

Tor Tallgren

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 12
No. 3 1979 s. 30-41

YHTEENVETO: Artikkelin on lyhennelmä diplomityöstä, joka on tehty Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen rakennetekniikan laboratoriossa. Työssä tutkittiin torninosturin hitsiliitoksen väsymislujuutta murtumismekaniikkaa hyväksikäyttäen. Teoreettisessa tarkastelussa selvitettiin väsymissärön ydintymistä ja kasvua. Kokeellisessa osassa tehtiin tutkittavalle liitostyypille väsytysokeita, joista saatuja tuloksia verrattiin edelleen teoreettiseen tarkastelumalliin.

JOHDANTO

Klassillinen väsymislujuusteoria perustuu useimmiten kokeisiin, joissa on tutkittu erilaisilla sileillä tai lovetuilla koekappaleilla materiaalin väsymislujuutta eli jännitysamplitudin ja murtumaan johtaneen kuormanvaihtoluvun välistä yhteyttä. Näissä kokeissa ei yleensä ole eritelty tarkemmin väsymissärön ydintymis- ja kasvuvaihetta. On oletettu, että ydintymisvaihe vie suurimman osan rakenteen eliniästä. Toisaalta materiaalissa saattaa olla sisäisiä vikoja, jotka ovat syntyneet esimerkiksi valmistuksen tai kokoonpanon yhteydessä. Varsinkin hitsatuissa rakenteissa hitsivirheet sijaitsevat vielä yleensä jännityskeskittymissä. Ydintymisvaihe tällöin lyhenee ja väsymissärön kasvuvaihe tulee merkittäväksi.

Murtumismekaniikka on tieteen haara, joka materiaaliopin ja lujuusopin avulla tutkii materiaalissa olevia säröjä ja niiden vaikutusta kuormankantokykyyn tai elinikään. Epästabili särönkasvu eli murtuminen tapahtuu, kun särö saavuttaa kuormitustilanteesta ja materiaalista riippuvan kriittisen koon. Murtumismekaniikan avulla voidaan näin tutkia tarkemmin väsymissärön kasvuvaihetta ja lopullisen murtumisen tapahtumista.

Murtumismekaniikkaa on sovellettu sellaisten rakenteiden mitoittamisessa, joissa on käytetty lujia materiaaleja, suuria ainepaksuuksia tai alhaisia käyttölämpötiloja. Tällöin materiaali käyttäytyy suhteellisen hauraasti eli plastisoituminen on vähäistä ja siten on voitu soveltaa lineaaris-elastista murtumismekaniikkaa.

Kun plastisoituminen tulee huomattavaksi, joudutaan käyttämään elastis-plastista murtumismekaniikkaa, jonka kehittyminen ei ole vielä edennyt line-

aaris-elastisen murtumismekaniikan tasolle. Tavalliset rakennemateriaalit kuten rakenneteräokset käyttäytyvät normaaleissa käyttöolosuhteissa ja materiaalipaksuuksilla elastis-plastisesti.

Murtumismekaniikan perusteita on käsitelty lehden aikaisemmissa numeroissa /1,2/ joten niihin ei tässä yhteydessä puututa.

VÄSYMINEN

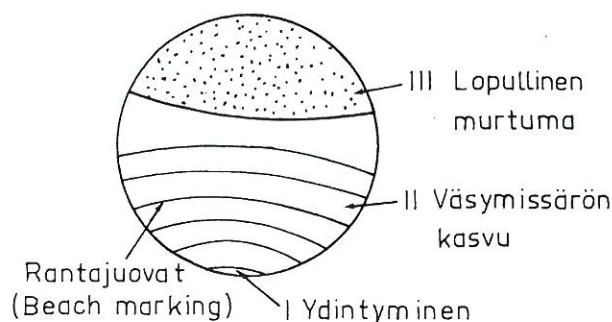
Rakenteet, jotka kantavat staattisesti tietyn kuorman, voivat vaihtelevalla kuormituksella vaurioitua ja murtua huomattavasti alhaisemmalla jännitystasolla. Edellä kuvattua murtumista, johon liittyy olennaisesti särön tai säröjen muodostuminen, nimitetään väsymismurtumaksi. Suurin osa vaihtelevan kuormituksen alaisten rakenteiden ja koneenosien vauriotapauksista on väsymisen aiheuttamia.

Väsymisessä voidaan erottaa kolme eri vaihetta (kuva 1)

I : Väsymissärön ydintyminen

II : Väsymissärön kasvu

III: Lopullinen murtuma



Kuva 1 Väsymisen eri vaiheet

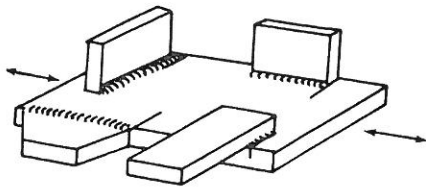
Rakenteen elinikä koostuu väsymisen eri vaiheissa kulutetusta ajasta (=kuormanvaihtoluku). Sileillä ja loveattomilla kappaleilla, joissa ei ole jännityshuippuja tai ainevikoja, ydintymisvaihe vie suurimman osan eliniästä (jopa 90 %). Materiaalissa saattaa olla kuitenkin valmistuksesta tai kokoonpanosta aiheutuneita vikoja kuten huokosia ja säröjä. Erilaisten lovien ja epäjatkuvuuskohtien seurauksena syntyy

kappaleeseen jännityshuippuja ja kappaleessa voi olla myös haitallisia sisäisiä jäännösjännityksiä. Varsinkin hitsatuissa rakenteissa voi esiintyä kaikkia edellä mainittuja tekijöitä ja niiden kerääntyminen yhteen paikkaan luo väsymismurtuman syntymiselle otolliset olosuhteet. Väsymissärö saattaa tällöin ydintyä kriittisestä kohdasta pienilläkin kuormanvaihtoluvun arvoilla ja silloin rakenteesta riippuen voi väsymissärön kasvuvaihe tulla hallitsevaksi rakenteen eliniän kannalta.

