

Hard Rock (- ei Hallelujah, vaan) Tribology

Pohjoismainen kaivosteollisuuden kulumisongelmiin keskittyvä kurssi ja seminaari Tampereella

Tampere Wear Centerin yhdessä Rock Trib -verkoston kanssa järjestämä Hard Rock Tribology -kurssi ja seminaari keräsivät 80 osallistujaa seitsemästä eri maasta Tampereen teknilliselle yliopistolle 4.–5.11.2014. RockTrib on pohjoismainen kaivosteollisuuden kulumisongelmien parissa toimiva tutkimus- ja kehitysverkosto, johon kuuluu yliopistoja ja tutkimusyksiköitä Ruotsista (Dalarna University (DU), Luleå, University of Technology ja Uppsala Universitet (UU)), Norjasta (Norwegian University of Science and Technology (NTNU) ja SINTEF) ja Suomesta (Tampereen teknillinen yliopisto/Tampere Wear Center (TWC) ja VTT).

Kaivosalan kulumistutkimus kiinnosti kansainvälistä yleisöä Tampereella. Osallistujista neljännes oli Suomen ulkopuolelta. Kaikki RockTrib-verkoston partnerit olivat ohjelmassa hyvin edustettuina. Kotimaisissa esityksissä pääpaino oli FIMECCin DEMAPP-, BSA- ja HYBRIDS-ohjelmien tuloksilla. Seminaariin liittyvä kurssi oli jatko-opintokelpoinen ja suunnattu erityisesti FIMECC Breakthrough Materials -tohtorikoulun opiskelijoille.

Kurssilla syvennyttiin ilmiöihin ja materiaaleihin

Professori **Staffan Jacobson** (Uppsala University) aloitti päivän kertauksella tribologian perusteista. Tribologia on monitieteellistä ja vaatii ymmärrystä fysiikasta, kemiasta, mekaniikasta, tekniikasta sekä luonnollisesti syvälistä tietoutta erityyppisistä materiaaleista ja niiden karakterisoinnista.

Pinnan karheus on olennainen pinnan tribologisiin ominaisuuksiin vaikuttava suure. Kuitenkin käytössä olevat pinnankarheusarvot harvoin kuvaavat riittävän hyvin pinnan luonnetta. Usein mikroskooppikuvat pinnasta ovatkin olennaisempia kuin pinnan Ra-arvo, joka toimii vain lisämääreenä. Lisäksi pinnalle muodostuva tribofilmi muuttaa alkuperäistä kontaktia nopeasti. Pinnankarheuden vuoksi kahden pinnan kontaktissa todellinen kontaktiala on paljon nimellistä alaa pienempi. Plastisessa kontaktissa materiaalin kovuus määrittää kontaktialan. Elastisessa kontaktissa alan määrittäminen on paljon haastavampaa ja siihen käytetään Hertzin yhtälöä. Käytännön kontaktitilanteet ovat kuitenkin haastavia yhdistelmiä plastisesta ja elastisesta muodonmuutoksesta. Tyypillistä kulumiselle luonnonkivikontaktissa ovat avoimet systeemit, joissa ympäristöllä on merkittävä osuus kulumiskontaktis-



sa ja kulumispinoilla on erityyppisiä abrasiivisia partikkeleita.

