

LEUKAMURSKAIMEN PIDÄTINSYLINTERIN LIITOSKOHTIEN KEHITYS

Aukusti-Vihtori Salo

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2023

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys

SALO, AUKUSTI-VIHTORI:
Leukamurskaimen pidätinsylinterin liitoskohtien kehitys

Opinnäytetyö 70 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Joulukuu 2023

Kehittämistutkimuksellisen opinnäytetyön aiheena on pidätinsylinterin liitoskohtien tutkiminen ja kehittäminen, ja se suoritettiin Metso Oyj:n toimeksiannosta. Pidätinsylinteri on oleellinen osa leukamurskainta, ja sen kehittäminen on avainasemassa koko koneen luotettavuuden parantamisessa.

Opinnäytetyön päätavoitteena oli parantaa pidätinsylinterin kiinnitykseen käytettyjen komponenttien kulutus- ja käyttöikää. Tutkimus toimi laajana kehityskohtien ja mahdollisten parannuskeinojen kartoituksena yrityksessä tehtävään pidätinsylinterien tuotekehitykseen. Tutkimusongelmaksi asetettiin kulumista aiheuttavien ja käyttöikää lyhentävien tekijöiden tunnistaminen sekä niiden ehkäisy, keskittyen erityisesti kulumiseen, kitkaan ja voiteluun pidätinsylinterin liitoskohdissa. Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuuskatsausta, havainnointia, kyselyjä, simulointia ja haastatteluja. Aineistona hyödynnettiin aihealueen kirjallisuutta, standardeja sekä asiakkailta ja eri lähteistä kerättyjä raportteja, haastatteluja, kuvia ja tilastoja.

Työn tuloksena käsitellystä aihealueesta saatiin kattava tietopaketti, joka tarjosi pohjan useille teoreettisesti päteville ratkaisuille tutkimuskohteen kehittämiseksi. Teoreettisten tulosten perusteella kartoitettiin erikoiskomponenttien toimittajia, joilta työn tilaaja voisi hankkia esiteltyjä ratkaisuja. Käytännön ratkaisujen esittely jätettiin yleiselle tasolle yrityksen liiketoiminnan suojelemiseksi.

Opinnäytetyö toimii erinomaisena kartoituksena ja pohjana tulevaisuuden Nordberg C -sarjan koneiden pidätinsylinterien tuotekehitykselle. Työssä tehtyjä havaintoja ja tietotaitoa voidaan helposti hyödyntää yrityksen sisällä vastaavissa sovelluksissa, sillä tutkimus koskee yleisesti käytössä olevaa liitostyyppiä.

Asiasanat: tribologia, kitka, kuluminen, adheesio, voitelu, oskillointi

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Product Development

SALO, AUKUSTI-VIHTORI:
Development of jaw crusher tension cylinder attachment points

Bachelor's thesis 70 pages, appendices 0 pages
December 2023

This developmental research thesis was conducted by the commission of Metso Oyj to investigate and improve the connection points of a tension cylinder. The primary objective of the thesis was to enhance the wear resistance and service life of the components used.

The research was defined by identifying factors causing wear and shortening of service life, focusing on wear, friction, and lubrication in the connection points of the tension cylinder.

The research methods included literature review, observation, surveys, simulation, and interviews. The data were collected from literature and standards in the field, as well as from reports, interviews, images, and statistics from customers and other independent sources.

The research provided several theoretical solutions for developing the connection points. Based on the research, suppliers of specialised components were contacted to acquire fitting solutions. The presentation of these practical solutions was kept on a general level in the thesis to protect the company's business interests. The thesis is a solid foundation for developing tension cylinders for Nordberg C-series machines. The findings and expertise gained from the research can be easily applied within the company for similar applications.

Key words: tribology, friction, wear, adhesion, lubrication, oscillation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
1.1	Työn taustat ja tavoitteet	7
1.2	Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset	7
1.3	Työn rakenne ja tutkimusmenetelmät	8
1.4	Työn rajaus	10
1.5	Työn toimeksiantaja	10
2	KIVENMURSKAUS JA LEUKAMURSKAIMET	11
2.1	Kivenmurkaus.....	11
2.2	Leukamurskaimet.....	12
2.3	Nordberg C-sarja.....	14
3	PIDÄTINSYLINTERI	17
3.1	Pidätinsylinterin toiminta ja rakenne	17
3.2	Liitoskohtiin kohdistuvat voimat.....	17
3.3	Pintapaineen laskeminen	20
3.4	Liukuminen liitoskohdissa	23
3.5	Liikkeen simulointi	24
4	KULUMINEN.....	29
4.1	Tribologia	29
4.2	Kulumistyytit.....	30
4.3	Kulumiseen vaikuttavat tekijät.....	40
5	KULUMISVAURIOIDEN ANALYSOINTI JA EHKÄISY	51
5.1	Vaurioanalyysin suorittaminen	51
5.2	Kulumismekanismien määrittäminen.....	52
5.3	Kulumisen ehkäisy	57
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	59
6.1	Tutkimuskysymyksiin vastaaminen	59
6.2	Luotettavuuden tarkastelu	61
6.3	Eettisyyden tarkastelu	63
6.4	Tavoitteiden saavuttaminen	65
6.5	Jatkotutkimuskohteet	66
7	YHTEENVETO.....	67
	LÄHTEET.....	68

LYHENTEET JA TERMIT

Abraasio	yleistermi, jolla kulumisen yhteydessä viitataan pintojen väliseen hankautumiseen
Abrasiivi	kova pintoja kuluttava partikkeli
Adheesio	yleistermi, jolla kulumisen yhteydessä viitataan pintojen väliseen kontaktivoimaan
ASC	engl. Active Setting Control eli automaattinen asetuksen säätö, Metson leukamurskaimien optio
FEM	engl. Finite Element Method, elementtimenetelmä, numeerinen differentiaaliyhtälöiden ratkaisumenetelmä
Fretting	yleistermi, jolla viitataan kulumisen yhteydessä toistuvaan liikkeeseen tai värähtelyyn
Oskillaatio	toistuva edestakainen liike kahden pisteen välillä
Pv	paineen ja liukumisnopeuden suhde, laakerien määrittämisessä käytettävä tekijä
Ra	pinnakarheuden parametri
Raekoko	kiviaineksen kokoa kuvaava termi
Rq	pinnankarheuden parametri
RR	engl. reduction rate, murskaussuhde, syötettävän kiviaineksen suhde ulos saatavan kiviaineksen kokoon
Siemens NX	tietokoneavusteinen 3D- suunnitteluohjelma
Tribologia	tieteen osa-alue, joka keskittyy tutkimaan kitkaa, kulumista ja voitelua
ω	kulmanopeus
μ	kitkakerroin
a	oskillointikiihtyvyys
A	pinta-ala
A_p	projektio pinta-ala
b	Hertzin teorian mukainen kontaktipinnan tekijä
b_o	liukumismatka
d'	Hertzin teorian mukainen yhdistetty halkaisija
d_1	kiinnitystapin halkaisija

d_2	laakerin sisähalkaisija
D_s	pidätinsylinterin sisähalkaisija
d_v	pidätinsylinterin männän varren halkaisija
E'	Hertzin teorian mukainen yhdistetty kimmokerroin
E_1	tapin kimmokerroin
E_2	laakerin kimmokerroin
F	normaalivoima
H	materiaalin kovuus
H_a	kuluttavan pinnan kovuus
H_m	metallisen vastinpinnan kovuus
L	liitoskohdan kosketuspituus
p	paine
P_{max}	pintapaineen maksimi arvo
r	säde
V	kulunut tilavuus
W	normaalivoima kitkan yhteydessä
Z	kulumiskerroin
β	kiertokulman puolikas
β^*	hajoamiskerroin
$\Delta\omega$	kulmanopeuden muutos
Δt	ajan muutos
$\Delta\varphi$	kiertokulman muutos
σ	myötölujuus
v	oskillointinopeus
v_0	keskiarvonopeus oskilloinnille

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustat ja tavoitteet

Tämä kehittämistutkimuksellinen opinnäytetyö on tehty Metson toimeksiannosta tutkia ja kehittää leukamurskaimen pidätinsylinterin liitoskohtia. Pidätinsylinteri on yksi leukamurskaimen toiminnan kannalta keskeisimmistä komponenteista, ja siihen tehtävä kehitystyö auttaa parantamaan koko koneen luotettavuutta. Työssä tehdyllä tutkimus- ja kehitystyöllä pyritään optimoimaan liitoskohdissa käytettävien komponenttien kuten laakerien ja tappien elinkaarta ja käyttöikä. Liitoskohdissa käytettyjen komponenttien optimointi auttaa vähentämään pidätinsylinterin alueella esiintyvää ennenaikaista kulumista ja siitä aiheutuvia kustannuksia.

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää pidätinsylinterin kiinnitykseen käytettyjen komponenttien kulutus- ja käyttöikä. Tavoitteen saavuttamiseksi työssä perehdytään siihen, mitkä tekijät aiheuttavat kulutus- ja käyttöiän lyhenemistä ja millä toimilla näitä tekijöitä voidaan minimoida.

1.2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Tutkimustyön pohjana on tutkimusongelma, jota lähdetään työssä ratkaisemaan. Todellisen ongelman määrittäminen on olennaista, sillä se ohjaa koko tutkimuksen etenemistä. Tutkimuksessa saatujen tulosten luotettavuus heikkenee, jollei todellista ongelmaa määritellä tutkimustyön alkuvaiheessa. Tutkimusongelman määrittämiseksi on täten tärkeää tutustua huolellisesti tutkittavaan aihealueeseen, jotta todellinen ongelma löydetään. (Kananen 2014, 44–45.)

Aihealueen kirjallisuuteen ja pidätinsylinterin rakenteeseen, toimintaan sekä toimintaympäristöön tutustumisen jälkeen tutkimusongelmaksi määriteltiin ”Kulumista aiheuttavien ja käyttöikä lyhentävien tekijöiden tunnistaminen sekä niiden ehkäisy”. Näiden tekijöiden tunnistaminen on merkityksellisessä roolissa, jotta ongelmaan voidaan kehittää parhaimmat mahdolliset ratkaisut.

Tutkimusongelman perusteella luodaan tutkimuskysymykset, jotka ohjaavat tutkijaa etsimään oikeanlaista tietoa aiheesta. Tutkimusongelman ytimen löytäminen ja täsmentäminen toimii tieteellisen tutkimusprojektin kivijalkana (Eskelinen & Karsikas 2014, 15). Tutkimuskysymyksiin vastataan tutkimuksen lopuksi, ja niiden avulla saadaan ratkaisu tutkimusongelmaan. Tutkimuskysymyksiä muotoilu on tärkeää, sillä ne tuottavat kysymyksen mukaiset vastaukset. (Kananen 2014, 45–46.) Tutkimusongelman pohjalta tutkimuskysymyksiksi määräytyivät;

1. Mistä syistä kuluminen johtuu?
2. Millä kulumismekanismeilla kuluminen tapahtuu?
3. Miten teoriassa kulumiskestävyyttä ja käyttöikää voidaan nostaa?
4. Mitä käytännön ratkaisuja on olemassa teoreettisille vastauksille?

Päätutkimuskysymys on listan ensimmäinen kysymys, sillä se ohjaa myös muihin kysymyksiin vastaamisen. Neljänteen kysymykseen vastattaessa noudatetaan tutkijan ja yrityksen välisiä salassapitosopimuksia. Tästä syystä käytännön ratkaisuja käsitellään vain yleisellä tasolla, eikä spesifejä ratkaisuja voida paljastaa tässä opinnäytetyössä.

1.3 Työn rakenne ja tutkimusmenetelmät

Tämä opinnäytetyö on kehittämistutkimus eli se on tutkimustyyppiltään kvalitatiivisen ja kvantitatiivisen tutkimustyyppien yhdistelmä. Työssä on siis käytetty tutkimusmenetelminä molempien tutkimustyyppien perinteisiä menetelmiä. (Kananen 2014, 47–53.) Tutkimusmenetelmät toimivat tieteellisen tutkimuksen työkaluina, joiden avulla tutkimusongelmaan etsitään toimiva ratkaisu (Eskelinen & Karsikas 2014, 15). Tutkimuksessa käytetyt tutkimusmenetelmät ovat kirjallisuuskatsaus, havainnointi, kyselyt, simulointi ja haastattelut.

Opinnäytetyön rakenne voidaan karkeasti jakaa viiteen osa-alueeseen. Työn johdantoa ja yhteenvetoa ei lasketa tähän jaotteluun mukaan. Ensimmäinen osio on omistettu työssä tutkittavien koneiden toimintaympäristön ja viitekehyksen esittelylle. Luvussa käsitellään kivenmurskausprosessi sekä leukamurskaimien asema tässä prosessissa. Luvussa käydään läpi myös erilaisten leukamurskaimien toimintaperiaatteet ja esitellään Metson Nordberg C -sarjan leukamurskaimet. Luvun tarkoituksena on tutustua työssä tutkittavien koneiden toimintaympäristöön,

sekä niille suunniteltuihin sovelluksiin. Tämä perehdytys auttaa työssä myöhemmin käsiteltävien aihealueiden ymmärtämisessä.

Toisessa osiossa käsitellään työn keskiössä ja tutkimuksen kohteena olevan pidätinsylinterin tehtävät, toiminta ja rakenne. Yleistä huomiota käytetään myös muiden pidätinsylinteriä ympäröivien komponenttien toimintaan. Lisäksi osiossa tutkitaan pidätinsylinterin liitoskohtiin kohdistuvia kuormituksia käyttämällä tilanteeseen sopivia fysiikan ja matematiikan yhtälöitä. Luvun loppuvaiheessa suoritetaan Siemens NX -ohjelmistolla liikesimulointi, jonka avulla selvitetään pidätinsylinterin käyttäytyminen murskaimen käytön aikana. Osiossa saatuja tuloksia ja huomioita hyödynnetään myöhemmin teoriaosuuden yhteydessä sekä tutkimuskysymyksiin vastattaessa.

Kolmannessa osiossa käsitellään kulumiseen liittyvää teoriaa, sekä siihen vaikuttavia tekijöitä, kuten pinnanlaatua, voitelua, kitkaa ja materiaaliominaisuuksia. Tämä luku on täysin teoreettinen ja sen tarkoituksena on toimia työn teoreettisena pohjana, sekä aihealueen käsitteiden ja ilmiöiden esittelijänä. Luvussa esiteltävä kulumisen teoria on rajattu pidätinsylinterin toiminta huomioon ottaen, sillä muuten sen laajuus kasvaisi liian suureksi.

Neljännessä osiossa suoritetaan toiseen tutkimuskysymykseen liittyvää kulumismekanismien tunnistamista. Kulumismekanismien tunnistamiseksi analysoidaan asiakkailta ja muista yksittäisistä lähteistä, kuten koekäytöstä saatuja raportteja, kuvia ja huomioita pidätinsylinterin alueella esiintyneistä ongelmista. Analysoinnin tukena ja kulumismekanismien määrittämisen apuna käytetään toisessa osiossa selvitettyjä kuormituksia sekä kolmannessa osiossa esiteltyä kulumiseen liittyvää teoriaa.

Viides osio toimii tuloksien esittely ja pohdinta kappaleen yhdistelmänä. Luvussa vastataan tutkimuskysymyksiin ja pohditaan tutkimuksen tuloksia sekä jatkotutkimuskohteita. Käytännössä toimeenpantavia ratkaisuja ei kuitenkaan paljasteta yrityksen liiketoiminnan suojelemiseksi vaan tulokset esitellään yleisluotoisesti. Lopuksi luvussa pohditaan työn luotettavuutta ja eettisyyttä tiedeyhteisön hyväksymien normien mukaisesti.

1.4 Työn rajaus

Tutkittava aihe koskettaa käytännössä Metson koko C-sarjan leukamurskaimia, sillä kaikkien niiden pidätinsylinterien rakenteet ovat samankaltaisia keskenään. Työssä rajattiin tutkittavaksi kaksi merkittävimmin toisistaan eroavaa konemallia pidätinsylinterin toteutuksen näkökulmasta. Tutkinnan ensimmäiseksi kohteeksi rajattiin konemalli, jossa pidätinsylinterin liitokset ovat rasvattuja ja toiseksi kohteeksi konemalli, jossa liitokset eivät ole rasvattuja. Kun valinta suoritetaan näin, saadaan tutkittua hiukan erilaisia komponentteja, jotka toimivat samassa tehtävässä, mutta eroavat ominaisuuksiltaan. Tällä koneiden rajauksella saadaan aikaan mahdollisimman laaja-alainen tarkastelu tutkimusongelmalle. Tämä toimintatapa rajaa kuitenkin merkittävästi tutkittavan datan määrää, samalla säilyttäen mahdollisimman laaja-alaisen otannan koneista.

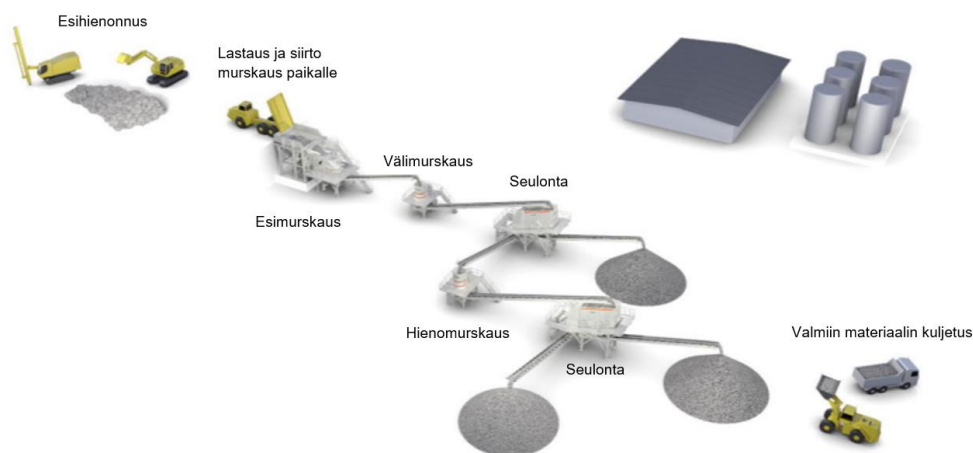
1.5 Työn toimeksiantaja

Metso Oyj on suomalaislähtöinen kaivos- ja teknologiateollisuuden alalla toimiva pörssilistattu yritys. Yritys toimi aiemmin nimellä Metso Outotec, mutta vaihtoi nimensä nykyiseen nimeen toukokuussa 2023. Metson tärkeimpiä toimialoja ovat kiviaineksen ja mineraalien käsittely, sekä muutamat metallien jalostuksen osa-alueet. Yritys on alansa johtavia teollisuusyrityksiä tarjoten asiakkailleen kokonaisvaltaisia globaaleja ja kestävästä kehitystä tukevia ratkaisuja. Metsolla on toimintaa yli 45 maassa ja se työllistää noin 16 000 ihmistä maailman laajuisesti. Yrityksen liikevaihto oli vuonna 2022 noin 5,5 miljardia euroa. (Metso 2023b.)

2 KIVENMURSKAUS JA LEUKAMURSKAIMET

2.1 Kivenmurkaus

Kivenmurkausprosessissa karkeasta sorasta ja kalliokivestä saadaan murskaamalla ja seulomalla sopivan kokoista sepeliä ja mursketta (Viilo 2022a, 2). Kalliosta irrotettua materiaalia kutsutaan louheeksi. Murskaamalla ja seulomalla louhetta eri raekokoihin saadaan aikaan mursketta. Maanmittauslaitoksen (2023) mukaan ”Mursketta käytetään betonin runkoaineena, tien kantavan kerroksen rakennusaineena ja sorateiden pintamateriaalina”. Sepelillä tarkoitetaan kiviainesta, joka saadaan murskeesta, seulomalla pois hienoin aines eli kivituhka. (Maanmittauslaitos 2023.) Murskausprosessi on monivaiheinen tapahtuma ja se suunnitellaan aina tilannekohtaisesti (Viilo 2022b). Kuvassa 1 on esitetty kiinteän murskauslaitoksen toiminta.



KUVA 1. Kiinteä murskauslaitos (Viilo 2022a, 3).

Prosessin ensimmäisessä vaiheessa kivimateriaalia hienonnetaan kuljettavaan muotoon esimerkiksi räjäyttämällä tai poraamalla kalliosta sopivan kokoista esisytettä. Tämän jälkeen esihionnettu kiviaines lastataan kuljetettavaksi murskauspaikalle. Varsinainen murskaus tapahtuu toisiinsa kuljettimien ja seulojen välityksellä liitetyillä kivenmurskaimilla. Murskausprosessissa käytetään tavalli-

sesti noin 3–4 murskainta lopullisen raekoon saavuttamiseksi. Yleisesti murskausprosessissa syntyy useampaa erikokoista kiviainesta moneen käyttötarkoitukseen. Tämä tapahtuu seulomalla kiviainesta murskauksen eri vaiheissa (kuva 1). (Viilo 2022b.) Kuvassa 2 on esitelty varsinainen kivenmurskaimilla tapahtuva murskausprosessi yksinkertaistettuna ilman seulontaa.



KUVA 2 Murskausprosessi (Viilo 2022a, 30).

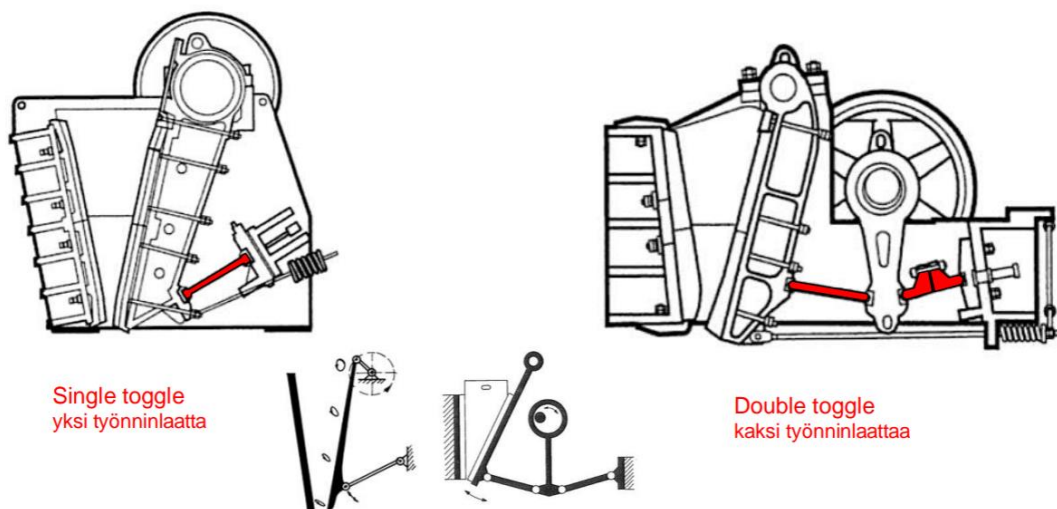
Kuten edellä esiteltyjen kuvien 1 ja 2 perusteella voidaan huomata, tapahtuu kivenmurskaus monen murskaimen avustuksella. Murskausprosessissa käytettävien murskaimien määrä ja tyyppi riippuu siitä, minkälaista kiviainesta käsitellään. Kaikki kivenmurskaimet voidaan lajitella karkeasti kahteen kategoriaan niiden murskausperiaatteen pohjalta puristaviin murskaimiin ja iskumurskaimiin (Metso 2023c, 42.)