VÄSYMISSÄRÖN YDINTYMINEN HITSILIITOKSISSA

Hitsatuissa rakenteissa väsymissärö ydintyy yleensä hitsiliitosten kohdalta (kuva 2).

Jännityshuiput



Kuva 2 Väsymissärön ydintymispaikko- ja hitsiliitoksissa

Hitsipalon muodostama epäjatkuvuuskohta aiheuttaa jännityshuipun hitsin viereen. Muotoluku, joka on huippujännityksen ja nimellisjännityksen suhde tutkittavassa leikkauksessa vaihtelee 1 ja 8 välillä riippuen hitsin ja liitoksen muodosta, hitsin tunkeumasta sekä rajakulmasta hitsin ja perusaineen välillä /3/.

Hitsauksessa syntyvät jännitykset

Hitsauksessa syntyvät hitsauslämmön aiheuttamat jännitykset voidaan jakaa ulkoisiin eli reaktiojännityksiin ja sisäisiin jännityksiin. Reaktiojännityksiä muodostuu jäykässä hitsiliitoksessa, kun ulkopuolinen kiinnitys estää muodonmuutokset. Sisäiset eli jäännösjännitykset syntyvät rakenteeseen paikallisen sulamisen, puristusmyötämisen ja sitä seuraavan jäähtymisen yhteydessä. Jäännösjännitykset saavuttavat myötölujuuden hitsin pituussuunnassa ja usein myös poikittaisessa suunnassa.

Väsymissärön ydintymisen kannalta eivät jäännösjännitykset ole aina vaarallisia. Puristusjännitystilän muodostuminen kriittiseen kohtaan hidastaa ydintymistä. Lisäksi haitalliset jäännösjännitykset saadaan osittain laukeamaan ylikuormittamalla rakenne ennen käyttöä. Kohdissa, joissa kuormittava jännitys yhdistettynä jäännösjännityksiin ylittää myötörajan, tapahtuu myötämistä ja kuormituksen jälkeen jäännösjännitystaso alenee.

Hitsausvirheet

Vaikka hitsauksessa pyritäänkin välttämään hitsausvirheiden muodostumista, tulee niitä kuitenkin aina hitseihin.

Hitsausvirheet voidaan jaotella seuraavasti

- säröt
- liitos- ja juurivirhe
- sulkeumat
- huokoset
- geometriset virheet.

Staattisella kuormituksella ja olosuhteissa, joissa haurasmurtumista ei esiinny, hitsausvirheet ovat harvoin vaarallisia. Sen sijaan vaihtelevalla kuormituksella ne voivat olla väsymissärön ydintymiselle sopivia kohteita. Väsymisen kannalta vaarallisimpia ovat terävät särömäiset viat, jotka sijaitsevat suurimman pääjännityksen normaalin suunnassa.

VÄSYMISSÄRÖN KASVU

Väsymissärön kasvusta on esitetty useita eri teorioita /4/. On todettu, että väsymissärön kasvu riippuu plastisesta muodonmuutoksesta särön kärjessä. Frost ja Dugdale osoittivat tutkimalla kokeellisesti särön kärjen plastista vyöhykettä, että sen koko riippuu vallitsevasta jännityksestä, särön pituudesta ja materiaalin mekaanisista ominaisuuksista.

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta\epsilon_p) = f(\Delta\sigma, a, A)$$

da/dN = särön kasvunopeus

$\Delta\epsilon_p$ = plastinen muodonmuutos

$\Delta\sigma$ = jännitysvaihtelu

a = särön pituus

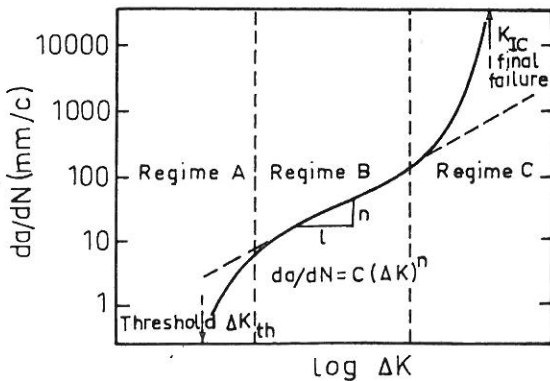
A = materiaalivakio

Murtumismekaniikassa käytetty suure jännitysintensiteettitekijä K sisältää edellä mainittuja termejä ($K = f(\sigma, a)$) ja niinpä Paris ja Erdogan esittivät särön kasvunopeudelle yhtälön (kuva 3).

