

Sara Aydar

Putkikäyrän vaurioanalyysi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kemiantekniikka

Insinöörityö

2.5.2016

Tekijä Otsikko	Sara Aydar Putkikäyrän vaurioanalyysi
Sivumäärä Aika	39 sivua + 1 liite 2.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kemiantekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaajat	Lehtori Juha Kotamies Projekti-insinööri Pekka Saranpää Diplomi-insinööri Oskari Ryti
<p>Kemiantekniikan insinööriä suoritettiin Metropolia Ammattikorkeakoululle. Työn tarkoituksena oli tehdä vaurioanalyysi eräästä prosessilaitoksessa käytetystä prosessiputkiston kahdesta hiiliteräspuutkikäyrästä, joista yhdessä on läpireikä. Tarkoituksena on määrittää reiän synnyn syy: kavitaatio vai eroosio.</p> <p>Työssä tarkasteltiin tribologiaa tieteenalana ja tutkittiin kulumismekanismeja tarkemmin ja niiden alaluokkia, kuten abrasiivista sekä adhesiivista kulumista. Kulumisen määräytyy kuorman, lämpötilan, liikkeen, materiaaliominaisuuksien, pinnankarheuden ja muiden ympäristötekijöiden kautta.</p> <p>Vaurioanalyysin teko rikkoutuneesta laitteista tai komponentista on tärkeää tulevaisuuden kannalta, sillä kun selvitetään vaurion syy, osataan tunnistaa vältettävät olosuhteet ja pyritään suunnittelemaan parempia laitteita tai komponentteja, joilla on pitempi käyttöikä.</p> <p>Työn aikana keskityttiin enemmän reiälliseen putkikäyrään, joten ehjä putkikäyrä toimi pelkästään vertailukohteena. Putkikäyrät nimettiin ja sahattiin pieniin osiin sahalla sekä laikka-leikkurilla, jotta putkikäyrien sisäpinta olisi helpommin tarkkailtavissa. Sahaukset suoritettiin Leiritien toimipisteellä. Tämän jälkeen kulumisjäljet katsottiin stereo-, valo- ja pyyhkäisyelektronimikroskooppilla Kalevankadun toimipisteellä. Kulumisjälkiä verrattiin kirjallisuuteen. Jäljet olivat epämääräisiä; selektiivinen korroosio oli mahdollinen reiän aiheuttaja. Täten päädyttiin tutkimaan myös mikrohien poikkileikkausta.</p> <p>Tutkimuksen tuloksien perusteella tultiin johtopäätökseen, että putkikäyrän reiän oli aiheuttanut kavitaatio. Kavitaatiota voidaan estää muun muassa pienentämällä nesteen pintavoimien vaikutusta.</p>	
Avainsanat	eroosio, kavitaatio, korroosio, kuluminen, kulumismekanismi, putkikäyrä, tribologia, vaurioitumisanalyysi

Author Title	Sara Aydar Failure Analysis for Elbow Pipe
Number of Pages Date	39 pages + 1 appendix 2 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Chemical Engineering
Specialisation option	
Instructors	Juha Kotamies, Lecturer Pekka Saranpää, Project Engineer Oskari Ryti, Master of Science (Technology)
<p>The Bachelor's thesis in chemical engineering was conducted for the Metropolia University of Applied Sciences. The objective of the thesis was to conduct a failure analysis of two carbon steel elbow pipes that were used in the pipe lines of a process plant. One of the pipes had a hole that went through its shell. The objective of the analysis was to define the cause of the hole: cavitation or erosion.</p> <p>The task examined tribology as a form of science and further examined degradation mechanisms and their subclasses such as abrasive and adhesive degradation. Degradation is defined by load, temperature, material properties, surface grain and other environmental factors.</p> <p>Damage analysis of a broken device or component is essential for future planning. When reasons for damage have been examined and solved, conditions that must be avoided can be identified so that better and longer lasting devices and components can be designed in the future.</p> <p>During the task more focus was put on the elbow pipe with the hole and so the intact pipe was used merely for comparison. The elbow pipes were named and sawed into smaller pieces using a saw and a cutoff saw in order to more thoroughly examine the inside surface of the pipes. The cutting was done at the Leiritie campus. After this the degradation marks were examined at the Kalevankatu campus using stereo-, light-, and scanning electron microscopes. Degradation marks were compared to published literature. The marks were non-specific; selective corrosion was a possible cause for the hole. Thus the decision was made to also examine the cross-section of the metallographic specimen.</p> <p>Based on the results of the examination the conclusion was made that the hole in the elbow pipe were caused by cavitation. Cavitation can be prevented among other things by reducing the effects of surface tension in liquids.</p>	
Keywords	erosion, cavitation, corrosion, degradation, degradation mechanisms, elbow pipe, tribology, failure analysis

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle keväällä 2016. Haluaisin kiittää kaikkia niitä, jotka olivat apuna tämän työn teossa: opinnäytetyöni ohjaajaa lehtori Juha Kotamiestä käytännön ja kokeellisen osion ohjauksesta, projekti-insinööri Pekka Saranpäästä pintakäsittelylaboratoriossa ohjauksesta sekä diplomi-insinööri Oskari Rytistä SEM:n käyttöavusta.

Haluaisin myös osoittaa kiitokseni koulutussuunnittelija Liisa Heikkilälle hyvin kärsivällisestä ohjaamisesta opinnäytetyöni ja valmistumisprosessini aikana.

Erityiskiitokset kuuluvat perheelleni sekä läheisilleni, jotka tukivat ja kannustivat minua opintojeni aikana.

2.5.2016 Helsinki
Sara Aydar

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tribologia	1
3	Kuluminen	2
3.1	Kulumisluokat	3
3.2	Kulumisen mittaus	6
3.3	Kulumistyytit	6
3.4	Kulumismekanismit	7
3.4.1	Abrasiivinen kuluminen, hiontakuluminen	8
3.4.2	Adhesiivinen kuluminen, tartuntakuluminen	8
3.4.3	Pinnan väsyminen	9
3.4.4	Tribokemiallinen kulumismekanismi	10
4	Putkikäyrät	10
5	Kulumisvaurioiden analyysi	12
6	Työn kulku	13
6.1	Putki 1	17
6.2	Putki 2	18
6.3	Mikroskoopit	21
6.3.1	Stereo- ja valomikroskooppi	22
6.3.2	Elektronimikroskooppi	22
6.4	Vertailukohteet	25
7	Tulokset ja tulosten tarkastelu	31
8	Johtopäätökset	38
	Lähteet	39

Liite 1. Yhteydenotto Amer Popen kanssa 26.4.2016

Lyhenteet

EM Electron Microscope. Elektronimikroskooppi.

SEM Scanning Electron Microscope. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi.

Putki 1 Putkikäyrä, joka on ehjä.

Putki 2 Putkikäyrä, jossa on läpireikä.

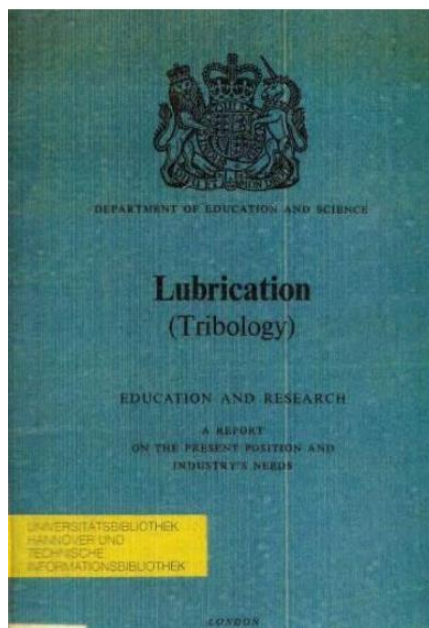
1 Johdanto

Työn tarkoitus on tehdä vaurioanalyysi putkikäyristä, jotka saatiin eräästä prosessilaitoksesta. Kaksi putkikäyrää oli poistettu eräästä prosessista, ja yhdessä putkikäyrässä on läpireikä. Työssä määritetään läpireiän aiheuttaja - kavitaatio vai eroosio. Ehjää putkikäyrää käytetään vertaamaan kyseiseen putkikäyrään.

Työ tehdään Metropolia Ammattikorkeakoululle lehtori Juha Kotamiehen toimeksiantona. Työn kokeellinen osa suoritetaan pintakäsittely- ja konetekniikkalaboratoriotiloissa. Putkikäyristä sahataan paloja, joiden kulutuspinnaa tutkitaan mikroskoopilla ja SEM:llä sekä lopuksi tutkimustuloksia verrataan kirjallisuuteen.

2 Tribologia

Tribologia (kreik. *tribos*, hankaus) on tieteenala, joka tutkii pintojen vuorovaikutuksiin liittyvää tekniikkaa, kun pinnat liikkuvat toisiinsa nähden. Kun pinnat ovat toistensa läheisyydessä, joko suoraan tai väliaineen kautta, pinnat alkavat vaikuttaa toisiinsa. Kuvassa 1 on Jostin komitean raportti Voitelusta, jossa mainittiin *tribologia* ensimmäisen kerran vuonna 1966.



Kuva 1. 50 vuotta vanha Jostin komitean raportti. [1]

Tribologian tärkeimmät osa-alueet ovat *kitka, kuluminen* sekä *voitelu*. Tässä työssä käsitellään tarkemmin kulumista. *Tribologisen kosketuksen* esimerkkejä ovat hammaspyörä, laakeroinnit tai lastuava työstö. Hammaspyörissä siirretään voimaa kappaleiden välillä, laakeroinnissa ohjataan mekaanisesti kappaleiden liikeratoja ja lastuavalla työstöllä muutetaan kappaleiden muotoa [2, s. 17.]

Suomen tribologiyhdistys määrittelee tribologian seuraavasti:

Tribologia on tieteenala, joka käsittelee toisiinsa nähden liikkuvien pintojen vuorovaikutuksia ja niihin liittyvää teknologiaa eli pääasiassa kitkaan, kulumiseen ja voiteluun liittyviä ilmiöitä [2, s. 11].

Kun kaksi pintaa liikkuu toisiinsa nähden, keskeisimmät osatekijät ovat

- pintojen välillä vaikuttavat voimat
- energian kulutus
- materiaalien fysikaalisten ja kemiallisten ominaisuuksien muutokset
- pintojen topografian muutokset
- irtoavien kulumishiukkasten synty, muokkaus ja poisto tai pintojen väliin jääminen [3, s. 7].

3 Kuluminen

Kun kaksi pintaa koskettavat toisiaan, liikkuvien pintojen välillä tapahtuu sellaista vuorovaikutusta, että niiden pinnoilta ilmenee materiaalihäviötä. Tällaista materiaalihukkaa kutsutaan kulumiseksi.

Taloudelliselta kannalta kulumisen vähentäminen tai sen poistaminen on tärkeää. Esimerkiksi Iso-Britanniassa valtio menetti pelkästään kulumisen takia n. 2 Mrd. puntaa vuoden 1988 arvioinnin mukaan [2, s. 97].

Taulukko 1. Eri kulumistavat

Kulumistapa	Määritys
Lievä kuluminen	erittäin pienten hapettuneiden kulumishiukkasten irtoaminen kosketuspinnasta
Tasainen kuluminen	sisäänajokulumisen jälkeen tasainen materiaalihukka kuormituksen pysyessä muuttumattomana
Voimakas kuluminen	suhteellisen suurten, pääasiassa hapettumattomien kulumishiukkasten kosketuspinnasta
Tuhoisa kuluminen	pinnan nopea kuluminen, joka lyhentää huomattavasti koneenosan kestoikää. Voimakasta plastista muodonmuutosta esiintyy koko kosketuspinnalla

Yllä olevaa taulukkoa 1 käytetään myöhemmin työssä kuvaamaan putkikäyrien kulumistapaa.

3.1 Kulumisluokat

Kuluminen luokitellaan erilaisiin kulumismekanismeihin. Päätyypit ovat kulumisen aiheuttava suhteellinen liike ja kulumismekanismi. Lujuusopillisesti kulumista voidaan tarkastella ulkoisten kuormitusten seurauksena (puristus, taivutus, veto ja vääntö) ja tuhoutumismekanismien aikaansaannoksena (hauraana murtumana). [2, s. 101.]