Puristavia murskaimia ovat leuka-, kartio-, kara-, rullamurskaimet, jotka nimensä mukaisesti murskaavat kiviainesta puristamalla sitä liikkuvan ja stationaaristen kulutusosien väliin, kunnes kiviaines murtuu (Metso 2023c, 42). Jos esimerkiksi syötettävä kiviaines on kalkkikiveä, sopii ensimmäisen vaiheen murskaimeksi iskupalkkimurskain. Jos taas kiviaines on vaikkapa graniittia, joka on suhteellisen kovaa ja kuluttavaa kiveä, sopii ensimmäisen vaiheen murskaimeksi parhaiten kara- tai leukamurskain. Työssä käsiteltäviä Nordberg C-sarjan leukamurskaimia käytetään tyypillisesti murskausprosessissa esimurskaimina. (Gupta & Yan 2006, 99–102; Viilo 2022b.)

2.2 Leukamurskaimet

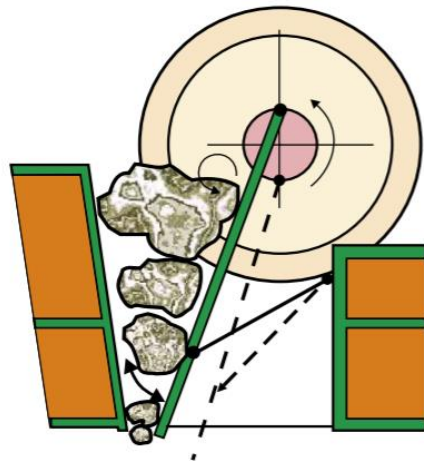
Leukamurskaimet voidaan jakaa karkeasti kahteen pääasialliseen ryhmään, niiden työnninlaattojen ja epäkeskoakselin sijoittelun perusteella. Voidaan puhua yhdellä tai kahdella työnninlaattalla varustetuista leukamurskaimista. Usein puhuttaessa leukamurskaimista tarkoitetaan yhden työnninlaatan versiota, sillä se on näistä kahdesta tyypistä laajemmin käytössä oleva murskaintyyppi. (Gupta & Yan 2006, 99–102; Michaud 2014.)

Yksi työnninlaattaisessa leukamurskaimessa epäkeskoakseli sijaitsee liikkuvan leuan yläpäässä. Kun taas kaksi työnninlaattaisessa leukamurskaimessa epäkeskoakseli sijaitsee erillään leuoista kahden työnninlaatan välissä. (Gupta & Yan 2006, 99–102; Michaud 2014.) Kuvassa 3 on havainnollistettu näiden kahden leukamurskaintyyppin rakenteelliset erot.

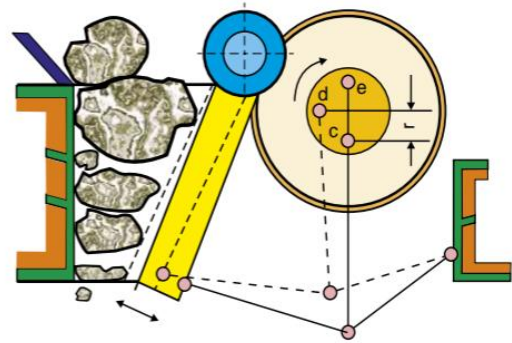


KUVA 3. Leukamurskaintyytit (Viilo 2022a, 18).

Leukamurskaimilla suoritettava kivenmurskaus tapahtuu puristamalla kiviaines kiinteän ja liikkuvan leuan väliin. Kitaan syötetty kiviaines valuu alaspäin painovoiman ja liikkuvan leuan epäkeskeisen liikkeen vaikutuksesta. Yksi työnninlaattaisessa leukamurskaimessa puristusta tapahtuu samanaikaisesti leuan ylä- ja alaosassa antaen sille paremman kapasiteetin verrattuna samankokoiseen kaksi työnninlaataiseen leukamurskaimeen. Yhden työnninlaatan leukamurskain on siis aggressiivisempi kuin kahden työnninlaatan versio. (Metso 2023C, 42.) Kuva 4 havainnollistaa näiden kahden erityyppisen leukamurskaimen murskaustyylin hyvin.



Single toggle crusher.



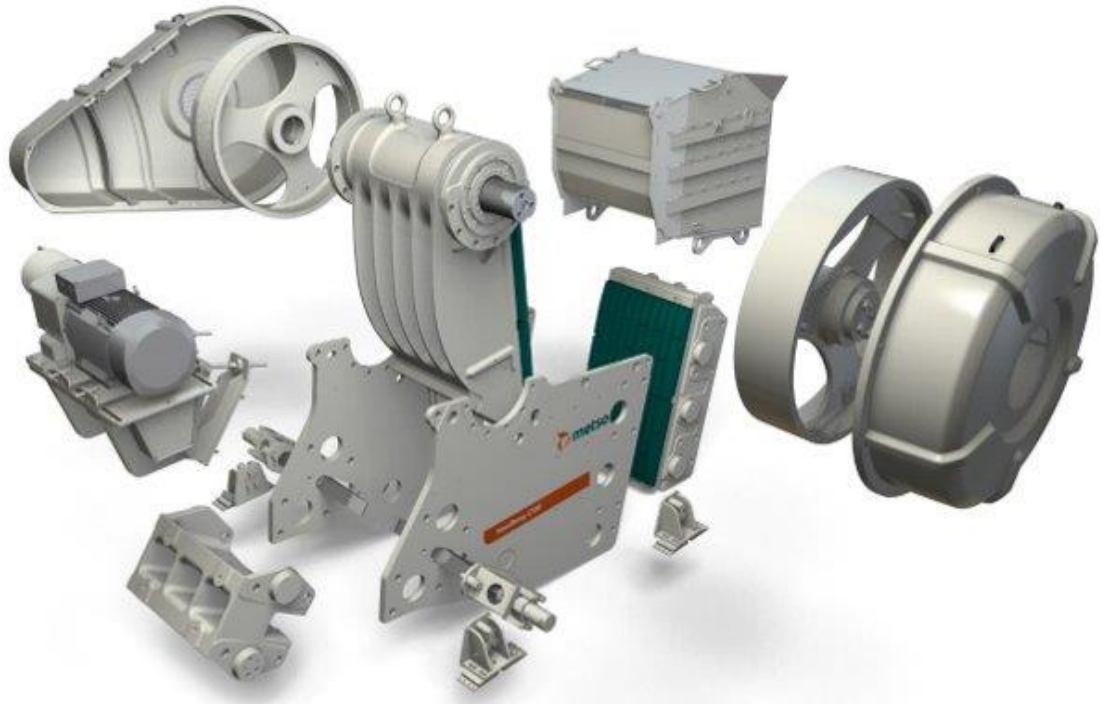
Double toggle crusher.

KUVA 4. Kivenmurskaus leukamurskaimilla (Metso 2023c, 42).

Edellä esitetyistä kuvista 3 ja 4 voidaan huomata näistä kahdesta leukamurskain mallista, että yksi työnninlaattainen leukamurskain on rakenteeltaan paljon yksinkertaisempi ja kompaktimpi. Yksinkertaisuuden ja luotettavuuden takia yksi työnninlaattaiset leukamurskaimet ovat globaalisti yleisesti käytettyjä murskaimia esimurskaukseen. Kaikki Metson valmistavat Nordberg C -sarjan leukamurskaimet ovat yksi työnninlaattaisia leukamurskaimia (Metso 2023a).

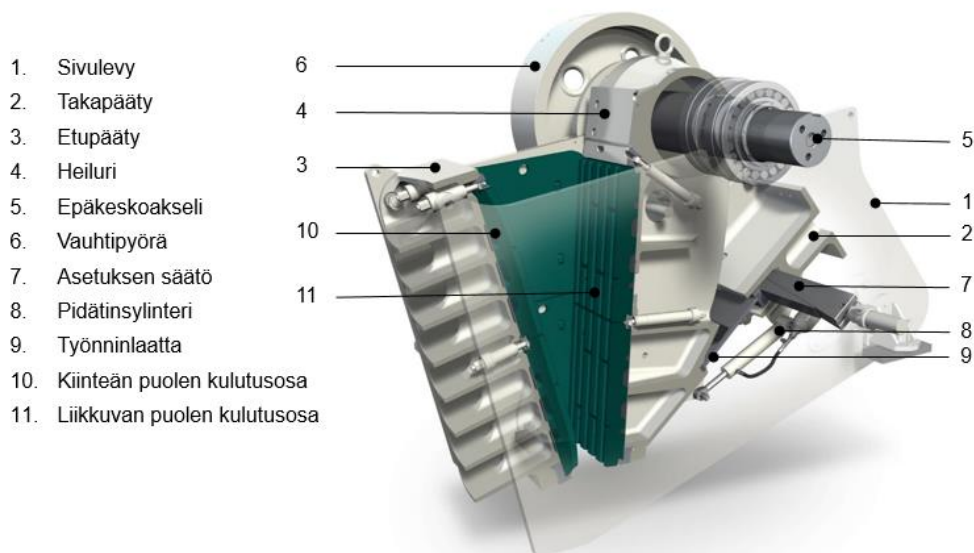
2.3 Nordberg C-sarja

Nordberg C-sarja on Metson leukamurskaimien tuoteperhe, johon kuuluu tällä hetkellä yhdeksän erilaista leukamurskainmallia. Tuoteperheen mallien nimeäminen on sidoksissa syöttöaukon leveyteen, viitaten karkeasti murskaimella saavutettavaan kapasiteettiin. Esimerkiksi C106 leukamurskaimen syöttöaukon leveys on 106 cm ja C160 leukamurskaimen 160 cm. Metson valmistamien leukamurskaimien rakenne on modulaarinen tarkoittaen, että C-sarjan leukamurskain koostuu pitkälti pulttiliitoksilla yhteen kytkeytyistä pääkomponenteista. Rakenteen modulaarisuudella saavutetaan korkea konfiguroitavuusaste yksilöllisiä tarpeita varten. Modulaariset ominaisuudet ovat rakennettu leukamurskaimen **peruskoonpanon** ympärille. (Metso 2023a). Kuva 5 havainnollistaa Metson C-sarjan leukamurskaimen modulaarisen rakenteen.



KUVA 5. C-sarjan leukamurskaimen räjäytyskuva (Metso 2023d, 19).

Leukamurskaimien peruskokoonpanon rakenne on laatikkomainen, koostuen kahdesta sivulevystä, etupäädystä, takapäädystä sekä näiden väliin asennetusta heilurin ja epäkeskoakselin kokoonpanosta. Kuvassa 6 on havainnollistettu Metson C -sarjan leukamurskaimen peruskokoonpanon pääkomponentit. Peruskokoonpanolla tarkoitetaan rakennetta, jossa mukana on vain murskaimen ydin-komponentit. Peruskokoonpanoon ei kuulu esimerkiksi kuvassa 5 esiintyvää sähkömoottoria, hihnasuojia tai syöttösuppiloa. (Metso 2023d, 1–32.)



KUVA 6. C-Sarjan leukamurskaimen pääkomponentit (Metso 2023a).

Pidätinsylinteri on osa asetuksen säädön kokoonpanoa, joka sijaitsee leukamurskaimen takapäädystä. Asetuksen säätö on perusmalleissa toteutettu kahdella toisiaan vasten liukuvalla kiilalla. Kun kiiloja ajetaan toisiaan vasten, työntyvät heilurin alaosa lähemmäs murskaimen etupäättyä pienentäen **asetusta**. Kun asetusta pienennetään, murskauksen tuotoksena saatava kivikoko pienenee. (Metso 2022, 22–24.)

Asetuksen säädön ja heilurin välissä sijaitseva työnninlaatta toimii murskaimen sulakkeena sekä murskausvoimien pääasiallisena vastaanottajana (Metso 2022, 24). Työnninlaatta lepää heilurin ja kiilojen välissä kitka kosketuksien varassa, joten sen paikallaan pitämiseksi tarvitaan jokin ulkoinen voima. **Hydraulisella** asetuksensäädöllä konfiguroiduissa konemalleissa työnninlaattaa paikallaan pitää pidätinsylinteri. Se sijaitsee heilurin alaosan ja takapäädyn välissä, työnninlaatan alapuolella. Osaa Nordberg C-sarjan konemalleja on saatavilla myös vaihtoehtoisesti **mekaanisella** asetuksen säädöllä tai **automaattisella** asetuksen säädöllä eli ASC optiolla. Näissä optioissa pidätinsylinteri on korvattu pohjimmiltaan samaa virkaa toimittavilla komponenteilla. Suurin osa Metson toimittamista koneista on hydraulisella asetuksen säädöllä konfiguroituja koneita. (Metso 2022, 80–100.)

3 PIDÄTINSYLINTERI

3.1 Pidätinsylinterin toiminta ja rakenne

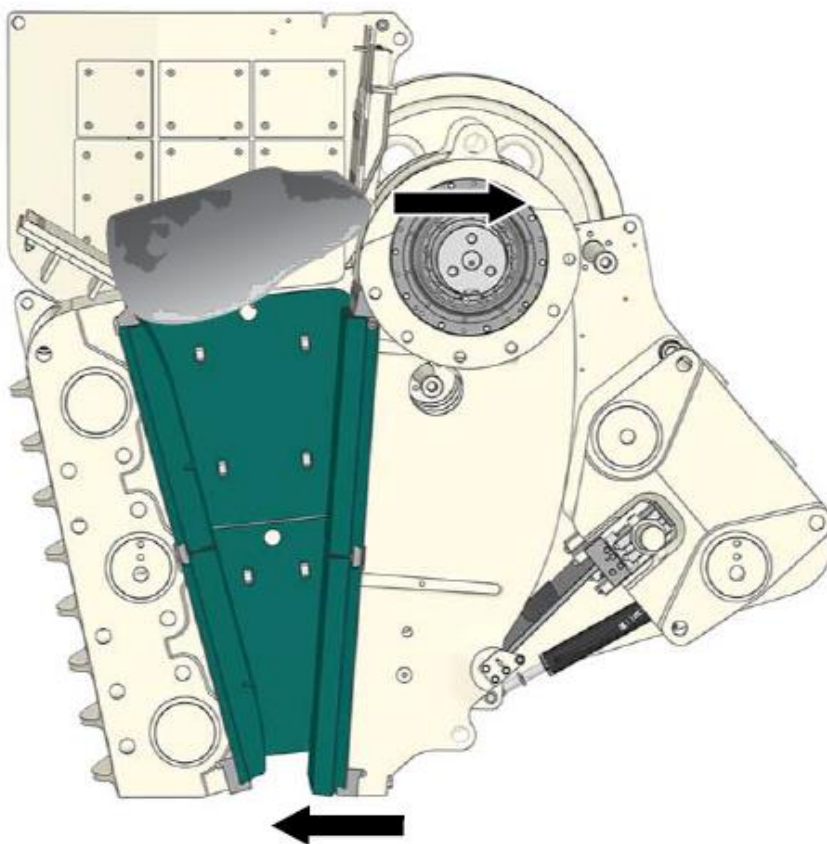
Pidätinsylinteri on yksi leukamurskaimen toiminnan kannalta oleellisimmista komponenteista. Sen tehtävänä on pitää työnninlaatta paikallaan, sekä toimia heilurin alapäässä iskunvaimentajana ja liikkeen palauttajana. (Metso 2022, 82) Pidätinsylinteriä kutsutaankin tästä syystä joskus vaihtoehtoisesti myös nimellä palautinsylinteri. Tässä työssä käytetään kuitenkin nimitystä pidätinsylinteri sen todellista toimintaa paremmin kuvaavamman termin vuoksi.

Pidätinsylinteri on kiinnitetty murskaimen takapäädyn ja heilurin väliin yksinkertaisilla tappiliitoksilla. Pidätinsylinterin kiinnityskohtien komponentit vaihtelevat hiukan konemalleittain, mutta pääasiallisesti se on toteutettu saman tyyppisesti kaikissa C-sarjan koneissa. Suurimpina eroina rakenteissa pienempien ja suurempien konemallinen välillä on tappiliitoksien rasvaus ja käytettyjen laakereiden tyyppi. Pienemmissä koneissa liitokset ovat kuivat eli niihin ei ole suunniteltu voitelua. Voitelemattomissa malleissa on käytetty huoltovapaata nivellaakerointia takapäädyn kiinnityksessä ja heilurin puolella laakeroimatonta tappiliitosta. Isommissa koneissa toinen tai molemmat päät liitoksista on voideltu, ja ne on liuku-laakeroitu joko vain takapäädyn osalta tai kummastakin päädystä. (Metso 2022, 80–85,190.)

3.2 Liitoskohtiin kohdistuvat voimat

Pidätinsylinterin kiinnityskohdille kohdistuvat voimat aiheutuvat pääsääntöisesti sylinterin käyttöpaineesta. C-sarjan pidätinsylintereille on määritelty maksimi käyttöpaineet ohjekirjoissa, joiden perusteella niitä käytetään. (Metso 2022, 97.) Asetettu käyttöpaine ei kuitenkaan ole sylinterissä esiintyvä todellinen maksimi paine. Tämä johtuu siitä, että murskaustapahtumassa sylinteri kuormittuu hetkellisesti dynaamisten voimien vaikutuksesta. Tällöin paine pidätinsylinterissä vaihtelee asetetun paineen kummallakin puolella. Sylinteriä suojataan liian korkealta paineelta paineenrajoitusventtiilin avulla (Metso 2022, 97–100.)

Kuten luvussa kaksi mainittiin, murskaustilanteessa välilaatta toimii päätoimisena murskaustapahtumasta aiheutuvien voimien vastaanottajana, sekä välittäjänä. Osa kuormituksesta kuitenkin kohdistuu myös pidätinsylinterin vastaanotettavaksi murskauksesta aiheutuvien epäsäännöllisyyksien johdosta. Yksi mahdollinen pidätinsylinteriä kuormittava murskaustilanne on "pitman tipping". Siinä heilurin ja etupäädyn yläosaan jää jumiin liian suuri syöte, joka saa heilurin kääntymään äkillisesti. Tämä kuormitus voi aiheuttaa pidätinsylinterin rikkoutumisen. (Metso 2022, 67.) Kuvassa 7 on esiteltyä, kuinka heiluri kääntyy liian suuren syötteen vuoksi.

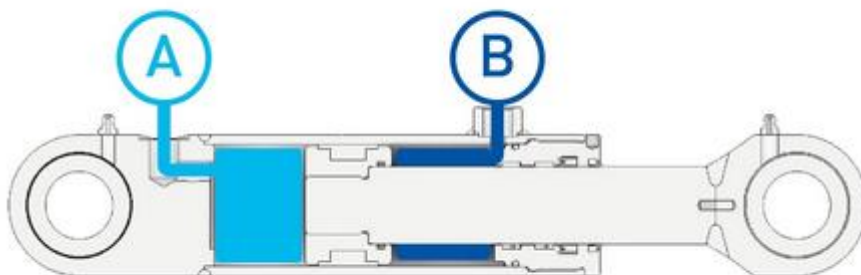


KUVA 7. Pitman tipping (Metso 2022, 67).

Kuvassa 7 havainnollistettu pitman tipping ja muut murskauksesta johtuvat erikoiskuormitustapaukset pidätinsylinterille ovat kuitenkin hankalasti arvioitavissa, joten niiden laskeminen esimerkiksi FEM-laskentaohjelmiston avulla on parhaimmillaankin vain hyvä arvaus. Tämän vuoksi työssä keskitytään tutkimaan pidätinsylinterin kuormitusta todennäköisimmän kuormitustilanteen pohjalta.

Kuten edellä mainittiin, pidätinsylinterin kuormitus syntyy suurimmaksi osaksi sylinterin käyttöpaineesta. Käyttöpaineen vaihtelu voidaan ottaa huomioon lisäämällä käyttöpaineen maksimiarvoon dynaaminen kuormituskerroin. Pidätinsylinterissä tapahtuvalle paineen vaihtelulle määritettiin dynaaminen kuormituskerroin Koivumäen (2023) ja Heinosen (2023) arvioiden mukaisesti.

Pidätinsylinterin paineen aiheuttamat voimat liitoskohdissa saadaan laskemalla tällä dynaamisella kuormituskertoimella varustetulla paineen arvolla sylinterin tuottamat reaktivoimat. Kaksitoimisen hydraulisynterän reaktivoimia laskettaessa on huomioitava mihin suuntaan sylinteriä käytetään, sillä voima määräytyy paineen ja sen vaikutuspinta-alan perusteella (yhtälö 2). Kaksitoimisella hydraulisynterillä tarkoitetaan sylinterityyppiä, jota voidaan operoida sylinterin kumpaankin aksiaalissuuntaan paineistetun öljyn avulla. Kaksitoimisessa hydraulisynterissä männän kummallakin puolella on öljyn syöttö- ja poistoaukot, jotka mahdollistavat öljyn säätelyn kummallakin puolella sylinterin mäntää. (Hydroline n.d). Kuvassa 8 on esitelty kaksitoiminen hydraulisynteri.



KUVA 8. Kaksitoiminen hydraulisynteri (Hydroline n.d).

Pidätinsylinteri vetää heiluria kohti takapäättyä, eli sitä käytetään kuvan 8 mukaisesti männän varren puolelta (syöttöaukko b). Sylinterin käytön suunta voidaan myös havainnoida käyttöohjekirjan perusteella (Metso 2022, 83). Reaktivoimien laskemiseksi tarvitaan sylinterin käyttöpaineen lisäksi pinta-ala. Se voidaan laskea yhtälön (1) perusteella, kun tiedetään männän varren halkaisija sekä sylinterin sisähalkaisija

$$A = \pi \cdot \frac{(D_s^2 - d_v^2)}{4} \quad (1)$$

jossa D_s on sylinterin sisähalkaisija ja d_v sylinterin varren halkaisija (Mäkelä, Soinen, Tuomola & Öistämö 2005, 99).

Liitoskohtiin kohdistuvat voimat saadaan nyt laskemalla pidätinsylinterin tuottamat voimareaktiot edellä määritellyllä paineella yhtälön (2) mukaisesti

$$F = p * A \quad (2)$$

jossa F on normaalivoima p paine ja A paineen vaikutuksen alainen pinta-ala (Mäkelä ym. 2005, 18).

3.3 Pintapaineen laskeminen

Edellisessä kappaleessa laskettujen voimien avulla voidaan laskea seuraavaksi liitoskohdissa esiintyvät pintapaineet. Kahden tasaisen pinnan välillä suoritettavissa tarkasteluissa voidaan pintapaine laskea yhtälöllä (3). Myös pidätinsylinterin kaltaisissa liitoksissa voidaan pintapainetta arvioida tämän yhtälön avulla. Käytettäessä yhtälöä (3), pinta-alaksi lausekkeeseen määritellään tapin projektion pinta-ala. Projektio pinta-alaksi määritellään yleensä puolet tapin pinnasta. (Kivioja 2009, 19.)

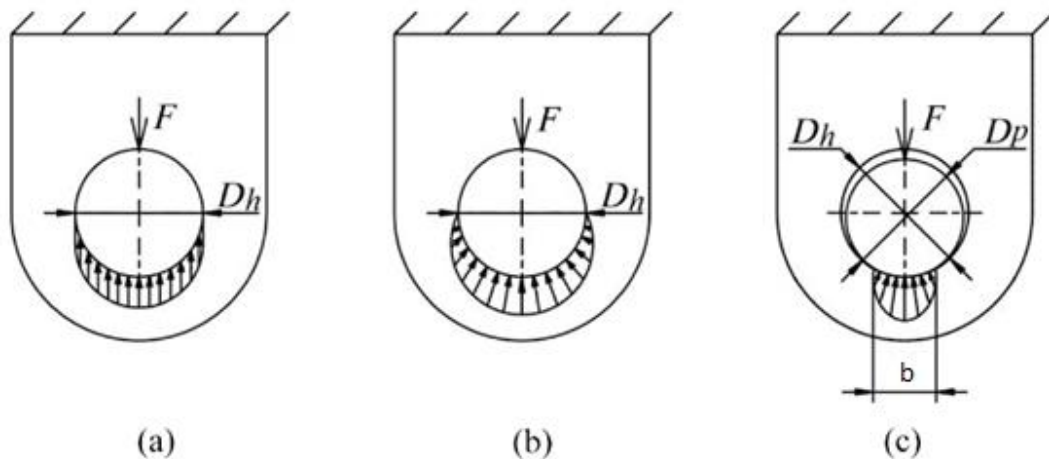
$$p = \frac{F}{A_p} \quad (3)$$

jossa F on normaalivoima ja A_p kosketuspinta-ala (Kivioja 2009, 19).