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^n$$

C, n = materiaalivakioita

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ = jännitysintensiteettivaihtelu



Kuva 3 Särön kasvunopeus ΔK :n funktiona

Kun tunnetaan rakenteen K -arvot särön pituuden funktiona sekä materiaalivakiot C ja n (taulukko 1) voidaan särön kasvuun kulunut aika (kuormanvaihtoluku N) laskea integroimalla

$$N = \int_{a_0}^{a_{kr}} \frac{da}{C \cdot (\Delta K)^n}$$

a_0 = alkusärön pituus

a_{kr} = kriittinen särön pituus

Taulukko 1 Materiaalivakioiden arvoja eri teräksille /5,6/ yksiköissä $\Delta K = \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, $da/dN = \text{mm/cycle}$

	C	n
Ferriittis-perliittinen teräs	$6,89 \cdot 10^{-9}$	3
Martensiittinen teräs	$1,36 \cdot 10^{-7}$	2,25
Austeniittinen teräs	$5,61 \cdot 10^{-9}$	3,25
Hiili-mangaani teräs, hitsiliitos		
Yläraja	$9,49 \cdot 10^{-9}$	3
Alaraja	$2,85 \cdot 10^{-9}$	3

LOPULLINEN MURTUMA

Kriittinen särön pituus a_{kr} on se rajakohta, jonka jälkeen särön kasvu jatkuu joko stabiilina eli sitkeänä repeämänä tai epästabiilina eli haurasmurtumana materiaalista ja kuormitusolosuhteista riippuen. Sama materiaali voi eri olosuhteissa käyttäytyä täysin eri tavalla. Tähän liittyy esimerkiksi rakenneteräksillä havaittu transitio sitkeästä hauraaksi lämpötilan laskiessa.

Alhaisen lämpötilan lisäksi haurasmurtuman syntymistä edistävät suuri materiaalipaksuus (kolmiakselialinen jännitystila särön kärjessä), iskumainen kuormitus sekä materiaalin suuri myötölujuus.

Lineaaris-elastisella alueella saadaan murtumisehdoksi

$$K = K_{Ic} \text{ tai } K_{Id}$$

K_{Ic} = murtumissitkeys staattisella kuormituksella tasomuodonmuutostilassa

K_{Id} = murtumissitkeys dynaamisella kuormituksella tasomuodonmuutostilassa

Koska jännitysintensiteettitekijä K on särön pituuden funktio, voidaan kriittinen särön pituus laskea kun tunnetaan materiaalin murtumissitkeys käyttöolosuhteissa ja rakenteessa olevan särön K -arvo.

Materiaalin käyttäytyessä elastis-plastisesti murtumista edeltää särön kärjen huomattava plastisoituminen ja lineaaris-elastisen murtumismekaniikan murtumisehtoja ei voida silloin käyttää. Jos plastinen vyöhyke on edennyt läpi kuormaa kantavan poikkipinnan eli materiaali on kyseisellä alueella kokonaan plastisoitunut, on seurauksena sitkeä leikkausmurtuma, jota edeltää koko poikkipinnan myötäminen. Kriittiseksi ehdoksi saadaan tällöin

$$\frac{F}{A} = \sigma_y$$

F = kuormittava voima

A = kantava poikkipinta-ala

σ_y = myötölujuus

VÄSYMISSÄRÖN KASVUNOPEUSYHTÄLÖN PÄTEVYYSALUE

Väsymissärön kasvunopeuden yhtälössä käytetty jännitysintensiteettitekijä K perustuu lineaaris-elastiseen murtumismekaniikkaan, jolloin plastisoituminen särön kärjessä on vähäistä. Näin onkin pienillä K :n arvoilla. Särön jatkaessa kasvuaan suurenee plastinen alue kuitenkin edelleen kunnes plastisoituminen on niin huomattavaa, että lineaaris-elastisen murtumismekaniikan perusolettamukset eivät ole enää voimassa.

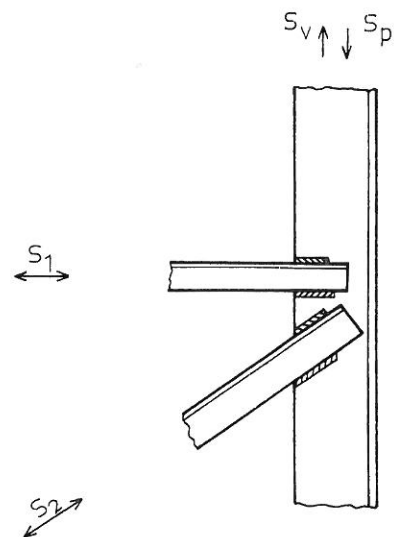
Tämä on yleistä varsinkin sitkeillä ja alhaisen myötölujuuden teräksillä (mm. rakenneteräksset) ja lineaaris-elastisen murtumismekaniikan soveltamis-

aluetta on silloin tarpeellista rajoittaa ASTM:n standardissa /7/ on soveltamisaluetta ehdotettu rajattavaksi menetelmällä, joka perustuu siirtymien mittauksen särön kasvussa.

SOVELLUTUSKOHDDE

Väsymislujoustarkastelun sovellutuskohteeksi valittiin torninosturin maston nurkkaliitos. Kuvassa 4 on esitetty tarkastelussa käytetty liittostyyppi.