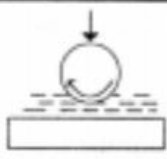
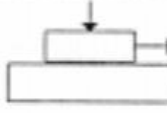
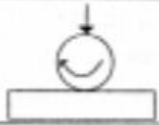
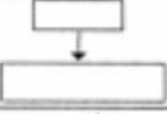
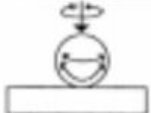
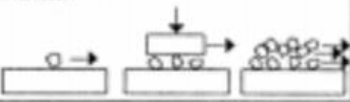

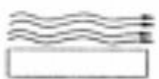

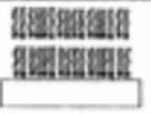

Kulumista aiheuttavaa liikettä voi olla

- eroosiota
- iskukulumista
- kavitaatiota
- liukumista
- vierivää kosketusta
- värähtelykulumista.

Kulumismekanismeja ovat

- *abrastiivinen kuluminen*, hiontakuluminen
- *adhesiivinen kuluminen*, tartuntakuluminen
- pinnan väsyminen
- tribokemiallinen kuluminen.

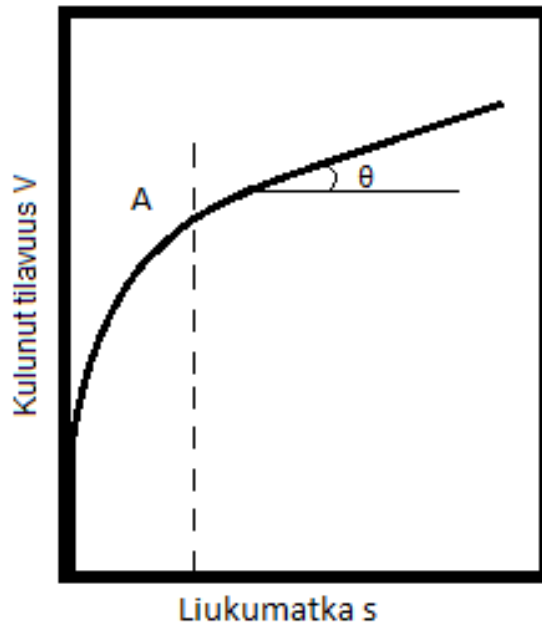
Alla olevassa kuvassa 2 on luokiteltu kuluminen kulumistyyppin ja -mekanismin mukaan.

Systeemin rakenne	Kulumisen aiheuttava rasitustyyppi	Kulumistyyppi	Kulumismekanismi			
			Adheesio	Abraasio	Pinnan väsyminen	Tribo-kemiallinen
Kiinteiden pintojen välissä voiteluaine	Liukuminen Vierintä Isku Sysäykset 				X	X
Kiinteät pinnat toisiaan vasten	Liukuminen 	Liukumis-kuluminen	X	X	X	X
	Vierintä 	Vierintä-kuluminen	X	X	X	X
	Iskukuormitus 	Isku-kuluminen	X	X	X	X
	Värähtely 	Värähtely-kuluminen	X	X	X	X
Kiinteät pinnat ja kulumispartikkeli	Hionta 			X		
Kiinteät pinnat ja partikkelit	Partikkeli-suihku 	Erosio		X	X	X
Kiinteä pinta ja kaasu	Virtaus 	Kaasu-erosio				X
Kiinteä pinta ja neste	Virtaus Värähtely 	Kavitaatio			X	X
	Virtaus Isku 	Pisara-erosio			X	X
Kiinteä pinta ja nesteessä kuluttavia partikkeleita	Virtaus 	Erosio		X	X	
		Korroosio-erosio		X	X	X

Kuva 2. Kulumisluokittelu. Moderneissa jaotteluissa käytetään kulumiskarttoja. [2, s. 102]

3.2 Kulumisen mittaus

Kulumista mitataan suhteellisenä arvona, jossa kulunut materiaalin tilavuus V suhteutetaan liukumismatkaan s alla olevan kuvan 3 mukaan.



Kuva 3. Liukumismatkan funktiona kulumistapahtuma. [2, s. 103]

Liikkeen alku, sisäänajovaihe, kulumiskäyrä on jyrkkä ja kuluminen on voimakasta. Tasapainotilassa, A-pisteen saavutettua kosketuspintojen pinnankarheudet ovat tasoittuneet ja kosketuskohdasta pinnan epäpuhtaudet ovat lähteneet irti. Lopussa kulumiskäyrä on suora, eli kuluminen on vakiota. [2, s. 103.]

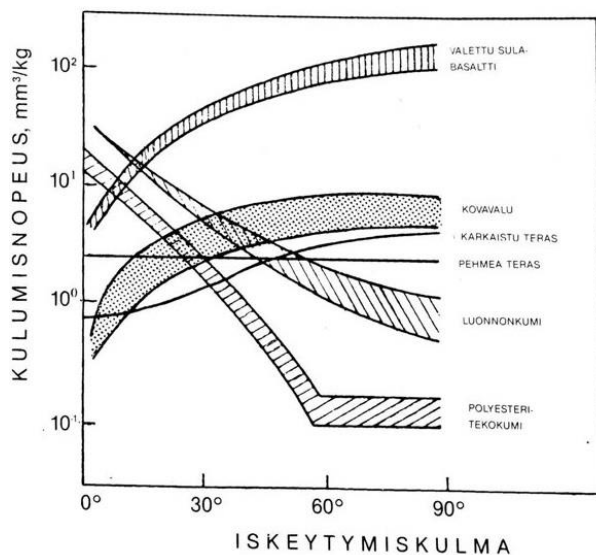
3.3 Kulumistyytit

Erosiota tapahtuu, kun kuluttavan aineen liike-energia aiheuttaa abrasiivista kulumista, eli kun kiinteä kappale kuluu kiinteiden hiukkasten ansiota kaasui- tai nestevirrassa. Se voi näkyä kavitaationa tai partikkelierosiona.

Kavitaatiossa höyrystyneet kaasukuplat romahtavat kohdatessa paineiskuja nestevirrassa, jolloin kappaleen pinta kuluu. Tarkemmin kuvattuna pinnan kuluminen johtuu kyseisen hajoamisen aiheuttamien paineiskujen ja korkeiden lämpötilojen takia. Jotta voi-

daan välttää kyseinen kulumismekanismi, on nesteen pintavoimien vaikutus pienennettävä ja on rakenteet suunniteltava niin, että systeemissä olisi sopivan korkea paine ja suunniteltu virtausnopeus jakaantuisi tasaisesti, jotta höyrykuplat eivät muodostuisi. [2, s. 14; 4, s. 5.]

Partikkelieroosiossa neste- ja kaasuvirrassa kulkeutuu sekä kiinteitä että nestemäisiä partikkeleita, jotka virran mukana kuluttavat kappaleen pintaa. Sitkeät ja kimmoiset materiaalit kestävät eroosiota paremmin kuin kovat ja hauraat materiaalit silloin kun virtaava materiaali kulkee suoraan kuluvalle materiaalilla. Alla olevassa kuvassa 4 kuvataan iskeytymiskulman pienentymistä, abraasioliukumista, joissa kovat materiaalit kestävät kulutusta paremmin kuin kimmoiset materiaalit. [4, s. 5.]



Kuva 4. Kvartsihiekan eroosiivinen kulumiskoe iskeytymiskulman vaikutuksesta eri materiaaleissa ylimmästä alimpaan: valettu sulabasaltti, kovavalu, karkaistu teräs, pehmeä teräs, luonnonkumi ja polyesteritekokumi. [4, s. 5]

3.4 Kulumismekanismit

Kahden liikkuvan osan välissä, kosketuskohdassa, kulumista tapahtuu eri tavoin. Kuorma, liike, materiaali, pinnankarheus, lämpötila sekä eri ympäristötekijät määrittävät kulumistyyppiin. Teollisuudessa kulumisvaurioiden syyt jakaantuvat seuraavasti:

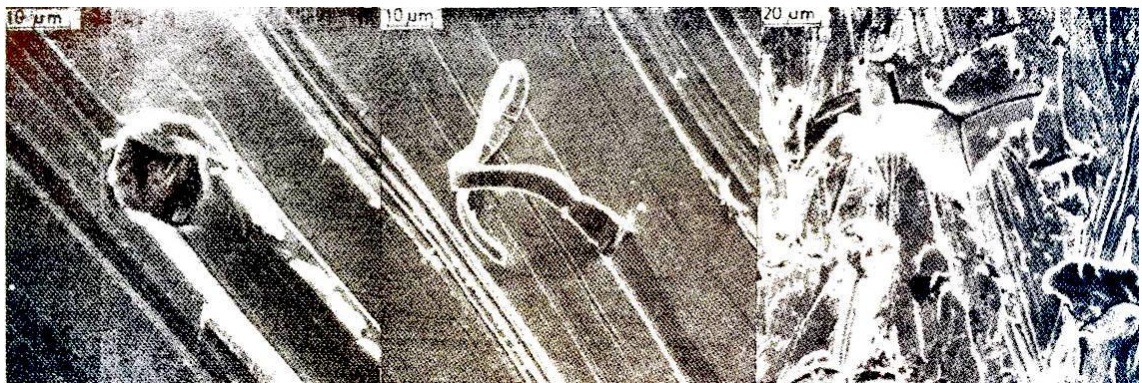
- 55 % kulumisesta on hiontakulumista eli abrasiivista kulumista.

- 15 % kulumisesta on tartuntakulumista eli adheesiivista kulumista.
- 15 % kulumisesta on väsymiskulumista.
- 15 % kulumisesta on tribokemiallista kulumista. [4, s. 3.]

3.4.1 Abrasiivinen kuluminen, hiontakuluminen

Kun materiaalia irtoaa kappaleen pinnasta irtonaisten partikkeleiden takia, sitä kutsutaan abrasiiviseksi kulumiseksi. Kuvassa 5 näkyy eri hiontakulumismekanismeja.

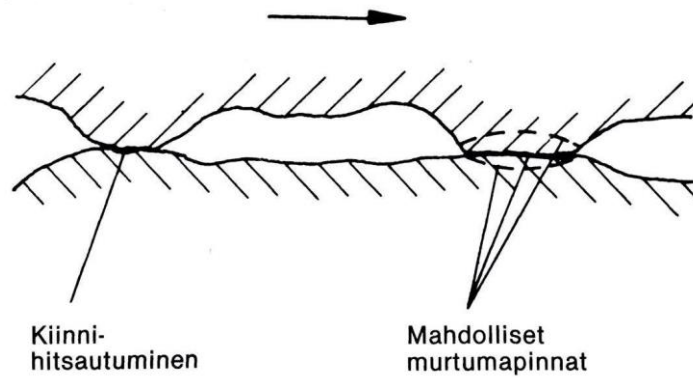
Abrasiivinen kuluminen jaetaan kolmeen ryhmään kulumisen voimakkuuden perusteella: kovertavaan, jauhavaan ja naarmuttavaan kulumiseen. Naarmuttava kuluminen on lievin hiontakuluminen. [3; s. 19, 74.]



Kuva 5. Eri hiontakulumismekanismeja vasemmalta oikealle: kyntäminen, leikkautuminen ja hauraasti murtuminen. [4, s. 4]

3.4.2 Adhesiivinen kuluminen, tartuntakuluminen

Adhesiivinen kuluminen on sitä, kun toisiinsa suhteen liukuvat pinnat alkavat irrottaa materiaalia adheesiivisten liitosten leikkautuessa ja siten muodostaa partikkeleita, jotka kulluttavat kappaleen pintaa. Alla olevassa kuvassa 6 ilmenee kyseinen ilmiö.

