

LAMINAATTIEN PROGRESSIIVISET PETTÄMISMALLIT

Veera Skyttä, Olli Saarela, Markus Wallin

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 37
No. 1, 2004, ss. 12-21

TIIVISTELMÄ

Kuitulujitettujen laminaattien progressiivisilla pettämismalleilla lasketaan matriisissä-
säröjen aiheuttamaa laminaatin asteittaista heikkenemistä. Progressiivisen pettämismallin perustana ovat kerroksen murtokriteeri ja kerroksen vauriomalli. Murtokriteerin avulla määritetään, milloin kerros pettää. Vauriomalli muuttaa kerroksen ominaisuudet vastaamaan murtokriteerin osoittamaa pettämismuotoa. Laminaatin kuormitusvastetta lasketaan klassisella laminaattiteorialla. Tässä artikkelissa esitetään yksinkertaisimmat murtokriteerit ja vauriomallit, esitetään esimerkki näiden yhdistämisestä progressiiviseksi pettämismalliksi sekä käydään läpi viimeaikoina julkaistuja progressiivisia pettämismalleja ja progressiivisen pettämismallin käyttöperiaate rakennetasolla.

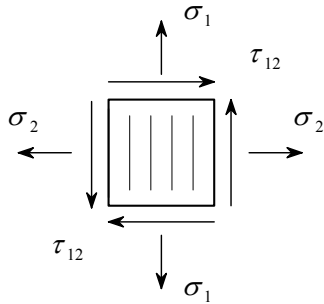
JOHDANTO

Kuitulujitettu laminaatti koostuu useasta suunnatusta ortotrooppisesta kerroksesta. Ensimmäisen kerroksen pettäminen ei yleensä johda laminaatin lopulliseen pettämiseen vaan laminaatti voi kantaa vielä moninkertaisen kuorman. Ensimmäisen kerroksen pettämisen aiheuttavaa kuormaa kutsutaan FPF-kuormaksi (First Ply Failure). Progressiivisilla pettämismalleilla lasketaan laminaatin vastetta FPF-rajaa suuremmilla kuormilla tavoitteena määrittää laminaatin lopullisen pettämisen aiheuttava nk. LPF-kuorma (Last Ply Failure). Progressiivisilla pettämismalleilla voidaan myös arvioida vaurioitumisen etenemistä laminaattirakenteessa ja vaurion jälkeistä jäännöslujuutta. Progressiivisessa pettämismallissa vauriot paikallistetaan kerrostasolla, jonka jälkeen kerroksen ominaisuuksia päivitetään vauriomallien mukaisesti. Progressiivinen pettämismalli koostuu siis pääasiassa kerrostason murtokriteeristä ja pettäneen kerroksen vauriomallista. Tässä artikkelissa esitetään aluksi, kuinka vaurioituminen lasketaan murtokriteereillä. Sen jälkeen kuvataan vauriomalleja, joita käytetään kerroksen käyttäytymisen kuvaamiseen vaurioitumisen jälkeen. Murtokriteerien ja vauriomallien yhdistämisestä progressiiviseksi pettämismalliksi esitetään yksinkertainen laskenta-esimerkki, jonka jälkeen kuvataan lyhyesti viimeaikoina julkaistuja progressiivisia pettämismalleja. Lopuksi esitetään, kuinka laminaattien progressiivisia pettämismalleja voidaan soveltaa rakenneanalyysissä. Tarkastelu rajoitetaan yhdensuuntaiskerroksista muodostettuihin laminaatteihin.

MURTOKRITEERIT

Laminaattien murtokriteerit kuvaavat, milloin kerroksen pettäminen tapahtuu. Murtokriteerit perustuvat kerrosjännitysten ja kerrokselle mitattujen lujuuksien vertailuun. Jännitykset ja ljuudet esitetään kerroksen lokaalissa 12-koordinaatistossa, jossa 1-suunta yhtyy kuitujen suuntaan ja 2- suunta on kohtisuorassa kuituja vastaan.

