

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka/Lentokonetekniikka
Opinnäytetyö
Heidi Jauhiainen

Opinnäytetyö

Opetusmateriaalipohja opintojaksolle Lentokonerakenteet K-04121

Työn ohjaaja DI Simo Marjamäki
Työn tilaaja Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere 12/2009

Tekijä	Heidi Jauhiainen
Työn nimi	Opetusmateriaalipohja opintojaksolle Lentokonerakenteet K-04121
Sivumäärä	24
Valmistumisaika	18.12.2009
Työn ohjaaja	DI Simo Marjamäki
Työn tilaaja	Tampereen ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Tämän työn tarkoituksena oli käsitellä lentokonerakenteita samalla kooten pohjaa suomenkieliselle opetusmateriaalille. Kyseinen materiaali on tarkoitettu kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelmaan lentokonetekniikan suuntautumisvaihtoehdon opintojaksolle Lentokonerakenteet (K-04121). Opetusmateriaalipohjan kokoaminen oli tarpeen, koska aiheesta ei ole Tampereen ammattikorkeakoulun hallussa suomenkielistä opetusmateriaalia.

Työn tekeminen aloitettiin syyskuussa 2009 haalimalla koulun kirjastosta kaikki mahdollinen lentokonerakenteita käsittelevä materiaali sekä kaivamalla esiin syksyllä 2006 käydyn Lentokonerakenteiden opintojakson K-04121 tunneilla tehtyjä muistiinpanoja. Lähdeaineistoa läpikäydessä pohdittiin mitä kaikkea opetusmateriaaliin olisi tarpeellista koota ja samalla karsittiin aineistosta ylimääräiset teokset pois.

Työ ei onnistunut ihan siinä laajuudessa kuin oli tarkoitus, joitakin tärkeimpiä rakenteita jäi käsittelemättä, mutta se näyttää suunnan lopulliselle opetusmateriaalille.

Avainsanat opinnäytetyö, lentokonerakenteet, kuormitukset, rajoittavat tekijät, rakennevaatimukset, rakenneratkaisut, luokittelu

Writer Heidi Jauhiainen
Thesis Teaching Material Foundation for the Aircraft Structures
Course K-04121
Pages 24
Graduation time 18.12.2009
Thesis Supervisor MSc Simo Marjamäki
Co-operating Company TAMK University of Applied Sciences

ABSTRACT

The aim of this thesis is to discuss aircraft structures, and to create study material of the given subject in Finnish. This study material is intended for the course in Aeronautical Engineering (K-04121) in the Department of Mechanical and Production Engineering. There was a specific need for this thesis, as there was no information of this subject in Finnish within the TAMK University of Applied Sciences.

The work with this thesis was started at autumn 2009 by gathering of the material which deals with aircraft structures from the school's library, and by gathering notes from the Aircraft Structures Course K-04121 from autumn 2006. When the source material was gone through, every aspect of what was needed on the teaching material was thought about and at the same time everything unnecessary was eliminated.

The thesis didn't succeed as it should been, some of the most important structures were left out, but it shows the way for the final teaching material.

Keywords Thesis, aircraft structures, loads, limiting factors, structural demands, structural solutions, structural classification

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	5
2 Lentokonerakenteiden luokittelu	6
3 Rakennevaatimuksia	7
3.1 Rakenteiden kuormituksia	8
3.2 Rakenteiden rajatiloja	11
4 Rakenneratkaisuja.....	12
4.1 Siipi.....	14
4.1.1 Liikennelentokoneet	14
4.1.2 Pienet lentokoneet	17
4.1.3 Hävittäjät.....	17
4.2 Runko	18
4.2.1 Liikennelentokoneet	18
4.2.2 Pienet lentokoneet	19
4.2.3 Hävittäjät.....	19
4.3 Siipi – runko-liitos	20
4.3.1 Liikennelentokoneet	20
4.3.2 Pienet lentokoneet	20
4.4 Vakaimet	21
4.4.1 Liikennelentokoneet	21
4.4.2 Pienet lentokoneet	21
4.4.3 Hävittäjät.....	21
4.5 Ohjainpinnat ja lisänostovoimalaitteet.....	22
5 Yhteenveto	23
Lähteet	24

1 Johdanto

Tarve tämänkaltaiselle opetusmateriaalipohjalle tuli, kun Lentokonerakenteiden opintojaksoa opettanut opettaja jäi eläkkeelle ja opintojakson opetusvastuu siirtyi toiselle opettajalle. Opetusmateriaali oli aikaisemmin niin sanottua hiljaista tietoa englanninkielisten teosten ohella, joten kun kysyin opinnäytetyöaiheita koululta, tämä aihe sattui todella sopivasti kohdalleen.

Käydessäni lähdeaineistoa läpi ongelmaksi muodostui aineiston ylitarjonta ja se, miten saisin kaikesta siitä tiedosta otettua työhön mukaan juuri sen oleellisen osan. Tämä pakotti karsimaan lähdeaineiston kahteen teokseen ja omiin kyseessä olevan opintojakson muistiinpanoihin sekä työharjoittelupaikassani olleen lentoteknillisen koulutuksen luentomateriaaleihin.

Varsinainen työ alkoi siitä, kun käsiteltävät asiat ja niiden järjestys tulivat selviksi. Oli haastavaa poimia valtavasta tietomäärästä oleellinen tieto ja rakentaa ymmärrettäviä kokonaisuuksia. Opetusmateriaalin pohja onkin koottu tasapuolisesti kaikista lähteistä, eikä missään ole suoraan yhdestä lähteestä otettua materiaalia. Aihe on niin laaja, että se täytyi rajata jotenkin, ettei työstä muodostu täysin mahdotonta tehtävää.

Työssä koottu opetusmateriaalin pohja on osana tätä raporttia, puuttuvat ja muut ajatuksia herättävät asiat käydään läpi viimeisessä luvussa.

Työn pääpaino on erilaisissa rakenneratkaisuissa, joita on esitetty niin liikennelentokoneiden, pienten lentokoneiden kuin hävittäjienkin näkökulmasta. Helikoptereita ja niiden rakenteita ei käsitellä lainkaan, lukuun ottamatta joitakin viittauksia. Lisäksi työssä perehdytään lentokonerakenteiden luokitteluun, rakennevaatimukseen kuormituksineen ja rajoittavine tekijöineen. Lujuusoppia ja materiaalien ominaisuuksia on työssä esitetty sivuhuomautuksina ja taustaksi rakenteiden vaatimuksille sekä hieman muistin virkistämiseksi.