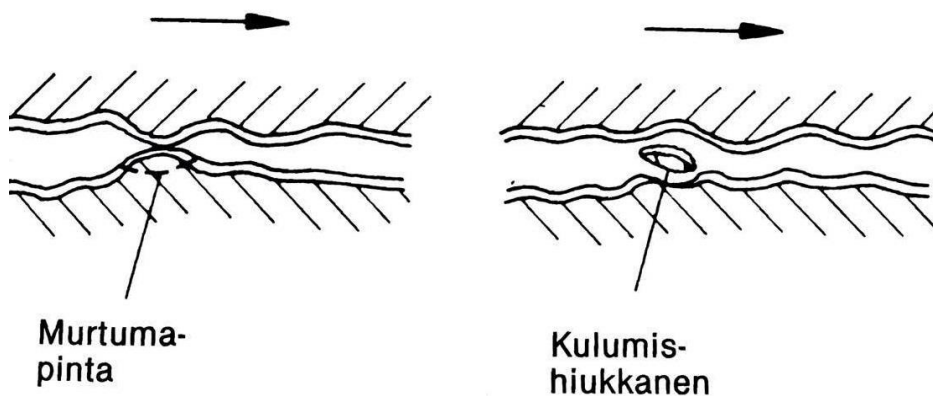


Kuva 6. Adhesiivinen kuluminen. [4, s. 5]

Adhesiivinen kuluminen voidaan jaotella lievään ja voimakkaaseen kulumiseen. Lievässä materiaali irtaoo kappaleiden pinnalta oksideina ja voimakkaassa irtaantuneet partikkelit ovat silmin havaittavia metallilastuja. Pintojen voitelulla voidaan ehkäistä tartuntakulumista. [4, s. 5.]

3.4.3 Pinnan väsyminen

Kun kaksi pintaa liikkuvat toistensa suhteen, pintojen väliset voimat aiheuttavat materiaaliin muutoksia pitkällä aikavälillä. Kun tarpeeksi monta kertaa tällaisia muodonmuutoksia tapahtuu samoissa kohdissa, pinta väsyä ja pyöreähköjä hiukkasia alkaa irrota kohdista, joissa on korkeimmat leikkausjännitykset, kuten alla olevassa kuvassa 7 esitetään. [4, s. 7.]

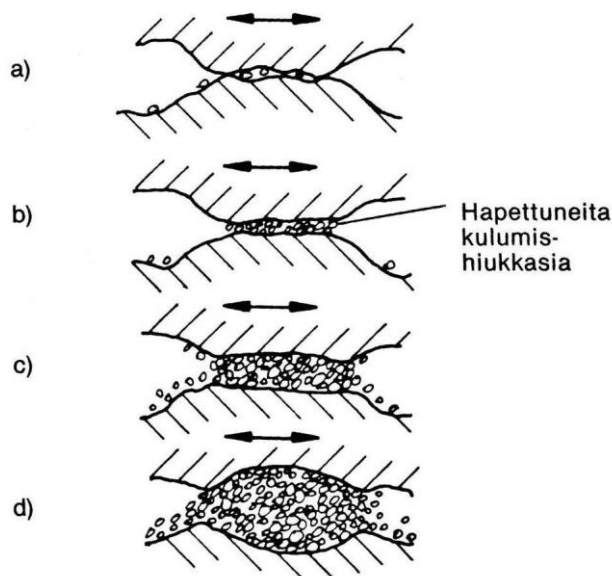


Kuva 7. Väsyminen liukuvassa vuorovaikutuksessa. [4, s. 7]

3.4.4 Tribokemiallinen kulumismekanismi

Tribokemiallista kulumista tapahtuu, kun metallipinta on ympäristönsä kanssa synnyttää reaktiotuotekerroksen, joka kuluu pintojen kosketusvuorovaikutusten takia. Kun kyseinen reaktiotuote on rikkoutunut ja siten alla oleva metallipinta paljastuu, se reagoi jälleen ympäristöönsä muodostaen jälleen uuden kerroksen.

Yksi tribokemiallisen kulumisen tyypeistä on *värähtelykuluminen*. Siinä edestakainen liike (0,1 —1 mm), pieniamplitudinen liike, muodostaa partikkeleita adhesiivisten liitosten liikkeiden seurauksesta, kuten kuvassa 8. Kyseiset partikkelit joko hapettuvat tai muokauslujittuvat. [4, s. 7.]



Kuva 8. Värähtelykuluminen. [4, s. 8]

Seuraavien menetelmien avulla pintojen välinen adheesioilmiö voidaan estää: hiilitypitys, typitys, kovakromaaminen, fosfatointi, pinnoitus PTFE:llä ja kiinteiden voiteluaineiden käyttö [4, s. 8].

4 Putkikäyrät

Putket ovat hiilliterästä, materiaaliluokkaa A106. Putken käyrät ovat halkaisijaltaan 4" ja niiden nimellisseinämä on 6,02 mm. Putkien alkuperäisessä prosessilaitoksessa, putki-

käyrien sisältönä on ollut pelkästään lauhdevettä, jonka lämpötila on vaihdellut lämpötilojen 60 °C ja 100 °C:n välillä. Toisessa putkessa on läpireikä. Syynä epäillään joko eroosiota tai kavitaatiota, sillä putken sisällä kulkeneessa virtauksessa on ollut höyryä kuumen veden joukossa. Kuvassa 9 molemmat putkikäyrät.

Liitteessä 1 on yhteydenotto yhdysvaltalaisen putkituottajan Amer PIP:n asiakaspalvelijan kanssa. Putkikäyrien mukana tulleesta tietolähteestä ei selvinnyt, mitä luokkaa hiiliteräs A106 oli, joten liitteestä saadaan selville, että käytettävät hiiliteräsputkikäyrät ovat luokkaa B perustuen niiden yleisyyteen teollisuudenaloilla, joten käytetään sitä tietoa hiiliteräs A106:n määrittämiseen. Hiiliteräs A106 soveltuu muun muassa hyvin taivutukseen, laippakiinnitykseen sekä hitsattavaksi. Hiiliteräksen murtolujuus on minimissään 60 000 psi eli 414 MPa sekä myötörajan arvo on vähintään 35 000 psi eli 241 MPa [5].



Kuva 9. Opinnäytetyössä tutkittavat putkikäyrät.

Taulukko 2. Hiiliteräksen A106 kemiallinen koostumus. [6]

Hiili, C	Mangaani, Mn	Fosfori, P	Rikki, S	Pii, Si
max. 0,30 %	0,29-1,06 %	max. 0,035 %	max. 0,035 %	min. 0,10 %
Kromi, Cr	Kupari, Cu	Molybdeeni, Mo	Nikkeli, Ni	Vanadiini, V
max. 0,40 %	max. 0,40 %	0,15 %	max. 0,40 %	min. 0,08 %

Hiiliteräs sisältää ferriittiä sekä perliittiä. Ferriitti (α -Fe) on raudan ja metalliseosten tilakeskeinen kuutio, *tkk-hila*. Se ei ole kovaa materiaalia, joten se ei lujitu voimakkaassa muokkauksessa. Perliitti on teräksen mikrorakenne, joka muodostuu austeniitista ferriitti- ja sementiitistä ja esiintyy ohuina lamelleina. Kulumisen kannalta korroosiota tapahtuu metallipinnoilla selektiivisesti perliittipesäkkeisiin. [7.]

5 Kulumisvaurioiden analyysi

Jotta tulevaisuudessa voitaisiin ennakoida tai edes välttää vaurioita, on hyvä tehdä vaurioanalyysi. Vaurioanalyysin avulla selvitetään vaurion syy ja jatkossa osataan välttää tietynlaisia toimintoja, joiden seurauksena on vaurio, kuten tässäkin työssä on reikä putkikäyrässä.

Analyysin avulla tuotekehitysvaiheessa muodostuneet vauriot suuntaavat suunnittelun kestävämpään tuotteeseen, laitteiden kuormankesto ja kestoikä paranee ja koneiden ylläpitäviä vaurioita osataan ennakoida [2, s. 342].

Kulumisen jäljet näkyvät eri tavalla eri kulumismekanismeilla:

- Abrasiivinen kuluminen: kulutuspinna on kyntämisen tai lastuamisen jälkiä. Materiaalin pinnalla näkyy murtumisjälkiä. Virtauksessa virtaa sisällön lisäksi irronneita partikkeleita tai metallilastuja.
- Adhesiivinen kuluminen: kulutuspinna on merkittävästi repeytymisen jälkiä. Virtauksessa virtaa sisällön lisäksi metallilastuja.
- Pinnan väsyminen: kulutuspinna on kuoppainen vierimiskosketuksen seurauksena. Virtauksessa virtaa sisällön lisäksi kiiltävää metallihilsettä.
- Tribokemiallinen kuluminen: kulutuspinna on kiiltävän näköinen. Virtauksessa virtaa sisällön lisäksi metallioksidea. [2, s. 343.]

6 Työn kulku

Työssä tarkastellaan putkikäyrät visuaalisesti. Nimetään putket; Putki 1 ja Putki 2. Putki 1 on toinen niistä kahdesta tutkittavista putkikäyrästä, jossa ei ole läpireikää. Putki 2:ssa on läpireikää. Putket sahataan ja tutkitaan mikroskoopeilla.



Kuva 10. Putki 1 ennen osiin sahaamista.



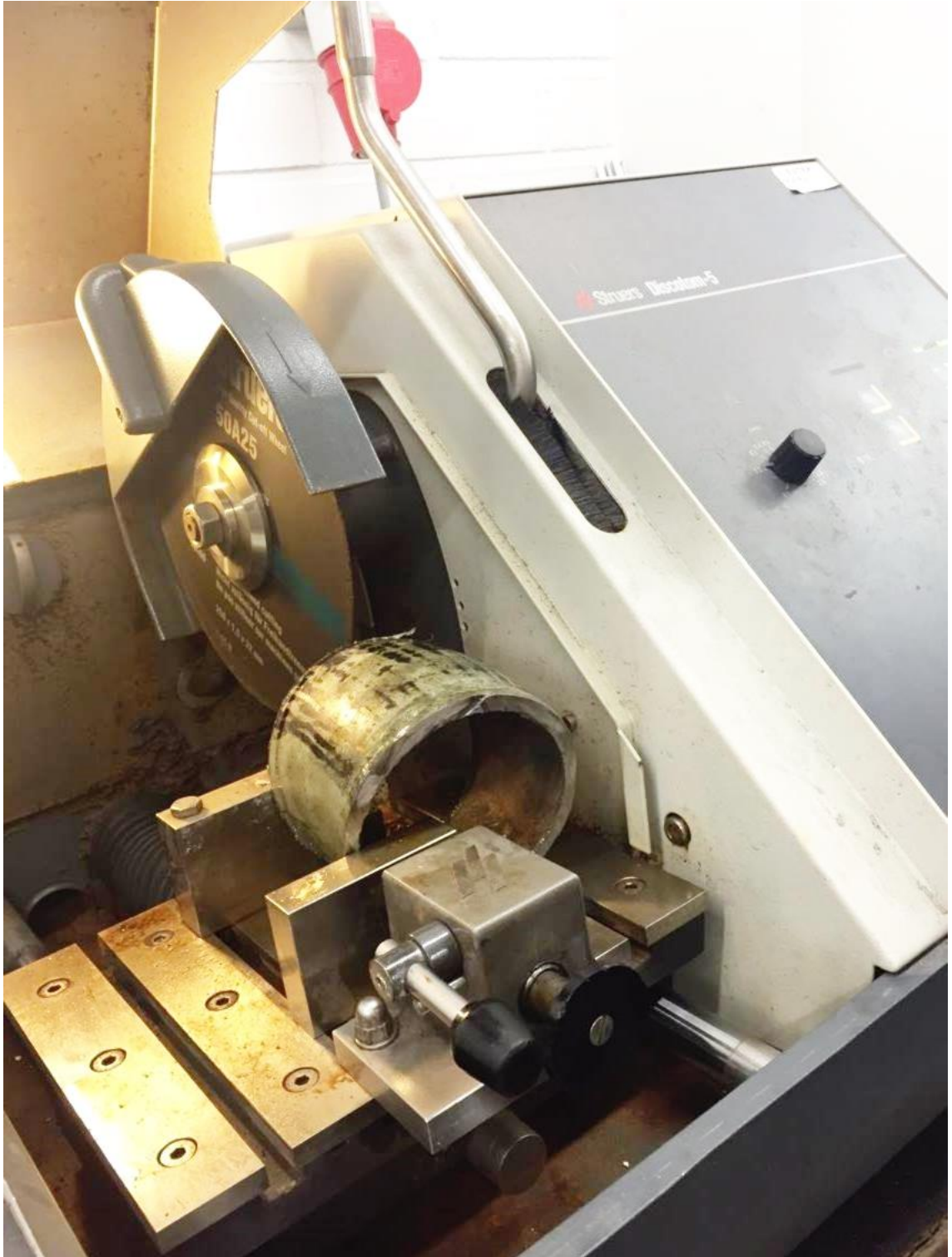
Kuva 11. Putki 2 ennen osiin sahaamista.