Kerrosjännitykset voidaan laskea käyttäen klassista laminaattiteoriaa, joka on esitetty mm. lähteessä [3]. Laminaatissa kerroksen jännitystilä on tyypillisesti moniakiaalinen (kts. kuva 1). Murtokriteerien haasteena on ennustaa totuudenmukaisesti kerroksen pettäminen moniakiaalisessa jännitystilässä



X_t = kerroksen vetolujuus 1 - suunnassa

X_c = kerroksen puristuslujuus 1 - suunnassa

Y_t = kerroksen vetolujuus 2 - suunnassa

Y_c = kerroksen puristuslujuus 2 - suunnassa

S = kerroksen leikkauslujuus 12 - tasossa

Kuva 1. Kerrosjännitykset ja kerroksen ljuudet

Murtokriteerit voidaan jakaa kolmeen ryhmään. Maksimijännitys- ja maksimivenymäkriteerit ovat *riippumattomia murtokriteerejä* eli ne eivät huomioi jännityskomponenttien yhteisvaikutusta. *Interaktiiviset murtokriteerit* määrittelevät murtofunktion, joka on yhdistelmä kaikista kerroksen kokemista jännityksistä ja alkuarvoina annetuista ljuuksista. Tasojännitystapauksessa interaktiivinen murtofunktio määrittelee $(\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12})$ -avaruudessa yhtenäisen pinnan. Jos jännitystilä on pinnan sisäpuolella, ei kerroksessa tapahdu vaurioitumista. Eräs tunnetuimmista interaktiivisista murtokriteereistä on Tsai-Wu kriteeri, jonka murtofunktio yksinkertaistuu tasotapauksessa muotoon

$$\frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 = 1 \quad (1)$$

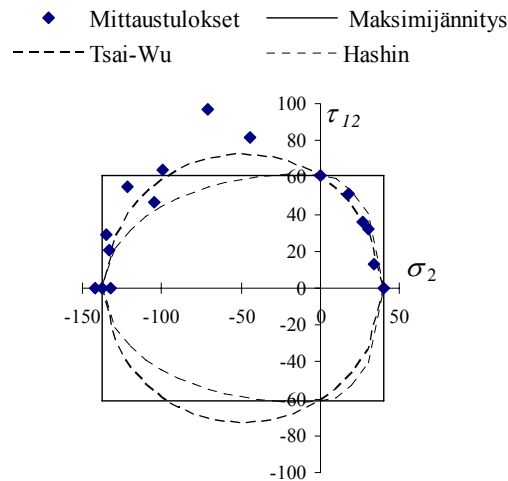
Kaavan 1 vuorovaikutuskerroin F_{12} määritetään kokeellisesti mittaamalla kerroksen ljuuus, kun siihen kohdistetaan samanaikaisesti kuormat 1- ja 2-suunnissa.

Kolmas murtokriteerityyppi on *osittain interaktiivinen ja vauriomekanismin pohjautuva*. Nämä kriteerit ovat tyypillisesti edellä mainittuja monimutkaisempia, koska ne tarvitsevat enemmän kokeita materiaalivakioiden määrittämiseksi. Ensimmäisenä kehitetty vauriomekanismin pohjautuva murtokriteeri on Hashinin kriteeri [4]. Hashinin

³ Saarela O., Airasmaa I., Kokko J., Skrifvars M., Komppa V., "Komposiittirakenteet", Muoviyhdistys ry, 2003

⁴ Hashin Z., "Failure criteria for Unidirectional Fiber Composites" Journal of Applied Mechanics,

kriteeri koostuu neljästä eri murtofunktiosta, jotka määrittelevät kuituvaurion ja matriisivaurion erikseen veto- ja puristuskuormilla. Puck [5] ja Cuntze [6] ovat nykyaikaisten vauriomekanismeihin perustuvien kriteerien pääasiallisia kehittäjiä. Murtokriteerejä voidaan vertailla laskemalla kerrokselle murtokäyrät (failure envelope). Käyrät piirretään asettamalla yksi kolmesta jännityksestä vakioksi. Kuvassa 2 on esitetty lasikuitulujitetun kerroksen murtokäyrä (σ_2, τ_{12} -tasossa ($\sigma_1 = 0$) Hashinin, Tsai-Wun ja maksimijännityskriteerin mukaisesti. Mittaustulokset ovat lähteestä [7]. Kattavampia murtokriteerien vertailuja ja yhteenvetoja on esitetty mm. lähteissä [8, 9, 11].