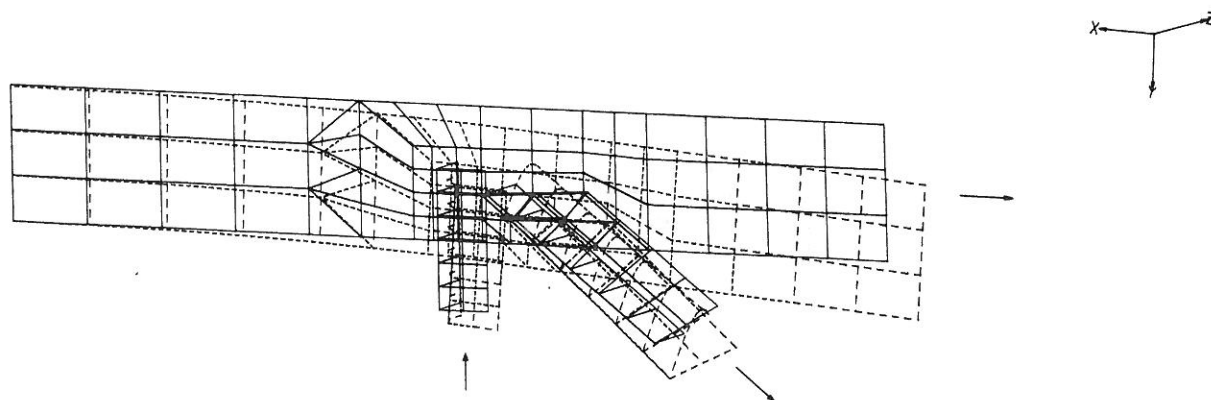
Kuormittavat voimat valittiin torninostureiden mitoituksessa käytettävän standardin /8/ ja erään nosturityypin laskelmien mukaisesti



Jännitysanalyysi

Väsymissärön ydintymiskohdan selvittämiseksi tehtiin rakenteelle jännitysanalyysi elementtimenetelmällä. Ohjelmana käytettiin PAFEC 75 ESIDATA:a. Elementtiverkko muodostettiin isoparametrisilla kolmio- ja nelikulmioleveyelementeillä, jotka kiinnitettiin tasoonsa. Hitsisaumat aikaansaatiin kytkemällä paarten ja vastaavat diagonaali- ja vertikaalisauvojen solmupisteet toisiinsa siten, että niillä oli samat vapausasteet.

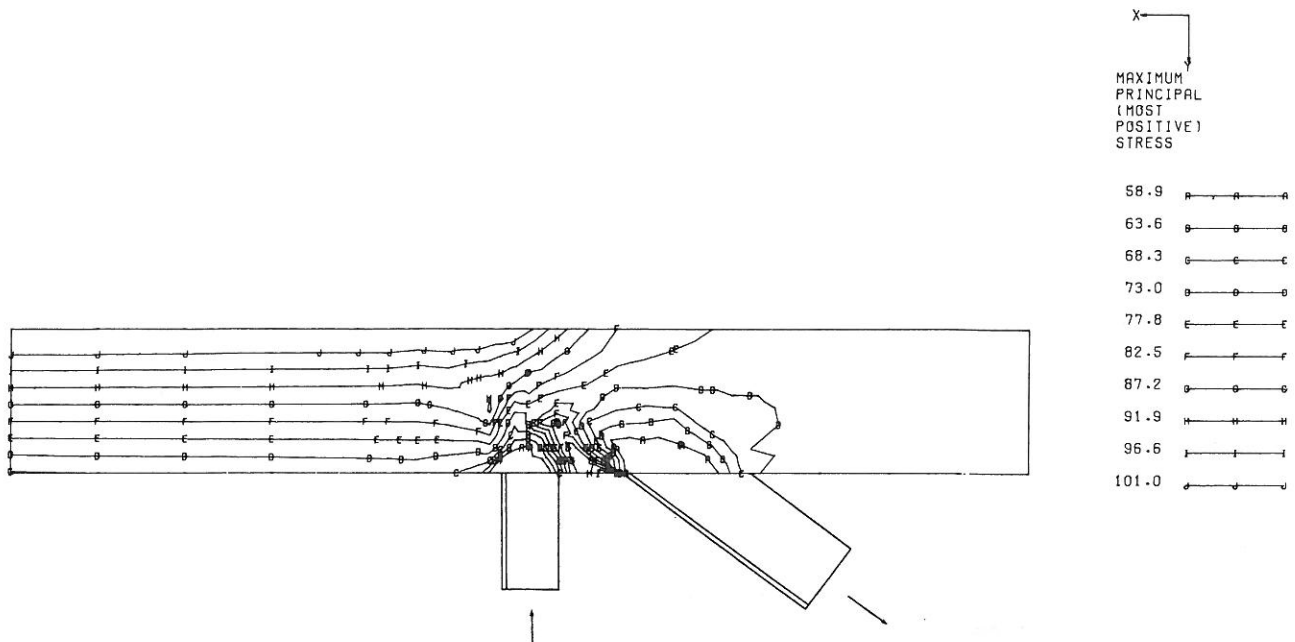
Rakenne analysoitiin kahdella kuormitustapauksella. Rakenteen siirtymätilat on esitetty kuvassa 5 ja jännitykset tasa-arvokäyrinä kuvissa 6 ja 7.



