

# MURTUMISMEKANIIKASTA

ERKKI PENNALA

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 5  
No 3 1972 ss. 307-324; Rakenteiden Mekaniikan Seura, Helsinki

---

## 1. JOHDANTO

Murtumismekaniikaksi kutsuttu lujuusopin haara on noin vuodesta 1950 lähtien kehittynyt vireästi, ja tällä hetkellä murtumisilmiö on laajojen sekä teoreettisten että kokeellisten tutkimusten kohde koko maailmassa. Murtumismekaniikan tarkoituksena on selvittää rakenteissa esiintyvien vikojen ja säröjen, jotka voivat johtaa rakenteen tuhoutumiseen, kasvun syyt ja kulku.

Murtumisilmiöön vaikuttavia tekijöitä ovat mm. materiaali, jännitystaso, lämpötila, lovet, ainespaksuus, hitsit ja hitsauksen suoritustapa, iskumaiset rasitukset sekä väsyminen.

Avaruus- ja ydinvoimalatekniikka ovat antaneet oman sysäyksensä murtumismekaniikan tutkimusten tulemiselle ajankohtaiseksi.

Näiden tekijöiden ohella tapahtunut materiaalien lujuusominaisuuksien kehittäminen (esim. teräkset) on johtanut uusien, materiaalivikojen olemassaolon tunnustavien mitoitusperusteiden etsimiseen murtumisvaaran pienentämiseksi rakenteissa. Edelleen kehitys on johtanut

yhä suurempiin hitsattuihin rakenteisiin. Hitsaus heikentää kuitenkin materiaalia hitsin läheisyydessä ja aiheuttaa lisäksi vikojen lukumäärän kasvua. Tuhoutuneissa rakenteissa onkin haurasmurtuman todettu useimmiten alkaneen hitsitsä tai sen läheisyydestä [12]. Rakenteiden koon suureneminen on toisaalta lisännyt ylikriittisen vian todennäköisyyttä yksityisessä rakenteessa.

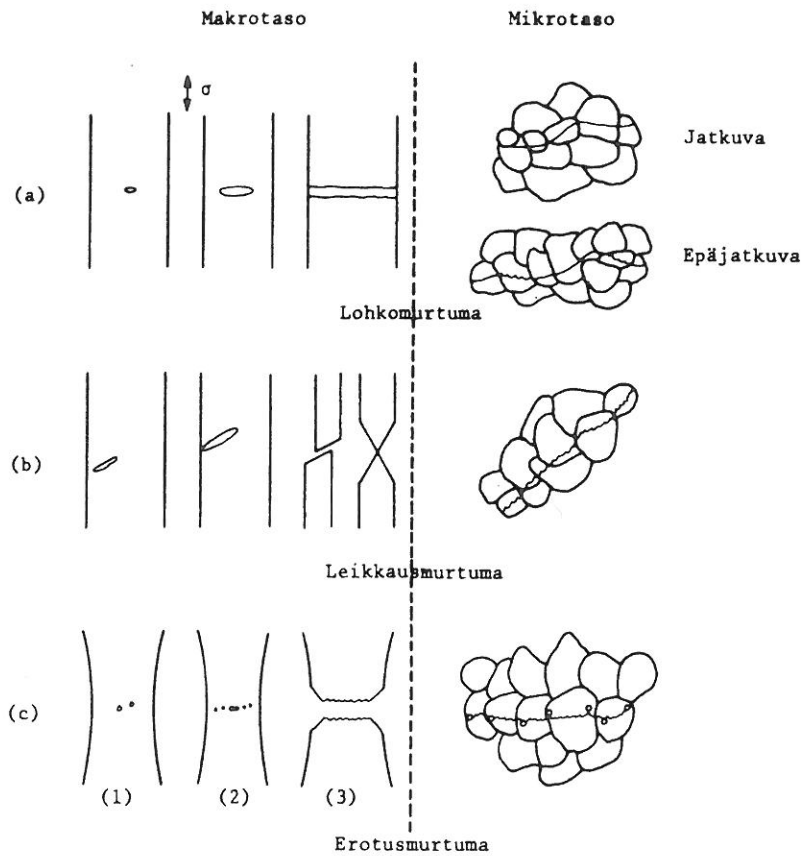
Kolmen viimeksi mainitun seikan lisäksi on suurten rakenteiden vaurioitumisen välttämisyrittäminen taloudellisista, ympäristö- ja varmuussyistä tehnyt murtumistutkimukset aktuelleiksi.

Tätä taustaa vasten on ilmeistä, että rakenteiden suunnitteli- ja tarvitsee luotettavan murtumismekaniikkaan perustuvan mitoitusperusteen, joka ottaa huomioon murtumisvaaran. On syytä kuitenkin heti huomauttaa [1], että murtumismekaniikan antamat tulokset ovat juuri niin hyviä kuin sen käyttämien tietojen hankkimismenetelmät: ainetta rikkomattomat vian etsintämenetelmät, jännitysten analysointimenetelmät, murtumismekaniikan analyttiset perusteet sekä tiettyjen vakioiden, kuten esim. särön laajentamiseen tarvittavan kriittisen energian  $G_c$ , määrittämismenetelmät.