Yhtälössä (3) oletetaan voiman jakaantuvan tasaisesti näennäiselle pinta-alalle. Todellinen kosketuspinta-ala ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin näennäinen pinta-ala. Yhtälö (3) ei myöskään anna täysin todenmukaista vastausta, jos vähintään toinen pinnoista on kaareva. Jos liitoksessa esiintyvistä maksimi paineesta halutaan yhtälöä (3) tarkempi arvio, on otettava huomioon toleranssit ja materiaalien

ominaisuudet. Tällöin on käytettävä esimerkiksi Hertzin kosketusjännitysteorian mukaisia yhtälöitä. (Kivioja 2009, 19.)

Kohdassa **a** (kuva 9) on esitelty perinteinen tasainen paineen jakautuminen yhtälön (3) mukaisesti. Mallissa **b** on otettu huomioon, että paine ei jakaudu tasaisesti kontaktialueella, vaan suurin paine esiintyy normaalivoiman kohdalla. Viimeisessä mallissa **c** esitetään Hertzin kosketusteorian mukainen paineen jakauma. Siinä otetaan huomioon tapin ja reiän toleranssit sekä materiaaliominaisuudet. Tällöin saadaan melko todenmukainen laskentatuloks liittoksen maksimaalisesta pintapaineesta. Hertzin teoria on osoitettu olevan todenmukainen arvio maksimaalisesta pintapaineesta elementtimenetelmän avulla ja sitä voidaan soveltaa suunniteltaessa tappiliitoksia. (Li, Huang, Zhao & Wang 2022.)



KUVA 9. Tappiliitoksen pintapaine mallit (Li ym. 2022.)

Pidätinsylinterin liitoskohtien paineet laskettiin Hertzin teorian mukaisilla yhtälöillä. Kahden kaarevan toisiaan vasten kosketuksissa olevan pinnan tapauksessa käytetään Hertzin kosketusjännityksen laskemiseen niiden yhdistettyä halkaisijaa d' . Se voidaan määrittellä yhtälön (4) mukaisesti

$$d' = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{-d_2} \quad (4)$$

jossa d_1 on tapin halkaisija ja d_2 on laakerin sisähalkaisija. (Kivioja, Kivivuori & Salonen. 2007, 28; Abdelbary & Li 2023, 79–90.)

Materiaalin elastisuus otetaan huomioon laskemalla materiaalien yhteenlaskettu kimmokerroin. Tämä voidaan suorittaa yhtälön (5) mukaisesti

$$E' = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \quad (5)$$

jossa v_1 on Poissonin suhde tapin materiaalille, v_2 on Poissonin suhde laakerin materiaalille, E_1 on tapin materiaalin kimmokerroin ja E_2 laakerin materiaalin kimmokerroin. (Kivioja ym. 2007, 28; Abdelbary & Li 2023, 79–90.)

Kun tiedetään elastisuuden ja toleranssien perusteella määritellyt yhteistekijät voidaan määrittellä kuvassa 9 esiintyvä kontaktipinnan tekijä b , joka saadaan yhtälöstä (6)

$$b = \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L} \cdot \frac{E'}{d'}} \quad (6)$$

jossa F on normaalivoima ja L on kosketuspinnan pituus (Kivioja ym. 2007, 28; Abdelbary & Li 2023, 79–90).

Laskennassa suurin mahdollinen paine saadaan, kun valitaan tapin halkaisijaksi toleranssien perusteella pienin mahdollinen halkaisija ja reiälle suurin mahdollinen halkaisija. Eli otetaan huomioon suurin mahdollinen liitoskohdassa esiintyvä vällys. Kosketuspinnan tekijän b määrittämisen jälkeen voidaan laskea Hertzin kosketusteorian mukaan laakerin ja tapin välinen maksimi pintapaine, yhtälön (7) mukaisesti.

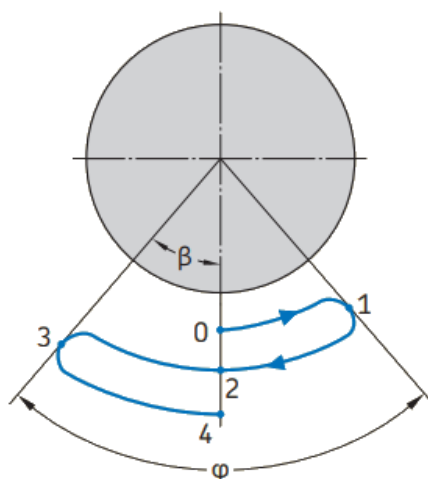
$$P_{max} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot b} \quad (7)$$

jossa P_{max} on maksimaalinen pintapaine, F on normaalivoima, L on kosketuspinnan pituus. (Kivioja ym. 2007, 28; Abdelbary & Li 2023, 79–90.)

Edellä esitellyt yhtälöt (4, 5, 6 ja 7) ovat johdettu Hertzin kosketusteorian pohjalta pidätinsylinterin pintapaineen laskentaan, joten ne eivät välttämättä esiinny merkityissä lähteissään sellaisenaan. Tämä johtuu siitä, että Hertzin kosketusteoriaan liittyvät yhtälöt esitetään aineistoissa yleisessä muodossa, joten niitä on sovellettava pidätinsylinterin liitoskohtien pintapaineen laskemiseksi. Yleisenä huomiona Hertzin kosketusteorian mukaisia laskutoimituksia suoritettaessa on, että pienet muutokset halkaisijoissa d_1 ja d_2 voivat aiheuttaa merkittäviä muutoksia lopullisessa pintapaineessa. Tulosten tarkastelussa on siis oltava kriittinen ja otettava huomioon, että todelliset dimensiot eivät välttämättä vastaa laskettuja pahimpia mahdollisia tilanteita.

3.4 Liukuminen liitoskohdissa

Murskaussyklin aikana pidätinsylinteri liikkuu sisään ja ulos sen aksiaalissuunnassa sekä sen suhteellinen kulma liitoskohtiin nähden vaihtelee heilurin tekemän epäkeskoliikkeen seurauksesta. Tällöin liitoskohdissa, laakeroinnin ja kiinnitystapin välillä tapahtuu oskilloivaa liikettä (kuva 10). Oskilloinnilla yleisesti tarkoitetaan toistuvaa edestakaista liikettä kahden pisteen välillä (Cambridge Dictionary n.d). Pidätinsylinterin tapauksessa oskilloinnilla tarkoitetaan laakerin ja kiinnitystapin pintojen välillä tapahtuvaa pientä edestakaista kulman vaihtelua (kuva 10).

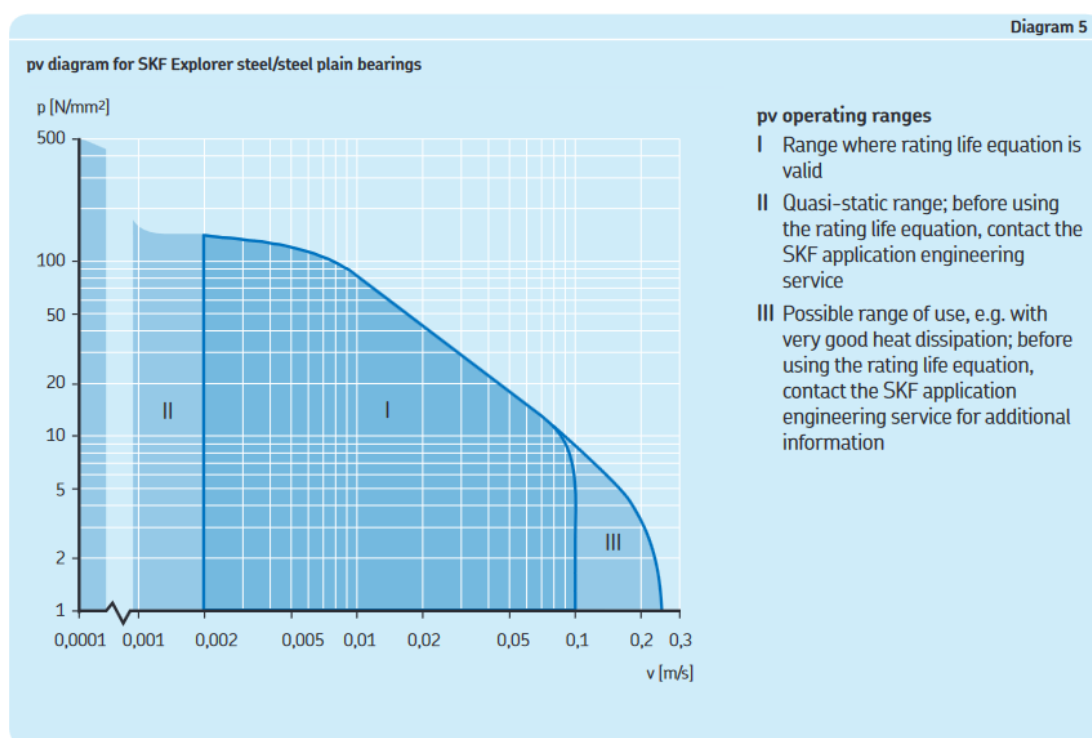


φ = angle of oscillation = 2β

A complete oscillation is from point 0 to point 4 and = 4β

KUVA 10. Oskillaatio (SKF Group, 7).

Laakerointia suunniteltaessa on otettava huomioon liukupintojen välinen liukumisnopeus, kuormitus sekä niiden tyyppi. Kuviosta 1 huomataan, esimerkiksi liikenopeuden kasvaessa laakerin kuormankestokyvyn laskevan. Liukumisnopeuden ja kuormituksen vaikutusta laakerin käyttöikään voidaan arvioida pv-luvun avulla. Pv-luku on liukumisnopeuden v ja paineen p suhde, jota käytetään yleisesti esimerkiksi liukulaakerien määrittämisen yhteydessä. SKF:n ilmoittama ”basic rating life” lasketaan pääasiassa paineen ja liukumisnopeuden perusteella ja se ilmoitetaan käyttötunteina tai oskilloinnin tapauksessa syklien määränä. (SKF Group 2019, 5–11.) Kuviossa 1 on esitelty pv-käyrä eräälle SKF valmistamalle laakerille.



KUVIO 1. Pv-käyrä SFK Explorer sarjan laakerille. (SKF Group 2019, 11).

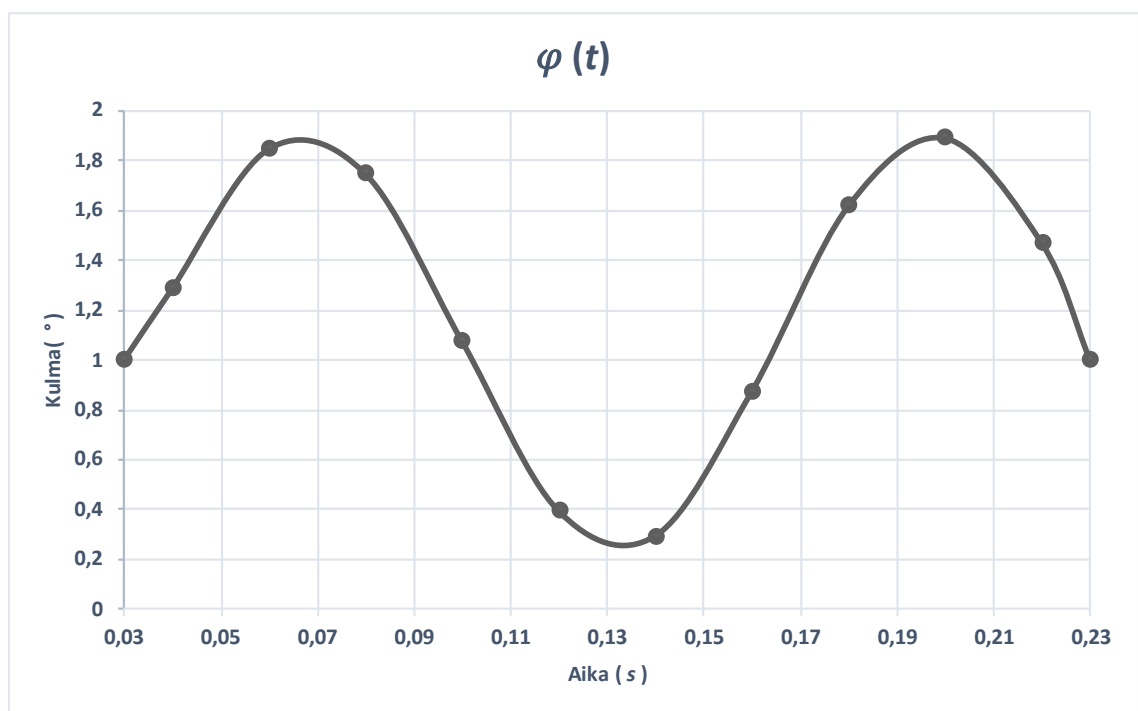
Useiden laakerivalmistajien sivuilta löytyy kuvion 1 kaltaisia pv-taulukkoja. Niiden avulla suunnittelija voi määrittää laskennallisen kuormituksen ja liikenopeuden perusteella laakerin soveltuvuuden kohteeseen.

3.5 Liikkeen simulointi

Liitoskohdissa tapahtuva oskillointi selvitettiin suorittamalla rakenteelle liikesimulaatio. Se tehtiin Siemens NX -ohjelmiston Animation Designer -lisäosan avulla.

Simulointi aloitettiin rakentamalla konekohtaiset apumallit, joihin liitettiin kaikki liitoskohtien liikkeeseen vaikuttavat komponentit. Niiden välille määriteltiin mekaaniset liikesuhteet, sekä mitkä komponentit pysyvät paikallaan. Varsinainen liike toteutettiin asettamalla epäkeskoakselille käyttöohjekirjan mukainen pyörintänopeus.

Lopuksi ohjelma asetettiin mittaamaan liitoskohdissa tapahtuva suhteellinen kulmanmuutos ajan funktiona. Tämä suoritettiin määrittelemällä normaalivektori laakerin pinnalle ja mittaamalla sen ja liikkumattoman pinnan välistä suhteellista kulman muutosta. Kuviossa 2 on saadun mittausdatan perusteella piirretty kuvaaja kiertokulmasta ajan hetkellä t .



KUVIO 2. Kiertokulma φ ajan hetkellä t

Kuvio 2 havainnollistaa hyvin laakerin ja tapin välillä tapahtuvan oskilloivan liikkeen ja siitä voidaan lisäksi huomata sen muistuttavan paljon siniaaltoa. Kiertokulman vaihtelun eli oskillointikulman voidaan kuvaajasta huomata olevan noin 1,5 astetta. On myös hyödyllistä tarkastella todellista liukumismatkaa, joka saadaan laskettua yhtälöstä (8)

$$b_o = \frac{\varphi}{180^\circ} \cdot \pi \cdot r \quad (8)$$

jossa φ on kiertokulma ja r kiinnitystapin säde (Mäkelä ym. 2005, 18)

Mittausdatan perusteella voidaan laskea kulmanopeus derivoimalla kulmanvaihtelu ajan suhteen yhtälön (9) mukaisesti

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \quad (9)$$

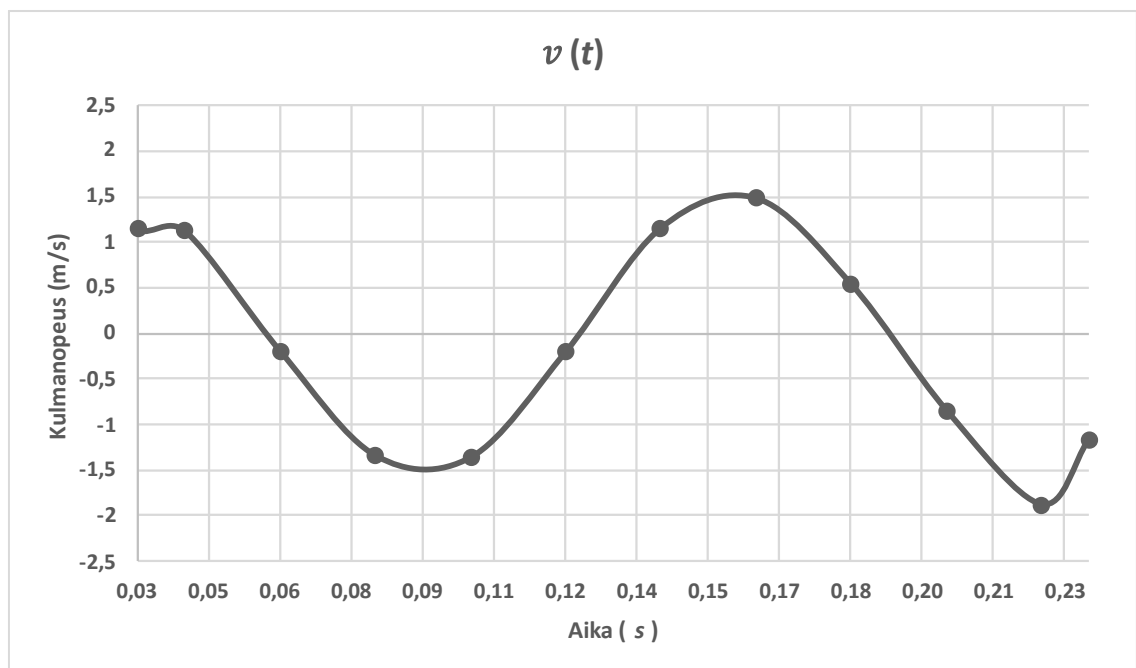
jossa $\Delta\varphi$ on kulman muutos ja Δt ajan muutos (Mäkelä ym. 2005, 92).

Oskillointinopeus laakerin ja kiinnitystapin välissä saadaan laskettua kulmanopeuden ja kiinnitystapin säteen perusteella yhtälöstä (10)

$$v = \omega \cdot r \quad (10)$$

jossa ω on kulmanopeus ja r on laakerin sisäsäde (Mäkelä ym. 2005, 92).

Kuviossa 3 on mittausdatan perusteella laadittu kuvaaja oskillointinopeudesta ajan funktiona.



KUVIO 3. Oskillointinopeus v ajan hetkellä t .

Oskillointinopeudesta piirretystä kuvaajasta (kuvio 3) voidaan huomata edellä mainittu nopeuden hetkellinen pysähtyminen suunnan muuttuessa. Kuvaajasta voidaan myös havaita nopeuksien nousevan hetkellisesti verrattain nopeiksi liitoskohdissa.

Edellä lasketun ja kuviossa 3 esiintyvän oskillointinopeuden perusteella voidaan arvioida liitoskohdissa tapahtuvan liukumisen maksimaalista nopeutta. Laakereita mitoitettaessa pv-käyrän avulla käytetään kuitenkin usein keskiarvonopeutta hetkellisen maksiminopeuden sijasta. (SKF Group 2019, 8.) Laakerivalmistajilta löytyy omia laskukaavoja keskiarvonopeuden laskemiseksi, mutta esimerkiksi kuvion 1 laakerille voidaan keskiarvonopeus v_o laskea SKF:n perusteella yhtälöstä (11)

$$v_o = 8,73 \cdot 10^{-6} \cdot d_k \cdot \left(\frac{4\beta}{\Delta t}\right) \quad (11)$$

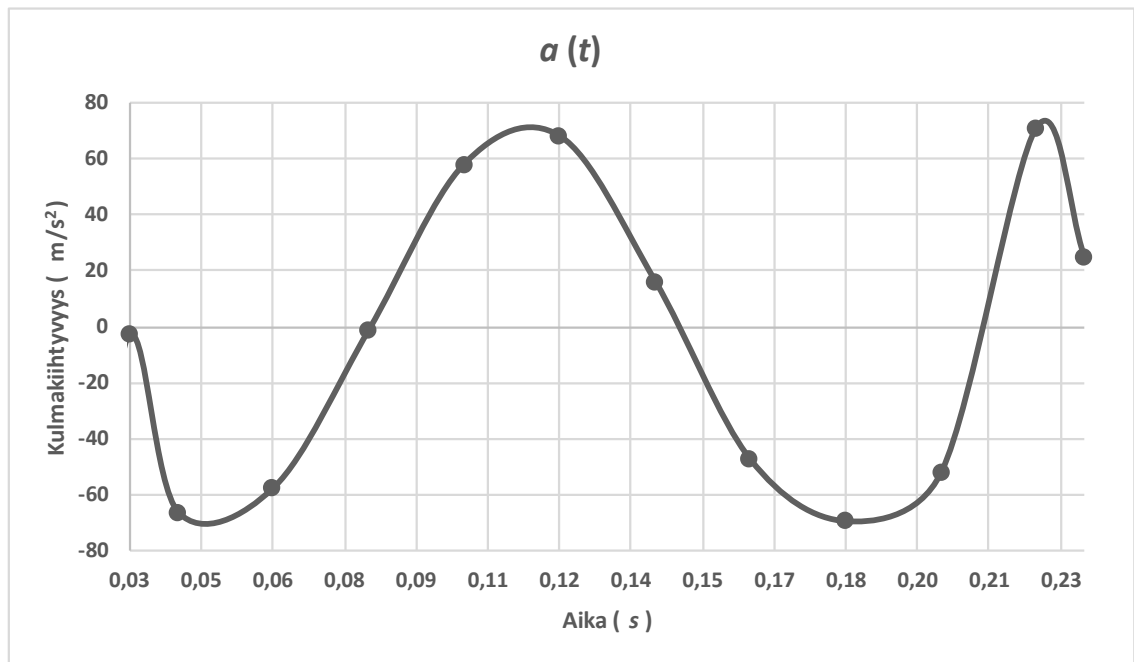
jossa d_k on laakerin sisähalkaisija, β on kiertokulman puolikas ja Δt ajan muutos. (SKF Group 2019, 8.)

Kulmavaihtelun ja oskillointinopeuden lisäksi kiinnostavaa on tietää oskillointikiihtyvyyden arvo liitoskohdissa murskaimen käytön aikana. Se saadaan selville derivoimalla aiemmin laskettu kulmanopeus ajan suhteen yhtälön (12) mukaisesti

$$a = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (12)$$

jossa $d\omega$ on kulman muutos ja dt ajan muutos (Mäkelä ym. 2005, 92).

Kuviossa 4 on esitelty mittausdatan perusteella laadittu kuvaaja oskillointikihtyvyydestä ajan funktiona.



KUVIO 4. Oskillointikiikkyvyys a ajan hetkellä t

Oskillointikiikkyvyydestä piirretystä kuvaajasta (kuvio 4), voidaan havaita liikumisen suunnan muuttuessa todella korkeita kiikkyvyyden arvoja. Kuvaajasta voidaan arvioida kiikkyvyyden arvojen saavuttavan hetkellisesti noin 70 m/s^2 . Tämä kiikkyvyyden arvo on esimerkiksi hiukan yli seitsemänkertainen maanmittauslaitoksen ilmoittamaan Suomessa vallitsevaan keskimääräiseen putoamiskiikkyvyyteen $g \approx 9,82 \text{ m/s}^2$ nähden (Poutanen, Bilker-Koivula & Ruotsalainen). Tarkkojen mittapisteiden arvojen perusteella voidaan laskea liitoskohdissa tapahtuvan hetkellisesti yli 7 g :n kiikkyvyyksiä. Oskilloivan liikkeen sekä korkeiden hetkellisten Oskillointinopeuksien ja -kiikkyvyyksien yhteyttä kulumiseen käsitellään seuraavien lukujen yhteydessä tarkemmin.