2 Lentokonerakenteiden luokittelu

Lentokonerakenteet voidaan luokitella monella tavalla, kuten vikaantumisen seurauksien, suunnittelun tai vaihdettavuuden perusteella. Sen ensisijainen luokitteluperuste on vikaantumisen seurauksien perusteella tapahtuva luokittelu. Tämän perusteella lentokonerakenteet luokitellaan kolmeen ryhmään sen mukaan, kuinka tärkeä rakenne on lentokoneen turvallisen toiminnan kannalta:

- Luokka I (primäärirakenteet): Vikaantuminen saattaa vaarantaa ihmishenkiä tai aiheuttaa merkittäviä taloudellisia vahinkoja.
- Luokka II (sekundäärirakenteet): Vikaantuminen ei vaaranna ihmishenkiä tai aiheuta merkittäviä taloudellisia vahinkoja.
- Luokka III (tertiäärirakenteet): Vikaantuminen ei aiheuta vahinkoja.

Siiven, rungon ja vakainten päärakenteet sekä laskutelineet tukirakenteineen kuuluvat primäärirakenteisiin, jotka ovat kriittisiä rakenteita lentokoneen turvallisuuden kannalta katsottuna. Voimakkaasti kuormitetut rakenteet, kuten korkeus- ja sivuperäsin, spoilerit ja siivekkeet, ovat sekundäärirakenteita, eivätkä ne aiheuta välitöntä vahinkoa vikaantuessaan. Lentokoneen toiminnan kannalta vähäpätöiset, kevyesti kuormitetut rakenteet, kuten tarkastusluukut ja erilaiset muotosuojat, ovat tertiäärirakenteita. Tästä luokittelusta riippuu rakenteen suunnittelun, valmistuksen ja kunnossapidon vaatimukset.

Toinen tapa luokitella lentokonerakenteita on niiden vaihdettavuuden perusteella. Tällöinkin jako tapahtuu kolmeen ryhmään:

- Vaihtokelpoiset (interchangeable) komponentit voidaan asentaa mihin tahansa yksikköön koneistamatta tai tekemättä muitakaan muutoksia.
- Korvattavat (replaceable) komponentit voidaan asentaa vähäisen koneistuksen jälkeen, jos se ei vahingoita eikä vääristä komponenttia tai siihen liittyviä rakenteen osia.
- Kaikki muut komponentit voidaan kokoonpanna taloudellisesti.

Kolmas tapa luokitella lentokonerakenteita on tehdä luokittelu suunnittelun periaatteiden perusteella. Tästä luokitteluperiaatteesta kerrotaan luvussa kolme, lentokonerakenteiden rajatiloissa säröytymistä käsittelevän osuuden yhteydessä.

3 Rakennevaatimuksia

Vaatimukset, joita rakenteille asetetaan, riippuvat täysin lentokoneen käyttötarkoituksesta. Sotilaskäytössä olevien koneiden käyttö on monipuolisempaa kuin siviilipuolella olevien koneiden käyttö, joten erilaisten käyttötarkoitusten mukaan lentokoneiden ominaisuuksille ja rakenteille on toisistaan hyvinkin paljon poikkeavia vaatimuksia. Myös viranomaiset on asettanut omat vaatimuksensa turvallisuudesta, ja nekin rakenteiden on täytettävä.

Lentokoneen muuttaessa lentosuuntaansa, kohdistuu siihen suurempia kuormituksia kuin tasalennossa. Esimerkkinä tästä on, että lentokoneen tehdessä kaarretta siihen kohdistuvan nostovoiman L on oltava suurempi kuin lentokoneen painon W . Siipiin kohdistuva nostovoima pyrkii taivuttamaan niitä hyvin voimakkaasti, koska koneen paino on keskittynyt runkoon. Lentokoneen käyttötarkoitus ratkaisee sen, minkälaista liikehtimiskykyä siltä vaaditaan. Suurilla liikennekoneilla suurin sallittu L/W on noin 2,0, kun taas hävittäjillä sallittu L/W -suhde voi olla liikennekoneisiin verrattuna jopa viisinkertainen. Joka tapauksessa rakenteiden on kestävä kaikki sellaiset liikehtimiskuormat, jotka niille on etukäteen määritetty.

Jos liikehtimiskyky ei ole lentokoneen toiminnan kannalta tärkeä ominaisuus, niin puuskakuormista muodostuu liikehtimiskuormia kriittisempiä. Tilanne onkin tämä liikennelentokoneiden kannalta katsottuna. Koneen täytyy kestää voimakkaiden ja äkillisten tuulenpuuskien aiheuttamat häiriöt suurellakin nopeudella lennettäessä.

Muita rakenteisiin kohdistuvia kuormia tulee esimerkiksi laskeutumisessa syntyvistä tärähdyksistä sekä mahdollisesta paineistetusta rungosta. Nämä kuormitukset eivät kertaluontoisesti rasita lentokonetta kovin paljoa, mutta pidemmällä ajalla ne väsyttävät rakenteita. Rakenteiden väsyminen on syy siihen, että lentokoneille on määritelty tarkka käyttöikä, joka tosin riippuu myös siitä, onko konetta käytetty sillä tavoin kuin mihin se on suunniteltu. Väsymisilmiöiden hallinnasta onkin tullut suunnittelulle ja käytölle tärkeämpi ilmiö kuin yksittäisistä äärikuormituksista. Koneen jäljellä oleva elinikä selviää vain jatkuvalla käytön seurannalla.

Riittävä jäykkyys on lujuusvaatimusten lisäksi rakenteelta vaadittava ominaisuus. Muodonmuutokset voivat kasvaa vaaratilanteita aiheuttaviksi, vaikka jännitykset pysyisivätkin määrätyissä rajoissa. Jos jokin rakenne, esimerkiksi perärunko, joustaa liikaa, heikkenee ohjainten tehokkuus. Suurilla lentonopeuksilla lennettäessä voi esiintyä värähtelyitä, joilla voi olla tuhoisia seurauksia joustaville rakenteille. Värähtelyjen välttäminen onkin se syy, jonka takia lentokoneille on määritelty suurin sallittu lentonopeus.