Kuvissa 10 ja 11 molemmat putkikäyrät, ennen kuin ne sahataan osiin, jotta sisällä olleet kulumisjäljet näkyisivät paremmin, joita voitaisiin myöhemmin tarkkailla stereo- ja elektronimikroskoopilla. Putkikäyrät sahataan osiin kahdessa vaiheessa: ensin isot käyrät sahataan saksalaisella Klaeger Plus 220 -sahalla (kuva 12), jonka jälkeen pienemmiksi paloiksi Struers Discotom-5 -laikkaleikkurilla (kuva 13).



Kuva 12. Klaeger Plus 220 -saha.

Sahauksen aikana sahan ja putkikäyrän väliin suihkutetaan leikkuunestettä, jonka avulla jäädytetään sahauskitkan aiheuttama lämpiäminen, jolloin metallilastut eivät tartu sahan terään.



Kuva 13. Struers Discotom-5 -laikkaleikkuri.

Laikkaleikkurilla saadaan käyristä pienempiä paloja. Leikkurin avulla putkien sisäpintaa on helpompi tutkia. Seuraavaksi alla löytyy kuvia sahan ja laikkaleikkurin jälkeen.

6.1 Putki 1



Kuva 14. Putken 1 sahatut osat.



Kuva 15. Putken 1.1 sahattu osa.

Kuvissa 14 ja 15 putkikäyrän palasia tutkitaan visuaalisesti ja voidaan todeta, että kuluminen on lievää Putkessa 1 taulukon 1 mukaan.

6.2 Putki 2

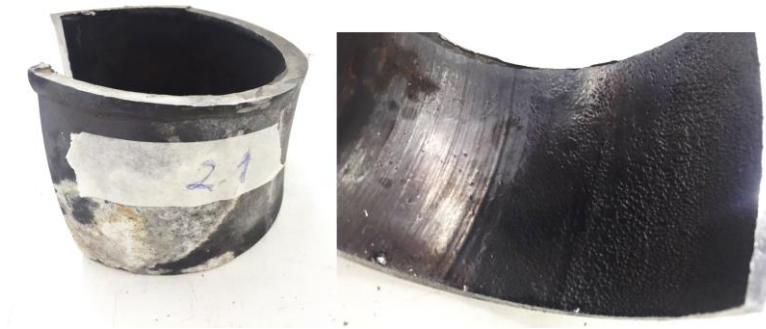
Putkessa 2 on reikä, jonka ympärillä on kiiltävä, kuoppainen pinta. Kuvien 16–20 perusteella voidaan todeta, että liittyen taulukkoon 1 Putken 2 kulumistyyliä muuttuvat radikaalisti lievästä tuhoisaan kulumiseen.



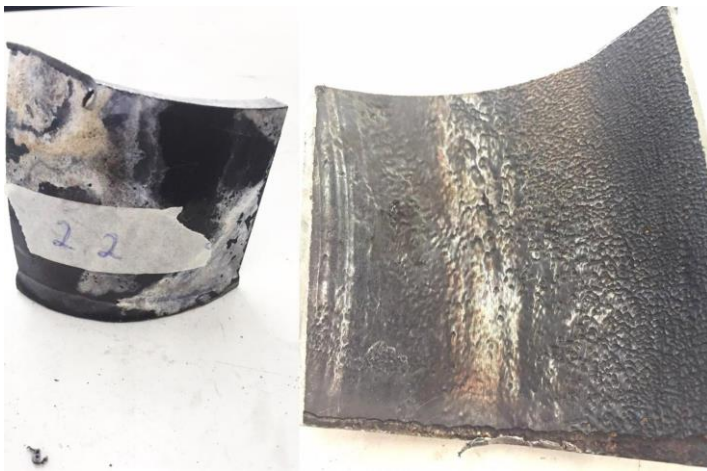
Kuva 16. Putken 2 sahatut osat.



Kuva 17. Putken 2 sahatut osat.



Kuva 18. Putken 2.1 sahattu osa.



Kuva 19. Putken 2.2 sahattu osa.



Kuva 20. Putken 2 sahattu osa.

Putkessa 2 reiän kohdalla on tapahtunut tuhoisaa kulumista (kuva 21) sekä sen ympärillä olevalla alueella voimakasta kulumista liittyen taulukko 1:een. Putkipalassa 2.1 nähdään, kuinka voimakas kuluminen muuttuu tasaisen viirumaisiin jälkiin. Ne voivat olla joko partikkelivirtauksen jälkiä tai se tarkoittaa sitä, että se on ollut putkivalmistajan virhe. Reiän toisella puolella on sileää, lievää kulumista.



Kuva 21. Putken 2 osa 2.4, joka on sahattu. Läpireikä.

Putkikäyrän osa 2.4. läpireiän halkaisija mitataan arvoksi 3,6 cm x 1,2 cm. Alla olevasta poikkileikkauksuvasta 22 näkee, että putkikäyrän seinämät ovat kuluneet todella paljon, etenkin reiän puoleinen seinämä.



Kuva 22. Putken 2.4. poikkileikkaus

Poikkileikkauksen vasemmalla puolella on reikä ja sen seinämän paksuus on 0,1 cm. Oikean puolen, joka on ehjä, seinämän paksuus on 0,60 cm. Kulumista on siis tapahtunut

$$\Delta T_{\text{seinämä}} = (0,60 - 0,10) \text{ cm} = 0,50 \text{ cm} \quad (1)$$

Kulumista on tapahtunut puoli senttimetriä.

6.3 Mikroskoopit

Putkikäyrien kulumismekanismit eivät selviä, ellei näytekappaleita tutkittaisi mikroskoopeilla. Ihmissilmän erotuskyky on suurin piirtein noin 10 μm , joten mikroskooppien käyttö on välttämätöntä. Mikroskoopeilla katsottaessa läpireiän muodostumisen syy selviää, kun verrataan kulumisia kirjallisuuksissa oleviin kuviin. Kuvassa 23 on koristeellinen mikroskooppi Pariisista vuodelta 1760.



Kuva 23. Barokkityylinen mikroskooppi. [8]

6.3.1 Stereo- ja valomikroskooppi

Tavallinen optinen mikroskooppi perustuu aallonpituus 400–700 nm eli näkyvään valoon. Stereomikroskoopissa on molemmille silmille okulaarit, jolloin tutkivaa kohdetta voidaan tutkia kolmiulotteisena. [9.]

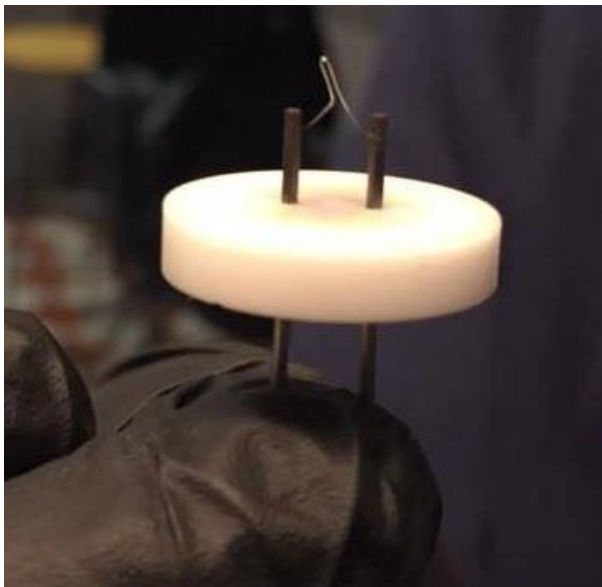
Valomikroskooppi on tarkempi kuin stereomikroskooppi. Stereomikroskoopilla tutkitaan näytekappaleita, mutta huomataan, että tarvitaan tarkempia kuvia putkien kulutuspinnoista. Näytekappaleita tutkittiin Olympus PME3 -valomikroskoopilla. Lopuksi siirryttiin elektronimikroskooppiin.

6.3.2 Elektronimikroskooppi

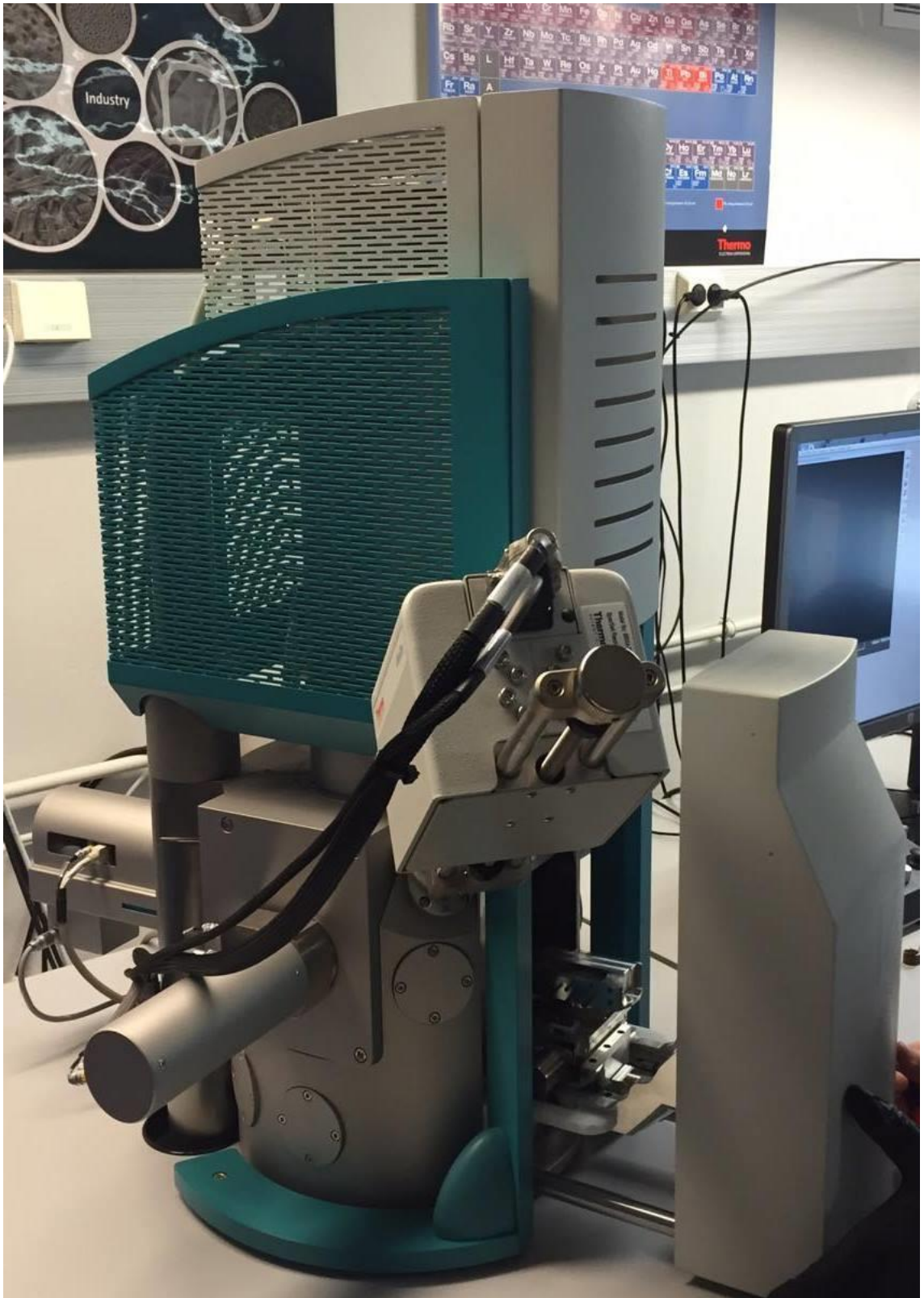
Työssä tarvitaan tarkempia yksityiskohtia, joita stereomikroskooppi ei voi näyttää. Elektronimikroskoopin toiminta perustuu siihen, että verrattuna stereomikroskooppiin, SEM

käyttää elektronisuihkua näkyvän valon sijaan [10]. Korkean resoluution sekä laajan syväterävyyden ansiota pyyhkäisyelektronimikroskooppi SEM on hyvä työkalu mm. metalliseoksien ja teräsnäytteiden topografisten piirteiden havainnointiin [11]. SEM:n erottelukyky on moderneissa laitteistoissa muutaman nanometrin luokkaa.