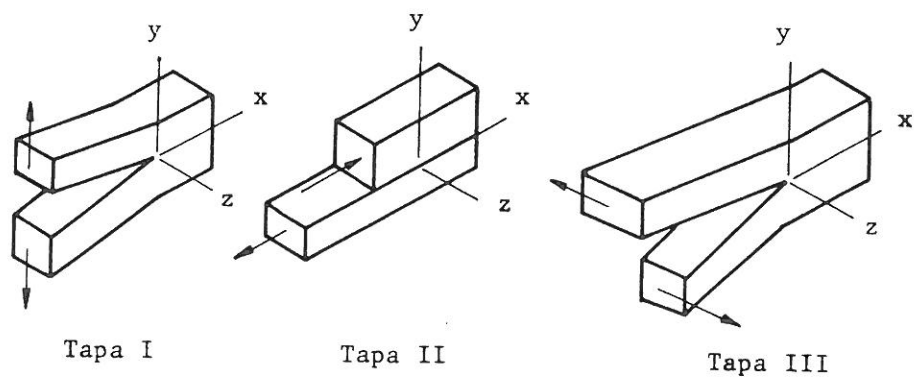
Arvioitaessa murtuman mahdollisuutta tuhota rakenne on kiinnitettävä huomiota seuraaviin tekijöihin: käyttöolosuhteet (jännitykset, lämpötila, kuormitusnopeus särön edessä, ympäristö), geometriset tekijät (särön koko, särön terävyys, ainespaksuus).

## 2. MURTUMISTYYPIT JA SÄRÖN KASVUTAVAT

Murtumistyyppinä on kolme, nimittäin lohko-, leikkaus- ja erotusmurtuma. Kun lisäksi otetaan huomioon, että murtumistasot voivat kulkea rakeiden läpi (transgranular) tai raerajoiltaan heikoissa materiaaleissa pitkin raerajoja (intergranular) voi murtuminen tapahtua



Kuva 1. Murtumistyytit.



Kuva 2. Särön kasvutavat.

siis kuudella eri tavalla [1]. Murtumistyytit on esitetty kuvassa 1.

Murtuman edetessä särön kasvutapoja erotetaan yleisesti kolme riippuen siitä jännitystilasta, jonka vaikutuksesta halkeama kasvaa.

Kuvassa 2 on esitetty kasvutavat, joita merkitään: tapa I, tapa II ja tapa III.

### 3. MURTUMISMEKANIIKAN TEORIOISTA [1], [4], [13]

#### 3.1 Yleistä

Murtumismekaniikaksi kutsutaan sitä lujuusopin ja metalliopin välialueen osaa, joka tutkii murtumistapahtumaa makro- tai mikrotasolla ja joka pyrkii antamaan mahdollisuudet materiaalivikojen huomioon ottamiseen rakenteiden mitoituksessa.

Materiaalivian vaikutus koostuu monista tekijöistä, kuten esimen suuruudesta, muodosta (erityisesti terävimmän kärjen käyristysteestä), orientoitumisesta nimelliseen jännitykseen nähden jne.

Seuraavassa käytetään vian läheisyydessä olevan häiriintyneen jännityskentän suurimman jännityksen suhteesta nimellisjännitykseen nimitystä jännityshuippukerroin.

Lovelle on voimassa likimain

$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{nim}}} = 1 + (0,5 \dots 2) \frac{c}{\rho} \quad (1)$$

missä  $c$  on loven maksimitan puolikas ja  $\rho$  loven terävimmän kohdan kaarevuussäde. (Lovelle on siis jännityshuippukerroin = klassinen loven muotoluku.)

Jännityshuippukerroin kasvaa (1):n mukaisesti ja  $\sigma_{\max} \rightarrow \infty$ , kun  $\rho \rightarrow 0$ . Vaarallisin lovi on siis särö tai halkeama, koska sen kärjen  $\rho = 0$  makrotasolta katsottuna.

Murtumismekaniikka tutkii juuri särön tyyppisiä vikoja, koska niitä on aina kaikissa rakenteissa ja koska tylpätkin viat muuttuvat teräviksi eri tekijöiden, kuten väsymisen ja korroosion, vaikutuksesta.

Murtumismekaniikan tarkoituksena on selvittää särön kasvun alkamis- ja epästabiilin etenemisen edellytykset ja tätä kautta luoda mahdollisuudet varmojen rakenteiden suunnittelulle. Jos rakenne joutuu väsyttäviin kuormitusolosuhteisiin, tulee lisäksi selvittää alikriittisen särön stabiilin kasvunopeuden laita, jotta voidaan päästä arvioimaan, onko rakenne koko suunnitellun käyttöaikansa varma, ts. ehtiikö alikriittinen vika kasvaa kooltaan kriittiseksi.

Murtumismekaniikassa on tällä hetkellä vallalla kaksi pääteoriaa, lineaarinen ja epälineaarinen murtumisteoria. Edellinen edellyttää aineen olevan lineaarisesti kimmoista, joten tämän teorian mukaan ei särön edessä ole plastista aluetta (tai se on hyvin pieni). Lohkomurtuma täyttää parhaiten tämän teorian edellytykset. Nopea murtuminen ei ole osoitus siitä, että murtuminen tapahtuu hauraasti, sillä myös täysin sitkeä murtuminen voi tapahtua hyvin nopeasti. Tällöin kuitenkin särön edessä on huomattava plastisoitunut alue, joten lineaarista teoriaa ei voida soveltaa. Näitä tapauksia varten on lineaarista teoriaa pyritty modifioimaan plastiseen muodonmuutokseen kuluvan työn huomioon ottavaksi epälineaariseksi murtumisteoriaksi.

