

Eero Kankaanpää

KITKAVÄSYMISEEN VAIKUTTAVAT KESKEISET TEKIJÄT

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Eero Kankaanpää: Kitkaväsymiseen vaikuttavat keskeiset tekijät
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, konetekniikka
Kesäkuu 2023

Kitkaväsyminen on ilmiö, jossa hyvin pieniamplitudisen hankausliikkeen seurauksena materiaalin väsymisikä vähenee. Tällöin kaksi kosketuksissa olevaa kappaletta hankaavat toisiaan tyypillisesti alle sadan mikrometrin liikkeellä, jonka lisäksi kappaleisiin kohdistuu ulkoinen dynaaminen rasitus. Kitkaväsyminen on tyypillistä eri koneenosien liitoskohdissa, joissa esiintyy ulkoisten rasitusten lisäksi esimerkiksi värinää, joka johtaa osien hankaukseen. Säröjen ydintyminen on seurausta kitkaväsymisessä pintoihin muodostuvista pintapaine-, kitkavoima- ja leikkausjännityskeskittymistä.

Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena tavoitteenaan selvittää kitkaväsymiseen vaikuttavat keskeiset tekijät sekä tarkastella näiden vaikutusta kitkaväsymiseen. Työn alussa esitellään kitkaväsymiseen liittyviä yleisiä mekanismeja. Tämän jälkeen työssä tarkastellaan koetuloksia sekä laskeellisia tutkimuksia, ja havainnoidaan määritettyjen tekijöiden vaikutusta kitkaväsymiseen.

Kappaleiden havaitaan olevan alttiimpia kitkaväsymiselle kappaleiden ollessa niin sanotussa osittaisluistossa. Tällöin kontaktit ovat kiinnittyneet toisiinsa suuremman kitkavoiman alueella ja luistavat toistensa suhteen pienempien kitkavoimien alueilla. Osittaisluiston tapahtumiseen vaikuttaa kontaktien suhteellinen liike eli luistoamplitudi, kappaleita toisiinsa puristava pintapaine sekä kappaleiden välinen kitkakerroin. Luistoamplitudilla todetaan olevan kriittinen arvo, jolla kontaktit ovat osittaisluistossa ja kitkaväsyminen on merkittävintä. Suuremmilla luistoamplitudeilla tapahtuu enemmän kulumista, ja säröjen ydintyminen vähenee. Pienemmällä luistoilla pintoihin ei muodostu suuria jännityskeskittymiä, joten säröt ydintyvät hitaammin. Pintapaine vaikuttaa kappaleiden liikettä vastustavaan kitkavoimaan. Pintapaineen kasvattaminen johtaa suuri magnitudisiin jännityskeskittymiin. Tällöin kuitenkin kontaktien luistamiseen vaaditaan suurempi tangentialinen voima, ja kontaktien välillä on enemmän pitoa. Myös kitkakerroin vaikuttaa kontaktien väliseen kitkavoimaan sekä luiston tapahtumiseen. Suuremmilla kitkakertoimen arvoilla luistoamplitudi vähenee, mutta kitkavoima kasvaa. Osittaisluisto saavutetaan näiden kolmen muuttujan avulla, jotka toisaalta vaikuttavat myös toisiinsa.

Avainsanat: Kitkaväsyminen, väsyminen, osittaisluisto, kitka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEORIAA	3
2.1 Kitkaväsyminen ilmiönä	3
2.2 Kitka	3
2.3 Luisto	4
2.4 Särön muodostuminen	5
3. KESKEISET VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	7
3.1 Luiston amplitudin vaikutus	7
3.2 Pintapaineen vaikutus	10
3.3 Kitkakertoimen vaikutus	13
4. YHTEENVETO	17
LÄHTEET	18

1. JOHDANTO

Kitkaväsyminen on materiaalille haitallinen ilmiö, jossa kahden kosketuksissa olevan kappaleen pinnan pieniamplitudinen hankaava liike vähentää kappaleiden väsymisikää (Liskiewicz & Daniele 2022, s. 32). Käytännössä tämä johtaa vaihtelevasti kuormitettujen kosketuksissa olevien kappaleiden murtumiseen esimerkiksi liitoskohdista hyvin pieniamplitudisen hankauksen vaikutuksesta. Kosketuspintojen hankauksella havaittiin olevan vaikutusta väsymiseen ensimmäisen kerran vuonna 1911 tehdyssä koejärjestelyssä, mutta ilmiön toimintaperiaatetta alettiin ymmärtämään vasta 1950-luvulla (Liskiewicz & Daniele 2022, s. 17). Nykyäänkin kitkaväsymistä voidaan pitää monimutkaisena ilmiönä, vaikkakin tutkimusten ansiosta kitkaväsymisen säröjen ydintymistä sekä käyttäytymistä pystytään ennustamaan tarkasti (Sunde et al. 2018).

Kitkaväsymistä ilmenee erilaisissa koneenosien liitoskohdissa, joissa esiintyy värinää ja pientä hankaavaa liikettä vaihtelevan kuormituksen lisäksi (Stachowiak & Batchelor 2014, s. 663). Yksi erittäin tyypillinen kitkaväsymiselle alttiista liitoksista on lohenpyrstöliitos, jota käytetään muun muassa kaasuturbiineissa sekä suihkumoottoreissa lapojen ja roottorin kiinnittämiseen toisiinsa (Hills & Andresen 2021, s. 1). Toinen erittäin yleinen liitos, jossa kitkaväsymistä esiintyy usein, on ruuvi- ja niittiliitokset. Tällöin kaksi kappaletta on kiinnitetty toisiinsa kappaleet lävistävällä puristavalla komponentilla eli niitillä tai ruuvilla. Näin ollen kosketuksissa olevat komponentit ovat alttiita kitkaväsymiselle, kun liitokseen kohdistuu edestakaisia veto- tai puristusjännityksiä. (Nicholas 2006, s. 265)

Esimerkiksi vuonna 2018 Southwest Airlinesin lennolla 1380 olleen lentokoneen suihkumoottori vioittui moottorin siivekkeen liitoksen kitkaväsymisen vaikutuksesta, vaikka siivekkeen lohenpyrstöliitokseen kohdistunut rasitus oli sille määritettyä väsymislujuutta pienempi. Samoin vuonna 2017 Air Francen lennon AF66-lentokoneen moottori tuhoutui moottorin siivekkeen tyven vaurioituttua kitkaväsymisestä. (Liskiewicz & Daniele 2022, s. 246–247). Vaikka kitkaväsymistä on tutkittu jo vuosikymmenten ajan, ei sen aiheuttamilta tuhoilta ole voitu välttyä. Tämä johtuu siitä, että kitkaväsyminen ei ole välttämättä suunnittelijoiden tiedossa sekä siitä, että koneensuunnittelussa on hyvin vaikea päästä eroon kitkaväsymistä aiheuttavasta pienestä hankausliikkeestä (Stachowiak & Batchelor 2014, s. 647).

Tämän työn tarkoitus on tutustua tärkeimpiin tekijöihin, jotka vaikuttavat kitkaväsymisen aiheuttamaan säröytymiseen. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena vastaamalla tutkimuskysymyksiin; mitkä ovat keskeisimmät vaikuttavat tekijät kitkaväsymisessä, ja miten nämä tekijät vaikuttavat kitkaväsymiseen. Työn toisessa luvussa määritellään kitkaväsymiseen liittyviä yleisiä mekanismeja ja kitkaväsymisen toimintaperiaatetta. Kitkaväsymiseen vaikuttavia keskeisimpiä parametreja käsitellään tämän työn kolmannessa luvussa.

Tämä työ käsittelee ainoastaan metallien kitkaväsymiseen vaikuttavia keskeisiä tekijöitä, joten puhtaaseen väsymiseen tai muihin väsymisen muotoihin vaikuttavat tekijät rajataan pois. Työssä käsitellään osin kriittisen tason menetelmällä saatuja koetuloksia. On myös olemassa muita vastaavia menetelmiä, mutta näiden käsittely rajataan pois tässä työssä.