PAFEC/DRAW CDC CYBER / VTT
ON 1979-03-30 AT 15.55.52

DRW. NO. 2
SCALE = 0.0003 :1

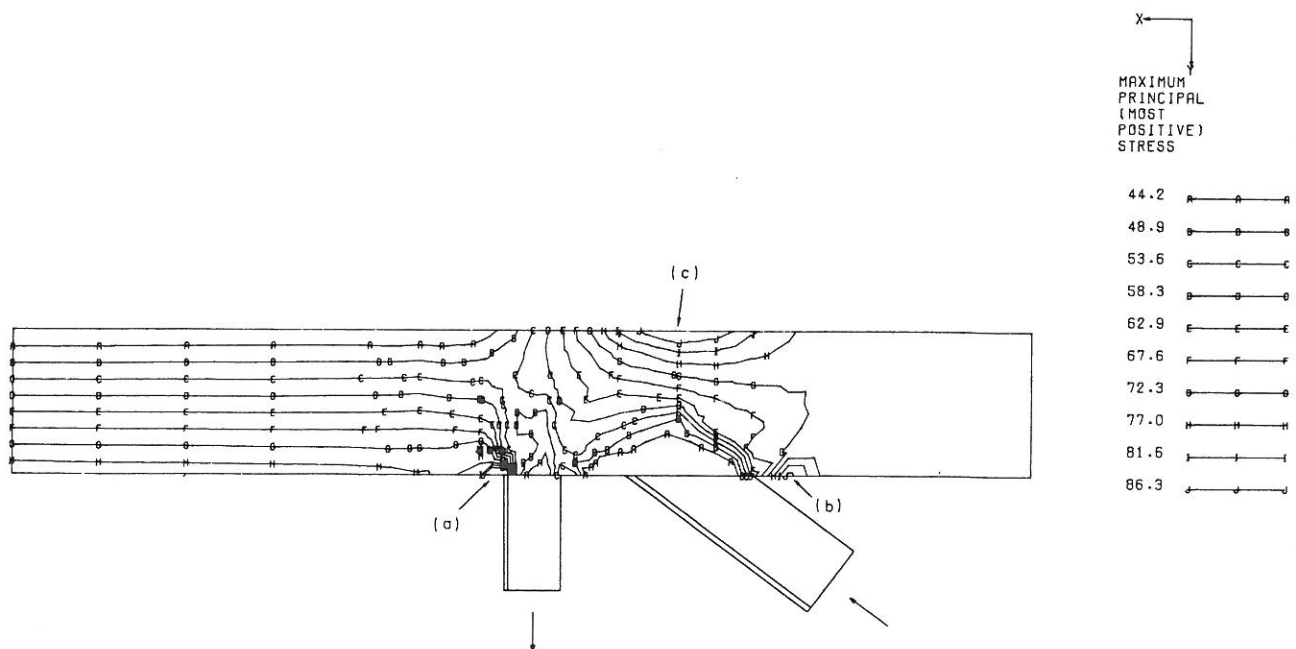
Kuva 5 Siirtymätilat



PAFEC/DRAW CDC CYBER / VTT
ON 1979-04-02 AT 16.06.31

DRW. NO. 6
SCALE = 0.0003 :1

Kuva 6 Jännitykset tasa-arvokäyrinä, kuormitustapaus I



PAFEC/DRAW CDC CYBER / VTT
ON 1979-04-02 AT 16.06.41

DRW. NO. 7
SCALE = 0.0003 :1

Kuva 7 Jännitykset tasa-arvokäyrinä, kuormitustapaus II

Väsymissärön ydintymisen kannalta vaarallisin jännityshuippu sijaitsee kuormitustapauksen II kohdassa (a), jossa se on aivan hitsin vieressä. Lisäksi hitsin aiheuttama muotoluku lisää jännityksiä. Muut jännityshuiput eivät ole niin kriittisiä, koska ne sijaitsevat kohdissa, joissa ei ole hitsin aiheuttamaa muotolukua tai muuta epäjatkuvuuskohtaa.

Myös väsymissärön kasvun kannalta on kohta (a) kriittisin, koska hitsi on kohtisuoraan suurinta pääjännitystä vastaan ja särö voi siten kasvaa hitsin vieressä jännityshuipun alueella suurimman osan eliniästään.

Jännitysintensiteettitekijän K_I määrittäminen rakenteelle

Jännitysintensiteettitekijä K_I kuvaa säröllisen rakenteen jännityskentän intensiteettiä särön kärjessä ja se on riippuvainen kuormittavasta jännityksestä, särön pituudesta ja sen sijainnista jännityskentässä

$$K_I = f(g) \cdot \sigma \sqrt{a}$$

$f(g)$ = geometrinen tekijä

σ = kuormittava jännitys

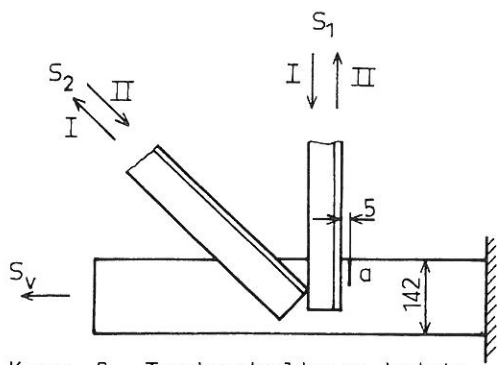
a = särön pituus

Jännitysintensiteettitekijän K-arvoja on taulukoitu erilaisille geometrioidille ja kuormitustapauksille /9/. Monimutkaisemmissa tapauksissa ei voida käyttää analyyttisiä ratkaisumalleja ja silloin on turvauduttava numeerisiin menetelmiin K-arvon määrittämiseksi.

