

Kitkaväsymisestä aiheutuvien säröjen etenemisen tutkiminen murtumismekaniikan avulla

Juho Niva

Tiivistelmä. Paperikoneen telan päätyliitokseen ydintyvien kitkaväsymissäröjen etenemistä tutkittiin murtumismekaniikan avulla, soveltaen kolmiulotteista elementtimenetelmään perustuvaa laskentaa jännitysintensiiteetikertoimen K_I ja sen vaihteluvälin ΔK_I määrittämiseksi. Analyysi osoitti parametrien kasvukehityksen hidastuvan ja jopa kääntyvän laskuun särön kärjen edetessä riittävän syvälle telavaipan seinämässä. Säröjen kasvunopeuden kannalta tämä tarkoittaa vähintäänkin merkittävää hidastumista, mutta myös pysähtyminen on mahdollinen.

Avainsanat: kitkaväsyminen, murtumismekaniikka, jännitysintensiiteetti, elementtimenetelmä

Vastaanotettu 16.6.2017. Hyväksytty 8.8.2017. Julkaistu verkossa 21.8.2017.

Johdanto

Kitkaväsymiseksi kutsutaan ilmiötä, joka ydintää ja kasvattaa säröjä yhteenpuristettujen pintojen edestakaisessa mikroskooppisessa luistossa. Englanninkielessä siitä käytetään nimitystä fretting fatigue. Kitkaväsymissäröjä tavataan toisinaan paperikoneen telan, ahdistus- ja ruuviliitoksesta muodostuvassa, päätyliitoksessa telavaipan ahdustusliitospinnalla. Vaurioituneet vaipat profiloituivat voimakkaiden käyttökuormien lisäksi pitkällä kuormitushistorialla. Havaintoja on toisaalta myös säröjen nopeasta ydintymisestä, mikä on tunnusomaista kitkaväsymiselle.

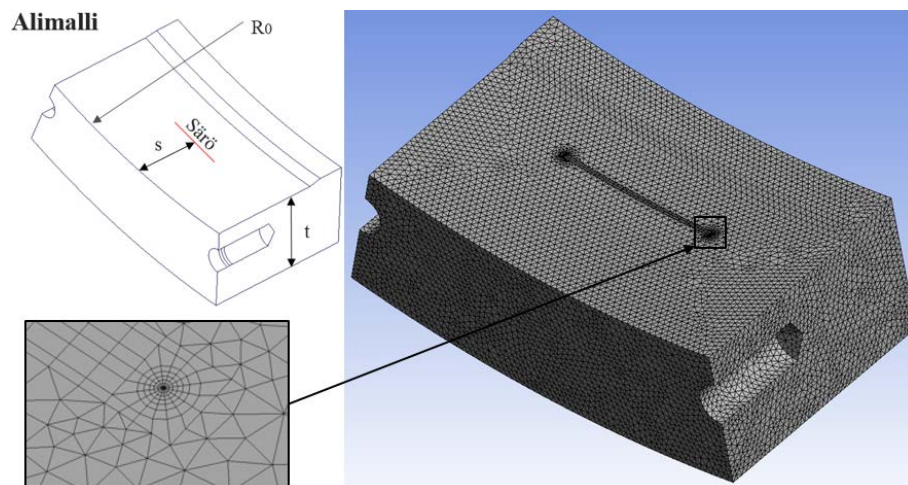
Vaurioiden ennaltaehkäisemisen ohella on muodostunut tarpeelliseksi tutkia kehäsäröjen etenemistä vaipan seinämässä kuormitushistorian aikana. Murtumismekaniikkaa soveltava elementtimenetelmään (*Finite Element Method, FEM*) perustuva laskenta on tähän hyvä työkalu. Sen avulla voidaan arvioida särön kasvun luonnetta suhteellisen niukalla materiaalin murtumis-ominaisuuksien tuntemuksella ja ilman täysmittakaavaista koelaitetta.

Laskentamalli

Laskennallinen tarkastelu perustuu olemassa olevaan vauriovaippaan, jonka kuormitushistoria ja särödimensiot tunnetaan. Jotta särönkasvun luonnetta voidaan arvioida luotettavimmalla mahdollisella tavalla, on analyysin ulkopuolelle rajattava matalat, kärkialueeltaan vielä vaikeasti mallinnettavan osittaisluistavan kontaktipinnan läheisyydessä sijaitsevat säröt. Sen sijaan tut-kimukseen on sisällytettävä syvyydeltään havaittuja säröjä pidemmälle vaipan seinämään edenneitä säröjä. Tutkittavat särösyvyydet ovat 6, 10, 14 ja 18 mm.