### 3.2 Lineaarinen murtumismekaniikka (Linear Elastic Fracture Mechanics)

Plastisen alueen pysyessä hyvin pienenä etenevän särön edessä voidaan soveltaa lineaarista murtumismekaniikkaa. Särön kasvun alkamishetken ja sen etenemisen tutkimisen kannalta on oleellista tuntea jännitystila särön reunan läheisyydessä eri jännitystiloissa ja niiden aiheuttamissa särön kasvutavoissa I, II ja III.

Puuttumatta lähemmin laajoihin laskelmiin, joilla Airyn jännitysfunktion avulla voidaan määrittää jännityskenttä särön reunan lä-

heisyydessä, mainittakoon, että kuvan 3 mukaisessa tapauksessa, missä normaalijännitys vaikuttaa särön etenemistasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa (särönkasvutapa I), saadaan jännitysten lausekkeiksi

$$\begin{aligned}\sigma_x &= K_I f_1(\theta) / \sqrt{2\pi r} \\ \sigma_y &= K_I f_2(\theta) / \sqrt{2\pi r} \\ \tau_{xy} &= K_I f_3(\theta) / \sqrt{2\pi r}\end{aligned}\quad (2)$$

$$\sigma_z = \begin{cases} \nu(\sigma_x + \sigma_y) & \text{tasomuodonmuutostilassa} \\ 0 & \text{tasojännitystilassa} \end{cases}$$

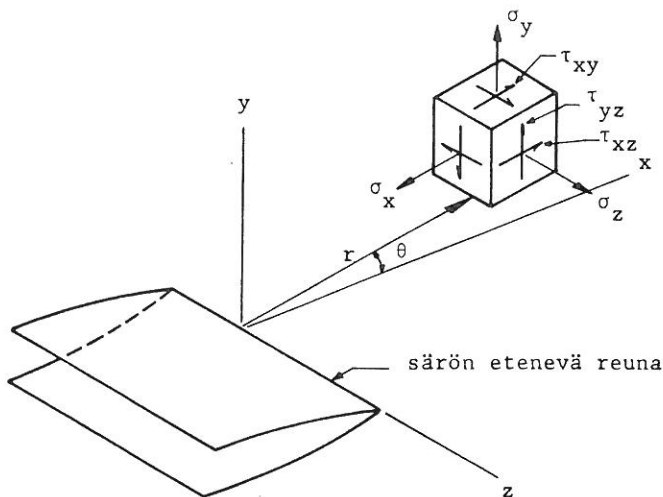
Koordinaatit  $r$  ja  $\theta$  ilmenevät kuvasta 3.  $K_I$  on jännitysintensiteetti-kerroin, joka on koordinaateista riippumaton. Jännitysintensiteettikertoimen, jonka ensimmäisenä otti käyttöön Irwin, yleinen muoto on

$$K = \sigma_\infty \sqrt{\lambda \pi c} \quad (3)$$

missä  $\lambda$  on vian ja koko kappaleen geometriasta riippuva parametri,  $c$  särön koon mitta ja  $\sigma_\infty$  nimellinen jännitys.

$\sigma_y$  on tietenkin tässä tapauksessa vaarallisin jännityskomponentti ja se saa  $\theta$ :n arvolla 0 arvon

$$\sigma_y(\theta=0) = K_I / \sqrt{2\pi r} \quad (4)$$



Kuva 3.

Esim. äärettömässä, aksiaalisen vedon alaisessa levyssä olevalle  $2c$ :n mittaiselle, levyn läpi ulottuvalle raolle saadaan jännitysintensiiteettikertoimeksi  $K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi c}$ . Poikittaissuppeumaksi  $\epsilon_z$  tulee siis

$$\begin{aligned}\epsilon_z &= -\frac{\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \\ &= -\frac{\nu \sigma_\infty}{E} \sqrt{\frac{c}{2r}} (f_1(\theta) + f_2(\theta))\end{aligned}\quad (5)$$

eli  $\epsilon_z$  on  $f = \sqrt{\frac{c}{2r}} (f_1(\theta) + f_2(\theta))$  -kertainen särön reunan läheisyydessä, jos se saa vapaasti kehittyä, verrattuna nimellisen jännityksen muualla aiheuttamaan suppeumaan  $\epsilon_z = -\nu \sigma_\infty / E$ . Jos levy on paksu, on selvää, ettei  $\epsilon_z = -\nu f \sigma_\infty / E$  pääse syntymään, vaan häiriöalueen ulkopuolella oleva materiaali estää tämän ja vain yleinen poikittaissuppeuma  $\epsilon_z = -\nu \sigma_\infty / E$  tapahtuu häiriöalueellakin. Tällöin vian läheisyydessä vallitsee ns. tasomuodonmuutostila ja häiriöalueella  $\sigma_z = f \nu \sigma_\infty$ . Jos levy sitävastoin on niin ohut, että häiriöalueen poikittaissuppeuma  $\epsilon_z = -f \nu \sigma_\infty / E$  pääsee tapahtumaan, on häiriöalueella tasojännitystila, ts.  $\sigma_z = 0$ .

Särönkasvutavoille II ja III on voimassa tavan I kanssa analogiset jännitysten lausekkeet. Erityisesti  $xz$ -tasossa särön edessä on maksimijännitysten lausekkeet

$$\tau_{xy} = K_{II} / \sqrt{2\pi r} \quad (6a)$$

$$\tau_{yz} = K_{III} / \sqrt{2\pi r} \quad (6b)$$

$K_{II}$  ja  $K_{III}$  saadaan laskemalla eri tapauksille tai valmiista taulukoista. Tällöin nimellisen normaalijännityksen sijalle tulee nimellinen leikkausjännitys.

