

MATKUSTAJAKONE AIRBUS A380:N OHJAINPINNAN PAINON MINIMOINTI

Olli Norja
Markus Aho

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 37
No. 2, 2004, s. 5-13

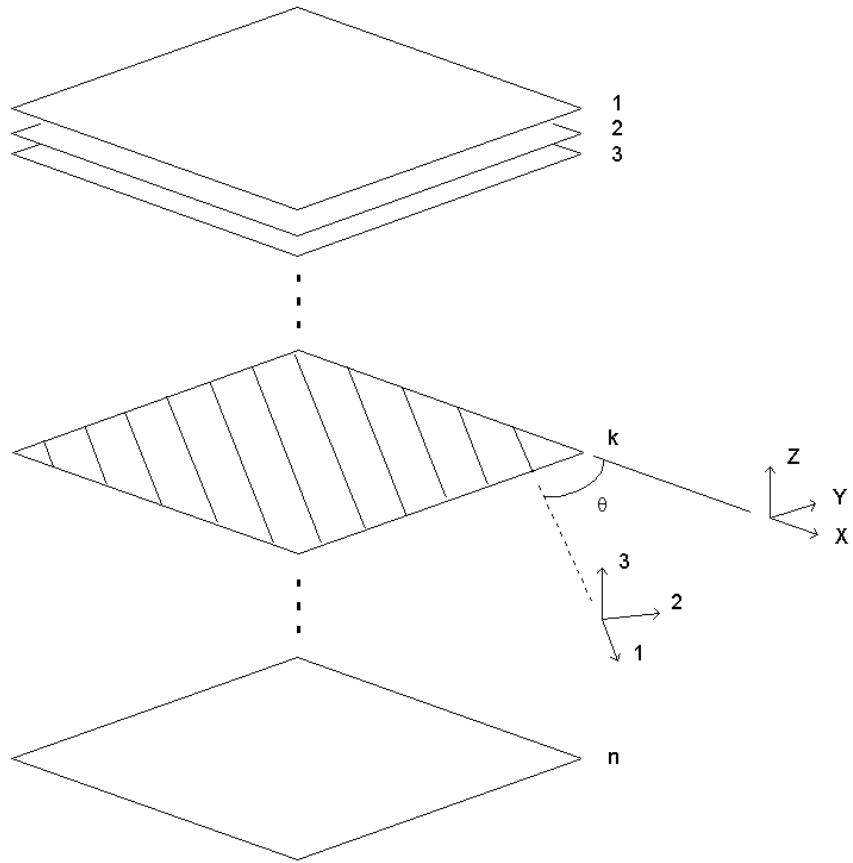
TIIVISTELMÄ

Tässä työssä on käsitelty komposiittisen laminaattirakenteen painon minimointia. Sovelluskohteena on matkustajakone Airbus A380:n ohjainpinta eli spoileri. Optimointi suoritettiin tämän tyyppisiä tehtäviä varten tehdyllä diskreetin optimoinnin algoritmilla, joka tuotti erittäin keveän alustavan rakenneratkaisun. Optimoitu rakenne ei toteuta kaikkia hiilikuitulaminaattien suunnittelun ja valmistuksen asettamia vaatimuksia, mutta sitä apuna käyttäen luotiin käytännöllisempi rakenne, joka osoittautui kilpailukykyiseksi Patria Aerostructures Oy:n (jäljempänä AST) suunnittelemaan spoileriin verrattuna. Optimoinnin soveltamisen suurin hyöty spoilerin suunnittelussa todettiin olevan ajan säästö.

HIILIKUITURAKENTEIDEN MEKANIikka

Yleisin komposiittirakenne lentokoneellisuudessa on hiilikuitulaminaatti. Se koostuu kahdesta tai useammasta hiilikuiduilla vahvistetusta hartsikerroksesta, jotka kiinnitetään toisiinsa kovettamalla ne korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Yksittäinen kerros voi olla joko usean suuntaisista kuiduista punottu kangas tai vain yhdensuuntaisia kuituja sisältävä prepreg, jonka materiaaliominaisuudet ovat voimakkaasti suuntautuneet siinä olevien hiilikuitujen mukaan. Esimerkiksi kerroksen jäykkyys kuitujen suunnassa saattaa olla yli 20-kertainen verrattuna kuituja vastaan kohtisuoraan suuntaan. Optimointiproseduuri on mielekäs kun käytetään yksisuuntaisia prepregejä, koska tällöin materiaaliominaisuudet voidaan suunnata tehokkaasti laminaatin kuormitusten mukaan.