4 KULUMINEN

4.1 Tribologia

Kulumista, kitkaa ja voitelua tutkivaa tieteen osa-aluetta kutsutaan tribologiaksi. Tribologia on suhteellisen uusi tieteen osa-alue, joka määriteltiin omaksi tieteenalaksi vuonna 1967. Nimi tribologia on käännetty englanninkielisestä termistä 'tribology', alun perin se kuitenkin juontuu kreikankielisestä termistä 'tribos'. Tämä kreikankielinen termi 'tribos' tarkoittaa hankausta ja liukumista. (Stachowia & Batchelor 2005, 2.) Tribologian alueelle kuuluvat ongelmat vaativat erialojen tietämystä ja se "yhdistää fysiikan, kemian materiaalitekniikan, koneenelinopin ja tuotekehityksen omaksi insinööritieteekseen" (Kivioja 2007,11).

Kuluminen on yleinen termi, jolla tarkoitetaan kappaleen pinnalla tapahtuvaa materiaalin irtoamista, kun kaksi pintaa liukuvat toisiaan vasten (SFS-ISO 10825. 2012, 5). Kuluminen ilmentyy materiaalihäviönä ja kuluminen onkin määritelmänsä mukaisesti materiaalihukkaa (Kivioja ym. 2007, 97). Toisiaan vasten liukuvien pintojen keskinäisestä vuorovaikutuksesta syntyy lähes poikkeuksetta aina kulumista. Jopa hyvin voidelluissa järjestelmissä kulumista ei pystytä välttämään täysin. (Buckley 1981, 429.)

Kulumisen täydellistä matemaattista tai fysikaalista mallia ei ole vielä pystytty määrittämään, sillä kulumiseen vaikuttaa lukuisia parametrejä ja niiden hallitseminen ja arvioiminen on usein hankalaa. Paljon kulumiseen ja kulumistapahtumiin liittyvää tietoa onkin vain empiirisen tutkimustiedon varassa. (Kivioja ym. 2007, 97.)

Kuluminen on yleinen ilmiö teollisuudessa, ja siitä syntyy merkittäviä kustannuksia kansantaloudellisesti. Saksalaisen BHFT:n raportin mukaan tribologisista syistä aiheutuvat kustannukset syövät teollisuusmaissa noin 4,5 % bruttokansantuotteesta. Nämä tappiot koostuvat pitkälti mekaanisen kunnossapidon kustannuksista sekä seisokkiajan aiheuttamasta tuottojen menetyksestä. (Kivioja ym. 2007,12, 97.)

4.2 Kulumistyytit

Kulumista tapahtuu koneenelimissä hyvin monenlaisissa olosuhteissa ja monella erilaisella mekanismilla, joista yleensä katsotaan yhden mekanismin hallitsevan kulumista. Hallitseva kulumismekanismi voi vaihdella kulumisen eri vaiheissa. (Kivioja ym. 2007, 100.)

Kulumisen voidaan jaotella monella tapaa ja sen luokitteluksi onkin olemassa useita erilaisia menetelmiä. Yleisimmät tavat luokitella kulumista on jaotella se kulumismekanismien mukaisesti tai vaihtoehtoisesti kulumista aiheuttavan liikkeen mukaisesti. (Kivioja ym. 2007, 100.) Jos luokittelu tehdään kulumista aiheuttavan liikkeen mukaisesti, voidaan se jakaa seuraavan jaotuksen mukaisesti kuuteen erityyppiseen tapaukseen:

- vierintä
- liukuminen
- värähtely
- iskukuormitus
- nestevirtaus
- nestevirtaus, joka sisältää kiinteitä partikkeleita (Kivioja ym. 2007, 100).

Jos kulumisen jaotellaan kulumismekanismien mukaisesti, voidaan se tehdä seuraavasti:

- abrasiivinen kulumisen
- adheesio kulumisen
- pintaväsymiskulumisen
- tribokemiallinen kulumisen (Kivioja ym. 2007, 100).

Kuitenkin joskus on perusteltua luokitella kulumismekanismit vielä tarkemmin etenkin, jos on tarvetta eritellä tribologista syistä johtuva kulumisen. Tällöin voidaan suorittaa jako Parikan ja Lehtosen (2000, 4–5) mukaan esimerkiksi näin:

- adhesiivinen kulumisen
- abrasiivinen kulumisen
- pintaväsyminen
- korroosiokulumisen

- eroosio
- fretting
- kavitaatio.

On olemassa vielä paljon muitakin menetelmiä luokitella kulumista ja siksi kulumista käsittelevässä kirjallisuudessa saattaakin törmätä samaa asiaa tarkoittaviin mekanismeihin eri nimityksillä. Etenkin englanninkielisessä kirjallisuudessa on käytetty paljon erilaisia termejä samoille tapahtumille. (Kivioja ym. 2007,97; Parikka & Lehtonen 2000, 5)

Abrasiivinen kuluminen

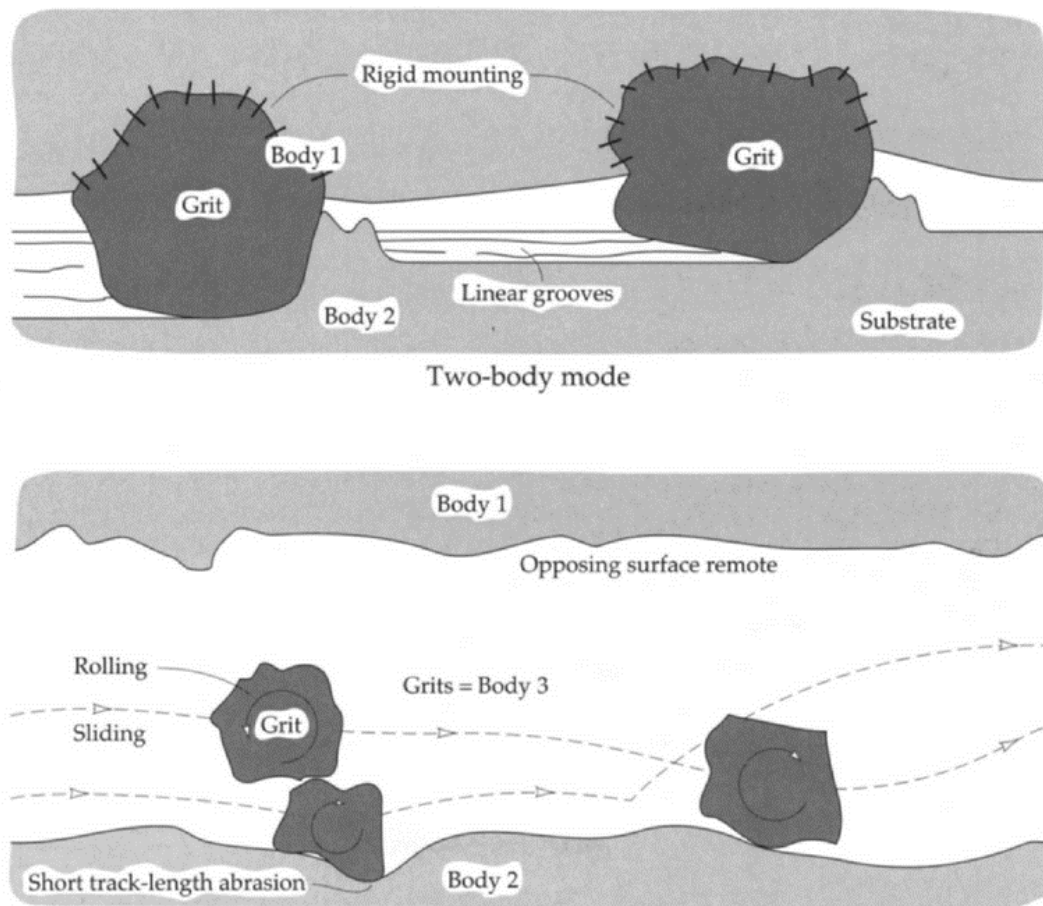
Abrasiivinen kuluminen on yleisin kulumisen muoto ja siitä johtuu myös suurin osa kulumisesta aiheutuvista kustannuksista teollisuudessa (Stachowiak & Batchelor 2005, 526). Abrasiivisessa kulumisessa kulumispartikkelin syntyminen voi tapahtua vastinpintojen tai niiden välissä olevien abrasiivien vaikutuksesta kyntämällä, leikkaantumalla tai hauraasti murtumalla (Kivioja ym. 2007,109). Mekanismien lisäksi abrasiivinen kuluminen voidaan jaotella kahteen alaryhmään: kahden- ja kolmen kappaleen kulumiseen. Kahden kappaleen abrasiivisessa kulumisessa kaksi pintaa, joista toinen on kovempi ja toinen pehmeämpi liukuvat toisiaan vasten. Kun nämä kaksi pintaa liukuvat toisiaan vasten ja niiden pinnankarheuksien huippujen tehdessä kontaktia toisiinsa, pinnoista pehmeämpi kuluu. Tällaisessa tilanteessa kuluminen tapahtuu, kun kovemman pinnan pinnankarheuden huiput uurtavat pehmeää pintaa normaalivoiman vaikutuksesta. (Kivioja ym. 2007, 108; Parikka & Lehtonen 2000, 8.) Kuva 11 esittää tyypillistä abrasiivisesti kyntämällä kulunutta pintaa.



KUVA 11. Abrasiivisesti kyntämällä kulunut pinta. (Kivioja ym. 2007,109)

Jos kahden toisiaan vasten liukuvien pintojen välissä on kumpaakin pintaa kovempia irtonaisia vapaasti liikkuvia kappaleita, jotka kuluttavat molempia pintoja, puhutaan kolmen kappaleen abrasiivisesta kulumisesta. Tällaisia irtonaisia todella kovia kappaleita usein syntyy kahden kappaleen abrasiivisen kulumisen tuotteena, kun pehmeämmästä pinnasta irronneet pienet partikkelit muokkauslujittuvat. Näitä kovia pintaa kuluttavia kovia partikkeleita kutsutaan abrasiiveiksi (Kivioja ym. 2007, 108–109.)

Englanninkielisessä kirjallisuudessa pintaa kuluttavista huipuista ja/tai erillisistä muokkauslujittuneista partikkeleista käytetään yleistermiä "grit". Tämä termi tarkoittaa sitä osaa pinnasta tai vaihtoehtoisesti kokonaan irtonaista partikkelia, joka aiheuttaa kulumista. (Stachowiak & Batchelor 2005, 505). Kuvassa 12 on esitetty kahden ja kolmen kappaleen abrasiivinen kulumisen.



KUVA 12. Kahden ja kolmen kappaleen abrasiivinen kuluminen. (Stachowiak & Batchelor 2005, 505.)

Kolmen kappaleen abrasiivinen kuluminen on usein saanut alkunsa kahden kappaleen abrasiivisesta kulumisesta. Myös samaan tapaan adhesiivinen tai tribo-kemiallinen kuluminen voi olla alkuperäinen syy muokkauslujittuneiden partikkelien syntyyn, jonka seurauksena kuluminen on kehittynyt kolmen kappaleen abrasiiviseksi kulumiseksi. (Kivioja ym. 2007, 108)

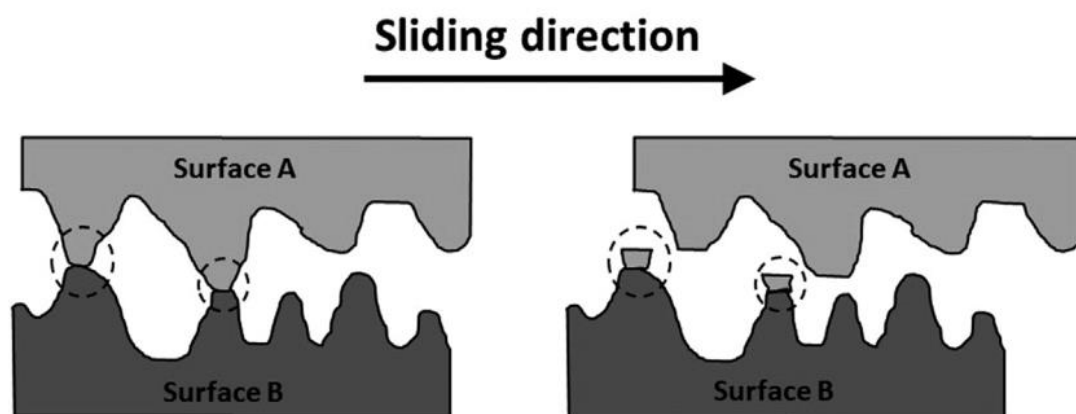
Abrasiivisen kulumisen voimakkuus on sidoksissa pitkälti materiaalien kovuuden H_m/H_a suhteesta toisiinsa. Tässä H_a tarkoittaa abrasiivisen eli kuluttavan pinnan kovuutta ja H_m metallisen vastinpinnan kovuutta. Kun kovuuksien suhteen ollessa alle 0,8 puhutaan voimakkaasta abrasiivisesta kulumisesta. (Kivioja ym. 2007, 109.) Abrasiivisen kulumisen ehkäisy voidaankin usein toteuttaa vain kasvattamalla kuluvan komponentin H_m pinnan kovuutta, jotta kovuuksien suhde on noin 0,8 kertainen tai hiukan suurempi, jolloin kuluminen on lievän abraasio kulumisen

alueella. Tämä keino ei aina kuitenkaan riitä yksinään, jos komponenttiin kohdistuva kuorma on suuri. (Stachowiak & Batchelor 2005, 526; Kivioja ym. 2007, 109.) Abrasiivista kulumista voidaan myös ehkäistä lisäämällä tai parantamalla kohteen voitelua sekä pinnankarheuden optimoinnilla. (Parikka & Lehtonen 2000, 9.)

Adhesiivinen kuluminen

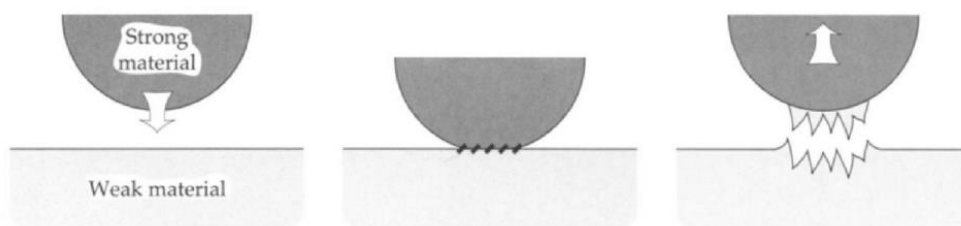
Adhesiivista kulumista tavataan yleisesti kohteissa, joissa kahden toisiaan vasten liukuvan pinnan välillä ei ole voitelua, se on toteutettu huonosti tai joissa esiintyy suuria kuormituksia. Tämän kaltaisia sovelluksia ovat esimerkiksi tappiliitokset, joissa kaksi metallista pintaa liukuvat toisiaan vasten. Metallit ovatkin yleisesti ottaen erityisen alttiita adhesiiviselle kulumiselle (Stachowiak & Batchelor 2005, 553.) Usein mekaaniset sovellukset, joissa kahden metallisen pinnan välinen voitelu epäonnistuu, johtavat adhesiiviseen kulumiseen. (Stachowiak & Batchelor 2005, 553.) Jos kuormitus tai kappaleiden välinen suhteellinen liike on pientä ei yleensä adheesiosta johtuvaa kulumista tapahdu, vaikka liitos olisikin voitelematon. (Kivioja ym. 2007, 104–107.)

Kaikkien metallien pinnoilla on pieni pintaa suojaava oksidikerros. Tämä oksidikerros suojaa metallia kulumiselta ja estää metallisien pintojen välillä tapahtuvia metalli - metalli- kosketuksia. Kun kaksi metallista pintaa liukuvat toisiaan vasten kuluu suojaava oksidikerros pois. Oksidikerroksen kulumisnopeus ja uusiutumisnopeus riippuu kuormituksen määrästä. Kuormituksen kasvaessa metallien pinnoille ei ehdi enää muodostua pintaa suojaavia oksidikerroksia ja pintojen välille muodostuu metalli - metalli kosketuksia. Näissä pintojen välisissä kosketuksissa pinnankarheuden huippujen välille syntyy adhesiivisiä liitoksia. Kun nämä liitokset repeävät, jostain muualta kuin alkuperäisestä liitoskohdasta syntyy kulumispartikkeleita. (Kivioja ym. 2007, 104–107.) Koska adhesiiviset liitokset syntyvät ensimmäisenä pinnankarheuden huippujen välille on pinnankarheudella suuri merkitys adheesiokulumiseen (Stachowiak & Batchelor 2005, 553). Kuvassa 13 on esitetty pinnankarheuksien huippujen välille syntyvät adhesiiviset liitokset sekä niiden repeytyminen liukumisen yhteydessä.



KUVA 13. Adhesiivisen kulumisen mekanismi (Abdelbary & Li 2023, 157).

Adhesiivista kulumista siis tapahtuu, kun adhesiivinen liitos pintojen välillä on vahvempi kuin toinen kontaktipinnoista ja liitos repeää muualta kuin alkuperäisestä kontaktikohdasta (kuva 13). Adhesiivisen liitoksen ollessa vahvempi kuin toinen kontaktimateriaaleista, liitoksen repeäminen tapahtuu heikomman materiaalin puolelta. Tällöin materiaalia siirtyy pehmeämmästä pinnasta kovempaan pintaan (kuva 14). Pehmeämmästä materiaalista siirtynyt partikkeli saattaa myös irrota ja toimia myöhemmin kovana kumpaakin pintaa kuluttavana partikkelina (3-body wear). (Kivioja ym. 2007, 104–107; Stachowiak & Batchelor 2005, 553.) Kuvassa 13 on havainnollistettu adhesiivisen materiaalin siirtyminen kappaleesta toiseen.

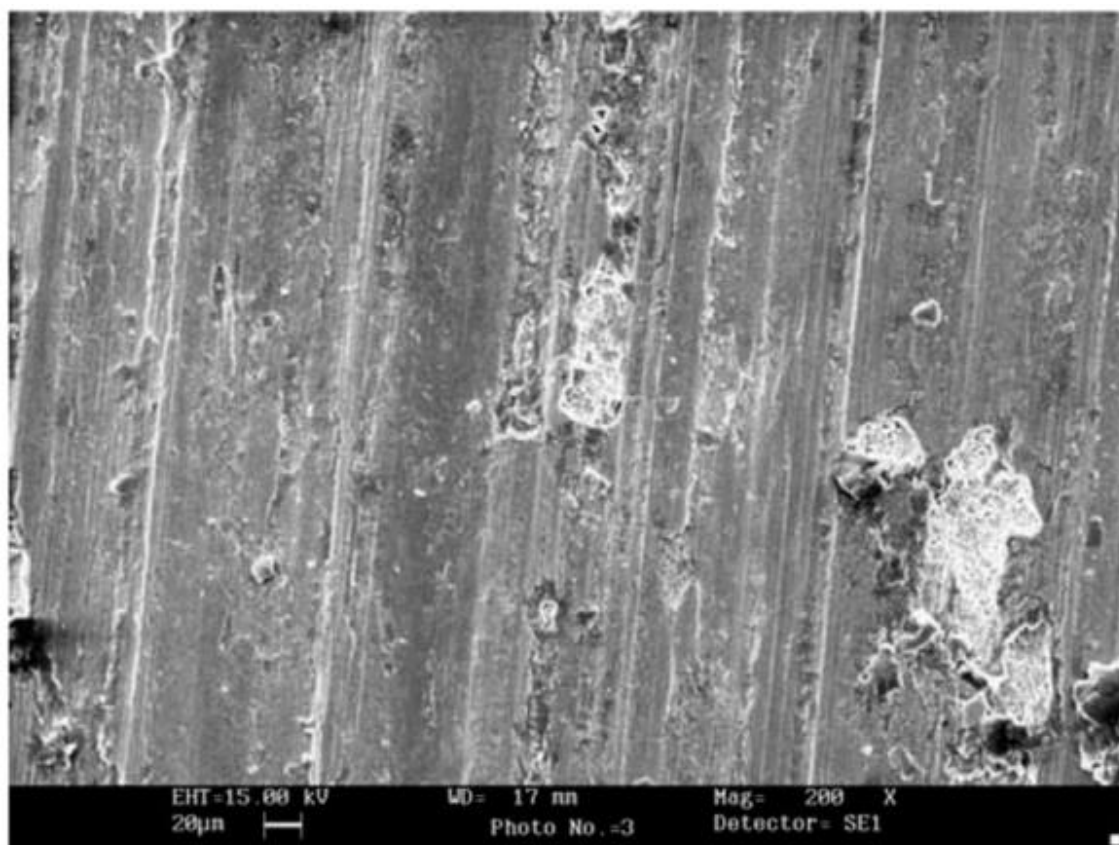


KUVA 14. Materiaalihukka adheesiovaikutuksesta (Stachowiak & Batchelor 2005, 554).

Kuormituksen kasvaessa edelleen ja kun pintojen väliltä puuttuu helposti leikkaantuvat pintakerrokset kuten oksidikerros tai öljy, laajentuu pinnankarheuden huippujen välillä tapahtuva plastisoituminen alla oleviin alueisiin ja pinnat yhtyvät toisiinsa. Tästä tapahtumasta käytetään termiä tahmaantuminen. Kitkaliitosten syntyessä tietyille alueelle jatkuvasti ja tahmaantumisen jatkuessa pinnat lopulta

leikkautuvat toisiinsa kiinni. Kun adhesiivii liitoksia syntyy samalla alueella useasti, kohdassa syntyy kitkalämpöä. Lämpötilan voi nousta lokaalisti todella korkealle ja täten myös tahmaantuminen ja kiinnileikkautuminen voi tapahtua odotettua aikaisemmin. (Kivioja ym. 2007, 104–107.)

Adhesiivista kulumista voidaan välttää oikealla materiaalivalinnalla ja pintojen välisen kitkan pienentämisellä. Kitkaa voidaan pienentää esimerkiksi laskemalla kuormitusta, kohteen oikeanlaisella voitelulla sekä parantamalla pinnanlaatua. (Kivioja ym. 2007, 106; Parikka & Lehtonen 2000, 6.) Kuvassa 15 on esitettyä mikroskooppinen otos adhesiivisesti kuluneesta pinnasta.



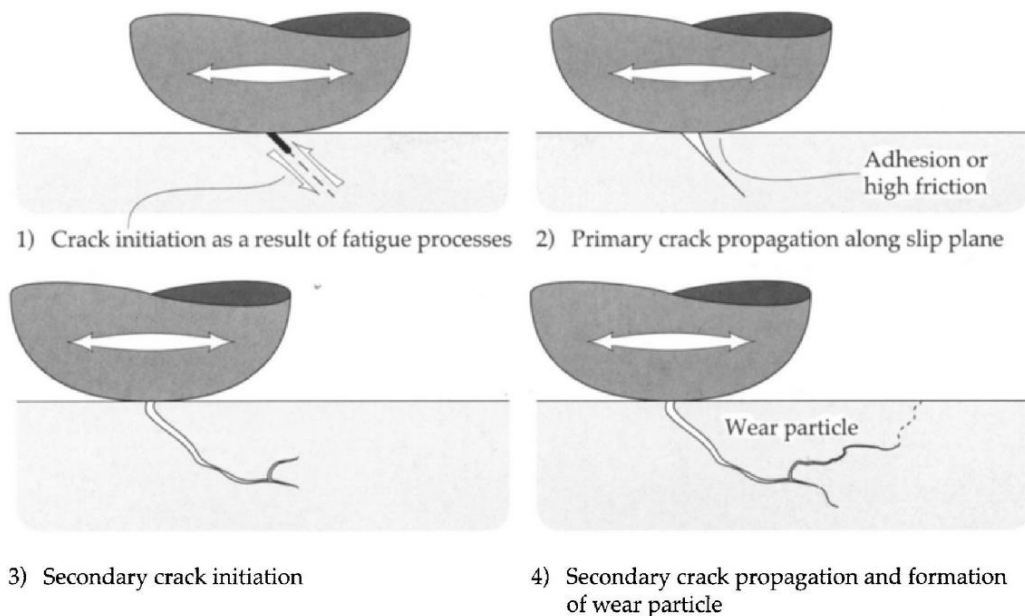
KUVA 15. Mikroskooppinen kuva adhesiivisesti kuluneesta pinnasta (Abdelbary & Li 2023, 158).

