

ELEMENTTIMENETELMÄN SOVELTAMINEN SÄRÖN YDINTYMISEN ARVIOINNISSA

Pentti Rajamäki
Kalle-Erkki Penttilä

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 17
No 2 1984, s. 47...55

YHTEENVETO: Artikkelissa esitetään menettely, jonka avulla voidaan arvioida särön muodostumista eli ydintymistä rakenteeseen valmistusteknisistä syistä syntyneen terävän loven pohjaan. Menettely perustuu sekä särön kärjen jännitystilän teoreettiseen tarkasteluun että kokeellisesti saatuihin tuloksiin. Aluksi tarkastellaan loven pyöristyssäteen vaikutusta ydintymiseen sekä esitetään särön ydintymistä kuvaavat laskentakaavat. Ydintymisanalyysi voidaan suorittaa tavallisilla elementtiohjelmilla käyttämällä singulaarisia elementtejä särön kärjessä. Lopuksi esitetään sovellusesimerkinä yhdekonstruktiossa olevan terävän loven ydintymisanalyysi.

JOHDANTO

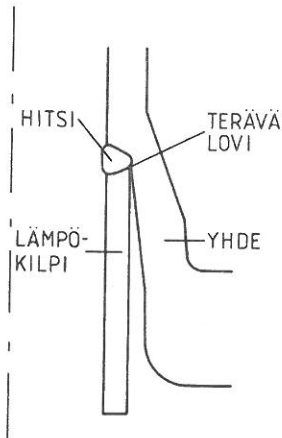
Laskettaessa särömaisten virheiden kasvua rakenteissa oletetaan yleensä vika säröksi, joka alkaa kasvaa heti ensimmäisestä kuormitusykleistä lähtien. Särön ydintymiseen vaadittavia kuormitusyklejä ei tällöin oteta huomioon. Valmistuksessa syntyvien särön kaltaisten (kuva 2) alueiden tarkastelussa tämä laskentatapa saattaa kuitenkin olla liian konservatiivinen ja johtaa liian suuriin särön kasvuarvioihin.

Tässä artikkelissa esitetään menettely, jonka avulla voidaan arvioida särön ydintymiseen vaadittava kuormitusykleiden lukumäärä. Menettely perustuu sekä särön kärjen jännitystilän tarkasteluun että kokeisiin. Särön ydintymisen laskeva ohjelma liittyy IVOFEM- ja BERSAFE-ohjelmiin, jotka ovat osa IVO:n FEM-järjestelmää (kuva 1).

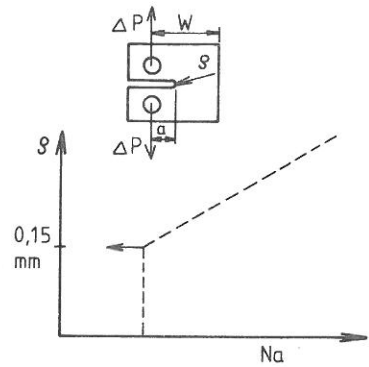
YDINTYMISTEORIA

Laskentamenetelmä, jolla voidaan tutkia väsytytkuormituksen aikaansaamaa särön ydintymistä kuvan 2 kaltaisissa terävissä lovista, perustuu osaksi kokeellisiin havaintoihin.

Loven pyöristyssäteen vaikutusta ydintymiseen on tutkittu kuvan 3 mukaisella CT-sauvalla /2/. Kuvassa on esitetty austeniittisella teräksellä (AISI 316) saa-



Kuva 2. Yhteen ja lämpökilven muodostama terävä lovi.



Kuva 3. Loven pyöristyssäteen vaikutus ydintymiseen.

tu koetuloks. Kokeessa väsyttävä kuorma ja sauvan mitat pidettiin vakioina. Sitä vastoin loven pohjan pyöristyssädettä ρ vaihdeltiin. Kun pyöristyssäde pienenee, pienenee aluksi myös ydintymiseen johtavien syklien lukumäärä N_a . Kun ρ on 0,15 mm tai sitä pienempi, ei sillä koetuloksen mukaan ole vaikutusta N_a :han. Tämän perusteella ei ole tarpeen tuntea loven tarkkaa geometriaa, mikäli pyöristyssäde on riittävän pieni.