Tässä työssä käytettiin VTT:n ydinvoimatekniikan laboratorion CRACK-ohjelmaa /10/, jolla voidaan analysoida kaksidimensioisessa tapauksessa kappaleen reunalla tai sen sisällä olevia säröjä voima-, lämpötila- tai pakkosiirtymäkuormituksella. Jännitystilana voi olla joko tasojännitys- tai tasomuodonmuutostila. Ohjelma laskee särön jännitysintensiteettitekijän kahdella eri siirtymämenetelmällä sekä energiamenetelmällä.

Ohjelma perustuu tavalliseen kaksidimensioiseen elementtimenetelmäohjelmaan, joka käyttää nelisivuisia 8-solmuisia isoparametrisia elementtejä. Singulaarisuus saadaan särön kärjessä oleviin nurkkapisteisiin siirtämällä viereisten sivujen välisolmut 1/4-asemaan. Ohjelma muodostaa normaalisti elementtien jäykkyysmatriisit, kokoaa niistä koko rakenteen jäykkyysmatriisin ja ratkaisee kyseistä kuormitustapausta vastaavat siirtymät. Näistä siirtymistä ohjelma laskee K-arvot sekä Westergaardin yhtälöiden perusteella että deLorenzin ja Shih'n esittämällä tavalla singulaaristen elementtien siirtymistä.

Energiamenetelmässä ohjelma laskee rakenteeseen sitoutuneen potentiaalienergian ja muuttaa elementtiverkkoa lisäämällä särön pituutta. Kuormitustila pysyy samana ja siirtymät sekä potentiaalienergia lasketaan uudelleen.



Kuva 8 Tarkasteltava kohde

K-arvo saadaan energiamuutoksen ja särön pinta-alamuutoksen suhteesta. Näistä menetelmistä tarkimmaksi on osoittautunut energiamenetelmä.

Jännitysanalyysin perusteella osoittautui kriittisimmäksi tapaukseksi se, jossa särö kasvaa vertikaalisauvan hitsin vieressä (kuva 8).

Kyseiselle tapaukselle laskettiin jännitysintensiteettitekijä K_I CRACK-ohjelmalla kummallakin kuormitustapauksella viidellä eri särön

pituudella. Energiamenetelmällä lasketut arvot tasomuodonmuutostilassa on esitetty taulukossa 2.

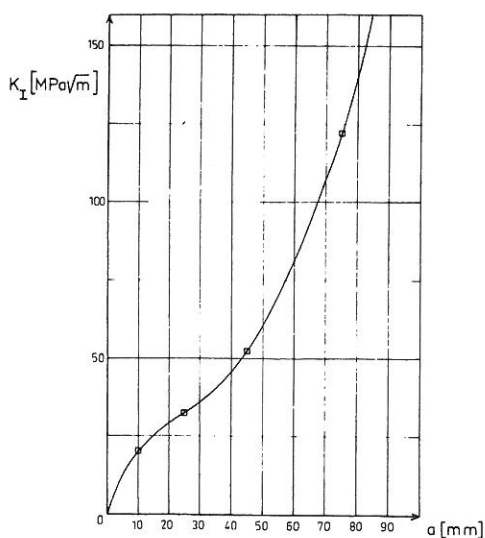
Taulukko 2 Energiamenetelmällä lasketut K_I -arvot eri särön pituuksilla

a (mm)	K_I (MPa $\sqrt{m}$), I	K_I (MPa $\sqrt{m}$), II
10	9,5	20,4
25	19,8	32,3
45	39	52,7
75	107	122
100	247	259

Kuormitustapauksessa II ovat K_I -arvot suurempia ja se johtuu liitoksen epäkeskeisyydestä aiheutuvasta momentista, joka pyrkii avaamaan säröä.

Kriittisemmän kuormitustapauksen II K_I -arvojen kautta sovitettiin pienimmän neliösumman menetelmällä viidennen asteen käyrä (kuva 9), jonka yhtälö on

$$K_I = 3,114 \cdot a - 0,138 \cdot a^2 + 3,377 \cdot 10^{-3} \cdot a^3 - 3,465 \cdot 10^{-5} \cdot a^4 + 1,414 \cdot 10^{-7} \cdot a^5$$