Kuvassa 24 levy ja hehkulanka toimivat katodina. Näkyvä hehkulanka asetetaan levyyn, jossa on pieni reikä. Tämä toimii anodina. Katodin ja anodin välille jännite-ero voi kasvaa tyypillisesti 200 – 30 000V. Kuvassa 25 näkyy elektronimikroskooppi. Elektronisuihkua hallitaan kolumnin sisään rakennettujen sähkömagneettisten linssien avulla, joiden avulla säädetään elektronisuihkua. Detektorien jännitteet ovat erilaiset verrattuna näytteen jännitteeseen. Kuvassa 39 kuvataan kammiota ja kuvassa 40 olevaa näytettä. Kammiossa elektronisuihku muodostuu vakuumissa olevassa elektronitykissä ja osuu näytteeseen ja sieltä sitten detektoriin, jossa on pieni ikkuna. Kun elektronit törmäävät siihen ikkunaan, syntyy valoa. Mitä enemmän elektroneja törmää, sitä kirkkaampi valo. SEM skannaa elektronien törmäyksiä luoden ns. intensiteettikartan.



Kuva 24. Elektronitykin hehkulanka, josta elektronit irtoavat korkean jännitteen seurauksena.



Kuva 25. Elektronimikroskooppi. Mikroskoopin yläpäässä olevan häkin sisällä putkikolumni, jossa on sähkömagneettinen linssi. Edessä oleva putkimainen kappale on SE-detektori, takana BSE-detektori.

6.4 Vertailukohteet

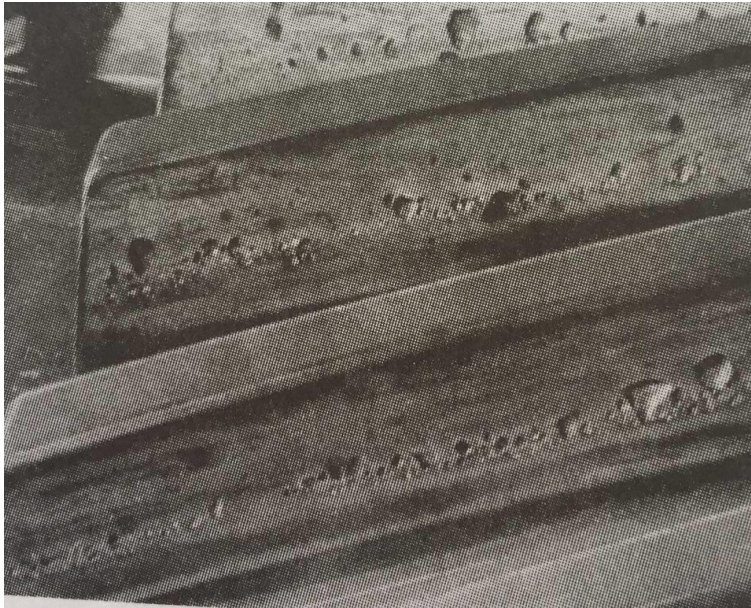
Vertaamalla *Tribologia – kitka, kuluminen ja voitelu* -kirjan [2004, s. 106-121], *Analysis of a SA 516-70 carbon steel boat sample taken from the digester shell wall* -raportin [1995, s. 8–14] sekä *ASM - Handbook. Volume 11: Failure Analysis and Prevention* -kirjan [1986, s. 165] kuvia kohtaan 7.1 ja 7.1.1 oleviin SEM-kuviin, ratkaistaan reiän syy. Kuvissa 26–32 esitetään eri kulumismekanismeja eri pinnoilla.



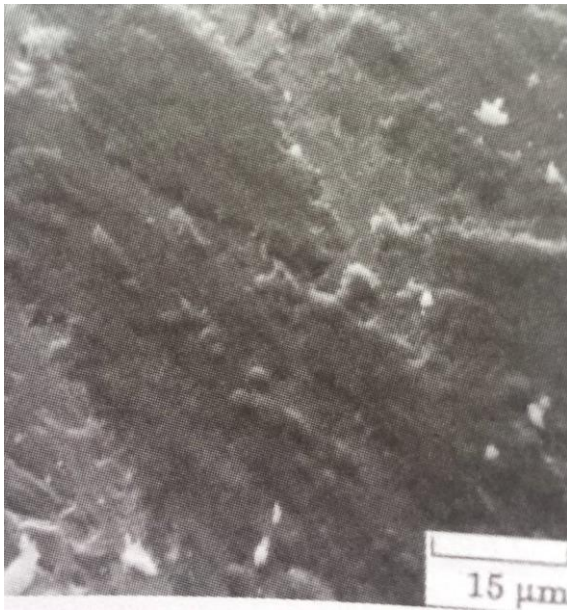
Kuva 26. Abrasiivisesti kulunut pinta, jossa on kyntämisen jälkiä. [2, s. 110]



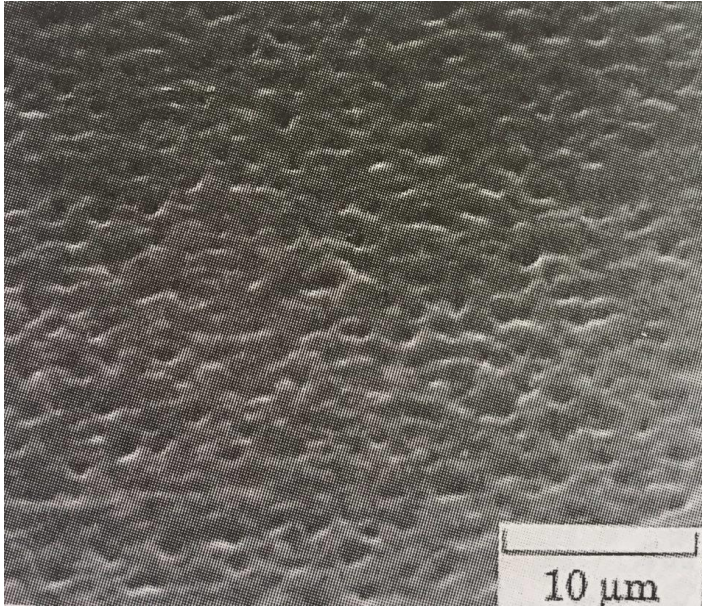
Kuva 27. Adhesiivinen kuluminen. [2, s. 106]



Kuva 28. Väsyminen hammaspyörän hampaalla. [2, s. 114]



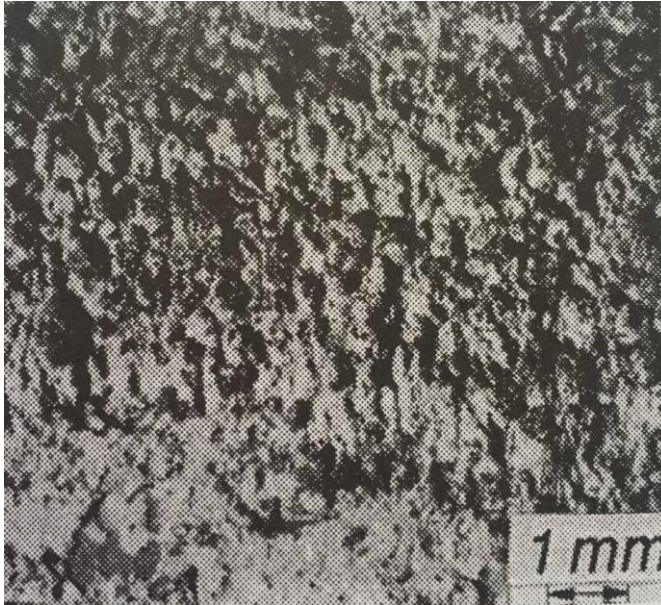
Kuva 29. Tribokemiallinen kuluminen. [2, s. 114]



Kuva 30. Iskukuluminen. [2, s. 117]

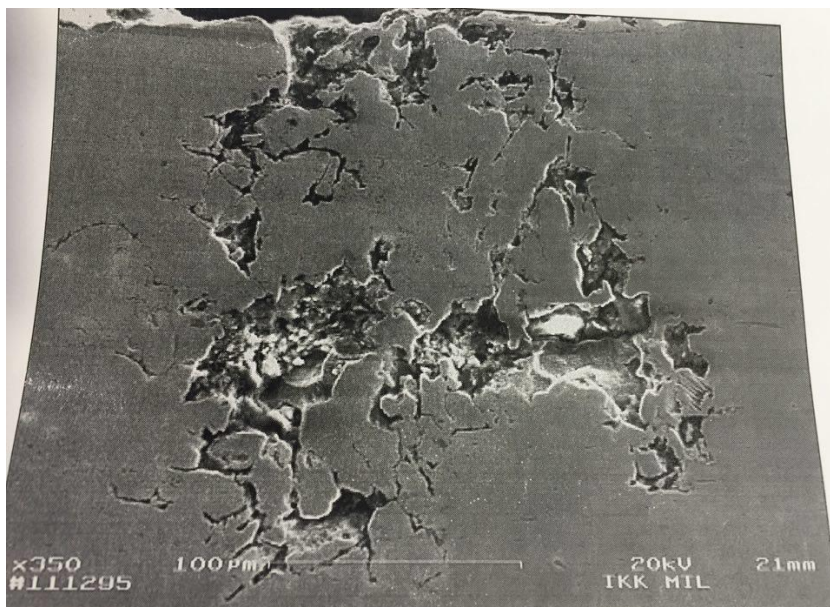


Kuva 31. Värähtelykuluminen. [2, s. 119]

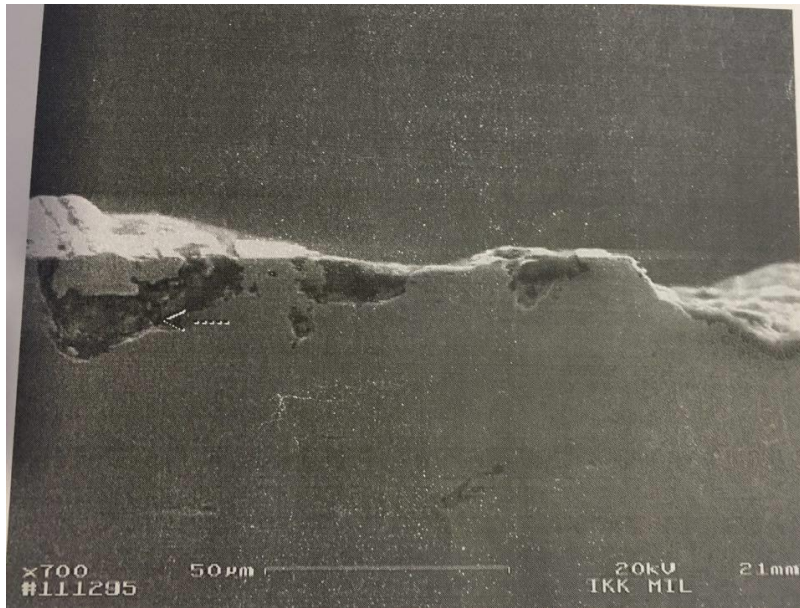


Kuva 32. Kavitaatio. [2, s. 121]

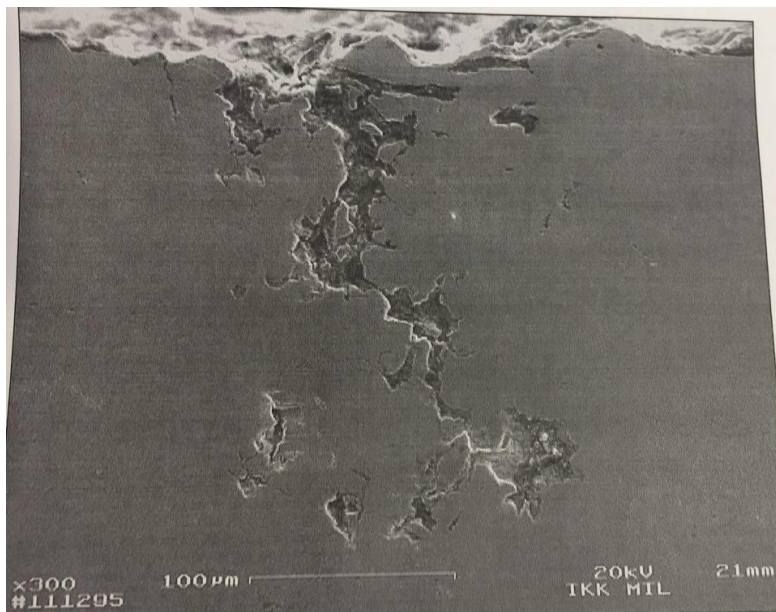
Alla olevat kuvat 33–36 ovat SEM-kuvia hiiliteräksisestä keittokattilan vaipan poikkileikkauksesta, jossa selektiivinen korroosio oli aiheuttanut kulumista. Paikoin korroosiokuluminen on edennyt syvälle perliittipesäkkeisiin. [13, s. 4].