Professori **Mikael Olsson** (Dalar na University) muistutti esityksensä alussa, että kitka ja kulumisen eivät ole materiaaliominaisuuksia, vaan koko kulumissysteemin ominaisuudet vaikuttavat: materiaalin ominaisuudet, abrasiivin ominaisuudet, niiden välinen vuorovaikutus sekä kulumisympäristö. Esimerkkinä abraasiosta hän esitti kulumiskestävän teräksen ja kovametallin naarmutuskokeen timantti- ja kvartsikärjellä. Timanttikärjellä naarmutettaessa kovametalli kesti huomattavasti terästä paremmin ja myös kitkakertoimet olivat pienempiä. Kvartsikärki murtui terästä vasten nopeasti, kun naarmun edetessä kiilamainen muodostelma muodosti esteen sen etenemiselle. Sen jälkeen murtuminen jatkui samantyyppisenä pienemmässä mittakaavassa. Kovametallipintaa vasten kivi muodosti paremminkin tribofilmin eikä kovametalli osoittanut selviä merkkejä kulumisesta. Hän esitteli myös yleisesti kulutusosissa käytettävät materiaalit. Kulumiskestävässä teräksissä haasteena on standardoimattomuus. Eri teräsvalmistajilla on omat kovuusluokkiin pohjautuvat kauppa-merkkinsä, jotka kuitenkin voivat ominaisuuksiltaan ja koostumuksiltaan poiketa toisistaan huomattavasti.

Esa Vuorinen (Luleå University of Technology) keskittyi esityksessään porakruunujen erityyppisiin kulumisilmiöihin vaurioanalyysien kautta. Yhdellä porakruunulla voidaan porata viidestä metristä jopa sataan metriin. Porakruunujen kovametalliset nastat voivat murtua tai jopa irrota, kun teräs ympärillä kuluu. Ilmavirran aiheuttama turbulenssi saattaa myös aiheuttaa epätasaista kulumista. Porakruunujen sivuissa oli selviä merkkejä abraasiosta ja virtauskanavissa puolestaan virtaavan, hiekkanekaisen ilmavirran aiheuttamasta eroosiosta. Iskuliike aiheuttaa kiinnitysurissa pintaväsymistä ja säröilyä. Lisäksi oli havaittavissa kitkan aiheuttamaa paikallista pintakuumentumista.

Tribokorroosiossa kulumisen ja korroosio aiheuttavat yhteisvaikutuksen, joka yleensä on huomattavasti voimakkaampi kuin mitä kulumisen tai korroosio olisivat erillisinä aiheuttaneet. Professori **Nuria Espallargas** (NTNU) kuvasi useita tapauksia, joissa kulumisen lisää korroosionopeutta huomattavasti. Ongelmia saattaa syntyä putkistoissa, pumpuissa, tunneliporauksessa, merivesiympäristössä, mutta myös ihmiskehon varaosissa. Kokonaismateriaalihäviö voidaan ja-

kaa korroosion kiihdyttämään kulumiseen, mekaaniseen kulumiseen ja korroosioon. Tribokorroosion tutkiminen on haastavaa, sillä laboratorio-olosuhteissa erilliset korroosio- ja kulumiskoeket eivät anna riittävästi tietoa materiaalin käyttäytymisestä.

Terästen mikrorakenteella on merkitystä haastavissa kulumisolosuhteissa

Abrasiivinen ja iskuabrasiivinen kulumisen ovat haasteina kaivoksissa, mineraalien prosessoinnissa ja kivimateriaalien kuljetuksessa. Tutkija **Vilma Ratia** (TWC) raportoi tutkimustuloksiaan terästen kulumisesta mitattuna kolmella eri menetelmällä, jotka olivat impeller-tumbler iskuabraasiotesti, puristava murskain ja murskaava pin-on-disk abraasiotestilaitteisto. Nämä testimenetelmät pyrkivät mallintamaan kulumista todellisissa olosuhteissa ja abrasiivina käytetty luonnonkivi murskaantuu kokeiden aikana. Kovemmissa teräksissä leikkautuminen on suuremman roolissa, kun taas kovuudeltaan alhaisemmissa teräksissä pinta muokkautuu voimakkaasti ja kivi tarttuu pintaan kiinni. Sekä abrasiivisessa että iskumaisessa kontaktissa tapahtuu pinnan muokkauslujittumista, mikä saattaa vaikuttaa kulumisnopeuteen ja mekanismiin merkittävästi. Teräksen kovuuden vaikutus kulumiskestävyteen riippuu suuresti kontaktista.