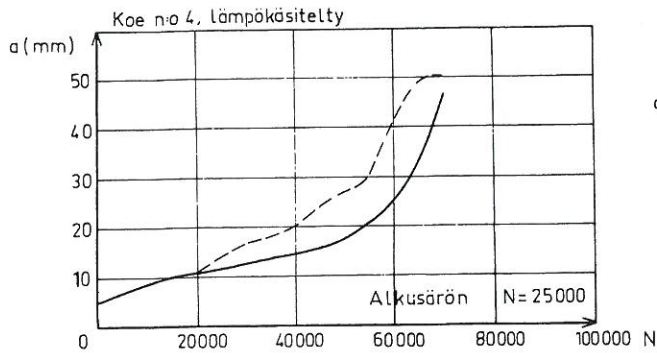


Kuva 9 K_I -arvo rakenteelle, kuormitustapaus II

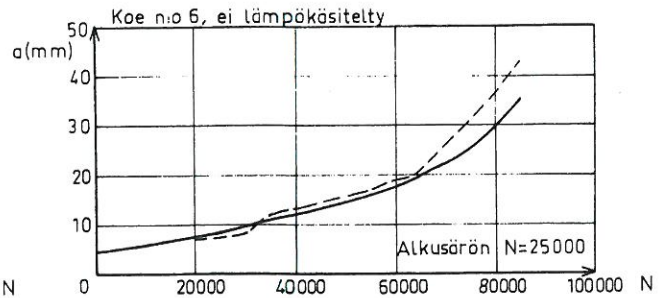
Väsytykokeet

Tutkittavan liitoksen väsytykokeet tehtiin Teknillisen korkeakoulun lujuusopin laboratoriossa. Kokeissa käytettiin kahta koekappalesarjaa (ä 3 kpl), joista toinen oli lämpökäsitelty (normalisoitu) ja toinen oli lämpökäsittelemättömä. Tällä pyrittiin selvittämään hitsausjännitysten vaikutusta väsymissärön kasvuun.

Koekappaleiden mitat samoin kuin kuormittavat voimat vastasivat teoreettista tarkastelumallia (kuva 8). Koekappaleisiin tehtiin alkulovet ($a = 30$ mm) kriittiseen ydintymiskohtaan ja särön etenemistä seurattiin paarteen kummaltakin



Kuva 10 Särön pituus kuormanvaihtoluvun funktiona kokeessa n:o 4



Kuva 11 Särön pituus kuormanvaihtoluvun funktiona kokeessa n:o 6

puolelta kuormanvaihtoluvun funktiona. Kokeiden n:o 4 (normalisoitu) ja n:o 6 (lämpökäsittelemätön) tulokset on esitetty kuvissa 10 ja 11.

Molemmissa kokeissa kasvoi särö nopeammin hitsin puoleisella reunalla, jossa hitsin aiheuttama muotoluku lisäsi särön kasvunopeutta. Verrattaessa kokeiden 4 ja 6 tuloksia havaitaan särön kasvavan lämpökäsittelemättömässä koekappaleessa huomattavasti hitaammin. Tässä tapauksessa ilmeisesti hitsausjännitykset hidastivat särön kasvua.

Teoreettisten ja kokeellisten tulosten vertailu

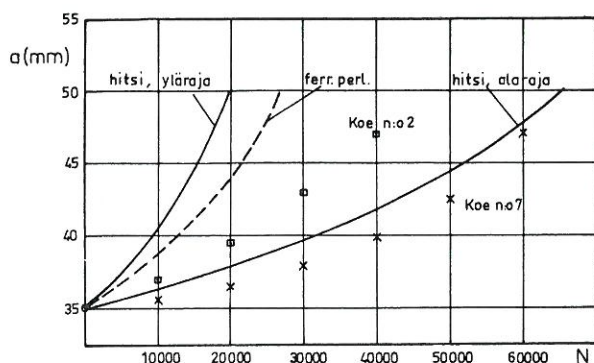
Teoreettinen elinikä rakenteelle laskettiin Paris'n lain kaavalla, josta saadaan integroimalla

$$N = \int_{a_0}^{a_{kr}} \frac{da}{C \cdot (\Delta K_I)^n}$$

ja käyttämällä numeerista integrointia

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{C \cdot (\Delta K_I)^n}$$

Alkusärön pituus a_0 valittiin kokeissa käytetyn alkusärön mukaan (lovi + alkusärö = 35 mm). Kriittinen särön pituus a_{kr} oli se rajapiste, johon asti voitiin soveltaa lineaaris-elastista murtumismekaniikkaa ($a_{kr} = 50$ mm). Materiaalivakioina C ja n käytettiin taulukon 1 arvoja ja K_I -arvo saatiin kuvan 9 mukaisesti.



Kuva 12 Teoreettisesti lasketut särön pituudet kuormanvaihtoluvun funktiona sekä kokeiden 2 ja 7 tulokset

Teoreettisesti lasketut särön pituudet ja koetulosten 2 ja 7 vastaavat arvot on esitetty kuvassa 12.

Teoreettista tarkastelumallia lähinnä olevan normalisoidun koekappaleen tulokset sopivat hitsiliitoksen ylä- ja alarajan tulosten välille. Lämpökäsit-

telemättömällä koekappaleella tulokset ovat sen sijaan lähempänä hitsiliitoksen alarajalla saatua tulosta.

Koetulosten ja teoreettisten laskelmien välinen yhteys on hyvä ottaen huomioon laskennallisen epätarkkuuden. Laskennallisesti saadut arvot eliniälle ovat nimittäin suuresti riippuvaisia K-arvosta ja käytetyistä materiaalivekoista. Laskennallisen mallin ja koekappaleiden väliset erot (liitoksen epäkeskeisyys paarteen suhteen, hitsin muotoluku) aiheuttavat epätarkkuutta jännityksiin ja edelleen K_I -arvoihin.

Myös eri materiaalivekojen arvoilla saadut tulokset vaihtelevat huomattavasti. Teoreettiset laskelmat, jotka on saatu ylärajan vakioarvoilla, antavat tässä tapauksessa konservatiivisia tuloksia ja ovat siten käyttökelpoisia käytettäväksi elinikäntarkastelussa.