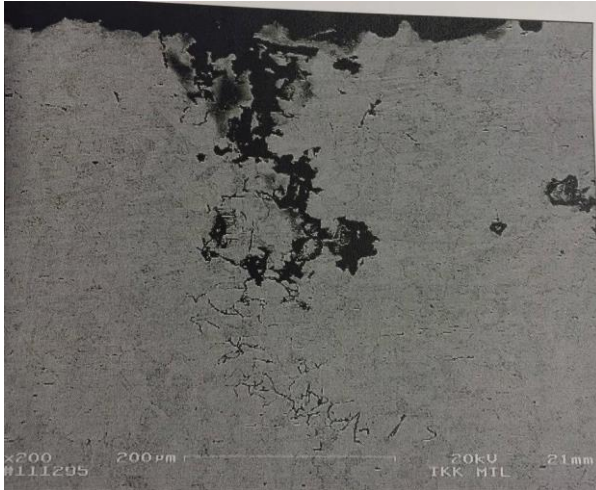
Kuva 33. SEM-kuva hiiliteräksisestä keittokattilan vaipan poikkileikkauksesta. [13, s. 8]



Kuva 34. SEM-kuva hiiliteräksisestä keittokattilan vaipan poikkileikkauksesta. [13, s. 8]

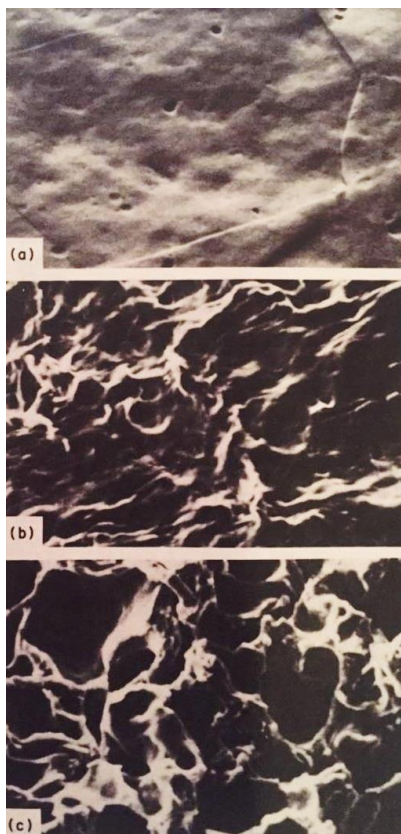


Kuva 35. SEM-kuva hiiliteräksisestä keittokattilan vaipan poikkileikkauksesta. [13, s. 9]



Kuva 36. SEM-kuva hiiliteräksisestä keittokattilan vaipan poikkileikkauksesta. [13, s. 10]

Seuraavassa kuvassa 37 on SEM-kuvia siitä, kun monikiteinen elohopeapinta on alltiina voimakkaalle kavitaatiolle 20 kHz voimakkuuden värähtelytestissä ja kuvassa 38 on kavitaation aiheuttama kuoppainen kulutuspinna ruostumattomalla teräksellä.



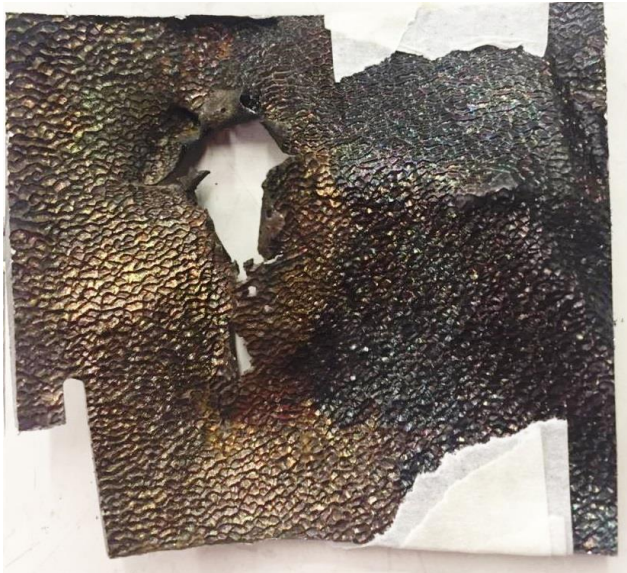
Kuva 37. Kohdassa (a) näkyy pieniä kraattereita 5 sekunnin jälkeen. (b) Syvämpiä kuoppia 10 minuutin jälkeen. (c) 2 tunnin jälkeen selkeät murtumat näkyvillä. [12, s. 165]



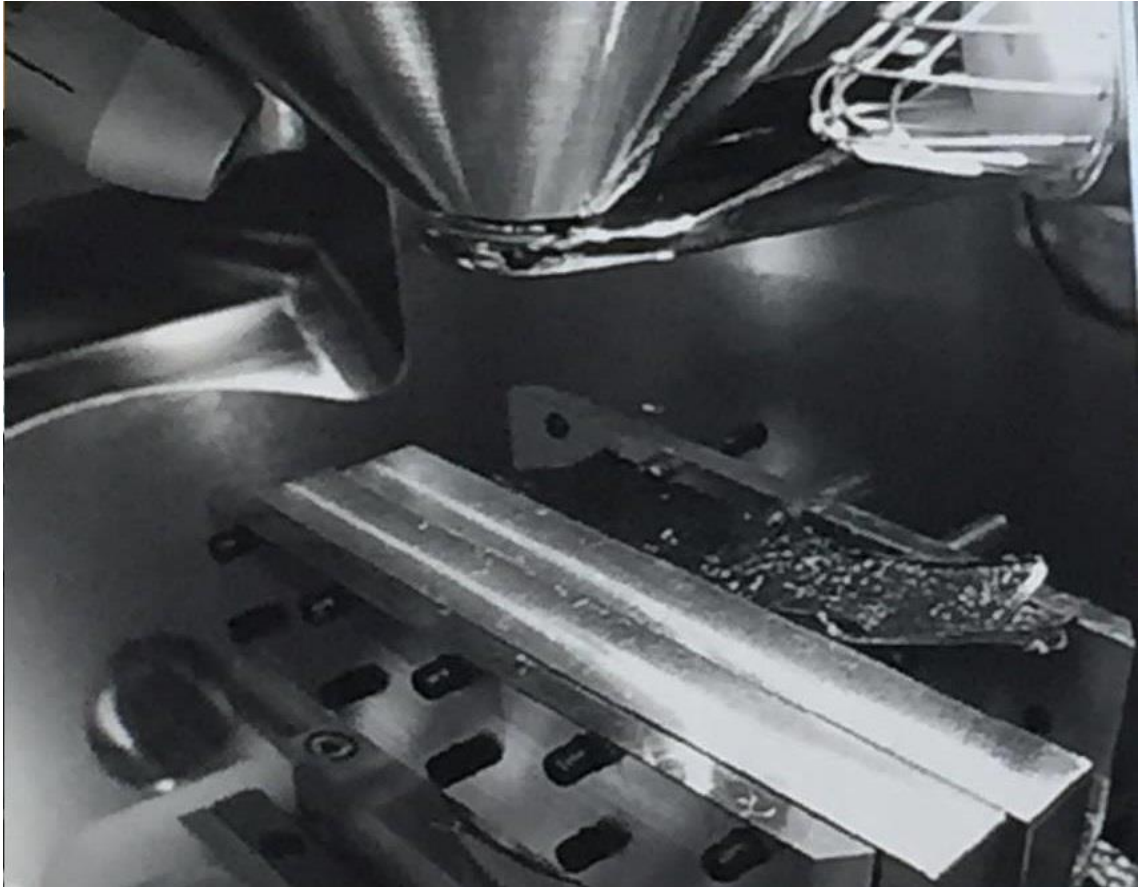
Kuva 38. Kavitaation aiheuttama kuoppainen kulutuspinna ruostumattomalla teräksellä. [12, s. 165]

7 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Putkipala 2.4 sahataan vieläkin pienempään osaan, jotta se mahtuisi EM:n sisään tutkitavaksi. Ultraäänipesurilla näytekappale pestään rasvat pois, jonka jälkeen voidaan käynnistää SEM. Saaduilla intensiteettikartoilla voidaan havaita kulumismekanismi vertaamalla kirjallisuuteen.



Kuva 39. Pieni pala putkipalasta 2.4.



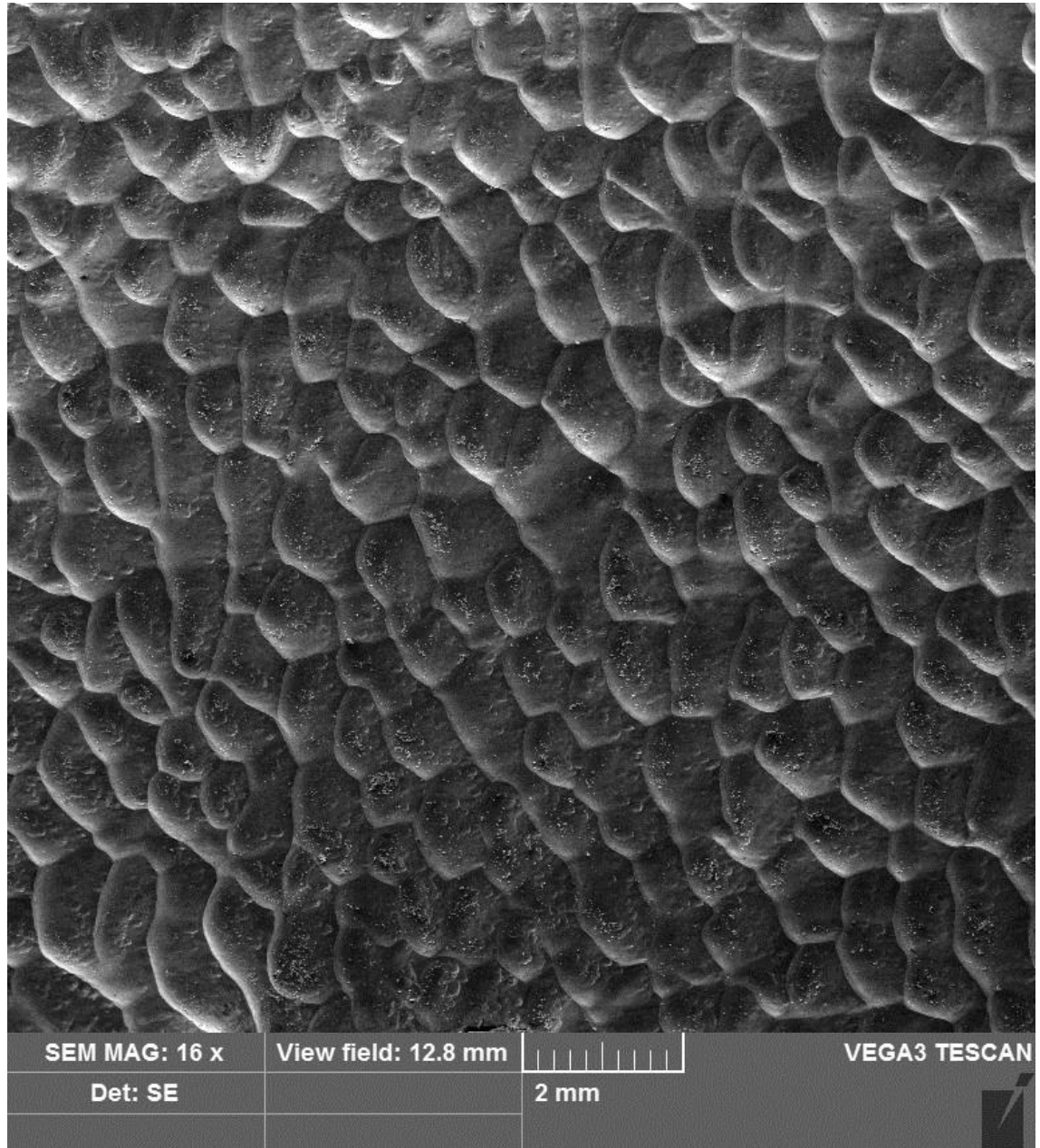
Kuva 40. Kuva putkipalasta 2.4 kammion sisältä. Palanen on sahattu kuvan 39 putkipalasta. Vasemmalta yläkulmalta näkyy elektronisuihkua säättävä sähkömagneettinen linssi.