Jännityksen suuruus särön reunassa ei tarjoa käyttökelpoista arviointitapaa särön epästabiilin kasvun liikkeellelähdölle. Jännitysintensiiteettikertoimen  $K_N$  ( $N = I, II, III$ ) voidaan sitävastoin

osoittaa olevan asianmukainen mitta epästabiilille särönkasvun alkamiselle. Jännitysintensiteettikertoimesta  $K_N$  sen saavuttaessa kriittisen arvon käytetään nimitystä murtositkeys  $K_{NC}$  (fracture toughness), joka on materiaalivakio. Murtositkeyden riippuvuuteen eri tekijöistä kuten lämpötilasta, levyn paksuudesta jne. palataan tuonnempana.

Seuraavassa käsitellään vain tapaa I johtuen sen yleisyydestä konstruktioissa. Koko ajan on syytä pitää mielessä, onko kyseessä tasomuodonmuutos- vai tasojännitystila särön edessä olevassa häiriökentässä. Murtositkeyden arvoja merkitään vastaavasti  $K_{Ic}$  ja  $K_c$ .

Lineaarisen murtumismekaniikan mukainen ehto särön epästabiilin kasvun alkamiselle kuuluu

$$K_I = \begin{cases} K_{Ic} & \text{tasomuodonmuutostila} \\ K_c & \text{tasojännitystila} \end{cases} \quad (7)$$

Materiaalivakio  $K_{Ic}$  tai  $K_c$  on määritettävä kokeellisesti ja jännitysintensiteettikertoimen  $K_I$  arvo katsotaan joko valmiiksi lasketusta taulukosta tai se voidaan laskea lineaarisen kimmoteorian avulla.

Särön kasvaessa syntyy uutta pintaa, joka sitoo energiaa samoin kuin plastinen muodonmuutoskin, joka edeltää pienellä alueella säröä. Näiden kahden energian summa särön pinta-alayksikköä kohti on

$$G = 2\gamma + \gamma_p \quad (8)$$

Kun  $K = K_{Ic}$  tai  $K_c$  merkitään vastaavasti  $G = G_{Ic}$  tai  $G_c$ .

Ehto särön epästabiilille kasvulle on tietenkin, että kokonaisenergia tällöin pienenee. Jos merkitään kappaleen kimmoista energiaa  $U$ :lla ja särön pientä kasvua  $dc$ :lla, kuuluu ehto

$$\frac{dU}{dc} dc + G_{Ic} dc \leq 0$$

eli

$$\frac{dU}{dc} + G_{Ic} \leq 0 \quad (9)$$

U riippuu kappaleen geometriasta ja kuormitustilasta ja on näin ollen laskettavissa.  $dU/dc$  voidaan laskea Irwinin osoittamalla tavalla heti kun jännitys- ja muodonmuutostila tunnetaan särön reunan läheisyydessä. Puuttumatta tarkemmin näihin laajoihin laskelmiin todetakaan niiden lopputulokset tavalle I

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{G_{Ic} E}{1-\nu^2}} \quad \text{tasomuodonmuutostila}$$

$$K_c = \sqrt{G_c E} \quad \text{tasojännitystila} \quad (10)$$

Näiden yhtälöiden avulla on nyt saatu murtositkeyden  $K_{Ic}$  ja  $K_c$  yhteys plastisen muodonmuutostyön (särön edetessä) ja pintaenergian summaan  $G$  (crack extension force).

Jos esim. äärettömässä levyssä on  $2c$ :n mittainen läpi ulottuva rako ( $K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi c}$ ) ja lisäksi oletamme, että  $\gamma_p = 0$ , jolloin kyseessä on täysin hauras murtuminen, saamme ehdosta (7) ja yhtälöistä (8) ja (10) Griffithin aikoinaan energiatarkestelulla johtamat tulokset jännitykselle, jolla epästabiili särön kasvu alkaa

$$\sigma_\infty = \sigma_F = \sqrt{2\gamma E / \pi(1-\nu^2)c} \quad \text{tasomuodonmuutostila}$$

$$\sigma_\infty = \sigma_F = \sqrt{2\gamma E / \pi c} \quad \text{tasojännitystila} \quad (11)$$

Näitä tuloksia voidaan soveltaa siis sitkeille aineille riittävän alhaisissa lämpötiloissa sekä hauraille aineille, kun särön etenemisnopeus on suuri ja  $\sigma_m$  on koheesiovoiman  $E/10$  luokkaa särön reunan läheisyydessä. Tällöin on plastisen muodonmuutoksen särön edessä oltava riittävän pieni.

Kun lämpötila on korkeampi, myötölujuus särön reunan läheisyydessä on pienempi kuin  $E/10$ . Jos materiaali ei ole myötölujenevaa, ei jännitys voi nousta särön läheisyydessä paljoakaan  $\sigma_m$ :n yläpuolelle. Koska tällöin  $\sigma_y \approx \sigma_m < E/10$ , häiriöalueen jännitykset ovat riit-

tämättömiä murtamaan atomien välisiä koheesiovoimasta tulevia siteitä. Särön edessä etenevä plastisesti myötänyt alue kasvaa tällöin ja Griffithin tuloksia (11) ei voida käyttää murtumiskriteerinä. Näiden tulosten virhe on sitä suurempi mitä suuremmaksi plastisesti myötänyt alue on kasvanut suhteessa särön pituuteen ja jäljellä olevaan murtumattomaan alueeseen. Virhettä voidaan korjata ottamalla särön pituudessa huomioon plastisoituneen alueen pituus. Tätä teoriaa kutsutaan ns. epälineaariseksi murtumismekaniikaksi.