Kuva 2. Lasikuitulujitetun kerroksen murtokäyrä

Riippumattomat murtokriteerit, samoin kuin vauriomekanismiin pohjautuvat murtokriteerit, muodostavat murtokäyrän useasta osasta, jotka kuvaavat eri pettämismuotoja. Interaktiivisten kriteerien rajaama alue määritellään yhdellä funktiolla, jolloin kriteeri ei suoraan ilmaise pettämismuotoa.

Vol. 47, June p. 329-334, 1980

⁵ Pück A., Shürmann H., Failure Analysis of FRP Laminates by Means of Physically Based Phenomenological Models” Composites Science and Technology, Vol 58 pp. 1045-1067, 1998

⁶ Cuntze R.G., Freund A., ”The predictive capability of failure mode concept – based strength criteria for multidirectional laminates” to be published in Composites Science and Technology

⁷ Hinton M.J., Kaddour A. S., Soden P. D., ”Biaxial test results for strength and deformation of a range of E-glass and carbon fibre reinforced composite laminates: failure exercise benchmark data” Composites Science and Technology vol 62 pp. 1489-1514, 2002

⁸ ESA PSS-03-203, Structural Materials Handbook Vol 1 Polymer Composites, 1994

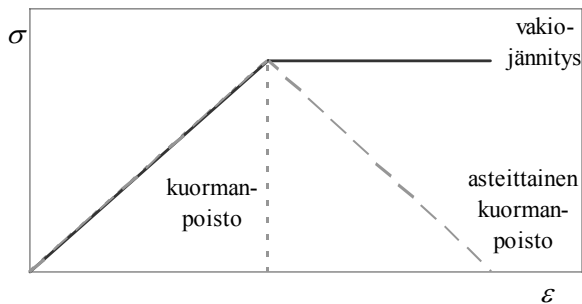
⁹ Nahas M.N., ”Survey of Failure and Post-Failure Theories of Laminated Fiber Reinforced composites” Journal of Composites Technology & Research, Vol.8, No.4 pp. 138-153, 1986

¹⁰ Soden P.D., Hinton M.J., Kaddour A.S., ”A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates”, Composites Science and Technology, Vol 58, pp. 1225-1254, 1998

¹¹ Soden P.D., Hinton M.J., Kaddour A.S., ”A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence”, Composites Science and Technology, Vol 62, pp. 1725-1797, 2002

KERROKSEN KÄYTTÄYTYMISEN MÄÄRITTELEVÄT VAURIOMALLIT

Yhdensuuntaiskerroksista muodostetulle laminaatille laskettu murtokäyrä on yleensä hyvä arvio jännityksille, jotka laminaatti kestää vaurioitta. Käyttäytyminen suuremmilla kuormituksilla määritellään vauriomalleilla, jotka määrittelevät kerroksen käyttäytymisen laminaattirakenteessa vaurioitumisen jälkeen. Vaurioitumisen vaikutukset näkyvät kerroksen kolmella jännitysvenymäkuvaajalla; kuidun suuntaisella (σ_1, ε_1)-kuvaajalla, poikittaissuuntaisella (σ_2, ε_2)-kuvaajalla ja (τ_{12}, γ_{12})-kuvaajalla. Vauriomekanismista riippuen vaurion vaikutukset näkyvät joko yhdellä tai useammalla jännitysvenymäkuvaajassa samanaikaisesti.



Kuva 3. Kerroksen käyttäytymistä kuvaavat vauriomallit

Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva kolmesta yksinkertaisimmasta vauriomallista. Kuormanpoistomalli [12] olettaa, että kerros ei murtokuormansa jälkeen kannata kyseistä kuormituskomponenttia vaan kuorma jakaantuu kokonaisuudessaan laminaatin muille kerroksille. Vakiojännitysmallissa [13] oletetaan, että kerros ei vaurioitumisen jälkeen pysty kantamaan lisäkuormaa mutta kantaa kuitenkin murtokuormansa. Asteittaisen kuormanpoiston malleissa heikkenemistä voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata lineaarisena [14].