Karbidittomien bainiittisten terästen (carbide free bainite, CFB) ferriittis-austeniittinen mikrorakenne on hyvin hienojakoinen. Rikastamoissa käytetyt erotustangot altistuvat käytössä voimakkaalle abrasiiviselle ja iskumaiselle kulumiselle. Esa Vuorinen tutki useiden eri CFB-teräksien ominaisuuksia ja kulumista sekä kenttäolosuhteissa kaivosseuloissa että laboratoriokokeissa. Kenttäkokeissa CFB-teräkset kesti-vät huomattavasti normaalisti käytössä ollutta karkaistua terästä paremmin. Tutkimuksen perusteella terästen pintakerroksessa tapahtuu muokkauslujittumista ja jopa faasimuutoksia TRIP-terästen tapaan. TWC:llä toteutettu kuivaeroosiotesti suurilla partikkeleilla tuotti samantapaisia tuloksia kenttätestien kanssa, mutta abraasiotestissä hiekkapaperia vasten pinnan muokkautumista ei saavutettu.

Mallinnus tuo lisäarvoa kulumistutkimukseen

Anssi Laukkanen (VTT) paneutui esityksessään kulumisprosessien ja niiden mikromekanismien mallinnuk-

seen. VTT:llä kehitetty ProperTune™ on materiaaliongelmien ratkaisun ja materiaalikehityksen menetelmäkoko-naisuus, joka perustuu laskennalliseen monitasomallintamiseen. Sen avulla voidaan ratkaista erityyppisten materiaalien suunnitteluun ja käyttöön liittyviä ongelmia, optimoida materiaaliratkaisuja sekä esittää digitaalisessa muodossa teollisten materiaalien käytettävyyttä ja soveltuvuutta todellisiin käyttöolosuhteisiin simuloinnin avulla.

Laukkanen esitteli useita esimerkkejä FIMECC DEMAPP- ja BSA-ohjelmissa tehdystä työstä. Laaja-alaisessa mallinnuksessa otetaan huomioon myös materiaalin mikrorakenne ja siinä tapahtuvat muutokset plastisessa ja elastisessa muodonmuutoksessa. Lisäksi on mahdollista mallintaa huokoisuuden, faasirajojen, murtumien ja muiden vastaavien epäjatkuvuuskohtien vaikutus. Myös abrasiivien ominaisuudet on tärkeä mallintaa, jos pyritään mallintamaan abrasiivista ja eroosiokulumista. Mitä tarkemmin materiaalin ominaisuudet pystytään määrittämään, sitä parempi laskennallinen malli mikrorakenteesta on mahdollista muodostaa. Mallinnus vaatii vankkaa kokeellista pohjaa ja lisäksi mallien varmistusta kokeellisella tutkimuksella. Mallinnus ei siis vähennä kokeellisen tutkimuksen tarvetta, vaan pidemminkin lisää sitä. Toisaalta mallinnus mahdollistaa myös rajojen ylittämisen ja normaalia yritys-erehdys -tyyppistä materiaalinvalintaprosessia nopeamman lähestymistavan. Esimerkiksi komposiittien ja hybridimateriaalien suunnitteluun mallinnus tuo kokonaan uuden lähestymistavan.

Ensimmäisen päivän päätteeksi tohtorikoulutettavat esittelivät posterinsa lyhyillä hissipuheilla ja iltana jatkettiin rennoissa merkeissä viinilasillisten äärellä posterinäyttelyssä ja laboratorierokierroksilla. Parhaaksi posteriksi valittiin **Juuso Tervan** (TWC) posterin ”Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing”.