Koska laminaatin jokaisella hiilikuitukerroksella on erilaiset materiaaliominaisuudet riippuen kerroksen orientaatiokulmasta, pitää kerroksen materiaaliominaisuudet muuntaa omasta koordinaatistostaan laminaatin koordinaatistoon (Kuva 1). Muunnoksen jälkeen voidaan muodostaa materiaaliominaisuudet koko laminaatille.



Kuva 1 Laminaatin koordinaatisto (XYZ) ja kerroksen k koordinaatisto (123).

Laminaatin konstitutiiviset yhteydet ovat hankalia lausua jännitysten ja venymien välille, koska jännitykset laminaatissa muuttuvat eri kerrosten välillä. Huomattavasti helpompaa on lausua yhteydet jännitysresultanttien ja venymien välille. Tätä varten määritellään jännitysresultantit

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} N_x & N_y & N_{xy} \end{bmatrix}^T &= \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_{xy} \end{bmatrix}^T dz \\
 \begin{bmatrix} M_x & M_y & M_{xy} \end{bmatrix}^T &= \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_y & \sigma_{xy} \end{bmatrix}^T z dz \\
 \begin{bmatrix} Q_x & Q_y \end{bmatrix}^T &= \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \tau_{xz} & \tau_{yz} \end{bmatrix}^T dz
 \end{aligned} \tag{1}$$

missä n on kerrosten lukumäärä laminaatissa ja
 z_k on kerroksen k etäisyys laminaatin yläpinnalta.

Kun näihin jännitysresultanttien lausekkeisiin sijoitetaan yksittäisen kerroksen konstitutiiviset ja kinemaattiset yhteydet, saadaan laminaatin konstitutiiviset yhtälöt, jotka voidaan osamatriisien avulla lausua seuraavassa lyhyessä muodossa

$$\begin{bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \bar{\mathbf{A}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^0 \\ \boldsymbol{\kappa}^0 \\ \boldsymbol{\gamma}^0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Osamatriisit voidaan ajatella vedon (\mathbf{A}), nurjahduksen (\mathbf{B}), taivutuksen (\mathbf{D}) ja leikkauksen ($\bar{\mathbf{A}}$) jäykkyyismatriiseiksi. Niiden alkiot saadaan seuraavien helposti muistettavien kaavojen avulla

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \\ \bar{A}_{\alpha\beta} &= k_\alpha k_\beta \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{\alpha\beta})_k (z_k - z_{k-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

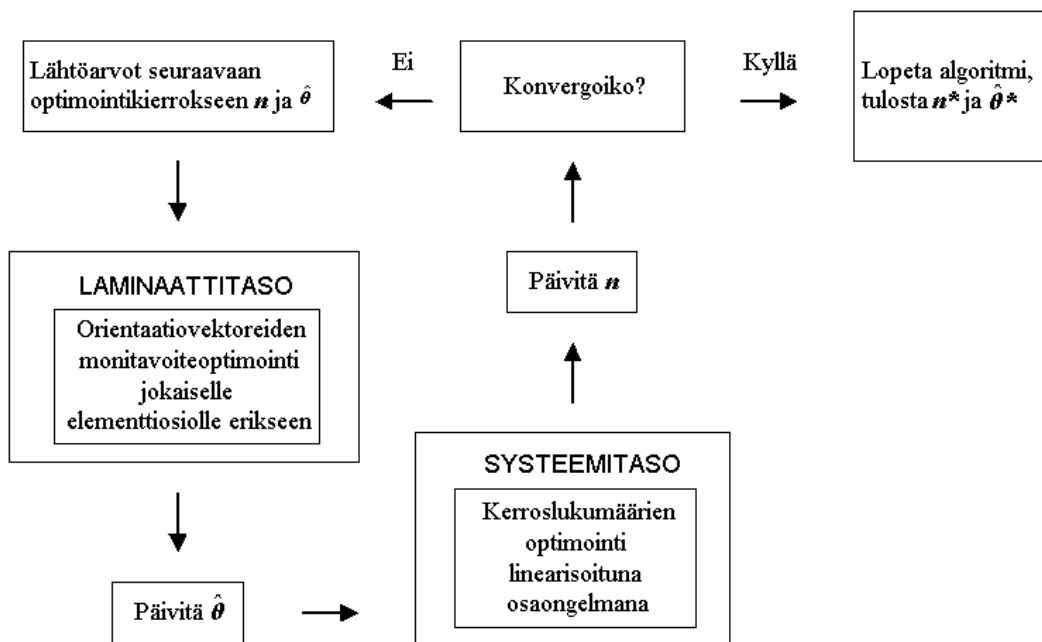
missä \bar{Q}_{ij} ovat kerroksen materiaalmatriisin alkiot käännettynä laminaatin koordinaatistoon. (Hyer 1998)