2. TEORIAA

2.1 Kitkaväsyminen ilmiönä

Väsyminen on materiaalin heikkenemistä dynaamisen rasituksen vaikutuksesta. Materiaalin väsyminen tapahtuu vaihtelevan kuormituksen vaikuttaessa tyypillisesti pitkään, ja se on erittäin yleinen vaurioon johtava ilmiö metalleilla. Väsymismurtuma muistuttaa hausrasmurtumaa myös sitkeillä metalleilla, sillä väsymisen aikana plastista muodonmuutosta tapahtuu hyvin vähän. (Callister & Rethwisch, 2020, s. 247) Materiaalille voidaan kokeellisesti määrittää useita parametreja kuvaamaan väsymistä. Yksi tärkeä tällainen parametri on väsymisikä, joka kuvaa tiedetyn jännitysamplitudisten jaksollisten rasitusten lukumäärää, jonka materiaali kestää ennen murtumista. (Callister & Rethwisch 2020, s. 250) Kitkaväsymisessä puolestaan jaksollisen kuormituksen lisäksi kappaleen pintaan vaikuttaa myös toisen kappaleen hankaava liike, joka alentaa merkittävästi väsymisikää (Stachowiak & Batchelor 2014, s. 660). Tätä alennettua väsymisikää voidaan kutsua kitkaväsymisiäksi.

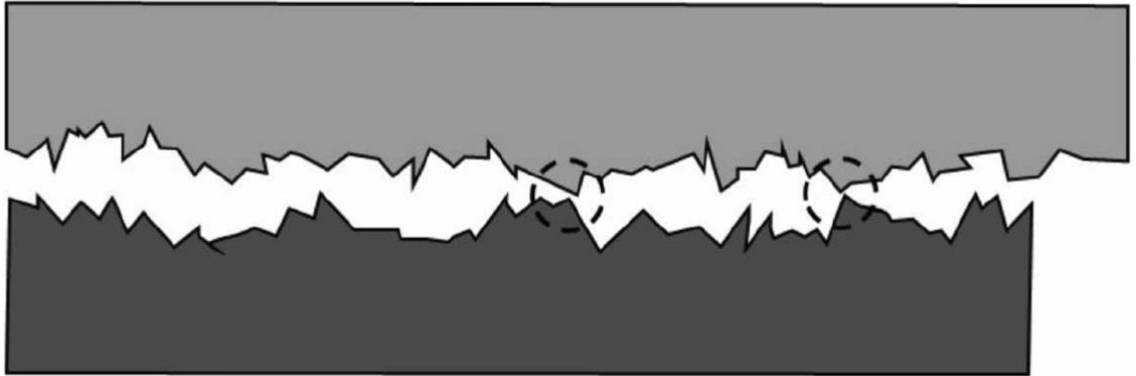
Väsymisessä ja kitkaväsymisessä vaurioituminen on kolmivaiheinen prosessi, johon kuuluu särön ydintyminen ja kasvu ja lopulta murtuminen (Bhatti & Abdel Wahab 2018; Callister & Rethwisch 2020, s. 253). Säröjen ydintymisessä jännityskonsentraatiot muodostavat materiaaliin pieniä säröjä, jotka puolestaan kasvavat vähitellen vaihtelevan kuormituksen vaikutuksesta (Callister & Rethwisch 2020, s. 253). Kitkaväsymisessä särön ydintymistä vauhdittaa puhtaaseen väsymiseen verrattuna pinnassa vaikuttava kitkavoima (Kuhn & Medlin 2007).

2.2 Kitka

Kitkaväsymisen yhteydessä kitkalla viitataan ilmiöön, joka vastustaa kahden kiinteän kosketuksissa olevan kappaleen liukumista toistensa suhteen. Mikroskooppisella tasolla kitka johtuu pintojen vuorovaikutuksesta toistensa kanssa, mikä puolestaan voi tapahtua adheesion tai mikroskooppisen elastisen tai plastisen muodonmuutoksen kautta (Abdelbary 2020, s. 44). Kitkavoima eli voima, joka vastustaa liukumista voidaan yleisesti ilmaista kaavalla

$$F = \mu W, \quad (1)$$

missä F on kitkavoima, μ kitkakerroin ja W on pintoja yhteen puristava normaalivoima (Abdelbary 2020, s. 2).



Kuva 1. Havainnollistava kuva kahden pinnan kontaktista mikroskooppisella tasolla (Abdelbary 2020, s.44)

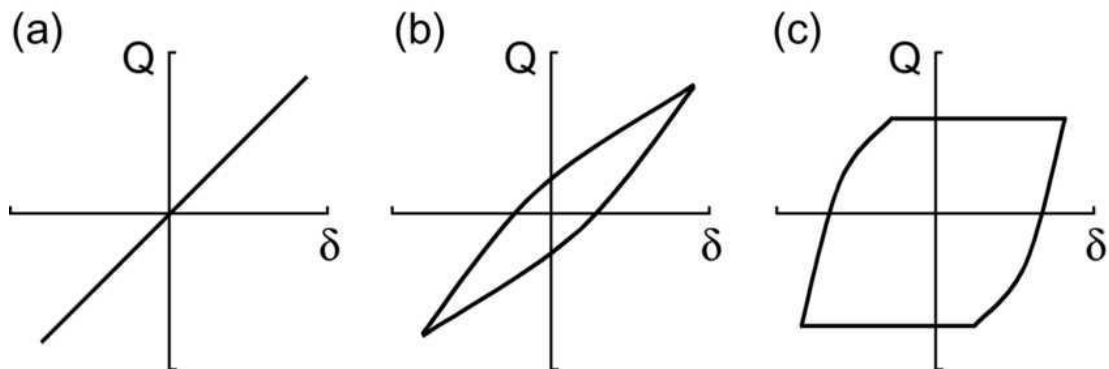
Kappaleiden pinnat eivät mikroskooppisella tasolla ole todellisuudessa ikinä täysin tasaisia kuten kuvassa 1 on havainnollistettu. Tämän vuoksi kappaleiden koskettaessa toisiinsa voitaisiin tarkastella todellista kosketuspinta-alaa, joka on näiden mikroskooppisten epätasaisuuksien kosketuspinta-alojen summa. Pintoihin vaikuttavien kohtisuoran ja tangentiaalisen voiman kasvaessa kontaktialueissa alkaa tapahtua mikroskooppista elastista ja plastista muodonmuutosta ja kosketuspinta-ala kasvaa. (Abdelbary 2020, s. 44)

2.3 Luisto

Olenaisia kitkaväsymiseen liittyviä käsitteitä ovat kokonais- ja osittaisluisto. Osittaisluistossa kappaleet eivät luista täysin, vaan kiinnittyvät toisiinsa paikoittain. Tämä edellyttää kappaleiden käyttäytyvän elastisesti kontaktialueilla, ja luistavan liikkeen amplitudi onkin muutamasta mikrometristä kymmeneen mikrometreiin. Suuremmilla amplitudeilla kappaleiden liikettä voidaan pitää makroskooppisena luistona eli kokonaisluistona. (Hills & Andresen 2021, s. 1) Osittaisluistossa kappaleen pintaan syntyy suuria jännitysgradientteja ja säröjen ydintyminen materiaaliin on tyypillistä. Kokonaisluistossa puolestaan materiaalin kuluminen on merkittävämpää ja säröjen muodostuminen hidastuu. (Bhatti & Abdel Wahab, 2018)

Osittaisluiston kohdissa, joissa luistoa ei tapahdu tangentiaalinen voima on pienempi kuin kitkakertoimen ja normaalivoiman tulo. Osittaisluistossa siis kitkakertoimen tai normaalivoiman tulee muuttua kontaktipinnan yli. (Liskiewicz & Daniele, 2022, ss. 36–37) Pidon, osittais- tai kokonaisluiston toteutuminen riippuu siis suhteellisen luiston suuruuden lisäksi kontaktialueella olevista normaalivoiman tai kitkakertoimen jakaumasta sekä tangentiaalisesta voimasta.