3.1 Rakenteiden kuormituksia

Lentokonerakenteita kuormittavat useat erilaiset voimat ja jännitykset. Kuormitukset, vaatimukset ja käyttö, joita rakenteiden täytyy kestää, ovat määriteltyinä käytettävyyksivaatimuksissa. Vaatimukset on jaoteltu kuuteen ryhmään: lyhytaikaiskestävyys, pitkäaikaiskestävyys, jäykkyys, värähtelyominaisuudet, rakennemateriaalit ja valmistusmenetelmät. Kuormitusten myötä lentokonerakenteilla esiintyy rajatiloja, ja tämän takia suunnittelussa täytyy ottaa huomioon lukuisia rajoittavia tekijöitä.

Lyhytaikaiskestävyys käsittää vaatimukset, jotka määritellään lentokoneen kestettävänä käyttötilanteina. Tällaisia käyttötilanteita ovat erilaiset liikehtimistilanteet, esimerkiksi kaartolento, laskeutuminen ja lentoonlähtö. Näiden lisäksi puuskaisessa säässä lentäminen määrittää omat vaatimuksensa kestävyydelle. Pahimpia kuormittajia ovat pystysuuntaiset puuskat. Viranomaisten asettamien turvallisuusvaatimuksien mukaan rakenteiden on kestettävä kaikki edellä mainitut tilanteet ilman pysyviä muodonmuutoksia, jotka haittaisivat koneen turvallista käyttöä.

Tämän lisäksi rakenteilta edellytetään lujuusreserviä, joka on määritelty suurimpien kuormien monikerralla eli varmuuskertoimella (Factor of Safety, FoS). Yleensä varmuuskerroin on 1,5, mutta viranomaisen on määritellyt erikoistapauksia, joissa edellytetään suurempaa varmuuskerrointa. Edellä mainittujen tilanteiden lisäksi lennettäessä esiintyy erikoistilanteita, kuten pakkolasku tai lintuun törmäys, jotka koneen on kestettävä vaaditulla tavalla.

Pitkäaikaiskestävyys tarkoittaa sitä, että rakenne on suunniteltu kestämaan rasituksia pitkäaikaisesti, jatkuvassa rasituksessa. Vauriosietoinen rakenne pystyy kantamaan kuormia ja toimimaan vaurioituneena. Tyypillisiä vaurioita lentokonerakenteille ovat erilaiset iskut, kuten kiven tai rakeiden iskeymät. Myös esimerkiksi paineistuskuormituksista johtuvat väsymissäröt ovat vaurioita, joita vauriosietoiset rakenteet kestävätkin tiettyyn rajaan saakka. Hyvänä huonona esimerkkinä rakenteiden väsymisestä on vuonna 1988 Aloha Airlinesin Boeing 737:lle tapahtunut rakenteen pettäminen. (www.aloha.net/~icarus/243pg2.htm 18.12.2009). Lentokoneesta löydettiin lukuisia paikkoja, joiden väsyminen johti rakenteiden pettämiseen. Ja syyksi tähän tapahtumaan selvisi operaattorin kunnossapito-ohjelman epäonnistuminen korroosiovaurioiden havaitsemisessa.



Kuvio 1. Aloha Airlinesin Boeing 737 (www.aloha.net/~icarus/243pg2.htm 18.12.2009)

Vaihtoehtona vauriosietoiselle rakenteelle on elinikärajoitettu rakenne, joka on suunniteltu kestämaan tietty aika, jonka jälkeen se poistetaan käytöstä.

Matkustajalentokoneissa rakenteet ovat pääsääntöisesti vauriosietoisia. Laskuteline on poikkeus, koska se on hyvin vaikea toteuttaa vauriosietoisena. Sotilaskoneissa taas elinikärajoitettuja rakenteita on enemmistö.

Lujuusvaatimusten lisäksi rakenteelta vaaditaan jäykkyyttä. Perusvaatimus rakenteen jäykkyydelle on, etteivät kuormitusten aiheuttamat muodonmuutokset, esimerkiksi siiven taipuma, suurene turvallisuutta haittaaviksi missään käyttötilanteessa.

Vauriosietoisen rakenteen edellytetään täyttävän jäykkyyksivaatimukset myös siinä tapauksessa että se olisi vaurioitunut todella pahasti.

Rakenteet voivat käytössä siis värähdellä. Merkittävimpiä ovat värähtelyt, jotka syntyvät, kun energia siirtyy rakenteeseen siitä ympäröivästä virtauksesta. Haitallisia värähtelyjä ei saisi missään koneen käyttötilanteessa syntyä, koska ne heikentävät lentokoneen turvallisuutta. Pahin tilanne, joka värähtelystä voi syntyä, johtaa rakenteen arvaamattomaan pettämiseen. Jäykkyyden ohella rakenteen massa ja massajakauma vaikuttavat värähtelyominaisuuksiin. On tapauksia, joissa rakenteita joudutaan tasapainottamaan lisättävillä massoilla, jotta päästään hyväksyttäviin värähtelyominaisuuksiin. Tällaisten osien korjauksissa on otettava huomioon rajoitukset, joita korjausmassan lisäämiselle on asetettu.

Kaikkien materiaalien, joita lentokonerakenteiden valmistukseen tai korjaamiseen käytetään, pitää olla lentokonekäyttöön hyväksytyjä viranomaisten vaatimusten mukaisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jokainen käytettävä materiaali täyttää sen materiaalispesifikaation vaatimukset, eli materiaali on koostumukseltaan täysin määrittelyn mukainen ja yksityiskohtaisesti määritellyn valmistustavan mukaan valmistettu. Materiaalierien erot pitää huomioida, ja jokainen käytettävä erä on testattava. Näin saadaan varmuus siitä, että ne täyttävät materiaalispesifikaation. Lentokonemateriaaleilta edellytettäviä ominaisuuksia ovat lujuus, jäykkyys sekä kyky kestää heikkenemättä lentokoneen käyttöolosuhteita. Koska rakenteilta vaaditaan keveyttä, eri materiaaleja voidaan verrata toisiinsa niiden ominaisarvojen eli tiheyteen suhteutettujen jäykkyyks- ja lujuusarvojen perusteella. Nämä arvot saadaan jakamalla kimmomoduuli E ja lujuusarvo σ materiaalin tiheydellä ρ .