Greager on johtanut jännityskomponentit kuvan 4 mukaiselle lovelle pyöristyssäteeseen ρ alueelle ($/3/$), ne ovat ensimmäiselle kuormitustavalle (ns. MODE I)

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos\frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin\frac{\varphi}{2} \sin\frac{3\varphi}{2} \right) - \frac{\rho}{2r} \cos\frac{3\varphi}{2} \right] \quad (1)$$

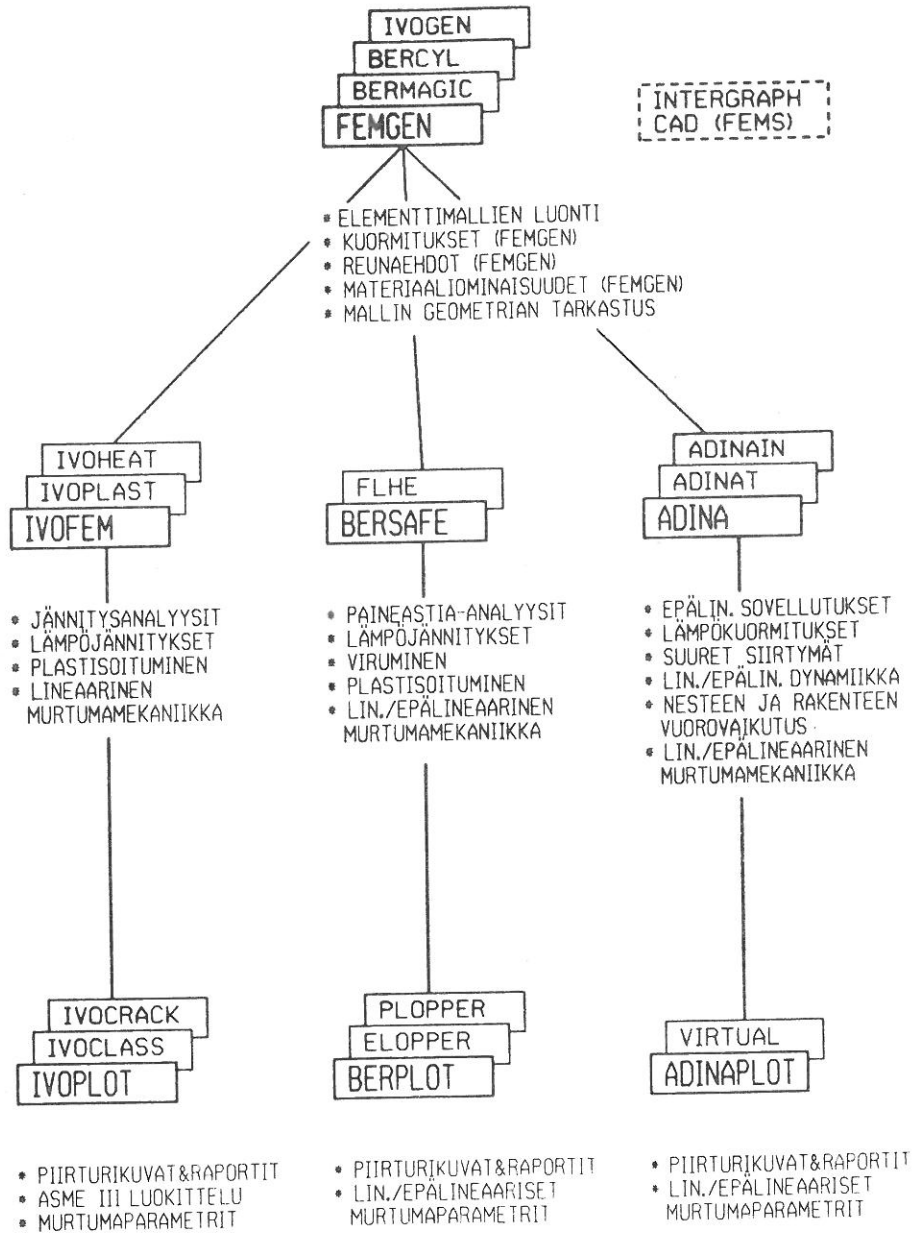
$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos\frac{\varphi}{2} \left(1 + \sin\frac{\varphi}{2} \sin\frac{3\varphi}{2} \right) + \frac{\rho}{2r} \cos\frac{3\varphi}{2} \right] \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\sin\frac{\varphi}{2} \cos\frac{\varphi}{2} \cos\frac{3\varphi}{2} - \frac{\rho}{2r} \sin\frac{3\varphi}{2} \right] \quad (3)$$