Kokeellisesti määrittäminen, onko kyseessä osittais- vai kokonaisluistoa, tapahtuu mitaamalla tangentiaalista voimaa sekä kappaleiden välistä siirtymää. Kappaleiden pintojen ollessa paikoillaan suhteessa toisiinsa tangentiaalin voima ei riitä ylittämään lepokitkaa, ja ainoa havaittava siirtymä kappaleiden välillä on hyvin pientä elastista muodonmuutosta. Osittaisluistossa kappaleiden pinnat luistavat paikoittain ja tällöin tangentiaalisen voiman ja siirtymään välillä alkaa näkyä hystereesiä. Kokonaisluistossa tangentiaalinen voima riittää ylittämään lepokitkan koko kontaktialueella, ja kappaleet luistavat täysin toistensa suhteen. Kokonaisluistossa hystereesikäyrä on huomattavasti kulmikkaampi kuin osittaisluistossa. (Liskiewicz & Daniele 2022, s. 39)



Kuva 2. Eri olosuhteille karakteristiset tangentiaalisten voimien suhteet siirtymään (a) kappaleiden välillä ei luistoa (b) osittaisluisto (c) kokonaisluisto (Liskiewicz & Daniele 2022, s. 38)

Kuvasta 2 huomattavaa on, että hystereesikäyrän vaakasuora leveys voiman ollessa nolla, on kappaleiden luistama matka toistensa suhteen eli suhteellinen luisto. Toisin sanoen voiman ollessa nolla, elastinen muodonmuutos on palautunut ja jäljellä oleva siirtymä on siis luistoa. Luistoamplitudi on siis hystereesikäyrän leveyden puolikas voiman arvolla nolla.

2.4 Särön muodostuminen

Kitkaväsytymisessä särön ydintyminen on vauriomekanismin ensimmäinen vaihe. Ydintyminen tapahtuu osittaisluistossa kohdissa, jotka ovat pidon ja luiston välissä, sillä näillä alueilla esiintyy suurin leikkausjännityskeskittymä. Kokonaisluistossa sekä pidossa ydintyminen voi tapahtua missä tahansa kontaktialueella, sillä näissä tilanteissa ei esiinny paikallisia jännityskonsentraatioita. (Kuhn & Medlin 2007)

Kuhn ja Medlin (2007) toteavat säröjen ydintymisen kappaleen pinnalla olevan seurausta kitkan aiheuttamasta jännitystilasta. Kuhnin ja Medlinin (2007) mukaan säröt ydintyvät suurinta pääjännitystä kohtisuoraan, ja kasvavat aluksi leikkausjännityksen vaikutuk-

sesta ja myöhemmin vetojännityksen vaikutuksesta. Särön kasvua ohjaa aluksi leikkausjännitys, joka on suurempi pinnan läheisyydessä, kun taas kauempana pinnasta kappaletta rasittava dynaaminen vetokuormitus toimii säröä ohjaavana jännityksenä (Bhatti & Abdel Wahab (2018), Kuhn & Medlin (2007)).

On myös huomattava, että tarkkaa rajaa, jossa särön käyttäytyminen muuttuu ydintymisestä särön kasvuun, ei voida määrittää. Usein kokeellisissa tarkasteluissa päätetäänkin jokin mitta särölle, jonka jälkeen ydintymisen katsotaan muuttuvan särön kasvuksi. Esimerkiksi Shin et al. (2016) tutkimuksessa lohenpyrstöliitoksen kitkaväsymistä tutkittiin eri jännitysamplitudeilla. Kokeissa vedettävän koekappaleen pituuden huomataan muuttuvan äkillisesti syklien ylittäessä tietty raja. Tällöin särön katsotaan ydintyvän tähän pisteeseen saakka, jonka jälkeen alkaa särön kasvu ja lopulta murtuma. Shin et al. (2016) koetuloksissa särön ydintymisajan todetaan olevan noin 90 % koko väsymisiästä.

Toisaalta kitkavoima materiaalin pinnassa johtuu kasvavasta kitkakertoimesta, joka on seurausta kappaleiden kiinnittymisestä toisiinsa adhesiivisen kitkan vaikutuksesta (Li et al. 2015). Adhesiivinen kitka puolestaan kasvaa, kun liikkeen vaikutuksesta hankaavien kappaleiden pinnoilla olevat oksidikerrokset kuluvat pois. Tällöin kontaktissa ovat puhtaasti metalli pinnat, joiden välinen adhesiivinen kitkavoima on suurempi kuin oksidikerroksen läsnä ollessa. (Sunde et al. 2018) Toisaalta kappaleiden pinnalta saattaa kulua pieniä epätasaisuudesta johtuvia partikkeleita, jotka puolestaan jäävät kontaktipintojen väliin ja toimivat ikään kuin väliaineena vähentäen kitkaa (Naidu & Raman 2005).

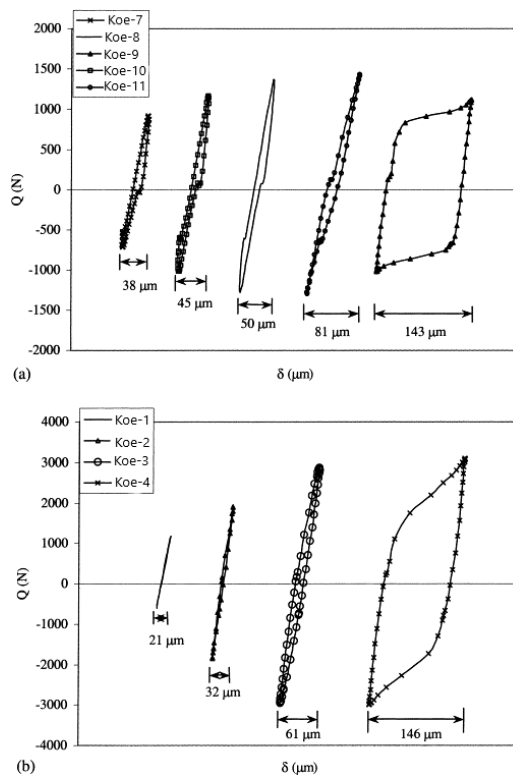
Kitkaväsymistä voidaan tarkastella matemaattisesti useasta eri näkökulmasta, joista yksi on kriittisen tason menetelmä. Tähän kuuluu useita eri tavoin määritettyjä laskennallisia parametreja, joiden avulla saadaan selville tietyt tasot tai suunnat, jotka ovat alttiita vaurioitumiselle. (Bhatti & Abdel Wahab 2018) Kriittisten tasojen menetelmissä perusperiaate on yhdistää eri jännitys- tai venymäarvoja yksittäisiksi parametreiksi (Hills & Andresen 2021, s. 146). Säröjen oletetaan ydintyvän kappaleen pinnassa tai pinnan läheisyydessä suuntiin, joissa parametrit saavuttavat suurimman arvonsa (Lykins et al. 2000). Parametrit voivat kertoa joko suurimmista venymäarvoista, jännityksistä tai energian absorptiokyvystä tarkasteltavassa suunnassa.

3. KESKEISET VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Kitkaväsymiseen vaikuttaviksi tekijöiksi mielletään tyypillisesti kappaleiden välinen kitkerroin, luiston amplitudi ja kappaleeseen kohdistuva pintapaine (Kuhn & Medlin, 2007; Naidu & Raman, 2005; Yang et al. 2022) Näillä kolmella muuttujalla katsotaan olevan suora vaikutus kitkaväsymiseen ja osittaisluiston saavuttamiseen. Näiden lisäksi esimerkiksi tangentiaaliset voimat mainitaan toisinaan tärkeimpien muuttujien yhteydessä (Li et al. 2015). Tässä luvussa tarkastellaan näitä keskeisiä tekijöitä.