Lentokonerakenteiden valmistuksen on tapahduttava tarkkojen dokumentoitujen prosessien eli valmistusspesifikaatioiden vaatimusten mukaisesti.

Valmistusspesifikaatiot koskevat sekä osavalmistusta että kokoonpanoa. Tällä tavoin toimimalla varmistetaan se, että valmistuvat tuotteet ovat mahdollisimman tasalaatuisia ja että niiden ominaisuudet tunnetaan. Muita valmistusmenetelmille asetettuja vaatimuksia ovat riittävä mittatarkkuus ja taloudellisuus.

3.2 Rakenteiden rajatiloja

Se, kuinka paljon jokin rakenne kestää tai sen on kestettävä erilaisia kuormituksia, aiheuttaa rakenteiden suunnittelulle rajoittavia tekijöitä ja näin ollen rajatiloja sille, millaisia kuormia rakenteille voi asettaa. On otettava huomioon staattinen lujuus ja elastisten muodonmuutosten sekä säröytymisen mahdollisuudet.

Staattinen lujuus otetaan huomioon kahden eri kuorman muodossa:

- Murtokuorma (ultimate load) on kuorma, joka rakenteen on kestettävä kolmen (3) sekunnin ajan murtumatta, eli rakenteen toimintakyvyn on kestettävä vähintäänkin rajoitetusti.
- Myötökuorma (yield load) on kuorma, jolla rakenteeseen tulee pysyviä muodonmuutoksia (0,2 %).

Elastiset muodonmuutokset huomioidaan rajakuorman (limit load) muodossa. Tämä on suurin mahdollinen kuorma, joka rakenteeseen saa kohdistua käytössä, eivätkä sillä syntyvät muodonmuutokset saa vaarantaa turvallisuutta.

Säröytymisen mahdollisuudet otetaan huomioon tässä suunnittelun periaatteiden perusteella tapahtuvassa luokittelussa:

- Elinikärajoitettu rakenne (safe-life structure) on suunniteltu kestämään tietty elinikä, jonka jälkeen rakenne poistetaan käytöstä. Rakenteeseen ei saa tulla havaittavia säröjä sen eliniän aikana. Tyypillisiä elinikärajoitettuja komponentteja ovat ne, joita on hankala tarkastaa, korjata tai korvata.
- Vauriosietoiset rakenteet (fail-safe/damage tolerant structure) kestävät tiettyyn rajaan saakka; säröt on pystyttävä havaitsemaan, ja ne sallitaan tiettyyn rajaan asti. Tämän seurauksena ovat muodostuneet tarkat vaatimukset tarkastuksille ja kunnossapidolle. Särön kasvuaika ja se, että rakenne vaurion ympärillä pystyy kantamaan alueelle kohdistuvat lisäkuormat täytyy huomioida. Vauriosietoisuuden oleellisena osana on, että vauriot havaitaan ennen kuin ne pääsevät kasvamaan liian suuriksi ja aiheuttamaan vaaratilanteita.

4 Rakenneratkaisuja

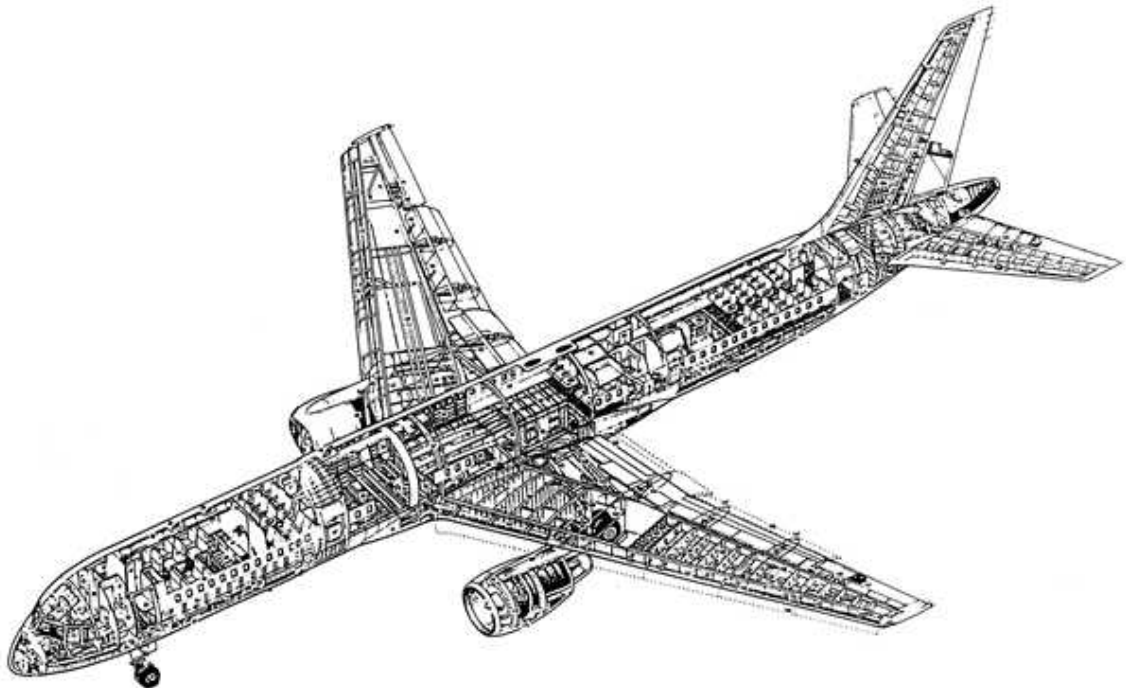
Käyttötarkoitus, koko sekä materiaalit ratkaisevat suunniteltavan lentokoneen yksityiskohtaiset rakenneratkaisut. Pääpiirteet ovat kuitenkin samat kaikissa lentokoneissa. Lentokoneet pyritään tekemään niin kevyiksi kuin mahdollista, mutta painonsäästöä rajoittavat rakenteille asetetut lujuus- ja jäykkyysvaatimukset. Myös vaatimus pienestä vastuksesta on ristiriidassa edellä mainittujen vaatimusten kanssa.