Ennen kuin ryhdytään käsittelemään epälineaarista murtumismekaniikkaa tarkastellaan vielä alikriittisen särön kasvamista kriittiseksi ja epästabiilin särön kasvunopeutta.

Väsyttävissä olosuhteissa voi kooltaan alikriittinen vika kasvaa kriittiseksi. Useimpien materiaalien alikriittisen särön kasvu väsyttävissä olosuhteissa noudattaa seuraavaa lakia

$$\frac{dc}{dN} = \kappa(\Delta K/\sigma_m)^\alpha \quad (12)$$

missä  $N$  on kuormituskertojen lukumäärä ja  $\Delta K$  suhtautuu  $\Delta\sigma$ :aan kuten  $K$   $\sigma$ :aan sekä  $\kappa$  ja  $\alpha$  ovat materiaalivakioita. Jännitysheilahduksen  $\Delta\sigma$  vakioarvolla voidaan särön kasvu  $c_0$ :sta  $c$ :hen  $N$ :n kuormituskerran aikana integroida. Esim. jos  $\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi c}$  ja  $\alpha > 2$ , kuten esim. teräksille ja monille muille materiaaleille ( $\alpha \approx 4$ ), saadaan

$$c^\beta = c_0^\beta + \kappa\beta(\Delta\sigma_\infty\sqrt{\pi}/\sigma_m)^\alpha N \quad (13)$$

missä  $\beta = 1 - \alpha/2$ . Jos vian kriittinen koko tunnetaan, on yhtälön (13) avulla määritettävissä elinikä  $N$  (kuormituskertojen lukumäärä).

Jos särö on kooltaan kriittinen tai kasvanut väsyttävissä kuormitusolosuhteissa sellaiseksi, särö kasvaa suurella nopeudella. Energia- ja dimensiotarkastelulla voidaan osoittaa, että särön etenemisnopeus tällöin on

$$v_c = \sqrt{\frac{\pi}{k}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[ 1 - \frac{\pi E \gamma}{\sigma_{\infty} c} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

missä E on kimmokerroin,  $\rho$  aineen tiheys ja k vakio.

Kun c kasvaa hyvin suureksi tulee särön etenemisnopeudeksi n. 40 % äänennopeudesta materiaalissa, sillä vakion  $\sqrt{\pi/k}$  on osoitettu olevan 0,38 hyvin monille materiaaleille ja  $\sqrt{E/\rho}$  on äänennopeus materiaalissa. Tulos pätee staattiselle kuormitustilanteelle, mutta dynaamiselle kuormitustilanteelle sen antamat särön etenemisnopeudet epästabiilin vaiheen aikana ovat liian pieniä.

### 3.3 Epälineaarinen murtumismekaniikka

Kun huomattava plastinen muodonmuutos tapahtuu särön edessä, kasvatetaan särön pituutta c plastisoituneen alueen puolikkaalla, joksi esim. särönkasvutavalle I tasojännitystilan ollessa kyseessä häiriöalueella, saadaan

$$r_m = K_{Ic}^2 / 2\pi\sigma_m^2 \quad (15)$$

Plastisen alueen ollessa hyvin suuri ei edellä olevaa menettelytapaa enää voida soveltaa. Tarkemman menettelytavan plastisen alueen huomioon ottamiseksi on esittänyt Dugdale, mutta kyseiseen menetelmään ei tässä yhteydessä ole mahdollista tarkemmin perehtyä.

Epälineaarisisissa tapauksissa mitoitus on usein perustettava täysimittaisilla koekappaleilla tehtyjen kokeiden, jotka ovat erittäin hankalia ja epäkäytännöllisiä, antamiin koetuloksiin. Viime vuosina on pyritty kehittämään menetelmiä, jotka käyttävät hyväksi COD-arvoja (crack opening displacement). Valitettavasti COD-arvot riippuvat koekappaleen geometriasta, mikä seikka on vaikea ottaa huomioon teoreettisissa malleissa.

#### 4. MURTOSITKEYDEN RIIPPUVUUS ERI TEKIJÖISTÄ

Tärkeimmät niistä tekijöistä, joista murtositkeys analyysin ohella riippuu, ovat lämpötila ja levypaksuus. Kuvassa 4 on esitetty  $K_{Ic}$ :n riippuvuus lämpötilasta eräälle teräkselle ja kuvassa 5 murtositkeyden riippuvuus levypaksuudesta. Ohuissa levyissä  $t < 2$  cm vallitsee tasojännitystila ja  $K_c$  on  $t$ :n funktio. Tästä johtuu, että ohuille levyille on suoritettava ns. täyden mittakaavan testi, jolloin saadaan kutakin tilannetta vastaava  $K_c$ -arvo. Paksuille levyille, jolloin on kyseessä tasomuodonmuutostila, murtositkeys on paksuudesta riippumaton vakio.