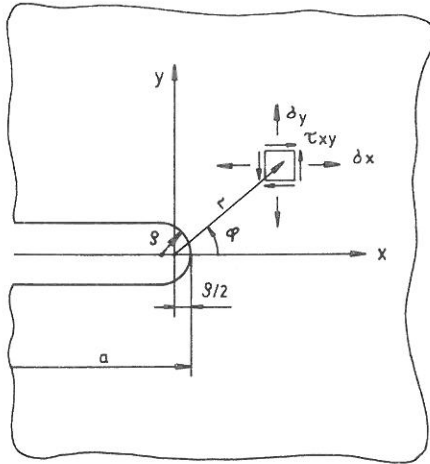
K_I on jännitysintensiiteettikerroin vastaavan kokoiselle särölle ($\rho = 0$), a puolet särön pituudesta ja $\rho/a \ll 1$.

Kuvassa 5 on tarkasteltu $\sigma_{\theta\theta}$ ($= \sigma_y$) jännitystä x-akselin suhteen symmetriselle I kuormitustavalle. Merkinnät ovat lähteen /1/ mukaisia.

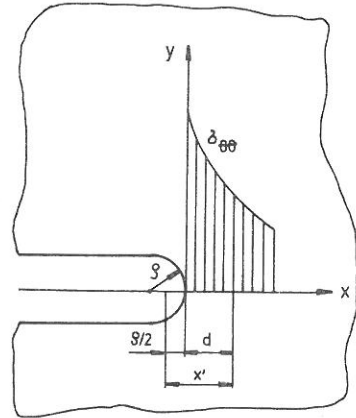
IVO_n FEM-JÄRJESTELMÄ 30.6.1984



Kuva 1. IVO_n FEM-järjestelmä 30.6.1984



Kuva 4. Jännityskomponentit lähellä loven pohjaa.



Kuva 5. $\sigma_{\theta\theta}$ jakautuma x-akselilla.

Kaavasta (2) saadaan arvolla $\varphi = 0$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi X'}} \left(1 + \frac{\rho}{2r}\right) . \quad (4)$$

Kun merkitään $X' = d + \rho/2$, saadaan $\sigma_{\theta\theta}$:n heilahteluvälille $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ lauseke (/1/)

$$\Delta\sigma_{\theta\theta} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Delta K_I}{\sqrt{2d+\rho}} \cdot \frac{d+\rho}{2d+\rho} . \quad (5)$$

Arvolla $\rho/d = 1$ heilahteluväli saavuttaa maksimin

$$\Delta\sigma_{\theta\theta} = 1,09 \frac{\Delta K_I}{\sqrt{2\pi d}} . \quad (6)$$

Kun $\rho/2d$ on pieni, saadaan yhtälöstä (5)

$$\Delta\sigma_{\theta\theta} = \frac{\Delta K_I}{\sqrt{2\pi d}} , \quad (7)$$

joka on lähellä yhtälöä (6).

Yhtälö (6) antaa $\Delta\sigma_{\theta\theta}$:n ylärajan kaikille ρ :n arvoille. Valmistuksessa syntyvää (kuva 1) pyöristyssädettä ρ ei yleensä tunneta.

Kun laskelmat tehdään elementtimallilla, jossa lovi on muotoiltu säröksi (eli $\rho = 0$), saadaan enintään 8,3 % pienempiä $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ arvoja (yhtälö 7) kuin saataisiin epäedullisimmalla ρ :n arvolla. Käytännössä voidaan särömallilla saadut $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ arvot

kertoa 1,09:llä, jolloin p :n vaikutus tulee otetuksi huomioon.