Lyhyet ja paksut muodot olisivat ihanteelliset rakennevaatimusten kannalta, kun taas aerodynamiikan kannalta katsottuna pitkät ja kapeat muodot olisivat paremmat. Kevyen ja pienen vastuksen omaavan rakenteen valmistaminen on mahdollista, mutta käytettävät erikoismateriaalit ja valmistustavat tekevät rakenteen kustannuksista niin korkeat, ettei valmistaminen kannata. Jotta lopputulos olisi paras mahdollinen, ja vaatimukset olisivat sopivassa tasapainossa, täytyy kompromissin olla vaatimusten kesken onnistunut.

Kompromissi on käytännössä toteutettavissa niin sanotulla kotelo- eli kuorirakenteella, joka kantaa pääosan koneeseen kohdistuvista kuormista. Kuorirakenteita valmistetaan, koska niistä saadaan kevyitä, rakenteellisesti tehokkaita ja ne antavat rakenteen sisään jäävän tyhjän tilan hyötykäyttöön. Tällä tavoin valmistetut rakenteet antavat koneen käyttöön ulkomittansa kantamaan taivutus- ja vääntökuormia. Tämän suuntainen ajattelu johtaa ohuisiin pintarakenteisiin, jotka lommahtavat helposti kun niihin kohdistuu pinnan suuntaista puristusta. Lommahdus tosin sallitaan, jos rakenne kokonaisuutena kestää. Siiven ja rungon pintalevyihin laitetaan jäykisteitä, jotta kokonaisuus pysyisi stabiilina. Ulkokuoren täytyy myös olla halutuilta osin siinä määrin vahvistettu, että siihen voidaan tehdä aukkoja, kuten ovia ja ikkunoita.

Puolikuorirakenteen lisäksi lentokoneissa käytettyjä rakenne-elementtejä ovat I-palkki, jota käytetään muun muassa siipisalossa, sekä integraalirakenteet, joita on mahdollista valmistaa pursottamalla, työstämällä tai komposiittirakenteina. Rakenne-elementtejä ovat myös erilaiset kiinteät tai irrotettavat liitokset, joista esimerkkinä korvake eli liitososa, joka on muotoiltu liittämistä ja irrottamista varten. Lisäksi erilaiset niitatut rakenteet, kuten pintalevy, pitkittäisjäykisteet (stringer/longeron) ja kaaret [rib (levykaari), frame (runkokaari)] luokitellaan rakenne-elementteihin.

Osakohtaisessa rakennetarkastelussa kaikkia rakenteita tarkastellaan ensin liikennelentokoneiden, pienten lentokoneiden ja hävittäjien näkökulmista. Lähtökohtana on liikennelentokone, johon näitä kahta muuta konetyyppiä verrataan. Kun joissakin osissa pätevät samat asiat, niitä ei enää uudestaan käydä läpi. Tarkastelussa on niin metallisia kuin komposiittisiakin rakenteita. Tosin komposiittien käyttö lentokonerakenteissa on vielä vähäistä, koska ne ovat edelleen jonkinlaisessa kehitysvaiheessa. Poikkeuksina mainittakoon Boeing Dream Liner B787, jonka primäärirakenteista puolet on komposiittisia (<http://www.boeing.com/commercial/787family/background.html> 17.12.2009), Airbus – yhtiön A350XWB, jossa on käytetty komposiitteja (<http://www.airbus.com/en/aircraftfamilies/a350/efficiency/by-design/fuselage/>) tai NH-90 – kuljetushelikopteri, joka on lähestulkoon kokonaan tehty komposiiteista. Myös uusissa hävittäjissä siivet on tehty komposiiteista.



Kuvio 2. Tyypillisen liikennelentokoneen rakennekuva.
(<http://physics911.net/images/boeing2.jpg> 17.12.2009)

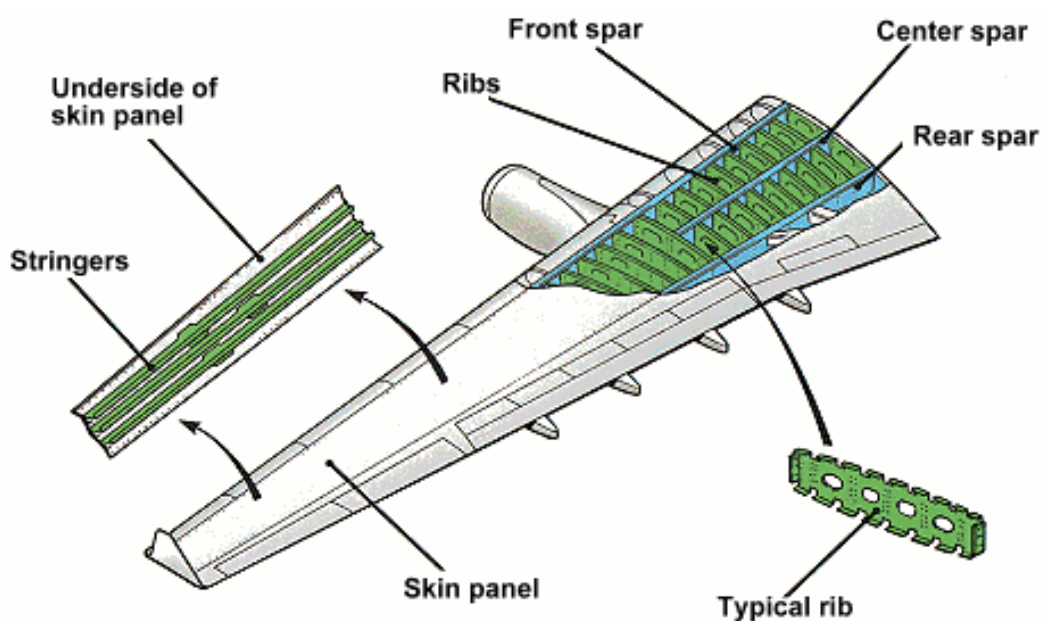
4.1 Siipi

Vaikka otsikkona on siipi, tarkastelun alla olevien konetyyppien vertailut liikennelentokoneisiin nähden käsitellään tässä osiossa kunkin otsikon alla.

