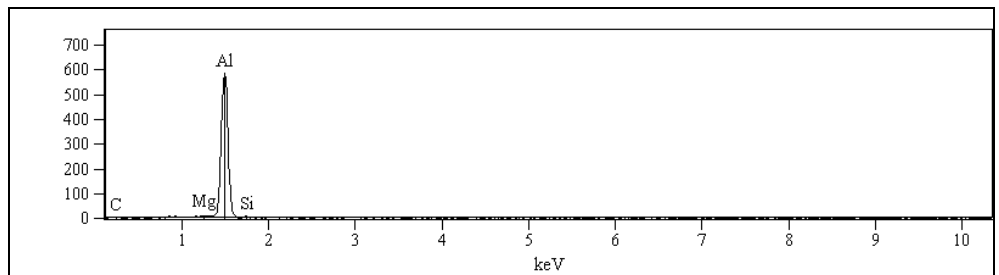
Kuva 25 Avatun särön pinnan keskivaiheen röntgenspektri (EDS).

Vanhan murtuman yhteydessä keskivaiheen murtopinnan yksityiskohtien tarkastelussa havaittiin siinä materiaalin väsymiselle tyypillisiä murtopinnan piirteitä kuten väsymismurtuman etenemisjälki, kuva 24. Keskivaiheen pinnan röntgenanalyysissä havaittiin alumiinia, magnesiumia ja piitä sekä hieman hiiltä ja happea, kuva 25. Murtuminen on ollut taivutusväsymismurtumaa.

Avatun särön loppuvaiheen pinnan SE-kuva on esitetty kuvassa 26, ja sen röntgenspektri on esitetty kuvassa 27. Loppuvaiheen pinnan röntgenanalyysissä havaittiin alumiinia, piitä, magnesiumia ja hieman hiiltä. Avatun särön loppuvaiheen murtuma on tapahtunut sitkeästi, mikä on tyypillistä väsymismurtumissa viimeiseksi murtuneelle jäännösmurtumalle.



Kuva 26. Avatun särön loppuvaiheen pinnan SE-kuva.



Kuva 27. Avatun särön loppuvaiheen pinnan röntgenspektri (EDS).

Avatun särön murtopinnan perusteella osa murtumasta on vanhaa ja siitä on havaittavissa taivutusväsymismurtumalle tyypillisiä piirteitä.

Tulosten tarkastelu

Koostumukseltaan vertailu- ja vauriosiipitukien perusaineet vastaavat lähinnä standardin EN573-3:2013(E) /1/ mukaista alumiinin seosta EN AW-6106 (EN AW- AlMgSiMn).

Käyttämättömän vertailukappaleen materiaali vastaa lähinnä standardien EN-573-3:2013 (E) /1/ ja EN-755-2:2013(E) /3/ mukaista EN AW-6106 (EN AW- AlMgSiMn) seosta toimitustilassa T6. Kovuudeltaan murtunut siipituki on huomattavasti pehmeämpää kuin vertailukappale.

Murtuneen siipituen materiaalin mikrorakenteesta havaittiin voimakasta raakeenkasvua ja raerajoille kertynyttä erkaumaa. Murtopinnan 1 yleispiirteiden ja yksityiskohtien tarkastelu mikroskooppisin menetelmin viittaa murtopinnan kuumementuneen aina sulaan tai osittain jähmeään tilaan. Tämä on todennäköisimmin tapahtunut koneen maahan syöksyn jälkeisessä tulipalossa. Murtopinta-

alueen kuroutumiseen perustuen seinämään on kohdistunut murtumisen yhteydessä seinämän suuntainen veto.

Avatun särön murtopinnan perusteella osa murtumasta on vanhaa ja siitä on havaittavissa taivutusväsymismurtumalle tyypillisiä piirteitä. Murtuma etenee sisäpinnalta kohti tuen seinämän ulkopintaa. Väsymismurtuma syntyy ajan kanssa. Se ei ole syntynyt koneen syöksyessä maahan tai sitä seuranneessa tulipalossa. Väsymismurtuma on ydintynyt siipituen sisäpinnalta ja edennyt poikkisuuntaisesti tuen alapään seinämän läpi mutterikiinnityksen yläpuolelta kylmänä pidemmän ajan kuluessa.

ESPOO, 23.7.2014



Helena Järnström

Tuotepäällikkö



Tom E. Gustafsson

Erityisasiantuntija

VIITTEET

/1/ EN573-3:2013(E) ALUMINIUM AND ALUMINIUM ALLOYS. CHEMICAL COMPOSITION AND FORM OF WROUGHT PRODUCTS. PART 3: CHEMICAL COMPOSITION AND FORM OF PRODUCTS.

/2/SFS-EN ISO 18265 METALLIC MATERIALS. CONVERSION OF HARDNESS VALUES (ISO 18265:2013)

/3/ EN 755-2:2013(E) ALUMINIUM AND ALUMINIUM ALLOYS. EXTRUDED ROD/BAR, TUBE AND PROFILES. PART2: MECHANICAL PROPERTIES.

JAKELU

Tilaaja
Arkisto

Alkuperäinen
Alkuperäinen