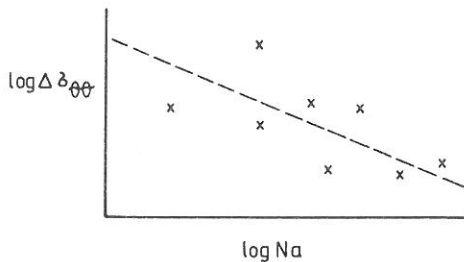
Särön ydintymislaskelmat perustuvat Petersonin [1] ajatukseen, jonka mukaan väsytyksessä vaurioitetaan pientä aluetta särön kärjen ympäristössä. Alueen koko on riippuvainen materiaalin mikrorakenteesta. Tämän mukaan jännityksiä ei tarvitse laskea särön kärjessä, jossa materiaali plastisoituu, vaan etäisyydellä d (kuva 5) särön tai loven pohjasta. Laskelmissa oletetaan kuitenkin, että plastisoituminen tapahtuu vain pienellä alueella särön kärjessä ja sitä ympäröivä kimmainen jännityskenttä säätelee plastisen alueen käyttäytymistä. Laskelmat tehdään kimmoisella analyysillä.

Ydintymiseen johtavien syklien lukumäärä N_a ja vastaava jännitysheilahdus $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ voidaan esittää yhtälöllä

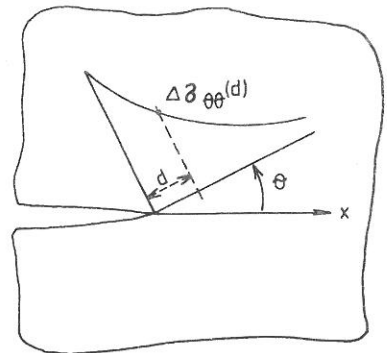
$$\Delta\sigma_{\theta\theta}(d) = \sigma_0(d) N_a^{n(d)} \quad (8)$$

Yhtälö (8) voidaan kirjoittaa mille tahansa valitulle d -arvolle. Tulokset voidaan esittää kuvan 6 tapaan (pienimmän neliösumman suorana). Materiaalille ominainen d -arvo voidaan määrittää siten, että se minimoi $\log \Delta\sigma_{\theta\theta}$:n standardipoikkeaman lasketusta suorasta. Tällä tavalla saadaan esimerkiksi ruostumattomalle teräkselle $d = 0,05 \dots 0,06$ mm ([1], [2]).

Edellä esitettyä teoriaa on yleistetty ([1], [2]) siten, että myös kuormitus-tapa II otetaan huomioon kokeissa ja laskelmissa. Tällöin jännitysheilahdus $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ lasketaan etäisyydellä d suunnassa, joka antaa suurimman $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ -arvon. Väsytyksikäyrältä katsotaan vastaava sallittujen syklien lukumäärä (kuva 7). Teorian mukaan särö lähtee liikkeelle suuntaan, joka on kohtisuorassa suurinta $\Delta\sigma_{\theta\theta}(d)$ -arvoa vastaan.



Kuva 6. Jännitysheilahduksen riippuvuus syklien lukumäärästä.



Kuva 7. Jännitysheilahdus suunnalla θ .

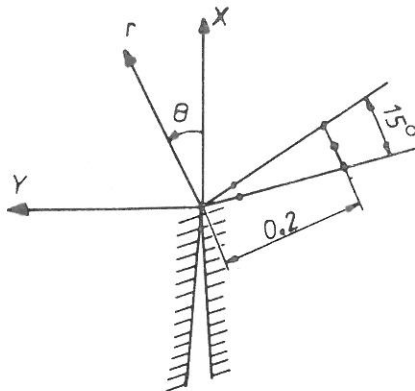
ELEMENTTIMENETELMÄN SOVELTAMINEN YDINTYMISEN LASKENTAAN

Suurimman $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ -arvon löytämiseksi täytyy tuntea särön kärjen $\sigma_{\theta\theta}$ -jakaumat kuormitustransientin aikana. Elementtimenetelmällä saavutetaan paras tulos, kun särön kärki ympäröidään 24:llä singulaarisella säröelementillä, jotka on muodostettu 8-solmuisista isoparametrisista elementeistä (/1/, /2/). Yhden elementin kärkikulmaksi tulee näin ollen 15° (kuva 8). Elementin pituus kannattaa valita siten, että jokin integrointipiste sijaitsee kullekin materiaalille ominaisen mitan d etäisyydellä särön kärjestä. Tällöin saadaan edellä mainitun pisteen jännitystila helposti määritetyksi. Pääkoordinaatistossa lasketut jännitykset tulee muuttaa elementin paikalliseen koordinaatistoon kehäjännityksen $\sigma_{\theta\theta}$ määrittämiseksi.