Seminaaripäivänä keskityttiin RockTrib-partnereiden tutkimuksiin

Seminaarin avasi TWC:n projektipäällikkö **Kati Valtonen**, joka esitteli puheenvuorossaan RockTrib-tutkimusverkoston ja sen toimijat. Verkoston tavoitteena on edistää pohjoismaista kulumistutkimusta ja vahvistaa pohjoismaisen tutkimustyön asemaa sekä EU:ssa että kansainvälisessä tutkimuskentässä. Pohjoismaissa meneillään oleva voi-

makas pyrkimys kallioperän luonnonvarojen hyödyntämiseen on tuonut mukanaan myös kulumistutkimuksen painottumista kaivosteollisuuden soveltuksiin. Kaikilla verkoston toimijoilla on pitkä kokemus kulumistutkimuksesta ja hyvin varustettu tutkimuslaboratorio. Tutkimustyön tavoitteena on kulumisen hallinta kulumismekanismien ymmärtämisen, testausmenetelmien kehittämisen, kulumisen mallintamisen ja simuloinnin ja luonnollisesti kulumiskestävien materiaalien ja ratkaisujen kehittämisen avulla. Toiminnan pitkän tähtäyksen tavoitteena on kulumiseen keskittyvän Nordic Centre of Excellence -huippuututkimusverkoston rakentaminen ja yhteisen tohtorikoulutuksen kehittäminen.

Tutkimustietoa kovametallien kulumisesta kallioporauksessa

Seminaarin kolme ensimmäistä esitelmää käsitelivät kovametallityökalujen kulumista kallio- ja tunneliporauksessa. Professorit **Staffan Jakobsson** ja **Mikael Olsson** tarkastelivat kovametallien kulumista kallioporauksessa kuluneiden komponenttien mikrorakennetutkimusten ja mikroanalysoinnin avulla. Voimakkaiden iskujen aiheuttama hyvin paikallinen ja lyhytkestoinen lämpötilan nousu riittää sulattamaan sekä kvartsin että kovametallin sideaineen kobolttin. Sekä kiviaineksen sekoittumisessa kovametallin sideaineeseen että sulaneen kiviaineksen tarttumisessa kovametallin pintaan syntynyt ”komposiitti”kerros toimii kuluvana kerroksena työkalun pinnalla. Kovametallin karbidipartikkeleissa havaittiin kulumista plastisen muodonmuutoksen, murtumisen ja matriisista irtoamisen välityksellä. Kulumistilannetta simuloivissa naarmutuskokeissa todettiin kiviaineksen siirtymisen graniitista kovametallin pintaan alkavan jo ensimmäisen kontaktin aikana huoneenlämpötilassa. Siten graniitti vaikuttaa käyttäytyvän kontaktitilanteessa varsin sitkeästi. Kulumistilanne on puhtaaseen abraasiokulumiseen verrattuna huomattavasti monimutkaisempi eikä työkalumateriaalin kovuuden rooli kulumiskestävyyden muodostumisessa ole niin suuri kuin on ajateltu.

Vanhempi tutkija **Alexandre Kane** (SINTEF) käsiteli esityksessään suurihalkaisijaisten tunneliporien kovame-

HARD ROCK

TRIBOLOGY COURSE AND SEMINAR



Kahvitaukojen aikana vaihdettiin vilkkaasti kokemuksia ja mielipiteitä. Henkilöt vasemmalta Kati Valtonen (TWC, selin), Mikael Olsson (DU), Helena Ronkainen (VTT) ja Staffan Jakobsson (UU).

tallisten leikkuuterien kulumisen enustamista mallintamisen ja simuloinnin keinoin. Käynnissä olevassa SINTEFin ja yritysten laajassa yhteishankkeessa (NextDrill) mallinnetaan sekä työkalumateriaalit, työkalurakenne, kulumismekanismit että porattava kalliomateriaali ja sen murtumiskäyttäytyminen. Kunnianhimoisena tavoitteena on luoda kulumistilanteen numeerisen simuloinnin avulla elinikäennuste käytettäville työkaluille ja optimoida sekä työkalumateriaalit että työkalurakenne kulloiseenkin porattavaan materiaaliin parhaiten soveltuviksi.