Asain [1] mukaan kitkaväsymissäröjen kehittyminen voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa särön ydintää ja sitä kasvattaa leikkaava muodonmuutos- ja jännitystila. Lyhyen sekakuormitusalueen jälkeen särön orientaatio kääntyy sen kärjen siirtyessä sitä avaavan kuormituksen vaikutuksen alaisuuteen. Tällöin säröllä on yleensä pituutta sadoista mikrometreistä yhteen millimetriin ja sen kasvusuunta lähestyy ydintymispinnan normaalia [1, 2]. Havaintojen nojalla on perusteltua käyttää jo useiden millimetrien syvyisten säröjen tutkimisessa laskenta-mallia, jossa säröjen orientaatio on kohtisuorassa ydintymispintaansa nähden. Analyysissä sovellettavaksi murtumisparametriksi valitaan jännitysintensiiteettikerroin K_I avaavan kuormitus-tavan sekä tutkittavan rakenteen määräävän vaihtojännityksen nojalla. Etenkin parametrin vaihteluvälillä ΔK_I on keskeinen merkitys särön kasvussa [3].

Päätyliitoksen kehäsäröjen FEM-analyysi suoritetaan alimallinnustekniikkaa hyödyntäen Ansys 17.2 -ohjelmistolla. Alimallin muodonmuutos määritellään ulkoisille kuormituksille altistetun säröttömän emomallin siirtymätuloksista. Särö kuvataan puolielliptisenä ja kohtisuorana ydintymispintaansa nähden. Kärkialueella käytetään elementtityyppiä SOLID186, joka singulaarisuuden tuottamiseksi degeneroi keskisolmullisista kuutioelementeistä kiilan muotoisia [4]. Elementtityypin avulla voidaan tulostaa suoraan ohjelmiston integroimia K_I :n arvoja. Alimallia havainnollistaa kuva 1 ja sen keskeisimmät mitat on lueteltu taulukossa 1.



Kuva 1. Alimalli ja sen elementtiverkko.

Taulukko 1. Alimallin geometrian dimensiot jännitysintensiiteettikertoimen K_I laskennassa.

Tunnus	Selite	[mm]
R_0	vaipan sisäsäde	527,5
s	särön etäisyys vaipan otsapinnasta	65,0
t	vaipan seinämän paksuus	65,5
l	särön kehäpituuden puolikas, ellipsin suurempi säde	40,0

Alimallin elementtiverkon verifioimiseksi suoritetaan vertailevaa laskentaa analyttisellä ratkaisulla, joka elliptisen tasosärön tapauksessa saadaan K_I :lle Greenin ja Sneddonin [5] nojalla muotoon:

$$K_I = \frac{\sigma_\infty \sqrt{\pi a}}{E(m)} (1 - m^2 \cos^2 \varnothing)^{1/4}, \quad (1)$$

jossa σ_∞ on nimellisjännitys kaukana säröstä, $m = \sqrt{1 - a^2/l^2}$ ja $E(m)$ on täydellinen toisen lajin elliptinen integraali. Kaavalla (1) määritettäviä tuloksia kerrotaan vielä arvolla 1.12, joka on likimain reunasärön muotokerroin [3]. Vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi verifiointi-analyysissä käytetään ekvivalenttia kuormitusta, joka tuottaa alimalliin yhtälössä (1) sovellettavan nimellisjännityksen. Vertailua suoritetaan myös alunperin Newmanin ja Rajun 1983 julkaisemaan koetuloksiin sovitettuun puolielliptisen pintasärön taulukkoratkaisuun, joka on luettavissa viitteen [3] sivulta 364. Se asettaa ehdon $s \gg a, l$, jonka voimassaolo alimallissa jää kuitenkin kyseenalaiseksi taulukon 1 perusteella.

Tulokset

Verifiointianalyysi

Alimallilla, yhtälöllä (1) sekä taulukkoratkaisulla määritetyt verifiointianalyysin tulokset on esitetty taulukossa 2. Alimallin osalta taulukon arvot on luettu maksimistaan särörintaman kärjestä. Vastaavasti analyttiset arvot on määritetty kulman arvolla $\varnothing = \pi/2$.