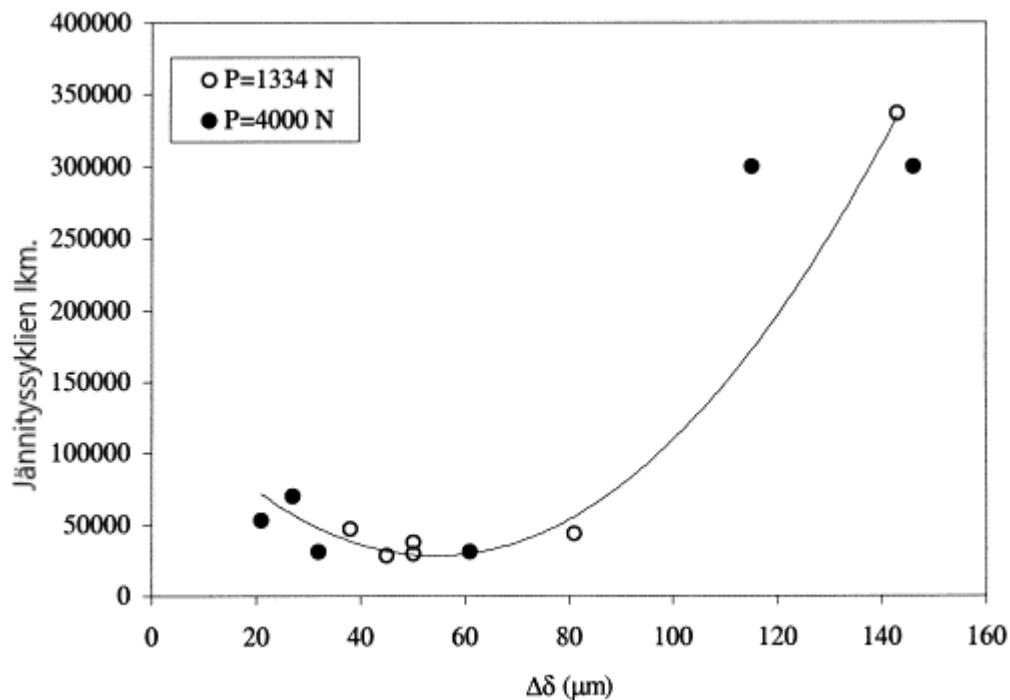
3.1 Luiston amplitudin vaikutus

Jin ja Mall (2002) tutkivat titaaniseoksen Ti-6Al-4V kitkaväsymistä. Kokeet suoritettiin yhdellä vetojännitysamplitudin arvolla, sekä kahdella näytteen pintaa painavalla normaalivoiman arvolla 1334 N:a ja 4000 N:a. Jokaisessa kokeessa näytteen pintaa hankaavan palan edestakaista siirtymää muutettiin, josta laskettiin palan ja näytteen välinen suhteellinen liukuma eli luisto. Kokeiden hystereesikäyrien ja kitkavoiman kehityksen perusteella voidaan päätellä missä kokeen vaiheissa olosuhteet ovat osittais- ja kokonaisluistoa. (Jin & Mall 2002)



Kuva 3. Stabiilin muodon saavuttaneita hystereesikäyriä suurenevilla hankauspalan siirtymillä normaalivoiman arvolla (a) 1334 N ja (b) 4000 N (mukaillen Jin & Mall (2002))

Kuvissa 3 (a) ja (b) hankauspalaan kohdistettu siirtymä nousee kokeen numeron mukaan (Jin & Mall 2002). Kuvasta 3 (a) havaitaan, että vain yhdessä kokeessa kyseessä oli kokonaisluistoa, kun muut olivat osittaisluistoa. Tämä voidaan päätellä hystereesikäyrien muodoista. Kuvassa 3 (b) luisto on vähäisempää kuin kuvassa 3 (a). Tämä saattaa johtua suuremmasta normaalivoiman arvosta. Toisaalta hankauspalan siirtymä pidettiin pienempänä matalammalla normaalivoiman arvolla, jotta tangentiaalisen voiman suhde normaalivoimaan voitiin pitää samassa kokoluokassa kaikissa kokeissa.



Kuva 4. Kitkaväsymisikä luiston suhteen (mukaillen Jin & Mall 2002)

Kuvasta 4 havaitaan kitkaväsymisikälle tyypillistä käyttäytymistä, jossa kitkaväsymisikä vähenee luistoamplitudin kasvaessa. Kitkaväsymisikä alkaa kuitenkin kasvaa luistoamplitudin kasvaessa riittävästi. Kitkaväsymisiän minimi saavutetaan noin 50–60 mikrometrin luistolla. Jin ja Mall (2002) toteavat tämän käyttäytymisen johtuvan materiaalin kulumisesta kontaktiolosuhteiden siirtyessä kokonaisluistoon, mikä johtaa kitkaväsymisiän kasvuun. Pienimmillä luistoilla tangentiaaliset voimat ovat myös pienempiä, joten säröjen ydintymistä tapahtuu hitaammin. Pienimmät kitkaväsymisiät havaittiin esiintyvän kokeissa, joissa todettiin esiintyvän osittaisluistoa (Jin & Mall 2002).

Madge et al. (2007) tarkastelivat Jin ja Mallin (2004) kokeiden tuloksia, jotka ovat jatkoa edellä esitettyihin kokeisiin. Madge et al. (2007) mallinsivat käsiteltäviä tuloksia ABAQUS-ohjelmalla, joka käyttää kriittisen tason menetelmää laskemaan vaurioparametrin arvoja. Parametrin todetaan mukailevan koetuloksia hyvin. Mallinnuksen tuloksista havaitaan, että osittaisluiston tapauksissa pinnalla vaikuttava tangentiaalinen jännitys kasvaa luiston kasvaessa. Kun luiston suuruus on riittävä, jotta kokonaisluistoa alkaa ilmetä,

tangentiaalisen jännityksen kasvu pysähtyy. Tämän vuoksi luiston kasvattaminen tästä eteenpäin ei pitäisi vaikuttaa kitkaväsymisikään. Madge et al. (2007) toteavat tämän tarkastelemalla vaurioparametrin arvoja kokonaisluiston tilanteille eri luiston amplitudeilla, ja havaitsemalla parametrin pysyvän samana luiston kasvaessa edelleen. Madgen et al. (2007) mukaan kokonaisluistossa tapahtuu enemmissä määrin kulumista, joka puolestaan laskee pintapainetta ja mahdollisesti poistaa säröjä johtaen kitkaväsymisiän nousuun.

Myös Leen ja Mallin (2006) suorittamassa kokeessa titaanielumiiniseos-näytettä hankaavan palan siirtymän vaikutusta kitkaväsymiseen tutkittiin. Kokeissa kuulapuhalluksella käsiteltyä sekä käsittelemätöntä näytettä rasitettiin syklisellä vetojännityksellä kahdella eri pintapaineen arvolla. Tangentiaalisen voiman ja siirtymän hystereesikäyrästä tunnistettiin jälleen osittais- ja kokonaisluistojen tilanteet.

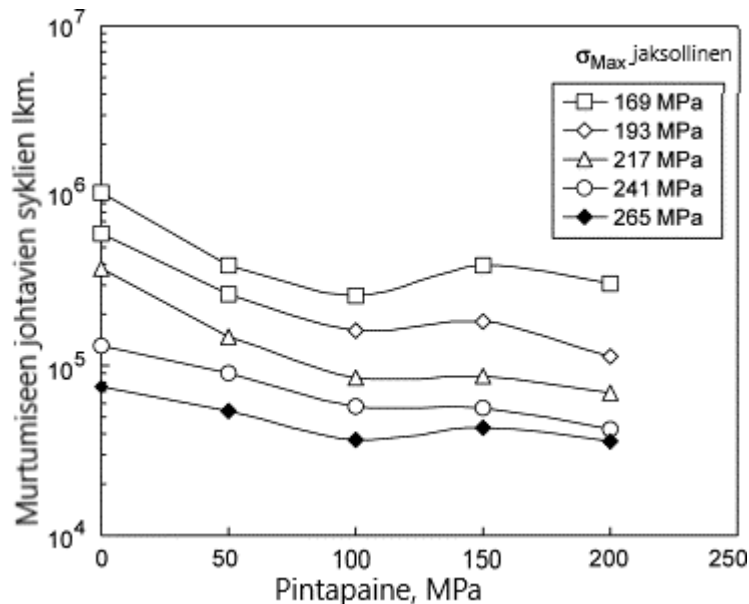
Kun Leen ja Mallin (2006) kokeessa hystereesikäyriä tarkasteltiin, havaittiin että kun hankauspalaa ei liikutettu, hankauspala sekä näyte eivät juuri luista toistensa suhteen. Tällöin hystereesikäyrä on koko kokeen ajan samankaltainen kuin kuvassa 2 (a). Hankauspalan siirtymää kasvatettaessa osittaisluistoa alkaa puolestaan ilmetä. Tällöin kokeen alussa hystereesikäyrä on kuvan 2 (c) mukainen, mutta kokeen edetessä hystereesi vähenee huomattavasti. Suuremmilla hankauspalan siirtymän arvoilla hystereesikäyrä pysyy koko kokeen ajan kuvan 2 (c) mukaisena, jolloin kokeessa ilmenee kokonaisluistoa koko kokeen ajan. (Lee & Mall 2006) Kuten Jinin ja Mallin (2002) kokeessa, luiston amplitudin kasvaessa kontaktiolosuhteet muuttuvat pidosta osittaisluistoon ja edelleen kokonaisluistoon.