Väsymiskuluminen

Nimensä mukaisesti väsymiskuluminen on väsymisestä aiheutuvaa kulumista. Sitä ilmenee paikoissa, joissa on tykyttävää tai pidempiaikaista vaihtuvaa kuormitusta. Vaihtelevan suuruinen tai suuntainen, pidempiaikainen mekaaninen kuormitus onkin edellytys väsymiskulumisen syntymiselle (Parikka & Lehtonen

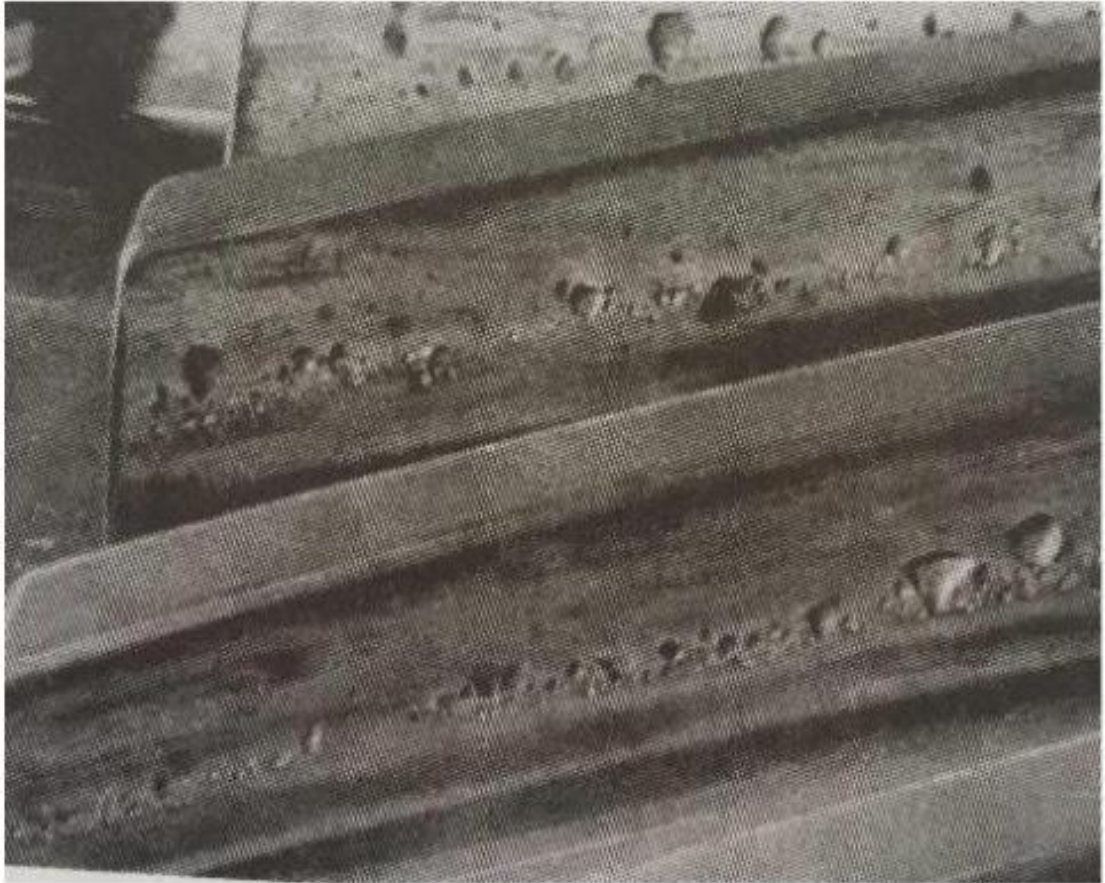
2000, 6). Komponentin väsymiskestävyys on yksi merkittävimmistä tekijöistä suunniteltaessa konetta, jossa esiintyy edellä mainitun kaltaista kuormitusta. Samaa tapaan myös väsyttävästä kuormituksesta aiheutuva kulumisen on syytä ottaa huomioon komponentteja suunniteltaessa. (Kivioja ym. 2007, 113).

Erikoista väsymiskulumiselle on, että se voi tapahtua myös ilman pintojen fyysistä kosketusta (Parikka & Lehtonen 2000, 6). Väsymiskulumisen saa alkunsa, kun pintaan kohdistuva edellä mainitun kaltainen rasitus saa aikaan särön, jonka seurauksena lopulta pinnasta irtoaa kulumispartikkeli (Kivioja ym. 2007, 113). Kuvassa 16 on esitetty väsymismurtuman kehittyminen vaiheittain.



KUVA 16. Väsymismurtuman kehittyminen (Stachowiak & Batchelor 2005).

Kuten kuvasta 16 voidaan huomata, ensimmäinen vaurio tapahtuu materiaalin pinnan alapuolella. Tämä johtuu siitä, että pintaan kohdistuva kuormitus saa aikaan materiaalin pinnalle maksimi puristusjännityksen, mutta pinnan alapuolella sen sijaan muodostuu maksimi leikkausjännitys (Parikka & Lehtonen 2000, 6). Väsymiskulumisen tavanomainen kulumisjälki on kraatteri- tai kuoppainen mutta muutoin tasainen pinta. Kuvassa 17 on esitetty tyypillinen väsymiskulunut pinta. Jos kulumisen ei selvästi noudata adhesiivisen tai abrasiivisen kulumisen tunnusmerkkejä on se todennäköisesti väsymiskulumista (Kivioja ym. 2007, 113).



KUVA 17. Tyypillinen väsymiskulumisjälki hammaspyörän pinnalla (Kivioja ym. 2007, 113).

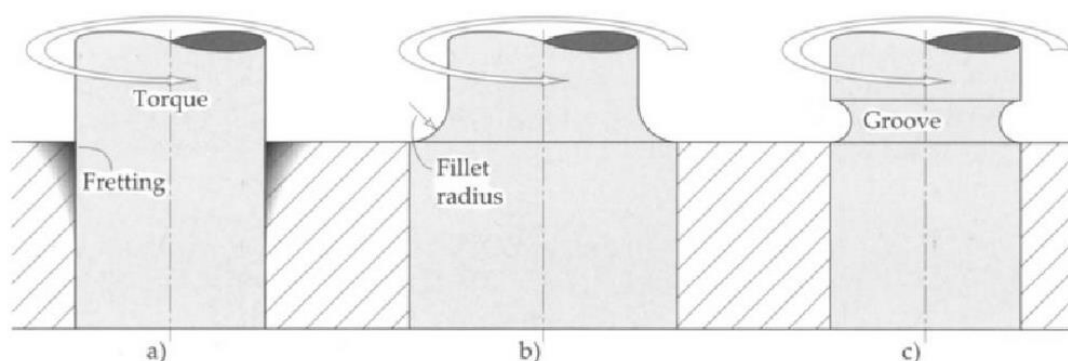
Värähtelykuluminen (Fretting -kuluminen)

Yksi liikettä aiheuttavan kulumisen määrittely tapa on värähtelykuluminen. Tässä kulumismuodossa yhdistyy edellä mainitun abraasion, adheesion, ja väsymisen kulumismekanismit (Parikka & Lehtonen 2000, 12). Värähtelykulumista syntyy, kun toisiaan vastakkain olevien pintojen välillä tapahtuu edestakaista liikettä normaalivoiman alaisuudessa. Värähtelykulumista esiintyy yleisesti koneen rakenteissa puristus- ja kiilaliitoksissa, joissa vähintään kaksi pintaa liikkuvat toisiaan vasten edestakaisella pieniamplitudisella liikkeellä (Parikka & Lehtonen 2000, 11). Tyypillisiä kohteita ovat esimerkiksi moottoripyörän ketjujen kiinnitystapit, sekä erilaiset tappien ja akselien väliset puristusliitokset (Kivioja ym. 2007, 116–118.) Muita yleisiä kohteita värähtelykulumiselle ovat joustavat kytkennät ja laakerisovellukset, joissa esiintyy pieniamplitudista oskilloivaa liikettä. (Stachowiak & Batchelor 2005, 637).

Värähtelykulumista syntyy, kun normaalivoiman vaikutuksesta pintojen pinnan-
karheuksien huippujen välille syntyy adhesiivisia liitoksia, jotka repeytyvät irti vä-
rähätelyn seurauksena. Irronneet partikkelit muokkauslujittuvat koviksi pintaa ku-
luttaviksi abrasiivisiksi partikkeleiksi. Tällöin puhutaan aiemmin mainitusta kol-
men kappaleen abrasiivisesta kulumisesta. (Kivioja ym. 2007, 116–117.)

Se osa pinnasta, josta on irronnut värähtelyn seurauksena kulumispartikkeleita,
on paljon alttiimpi kulumiselle jatkossa. Usein kohteissa, jotka ovat alttiita väräh-
tely kulumiselle esiintyykin toispuoleista kulumista. Kun pintaan syntyy pitkän ku-
lumisen takia syviä lovia, pienenee komponentin lujuusominaisuudet lovivaiku-
tuksen vuoksi. (Kivioja ym. 2007, 117.)

Värähtelykulumista voidaan välttää pitkälti adhesiivisten liitosten ehkäisemisellä,
esimerkiksi lisäämällä pintojen väliin voitelu tai käyttämällä pinnoitteita kuten nit-
rausta tai kovakromaamista (Kivioja ym. 2007, 117; Parikka & Lehtonen 2000,
12). Toinen värähtely kulumisen ehkäisykeino on minimoida komponentteihin
kohdistuva värähtely (Stachowiak & Batchelor 2005, 636). Akselin ja laakeroinnin
välisissä tiukoissa soviteliitoksissa värähtelystä aiheutuvaa kulumista esiintyy
yleisesti komponenttien reuna-alueilla. Tällöin geometriaan muokkaaminen siten,
että kontaktialueen halkaisija on suurempi kuin akselin pääty auttaa lievittämään
kulumista. Jos akselin halkaisijan kasvattaminen ei ole mahdollista, on toinen
vaihtoehto muokata akseliin lovi kontakti alueen jälkeen. (Stachowiak & Batchelor
2005, 638). Kuvassa 18 on havainnollistettu edellä mainitut toimenpiteet.



KUVA 18. Värähtelykulumisen ehkäisy akselin geometrian muokkauksen avulla
(Stachowiak & Batchelor 2005, 638).

Iskukuluminen

Toistuva vastakkaisien pintojen toisiinsa tapahtuva iskeytyminen aiheuttaa iskukulumista. Tämän kulumamuodon klassinen esimerkki löytyy vasaroiden päistä. (Stachowiak & Batchelor 2005, 643–644.) Pintojen törmäyksen seurauksesta syntyy paikallisia plastisia ja elastisia muodonmuutoksia materiaaleissa. Kun iskumainen kuormitus toistuu useasti samalle alueelle, väsyypintä ja kulumisen aktivoivan särön syntyä alkaa. Lopulta pinta murtuu ja syntyy kulumispartikkeli. Iskumaiselle kuormitukselle tavanomaista on myös paikallinen lämpötilan nousu, joka voi pehmentää materiaalin pintakerrosta. Lämpötilan paikallinen nousu tapahtuu, koska nopeassa iskumaisessa kuormituksessa lämpö ei ehdi johtua pois kosketuspinnolta. Iskukestävyyteen voidaan vaikuttaa muuttamalla komponentin viskoelastisia ja viskoplastisia ominaisuuksia. (Kivioja ym. 2007, 114–115.)

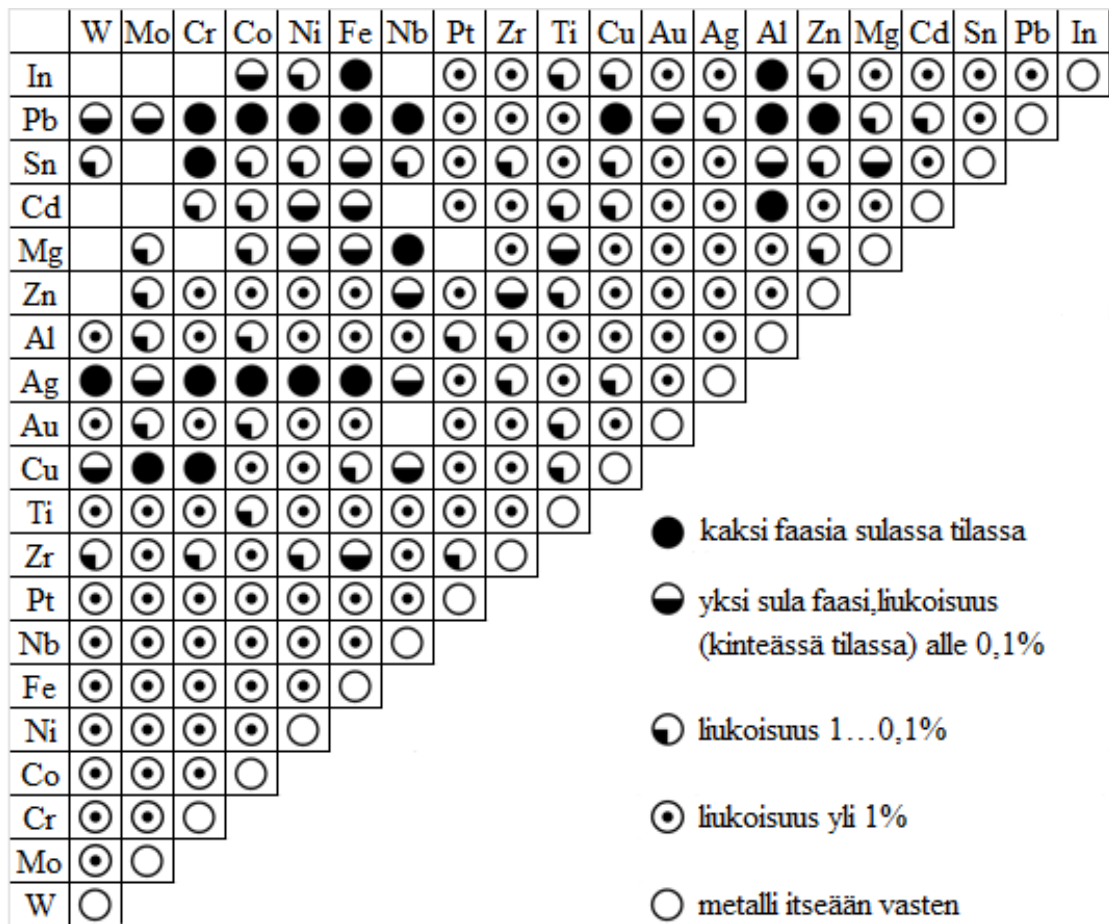
4.3 Kulumiseen vaikuttavat tekijät

Kuluminen on todella monimutkainen ilmiö ja siihen vaikuttaa paljon erilaisia tekijöitä tilanteen mukaan. Kivioja (2007, 120) on jakanut kulumisen laajuuteen vaikuttavat tekijät kuuteen tekijään/ryhmään, joita ovat

- kosketuksissa olevien pintojen rakenteet ja niiden koostumus
- lämpötila
- liukumisnopeus
- kuormitus ja sen tyyppi
- ympäristöolosuhteet
- materiaalien ominaisuudet esimerkiksi niiden liukoisuus toisiinsa nähden

Materiaalien ominaisuudet

Vastinpintojen materiaaleilla ja etenkin materiaalin ominaisuuksilla on suuri merkitys kulumisen kannalta. Esimerkiksi kohteessa, jossa kaksi komponenttia liukuu toisiaan vasten, on materiaalien liukoisuudella toisiinsa nähden suuri vaikutus kitkaan ja kulumiseen (Kivioja ym. 2007, 123). Liukuvassa kontaktissa kummankin komponentin ollessa samaa materiaalia, on liukoisuus 100 %. Tällöin komponenttien välinen adheesio ja kuluminen on nopeaa liukumisen aikana. (Kivioja ym. 2007, 123–124.) Kuviossa 5 on esitetty materiaallinen liukoisuuskartta toisiinsa nähden.



KUVIO 5. Materiaalinen liukoisuuskartta (Kivioja ym. 2007, 124).

Materiaalien ominaisuuksilla etenkin sen pintakovuudella on suuri merkitys kulumiseen. Yleisesti ottaen komponentin kulumiskestävyys paranee, kun sen kovuutta nostetaan. Kovuuden nostaminen toimii melkein kaikkien kulumisongelmien perusratkaisuna. Se ei kuitenkaan ole ainoa keino kulumisen estämiseksi eikä välttämättä yksinään riitä ongelman ratkaisemiseksi. (Kivioja ym. 2007, 120–125,185). Esimerkiksi väsymiskulumisen ehkäisyssä kovuuden nostaminen voi auttaa, mutta tällöin pitää huomioida, ettei materiaalien kovuus nouse liikaa, jolloin niistä tulee hauraita (Stachowiak & Batchelor 2005, 8, 615). Materiaalien murtumissitkeys myös pääsääntöisesti pienenee kovuutta nostettaessa, joten kovuuden nostaminen toimii vain tiettyyn rajaan asti kulumiskestävyuden kohentamisessa (Kivioja ym. 2007, 185)

Abrasiivisen kulumisen yhteydessä on selvitettävä materiaalin myötölujuuden σ arvoa suhteessa siihen kohdistuvaan kuormitukseen. Kun myötölujuuden arvo on

tarpeeksi korkea kuormitukseen nähden kannattaa valita materiaali, jonka kimmo kertoimen E suhde myötölujuuteen σ on mahdollisimman pieni. (Kivioja ym. 2007, 110–111.) Abrasiivisesti kuluviissa kohteissa kulumisen minimoimiseksi on suositeltavaa myös, että kulumisen materiaalin kovuus olisi noin 0,8 kertainen verrattuna kuluttavaan komponenttiin kuten abraasion käsittelyn yhteydessä mainittiin. Liukuvassa kontaktissa toisen materiaaleista ollessa huomattavasti pehmeämpää kuin vastinkappaleen materiaali, on kulumisen tapahtuminen todennäköistä. (Stachowiak & Batchelor 2005, 520, 568–569). Materiaalien ominaisuuksia on siis harkittava kulumista aiheuttavan mekanismin ja kohteen käyttötarkoituksen perusteella.

Pinnankarheus

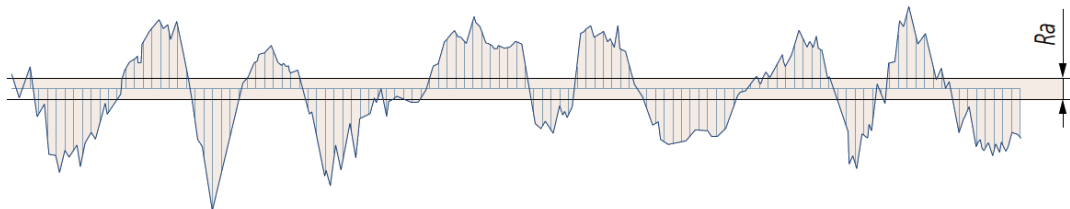
Todellisuudessa kiinteiden aineiden pinnat ovat mikroskooppisella tasolla todella monimutkaisia, vaikka ne paljaalla silmällä näyttävätkin tasaisilta. (Stachowiak & Batchelor 2005, 461.) Koska täysin tasaista pintaa on mahdoton valmistaa millään valmistusmenetelmällä, on normaalia, että todelliset pinnat ovat aaltomaisia ja karheita. (Kivioja, ym. 2007, 24) Pinnankarheudella on suuri merkitys etenkin metallien välisessä voitelemattomassa liukumisessa, jossa se vaikuttaa suuresti kitkaan, kulumiseen, kontaktien mekaniikkaan, adheesioon ja kosketuspintojen käyttäytymiseen niiden irtaantuessa toisistaan. Yleisesti karheampi pinnanlaatu tarkoittaa suurempaa kitkaa ja adheesiota, josta seuraa nopeampaa kulumista. (Abdelbary & Li 2023, 196.)

Kun kaksi pintaa puristetaan toisiaan vasten, kantavat pinnankarheuden huippujen ulokkeet kuorman. Jos kuorma on todella matala, huippujen välinen kosketus on täysin elastinen. Elastisien kosketuksien määrä laskee kuorman kasvaessa ja useimmissa tapauksissa ainakin osa pinnankarheuksien huipuista muokkautuu plastisesti pintojen hankautuessa toisiaan vasten. Pintojen todellinen kosketuspinta-ala muodostuu pinnankarheuksien pinta-alan summana. (Kivioja ym. 2007, 26.)

Pintojen välinen kontakti ja kulumisen tapahtuukin aina ensimmäisenä pinnan karheuden huippujen välityksellä ja karheampi pinta johtaa yleisesti aina voimakkaampaan kulumiseen. Pinnan ollessa todella sileä, on myös tässä tapauksessa kulumisen nopeaa. Tämä johtuu siitä, että todella sileässä pinnassa todellisen

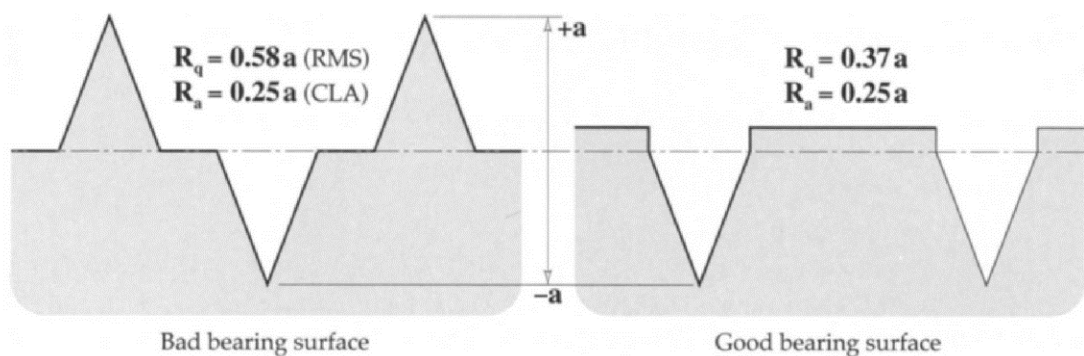
pintojen välinen kosketuspinta-ala kasvaa paljon suuremmaksi kuin hiukan karheammassa pinnassa. Tällöin pintojen välinen kitka kasvaa verrattain korkeaksi johtaen voimakkaampaan kulumiseen. Kulumisen kannalta on siis löydettävä optimaalinen pinnanlaatu, joka ei ole liian karhea eikä liian sileä. (Abdelbary & Li 2023, 196.)