4.1.1 Liikennelentokoneet

Lentokoneen siipi rakennetaan kotelorakenteena, jonka muodostavat siipisalat ja pintalevyt. Tavallisesti siipisalkoja on kaksi, etu- ja takasalot, mutta myös useampi-salkoisia siipiä on olemassa. Siiven osia ovat lisäksi siipikaaret ja pituusjäykisteet. Jokaisella siiven osalla on omat tehtävänsä:

- Siipisalko kantaa siiven taivutusta sekä toimii siiven muiden rakenneosien kiinnityskohtana.
- Siipikaaret antavat profiilille muodon ja tukevat pintalevyä. Lisäksi ne siirtävät kuormia jänteen suunnassa siipisaloille ja toimivat ulkoisten kuormien kiinnityspisteinä.
- Pituusjäykisteetkin tukevat pintalevyä ja lisäksi kantavat taivutusjännitystä.
- Pintalevyt antavat siivelle muodon, ottavat vastaan painevoimia ja kantavat taivutusta.



Kuvio 3. Tyypillinen (Airbus) liikennelentokoneen siipi.

(<http://www.sae.org/aeromag/techupdate/06-1999/06.htm> 17.12.2009)

Siipisalko on joko I- tai C-palkkimainen rakenne, jonka osia ovat uumalevy ja paarteet. Uumalevy ottaa pääosin kantaakseen siipeen kohdistuvat pystysuuntaiset leikkauskuormat, kun taas paarteiden tehtävänä on yhdessä pintalevyjen kanssa kantaa taivutusmomentti joka kuormittaa siipeä.

Siipisalolle löytyy kolme erilaista rakenteellista periaatetta:

- kokoonpantu rakenne paarteista, uumalevystä ja vahvikkeista
- osittain integraalinen rakenne
- täysin integraalinen rakenne.

Metalliset siipisalot suurilla ilma-aluksilla ovat usein Wagner-palkkeja, jotka on meistetty jäykistetyistä uumalevystä ja kahdesta paarteesta. Palkit on nimetty itävaltalaisen tiedemiehen Herbert A. Wagnerin mukaan, joka kehitti lukuisia innovaatioita aerodynamiikan ja lentokonerakenteiden aloilla. Uumalevyn lommahdus on sallittua alle rajakuorman, mutta ei polttoainetankkien alueella mahdollisten vuoto-ongelmien takia. Paarteet ovat jatkuvia, ja liitosvahvikkeet, joiden on oltava sen kokoisia, että ne pystyvät kantamaan kuormia taivutuksen ajan, tulevat uuma-alueiden yli. Toisin sanoen salko on lujitettu paikoista, joissa esiintyy korkeita keskittyneitä kuormia.

Liikennelentokoneissa siipikaaret ovat tavallisesti kohtisuorassa etu- tai takasiipisalkoa vasten, mutta ne voivat olla myös virtauksen suuntaiset. Kaarien lukumäärä ja koko on määritelty etsimällä tyydyttävä kompromissi rakenteellisen painon ja valmistuskustannusten välillä.

Kaarien välitykset huomioidaan seuraavien asioiden perusteella:

- ne jakavat korkeita paikallisia kuormia siivelle
- ne pitävät siiven muodossaan ja vakauttavat sen pintaa
- ne auttavat polttoainetankkien muotoilussa ja polttoaineen paineesta johtuvien kuormien kantamisessa
- ne ottavat osaa aerodynaamisten kuormien kantamiseen, sekä siiven taipumiseen ja vääntöön

Metallista valmistetut, korkeasti kuormitetut kaaret on koneistettu joko T- tai C-muotoon. Kevyesti kuormitetut kaaret on tavallisesti meistäetty C-muotoon. Paarteet on integroitu kaaren uumaan, koska tällä tavoin saadaan uusia mahdollisuuksia asentamiseen. Tarpeen mukaan kaariin voidaan tehdä kevennys- tai tarkastusreikiä sekä pystyvahvikkeita.

Metallisille pintapaneeleille on kolme mahdollista rakennetta:

- koneistettu integraalipinta, joka on pitkittäisjäykistetty
- niitattu pinta, joka on pitkittäisjäykistetty
- liimattu pinta, joka on pitkittäisjäykistetty.

Pitkittäisjäykisteet ovat samansuuntaisia jomman kumman siipisaloon kanssa, ja ne joko ympäröivät siipikaaret tai menevät ikään kuin kaarien läpi. Jäykisteiden lukumäärä ja koko ovat yleensä kompromissi rakenteellisen hyödyn ja valmistuskustannusten välillä. Jäykisteistä enemmistö on siiven yläpinnalla, koska sinne kohdistuu puristuskuormia. Käytetyimmät muodot pitkittäisjäykisteille ovat I-, J- ja Z-muodot.

Komposiittisia rakenneratkaisuja siivelle ovat:

- pinnat, joissa on kiinteät vahvikkeet
- integroidut C- tai T-muotoiset siipisalot, joissa on kiinteät uumavahvikkeet
- C- tai/ja T-muotoiset kaaret, joissa on kiinteät uumavahvikkeet tarpeen mukaan.

T-muotoisia siipisalkoja ja kaaria voidaan valmistaa lämpökäsittelymenetelmillä.

4.1.2 Pienet lentokoneet

Pienillä lentokoneilla ei ole niin kireät turvallisuusvaatimukset kuin liikennelentokoneilla, ja niiden rakenne on yksinkertaisempikin kaikin puolin.

Pienten koneiden metalliset siivet ovat yksinkertaistettuja versioita liikennelentokoneiden siivistä:

- Siipisalot on kokoonpantu uumalevyistä ja paarteista.
- Paarteet on pursotettu, koneistettu tai meistetty metallilevystä.
- Uumat on kevennetty ja jäykistetty kantamaan äärimmäisiä kuormia lommahtamatta.
- Yleensä käytössä on kaaria, jotka on meistetty C-muotoon.
- Pinnat ovat todella ohuita, ja ne voivat taipua jo pienillä kuormituksilla.