Leen ja Mallin (2006) kokeessa kitkaväsymisiän käyttäytyminen luiston suhteen on samanlaista kuin Jinin ja Mallin (2002) kokeissa. Kitkaväsymisikä saavuttaa jälleen minimiarvonsa eli noin 20 000 sykliä noin 55 mikrometrin luistolla. Kokeissa kontaktiolosuhteiden todettiin muuttuvan osittaisluistosta kokonaisluistoon samalla 55 mikrometrin suhteellisella luistolla (Lee & Mall 2006). Kitkaväsymisiässä ei myös havaita eroja pintapaineen muuttuessa, ja luiston amplitudin voidaan olettaa vaikuttavan kitkaväsymisikään huomattavasti enemmän kuin pintapaine.

Kitkaväsymisikä saavuttaa tarkasteltujen kokeiden perusteella minimiarvon tietyllä luistoamplitudilla. Suuremmat luistoamplitudit johtavat herkemmin kulumiseen, joka kasvattaa kitkaväsymisikää. Pienemmillä luistoilla säröjen ydintyminen puolestaan hidastuu.

3.2 Pintapaineen vaikutus

Pintapaineen vaikutus kitkaväsymiseen on kuitenkin merkittävä, sillä pintaan ja sen läheisyyteen syntyvä jännitystila on erittäin tärkeä mekanismia määrittävä tila. Pintapaine vaikuttaa myös kitkavoimaan, kuten luvussa kaksi todettiin. Naidun ja Ramanin (2005) suorittamassa kokeessa tutkittiin eri pintapaineiden vaikutusta alumiiniseoksen kitkaväsymisikään sekä pinnassa vaikuttavaan kitkavoimaan. Pintaa hankaavan palan näytteen kohdistamaa pintapainetta kasvatettiin 50 MPa:sta 200 MPa:iin viidenkymmenen megapascalin välein pitämällä pintapaineen arvo tasaisena kokeiden aikana. Näytettä rasitettiin eri amplitudisilla edestakaisilla vetojännityksillä näytteen murtumaan saakka. Kitkavoiman määrittämiseen käytettiin venymäliuskoja hankauspalojen ja koekappaleen rajapinnalla.



Kuva 5. Kitkaväsymisikä pintapaineen avulla esitettynä käytetyille jaksollisille jännityksille (mukaillen Naidu & Raman 2005)

Kuvassa 5 on esitetty Naidun ja Ramanin (2005) kokeessa saatuja tuloksia. Kaikilla jännitysamplitudeilla syklien lukumäärän havaitaan vähenevän pintapaineen kasvaessa 100 MPa:iin. Pintapaineen kasvaessa yli 100 MPa:in, syklien lukumäärä alkaakin kasvaa, kunnes 200 MPa:in pintapaineella väsymisikä taas laskee. Naidun ja Ramanin (2005) mukaan tämä kitkaväsymisiän lokaalin minimiarvon johtuvan kitkajännityksen muutoksesta, kriittisestä liukumasta sekä särön sulkeutumisesta sopivalla pintapaineella.

Yleisesti pintapaineen kasvaessa kitkavoima kasvaa kaavan (1) mukaisesti, joten kitkaväsymisiän tulisi laskea. Naidu ja Raman (2005) kuitenkin toteavat pintapaineen kasvun vähentävän luistoa, jonka vuoksi kitkaväsymisikä ei laskekaan monotonisesti. Tietyllä

pintapaineen arvolla saavutetaan siis kriittinen luistoamplitudi samoin kuten kuvassa 4. (Naidu & Raman 2005)

Xu et al. (2017) tutkivat pintapaineen vaikutusta kitkaväsymiseen austeniittiselle teräkselle vääntävällä rasituksella. Pintapaineen vaikutusta tutkittiin vääntömomentin arvolla 115 Nm:ä pintapainetta muuttamalla 0–160 MPa:iin. Kitkaväsymisikä käyttäytyy samoin kuin Naidun ja Ramanin (2005) kokeissa. Kitkaväsymisikä saavuttaa minimikohdan noin 120 MPa:in pintapaineella, ja 150 MPa:in pintapaineella kitkaväsymisikä alkaa kasvaa. Koetuloksista huomataan myös, että pintapaineen vaikutus kitkaväsymisikään on huomattavasti suurempi pienemmillä pintapaineilla. Pintapaineen noustessa 0–70 MPa:iin kitkaväsymisikä laskee 1 000 000 syklistä hieman alle 200 000 sykliin. Pintapaineen edelleen tästä noustessa kitkaväsymisikä pysyy 100 000 ja 200 000 syklin välissä. (Xu et al. 2017)

Verma et al. (2017) tutkivat myös pintapaineen vaikutusta kitkaväsymiseen titaaniseoksella Ti-6Al-4V. Kokeita suoritettiin 150 MPa:in sekä 300 MPa:in pintapaineilla sekä kahdella eri vetojännityssuhteella 0,1 sekä 0,7. Verma et al. (2017) kokeissa samalla jännityssuhteella pintapaineen vaikutus kitkaväsymisikään ei ole kovin merkittävä. Tämän todetaan johtuvan käytetyn pintapaineen suurista arvoista. Kuten Xu et al. (2017) kokeissa pintapaineen noustessa yli 100 MPa:in, pintapaineen kasvun vaikutus kitkaväsymisikään pienenee huomattavasti.

Sama käyttäytyminen havaitaan Shivan et al. (2021) kokeista, joissa tutkittiin pintapaineen vaikutusta 9Cr–1Mo teräksen kitkaväsymiseen. Kitkaväsymisikä laskee myös pintapaineen arvon noustessa 100 MPa:iin, josta eteenpäin kitkaväsymisikä tasoittuu. Kokeissa tarkasteltiin myös hankausalueelle muodostuneen jäljen muutoksia eri käytetyille pintapaineille. Näytteissä havaitaan selvästi keskellä olevan alue, jossa hankauspala on ollut pidossa, ja jota ympäröi luistoalue. Shiva et al. (2021) toteavat pidossa olleen alueen kasvavan ja luistossa olleen alueen pienentyvän pintapaineen kasvaessa. Tämä johtuu kasvavan pintapaineen vaikutuksesta kitkavoimaan, jolloin suuremmilla pintapaineilla vaadittaisiin suurempi tangentialinen voima luiston saavuttamiseksi (Shiva et al. 2021). Naidu ja Raman (2005) saivat myös samanlaisia tuloksia tarkastellessaan hankausalueita.