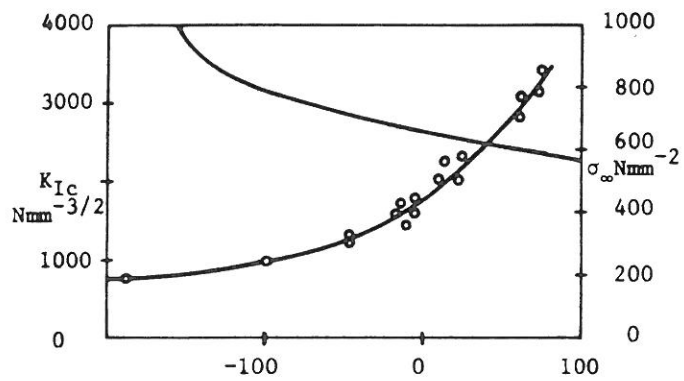
Muista murtositkeyteen vaikuttavista tekijöistä mainittakoon mm., että murtositkeys kasvaa teräksillä rikki-pitoisuuden laskiessa, ks. kuva 6.

#### 5. MURTUMA-ALTTIUDEN TESTAUKSESTA

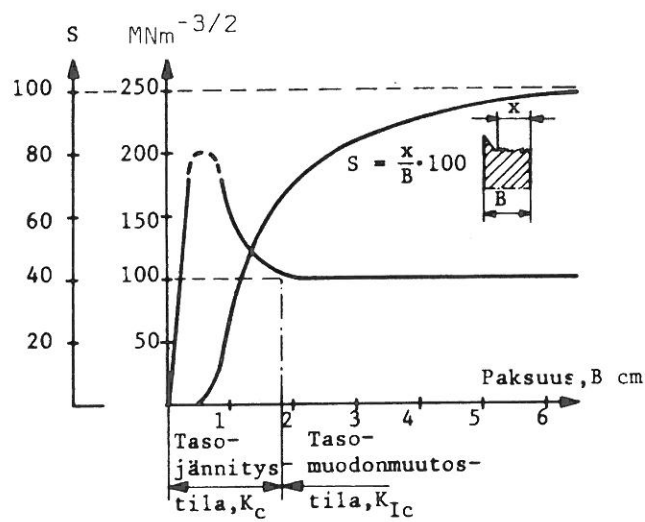
Murtumisilmiön tutkimista varten kehitettyjä lukuisia testausmenetelmiä [Type of test: Tipper Notched Tensile, Van der Veen, Pellini Drop Weight, Explosion Bulge, Navy Tear Test, Robertson, Wide Plate, Wells Wide Plate, Kihara Double Tension, Notch Impact Test (Charpy V, Charpy Keyhole, Mesnager U, Schnadt, Hounsfield)] ei tässä yhteydessä ole mahdollista käydä läpi kuin periaatteellisesti.

Testausmenetelmät on jaettavissa kvalitatiivisiin ja kvantitatiivisiin. Lähteessä [19] kokeet on jaoteltu kolmeen pääryhmään ja nämä edelleen kolmeen alaryhmään. Nämä ovat:

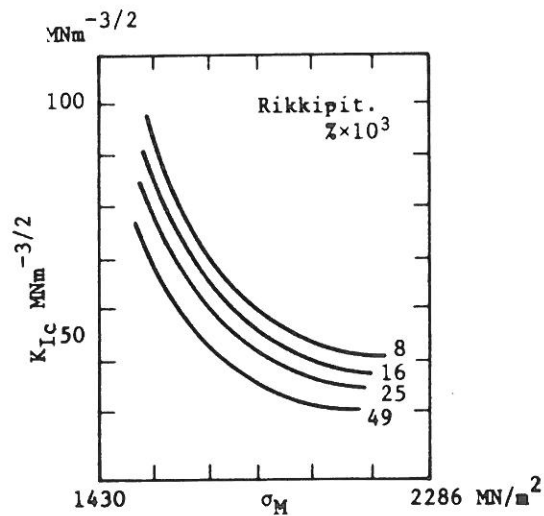
1. Halkeaman kasvu staattisen kuorman vaikutuksesta
2. Halkeaman kasvu dynaamisen kuorman vaikutuksesta



Kuva 4.  $K_{IC}$ -arvot Cr-Mo-V-teräkselle Wesselin mukaan.



Kuva 5. Murtositkeyden riippuvuus levyepaksuudesta J. Carlssonin mukaan.



Kuva 6. Vetolujuuden ja rikkipitoisuuden vaikutus erään teräksen murtositkeyteen R. Wei'n mukaan.

3. Haurasmurtuman eteneminen

- 1 Mallitestit
- 2 Murtumamekaniikkatestit
- 3 Laaduntarkkailutestit

Testin tulisi ottaa huomioon seuraavat vaatimukset, jos testituloksia käytetään suunnittelun lähtökohtana:

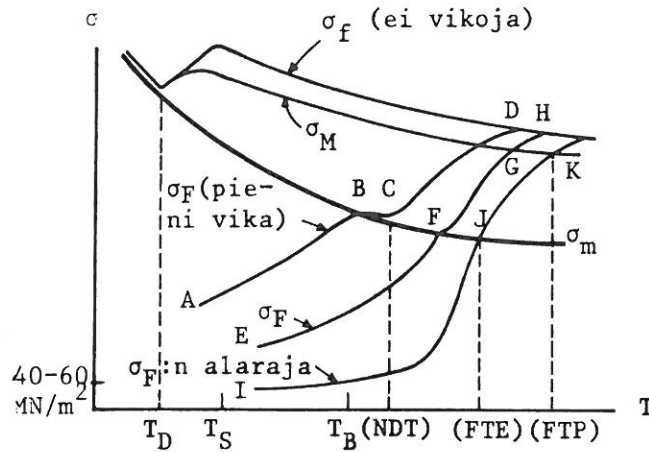
- a) materiaalin paksuus
- b) hitsauksen vaikutus (halkeamat, paikallinen haurastuminen, jäännösjännitykset)
- c) jännitysten ja venymien suuruus ja jakautuma
- d) rakenteen geometria ja koko
- e) vikojen (säröjen) sijainti, koko ja terävyys
- f) kuormitusnopeus
- g) perusaineen ja hitsin eri vyöhykkeiden absoluuttinen ja suhteellinen lujuus
- h) käyttölämpötila ja lämpötilagradientti
- i) rakenteen energiasisältö.