LAMINOITUJEN KOMPOSIITTIRAKENTEIDEN LAAJOJEN ONGELMIEN DISKREETTI OPTIMOINTIALGORITMI

Työssä käytettiin Markus Ahon vuonna 2003 tekemää suurten komposiittirakenteiden kuitusuuntien optimointiin tarkoitettua algoritmia. Tarkempi kuvaus löytyy tekijän väitöskirjasta (Aho 2003).

Algoritmi jakaa optimointitehtävän kahteen tasoon vähentääkseen kerralla käsiteltävien suunnittelumuuttujien määrää. Systeemitasolla optimoidaan kerrosmäärää ja laminaattitasolla kerrossuuntia. Systeemitasolla lasketaan ensin kohdefunktion ja

rajoitusehtojen arvot tarkastelupisteessä. Seuraavaksi tehdään rajoitusehdoille herkkyysanalyysi ja linearisoidaan ne, jolloin saatu lineaarinen osaongelma voidaan ratkaista BBM-algoritmilla (Branch and Bound Method, ks. Haftka & Gürdal 1992). Laminaattitasolla orientaatioiden optimoimiseen käytetään monitavoiteoptimointia (Eschenauer & Koski & Osyczka, 1990) jotta saavutetaan optimi murtumakriteerien, rakenteen potentiaalienergian sekä nurjahduksen suhteen. Menetelmää varten tehdään FEM-malli, jonka elementit jaetaan erillisiin osioihin eli laminaattialueisiin. Samaan osioon kuuluvien elementtien kuitusuuntia optimoidaan laminaattitason optimointirutiinissa (Kuva 2). Menetelmä siis tuottaa varsin akateemisen ratkaisun, jossa hiilikuitukerrokset ovat täysin toisenlaisia siirryttäessä osiolta toiselle. Tämän tyyppinen rakenne pitäisi valmistaa erillisinä osioina ja niiden liittäminen toisiinsa toisi rakenteeseen huomattavasti lisää massaa.



Kuva 2 Optimoinnin jako kahteen osaongelmaan

Algoritmi toimii rinnakkain yleiseen FEM-laskentaan tarkoitetun ohjelmiston, Abaquksen (Abaqus/Standard User's Manual, 2002) kanssa. FEM-mallia käsitellään syöttötiedostona, jota algoritmi muokkaa optimoinnin edetessä ja kutsuu Abaqusta tarvitessaan laskentapisteessä rakenteen siirtymiä ja jännityksiä. Ohjelma ei tarvitse käypää alkuarvausta, vaan etsii sellaisen itse. Sille annetaan rakenne, jossa optimoitavissa osioissa on vain yksi kerros. Käyvän alkutilan etsimisessä on kaksi vaihtoehtoa. Ensimmäisessä ja tässä työssä käytetyssä muodostetaan kvasi-isotrooppinen laminaatti, jonka kerrosmääriä skaalataan kunnes rajoitusehdot täyttyvät.

Toisessa muodostetaan ensin FSD-tyyppinen rakenne (Fully Stressed Design, Haftka & Gürdal 1992), jota vielä skaalataan niin että muutkin kuin lujuusrajoitusehdot täyttyvät.