Komposiittiset siipirakenteet ovat tavallisesti laminaattipintalevyjä, eikä niissä tarvitse stabiloida kaaria. Laminaattirakennetta käytetään myös siipisalossa ja kaarien uumissa. Liimaus on tyypillinen tapa kokoonpanna komposiittisiipi.

4.1.3 Hävittäjät

Hävittäjät ovat pieniä kooltaan, mutta ne kantavat korkeita kuormia kokoonsa nähden. Moottorin kiinnitys keskelle runkoa tuo omat haasteensa, niin kuin tuo kokonaan irrotettava korkeusvakainkin. Hävittäjillä siedetään suuriakin vaurioita, ja yleensä ne ovat myös jollakin tavalla korjattavissa.

Hävittäjän siipi

- on monisalkoinen rakenne
- on ohut sekä pinnoiltaan että profiililtaan
- ei sisällä pitkittäisjäykisteitä
- sisältää vain muutama kaaren.

Uusimmissa hävittäjissä on komposiiteista valmistetut siivet, vanhemmissa taas metalliset tai hybridi- eli metalli/komposiittisiivet.

4.2 Runko

4.2.1 Liikennealentokoneet

Perinteinen metallinen rungon kuorirakenne käsittää kaaria ja pitkittäisjäykistettyjä pintalevyjä. Tarkoituksena on saada matkustamoon yhtenäinen tila, joten runkokaaret ovat kehämäisiä, osa niistä hyvinkin kevyitä levykaaria. Pitkittäisjäykisteet voivat niin sanotusti mennä kaarien läpi tai ympäröidä ne, aivan kuten siipirakenteessakin.

Pitkittäisjäykisteet ja kaaret on liitetty kiinnittimillä sen takia, että pinnassa vältyttäisiin suurilta paikallisilta kuormilta. Nämä kiinnittimet toimivat myös vahvikkeina kaarille ja pitkittäisjäykisteille.

Kaarien tehtävänä on:

- pitää rakenne stabiilina värinöitä vasten
- tukea rungon sisärakenteita
- jakaa keskittyneitä kuormia
- toimia särönpysäyttäjinä.

Kaaret on tavallisesti koneistettu U- tai Z-muotoon, paineseinän kaaret koneistetaan tavallisesti T-muotoon.

Pintalevyissä käytettyjen pitkittäisjäykisteiden muoto on useimmiten Z- ja hattuprofiili. Niitä voidaan valmistaa pursottamalla tai valssaamalla, ja kiinnitys tehdään joko liimaamalla tai niittaamalla. Liimattu vohvelivahvike on normaalisti käytössä kaarien ja pitkittäisjäykisteiden alla lujittamassa liitosta ja toimimassa särön estäjänä. Myös peitelevyt kaarien välissä estävät säröjä.

Rungon pintalevyjen liitoksissa käytetään vahvikkeita, jotka on muotoiltu minimoimaan jännityskeskittymiä. Ulkoisia vahvikelevyjä käytetään pitkittäisissä liitoksissa. Vahvikkeiden merkitys nousee esiin väsymisen yhteydessä, esimerkkinä jo aikaisemmin mainittu Aloha Airlinesin onnettomuus (s. 9).

Rungon sisällä on lattiapalkisto, joka tukeutuu runkokaariin. Palkiston tehtävänä on tukea lattiapaneeleita ja tuolien kiinnityskiskoja. Paineseinät täydentävät rungon kotelorakenteen, ja ne yhdessä muodostavat paineistetun tilan. Myös paineseinät ovat jäykistettyjä rakenteita, ja ne muistuttavat paineastian päätyä muodoltaan. Muita rakenne-elementtejä rungossa ovat ikkunat, tuulilasi, keulakupu ja ovet. Kaikki lasit valmistetaan monikerroksisiksi laminaattirakenteiksi vauriosietoisuuden takia. Ovet ovat rakenteellisesti kaarevia ja jäykistettyjä levyjä. Ne koostuvat pitkittäis- ja poikittaisjäykisteistä sekä pintalevystä.

4.2.2 Pienet lentokoneet

Metallinen runkorakenne on yksinkertainen kuorirakenne, joka muodostuu pinnasta, jäykisteistä ja kaarista. Komposiittinen runko taas on tyypillisesti kerroslaminaattirakenteinen. Umpilaminaattirakenteita käytetään silloin kuin se on hyödyllistä, esimerkiksi liitokoneissa. Pitkittäisjäykisteitä ei tavallisesti käytetä komposiittikuorissa, mutta kaaria tarvitaan siirtämään korkeita paikallisia kuormia rungon kuorelle.

4.2.3 Hävittäjät

Hävittäjien rungoissa käytetään perinteisiä metallirakenteita. Runkorakenne on kaikkien systeemien suuri kompromissi.



Kuvio 4. Hornet-hävittäjiä (www.mil.fi 17.12.2009)

4.3 Siipi – runko-liitos

Siiven ja rungon liitos on hyvin riippuvainen siitä, millainen lentokoneen rakenne yleensäkin on. Siiven täytyisi olla yhtenäinen rungon läpi, jotta vältettäisiin siirtämästä siiven taivutusmomenttia rungon rakenteisiin. Liitoksen täytyy pystyä siirtämään kuormituksia joka suuntaan. Yhdistäminen on suunniteltava niin, ettei suuria rasituskeskittymiä pääse syntymään.

4.3.1 Liikennelentokoneet

Siipien kiinnitykseen runkoon tarvitaan keskiosa, niin sanottu keskisiipi, johon siivet kiinnitetään käyttäen liitoslevyjä, kiinnityskorvakkeita ja vetoniittejä. Kun siipi on liitetty kokonaiseksi, se liitetään runkoon pultein ja linkein, sekä mahdollisesti myös liitoslevyjä käyttäen.

Keskisiipi katkaisee runkorakenteen, joten kölipalkki (keel beam) korvaa alemman osan rungon kuoresta. Joustavaa imukaarta, joka sallii siiven muuttua vapaasti taivutuksen aikana, käytetään siirtämään leikkausjännityksiä pitkittäiseen suuntaan. Kölipalkit ovat suurimmaksi osaksi metallista valmistettuja, mutta komposiittiset rakenteet korvaavat tässäkin rakenteessa metalliset ennen pitkää.