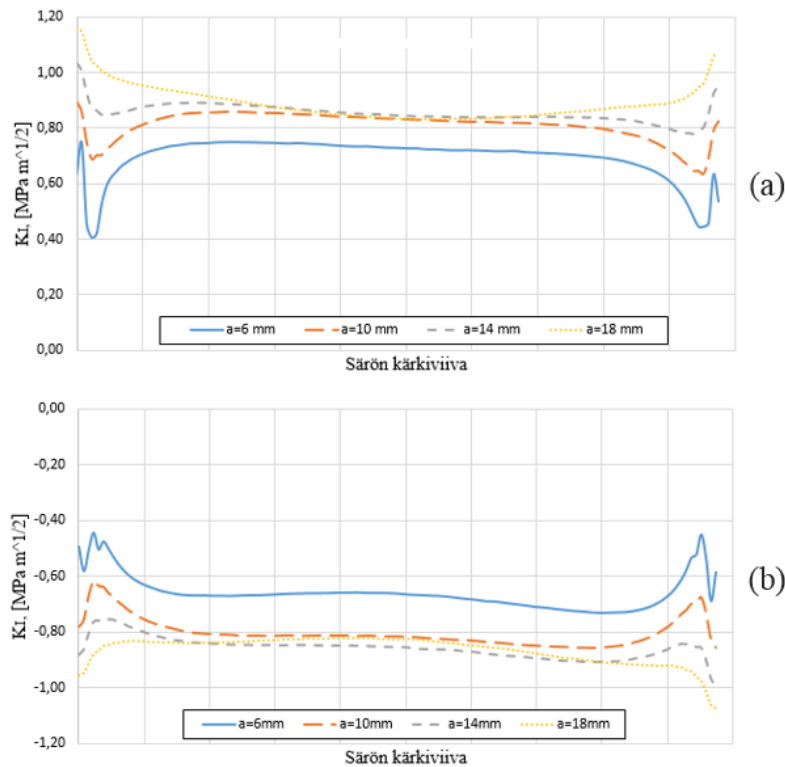
Taulukko 2. Verifiointianalyysissä sovelletut parametrit a ja σ_∞ sekä määritetyt jännitysintensiiteettikertoimen K_I arvot.

a [mm]	σ_∞ [MPa]	FEM [MPa \sqrt{m}]	Analyttinen [MPa \sqrt{m}]	Taulukko [MPa \sqrt{m}]
6	20	3,11	2,98	3,28
6	60	4,86	4,51	4,97
18	20	9,35	8,94	9,83
18	60	14,61	13,54	14,89

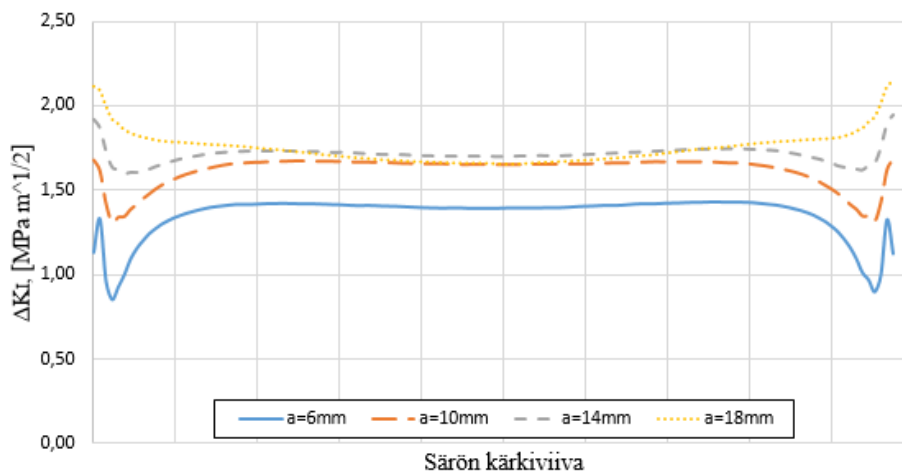
Päätyliitoksen analyysi

Emomallin analyysissä alimallinnusalueelle muodostuu jännitystila, jossa telavaipan aksiaalijännitys vaihtaa etumerkkiään niin seinämän kuin kehäkierroksenkin matkalla. Särön kasvun tutkimiseksi K_I :n arvoja tulostetaan kahdesta alimallista, joiden sijainnit vaipan kehällä

valitaan emomallin aksiaalijännityksen ääriarvojen perusteella. Näin on mahdollista laskea yhden vaipan pyörähdyksen aikainen ΔK_I :n suuruus. Sen määrittämisessä huomioidaan myös negatiiviset K_I -arvot, sillä prosessiliuosten pääsy säröpinnoille ei voida poissulkea. Laskentatulokset särön kärkiviivalta lukien on esitetty K_I :n osalta kuvassa 2 ja ΔK_I :n kuvassa 3.