Korkeita lämpötiloja ja korroosiotakin mukana kulumisessa

Apulaisprofessori **Jens Hardell** (Luleå University of Technology) selvitti tutkimustyössään korkean lämpötilan vaikutusta abrasiiviseen kulumiseen työkaluteräksissä ja ferriittis-perliittisessä booriteräksessä korkean lämpötilan (R.T. – 800°C) kumipyöräabraasiolaitteistolla. Korkeissa lämpötiloissa kulumistilanne mutkistuu, kun mukaan tulevat mm. materiaalin pehmeneminen, terminen väsyminen, diffuusio, hapettuminen ja mikrorakennemuutokset. Matalissa lämpötiloissa aina 500°C asteeseen saakka kulumisnopeus kasvoi vain lievästi lämpötilan noustessa ja pääasiallisena kulumismekanismina ollut abrasiivipartikkelien kyntäminen sekä lastuaminen lisääntyivät lämpötilan mukana. Yli 600°C asteen lämpötiloissa kulumismekanismi muuttui, kun kuluvaan pintaan muodostui mekaanisesti sekoittunut kerros teräkses-

tä ja siihen hautautuneista kuluttavista partikkeleista. Kerros ei kuitenkaan pienentänyt kulumisnopeutta, vaan ominaiskulumisnopeus (kulunut materiaalitilavuus/käytetty energia) kasvoi lämpötilan mukana molemmissa tutkituissa terästyypeissä.

Professori **Nuria Espal-largas** simuloi tutkimustyössään suurihalkaisijaisten tunneliporien hiiliteräksisten leikkuuterien kulumista kallio- ja maaperäpölyssä (TMB) kloridipitoisessa ympäristössä. Laboratoriotutkimusmenetelminä olivat tappikulutus (pin-on-plate) ja kumipyöräabraasiokokeet erityyppisissä vesiympäristöissä. Kokeissa todettiin hiiliteräksen kulumisnopeuden kasvava kloridipitoisuuden mukana ja saavuttavan maksiminsa kloridipitoisuuksilla, jotka ovat lähellä meriveden arvoja. ”Normaalien” abraasiokulumismekanismien lisäksi havaittiin pistesyöpymätyyppisen materiaalihäviön lisääntyvän kloridipitoisuuden mukana. Tunneliporauksessa käytetyt lisäaineet saattavat merkittävästi kasvattaa korroosionopeutta, ellei niitä valita oikein.

Uusia testausmenetelmiä ja pinnoitteiden kulumista

Tutkija **Juuso Terva** (TWC) esitteli kehittämänsä, leukamurskaimissa esiintyvän kulumisen tutkimiseen soveltuvan testauslaitteiston, jonka avulla tehtävään tutkimukseen tarvitaan ASTM G 81–83 -standarditesteihin verrattuna huomattavasti pienempi määrä murskattavaa kiviainesta pienemmän näytteen ansiosta. Laitteistossa voidaan säätää leukojen puristavan ja liukuvan murskausliikkeen suhdetta, joka mahdollistaa kiviaineksen murskaamiseen ja leukojen kulumiseen käytettyjen energioiden erottamisen toisistaan koetuloksissa. Kokeissa todettiin, että murskattavan kiviaineksen koetilanteen jälkeinen kokojakauma ei merkittävästi muutu liukumisliikkeen määrän lisääntyessä. Sen sijaan liukumisliikkeen kasvu nopeuttaa murskausprosessia, mutta kasvattaa samalla murskauksen tarvittavaa energiaa ja lisää liukuvan leuan kulumista. Kulumisnäytteiden mikrorakennetutkimuksissa todettiin voimakasta plastista muodonmuutosta sekä kiviaineksen hautautumista tutkitun rakenneteräksen pintaan.