Lopuksi lasketaan kullekin elementille $\sigma_{\theta\theta}$ -jännitysten erotukset kuormitustransientin eri ajanhetkien välillä. Näistä erotuksista itseisarvoltaan suurin on $\Delta\sigma_{\theta\theta}$:n maksimiarvo. Tätä vastaava särön ydintymiseen johtava kuormitusvaihtelujen määrä voidaan määrittää yhtälöstä (8), joka esitetään usein kullekin materiaalille ominaisena käyrästönä. Siitä on helppo määrittää suurin sallittu kuormitus syklien määrä.

Teorian mukaan ydintynyt särö alkaa kasvaa elementistä, jossa esiintyy suurin jännitysheilahdus $\Delta\sigma_{\theta\theta}$.

IVOn FEM-järjestelmän (kuva 1) IVOFEM- ja BERSAFE-ohjelmiin on tehty jälkikäsitteilyohjelmat, jotka määrittävät edellä mainitun suurimman jännitysheilahduksen ja sen suunnan.

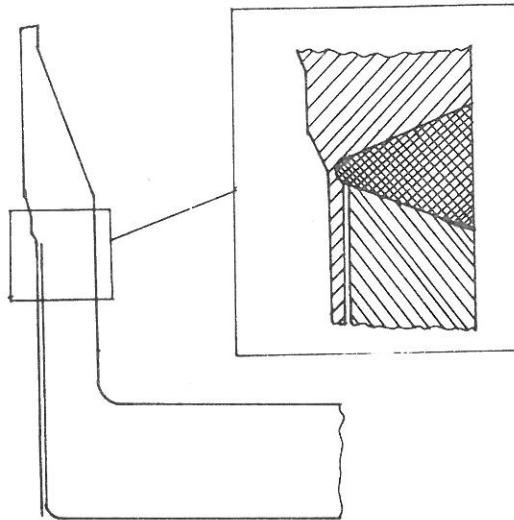


Kuva 8. Singulaarinen säröelementti.

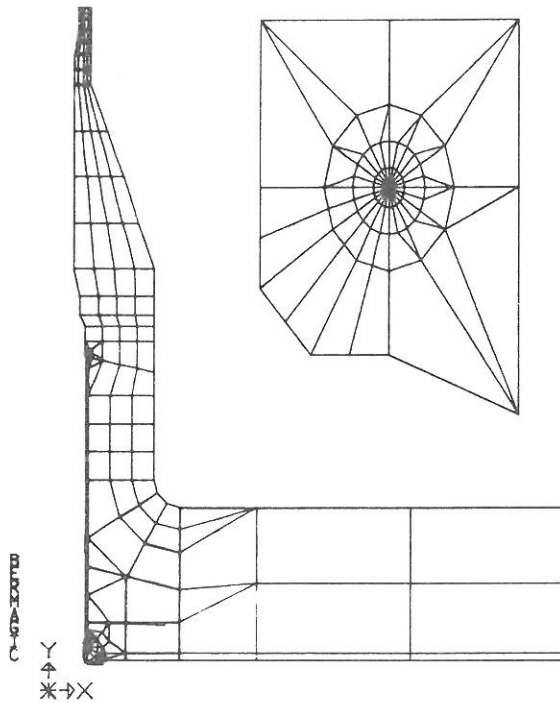
SOVELLUSESIMERKKI

Sovellusesimerkkinä esitetään BERSAFE-ohjelmalla laskettu ydintymisanalyysi yhderakenteelle, jossa on terävä lovi pinnoiteholkin ja perusaineen liitoskohdassa (kuva 9). Kuormitustransienttina on käytetty yhteen sisäpintaan kohdistuvaa askelmaista lämpötilan pudotusta $\Delta T = 290 \text{ }^\circ\text{C}$. Kuvassa 10 on esitetty käytetty laskentamalli. Koska yhteen materiaali särön kohdalla on austeniittista terästä, on $\sigma_{\theta\theta}$ -jakauma laskettu $0,05 \text{ mm}$ (d) etäisyydellä särön kärjestä.