Kuvassa 3 kerroksen käyttäytyminen on selvyden vuoksi kuvattu lineaarisena murtoon asti. Kerroksen käyttäytymistä ennen vauriota voidaan laskea myös epälineaarisenä. Tämä materiaaliepälineaarisuus johtuu matriisiaineen epälineaarisesta käyttäytymisestä ja näkyy vahvimmin (τ_{12}, γ_{12}) – kuvaajassa. Kuidun suunnassa materiaalikäyttäytyminen on tyypillisesti lineaarista murtoon asti. Oletus lineaarisesta käyttäytymisestä FPF-kuormaa pienemmillä kuormilla on yleensä hyväksyttävä, koska laminaatin käyttäytyminen määräytyy pääasiassa kuitujen mukaan. Matriisiaineen aiheuttama materiaaliepälineaarisuus tulisi selvästi erottaa vaurioitumisen aiheuttamasta

¹² Tsai S.W., Azzi V.D., "Strength of laminated composite materials" AIAA Journal Vol 4 pp. 296-301, 1966

¹³ Nahas M.N., "Survey of failure and post-failure theories of laminated fiber reinforced composites" Journal of Composites Technology & Research, Vol. 8, No. 4 pp. 138-153, 1986

¹⁴ Petit P.H., Waddoups M.E., "A method of predicting the nonlinear behavior of laminated composites" Journal of composite materials, Vol. 3, Jan. pp. 2-19, 1969

epälinearisuudesta. Vaurioitumisen aiheuttama epälinearisuus kuvataan vauriomallilla, joka vaikuttaa vasta vauriotapahtuman jälkeen.

Laminaattien kokeelliseen testaamiseen on käytettävissä kerrostason testejä ja laminaattitason testejä. Kerrostason testit suoritetaan yhdensuuntaislaminaateilla, joissa kaikki kerrokset on suunnattu samaan suuntaan. Kerrostason testit eivät sovellu vaurioitumisen aiheuttaman epälinearisuuden määrittämiseen, koska yhdensuuntaislaminaatin vaurioituminen ei vastaa kerroksen käyttäytymistä osana laminaattirakennetta, jossa kerroksia on useassa eri suunnassa. Laminaattitason testeissä mitataan laminaattitason vastetta. Kerroksen vaurioitumisen vaikutus laminaatin käyttäytymiseen on niin vähäinen, että kerrostason epälinearisuuden erottaminen laminaattitason kuormitusvasteesta voi olla hankalaa. Vauriotapahtumat voidaan mitata esim. akustisella emissiolla mutta kerroksen kuormanpoisto (vrt. kuva 3) pystytään erottamaan vain hyvin yksinkertaisista laminaateista.

LASKENTAESIMERKKI

Laskentaesimerkissä esitetään symmetrisen 8-kerroksisen $[0/45/-45/90]_{SE}$ – laminaatin jännitysvenymäkäyrän laskenta moniaksaalisessa vedossa. Laskentaesimerkin progressiivisessa pettämissä sovelletaan maksimijännityskriteeriä ja kuormanpoistomallia. Laskentavaiheet ovat:

1. Asetetaan kerroksen alkuarvot, laminaatin pinoamisjärjestys ja FPF-rajaa pienempi kuormavektori, esimerkkitarkastelussa $\{N_x, N_y, N_{xy}\} = \{2N_y, N_y, 0\}^T$ N/m
2. Lasketaan laminaatin jäykkyysmatriisit ja laminaatin venymät ε ja κ
3. Lasketaan kunkin kerroksen venymät $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}\}_k$ ja jännitykset $\{\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}\}_k$
4. Lasketaan murtofunktion f arvo kullekin kerrokselle:

$$f = \max\left(\left|\frac{\sigma_1}{X}\right|, \left|\frac{\sigma_2}{Y}\right|, \left|\frac{\tau_{12}}{S}\right|\right), \quad \begin{array}{l} \text{jos } \sigma_1 > 0 \rightarrow X = X_t \text{ muutoin } X = X_c \\ \text{jos } \sigma_2 > 0 \rightarrow Y = Y_t \text{ muutoin } Y = Y_c \end{array} \quad (2)$$

5. Jos kerrokselle $f > 1$, sovelletaan vauriomallia

$$\begin{array}{l} \text{jos } \frac{\sigma_1}{X} > 1 \rightarrow E_1 = E_2 = G_{12} = \nu_{12} = 0 \\ \text{jos } \frac{\sigma_2}{Y} > 1 \rightarrow E_2 = \nu_{12} = 0 \\ \text{jos } \frac{\tau_{12}}{S} > 1 \rightarrow E_2 = G_{12} = \nu_{12} = 0 \end{array} \quad (3)$$