Pintojen epäsäännöllisyyksiä eli pinnankarheutta voidaan mitata erilaisien parametrien avulla. Ra-arvo on teollisuudessa ehkä yleisimmin käytetty pinnankarheuden parametri (Kivioja ym. 2007, 24). Ra-arvo on huippujen ja laaksojen absoluuttisten arvojen aritmeettinen keskiarvo profiilin keskiviivasta (kuva 20) (Mitutoyo n.d). Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään termiä center-line average tai lyhennettä CLA (Stachowiak & Batchelor 2005, 466).



KUVA 19. Ra-arvo (Mitutoyo n.d).

Erilaiset oppaat ja standardit antavat ohjeistuksia siihen millaisia Ra-arvoja tulisi koneen suunnittelussa käyttää. Huomioitavaa Ra-arvoa käytettäessä on, että kaksi pintaa samalla Ra-arvolla eivät välttämättä kulu samaa tahtia. Kuvaa 19 tarkastelemalla huomataan, että kahdella pinnalla voi olla sama Ra-arvo, mutta niiden mikroskooppinen pinta ei silti välttämättä näytä samalta. (Stachowiak & Batchelor 2005, 466; Kivioja ym. 2007, 24–25.)

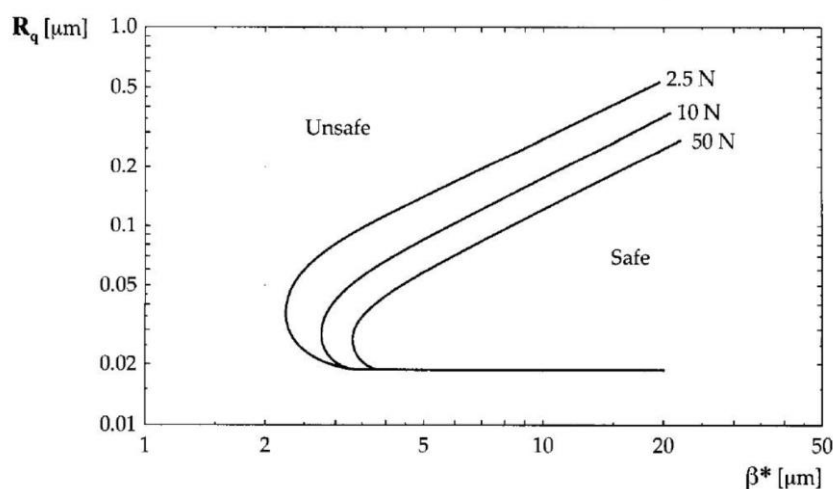


KUVA 20. Kaksi pintaa samalla Ra-arvolla (Stachowiak & Batchelor 2005, 466).

Sovelluksissa, joissa tavoitteena on mahdollisimman hyvin liukuva ja kitkaton pinta, tulisi pinnan jäljitellä kuvassa 21 esiteltyä ”good bearing surface” tyyppistä profiilia. Tämän tyyppisen profiilin, jossa pinnan epäsäännöllisyydet muodostuvat lähinnä alaspäin kohdistuvista nuolenkärjen muotoisista urista, on todettu olevan suotuisa pinnanprofiili liukumiselle. (Stachowiak & Batchelor 2005, 475.)

Kulumisen kannalta optimoidun pinnan tulisi käyttää muitakin pinnankarheuden määrittelytapoja kuin Ra-arvo. On olemassa paljon parametrejä pinnankarheuden mittaamiseen, mutta yleisin näistä on Ra-arvon lisäksi kuvassa 22 esiintyvä Rq eli RMS-arvo. Se tarjoaa parhaimman arvion optimaalisesta liukupinnasta. (Stachowiak & Batchelor 2005, 467; Kivioja ym. 2007, 24.) Rq-arvo on neliöllinen keskipoikkeama ja se katsotaan kattavammaksi mittariksi, joka ottaa huomioon pinnankarheuden amplitudin ja taajuuden. (Stachowiak & Batchelor 2005, 466–468.) Pidätinsylinterin kaltaisissa tilanteissa kannattaisi siis suosia Rq-arvon käyttöä yksinkertaisemman Ra-arvon ylitse.

Kuten aiemmin todettiin optimaalinen pinnalaatu ei aina suoranaisesti ole siilempi pinta. Tämä voidaan nähdä kuvioista 6, jossa on esitetty turvalliset ja epäturvalliset käyttöalueet pinnakorkeuden ja tilallisten ominaisuuksien näkökulmasta. Kuvaajassa y-akselilla on pinnankarheuden parametri Rq ja x-akselilla muuttuja β^* , joka kuvaa tässä yhteydessä eksponentiaalisen autokorrelaatiofunktion hajoamiskerrointa. Tämä kerroin liittyy pinnankarheuden tilastolliseen analyysiin, jonka avulla voidaan määrittää pinnan tilallisia ominaisuuksia.



KUVIO 6. Käyttöalueet pinnankarheuden ja tilallisten ominaisuuksien näkökulmasta (Stachowiak & Batchelor 2005, 476).

Kuviota 6 tutkimalla nähdään, että kun β^* (hajoamiskerroin) on pieni, alle 2 mikrometriä, pinta voi olla liian sileä, mikä johtaa välittömään pinnan vaurioitumiseen jopa hyvin kevyilläkin kuormilla. Toisaalta, kun β^* on suurempi, sekä pinnankarheus on riittävän suuri kantaa pinta paljon suurempia kuormia turvallisesti. (Stachowiak & Batchelor 2005, 476.)

Kitka ja lämpötila

Kitka voidaan yksinkertaisesti määritellä energian vapautumisena kahden toisiinsa vasten liukuvan pinnan välillä (Stachowiak & Batchelor 2005, 483). Todellisuudessa kitka on kuitenkin monimutkainen ilmiö ja siihen vaikuttaa todella moni parametri, kuten ympäristö, kappaleiden kemiallinen koostumus, pintojen geometria, pintojen välissä olevat epäpuhtaudet ja muut väliaineet kuten öljy. Kitkaa koskevia peruseriaatteita ovat;

- Tangentiaalinen kitkavoiman suuruus on suhteellisesti verrannollinen liukumisen normaalivoimaan, tätä kutsutaan kitkakertoimeksi.
- Liikekitka on pienempi kuin lepokitka.
- Liikenopeudella ei ole vaikutusta liikekitkan suuruuteen.
- Kosketuspinnan näennäinen pinta-ala ei vaikuta kitkavoiman suuruuteen. (Kivioja ym. 2007, 63–64; Stachowiak & Batchelor 2005, 483.)

Todellisuudessa nämä peruseriaatteet eivät kuitenkaan aivan pidä paikkaansa. Esimerkiksi liikenopeudella ja pinta-alalla on oikeasti pieni vaikutus kitkavoiman suuruuteen. Usein kuitenkin nämä seikat jätetään huomioimatta niiden vaikutuksen marginaalisuuden takia. (Abdelbary & Li 2023, 127–129.)

Kitkavoima voidaan jakaa kahteen käsitteeseen: liikekitka ja lepokitka. Lepokitka vaikuttaa kappaleen ollessa paikallaan ja kappaleen liikkeellelähdössä. Liikekitka taas vallitsee kappaleen liukuessa. Kitkavoima on aina liukumissuuntaa vastaan eli kappaleen liikkeellelähdössä on ensin kumottava lepokitkavoima ja liikkeen ylläpitämiseksi on kappaletta työntävän voiman oltava suurempi kuin liikekitkavoima. (Abdelbary & Li 2023, 129–130.) Kitka voidaan myös erotella sisäiseksi ja ulkoiseksi kitkaksi. Sisäinen kitka on kappaleen molekyyalitasolla ja ulkoinen kitka on pintakerrosten välissä tapahtuva reaktio. Nesteiden ja kaasujen tapauksessa puhutaan viskositeetista, joka kuvaa sisäistä kitkaa. (Kivioja ym. 2007, 63–64.)

Laskuissa kitka otetaan usein huomioon kitkakertoimen μ avulla. Se on dimensioton suure, joka määritellään jakamalla tangentiaalinen kitkavoima F normaali-voimalla W . Kuten kitkavoimakin, myös kitkakerroin jaetaan liike- ja lepokitkaker-toimeen. Erilaisille materiaalipareille on olemassa valmiita kitkakertoimen arvoja, mutta todellisuudessa kitkakerroin on empiirinen suure ja se on selvitettävä tilan-nekohtaisesti testauksen kautta. (Abdelbary & Li 2023, 127–206.)

Kitkaa pyritään yleisesti välttämään teollisuuden sovelluksissa, sillä suuremmalla kitkalla joudutaan tekemään enemmän työtä. Työ eli mekaaninen energia muut-tuu ja vapautuu käytännössä kokonaan lämpöenergiana pintojen välillä (Abdel-bary & Li 2023, 77–125). Kitkalämpö voi aiheuttaa todella suuria paikallisia läm-pötilan nousuja pintojen välillä ja materiaali voi saavuttaa jopa sulamislämpötilan. Lämpötilan nousua voidaan arvioida kitkatehon ja materiaali ominaisuuksien avulla. (Kivioja ym. 2007, 63–65, 76.) Paikallinen korkea lämpötilan nousu voi-daan selittää sillä, että todellinen kappaleiden välinen kosketuspinta-ala on vain pinnankarheuden huiput, kuten pinnankarheuksia käsitellessä esiteltiin. Tällöin kappaleiden liukuessa toisiaan vasten kaikki vapautuva lämpöenergia pintojen välillä kohdistuu näihin pinnankarheuden huippuihin, jolloin lämpenevä pinta-ala ja volyyymi on todella pieni ja se voidaan saavuttaa kitkalämmön vaikutuksesta. (Abdelbary & Li 2023, 77–125.)

Kitkasta johtuvalla lämpötilan nousemisella voi olla todella merkittävä vaikutus komponenttien tribologiseen toimintaan. Korkeaksi nousevat paikalliset lämpöti-lat vaikuttavat komponenttien ja voiteluaineiden ominaisuuksiin, sekä kulumiseen radikaalisti. (Abdelbary & Li 2023, 147–148.) Kitkalämmön yhteys kulumiseen on esitelty jo aikaisemmin adhesiivisen kulumisen yhteydessä.

Kuormitus ja liukumisnopeus

Liukumisnopeus on kytköksissä kulumiseen lähinnä lämpötilan kautta (Kivioja ym. 2007, 122). Puhutaan siis lähinnä edellä mainitun kitkan aiheuttamasta läm-pötilan noususta. Liukumisnopeuden tai kuorman lisäyksen on osoitettu olevan kytköksissä suoraan lämpötilan nousuun lineaarisesti. (Abdelbary & Li 2023, 116.) Liukumisnopeus yhdessä kuormituksen kanssa kuvaakin luvussa kolme esitellyn pv-luvun kautta pintojen välistä kriittistä lämpötilaa. Huomioitavaa pv-luvun käytössä on kuitenkin, että yleisesti sen määrittämiseen käytetään keskiarvo

nopeutta, sillä todellisuudessa nopeus komponenttien välillä harvoin pysyy vakiona koneen koko käyttöaikana.

Pidätinsylinterin tyylisessä sovelluksessa, jossa kulmanopeus ja kulmakiiktyvyys vaihtelevat nollan ja maksimin välillä (kuviot 3 ja 4), on otettava huomioon myös ”stick-slip” ilmiö. Termille ei ole olemassa suoraa suomennosta, joten sen käsittelyssä käytetään englanninkielistä termiä. Yksinkertaisesti se tarkoittaa tilannetta, jossa pintojen välinen liukuminen pysähtyy hetkeksi ja jatkuu uudelleen hetken päästä. Tällöin pintojen välillä vaikuttaa siis vuorotellen luvussa neljä esiteltyt lepokitka ja liikekitka. Tämä tapahtuma voi johtaa huomattavien kulumisongelmien syntymiseen ja sen onkin osoitettu olevan yksi pääsyy kulumiseen erilaisissa koneiden komponenteissa. (Abdelbary & Li 2023, 140–141.)

Nopeat muutokset nopeudessa, sekä suuret kiihtyvyydet etenkin stick-slip ilmiön transiiovaiheessa, ovat yhdistetty olevan ongelmallisia tekijöitä. Transiiovaiheella tarkoitetaan tilannetta, jossa siirrytään pysähtyneestä tilasta liikkeelle tai liikkeestä pysähdyksiin. Myös voiman lisääntyminen stick-slip ilmiön transiiovaiheessa aksiaalis-, sekä sivusuunnissa on todettu olevan ongelmallinen tekijä nopeuden ja kiihtyvyyden muutoksien lisäksi. Edellä mainitut tekijät synnyttävät pintojen välille suuria hetkellisiä kontaktivoimia, jotka kuormittavat niitä ja lisäävät kulumisvaurion syntymisen riskiä. (Abdelbary & Li 2023, 140–141; Zuleeg 2015.)

Kuormitus yksinään voidaan myös yhdistää suoraan kulumiseen, yhtälön (13) mukaisesti. Yhtälö (13) on tunnettu Holmin yhtälönä ja se on yksinkertainen kulumista kuvaava malli. Sitä ei voida suoraan sellaisenaan soveltaa todellisuuden kohteisiin, mutta se kuvaa hyvin kuormituksen yhteyttä kulumiseen. (Kivioja ym. 2007, 122.)

$$V = Z \cdot \frac{F \cdot s}{H} \quad (13)$$

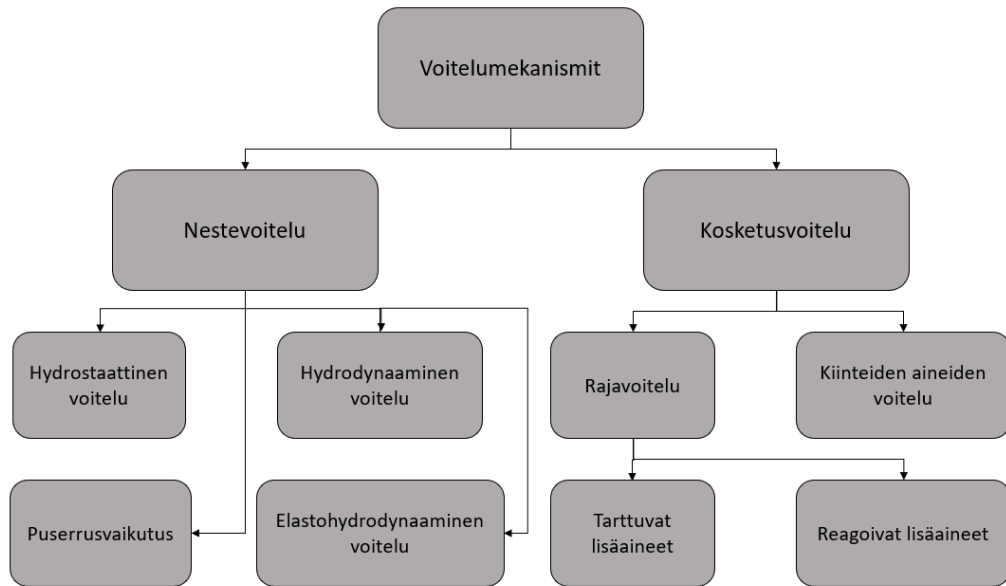
jossa V on kulunut tilavuus, Z on kulumiskerroin, F on normaalivoima, s on matka ja H materiaalin kovuus.

Yhtälön perusteella voidaan todeta suuremman kuormituksen johtavan suurempaan kulumiseen. Yhtälöstä (13) voidaan lisäksi huomata kovuuden olevan tiukasti sidoksissa kulumiseen. (Kivioja ym. 2007, 122.)

Voitelu

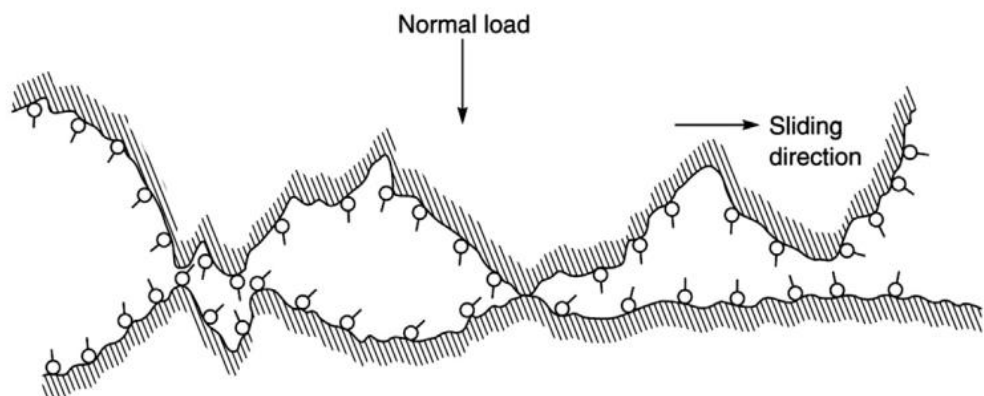
Termi voitelu voidaan määritellä erilaisien aineiden kuten öljyjen tai rasvojen soveltamisella kitkan pienentämiseksi, jotta mekaanisten komponenttien välinen liike olisi sulavaa (Abdelbary & Li 2023, 295). Kitkan pienentäminen tapahtuu pintojen väliin luotavan kiinteän, nestemäisen tai kaasumaisen voiteluainekalvon avulla. Tämän kalvon tarkoituksena on estää suora kontakti pintojen välillä ja täten pienentää niiden välistä kitkaa. (Kivioja ym. 2007, 129). Tämä voiteluainekalvo voi muodostua myös edellä mainittujen tekijöiden yhteisvaikutuksesta (Abdelbary & Li 2023, 295). Voitelulla voidaan siis suojata pintoja kulumiselta ja parantaa mekaanisen järjestelmän toimintaa. Voitelua voidaan myös käyttää suojaamaan pintoja korroosiolta, joten aina sen tarkoituksena ei välttämättä ole suoranaisesti estää kahden pinnan välistä kontaktia. (Abdelbary & Li 2023, 295).

Kulumisen ja kitkan kannalta paras vaihtoehto on, että voiteluainekalvo estää pintojen välisen kontaktin kokonaan. Tällöin puhutaan **nestevoitelutilanteesta**. (Kivioja ym. 2007, 129.) Tällainen tilanne voidaan yleensä toteuttaa vain suljetuissa järjestelmissä, joten sen soveltaminen ei ole aina mahdollista. Tällöin pintojen välinen voitelu tapahtuu **kosketusvoitelutilanteessa**. Tässä tilanteessa kuorma välittyy pintojen välillä osakseen voiteluainekalvon ja osakseen pinnankarheuden huippujen välityksellä. (Kivioja ym. 2007, 129). Kuviossa 7 on esitelty Kiviojan (2007, 130) suorittama voitelumekanismien jaottelu.



KUVIO 7. Voitelumekanismien jaottelu (Kivioja ym. 2007, 130).

Pidätinsylinterin voitelun tapauksessa puhutaan **rajavoitelutilanteesta**. Sillä tarkoitetaan tilannetta, jossa pinnat ovat niin lähellä toisiaan, että suurin osa kuormasta kohdistuu pinnankarheuksien huippujen kannettavaksi (kuva 21). Rajavoitelutilanteessa liukupintojen väliin jää hyvin ohut voiteluainekalvo, joka auttaa pienentämään kitkaa ja estää kulumista. (Kivioja ym. 2007, 167.) Kuvassa 21 tätä ohutta voiteluainekalvoa kuvastavat pintaan kiinnittyneet voiteluainemolekyylit (Abdelbary & Li 2023, 313). Vaikka rajavoitelutilanteessa muodostuva kalvo ei ehkäise kulumista tai kitkaa yhtä hyvin kuin esimerkiksi nestevoitelu, on se parempi vaihtoehto kuin ei voitelua ollenkaan (Kivioja ym. 2007, 167).



KUVA 21. Rajavoitelutilanne (Abdelbary & Li 2023, 313).

Kuten kuvasta 21 voidaan huomata, on pintoja suojaava ja voiteleva kerros hyvin ohut verrattuna pinnakarheuteen. Siksi rajavoitelutilanteessa voiteluaineelta edellytetään hyvää tarttuvuutta liukupintoihin. Siksi myös pinnalaadulla on suurempi merkitys rajavoitelussa, kuin muissa voitelutilanteissa. (Kivioja ym. 2007, 167).

5 KULUMISVAURIOIDEN ANALYSOINTI JA EHKÄISY

5.1 Vaurioanalyysin suorittaminen

Puhuttaessa kulumisvauriosta tarkoitetaan tilannetta, jossa kulumisen on edennyt niin pitkälle, että se haittaa komponentin toimintaan (Parikka & Lehtonen 2000, 4). Vaurioanalyysissa kulumismekanismi voidaan löytää tarkastelemalla kulumispintoja ja kulumispartikkeleita. Alkuperäisen kulumismekanismien löytäminen voi kuitenkin olla hankalaa jälkikäteen, sillä kulumisen alettua kuormitukset ja lämpötilat usein muuttuvat. Tämä johtaa uusien kulumismekanismien käynnistymiseen ja tilanteen monimutkaistumiseen. (Kivioja ym. 2007, 338).

Analysoidessa komponenttien vaurioita yksi tärkeimmistä asioista on taustatietojen kerääminen mahdollisimman tarkasti, sillä ulkoisilla tekijöillä voi olla suuriakin kulumista kiihdyttäviä vaikutuksia. Kulumisvaurioon johtavia ja vaikuttavia tekijöitä on monia. Parikan ja Lehtosen (2000, 20–23) kulumisanalyysiä vierintälääkeroinnista mukaillen, ainakin seuraavat asiat tulisi selvittää kulunutta komponenttia tutkittaessa:

- kuluneen komponentin käyttötunnit
- kuormitusolosuhteet normaalitilassa, sekä mahdolliset erityistilanteet
- käyttölämpötila ja lämpötilavaihtelut
- onko komponentti voideltu, miten voitelu on toteutettu
- mitä voiteluainetta on käytetty
- komponentin materiaalitiedot, kuten kovuus ja pinnanlaatu
- komponentille suoritettut huolto- ja korjaustoimenpiteet
- minkälaiset korroosio-olosuhteet kohteessa vallitsee
- mahdolliset muut tilanteeseen vaikuttavat tekijät.

Paras mahdollinen keino saada kattavat taustatiedot, on vieraillla itse vauriopai-
kalla. Tällöin saadaan toimintaympäristöstä tarkka kuva ja välttyään väärinym-
märryksiltä. Asiaa ymmärtävä henkilö huomaa myös todennäköisemmin vaurioon
vaikuttavia tekijöitä tilannepaikalla vieraillessaan, jotka olisivat muutoin voineet
jäädä kokonaan huomaamatta. Esimerkiksi asiakkaan kanssa sähköpostin väli-

tyksellä käydyn tilannekertomuksen yhteydessä on todennäköistä, että osa taustatiedoista jää saamatta. Kohteessa vierailu ei kuitenkaan ole aina mahdollista, johtuen esimerkiksi pitkistä välimatkoista tai ajan puutteesta. (Parikka & Lehtonen 2000, 20)

Koska tässä analyysissä käytettävät tiedot kulumisvaurioista ovat pääosin asiakkaiden ja Metson työntekijöiden välisiä sähköpostiviestejä, ei välttämättä pystytä ottamaan huomioon kaikkia mahdollisia ulkoisia tekijöitä analyysia suoritettaessa. Jokainen murskaustilanne on myös hiukan erilainen, joten ongelmia ja niiden aiheuttajia on tutkittava todennäköisimmän tilanteen perusteella. Analyysin suorittamiseen sovelletaan luvussa neljä esiteltyä kulumisen teoriaa ja luvussa kolme selvitettyä kuormitusta. Asiakkaiden sähköpostitse toimittamia raportteja kulumisesta käsitellään salassapitosopimuksien mukaisesti, eikä täten kaikkia analyysissä käytettäviä kuvia ja selostuksia voida sisällyttää työhön. Lähteisiin viitattaessa käytetään yleistä kaikkia raportteja koskettavaa lähdemerkintää (Metso 2023e).