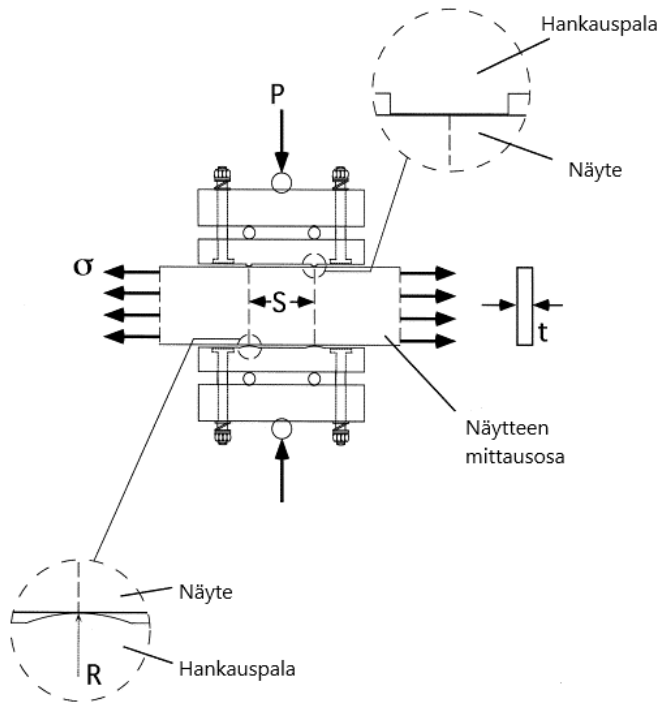
Toisaalta voitaisiin tarkastella pintaan kohdistuvan paineen jakaumaa ja sen synnyttämän jännitysgradientin vaikutusta. Bhatti et al. (2019) vertailivat eri kokeista saatuja koetuloksia, joissa toisessa käytössä oli ollut kaareva ja toisessa tasainen kontaktigeometria. Selvityksessä käytetään kriittisen tason menetelmiä laskemaan väsymisparametrien

arvoja, joiden käyttäytymisen voidaan katsoa seuraavan jännityksen käyttäytymistä kappaleen sisällä.

Bhattin et al. (2019) tarkastelemista tuloksista nähdään, että tasaisella kontaktigeometrialla vaurioparametri laskee eksponentiaalisesti kappaleen sisälle kuljettaessa, kun taas kaarevalla kontaktigeometrialla vaurioparametrin arvo laskee lähes lineaarisesti. Vertailussa tasaisella kontaktigeometrialla saaduissa tuloksissa kitkaväsymisiät ovat matalampia kuin kaarevalla kontaktigeometrialla. Tämä saattaa johtua siitä, että tasaisella kontaktigeometrialla näytettä painava kohtisuora voima, joka aiheuttaa pintapaineen, oli 2, 4 ja 8 kN:a. Kaarevalla kontaktigeometrialla painava voima oli aina sama 543 N:a eli huomattavasti pienempi kuin tasaisella kontaktigeometrialla. Kitkaväsymisikä saattaa tosin olla pienempi suuremman jännitysgradientin vuoksi, joka havaitaan vaurioparametrin eksponentiaalisena muutoksena. (Bhatti et al. 2019)

Tasaisen kontaktigeometrian koe oli suoritettu kahdella eri vetojännitysamplitudilla 110 ja 190 MPa:a ja kasvattamalla pintapaineen arvoja. Myös tällöin samoilla jännitysamplitudeilla kitkaväsymisikä vähenee pintapaineen noustessa. Pintapainetta ei tässä kokeessa kuitenkaan nostettu riittävästi, jotta kitkaväsymisiän nousu voitaisiin havaita. Kaarevalla kontaktigeometrialla tehdyssä kokeessa pintapaine oli pidetty vakiona, joten kitkaväsymisiän suhdetta pintapaineeseen ei voida arvioida. (Bhatti et al. 2019)

Papen ja Neun (1999) tekemässä kokeessa tarkasteltiin myös kahden erimuotoisen hankaavan pintageometrian vaikutuksia kitkaväsymiseen. Kokeessa toinen koekappaleen pintaa vasten painava alusta oli tasainen ja toinen kaareva kuvan 6 mukaisesti. Suuremmasta jännitysgradientista huolimatta särö kasvoi aina ensin vaadittuun mittaansa kaarevalla kontaktigeometrialla. Tämä saattaa johtua kaarevan kontaktigeometrian suuremmasta maksimi pintapaineen arvosta. Kokeiden lopettamishetkellä kahdessa kokeessa tasaisen kontaktin alla havaittiin myös merkittäviä säröjä. Kontaktigeometrian muuttaminen kaarevasta tasaiseen ei Papen ja Neun (1999) mukaan vaikuttanut suuresti kitkaväsymisikään. Bhattin et al. (2019) tuloksissa kitkaväsymisikä oli matalampi tasaisella kontaktilla. Tasaisen kontaktin kokeissa pintapaine oli suurempi, joten pintapaineen suurin arvo jakaumassaan on mahdollisesti tärkeämpi kuin se, miten paine on pinnalle jakautunut.



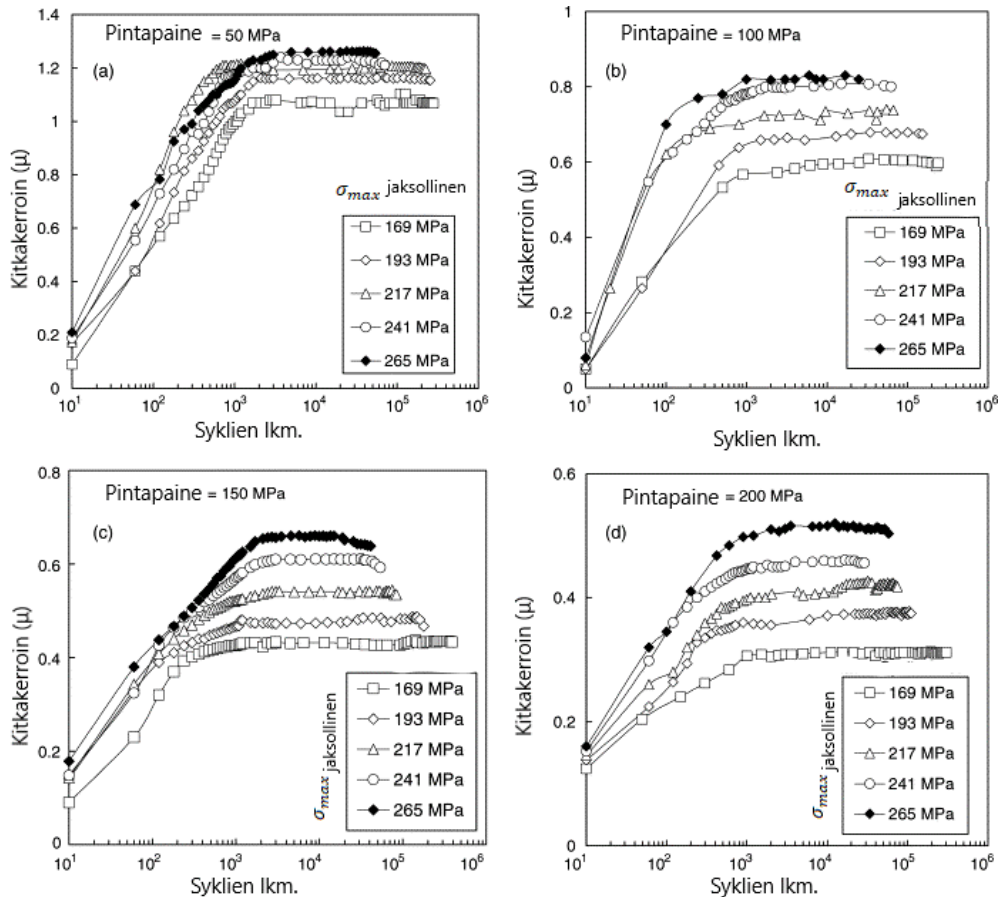
Kuva 6. Kitkaväsymiskokeessa käytetty näytekappale ja kaksi hankauspalojen erilaista kontaktigeometriaa (mukaillen Pape & Neu 2019)

Papen ja Neun (1999) kokeessa havaitaan myös jännityssuhteen ja keskijännityksen merkityksen särön ydintymiseen olevan pieni. Samalla jännitysamplitudilla ja eri jännityssuhteella tehdyillä kokeilla kitkavoiman havaitaan olevan likimain sama, ja kontaktigeometrioiden kitkavoimien välinen ero on myös likimain sama. (Pape & Neu 1999)

Pintapaine vaikuttaa hankauspintojen suuntaisiin voimiin. Suurempi pintapaine nostaa kitkavoimaa ja vähentää luistoa johtuen kriittisen luistoamplitudin saavuttamiseen.