Kuvassa 11 on esitetty $\Delta\sigma_{\theta\theta}$ -jännitysheilahdusjakauma särön ympärillä. Havaitaan, että maksimi $\Delta\sigma_{\theta\theta} = 2000 \text{ MPa}$ esiintyy kulman arvolla -83° . Viitteen /2/ kuvasta 6 saadaan $\Delta\sigma_{\theta\theta}$:n arvoa 2000 MPa vastaavaksi särön ydintymiseen johtavien kuormitusvaihteluiden lukumääräksi 50. Särönkasvun suunta on miltei kohtisuorassa pinnoiteholkkiin nähden ja ulospäin.



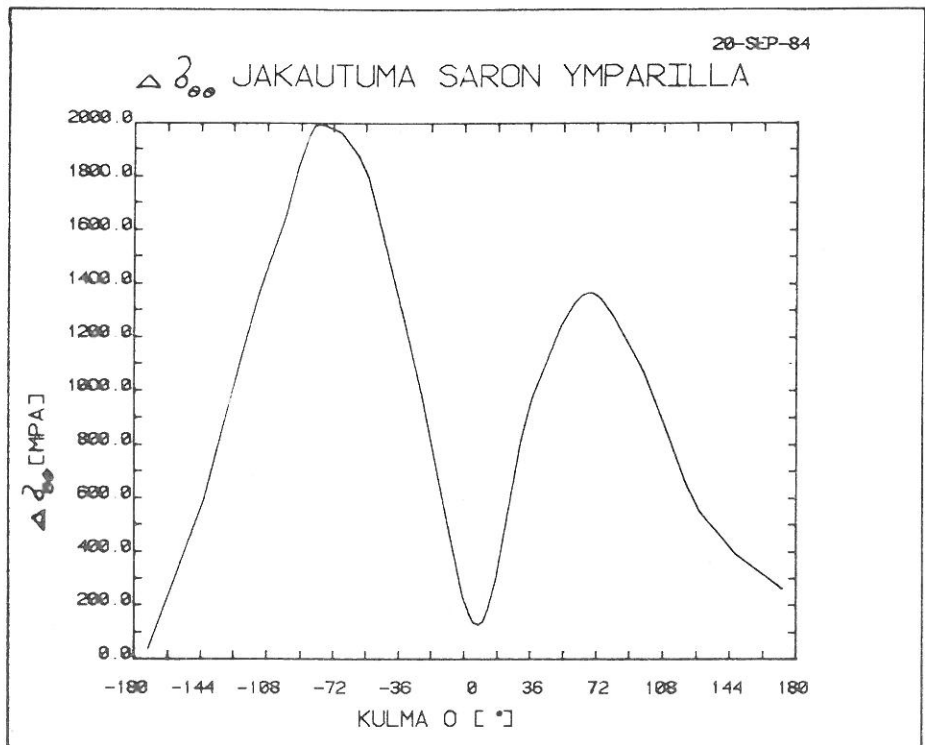
Kuva 9. Yhderakenne, jossa on terävä lovi.



Kuva 10. Särön ydintymisanalyysin laskentamalli.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Esitetty menettely antaa hyvät mahdollisuudet arvioida valmistuksen aikana syntyneiden terävien lovien vaikutusta rakenteen väsymisen kestävyYTEEN. Särön kasvua arvioitaessa voidaan ydintymiseen kuluva aika määrittää laskennallisesti. Menetelmän etuna on myös, että ydintymisen kestoa arvioitaessa ei jännitysintensiiteettikertoimia tarvitse laskea.



Kuva 11. $\Delta \sigma_{\theta\theta}$ -jännitysheilaudusjakauma särön kärjen ympärillä.

LÄHDELUETTELO

- [1] D'escatha, Y.C., Devaux, J.C., Bernard, J.L., Pellissier-Tanon, A., A criterion for analysing fatigue crack initiation in geometrical singularities, IMechE80.
- [2] Devaux, J.C., D'escatha, Y., Rabbe, P., Pellissier-Tanon, A., A criterion for analysing fatigue crack initiation in geometrical singularities, 5th SMIRT 1979 paper G8/1.
- [4] Richard, A., Ein Beitrag zur Ermittlung von Spannungsintensitätsfaktoren, Materialprüf 22 (1980) Nr 2 Februar.

Pentti Rajamäki, dipl.ins., Imatran Voima Oy

Kalle-Erkki Penttilä, dipl.ins., Imatran Voima Oy