MATKUSTAJALENTOKONE AIRBUS A380:N OHJAINPINTA

Spoilereiden käyttötarkoitus

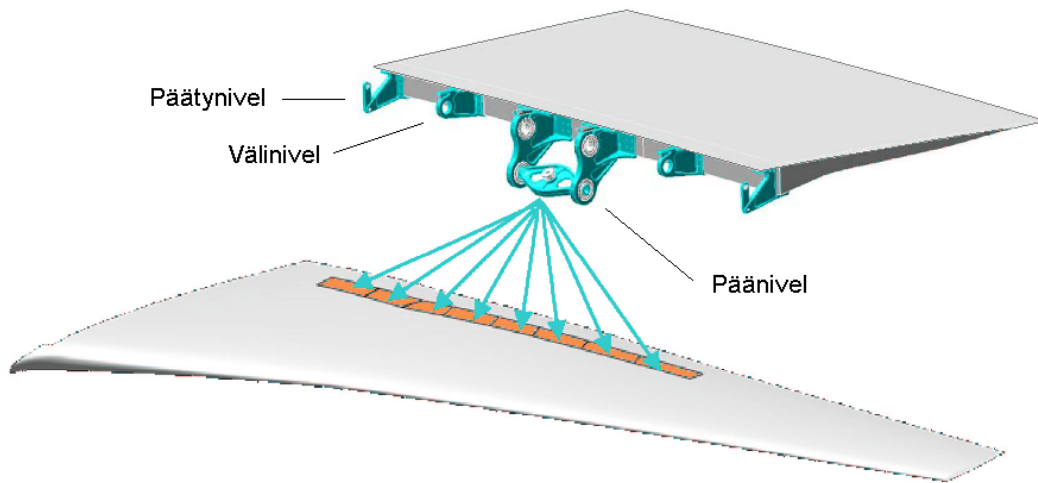
Spoileri on siiven yläpinnalla oleva nivelellinen ohjainpinta, jolla on useita lentokoneen ohjaamiseen liittyviä käyttötarkoituksia. Nopeuden vähentäminen ennen laskeutumista lienee niistä selvin, mutta lisäksi spoilerit painavat konetta alaspäin kiitorataa kohti pyörien jarruttaessa laskeutumisen jälkeen, tasaavat lentotilanteessa alhaalta tulevien puuskien nostovaikutusta sekä osallistuvat ohjaamiseen koneen kaarttaessa.

Spoilereiden rakenne

A380:ssä spoilereita on kaikkiaan kahdeksan kappaletta molemmissa siivissä (Kuva 3). Kaikki kahdeksan spoileria ovat geometrialtaan erilaisia, kokoluokka on 2 m x 1 m x 0,2 m. Spoilereiden kuormaa kantavana rakenteena on hiilikuitulaminaattikotelo, joka ympäröi kevyttä aramidikuitupaperista hunajakennoa. Laminaatti koostuu suunnatuista hiilikuitukerroksista, joiden määrä vaihtelee 5:stä 57:ään kerrokseen. Yhden hiilikuitukerroksen paksuus on 0.13 mm. Spoilerit kiinnittyvät siipeen alumiininivelillä, joista kaksi pääniveltä sijaitsee keskellä spoileria ja kahdesta neljään apuniveltä sivuilla. Laminaatin paksuus kasvaa jännitysten kasvaessa kohti niveliä. Lisäksi kuidut on suunnattu vauriokriteerianalyysin mukaan kriittisimpiin suuntiin. Näin on päästy komposiittirakenteelle ominaiseen keveään ratkaisuun, jossa paitsi materiaalia on sopivasti kuormitukseen nähden, sen lujuus- ja jäykkysominaisuudet on suunnattu oikein.

Optimointitehtävän asettelu

Optimointitehtävässä suunnittelumuuttujina ovat kerrosten lukumäärä sekä kuitusuunnat kussakin laminaattialueessa. Molemmat muuttujatyypit ovat käytännössä diskreettejä, koska myös orientaatiokulmissa halutaan yleensä helpomman valmistettavuuden vuoksi rajoittua muutamaan vaihtoehtoon.



Kuva 3 Spoilereiden sijainti lentokoneen siivessä.