SEM-kuvat

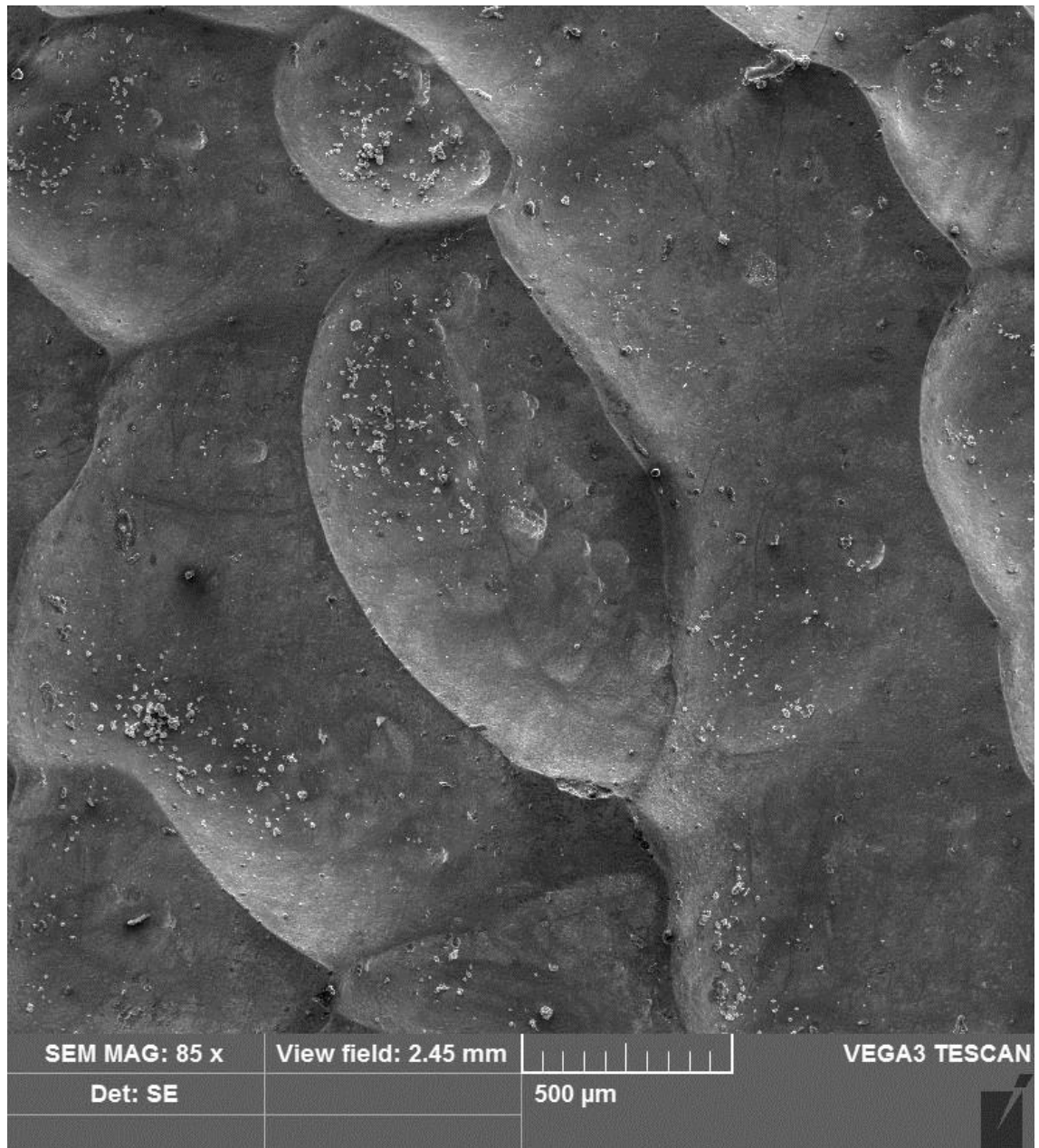
Seuraavaksi jatketaan putkipalan 2.4 tutkimista seuraavilla SEM-kuvilla. Alla olevissa kuvissa 41 ja 42 näkyy suomut 16- ja 85-kertaisina. Kulumissyytä ei vielä tunnista, joten lisätarkennukset ovat tarpeen. Kulumista esiintyy pieninä halkeamina sekä kuoppina. Kuvista 43 sekä 44 ovat 3000- ja 5270-kertaisia, ja niissä esiintyy selkeästi murtumia, jotka muistuttavat raerajoja. Raerajat syntyvät, kun halkeamiin pääsee nestettä. Halkeamat suurenevat ajan myötä, kunnes rajojen sisälle muodostunut rae irtoaa pinnalta virtauksen mukana.

Työssä käytetään Tescan VEGA SEM -elektronimikroskooppia konetekniikan laboratorioilassa.

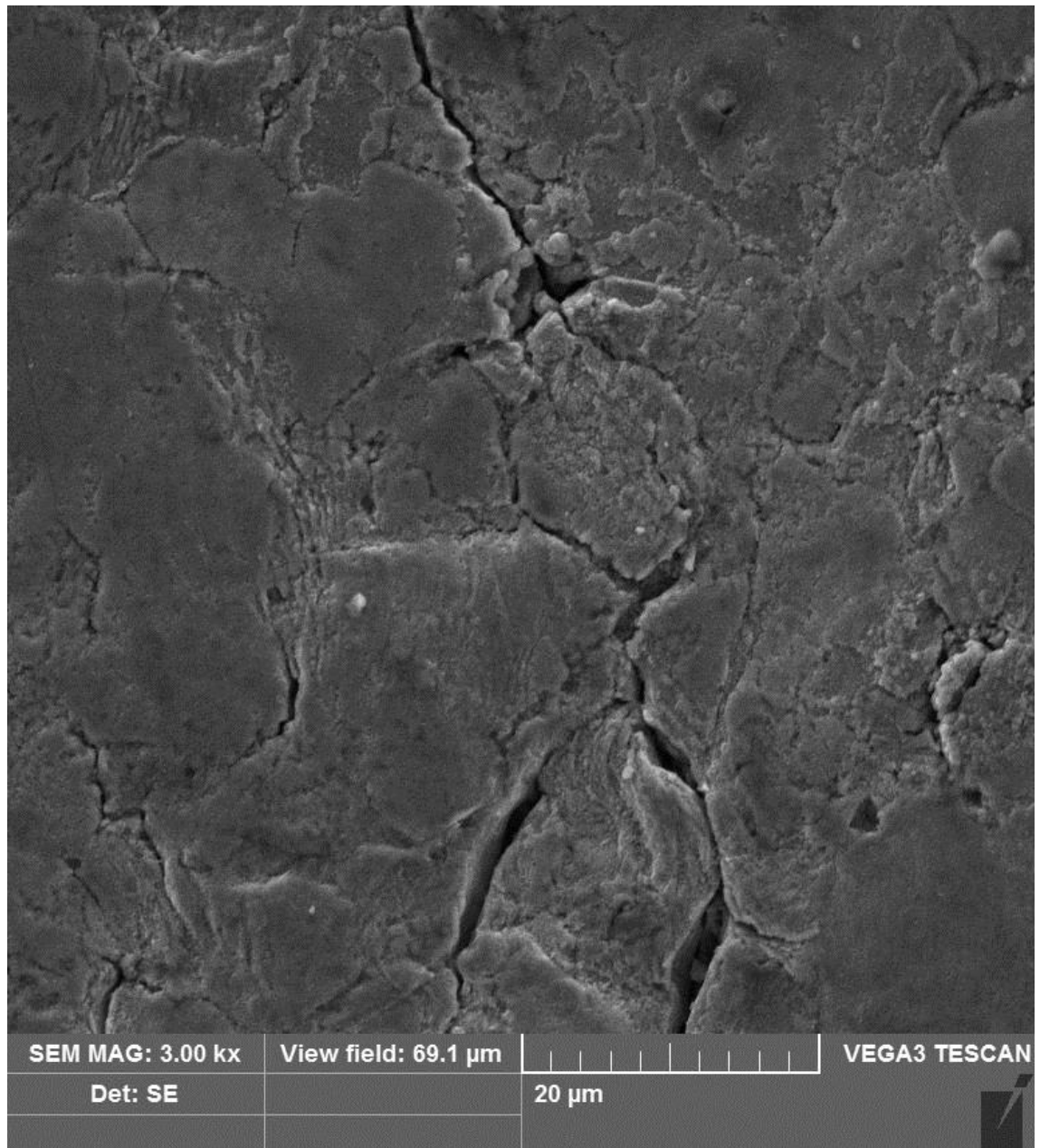
SEM-kuvia verrataan kirjallisuuteen, eikä sieltä löydetä yhdenvertaisuuksia välillä. Täten aikaisemmasta näytteestä leikataan uusi pieni osa, jonka poikkileikkausta tullaan tutki-
maan paremmin. Tämän hiepalan poikkileikkauksella selviää läpireiän syy.



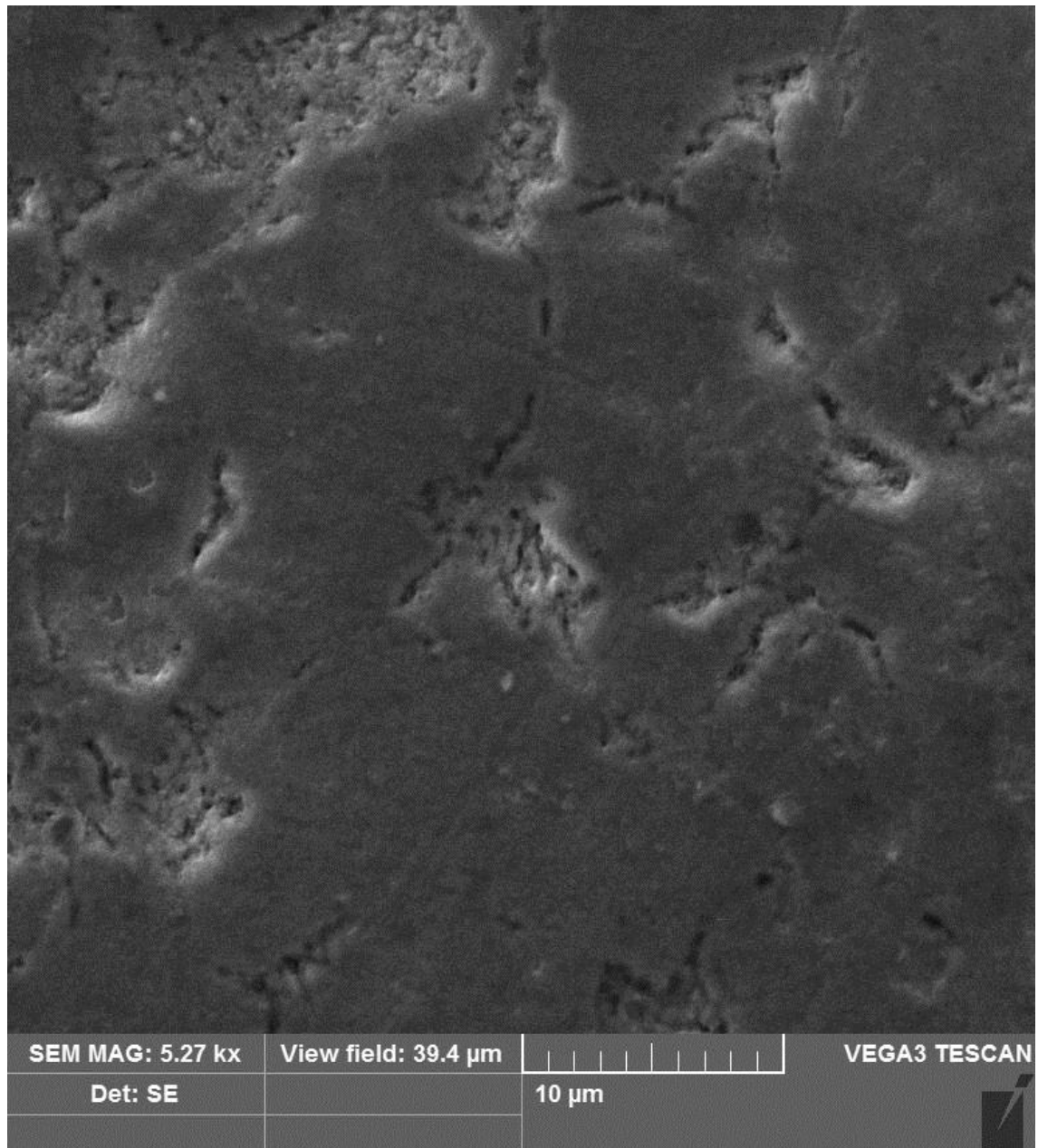
Kuva 41. 16-kertainen SEM-kuva.