Tutkija **Richard Waudby** (VTT ja The University of Sheffield) kertoi

elastomeerien, termisesti ruiskutettujen karbidi- ja bori-dipinnoitteiden sekä ultralujien terästen kestävydestä iskumaisia kuormituksia vastaan. Tutkimusongelmaa oli lähestytty sekä laboratoriokeilla että simuloimalla iskukohtaan muodostuvia jännitysjakautumia numeerisesti. Elastomeereissa tapahtuu iskun ansiosta voimakasta palautuvaa muodonmuutosta, joka absorboi suuren osan iskun energiasta ja tuottaa varsin hyvän kestävyden toistuvia iskuja vastaan. Pintaan iskeytyvän partikkelin geometria vaikuttaa voimakkaasti iskukohtaan muodostuviin jännityksiin. Termisesti ruiskutettujen pinnoitteiden kohdalla todettiin, että ne kestävät varsin hyvin pintaan kohdistuvia kohtisuoria iskuja, mutta vinosti kohdistuvien iskujen aiheuttama leikkausjännityskomponentti aiheuttaa pinnoitteen irtoamista, murtumista ja nopeampaa kulumista. HVOF (High Velocity Oxyfuel) -ruiskutetuilla pinnoitteilla saatiin parempia kestävyksiä kuin HVAF (High Velocity Air Fuel) -ruiskutetuilla pinnoitteilla.

Tohtori **Mike Davis** (Micro Materials Ltd) kertoi nanokovuus- ja nanoiskumittausten käytöstä kovametallien sekä pinnoitettujen kovametallien kulumiskestävyden arvioinnissa. Nanokovuusmittauksessa saatavasta voima-painumakäyrästä saadaan määritetyksi mitattavan materiaalin ns. plastisuusindeksi, jonka avulla voidaan arvioida materiaalin kulumiskestävyttä mm. lastuavan työstön olosuhteissa. Iskumaisessa kuormituksessa (esim. jyrästä tai katkeava lastuminen sorvauksessa) plastisuusindeksin kasvaminen parantaa kulumiskestävyttä, kun terämateriaalin kovuus on riittävä. Nanoiskumittausten avulla voidaan mitata materiaalien dynaamista kovuutta ja väsymistä, jotka korreloivat varsin hyvin terämateriaalien kestävyden kanssa eroosion sekä jatkuvan suurnopeustyöstön olosuhteissa.

Tutkija **Niko Ojala** (TWC) esitteli TWC:ssä kehitetyn eroosiotutkimuslaitteen, jossa voidaan käyttää merkittävästi suurempia kuluttavia partikkeleita kuin perinteisissä eroosiotesteissä. Testeissä voidaan säätää näytteiden nopeutta (max. 20 m/s) ja kuluttavien partikkelien kokoa aina 10 millimetriin saakka. Pyörivään akseliin neljälle eri tasolle kiinnitettyjen näytteiden kokoa ja geometriaa voidaan vaihdella ja testejä voidaan tehdä joko kuiva- tai liete-eroosio-olosuhteissa käytännön sovelluskohteen tarpeiden mukaisesti. Laitteistolla tehdyissä liete-eroosiokeksissä pienillä (alle 1 mm) eroosiopartikkeleilla tutkitut polymeeripohjaiset materiaalit kestivät kulumista paremmin kuin kulumiskestävät teräkset, mutta tilanne kääntyi päinvastaiseksi partikkelikoon suurentuessa yli kahden millimetrin. Voimakkaassa liete-eroosiossa, kun lietteessä oli 20 p-% 8–10 mm graniittipartikkeleita, kovahitsauspinnoitteet kestivät paremmin kuin työkaluteräkset, jotka puolestaan olivat tutkittuja kulumiskestäviä teräksiä parempia.

Kulumistutkimus ja -seminaarit jatkuvat

Tulevaisuudessa yhteistyö RockTrib-verkoston puitteissa laajenee ja syvenee yhteisten tutkimusteemojen ympärillä. Seuraava merkittävä yhteispohjoismainen alan konferenssi on Hämeenlinnassa Aulangolla vuonna 2016 järjestettävä NordTrib 2016. Vuonna 2015 TWC järjestää kansainvälisen kulumisseminaarinsa yhteistyössä Suomen Tribologiyhdistyksen kanssa. Teemana ovat teollisuuden kulumishaasteet. ▀

Lisätietoja Kati Valtoselta, kati.valtonen@tut.fi



Nordic know-how since 1893

forcit.fi