Kohdefunktioksi optimointitehtävälle valittiin massa, koska se varsinkin lentokoneteollisuudessa on suurin tuotteen kannattavuuteen vaikuttava rakenteen ominaisuus. Mitä pienemmäksi massa saadaan, sitä parempi tuottavuus lentokoneella on. Laminaattirakenteen massa voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$m = \sum_{e=1}^N \rho_e A_e t_e n_e, \quad (4)$$

missä	ρ_e	on elementin materiaalin tiheys,
	A_e	on elementin pinta-ala,
	t_e	on yhden kerroksen paksuus elementin alueella,
	n_e	on kerrosten lukumäärä elementin alueella ja
	N	on elementtien lukumäärä mallissa.

Rajoitusehtoina ei ollut mahdollista käyttää AST:n mitoituskriteereitä, joten oli valittava kriteerit, joilla optimoidusta rakenteesta saadaan mahdollisimman samankaltainen AST:n spoilerirakenteen kanssa. Valittiin siirtymärajoitus, jolla rakenteiden jäykkyydet saatiin vastaaviksi sekä Tsai-Hillin vauriokriteeri (Herakovich 1998), joka estää kovin yksipuolisten orientaatioiden syntymisen optimoinnissa. Siirtymärajoitusyhtälö voidaan kirjoittaa halutulle solmulle. Optimointialgoritmeille se yleensä annetaan normeeratussa muodossa:

$$\frac{u_i}{u_{sall}} - 1 \leq 0, \quad (5)$$

missä u_i on solmun i siirtymäkomponentti ja
 u_{sall} on suurin sallittu siirtymäkomponentin arvo.

Tsai-Hillin vauriokriteeri on Hillin vauriokriteeristä erityisesti komposiittimateriaalille tehty variaatio. Tässä työssä on käytetty seuraavaa muotoa:

$$\left(\frac{\sigma_1^{ek}}{X}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1^{ek}\sigma_2^{ek}}{X^2}\right) + \left(\frac{\sigma_2^{ek}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}^{ek}}{S}\right)^2 - 1 \leq 0, \quad (6)$$

missä σ_1^{ek} on kerroksen kuitujen suuntainen normaalijännitys elementissä;
 σ_2^{ek} on kerroksen kuituja vastaan kohtisuora normaalijännitys elementissä;
 τ_{12}^{ek} on kerroksen tasoleikkausjännitys elementissä
 X on materiaalin sallittu normaalijännitys kuitujen suunnassa, suuruus voi riippua jännityksen σ_1^{ek} etumerkistä;
 Y on materiaalin sallittu normaalijännitys kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa, suuruus voi riippua jännityksen σ_2^{ek} etumerkistä ja
 S on materiaalin sallittu tasoleikkausjännitys.

Optimoinnin tulokset

Kuten seuraava taulukko kertoo (Taulukko 1), algoritmilla päästiin selvästi nykyistä kevyempään rakenteeseen. Spoilerin kokonaisuudessa on n. 5 kg pienempi kuin nykyinen spoilerirakenne. Optimoinnissa vain laminaattien massa muuttui, joten on perusteltua verrata painon muutosta nykyisen spoilerin laminaattien massaansa. Optimoidun rakenteen laminaattien massa on 24,5% pienempi kuin AST:n suunnitteleman spoilerin laminaattien massa, joten optimoinnilla saatiin erittäin hyvä tulos.

Taulukko 1 Nykyisen spoilerirakenteen sekä optimoinnin tulorakenteiden kokonaismassat

	Kokonaismassa [kg]	Laminaattien massa [kg]
Nykyinen spoileri	41,0	20,0
Optimoitu spoileri	36,1	15,1