5.2 Kulumismekanismien määrittely

Luvun 4.2 alussa listattiin erilaisia kulumismekanismeja, joista myöhemmin esiteltiin abrasiivinen- ja adhesiivinen kulumisen. Molemmissa kulumismekanismissa kulumista tapahtuu, kun pinnat liukuvat toisiaan vasten. Näissä mekanismeissa kulumisen kuitenkin aiheutuu toisistaan merkittävästi eroavilla tavoilla. Tarkastelun yksinkertaistamiseksi puhutaan yleisesti **liukumiskulumisesta**, sillä se on terminä paljon helpommin ymmärrettävissä, kuin abrasiivinen- tai adhesiivinen kulumisen. Liukumiskulumiseen voidaan myös helposti sijoittaa liitoskohdissa tapahtuva oskillointi sekä niihin kohdistuvat kuormitukset. Tilanteen vaatiessa etenkin liukumiskulumisesta puhuttaessa, selvennetään kulumisen todellista aiheuttajaa tarkemmin viittaamalla aiempien lukujen tekstiin, kuviin sekä kuvioihin.

C-sarjan murskaimien tapauksessa suurimmat kulumista aiheuttavat tekijät ovat **liukumis-, värähtely- ja iskukuluminen**. Näissä kulumisen aiheuttajissa yhdistyy luvussa neljä esiteltyä kulumismekanismia sekä muut edellä esiteltyt tekijät kuten kitka, lämpötila ja liukupintojen ominaisuudet (Kiviojan 2007, 337–341).

Koska C-sarjan koneet ovat rakenteeltaan suhteellisen samantyyppisiä, voidaan pitää todennäköisenä, että kaikissa konemalleissa esiintyvä kulumisen aiheutuu ainakin osittain samoista syistä. Kuten luvussa neljä todettiin, kulumisen tapahtuu usein ensin jollain tietyllä mekanismilla, jonka jälkeen muut kulumismekanismit astuvat mukaan yhtälöön. Kulumisnopeus kasvaa ajan myötä, kun yhä useampi kulumismekanismi astuu mukaan yhtälöön. Tästä syystä on tärkeää tunnistaa alkuperäinen kulumisen aloittanut tekijä, jotta kulumista voidaan ehkäistä mahdollisimman tehokkaasti.

Liukumiskuluminen

Liukumiskuluminen on C-sarjan koneissa todennäköisesti suurin kulutusta aiheuttava tekijä. Tässä tapauksessa liukumisella tarkoitetaan luvussa kolme esiteltyä murskaimen käydessä tapahtuvaa pidätinsylinterin laakeroinnin ja tapin välistä pieniamplitudista oskilloivaa liikettä. Luvussa kolme oskilloivaa liikettä tarkasteltiin simulaation avulla. Simulaatiosta saadun mittausdatan avulla laskettiin oskillointinopeudet ja -kiihtyvyydet derivoimalla kiertokulman arvoja ajan suhteen.

Kuten luvussa kolme esittelystä kuviosta 2 voidaan nähdä, on kiertokulman muutos ajan suhteen suuritaajuista eli aallonpituus on lyhyt. Kuviosta 2 voidaan karkeasti arvioida kulmanopeuden suunnan vaihtuvan noin kahdeksan kertaa yhden sekunnin aikana. Tämä toistuva suunnan muuttuminen aiheuttaa jatkuvaa kitkavoiman vaihtelua liukupinnalla, kun liukuminen pysähtyy ja jatkuu vastavuoroisesti (stick-slip).

Luvussa kolme esiteltyistä oskillointinopeuden (kuvio 3) ja oskillointikiihtyvyyden (kuvio 4) kuvaajista huomattiin, etenkin oskillointikiihtyvyyden saavuttavan todella korkeita arvoja suunnan muutoksen yhteydessä. Luvussa neljä todettiin suurien kiihtyvyyksien ja nopeuksien aiheuttavan ongelmia mekaanisten liukupintojen välillä stick – slip tapahtuman yhteydessä, niistä aiheutuvien suurien kontaktivoimien seurauksesta. Tämän liitoskohdissa tapahtuvan oskilloinnin voitaisiin todeta täten olevan sidoksissa kulumiseen.

Kuten kuvasta 9 voidaan huomata, Hertzin kosketusteorian mukaan ei laakerin ja tapin välinen kosketuspinta-ala ole kovinkaan suuri, toisaalta luvussa 4 pinnakarheuden käsittelyn yhteydessä todettiin liitoksien todellisen kosketuspinta-alan

olevan pinnakarheuksien huippujen summa. Lyhyen liukumismatkan seurauksesta liukumiskuormitus kohdistuu tällöin vain todella pienelle pinta-alalle.

Edelliset huomiot kuormituksen paikallisuudesta, stick-slip tapahtuman jatkuvasta toistumisesta ja sen yhteydessä tapahtuvista suurista kontaktivoimista voidaan yhdistää adheesio kulumiseen. Suuret kiihtyvyydestä ja nopeudesta aiheutuvat kontaktivoimat synnyttävät korkean adheesio pintojen välille. Kuten luvussa 4 todettiin adheesio aiheuttaa pintoja suojaavan oksidikerroksen kulumisen. Kun pintoja suojaava oksidikerros puuttuu, muodostuu pinnankarheuden huippujen välillä metalli - metalli kosketuksia. Kosketuksien revetessä muualta kuin alkuperäisestä liitoskohdasta syntyy kulumista. Myöskään voideltujen koneiden osalta rajavoitelutilanteessa syntyvä todella ohut voiteluainekalvo ei välttämättä ehdi muodostua pintojen väliin ja suojata niitä kulumiselta (kuva 20).

Edellä esitelty oskilloiva liikekuormitus yhdistettynä samalle alueelle kohdistuvaan pintapaineeseen, aiheuttaa pintojen välillä paikallista lämpötilan nousua. Kuten luvussa neljä esiteltiin voi paikalliset lämpötilat nousta jopa materiaalin sulamislämpötiloihin. Paikallinen lämpötilan nousu voi vaikuttaa voimakkaasti voiteluaineen sekä pintojen ominaisuuksiin kuten kovuuteen ja viskositeettiin (Kivioja ym. 2007, 122). Lämpötilan nousuun liukumisen aikana vaikuttaa voimakkaasti kuormitus ja kitka, joten kummankin tekijän voimistuminen lisää todennäköisyyttä kulumisen syntymiselle. Etenkin voitelun epäonnistuminen tai liian korkea paine pidätinsylinterissä, voi aiheuttaa paikallisen lämpötilan nousun ja korkean adheesio.

Ahdeesio ja korkean paikallisen lämpötilan seurauksesta tapahtuu pintojen hantatessa toisiaan vasten pinnankarheuden huippujen plastisoitumista. Plastisoitumisen johdosta syntyy muokkauslujittuneita kovia abrasiiveja. Nämä abrasiivit toimivat molempia pintoja kuluttavina partikkeleina (kuva 12). Tällöin kulumisen ei ole niin voimakasta, mutta kuitenkin ei toivottua. Korkeaksi kasvava adheesio voi pahimmassa tapauksessa saada aikaan koko pintakerroksen plastisoitumisen. Tällöin materiaaliominaisuudet voivat muuttua radikaalisti ja pinnasta tulee paljon alttiimpi kulumiselle. Koko pintakerroksen plastisoituessa kulumisen voi olla todella voimakasta ja tapahtua nopeasti. Kuvassa 21 on erään leukamurskaimen pidätinsylinterin loppuun kulutettu tappi.



KUVA 22. Pidätinsylinterin loppuun kulutettu tappi (Metso 2023e).

Kuvasta 22 voidaan huomata, kuinka liukumisen ja kuormituksen kohdistuminen pienelle alueelle kiinnitystappia saa aikaan kulutusvaurion syntymään tietyllä tappin osa-alueella sen muutoin ollessa suhteellisen ehyt. Kuluminen on siis hyvin paikallista ja voidaan pitää todennäköisenä sen olevan lähtöisin alun perin juuri oskilloinnin ja paineen aiheuttamasta korkeasta adheesiosta pintojen välillä. Koska kuvan 22 kiinnitystapissa on huomattava kulumisvaurio, on todennäköistä, että vaurion ollessa jo näin pitkällä kulumista on tapahtunut loppuvaiheessa jo muillakin mekanismeilla (Kivioja ym. 2007, 338).

Tarkastellessa C-sarjan koneiden pidätinsylinterin alueella esiintyviä kulumisvaurioita asiakkaiden, sekä muiden yksittäisistä lähteistä saatujen raporttien pohjalta, voidaan niistä huomata usein samantyyppinen kulumisjälki, riippumatta siitä onko liitoskohtia voideltu vai ei. Kuluminen on usein hyvin paikallista, kuten kuvassa 22 ja kulumisvaurioista otetuista kuvista voidaan usein huomata komponenttien lopulta leikkautuneen vahvasti yhteen tai kaivautuneen toisiinsa. (Metso 2023e.) Tätä voidaan selittää edellä mainitulla korkealla adheesiolla ja lämpötilan paikallisella nousulla. Lämpötilan noustessa korkeaksi tiedetään metallien yleisesti pehmenevän. (Kivioja ym. 2007, 122) Pintojen pehmetessä ne kaivautuvat toisiinsa ja lopulta leikkaantuvat yhteen.

Värähtelykuluminen

Toinen koneissa esiintyvä kulumisen muoto on värähtelykuluminen (Fretting). Värähtely kuluttaa metallisia pintoja suojaavaa oksidikerrosta mahdollistaen metalli - metalli kosketuksien tapahtumisen liitoskohdissa, jolloin kulumista pääsee syntymään. Värähtelykuluminen toimii todennäköisesti yhdessä liukumiskulumisen kanssa päätoimisena oksidikerroksen kuluttajana. Kuten luvussa neljä esiteltiin, yhdistyy tässä mekanismissa abrasiivisen-, adhesiivisen- ja väsymiskulumisen tekijät. Tässä tilanteessa voitaisiin erotella kuitenkin vielä väsymiskuluminen, joka aiheuttaa komponenttien pintakerroksen halkeilua. Halkeamat etenevät luvussa neljä esitellyn väsymiskulumisen teorian mukaisesti ja lopulta pinnasta irtoaa kulumispartikkeleita. Väsymiskuluminen todennäköisesti johtuu pidätinsylinterin paineenvaihtelusta murskauksen aikana. Paine pidätinsylinterissä vaihtelee syötteen seurauksesta, jolloin liitoskohtiin kohdistuu vaihtelevan suuruista tykyttävää kuormitusta. Tämä kulumismekanismi saattaa esiintyä vain tietyntyyppisen murskaustapahtuman yhteydessä.

Iskukuluminen

Murskaustapahtumassa leukamurskain puristaa sykleittäin kiveä, jolloin pidätinsylinterin liitoskohtiin kohdistuu iskumaista vaihtelevaa kuormitusta. Liitoskohtien väljyys vaikuttaa siihen, kuinka vakavaa kuormitus on komponenteille. Liitoskohtien ollessa todella väljiä, kuten kuvassa 22 kuluneen komponentin kohdalla, pääsevät komponentit hakkaamaan toisiaan vasten. Kulumista voi tällöin tapahtua myös iskumaisen kuormituksen takia. Tämä kulumismekanismi ei tosin ole todennäköinen alkuperäisen vaurion aiheuttaja, jos liitoskohtien komponenttien toleranssit vastaavat valmistuspiirustuksissa määritellyt mittoja.

Kun kuluminen on edennyt kuvan 22 mukaiseen tilanteeseen usein voidaan havaita jo äänen perusteella, ettei kone toimi suunnitellusti. Vaikka murskain pitääkin käydessään kovaa ääntä, on metallisten komponenttien toisiaan vasten iskeytyessä aiheuttama ääni suhteellisen helposti havaittavissa. Jos pidätinsylinterin alueella havaitaan metallista kolkutusta, on tällöin todennäköistä, että jokin komponenteista on jo pahoin vaurioitunut. Iskumainen kuormitus aiheuttaa pahimmillaan koko sylinterin repeämisen. Täten on suotavaa lopettaa koneen käyttö, jos metallista kolkutusta on havaittavissa. Metallinen kolkutus voi myös johtua liian matalista pidätinsylinterin käyttöpaineista (Metso 2022, 170).

5.3 Kulumisen ehkäisy

Kulumiseen vaikuttavien tekijöihin kuten pidätinsylinterin tuottaman reaktiovoiman suuruuteen tai oskillointiin ei voida vaikuttaa suoranaisesti mitenkään. Tämä johtuu siitä, että työnninlaatta vaatii paikallaan pysyäkseen pidätinsylinteriltä tarpeeksi suuren reaktiovoiman. Oskillointi määräytyy pääosin koneen käyttönopeuden perusteella, joten sen arvoonkaan ei voida vaikuttaa. Vaikkei reaktiovoimaan voidakaan suoranaisesti vaikuttaa on mahdollista laskea pintapaineen arvoa jonkin verran. Tämä voidaan tehdä oikealla laakerivalinnalla, toleransseilla, sekä kasvattamalla laakerin ja liitostapin välistä pinta-alaa, jolloin paine jakautuu suuremmalle alueelle. Nämä toimet eivät kuitenkaan merkittävästi vaikuta pintapaineen arvoon, joten pääasiassa on keskityttävä etsimään muita ratkaisuja. Tällaisia ovat esimerkiksi kitkan ja siitä aiheutuvan lämpötilan pienentämiseen liittyvät toimet. Myös Komponenttien materiaaliominaisuuksia muokkaamalla voidaan vaikuttaa kulumiseen, esimerkiksi kovuuden kautta.

Kitkaa voidaan pienentää lisäämällä voitelu konemalleihin, joista se puuttuu. Tämän lisäksi valitsemalla toisiinsa huonosti liukoistuvat materiaalit kuvion 5 pohjalta, voidaan pienentää pintojen välistä adheesiota ja kitkaa. Voideltujen konemallien osalta, itsestään voitelevien laakerisovellusten käytöllä voidaan saavuttaa etua. Hyötyä voidaan saavuttaa, kun rajavoitelutilanteessa voiteluainekalvon hetkellinen puuttuminen liukupintojen välillä saadaan osittain korvattua laakerin itsestään voitelevilla ominaisuuksilla.

Koska pidätinsylinterin liitoskohdat ovat rajavoitelutilanteen alaisena tai kokonaan ilman voitelua, on pinnankarheudella ja pinnan profiililla huomattava vaikutus liukumisen kitkaan ja täten myös kulumiseen. Komponenttien kulumiskestävyyttä voidaan parantaa muuttamalla pinnankarheutta ja pinnanprofiilia mahdollisimman suotuisaksi kitkan näkökulmasta. Tämä voidaan toteuttaa luvussa neljä esitellyn pinnankarheusteorian perusteella. Rajavoitelutilanteessa stick-slip tapahtumasta aiheutuvaa kulumista voidaan minimoida vaihtamalla olemassa ole-

van voiteluaineen tilalle korkeampi viskositeettinen voiteluaine. Voiteluaineen viskositeetin kasvattaminen on havaittu olevan potentiaalinen keino minimoida stick-slip tapahtumasta johtuva kuluminen (Zuleeg 2015).

Komponenttien materiaalien ominaisuuksista kovuudella on suuri merkitys kulumiseen, kuten luvussa neljä esiteltiin. Kovuutta voidaan nostaa lisäämällä ole-massa oleville komponenteille pintakäsittely, kuten nitraus tai karkaisu. Materiaalin vaihtaminen toimii pintakäsittelyn vaihtoehtoisena ratkaisuna kovuuden nostamisessa. Kovuuden lisäämistä tutkittaessa on syytä ottaa huomioon millä metodilla päästään mahdollisimman kustannustehokkaaseen tulokseen suhteessa saatavaan kovuuden lisäykseen. Erikoismateriaalien hinnat voivat olla huomattavan korkeita, sekä niiden saatavuus globaalisti ei välttämättä ole aina mahdollista. Myös kaikkien muiden ratkaisujen globaalia saatavuutta on pohdittava tarkoin, sillä jos erikoiskomponentteja ei ole saatavilla kaikissa koneiden valmistusmaissa, joudutaan niitä lähettämään muista maista aiheuttaen lisäkustannuksia sekä negatiivisia ympäristövaikutuksia.

Voiteluaineen lämpötilanhajautus ja -kesto ominaisuuksiin on syytä myös keskittyä. Jos liitoskohdissa käytettävä voiteluaine menettää voitelevat ominaisuutensa lämpötilan noustessa korkeaksi kitkan takia, ei siitä juurikaan ole apua. Esimerkiksi molybdeenidisulfidi, joka on yksi yleisimmin käytetyistä kiinteistä voiteluaineista menettää voitelevat ominaisuutensa kokonaan, kun lämpötila kohoaa 800 celsiusasteeseen. Tällöin se hajoaa molybdeeniksi ja rikiksi aiheuttaen kitkaker-toimen voimakkaan kasvun. Molybdeenidisulfidin on todettu voitelevan tehokkaasti kuitenkin vain noin 400 celsiusasteeseen saakka. (Kivioja ym. 2007, 226–227.) Lämpötilan nouseminen näin korkeaksi liitoskohdassa voi tuntua epätodelliselta, mutta on muistettava, että kuten luvussa neljä esiteltiin, voivat paikalliset lämpötilat saavuttaa jopa metallien sulamislämpötilan.

Todenmukaisen liitoksessa vallitsevan lämpötilan arvioimien on haastavaa teoreettisin keinoin, sen ollessa todella lähtöarvotarkkaa (Kivioja ym. 2007, 76–82). Voiteluaineiden tutkiminen kannattaakin tästä syystä suorittaa käytännön ratkaisujen testauksessa yhteydessä mittaamalla liitoksen lämpötilaa käytön aikana ja arvioimalla sen perusteella onko mitatut lämpötilat liian korkeat kyseiselle voiteluaineelle.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

6.1 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen

Työssä suoritetun tutkimustyön pohjalta voidaan vastata luvussa 1.2 määriteltyihin tutkimuskysymyksiin, jolloin saadaan samalla vastaus työn tutkimusongelmaan. Ratkaistava tutkimusongelma oli kulumista aiheuttavien ja käyttöikää lyhentävien tekijöiden tunnistaminen sekä niiden ehkäisy. Tutkimusongelman pohjalta määritettiin seuraavat neljä tutkimuskysymystä.

Mistä syistä kulumisen johtuu?

Kuten edeltävien lukujen perustella voidaan todeta, on kulumisen laaja käsite ja siihen johtavat syyt voivat olla myös seurausta jostakin yksityiskohtaisesta ulkoisesta syystä. Siksi tähän tutkimuskysymykseen vastattaessa on pitäyditty raportteja analysoitaessa yleisimmin esiin tulleiden syiden luettelussa. Tällaisia syitä ovat esimerkiksi;

- Voitelun puute: manuaalista liitoskohtien voitelua ei ole suoritettu tarpeeksi useasti, jolloin liitoskohdan voitelu on jäänyt huonolle tasolle. Mahdollisuutena on myös automaattisen voitelujärjestelmän vioittuminen.
- Pidätinsylinterin liitoksissa on käytetty muita kuin alkuperäisiä tai suunniteltuja osia: vääränlainen laakerointi nostaa kulumisen riskiä.
- Komponenttien laatu on heikko: huonolaatuiset komponentit, erityisesti huonon pinnanlaadun omaavat komponentit nostavat kulumisen riskiä.
- Komponenttien materiaali on väärä: Toimittajan vaihtuessa saattaa määrätty materiaalit vaihtua vahingossa aiheuttaen piirustuksista poikkeavan komponentin joutumisen koneeseen.
- Konetta on kuormitettu yli suositellun käyttöasteen: jos pidätinsylinterin ohjeistetut käyttöpaineet on ylitetty tai konetta kuormitetaan muutoin sille suositeltujen käyttöolosuhteiden ulkopuolella, on kulumisen todennäköisempää. Tämä tilanne sisältää myös tahattomat tilanteet, joissa pidätinsylinteri on kuormittunut erikoisen murskaustapahtuman kuten heilurin äkillisen kääntymisen (kuva 7) takia.

Millä kulumismekanismeilla kuluminen tapahtuu?

Pääkulumismekanisminä määriteltiin molempien konemallien osalta liukumiskuluminen, joka on oskilloivan liikkeen ja paikallisen pintapaineen yhdistelmä. Muita kulumisvaurion aiheuttajiksi tunnistettuja tekijöitä olivat iskukuluminen, sekä värähtelykuluminen. Iskukuluminen tapauksessa liitoskohdat ovat jo todennäköisesti entuudestaan kuluneita, jolloin liitoskohdissa esiintyvän väljyyden takia osat pääsevät hakkaamaan toisiaan vasten. Iskukuluminen on kuitenkin hyvä huomioida sillä se voi aiheuttaa pahimmillaan koko pidätinsylinterin totaalisen hajoamisen. Värähtelykuluminen on myös huomioitu yhtenä kulumismekanismina sen aiheuttaessa oksidikerroksen kulumista sekä materiaalin väsymistä ja täten voimistaen liukumiskulumista.

Miten teoriassa kulumiskestävyyttä ja käyttöikää voidaan nostaa?

Koska kuluminen johtuu pääosin liukumisesta ja etenkin oskilloivan liikkeen seurauksesta, voidaan kulumiskestävyyttä parantaa keskittymällä siihen liittyvien tekijöiden, kuten kitkan pienentämiseen. Pintapainetta voidaan pienentää oikealla laakerointivalinnalla ja toleranssien parantamisella. Tällöin pintapaine jakaantuu suuremmalle pinta-alalle. Mahdollisuutena on siis kasvattaa liitoksen poikki-pinta-alaa, jolloin kuormitus kohdistuu liitoskohdassa isommalle alueelle laskien paikallisia kuormituksia. Liukumisesta johtuvaa kulumista voidaan minimoida vähentämällä kitkaa. Kitkaa voidaan pienentää parantamalla komponenttien pinnanlaatua, lisäämällä kohteeseen voitelua tai parantamalla olemassa olevaa voitelua. Materiaalien oikea valinta ja etenkin niiden ominaisuudet kuten kovuus on sidoksissa kulumisnopeuden hallintaan vahvasti. Myös materiaaliparin valinta siten, että niiden liukoisuus toisiinsa nähden on pieni, auttaa adheesion ja kitkan pienentämisessä.

Mitä käytännön ratkaisuja on olemassa teoreettisille vastauksille?

Käytännön ratkaisuja kartoitettiin erikoiskomponenttivalmistajilta, tutkimuksen yhteydessä selvitettyjen kuormitus- ja kulumisanalyysin perusteella. Näitä komponentteja yhdessä muiden ratkaisujen kanssa tullaan testaamaan opinnäytetyön ulkopuolella työn toimeksiantajan tiloissa, sekä asiakaskontaktien kautta. Näin saadaan varmistettua niiden toimivuus todellisuudessa. Muita käytännön ratkaisuja ovat edellä olevien teoreettisten ratkaisujen soveltaminen suunnitte-

lussa. Esimerkiksi komponenttien valmistuspiirustuksiin voidaan parantaa havaittujen koneiden osalta materiaalimuutoksia, toleransseja ja pintojen määrittelyjä. Joidenkin koneiden osalta voidaan myös liitoskohtien geometriaa muokata siten, että kuormitus jakaantuu tasaisemmin liitoskohdassa, jakaen paikallista kuormitusta.