4.3.2 Pienet lentokoneet

Rungon läpäisee poikkipalkki, johon siipien pääsalot kiinnitetään. Siiven takasalot kiinnitetään runkokaareen. Kiinnityksinä käytetään yksinkertaisia ratkaisuja, kuten kiinnityskorvakkeita, ja niiden tarkoitus on välittää vain tietyn suuntaisia voimia.

4.4 Vakaimet

Siipien tapaan lentokoneiden korkeus- ja sivuvakaimet ovat kotelorakenteita, jotka muodostuvat samanlaisista elementeistä. Tosin rakenteena siipikotelo on verrattain monimutkaisempi kuin pienten vakainten rakenne. Jos vakaimissa käytettäisiin tihennettyä kaarivälitystä tai useampia salkoja, niin välttyttäisiin käyttämästä pitkittäisjäykisteitä.

Vakaimissa on käytetty metallia, mutta komposiittiset rakenteet alkavat vallata tätäkin aluetta.

4.4.1 Liikennelentokoneet

Metallirakenteet ovat tavallisesti kaksisalkoisia rakenteita. Rakennratkaisuina mahdollisia ovat joko kaaret ja pitkittäisjäykisteet, tai sitten tiheämpi kaarivälitys eikä jäykisteitä lainkaan.

Komposiittiset vakaimet ovat kiinteästi jäykistettyjä, ja muutenkin lämpökäsittelytekniikka mahdollistaa sellaisten paneelien valmistuksen, joihin saadaan kaaret ja jäykisteet kiinteiksi yhdellä käsittelykerralla.

Korkeusvakaimen rakenne on jatkuva läpi pyrstön ja se on saranoitu takasalosta. Sivuvakain liitetään runkokaariin.

4.4.2 Pienet lentokoneet

Kuten liikennelentokoneissa, myös pienissä koneissa on tavallisesti kaksisalkoinen rakenne vakaimissa. Tosin sivuvakain voi olla myös yksisalkoinen. Metallisissa rakenteissa voidaan pitkittäisjäykisteiden sijaan käyttää pintojen puristusupotuksia. Komposiittisissa vakaimissa on yleisesti kerroslaminaattirakenteita. Myös tällä konetyypillä korkeusvakain on yhtenevä läpi rungon, mutta etu- ja takasalot liitetään rungon kaariin tai sivuvakaimen salkoon (T-pyrstö).

4.4.3 Hävittäjät

Myös hävittäjien vakaimissa käytetään perinteisiä metallirakenteita, komposiittisia monisalkorakenteita ja kokonaisvaltaisesti hunajakennoisia rakenteita käytetään lentävissä pyrstöissä. Sivuvakaimissa on komposiittirakenteita.

4.5 Ohjainpinnat ja lisänostovoimallaitteet

Nämäkin lentokonerakenteet ovat jäykistettyjä kotelorakenteita. Ohjainpinnat ovat kiinteästi saranoituja, kun taas lisänostovoimallaitteet kiinnitetään hieman monimutkaisemmin, jonkinlaisella kisko-tyyppisellä ratkaisulla. Mikäli on tarvetta, laitteiden kiinnitys tehdään staattisesti määräämättömäksi, jolloin yhden kannatinosan rikkoutuminen ei johda koko rakenteen sortumiseen, vaan ohjainpinta tai lisänostovoimallaitte säilyy toimintakuntoisena. Jos on tarvetta tasapainottamisen, esimerkiksi värähtelyiden varalta, niin lisäpainot voidaan liittää johtoreunaan etupinnalle.

Mikäli ohjainpintojen ja lisävoimallaitteiden suunnittelu on tehty oikein, lukuisat elementit tai komposiittirakenteet ovat vauriosietoisia rakenteita.

Seuraavanlaiset rakenteet ovat yleisiä ohjainpinnoissa ja lisänostovoimallaitteissa:

- kaksisalkoiset rakenteet, joissa on tiheä kaariväli tai kerroslaminaattipinta
- monisalkoiset rakenteet
- hunajakennorakenne joko salkojen kanssa tai ilman
- hunajakennorakenteen ja onton rakenteen yhdistelmä.

Erilaisia tekniikoita käytetään ohjainpintojen erittäin terävien jättöreunojen tekemiseen:

- koneistetut pinnat
- pursotetut kiilat
- hunajakennokiilat.

5 Yhteenveto

Työ ei saavuttanut täysin sitä laajuutta kuin mitä oli tarkoitus, mutta näyttää kuitenkin suunnan lopullisen opetusmateriaalin tekemiseen. Tärkeistä rakenneratkaisuista käsittelemättä jäi muun muassa moottorin asennus ja laskutelineet, mutta tässä mainittuna ne ovat muistutuksena jatkoa ajatellen. Lentokonerakenteiden valmistustekniikasta ja laadunvarmistuksesta olisi hyvä laittaa asiaa opetusmateriaaliin, tässä työssä näitä aiheita vain sivuttiin.

Siiven ja rungon rakenteiden ominaisuuksiin voisi upota syvemmällekin, mutta se ei ollut mahdollista tässä työssä aikataulullisista syistä. Ja muutenkin kaikkia jo käsiteltyjä rakenteita olisi hyvä syventää varsinaisessa opetusmateriaalissa.

Työn tekeminen oli oikein antoisaa ja mielenkiintoista, mieleen palasi joitakin opittuja ja jo unohdettuja asioita, uuttakin oppi todella paljon asiakokonaisuuksia työstäessä, mutta kaiken kaikkiaan lentokoneen rakentaminen on täysin kompromissien tekemistä.

Lähteet

- Hoffren Jaakko & Saarela Olli 2008. Lentokonetekniikan perusteet. Helsinki: Edita Prima Oy
- Niu, Michael C. Y. 1997. Airframe structural design: practical design information and data on aircraft structures. Yhdeksäs, osin uudistettu painos. Hong Kong: Conmilit Press Ltd.
- Aalto, Heikki 2006. Lentokonerakenteet K-04121 opintojakso, oppituntien muistiinpanot. Syksy 2006. Tampereen ammattikorkeakoulu.
- Saarela, Olli 2009. Lentoteknillinen koulutus, Patria Aerostructures Oy kevät 2009. Halli, Jämsä.