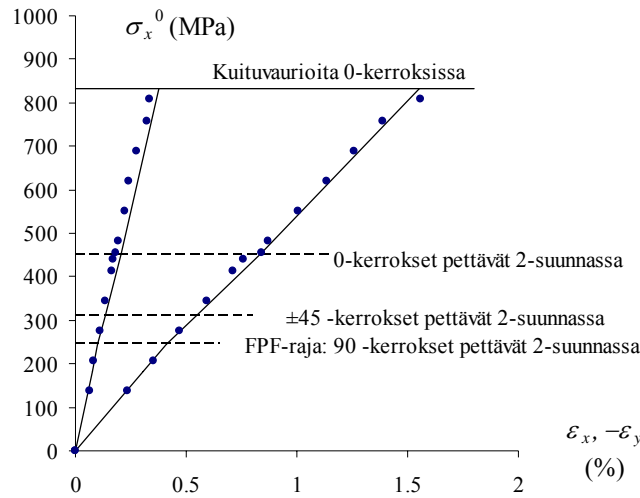
6. Kasvatetaan kuormaa ja palataan kohtaan 2

Esimerkkitehtävän laminaatti koostuu AS4/3501-6 hiilikuitu-epoksikerroksista, joiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

E_1	126	GPa
E_2	11	GPa
G_{12}	6,6	GPa
ν_{12}	0,28	
t	0,1375	mm
X_t	1950	MPa
X_c	1480	MPa
Y_t	48	MPa
Y_c	200	MPa
S	79	MPa

Taulukko 1. AS4/3501-6 kerrosominaisuudet

Kuvassa 4 on esitetty laminaatin normalisoitu jännitys σ_x eli keskimääräinen jännitys x -suunnassa venymien ε_x ja ε_y suhteen. Pisteillä esitetyt mittaustulokset ovat lähteestä [7]. Laminaatin jännitysvenymäkäyrä on liki lineaarinen, vaikka vaurioituminen alkaa jo alhaisella kuormitustasolla. Yksinkertaisella mallilla saadut tulokset vastaavat hyvin mittaustuloksia. Kuormanpoistomallia onkin käytetty menestyksekkäästi mm. lähteissä [15- 20].



Kuva 4. [0/+45/-45/90]_{SE} – laminaatin jännitysvenymäkäyrä moniakiaalikuormituksella

¹⁵ Wolfe W.E., Butalia B.S., “A strain-energy based failure criterion for non-linear analysis of composite laminates subjected to biaxial loading” Composites Science and Technology, Vol. 58, Issue 7 pp. 1107-1124, 1998

¹⁶ Sun C.T., Tao J., “Prediction of failure envelopes and stress/strain behaviour of composite laminates” Composites Science and Technology, Vol. 58, Issue 7 pp. 1125-1136, 1998

¹⁷ Padhi G.S., Shenoi R. A., Moy S. S. J., Hawkins G. L., “Progressive failure and ultimate collapse of laminated composite plates in bending” Composite Structures, Volume 40, pp. 277-291, 1998

¹⁸ Icten B.M., Karakuzu R. “Progressive failure analysis of pin-loaded carbon-epoxy woven composite plates” Composites Science and Technology, Vol 62, pp. 1259-1271, 2002

¹⁹ Spottswood S.M., Palazotto A.N., “Progressive failure analysis of composite shell” Composite structures, Vol 53, pp. 117-131, 2001

²⁰ Shokrieh M., Lessard L., “Progressive fatigue damage modeling of composite materials, Part I: Modeling” Journal of Composite Materials, Vol. 34, No. 13, 2000

ESIMERKKEJÄ JULKAISTUISTA PROGRESSIIVISISTA PETTÄMISMALLEISTA

Seuraavassa on esitelty viimevuosina julkaistuja komposiittirakenteiden progressiivisia pettämismalleja pääpiirteittäin. Pettämismallit sisältävät kuorman kriittisyyden määrittävän murtokriteerin ja vauriomekanismia vastaavan jäännösjäykkyyden määrittelyn. Osa esitetyistä malleista on ottanut osaa Sodenin ja Hintonin järjestämään WWFE-vertailuun (World Wide Failure Exercise) [21], jossa osanottajille annettiin kerrosten ominaisuudet ja heitä pyydettiin laskemaan eri laminaattien pettämiskuormia ja jännitysvenymäkäyriä. WWFE:n toisessa vaiheessa laskentatuloksia verrattiin mittaus-tuloksiin ja pettämisanalyyseistä annettiin suositus suunnittelukäyttöön.