Useimmat käytännössä suoritettavat testit täyttävät vain osan em. vaatimuksista ja ovat siten epäluotettavia.

6. LÄMPÖTILAN JA MATERIAALIVIKOJEN VAIKUTUS MEKAANISIIN LUJUUSOMINAISUUKSIIN

Useimpien terästen (myös muiden t.k.k. -hilaisten aineiden) eräs ominaisuus on, että ne määrättyissä lämpötiloissa tai suurella muodonmuutosnopeudella, kuormitusnopeudella, murtuvat hauraasti, ts. niiden murtumiskäyttäytyminen muuttuu tietyissä olosuhteissa sitkeästä hauraaksi.

Kuvassa 7 on esitetty lämpötilan vaikutus erään materiaalin



Kuva 7. Lämpötilan vaikutus erään materiaalin mekaanisiin lujuusominaisuuksiin.

mekaanisiin lujuusominaisuuksiin: myötölujuus  $\sigma_m$ , klassisesti määriteltä murtolujuus  $\sigma_M$ , virheettömän sauvan murtumislujuus  $\sigma_f$  sekä murtumislujuus  $\sigma_F$ , kun materiaalissa on pieni, keskisuuri tai suuri vika (esim. särö).

Kuvasta havaitaan, että virheetön materiaali murtuu hauraasti vain tietyn lämpötilan  $T_D$  alapuolella. Jos materiaalissa sen sijaan on pieni vika, murtuminen tapahtuu tietyllä nimellisellä jännityksellä (käyrä AB) ennen kuin myötölujuus  $\sigma_m$  on saavutettu. B-pistettä vastaavasta lämpötilasta käytetään nimitystä "Nil Ductility Temperature"  $T_{NDT}$ , kun  $T < T_{NDT}$  tapahtuu murtuminen hauraasti. Välillä BC muuttuu murtuminen hauraasta täysin sitkeäksi. Vian suureneminen siirtää käyrää korkeampiin lämpötiloihin päin. Hauraasta sitkeäksi muuttuva käyttäytyminen tapahtuu pisteissa F ja J. Käyrästä IJK havaitaan, että  $T_{NDT}$ :n läheisyydessä suuren "äärettömän" vian epästabiili kasvaminen estyy, jos jännitystaso  $\sigma < 40 - 60 \text{ MN/m}^2$ .  $T_{NDT}$ :n yläpuolella "äärettömän" vian epästabiiliin kasvuun tarvittava jännitystaso kasvaa nopeasti lämpötilan kasvaessa. Käyrää IJK kutsutaan särön pysähtymislämpötilakäyräksi (Crack Arrest Temperature Curve) CAT. Se määrittelee siis korkeimman lämpötilan kullekin jännitystasolle, jossa

särö voi vielä kasvaa epästabiilisti. Käyrän oikealla puolella olevilla jännitystaso - lämpötila kombinaatioilla ei siis epästabiili murtuma voi tapahtua. Tämän käyrän ja  $\sigma_m$ -käyrän leikkauspistettä vastaava lämpötila merkitään  $T_{FTE}$  (FTE, Fracture Transition Elastic). Tämän lämpötilan yläpuolella kimmoisella alueella olevat jännitykset eivät aiheuta murtumaa. Leikkauspistettä  $\sigma_m$ -käyrän kanssa vastaavaa lämpötilaa merkitään  $T_{FTP}$  (Fracture Transition Plastic) ja sen yläpuolella plastisoituminenkaan ei aiheuta hauraasti tapahtuvaa murtumaa.

Mitoitettaessa rakenne siten, että ollaan CAT-käyrän varmalla puolella, vaikka rakenteessa olisi suuriakin vikoja, merkitsee tämä sitä, että annetulla jännitys - lämpötilakombinaatiolla tulee valita erittäin hyvä aines, jonka CAT-käyrä jää kyseisen mitoitusasteen vasemmalle puolelle tai jännitystason on oltava alhainen. Kummatkin vaihtoehdot ovat käytännössä kalliita, joten on perusteltua sen sijaan valita jokin järkevä suurin sallittu vian koko ja suorittaa mitoitus tähän nähden. Tämä johtaa murtumismekaniikan teorioiden soveltamiseen.

## 7. SOVELLUTUSESIMERKKEJÄ

7.1 Olkoon äärettömässä 0,1 m paksuisessa levyssä levyn läpi ulottuva särö, joka on kohtisuorassa levyssä vallitsevaa aksiaalista jännitystilaa  $\sigma_\infty = 300 \text{ MN/m}^2$  vastaan. Materiaalin myötölujuus on  $800 \text{ MN/m}^2$  ja murtositkeys  $K_{IC} = 150 \text{ MNm}^{-3/2}$ . Tälle tapaukselle  $K_I = \sigma_\infty \sqrt{\pi c}$  ja soveltamalla ehtoa (7) saadaan kriittiseksi särön kooksi, koska kyseessä on tasomuodonmuutostila häiriöalueella,  $2c = 2K_{IC}^2 / \pi \sigma_\infty^2 = 0,16 \text{ m}$ , jolla epästabiili särön kasvu alkaa.