LOPPUSANAT

Artikkelissa on selvitetty murtumismekaniikan soveltamista todellisen rakenteen väsymislujuustarkasteluun. Teoreettisen tarkastelumallin ja kokeellisten tulosten välinen yhteys oli hyvä. Työssä käytettyä menetelmää voidaan soveltaa myös muihin rakenteisiin, joiden K-arvot tunnetaan. Yksinkertaisissa tapauksissa löytyvät yleensä K-arvot taulukkokirjoista ja monimutkaisissa rakenteissa voidaan käyttää elementtimenetelmään perustuvia numeerisia menetelmiä. Väsymissärön kasvuvaihetta pystytään näin tarkemmin seuraamaan. Rakenteessa oleva särö voidaan siten sallia, jos osoitetaan, että se ei ehdi rakenteen eliniän tai sille tehtävien tarkastusten välisenä aikana kasvaa kriittisen kokoiseksi.

LÄHDEKIRJALLISUUS

- [1] Pennala, E., Murtumismekaniikasta. Rakenteiden mekaniikka, Vol. 5, No. 3, 1972.
- [2] Kärnä, T., Murtumismekaniikan perusteita. Rakenteiden mekaniikka, Vol. 10, No. 4, 1977.
- [3] Gurney, T.R., Fatigue of welded structures. Cambridge University Press 1968.
- [4] Hoepfner, D.W., Krupp, W.E., Prediction of component life by application of fatigue crack growth knowledge. Engineering fracture mechanics, Vol. 6, No. 1, 1974.
- [5] Rolfe, S.T., Barsom, J.M., Fracture and fatigue control in structures, Applications of fracture mechanics, Prentice Hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey 1977.
- [6] Maddox, S.J., Assessing the significance of flaws in welds subject to fatigue, Welding research supplement, September 1974.

- [7] ASTM E 637-78 T, Tentative test method for constant load amplitude fatigue crack growth rates above 10^{-8} m/cycle.
- [8] DIN 15018, Krane, Grundsätze für Stahltragwerk Berechnung, April 1974.
- [9] Tada, H., Paris, P.C., Irwin, G.R., The stress analysis of cracks handbook, Del research corporation, Hellertown, Pennsylvania 1973.
- [10] Raiko, H., Särön jännitysintensiteettikertoimen määrittäminen. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Ydinvoimatekniikan laboratorio, Helsinki 1978.

Tor Tallgren, dipl.ins., Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Otaniemi

RAKENTEIDEN MEKANIIKAN SEURAN TOIMINTAA

Lokakuun keskustelutilaisuus

Keskustelutilaisuuden aiheena oli teräsbetonirakenteiden epälineaarinen analysointi ja ainetta rikkomattomien menetelmien käyttö betonin laadun arvioinnissa. Epälineaarista analysoinnista alustivat prof. Martti Mikkola ja DI Hannu Sinisalo Helsingin teknillisestä korkeakoulusta ja fil. kand. Matti Pajari Valtion teknillisestä tutkimuskeskuksesta. Ainetta rikkomattomista menetelmistä alusti DI Kari Nikkari Valtion teknillisestä tutkimuskeskuksesta. Tilaisuudessa oli läsnä 31 yhdistyksen jäsentä.

Martti Mikkola tarkasteli lineaaristen analysointimenetelmien soveltumista teräsbetonirakenteisiin ja selvitti syitä, jotka ovat johtaneet sekä fysikaalisesti että geometrisesti epälineaaristen analysointimenetelmien kehittämiseen. Hän esitteli käytettyjä betonimateriaalin jännitysmuodonmuutos-yhteyttä kuvaavia malleja. Hannu Sinisalo esitteli HTKK:ssa laskettuja sovellutuksia. Esimerkit olivat teräsbetonisia palkki- ja laattarakenteita, joihin vaikutti staattinen tai dynaaminen kuorma. Laskentatuloksia hän vertasi kirjallisuudesta saatuihin kokeellisiin ja laskennollisiin tuloksiin. Matti Pajari käsitteli VTT:ssä käytössä olevia teräsbetonirakenteiden epälineaarista analysointiohjelmaa. HIKI-ohjelma on differenssimenetelmää käyttävä pilareiden normaaliavoimakapasiteetin laskentaan tarkoitettu ohjelma. ADINA on 1-, 2- tai 3-dimensioisia elementtejä käyttävä elementtimenetelmään perustuva ohjelma, jota VTT:llä on edelleen kehitetty erityisesti teräsbetonirakenteisiin soveltuvaksi. Sovellutuslaskelmien esimerkkeinä Matti Pajari käytti samoja kirjallisuusesimerkkejä kuin Hannu Sinisalo.

Kari Nikkari tarkasteli alustuksessaan käsitteiden ainetta rikkomaton, betonin laatu ja arvioiminen sisältöä. Hän loi katsauksen ainetta rikkomattomien menetelmien yleispiirteisiin, niiden jakoon ja menetelmien kehittymiseen 50-luvulta 70-luvulle ja tulevaisuuteen. Alustuksessaan hän arvosteli betonin puristuslujuuden keskeistä asemaa betonin laadun arvioinnissa.

Ensimmäisen jakson alustusten pohjalta syntyneessä keskustelussa käsiteltiin TKK:ssa kehitettyjen ohjelmien ja ADINA-ohjelman käyttöä ja kehitystavoitteita sekä ulkopuolisten mahdollisuuksia ohjelmien käyttöön. Jälkimmäisen osan alustus herätti keskustelua mm. ultraäänitekniikasta ja kimmoivasaran käytöstä.

Illan isäntä Partek tarjosi osanottajille maukkaita piirakoita ja virvokkeita.

Paavo Hassinen