Koska saavutettu rakenneratkaisu ei ole täysin vertailukelpoinen nykyisen spoilerirakenteen kanssa akateemisuutensa vuoksi, tehtiin toinenkin massavertailu. Vertailuun otettiin mukaan vain spoilerin ylä- ja alapinta ja niistäkin jätettiin nivelien läheisyydessä sijaitsevat pulttialueet pois. Lisäksi muodostettiin optimoinnin tulorakennetta apuna käyttäen uusi rakenne, joka on valmistettavissa ja joka toteuttaa AST:lla spoilerien mitoittamisessa käytetyn Toldom-kriteerin. Rakenteen valmistettavuus saavutettiin rikkomalla optimoimalla saatu hiilikuitukerrosten pinoamisjärjestys ja kokoamalla laminaatit uudelleen siten, että saadut laminaattikerrokset ovat yhtenäisempiä. Samalla tehtiin myös pieniä muutoksia joidenkin osioiden orientaatiokulmiin. Orientaatiokulmien järjestyksellä ei ole suurta merkitystä sandwich-rakenteessa, koska kerrosten momenttivarsille suurempi tekijä on ydinaineen paksuus kuin kerroksen etäisyys laminaatin keskipinnasta. Rakenteelle tehtiin Toldom-analyysi (Airbusin vaatima mitoitusmenetelmä, ei julkinen), jonka jälkeen laminaattiin lisättiin kerroksia siellä missä kriteeri ei toteutunut. Tätä jatkettiin kunnes kunnes Toldom-kriteeri tuli täytettyä koko tarkastelualueella. Optimoidun spoilerin massa on edellä kuvattujen toimenpiteiden jälkeen edelleen pienempi kuin todellisen spoilerin massa tarkastelualueella. Seuraava taulukko (Taulukko 2) esittää optimoinnin tulorakenteen, tulorakenteesta muokatun vertailurakenteen sekä todellisen spoilerin massan vertailualueelta. Taulukosta nähdään, että vaikka toldom-kriteeri ja laminaattikerrosten yhtenäistäminen ovat pakottaneet vertailurakenteen massan selvästi suuremmaksi kuin optimoinnin tulorakenteen massa ja vaikka vertailurakenteen alapinnan massa on jopa suurempi kuin todellisen spoilerin alapinnan massa, kokonaismassa ylä- ja alapinnalle on edelleen pienempi kuin todellisen spoilerin massa. Massansäästö optimoidun tulorakenteen ja nykyisen spoilerirakenteen välillä on 10,6 %. Vastaavasti vertailurakenteella saavutettava massansäästö on 2,1 %.

Taulukko 2 Massavertailu. Vertailualue käsittää spoilerin ylä- ja alapinnan poislukien nivelien läheisyydessä sijaitsevat pulttialueet.

	Yläpinta [kg]	Alapinta [kg]	Yhteensä [kg]
Optimoinnin tulorakenne	6,70	5,92	12,62
Vertailurakenne	7,44	6,38	13,82
Nykyinen spoilerirakenne	7,93	6,18	14,11

Yhteenveto

Työssä sovellettiin optimointia komposiittirakenteiden käytännön suunnittelutehtävään. Sovellettu optimointialgoritmi konvergoi hyvin ottaen huomioon ongelman

vaikeusasteen diskreettinä ja paljon suunnittelumuuttujia sisältävänä tehtävänä. Saavutettu rakenneratkaisu on kilpailukykyinen, koska vertailukohtana olevaan spoilerirakenteeseen oli tehty paljon suunnittelutyötä, eikä ollut odotettavaa päästä sitä kevyempään ratkaisuun. Merkittävää onkin, että ratkaisu saavutettiin nopeasti ja siksi algoritmia voidaan pitää hyvänä apuvälineenä komposiittilaminaattirakenteiden suunnittelussa.

LÄHTEET

Abaqus/Standard User's Manual, 2002. USA: Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.

Aho, M. 2003. Discrete Optimization of Large Scale Laminated Structures. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisuja 446 [96 s.]

Eschenauer, H. & Koski, J. & Osyczka, A. 1990. Multicriteria Design Optimization. Heidelberg: Springer-Verlag. [482 s.]

Haftka, R. & Gürdal, Z. 1992. Elements of Structural Optimization. 3.p. Dordrecht, Hollanti: Kluwer Academic Publishers. [481 s.]

Herakovich, C. 1998. Mechanics of Fibrous Composites. 1.p. USA: John Wiley & Sons, Inc. [460 s.]

Hyer, M.W. 1998. Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials. USA: WCB/McGraw-Hill [627 s.]

Olli Norja

Markus Aho

Patria Aeronautics Oy., Tampere, Finland

olli.norja@tut.fi

Nokia Oyj, Tampere, Finland

markus.aho@nokia.com