Suunnittelukäyttöön soveltuvaksi laskentamenetelmäksi suositeltiin Puckin vauriomekanismeihin perustuvaa pettämismallia [5]. Puckin mallissa vauriomekanismit jaetaan kahteen kuituvauriomuotoon (FF Fibre Failure) ja kolmeen kerroksen sisäiseen pettämismuotoon (IFF Inter Fibre Failure). Kuituvaurioita arvioidaan maksimijännitys-kriteereillä. Kuituvaurioiden jälkeen laminaatti ei kannata enää kuormia eli kuituvauriot määräävät laminaatin lopullisen pettämisen. IFF-kriteerit kuvaavat kuidun poikittaissuunnassa tapahtuvaa pettämistä. IFF-kriteerien murtofunktiot muodostetaan laskemalla poikittaistasot, joissa Hashinin kriteeri saavuttaa maksiminsa. IFF-kriteerien osoittaessa kerroksen vaurioitumista kerroksen jäännösjäykkyydet määräytyvät siten, että murto-kriteeri saa aina arvon yksi, mikä vastaa vakiojännitysmallin periaatetta. Puckin pettämismalli ottaa huomioon myös materiaaliepälineaarisuuden.

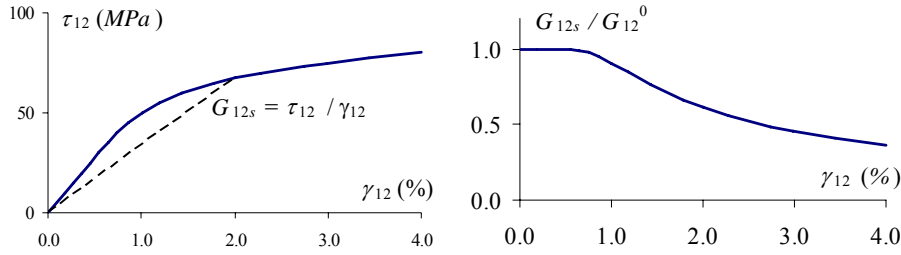
Cuntzen malli [6] on Puckin mallin kaltainen mutta eroaa Puckin mallista mm. vaurioituneen kerroksen analysoinnissa. Cuntzen mallissa IFF-vauriot vaikuttavat aina sekä $(\sigma_2, \varepsilon_2)$ -kuvaajaan että (τ_{12}, γ_{12}) -kuvaajaan, kun Puckin mallissa puristuskuormilla IFF-vauriot näkyvät vain (τ_{12}, γ_{12}) -kuvaajalla. Cuntzen mallissa jännitysvenymäkuvaajat ovat laskevia, kun Puckin malli toimii ns. vakiojännitysmallin mukaan. Cuntze on osallistunut WWFE:n jatko-osaan, jonka tulokset on julkaistu lähteessä [22].

Edgen progressiivisessa mallissa [23] on myös venymätilaan perustuva jäykkyyden heikennys. Laskennan alkutietoina ovat venymän suhteen mitatut sekanttimodulit $E_{1s}(\varepsilon_1)$, $E_{2s}(\varepsilon_2)$, $G_{12s}(\gamma_{12})$ sekä vastaavasti määritettynä $\nu_{12s}(\varepsilon_1)$. Kuvassa 5 on esitetty hiilikuitulujitetun kerroksen jännitysvenymäkäyrä ja sitä vastaava sekanttimoduli $G_{12s}(\gamma_{12})$. Laminaatin lopullisen pettämisen rajan määrää kuidunsuuntainen pettäminen maksimijännityskriteerin mukaisesti tai pettäminen leikkauksella osittain interaktiivisen murtokriteerin mukaisesti. Edgen kehittämässä epälineaarisuuksien vuorovaikutuksen huomioivassa laskennassa poikittaissuunnan eli 2-suunnan sekanttimoduli ohjaa progressiivista pettämistä siten, että liukumodulia ja Poissonin vakiota korjataan poikittaissuunnan heikkenemisen suhteessa. Poikittaissuunnan sekanttimodulikäyrät on saatu vertaamalla yhdensuuntaislaminaatin ja 0/90-kerroksista pinotun laminaatin jännitysvenymäkäyriä keskenään.