3.3 Kitkakertoimen vaikutus

Kitkavoiman kasvu kitkaväsymisen edetessä johtuu siitä, että kontaktialueilla tapahtuu kulumista ja todellinen kontaktipinta-ala kasvaa. Pienemmillä pintapaineilla kitkavoima ei riitä välttämättä kulumiseen. Pintapainetta suurentamalla mikroskooppista plastista muodonmuutosta tapahtuu nopeammin ja kontaktipinta-ala kasvaa nopeammin. Tällöin saavutetaan tilanne, jossa kitkavoima aiheuttaa pinnoissa pelkkää adheesiosta johtuvaa elastista muodonmuutosta. (Naidu & Raman 2005) Tämä kitkavoimien kasvu on merkittävä tekijä kitkaväsymisen kannalta, sillä pintojen välinen kitkavoima johtaa säröjen syntymiseen.



Kuva 7. Kitkakerroin rasitussykliä avulla ilmaistuna eri vetojännitysamplitudeille (mukailten Naidu & Raman 2005)

Kuvassa 7 esitetyt kitkakertoimen arvot saatiin edelleen kaavan (1) mukaisesti jakamalla kitkavoima näytettä painavalla normaalivoimalla. Suuremmilla pintapaineilla muodostui riittävästi kitkaa plastisesti muuttamaan ja murtamaan kappaleiden pintaa, mikä synnyttää irtonaisia oksidipartikkeleita. Nämä puolestaan laskevat kitkakertoimen arvoa jäädessään hankaavien kontaktien väliin (Naidu & Raman 2005).

Verman et al. (2017) tutkiessa pintapaineen vaikutusta kitkaväsymiseen kokeissa kitkavoiman hystereesikäyrien pinta-alan todetaan pienentyvän kokeiden edetessä. Tämä tarkoittaa sitä, että kokeiden alussa tapahtuu ensin kokonaisluistoa, joka muuttuu vähitellen osittaisluistoksi syklien jatkuessa. Muutoksen kokonaisluistosta osittaisluistoon todetaan puolestaan johtuvan kasvavasta kitkakertoimesta, joka kokeiden edetessä tasoittuu samoin kuin Naidun ja Ramanin (2005) kokeessa kuten kuvassa 7.

Jin ja Mall (2002) havaitsivat myös tangentialisen voiman saavuttavan stabiilin arvon syklien jatkuessa eri hankauspalkan siirtymille. Kun nämä saavutetut stabiilit tangentialisen voiman arvot jaetaan pintaan kohdistetulla normaalivoimalla, saadaan ikään kuin näennäskitkakerroin. Jinin ja Mallin (2002) kokeissa hankauspalkan siirtymä pidettiin va-

kiona, joten siirtymään vaadittu tangentiaalinen voima muuttuu eri kokeissa. Tällöin tangentiaalinen voima on siis likimain sama kuin kitkavoima, mutta ei kuitenkaan täysin yhtä suuri. Pitoalueilla tangentiaalinen voima ei riitä ylittämään kitkavoimaa, ja luistoalueilla tangentiaalinen voima on suurempi kuin luistoa vastustava kitkavoima.

Lohenpyrstöliitoksen kitkaväsymistä tarkastellessaan Yang et al. (2022) tutkivat kitkakertoimen vaikutusta muun muassa pintapaineeseen, leikkausjännitykseen, luistoamplitudiin sekä Ruiz-vaurioparametriin korkeissa lämpötiloissa. Kokeet suoritettiin ensin näytteillä, jonka jälkeen koejärjestelyistä tehtiin elementtianalyysi ABAQUS-ohjelmistolla. (Yang et al. 2022) Kokeissa tarkasteltu vaurioparametri ei perustu kriittisten tasojen löytämiseen. Se on kehitetty puhtaasti koetuloksista yhdistämällä luistoamplitudin ja pinnassa vaikuttavat leikkaus- ja normaalijännitykset. Ruiz-parametrilla voidaan määritellä särön todennäköisin ydintymiskohta. (Bhatti & Abdel Wahab 2018) Yangin et al. (2022) käyttämä parametri huomioi myös kitkakertoimen kaavassaan.

Simuloiduissa tilanteissa kitkakertoimen arvona käytettiin 0,3, 0,4, 0,5, 0,6 ja 0,7. Kitkakertoimen kasvaessa 0,3:sta 0,7:ään luistoamplitudin havaitaan laskevan 44,36 %:a (Yang et al. 2022). Suuremmilla kitkakertoimen arvoilla luistoon vaadittu voima kasvaa, jolloin luistoa tapahtuu vähemmän. Yang et al. (2022) eivät havaitse kitkakertoimen vaikuttavan vaurioparametrin jakaumaan kontaktialueella, joten särö tulee ydintymään todennäköisesti samaan kohtaan kitkakertoimesta huolimatta. Kitkakerroin kuitenkin vaikuttaa parametrin suuruuteen. Vaurioparametrin arvo saavuttaa suurimman arvonsa kitkakertoimen arvolla 0,5, joten tutkittu liitos on alttiimmillaan särön ydintymiselle tällä kitkakertoimen arvolla. (Yang et al. 2022)

Swalla ja Neu (2001) tutkivat edelleen kitkakertoimen vaikutusta kitkaväsymiseen. Tyyppillistä kitkaväsymisen tutkimiseen käytettyä mittauslaitteistoa simuloitiin kitkakertoimen arvoilla 0,75, 1 ja 1,5. Käytetty FEM-ohjelma (Finite Element Method) laskee simulaatioille kitkaväsymisiä käyttäen kriittisen tason menetelmää (Swalla & Neu 2001).

Kitkavoiman havaitaan kasvavan hitaasti kitkakertoimen arvoilla 0,75 ja 1, mutta kitkakertoimen kasvaessa tätä suuremmaksi kitkavoiman kasvu nopeutuu huomattavasti. Pienemmillä kitkakertoimen arvoilla kappaleet pääsisivät luistamaan toistensa suhteen helpommin. Swalla ja Neu (2001) toteavat, että kitkaväsymisen tapauksessa kitkakertoimen arvo ei ole vakio ajan eikä kontaktialueen suhteen. Käyttämällä vakiokitkakerrointa paikalliset suuremmat kitkakertoimen arvot saattavat näin ollen jäädä huomioimatta. Swalla ja Neu (2001) toteavat simulaatioissa suuremman vakiokitkakertoimen mallintavan paikallisia jännityskeskittymiä paremmin. Esimerkiksi todellisissa kontaktikohdissa

vaikuttavan adheesion seurauksesta syntyvät jännityskeskittymät ovat hyvinkin paikallisia.

Samanlaisia tuloksia saivat Mangardich et al. (2019) tutkiessaan kitkaväsymistä lohenpyrstöliitoksessa. Lohenpyrstöliitoksella suoritettiin neljä koetta, jonka jälkeen koetilannetta simuloitiin jälleen FEM-ohjelmalla. Simulaatioissa tutkittiin särön muotoa, kasvusuuntaa, kasvunopeutta sekä särön kasvuikää kitkakertoimen arvoilla 0,35 ja 0,7. Suuremmalla kitkakertoimen arvolla saatiin jälleen parempia tuloksia vertaillen simulaation sekä kokeiden tuloksia. Mangardich et al. (2019) havaitsivat simuloitun särön kasvunopeuden mukailevan koetuloksia vaihtelevasti. Särön alkuvaiheessa kasvunopeudet eivät ole lähellä koetuloksia kummallakaan kitkakertoimen arvolla. Suuremmalla kitkakertoimella särön kasvaessa noin 400 μm :iin kasvunopeus alkaa kuitenkin mukailla koetuloksia varsin hyvin. Kitkakertoimella 0,35 kasvunopeus pysyy kuitenkin jatkuvasti huomattavasti koetulosten alapuolella.