Kuva 2. Jännitysintensiteettikerroin K_I särön kärkiviivaa pitkin luettuna kehäsijainneissa 1 (a) ja 2 (b).



Kuva 3. Jännitysintensiteettikerroimen vaihteluväli ΔK_I kehäsijaintien 1 ja 2 tuloksista laskettuna.

Tulosten arviointi

Taulukon 2 nojalla voidaan todeta alimallin elementtiverkon kykenevän kuvaamaan jännitystilaa särön kärjessä jokseenkin tyydyttävästi. Sen avulla määritetyt jännitysintensiteetin arvot ovat poikkeuksetta yhtälön (1) ja taulukkoratkaisun välissä. Poikkeama yhtälöön (1)

näyttää kasvavan nimellisjännityksen mukana, mutta verrattaessa taulukkoratkaisuun käy päinvastoin.

Päätyliitoksen osalta kuvista 2 ja 3 havaitaan sekä jännitysintensiteetin että sen vaihteluvälin kasvavan särön edetessä, mikä on luonnollista särön kehittyessä syvemmäksi. Parametrien kasvu kuitenkin pysähtyy ja kääntyy laskuksi ennen syvyyttä $a=18$ mm. Yhtälön (1) nojalla tämä täytyy selittyä särön kärkialueen jännitystilän muutoksella, jossa nimellisjännityksen lineaarinen riip-puvuussuhde jännitysintensiteettiin dominoi särön syvyyden \sqrt{a} -riippuvuutta. Todennäköisesti syvyysalueella $a=14...18$ mm on särön kärki jo riittävän kaukana osittaisluistavan ydintymis-pinnan korkeista jännityksistä, eivätkä vaipan globaali aksiaalijännitys ja sen vaihtelu kykene jatkamaan särön kasvattamista. Vähintäänkin voidaan todeta kasvunopeuden, joka on voimak-kaasti riippuvainen ΔK_I :sta, kokevan merkittävän hidastumisen tällä alueella.

On syytä korostaa, että tulokset syvyydellä $a=6$ mm ovat virheellisiä johtuen emomallin elementtiverkon kyvyttömyydestä kuvata paikallista jännitystilaa lähellä kontaktipintaa. Havait-tujen säröjen olemassa olo todistaa suuremman jännitysintensiteetin ja sen vaihtelun esiintymisen ensimmäisten millimetrin matkalla ydintymisestä. Todellisuudessa matalampien säröjen tulos-käyrät lähestyvätkin syvempien vastaavia niiden yläpuolelta, jolloin $\Delta K_I(a=6 \text{ mm}) > \Delta K_I(a=18 \text{ mm})$ kuvasta 3 poiketen. Muutoin säröt eivät kasvaisi edes havaittuihin syvyyksiinsä.

Tulokset särön kasvun taitteesta osuvat yllättävän lähelle tutkimusvaipasta havaittuja syvimpiä säröjä. Laskennallisesti määritettyjen $\Delta K_{I,th}$ arvojen suuruusluokka on materiaalikokeiden mukaisen kynnyksarvon $\Delta K_{I,th}$ alapuolella. Tämäkin on loogista, kun huomioidaan emo-, ja siten myös alimallin, olevan tarkimmillaan syvien säröjen alueella. Tuloksia ei voida yleistää kaikkien vauriotelojen tapauksiin, vaan särön kasvun kehitys on telageometrian ja käyttökuormien määräämän seinämän aksiaalijännitysjakautuman säätelemä.

Viitteet

- [1] Asai K (2012) Fracture Mechanics Analysis of Fretting Fatigue Considering Small Crack Effects, Mixed Mode, and Mean Stress Effect, Applied Fracture Mechanics, Alexander Belov (Ed.), InTech, <https://doi.org/10.5772/51463>.
- [2] Noraphaiphaksa N, Kanchanomai C & Mutoh Y (2013) Numerical and experimental investigations of fretting fatigue: Relative slip, crack path and fatigue life. Engineering Fracture Mechanics 112-113: (58-71), <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2013.10.007>.
- [3] Ikonen K & Kantola K (1986) Murtumismekaniikka. 2. painos. Helsinki: Otatieto.
- [4] ANSYS R17.2 Documentation 1.2.1.2. Modeling 3-D Linear Elastic Fracture Problems, user's manual.
- [5] Green A & Sneddon I (1950) The distribution of stress in the neighbourhood of a flat elliptical crack in an elastic solid. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 46: (159-163), <https://doi.org/10.1017/S0305004100025585>.

Juho Niva
Valmet Technologies Oy
Rautpohjankatu 3, PL 587, 40101 Jyväskylä
juho.niva@valmet.com