7.2 Laattaa, jossa on 0,04 m mittainen läpiulottuva särö, rasittaa taivutusmomentti  $M_0$  särön suuntaisilla sivuilla. Laatan paksuus on 0,03 m ja materiaalin  $\sigma_m = 1300 \text{ MN/m}^2$  sekä murtositkeys  $K_{Ic} = 110 \text{ MNm}^{-3/2}$ . Tälle tapaukselle on  $K_I = 6M_0\sqrt{\pi c}/h^2$ . Soveltamalla jälleen ehtoa (7) saadaan sallituksi momentiksi 65,8 KN/m ja nimelliseksi jännitykseksi  $\sigma_\infty = 6 M_0/h^2 = 440 \text{ MN/m}^2$ .

7.3 Suuressa levyssä, jonka paksuus on 0,02 m, on aksiaaliseen jännitystilaan nähden kohtisuorassa suunnassa  $l$ :n mittainen 0,002 m syvyinen pintahaava ( $l \gg 0,002 \text{ m}$ ). Materiaalin  $\sigma_m = 900 \text{ MN/m}^2$  ja  $K_I \approx 1,1\sigma_\infty\sqrt{\pi c}$  (ks. esim. lähde [14]), joten  $\Delta K_I = 1,1\Delta\sigma_\infty\sqrt{\pi c}$ . Kun pintahaava kasvaa arvosta  $c_0 = 0,002 \text{ m}$  arvoon  $c = 0,01 \text{ m}$ , tulee lausekkeesta (12) integroitua  $\Delta\sigma_\infty$ :n ja  $N$ :n väliseksi yhteydeksi  $3,75 \cdot \log\Delta\sigma_\infty + \log N = 12,4928$ , mistä  $N$  saadaan kun  $\Delta\sigma_\infty$  tunnetaan.

#### Kirjallisuutta

- [1] Tetelman, A.S., Fracture of Structural Materials, John Wiley, New York 1967.
- [2] Sneddon, I.N., Lowengrub, M., Crack Problems in the Classical Theory of Elasticity, John Wiley, New York 1969.
- [3] Miekko-oja, H.M., Metalliooppi, Otava, Helsinki 1960.
- [4] Carlsson, J., Brottmeikanik, Tekn. T. 1970:1, s. 30.
- [5] Kotilainen, H., Frostén, J., Näkökohtia haurasmurtumataipumuksen arvioimiseksi, AEN-MR-1, 1970.
- [6] Kotilainen, H., Frostén, J., Eräitä neuvostoliittolaisten käyttämiä menetelmiä haurasmurtumataipumuksen arvioimiseksi, AEN-MR-2, 1970.
- [7] Insinöörijärjestöjen Koulutuskeskus, Hitsattujen teräsrakenteiden ja paineastioiden suunnittelu, Julkaisu 12-69, Helsinki 1969.
- [8] Kihara, H., Welding Cracks and Notch-Toughness of Heat-Affect-

- ed-Zone in High-Strength Steels, IIW Houdremont lecture, 1968.
- [9] Saarinen, A., Relander, K., Niukkahiilisten rakenneterästen hitsauksessa syntyvistä mikrorakenteista ja niiden ominaisuuksista, Swetsen, 1969:4.
- [10] Miekko-oja, H.M., Happiteräksen esiinmarssi, Konepajamies 1969:3.
- [11] Relander, K., Onnela, K., Corrosion Behaviour of Heat-Affected-Zones in Welded Ships, Jernkont. Ann. 154, 1970.
- [12] Cotton, H.C., Denham, J.B., European Practice in the Design and Construction of Oil Storage Tanks, API, Proc. Division of refining, 1968, p. 1075-1113.
- [13] Liebowitz, H., Fracture, Vol. 4, Academic Press, New York 1969.
- [14] STF-TLI Kursverksamhet, Brottmekanik och faktografi, Stockholm 1970.
- [15] British Standard Institution, Daft for Vertical, Cylindrical, Welded Steel Storage Tanks for Low-Temperature Service, Part 1.
- [16] A proposed acceptance Standard for Welded Defects Based upon Suitability for Service, The Welding Institute, England, 1968.
- [17] ASTM, Fracture Toughness Testing and Its Application, Baltimore, 1965.
- [18] Räsänen, Forstén, Näkökohtia haurasmurtuma-alttiuden testauksesta ja testitulosten huomioimisesta paineastioiden suunnittelussa.
- [19] The Welding Institut, Report Mise 19/12/69.
- [20] Nilsson, F., Some Experimental Studies of Unstable Crack Propagation in Thin Foils. Publikation nr 164, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm 1970.
- [21] Carlsson, J., Larsson, S.-G., Brottmekanikens grunder. Publikation nr 158, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm 1968.
- [22] Markström, K., Bestämning av brottseghet för tre svenska stål. Publikation nr 165, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm 1970.
- [23] Nilsson, F., Teoretiska aspekter på snabb sprickpropagering. Publikation nr 167, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm 1970.

Erkki Pennala, dipl.ins. Teknillinen korkeakoulu, Otaniemi