²¹ Hinton M.J., Soden P.D., "Predicting failure in composite laminates: the background to the exercise" Composites Science and Technology, Vol. 58, Issue 7 pp. 1001-1010, 1998

²² Composites Science and Technology, Volume 64, Issues 3-4, Pages 319-605 (March 2004)
"Failure criteria in fibre reinforced polymer composites Part C: Additional theories conclusions and recommendations" Edited by P. Soden, A.S Kaddour and M. Hinton

²³ Edge E.C., "Stress-based Grant-Sanders Method for predicting failure of composite laminates" Composites Science and technology, vol 58 pp. 1033-1041, 1998



Kuva 5. Hiilikuitulujitetun kerroksen jännitysvenymäkäyrä ja sekanttimoduli G_{12s}

Tsain mallissa [24] jännitykset lasketaan lineaarisina murtoon asti. Murtokriteerinä on Tsai-Wu kriteeri. Vaurioitumisen jälkeen kerroksen jäykkyydet heikennetään jäännösarvoihin:

$$E_1 = D_1 E_1^0; \quad E_2 = D_2 E_2^0; \quad G_{12} = D_6 G_{12}^0 \quad (4)$$

jossa D_i ovat kokemusperäisiä alennuskertoimia. Tsain mallissa jäännösarvo lasketaan mikromekaniikan sekoituskaavoilla (kts. lähde [3]) olettaen, että matriisiominaisuudet heikkenevät 15 prosenttiin. Kun sama kerros osoittaa toistamiseen vauriota Tsai-Wu kriteerin mukaisesti, kerroksen kaikki kimmo-ominaisuudet heikennetään 1 prosenttiin alkuperäisestä. Tsain mallissa puristuslujuutta X_c vähennetään myös päivitetyn liukumodulin suhteessa. Tsain malli oli Puckin mallin kanssa yksi parhaiten menestyneistä teorioista WWFE-vertailussa. Alennuskertoimia käytäviä malleja on julkaistu myös mm. [25-27].

Zinoviev [28] osallistui WWFE-vertailuun pettämismallilla, joka käyttää maksimijännityskriteeriä ja yksinkertaisia vauriomalleja. Kuidun suuntainen jännitysvenymäkäyttäytyminen kuvataan pettämisen jälkeen kuormanpoistomallilla ja leikkauskäyttäytyminen vakiojännitysmallilla. Poikittaissuunnan jännitysvenymäkuvaaja kuvataan vetopuolella vakiojännitysmallilla ja puristuspuolella kuormanpoistomallilla. Poikittaissuunnissa vaurioituminen asetetaan vaikuttamaan kumpaankin käyttäytymiseen samanaikaisesti. Zinovievin malli pääsi WWFE-vertailussa neljän parhaan joukkoon.

²⁴ Tsai S.W., Liu K., Kuraishi A., "A progressive quadratic failure criterion, part B" Composites Science and Technology, Vol 62 pp. 1683-1695, 2002

²⁵ Tan S.C., "Stress concentrations in laminated composites", 1994 by Technomic Publishing Company, Inc. ISBN 1-56676-077-1

²⁶ Gotsis P.K., Chamis C.C., Minnetyan L., "Application of progressive fracture analysis for predicting failure envelopes and stress-strain behaviors of composite laminate: a comparison with experimental results" Composites Science and technology, vol 62 pp. 1545-1559, 2002

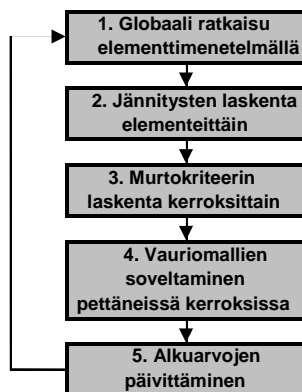
²⁷ Knight N.F., Rankin C.C., Brogan F.A., "STAGS computational procedure for progressive failure analysis of laminated composite structures" International Journal of Non-Linear Mechanics, Volume 37 pp. 833-849, 2002