Swallan ja Neun (2001) tutkimuksessa kitkakertoimen kasvaessa säröjen ydintymiseen vaadittujen syklien lukumäärä laskee merkittävästi. Syklien lukumäärä, jolloin särön katsottiin ydintyneen laskee 45 000:sta 600:aan. Mangardichin et al. (2019) tutkimuksessa pienemmällä kitkakertoimella särö kasvoi hitaampaa ja näin ollen särön kasvuikä on myös pienempi.

4. YHTEENVETO

Kitkaväsymisen yhteydessä on hyvin tärkeää tarkastella kosketuksissa olevien kappaleiden kontaktialueiden dynaamista tilaa. Tällöin tulee havainnoida ovatko kappaleet pidossa, osittaisluistossa vai kokonaisluistossa. Osittaisluistossa kitkaväsymismurtuma tapahtuu pitoa ja kokonaisluistoa nopeammin, joten kitkaväsymisiän maksimoimiseksi osittaisluistoa olisi hyvä välttää. Kontaktialueen tilaan vaikuttavat kappaleiden välisen suhteellisen luiston suuruus, pintapaine sekä kitkakerroin. On huomattava, että kitkaväsymistä voidaan tutkia kontrolloimalla joko hankaavan osan siirtymää, jolloin tangentialiset voimat muuttuvat liikkeen suuruuden pysyvän samana, tai pitämällä tangentialinen voima vakiona.

Luiston suuruudelle esitettiin löytyvän kriittinen arvo, jossa kitkaväsymisikä saa pienimmän arvonsa. Tätä suuremmilla luistoilla materiaalin kulumisen lisääntyy ja kitkaväsymisikä kasvaa. Luiston tapahtumiseen vaikuttaa pintojen välinen kitkakerroin, pintapaine sekä kappaleita rasittava tangentialinen voima.

Pintapaine vaikuttaa pintojen väliseen kitkavoimaan. Pintapaineen kasvu johtaa kitkavoiman kasvuun, joka voi puolestaan johtaa nopeammin säröjen ydintymiseen. Tällöin luistoa tapahtuu vähemmän, sillä tangentialisen voiman tulee ylittää kasvava kitkavoima. Toisaalta luiston vähentyessä pintoihin syntyy pienempiä jännityskonsentraatioita, ja säröjen ydintyminen hidastuu.

Kitkavoima vaikuttaa myös luiston suuruuteen sekä pinnan leikkausvoimaan. Jos tangentialinen voima pysyy vakiona, suurempi kitkakerroin vähentää luistoa. Toisaalta, jos hankaavan osa siirtymä pidetään vakiona, suurempi kitkakerroin johtaa suurempiin kitkavoimiin. Kitkakertoimeen vaikuttaa hankaustilanteessa pinnoissa tapahtuvat muutokset mikroskooppisen plastisen muodonmuutoksen eli kulumisen tapahtuessa.

Työn tutkimuskysymyksiin löydettiin vastauksia. Kitkaväsymiseen vaikuttavat keskeisimmät tekijät saatiin selville sekä näiden tekijöiden vaikutukset määritettiin. Työ rajautui ainoastaan metallien kitkaväsymiseen, ja muiden materiaalien kuten keraamien, polymeerien tai komposiittien kitkaväsymistä ei tarkasteltu. Toisaalta jatkotutkimuksena voitaisiin myös tarkastella muiden mahdollisten samanaikaisten väsymismekanismien vaikutusta kitkaväsymiseen.

LÄHTEET

- Abdelbary, A. (2020). *Extreme tribology: Fundamentals and challenges*. CRC press.
- Bhatti, N. A., & Abdel Wahab, M. (2018). Fretting fatigue crack nucleation: A review. *Tribology International*, 121, 121–138. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.029>
- Bhatti, N. A., Pereira, K., & Abdel Wahab, M. (2019). Effect of stress gradient and quadrant averaging on fretting fatigue crack initiation angle and life. *Tribology International*, 131, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.036>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Callister's Materials Science and Engineering (10th Edition, Global Edition edition)*. John Wiley & Sons, Inc.
- Hills, D. A., & Andresen, H. N. (Toim.). (2021). *Mechanics of Fretting and Fretting Fatigue*. Springer.
- Jin, O., & Mall, S. (2002). Effects of independent pad displacement on fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4V. *Wear*, 253(5–6), 585–596. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00061-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00061-3)
- Jin, O., & Mall, S. (2004). Effects of slip on fretting behavior: Experiments and analyses. *Wear*, 256(7–8), 671–684. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00510-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00510-6)
- Kuhn, H., & Medlin, D. (2007). *ASM handbook. 8: Mechanical testing and evaluation (2. print)*. ASM International.
- Lee, H., & Mall, S. (2006). Investigation into effects and interaction of various fretting fatigue variables under slip-controlled mode. *Tribology International*, 39(10), 1213–1219. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.02.011>
- Li, X., Zuo, Z., & Qin, W. (2015). A fretting related damage parameter for fretting fatigue life prediction. *International Journal of Fatigue*, 73, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2014.12.003>

- Liskiewicz, T., & Daniele, D. (2022). *Fretting wear and fretting fatigue: fundamental principles and applications*. ELSEVIER.
- Lykins, C., Mall, S., & Jain, V. (2000). An evaluation of parameters for predicting fretting fatigue crack initiation. *International Journal of Fatigue*, 22(8), 703–716. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(00\)00036-0](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(00)00036-0)
- Madge, J. J., Leen, S. B., McColl, I. R., & Shipway, P. H. (2007). Contact-evolution based prediction of fretting fatigue life: Effect of slip amplitude. *Wear*, 262(9–10), 1159–1170. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.004>
- Mangardich, D., Abrari, F. & Fawaz, Z. (2019). A fracture mechanics based approach for the fretting fatigue of aircraft engine fan dovetail attachments. *International journal of fatigue*, 129, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105213>
- Naidu, N., & Raman, S. (2005). Effect of contact pressure on fretting fatigue behaviour of Al–Mg–Si alloy AA6061. *International Journal of Fatigue*, 27(3), 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.07.001>
- Nicholas, T. (2006). *High cycle fatigue: A mechanics of materials perspective*. Elsevier.
- Pape, J. A., & Neu, R. W. (1999). Influence of contact configuration in fretting fatigue testing. *Wear*, 225–229, 1205–1214. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(98\)00398-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00398-6)
- Shi, L., Wei, D., Wang, Y., Tian, A., & Li, D. (2016). An investigation of fretting fatigue in a circular arc dovetail assembly. *International Journal of Fatigue*, 82, 226–237. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.025>
- Shiva, V., Goyal, S., Parthasarathi, N. L., Das, C. R., Kannan, R., Nagesha, A., Borah, U., Albert, S. K., & Bhaduri, A. K. (2021). Influence of Stress Ratio and Contact Pressure on Fretting Fatigue Behavior of Modified 9Cr-1Mo Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(4), 2822–2831. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05581-y>

Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering Tribology* (4th Edition).

Oxford : Butterworth-Heinemann

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpETE00005/engineering-tribology/engineering-tribology>

Sunde, S. L., Berto, F., & Haugen, B. (2018). Predicting fretting fatigue in engineering design. *International Journal of Fatigue*, 117, 314–326.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.08.028>

Swalla, D. R., & Neu, R. W. (2001). Influence of coefficient of friction on fretting fatigue crack nucleation prediction. *Tribology International*, 34(7), 493–503.

[https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(01\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00048-2)

Verma, V. K., Naseem, H., Raman, S. G. S., Murthy, H., Majila, A. N., & Fernando, D. C. (2017). Effect of contact pressure and stress ratio on the fretting fatigue behaviour of Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 707, 647–656.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.046>

Xu, Z. B., Peng, J. F., Liu, J. H., Cai, Z. B., & Zhu, M. H. (2017). Effect of contact pressure on torsional fretting fatigue damage of 316L austenitic stainless steel. *Wear*, 376–377, 680–689.

<https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.062>

Yang, B., Huo, J., Gao, Q., & Ren, R. (2022). Research on factors affecting fretting fatigue life of high-temperature dovetail tenon. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 45(4), 1126–1144.

<https://doi.org/10.1111/ffe.13654>