Kuva 42. 85-kertainen SEM-kuva.



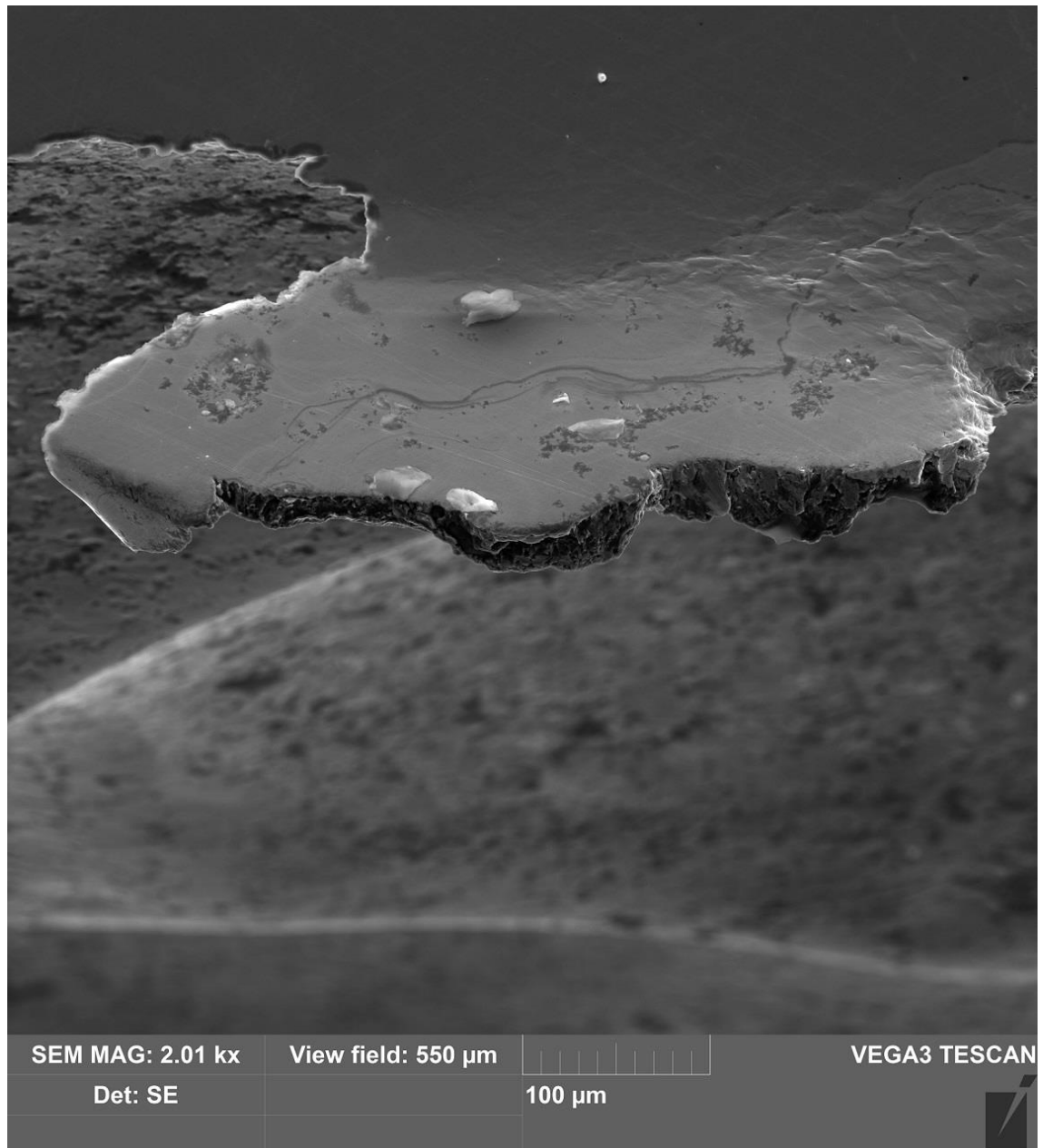
Kuva 43. 3000-kertainen SEM-kuva.



Kuva 44. 5270-kertainen SEM-kuva.

Poikkileikkaushietutkimus

Putkialasta 2.4 valmistettiin mikrohie, jonka mitat olivat noin 1 cm x 1,5 cm poikkileikkaushietutkimuksen suorittamiseen. Hiepala tehtiin nappi vihreällä muovilla Struers Prontopress-20 -painokoneella, jonka jälkeen hiottiin Struers Tegramin-25 -hiomakoneella ja kiillotettiin timanttiseoksilla. Lopuksi nappi rikottiin, ja tutkittiin mikrohien kiillotettua poikkileikkausta SEM:llä.



Kuva 45. Poikkileikkaushien SEM-kuva.

SEM-kuvasta nähdään poikkileikkauksen olevan siisti (kuva 45). Vasemmassa yläkulmassa näkyy erään suomun poikkileikkaus. Yhtäläisyyksiä ei löydetä kuvien 33–36 välillä, joten poistetaan selektiivisen korroosion mahdollisuus reiän aiheutumiseen. Kuvat 38 sekä 39 ja kuvat 37 sekä 43 muistuttavat toisiaan. Voidaan siis toteaa, että kavitaatio selittäisi läpiaukon aiheutumisen.

8 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tarkoituksena oli määrittää vaurioanalyysi putkikäyrän läpireiälle ja selvittää sen muodostaneen kulumismekanismien. Työ suoritettiin lehtori Juha Kotamiehen toimeksiannosta Metropolia Ammattikorkeakoululle.

Kun jokin laitteista tai komponentista rikkoutuu, on tärkeää tehdä sille vaurioanalyysi. Analyysin avulla osataan ennakoida laitteelle tai komponentille samat ääriolosuhteet ja välttyä pahimmissa tapauksissa mahdollisilta tehtaan alasajoilta, jotka voivat tulla kalliiksi, riippuen laitteesta tai komponentista. Vaurioanalyysin avulla myös keskitytään suunnitteluun, jonka avulla voidaan pidentää laitteen tai komponentin käyttöikä.

Työssä tutkittiin Putkea 2, reiällistä putkikäyrää, joka sahattiin pieniin osiin, tutkittiin yleisillä mikroskoopeilla ja päädyttiin tutkimaan Putkea 2 SEM:llä. Tähän työhön vertailevana kohteena oli Putkeen 1. Sahaukset suoritettiin Leiritien toimipisteellä ja SEM Kalevankadun toimipisteellä. SEM-kuvista saatiin tuloksia, joita oli verrattava kirjallisuuteen. Hankaluutena oli löytää vastaavaa SEM-kuvaa pinnan kulumisesta. Jäljet olivat epämääräisiä ja johtivat pohdintaan; selektiivinen korrosio voisi olla mahdollinen reiän aiheuttaja, sillä hiiliteräs sisältää sekä ferriittiä että perliittiä. Tapahtumassa perliitti olisi joutunut korroosion uhriksi, jolloin se olisi aiheuttanut turbulენტista virtausta, joka itsessään aiheuttaisi eroosiota. Tämä haluttiin todistaa - täten päädyttiin tutkimaan mikrohien poikkileikkausta.

Putkesta 2 saatujen poikkileikkaushietutkimuksen tuloksien seurauksena varmistettiin SEM:n avulla, että reiän aiheuttanut syy ei ollut selektiivinen korrosio, kuten aikaisemmin epäiltiin. Kuvasta 42 nähdään, että kulumispinta on sileän kuoppainen, ja kuvan 45 mikrohien poikkileikkaus on siisti, eikä kummastakaan kuvasta näy selkeitä repeytymisen jälkiä. Tämä päättää tutkimuksen toteamukseen, että Putkeen 2 reiän aiheuttanut kulumismekanismi oli kavitaatio. Tässä työssä kulumisen aiheuttanut liike oli nestekausvirtaus, jonka mukana on virrannut irtaantuneet partikkelit putkikäyrän sisäpinnalta. Kavitaatio voidaan estää muun muassa pienentämällä nesteen pintavoimien vaikutusta.

Lähteet

- 1 VTT Technical Research Centre of Finland. 2016. Friction and Energy Saving. Verkkodokumentti. <http://www.tribologysociety.fi/data/neste2016/TribYhd_VSK_2016_Holmberg.pdf>. Luettu:5.4.2016.
- 2 Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen, P. 2004. Tribologia - kitka, kuluminen ja voitelu. 4. korjattu painos. Hakapaino Oy, Helsinki.
- 3 Aho, K. 1993. Tribologisia perusasioita. Tekninen raportti 2/93. Tammer-Paino Oy, Tampere.
- 4 Suomen Metalliteollisuuden Keskusliitto. 1986. Materiaalivalinta – Kulumista kestävät materiaalit ja pinnoitteet.
- 5 Federal Steel Supply, Inc. 2016. ASTM A106 Carbon Steel Pipe Tube. Verkkojulkaisu. <<http://www.fedsteel.com/products/carbon-pipe-and-tube/astm-a106-seamless-carbon-steel-pipe.html>>. Luettu:25.4.2016.
- 6 Prosaicsteel Steel & Alloys. 2010. ASTM A106 Grade B Carbon Steel Seamless Pipe. Verkkojulkaisu. <http://www.prosaicsteel.com/a106_gr_b_carbon_steel_seamless_pipes.html>. Luettu:29.4.2016.
- 7 Tampereen teknillinen yliopisto. 2005. Rautametallit. Verkkojulkaisu. <http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_1.php>. Luettu:26.4.2016.
- 8 Schatzkammer der Optik, Optisches Museum. 2013. Schatzkammer der Optik. Verkkojulkaisu. <<http://schatzkammerderoptik.optischesmuseum.de/dt/inhalt.html>>. Luettu:25.4.2016.
- 9 Tieteen Kuvalehti. 2007. Miten elektroni-mikroskooppi toimii? Verkkojulkaisu. <<http://tieku.fi/teknologia/tutkimuslaitteet/miten-elektroni-mikroskooppi-toimii>>. Luettu:25.4.2016.
- 10 Wikipedia. 2014. Elektronimikroskooppi. Verkkojulkaisu. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Elektronimikroskooppi#cite_note-BI5-1>. Luettu:22.4.2016.
- 11 SEM-applications. Materials Science. Verkkojulkaisu. <<http://sem-applications.com/ms/ms.html#steels>>. Luettu:22.4.2016.
- 12 ASM Handbook. 1986. Volume 11: Failure Analysis and Prevention. United States of America.
- 13 Helsinki University of Tehnology, Faculty of Mechanical Engineering, Laboratory of Engineering Materials. 1995. Analysis of a SA 516-70 carbon steel boat sample taken from the digester shell wall. Espoo. 20 s

Liite 1: Yhteydenotto Amer Popen kanssa 26.4.2016

JOHN Hello, is there anything I can help you with?

CLIENT Hello. I'm doing my thesis on carbon steel A106. I'm here to get some data (mechanical properties) of that certain steel. I have only this data:

- Elbow pipe 4",
- Material: carbon steel A106
- Wall thickness 6,02 mm
- Content: water between temperatures 60°-100° Celsius

JOHN Min yield is 35,000psi

CLIENT How about tensile strength

JOHN 60,000 minimum

CLIENT So A106 is grade B?

JOHN or Gr. C. 98% of the time people request Gr. B

CLIENT Thank you very much

JOHN You're welcome. Good luck