²⁸ Zinoviev P., Grigoriev S., Lebedeva O., Tairova L., "The strength of multilayered composites under a plane-stress state" Composites Science and Technology, Vol 58 pp. 1209-1223, 1998

PROGRESSIIVISEN PETTÄMISMALLIN PERIAATE RAKENNE-ANALYYSISSÄ

Kaaviokuva rakennetason progressiivisesta vaurioanalyysistä on esitetty kuvassa 6. Rakenneanalyysi toteutetaan elementtimenetelmällä käyttäen joko normaaleja kuorielementtejä kuten lähteissä [17-19, ²⁹] tai tilavuuselementtejä, esim. [20]. FE-ohjelma laskee elementeittäin laminaatin kokemat globaalit venymät tai kuormitusvektorit (kohta 1), joita käytetään edelleen kerrosjännitysten laskentaan. Kerrosjännitysten laskenta (kohta 2) perustuu kuorielementeillä tyypillisesti klassiseen laminaattiteoriaan. Kerrosjännitysten kriittisyys analysoidaan elementeittäin murtokriteereillä (kohta 3) ja pettäneiden kerrosten jäykkyyksiä heikennetään vaurioituneiden elementtien alueella vauriomallien mukaisesti (kohta 4). Vaurioituneen laminaatin jäännösjäykkyys lasketaan kerrosten ominaisuuksista käyttäen uudelleen klassista laminaattiteoriaa ja elementtimallia päivitetään vastaavasti (kohta 5). Kuormien uudelleenjakautuminen analysoidaan päivitetyllä elementtimallilla (kohta 1) ja palataan takaisin kerrostason laskentaan (kohdat 2-4). Laskentaproseduuria toistetaan, kunnes rakenne on täysin pettänyt. Lopullisen pettämisen rajaksi voidaan katsoa esim. tilanne, jossa rakenne ei kykene kantamaan enää lisäkuormia tai tilanne, jossa vauriot ovat edenneet rakenteen koko leveydelle.

Laskenta voidaan toteuttaa joko laatimalla ohjelma, joka käyttää vuoroin elementti-ohjelmistoa ja laminaattien laskentaan kehitettyä ohjelmaa tai ohjelmoimalla progressiivista pettämistä kuvaava materiaalimalli FE-ohjelmaan. Oman materiaalimallien ohjelmoiminen on mahdollista ainakin ABAQUS-ohjelmistossa.



Kuva 6. Progressiivisen pettämismallin kaaviokuva

²⁹ Davila C., Damodar R., McGowan M., "Analytical prediction of damage growth in notched composite panels loaded in axial compression" proc. 40th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, St. Louis, Missouri, April 12-15, 1999

YHTEENVETO

Progressiivinen pettämissmalli koostuu kerrostason murtokriteeristä ja pettäneen kerroksen vauriomallista. Murtokriteeri määrittelee, milloin ja millä tavalla kerros vaurioituu. Vauriomallit määrittelevät pettäneen kerroksen käyttäytymisen vaurioitumisen jälkeen.

Murtokriteereistä yksinkertaisimpia ovat riippumattomat murtokriteerit kuten maksimijännityskriteeri tai maksimivienymäkriteeri. Interaktiiviset ja osittain interaktiiviset murtokriteerit huomioivat myös jännitysten vuorovaikutuksen. Vauriomallit kuvaavat kerroksen ominaisuuksia vaurioitumisen jälkeen.

Yksinkertaisuudessaan interaktiiviset murtokriteerit ja kokemusperäisiin alennuskertoimiin perustuvat vauriomallit ovat houkuttelevia. Laskentaesimerkki osoitti, että yksinkertaisellakin progressiivisella pettämissmallilla saavutetaan ainakin joissakin tapauksissa hyväksyttävä tarkkuus mittaustuloksiin nähden. Laminaatin käyttäytymisen kuvaaminen yleisessä tapauksessa vaatii tarkemman vauriomekanismeihin perustuvan pettämissmallin.

Veera Skyttä, tutkija
Olli Saarela, professori
Markus Wallin, tutkija

Teknillinen korkeakoulu, Kevytrakennetekniikan
laboratorio, PL 4300, 02015 TKK
veera.skytta@hut.fi
olli.saarela@hut.fi
markus.wallin@hut.fi