6.2 Luotettavuuden tarkastelu

Yksi opinnäytetyön kirjoittajan tehtävistä on näyttää toteen tutkimustulosten luotettavuus suorittamalla luotettavuustarkastelu. Se pitäisi löytyä jokaisesta opinnäytetyöstä riippumatta siitä onko kyseessä määrällinen vai laadullinen tutkimus. Tutkimustyön luotettavuutta voidaan tarkastella ja arvioida erilaisien luotettavuuskäsitteiden avulla. Tällaisia käsitteitä ovat reliabiliteetti ja validiteetti. (Kananen 2004, 257–259.)

Reliabiliteetilla tarkoitetaan tulosten pysyvyyttä eli jos tutkimus suoritettaisiin uudestaan, saataisiinko samat lopputulokset. Validiteetilla puolestaan tarkoitetaan sitä, onko tutkimus suoritettu oikein ja ovatko saadut tulokset oikein, eli vastaako tutkimuksessa tutkitut asiat todellisuuden ilmiöitä ja ovatko tutkimuksessa väitetyt asiat paikkaansa pitäviä. Reliabiliteetilla ja validiteetilla mitataan siis tutkimuksen luotettavuutta ja laatua. (Kananen 2004, 259–260.)

Opinnäytetyön tutkimuksen aiheena on ollut pääosin kulumiseen liittyvien teorioiden, tekijöiden, sekä pidätinsylinterin toiminnan tutkiminen. Kuten luvussa neljä todettiin, on kulumiseen liittyvää tietoa paljon empiirisen tiedon varassa. Kulumiselle ei ole olemassa myöskään täydellistä mallia ja se saattaa tapahtua toisiaan vastaavissa kohteissa erilaisilla mekanismeilla. Kulumisen voidaan siis todeta olevan todella monimutkainen aihealue ja usein vaativan teorian lisäksi käytännön testausta johtopäätösten varmistamiseksi sekä ratkaisujen löytämiseksi.

Työn reliabiliteettia arvioitaessa on otettava huomioon, että kulumiseen liittyvän teorian osalta voidaan päätyä myös hiukan erilaisiin tuloksiin. Tämä johtuu teorian monimutkaisuudesta ja siitä, että se perustuu osin vain empiirisen tutkimustyön pohjalle, jota ei ole voitu tieteellisten keinojen avulla täysin todistaa oikeaksi.

Tutkijan käyttämien aineistojen laajuus ja niihin perehtyminen sekä kriittinen tarkastelu vaikuttavat millaisiin teoreettisiin johtopäätöksiin päästään. Työssä käytetyt yhtälöt, ovat johdettu luotettavien ja toisiaan tukevien lähteiden perusteella. Laskut ovat myös pääsääntöisesti suhteellisen yksinkertaisia, joten niiden toistettavuus pitäisi olla suhteellisen helppoa.

Validiteettia eli pätevyyttä on tarkasteltava myös kriittisesti samaan tapaan kuin reliabiliteettiäkin. Validiteetin peruskysymyksenä on, tutkitaanko oikeaa asiaa (Eskelinen & Karsikas 2014, 15). On harjoitettava kriittistä pohdittava, ovatko tutkitut teoriat todellisuudessa yhteydessä kulumiseen ja täten apuna pidätinsylinterin liitoskohtien kehityksessä.

Työssä on aiemmin usein mainittu kulumisen monimutkaisuudesta ja siitä, että paljon siihen liittyvää teoriaa ja tietoa perustuu vain empiiriseen tutkimukseen. Tästä syystä voidaan todeta, että teoreettisen tutkimuksen tulisi toimia vain työkaluna ymmärtämisen ja tulosten tulkinnan yhteydessä todellisuudessa suoritettavassa kulumiseen liittyvässä teorioiden testauksessa. Voidaan myös todeta, että kulumiseen liittyvän tutkimuksen osalta teoreettinen tutkimus on aina toissijainen verrattuna todellisuudessa suoritettavaan testaukseen. Tätä väitettä voidaan perustella sillä, että kulumiseen liittyviä parametreja on niin valtava määrä, ettei kaikkia niitä voida kuitenkaan ikinä ottaa täysin huomioon teoreettisissa laskuissa tai päätelmissä.

Kulumisen tutkiminen todellisuudessa sekä uusien osien testaaminen rajattiin opinnäytetyön ulkopuolelle. Tästä syytä työssä kehitettyjen teorioiden paikkaansapitävyyttä tai yhteyttä todellisuudessa tapahtuvaan kulumiseen voidaan lähinnä spekuloida lähteiden luotettavuuden ja relevanttiuden pohjalta. Tästä syystä työssä on pyritty etsimään viitteitä useammasta toisiaan tukevista lähteistä sekä käyttämään hyödyksi pidätinsylinteriä muistuttavien tutkimustuloksien johtopäätöksiä apuna teorioiden kehittämisessä. Lähteet ovat valikoitu kriittisesti niiden luotettavuutta arvioiden sekä pyritty käyttämään aina alkuperäislähteitä, mikäli ne ovat olleet saatavilla.

Luotettavuutta voidaan myös tutkia työn uskottavuuden näkökulmasta. Tieteellisen tutkimuksen yhteydessä uskottavuudella tarkoitetaan voiko tutkimuksen toimeksiantajat luottaa ja uskoa tutkimustiedon antamiin tuloksiin. Usein työn toimeksiantajat eli päättäjät haluavat tutkimuksen esitystavan olevan konkreettisten lukuarvojen esittelyä. (Eskelinen & Karsikas 2014, 66–70.)

Tutkimuksen perustuessa täysin teorian varaan ilman todellisuudessa suoritettuja mittauksien tuloksia ja analysointia ei voida täysin sanoa tutkimuksen olevan uskottava ja tarjoavan konkreettisia tuloksia päättäjille. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että tutkimuksessa tehdyt havainnot tai tulokset olisivat vääriä. Luotettavien ja konkreettisten tuloksien saavuttaminen tässä tutkimustyössä ilman testausta on myös täysin mahdotonta. Voitaisiin pikemminkin pohtia, tarjoaako työ luotettavan ja uskottavan pohjan todellisuuden testaukseen liittyen.

Työssä on pyritty selventämään koko aihealueeseen sidoksissa oleva relevantti teoria mahdollisimman kattavasti, selkeästi sekä johdonmukaisesti. Tutkimustyössä esitetyt havainnot ja johtopäätökset on pyritty esittämään sekä perustelemaan niin selkeästi, että ne olisivat helposti ymmärrettävissä myös pienemmällä perehtymisellä. Tämä menettelytapa tarjoaa edellytykset sille, että tutkimustuloksista ja havainnoista olisi mahdollisimman paljon konkreettista hyötyä päättäjille. Vaikkei konkreettisia toimia kestoian parantamisesta voidakaan vielä tarjota päättäjille, on pyritty siihen, että ne löytyisivät mahdollisimman helposti tämän tutkimustyön avulla.

6.3 Eettisyyden tarkastelu

Yksi tieteellisen tutkimuksen kulmakivistä on tutkijan hyvä etiikka (Eskelinen & Karsikas 2014, 24). Tutkijan etikkaa voidaan koetella Eskelisen ja Karsikkaan (2014, 24) mukaan kahdella keskeisellä kysymyksellä;

- ”Mikä on yleisesti tunnettua tietoa ja mikä on lainattua?”
- ”Mikä on tutkijan vastuu tuottamastaan tutkimustuloksesta?”

Ensimmäiseen kysymykseen vastatessa on pohdittava tarkoin tutkijan kirjoittamaa tekstiä ja siinä käyttämiä lähdeviittauksia. Etenkin kokemusperäisen tiedon kirjoittaminen tutkimukseen on ongelmallista, koska siinä hämärtyy raja yleisesti

tunnetun tiedon ja tutkijan oman näkemyksen välillä. On siis vaikeaa sanoa mikä tieto on totta ja mikä tieto on tutkijan itse muovaamaa ja täten myös mahdollisesti vääristynyttä tietoa. (Eskelinen & Karsikas 2014, 24–25).

Tässä tutkimustyössä on pyritty kaikki kirjoitettu teksti todistamaan oikeaksi käytämällä tekstiviitteitä sekä kertomalla, milloin viitteistä saatua tietoa on muokattu tai mukailtu alkuperäisestä lähteestä poiketen. Tutkimuksessa on siis pyritty avoimuuteen esittämällä mahdollisimman hyvin tekstiviitteet ja täten myös erottelemalla työssä tutkijan omat näkemykset sekä teorian pohjalta tehdyt johtopäätökset. Kirjallisuuskatsauksessa on pyritty laajaan aineiston tutkintaan ja viitattu aineisto on myös pyritty todistamaan muiden lähteiden avulla korrektiksi. Työssä on myös pyritty rehellisyyteen kyseenalaistamalla ja pohtimalla saatuja tuloksia kriittisesti.

Tutkijan vastuuta työstään voidaan pohtia tutkijan vapauden näkökulmasta. On tarpeellista kriittisesti siis arvioida, onko oikein tutkia aihetta sekä onko käytetyt menetelmät oikeita. Koska tämän tutkimuksen kohteena ei ole ihmiset tai muutoin herkkä tai arkaluontoinen aihealue, ei tutkijan vapautta tutkimusmenetelmien valinnasta tai tulosten esittämisestä tarvitse painottaa. (Eskelinen & Karsikas 2014, 24–25.)

Vaikkei työ olekaan varsinaisesti arkaluotoista kohderyhmää kuten ihmisiä koskeva on siinä otettu huomioon työn toimeksiantajan asema. Tutkimuksessa on pyritty suojaamaan toimeksiantajan kilpailuasemaa tutkijan ja yrityksen välisillä salassapitosopimuksilla. Työssä arkaluontoisen materiaalin, kuten asiakasdokumenttien tai yrityksen sisäisen tiedon levittämistä on pyritty minimoimaan esitelmällä sitä harkitusti ja vain yrityksen päättäjien luvalla. Samaa mentaliteettia on käytetty myös tuloksien esittelyssä, jonka seurauksena opinnäytetyöhön sisällytettyjen tulosten esittäminen on jätetty vain yleiselle tasolle.

Tutkimustoissa saattaa yleisesti tulla vastaan tilanteita, joissa tutkija tahattomasti tutkimuksessaan tekemillä valinnoilla vaikuttaa mielipiteisiin tai aiheuttaa tarpeetonta kohua. Tekniikan aloilla suoritettavissa tutkimuksissa on otettava huomioon esimerkiksi ympäristölliset ja tuotesuunnittelun ergonomiset näkökulmat, jotta tarpeettomalta mielipahalta säästytään. (Eskelinen & Karsikas 2014, 25–26).

Työssä on otettu huomioon tuotesuunnittelulliset aspektit esimerkiksi esittämällä rehellisesti, ettei työssä saatujen tulosten toimivuutta voida varmistaa ennen todellisuuden testausta. Työssä ei myöskään kannusteta ympäristöä kuormittavien toimien suorittamiseen vaan ohjeistetaan pohtimaan ratkaisujen valinnassa paikallisen ratkaisun suosimiseen päästöjen ja muiden ympäristövaikutuksien minimoimiseksi.

6.4 Tavoitteiden saavuttaminen

Työn päätavoitteena oli tunnistaa konekohtaiset kulumisen aiheuttajamekanismit. Koska kulumismekanismien määrittely pohjautuu pääosin teorian sekä raporttien varaan eikä teorioita ole osoitettu toteen käytännön testauksilla, voidaan työn päätavoitteen saavuttamista arvioida teoreettisen katsauksen laajuuden ja luotettavuuden pohjalta. Teoreettinen tutkimustyö useammasta toisistaan tukevasta itsenäisestä lähteestä tukee leukamurskaimen pidätinsylinterin liitoskohdissa tehtyjen havaintojen pohjalta määriteltyä kulumisteoriaa. Voidaan siis todeta ainakin teorian pohjalta kulumismekanismien määrittely onnistuneen. Kuitenkin on otettava huomioon, että kulumiseen liittyvä teoria on todella laaja-alainen ja yleisestikin siihen liittyvää tietoa on pitkälti empiirisen tiedon varassa. Kulumiseen vaikuttavia parametrejä onkin olemassa valtava spektri ja kaikkia kulumiseen vaikuttavia ilmiöitä ei edes tunneta. Tämän takia työssä tehdyt johtopäätökset voivat myös osoittautua vääriksi myöhemmin.

Toisena tavoitteena oli kehittää tunnistettujen mekanismien pohjalta ongelmaan ratkaisuja. Ennen varsinaisten kehitystoimien implementoimista koneiden rakenteille, on niitä testattava laaja-alaisesti toimivuuden varmistamiseksi. Ratkaisujen testaaminen ja koekäyttö ei sisälly tähän opinnäytetyöhön. Voitaisiin siis todeta toisen tavoitteen toteutuneen ainakin teoreettisen tutkimuksen pohjalta. Vaikka osa työssä esitellyistä teorioista paljastuisikin soveltumattomiksi testauksen aikana, toimii työ kuitenkin kattavana perehdytyksenä aiheeseen ja antaa työkalut uusien johtopäätöksien ja ratkaisujen etsimiseen.

Työn tavoitteiden voidaan siis todeta yleisesti saavutetuiksi, sillä laajuudella kuin ne oli mahdollista suorittaa opinnäytetyön rajoissa. Työssä esitettyjä johtopäätöksiä ja tuloksia on kuitenkin analysoitava kriittisesti luotettavuus- ja eettisyys tarkastelun yhteydessä esiin tulleiden huomioiden pohjalta.

6.5 Jatkotutkimuskohteet

Pääasiallisena jatkotutkimuskohteena työlle on sen aikana saatujen ratkaisuehdotusten testaaminen todellisuudessa. Testaaminen on suunniteltu tapahtuvan lähitulevaisuudessa opinnäytetyön jälkeen ensin yrityksen omissa tuotannon testaus tiloissa, jonka lisäksi suoritetaan mahdollisia lisätestauksia asiakaskontaktien kautta.

Työn aikana esiin nousi paljon muitakin jatkotutkimuskohteita, jotta pidätinsylinterin liitoskohtien kulumisesta ja toiminnasta saadaan mahdollisimman todenmukainen käsitys. Tällaisia tutkimuksen kohteita ovat;

- Pidätinsylinterin paineen vaihteluvälin selvittäminen murskauksen aikana.
- Kosketuspintojen todellisen lämpötilan mittaaminen murskauksen aikana.
- Käytettyjen voiteluaineiden soveltumisen tarkempi tutkiminen.
- Erilaisien materiaalien sekä niiden pintakäsittelyiden vertailu kovuuden nostamisessa.

Paineen vaihteluväliä työssä arvioitiin dynaamisella kuormituskertoimella, mutta sen tarkempi tutkiminen on järkevää, jotta voidaan paremmin arvioida murskauksesta aiheutuva paineen vaihtelu. Lämpötilan mittaamisella liitoskohdista käytön aikana voidaan osittain toteen osoittaa työssä määritellyt pidätinsylinterin kulumisen mekanismit. Lämpötilan mittaukseen voidaan myös yhdistää listan kolmas tutkimuskohde, joka on voiteluaineiden tarkempi tutkiminen. Voiteluaineiden ominaisuuksia ja soveltuvuutta voidaan pohtia tällöin myös lämpötilan näkökulmasta. Listan viimeinen tutkimuskohde liittyy kovuuden nostamisen vertailuun erilaisien materiaalien ja pintakäsittely metodien näkökulmasta. Koska kovuuden nostaminen voidaan toteuttaa useammalla metodilla, on hyödyllistä tutkia millä keinolla se voidaan toteuttaa parhaiten. Jatkotutkimuskohteita sivuttiin lyhyesti opinnäytetyössä, mutta niiden vertailulle tai tarkemmalle käsittelylle ei annettu suurempaa huomiota työssä.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyö tehtiin Metson toimeksiannosta tutkia ja kehittää leukamurskaimen pidätinsylinterin liitoskohtia. Työssä suoritettua tutkimus- ja kehitystyötä avulla tavoiteltiin pidätinsylinterin liitoskohdissa käytettyjen komponenttien kuten laakerien ja tappien kestoajan parantamista. Työn tutkimusongelmaksi asetettiin: kulumista aiheuttavien ja käyttöikää lyhentävien tekijöiden tunnistaminen sekä niiden ehkäisy. Tutkimusongelmaa pilkottiin luvussa 1.2 esitelyihin tutkimuskysymyksiin.

Työ aloitettiin toimintaympäristön ja tutkinnan kohteena olevan koneen esittelyllä, josta jatkettiin tarkemmin tutkinnan ytimenä olleen pidätinsylinterin sekä sen liitoskohtien tutkimiseen. Pidätinsylinterin osalta selvitettiin siihen kohdistuvat kuormitukset sekä sen käyttäytyminen murskauksen aikana.

Työn teoreettinen viitekehys koostettiin pääosin kulumisen teorian sekä siihen vaikuttavien tekijöiden ympärille. Teoreettisen tutkimuksen ja edellisessä osiossa selvitettyjen kuormitusten avulla suoritettiin kulumismekanismien määrittäminen sekä määriteltiin tekijöitä, joilla kulumista voidaan ehkäistä. Kulumismekanismien määrittämisessä käytettiin apuna asiakkaiden toimittamia raportteja kulumisesta sekä tehtiin havaintoja teorian ja raporttien välille. Saatua tuloksia ja johtopäätöksiä pohdittiin kriittisesti työn viimeisessä osassa, jossa samalla vastattiin työn alussa määriteltyihin tutkimuskysymyksiin.

Yhteenvetona aiempien kappaleiden pohjalta voidaan todeta työn sujuneen hyvin ja tavoitteiden täyttyneen opinnäytetyön rajoissa siinä laajuudessa kuin ne oli mahdollista täyttää. Suurimpana haasteena tutkimuksessa oli kulumisen sekä siihen vaikuttavien tekijöiden teoreettinen laaja-alaisuus ja monimutkaisuus. Kulumisteorioiden tutkiminen ja soveltaminen pidätinsylinterin tapaukseen olikin työn eniten aikaa vaativa vaihe. Jatkotutkimuskohteiksi jäi ehdotettujen ratkaisujen testaaminen sekä muiden luvussa 6.5 esitelyjen kohteiden syvällisempi tutkiminen.

LÄHTEET

- Abdelbary, A. & Li, C. 2023. Principles of Engineering Tribology: Fundamentals and Applications. London, United Kingdom: Academic Press.
- Buckley, D. 1981. Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication. Amsterdam: Elsevier Scientific.
- Cambridge Dictionary. n.d. Meaning of oscillation in English. Verkkosivu. Viitattu 17.12.2023. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/oscillation>
- Eskelinen, H. & Karsikas, S. 2014. Tutkimusmetodiikan perusteet. Tampere: Tammertekniikka
- Gupta, A. & Yan, D. 2006. Mineral Processing Design and Operation. Sydney: Elsevier Scientific.
- Heinonen, J. 2023. Design Engineer. Teams viestit. 15.9.2023.
- Hydroline. n.d. Different types of hydraulic cylinders. Verkkosivu. Viitattu 4.12.2023. <https://hydroline.fi/blogs/different-types-of-hydraulic-cylinders/>
- Kananen, J. 2014. Verkkotutkimus opinnäytetyönä. laadullisen ja määrällisen verkkotutkimuksen opas. Tampere: Juvenes Print
- Kivioja, S. 2009. Konetekniikka. 898. Painos 7. Helsinki: Otatieto.
- Kivioja, S., Kivivuori, S. & Salonen, P. 2007. Tribologia - kitka, kuluminen ja voitelu. Helsinki: Otatieto.
- Koivumäki, J. 2023. Product Support Manager. Teams viestit. 28.9.2023
- Li, Y., Huang, R., Zhao, S. & Wang, J. 2022. Contact pressure analysis of pin-loaded lug with clearance. Sage Journals. Verkkosivu. Viitattu 1.12.2023. [Contact pressure analysis of pin-loaded lug with clearance - Yanmin Li, Rui Huang, Shusen Zhao, Jingyu Wang, 2022 \(sagepub.com\)](https://www.sagepub.com/journals/doi/10.1177/0954009122111111)
- Metso. 2023a. Nordberg C-series -verkkosivut. Verkkosivu. Viitattu 27.10.2023 <https://www.metso.com/portfolio/nordberg-c-series/>
- Metso. 2023b. Tietoa yrityksestä – liiketoiminta. Verkkosivu. Viitattu 23.10.2023 <https://www.mogroup.com/fi/yritys/tietoa-meista/liiketoiminta/>
- Metso. 2023c. Crushing and Screening Handbook. Seventh edition. Vaatii käyttöoikeuden.
- Metso. 2023d. Nordberg C series jaw crusher - Sales presentation. PowerPointesitys. Vaatii käyttöoikeuden.

- Metso. 2023e. Asiakkailta sekä muista yksittäisistä lähteistä kerätyt sähköpostiviestit.
- Metso. 2022. Nordberg C Series Jaw Crusher Instruction Manual. Vaatii käyttöoikeuden.
- Metso. 2020. Active - Setting - Control - ACS – Sales presentation. PowerPointesitys. Vaatii käyttöoikeuden.
- Michaud, D. 2014. Difference Between Single & Double Toggle Jaw Crusher. Verkkosivu. Viitattu 7.11.2023 [Difference Between Single & Double Toggle Jaw Crusher \(911metallurgist.com\)](http://911metallurgist.com)
- Mäkelä, M. Soininen, L. Tuomola, S. & Öistämö, J 2005. Tekniikan kaavasto: matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 21. painos. Tampere: Tammertekniikka.
- Parikka, R. & Lehtonen, J. 2000. Kulumismekanismit ja niiden merkitys vierintälaakereiden eliniälle. Valtion tutkimuslaitos. Espoo. <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/kulumismekf.pdf>
- Poutanen, M., Bilker-Koivula, M. & Ruotsalainen, H. Maanmittauslaitos. Putoamiskiihtyvyyks. Viitattu 22.12.2023. <https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/fgi/putoamiskiihtyvyyks.pdf>
- SFS-ISO 10825: Hammaspyörät. Hammaspyörien hampaiden kuluminen ja vauriot. Terminologia. 2012. Standardi. Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. Viitattu 7.11.2023 <https://sfs.fi/>
- SKF Group. 2019. SKF Explorer steel/steel plain bearings – Laakeri-esitys. Viitattu 20.11.2023. https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d19680947297/pdf_preview_medium/0901d19680947297_pdf_preview_medium.pdf
- Stachowiak, G. & Batchelor, A. 2005. Engineering Tribology, Third Edition. San Diego: Elsevier Scientific.
- Viilo, K. Senior Development Manager. 2022a. Maanrakennusmateriaalien valmistus murskaamalla. Metso Outotecin 3.2.2022 järjestämän perehdytyslennon opetusmateriaali. Vaatii käyttöoikeuden.
- Viilo, K. Senior Development Manager. 2022b. Perehdytys murskausprosesseista ja niissä käytettävistä laitteista. Metso Outotecin järjestämän perehdytysluento 3.2.2022. Tampere
- Maanmittauslaitos. 2023. Kiviainesalue - tunnistaminen, esiintymät ja hyväksikäyttö. Verkkosivu. Viitattu 20.12.2023 <https://ak.maanmittauslaitos.fi/2023/maapera-ja-pohjavesi/maapera/kiviainesalueiden-arviointi/kiviainesalue-tunnistaminen#KIVIAINEKSEN%20K%C3%84YTT%C3%96KOH-TEISTA>

Mitutoyo. n.d. Pikaopas pinnankarheuden mittaukseen, opas laboratorio- ja konepajakäyttöön, suomenkielinen painos. Verkkosivu. Viitattu 7.11.2023.
[Quick Guide to Surface Roughness FI WEB.pdf \(mitutoyo.fi\)](#)

Zuleeg, J. 2015. How to Measure, Prevent, and Eliminate Stick-Slip and Noise Generation with Lubricants. SAE Internatio