

Ossi Mäkinen

**ELEKTRONIIKAN
PIIRIKORTTIVALMISTUSTEKNIIKAN
HYÖDYNTÄMINEN ILMA-ALUSTEN
KEVYTRAKENTEISSA**

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2021

TIIVISTELMÄ

Ossi Mäkinen: Elektroniikan piirikorttivalmistustekniikan hyödyntäminen ilma-alusten kevytrakenteissa

Kandidaatintyö

Tampereen Yliopisto

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2021

Työn tarkoituksena on tuottaa kirjallisuus selvitys elektroniikan piirikorttivalmistustekniikan hyödynnettävyydestä ilma-alusten kevytrakenteissa tuleviin tutkimustöihin aiheen piirissä. Työssä tarkastellaan kirjallisuuden tietoja piirilevy materiaaleista, niiden mekaanisista ominaisuuksista, niiden valmistuksesta ja käsittelystä, sekä vertaillaan niitä perinteisten lentotekniikan materiaalien kanssa. Työn osana selvitetään myös elektroniikan ja sähköisen toiminnallisuuden yhdistämistä ilma-aluksen mekaaniseen ja aerodynaamiseen rakenteeseen, sekä tällä tavalla toteutettujen rakenteiden vaikutusta ilma-aluksen käyttöikänsä ja kunnonvalvontaan.

Hyödyntämällä elektroniikan piirilevyteknikkaa ilma-alusten rakenteissa voidaan saada-vuttaa hyötyjä vähentämällä rakenteen massaa toiminnallisuuden integraation kautta, nopeuttamalla rakenteen kokoonpanoa vähentämällä työvaiheita ja parantamalla rakenteen testattavuutta, sekä laskemalla rakenteen valmistuskustannuksia käyttämällä olemassa-olevia tuotantolaitoksia ja laajan kulutusvolyymien materiaaleja.

Monet piirilevy materiaalit ovat myös ilma-alusten konstruktitekniikassa tunnettuja materiaaleja, kuten lasikuitu ja alumiini. Myös ilma-alusten kaapeloinnissa käytetty polyimidi on joustavissa piirilevyissä käytetty materiaali. Kemiallisilta ominaisuuksiltaan kaikki piirilevyteknikan materiaalit soveltuvat käyttöön ilma-alusten rakenteissa. Elektroniikan teollisuudessa näitä materiaaleja käsitellään levyinä ja niistä laminoidaan monikerrosrakenteita, joilla voidaan yhdistellä toivottuja ominaisuuksia lopputuloksena syntyvään rakenteeseen.

Edellämainituista materiaaleista ainoastaan alumiini on lentotekniikassa yleinen rakennemateriaali. Materiaalien valintaa voidaan ohjalla rakenteen muodosta ja kuormituksesta riippuvilla materiaali-indekseillä. Tarkasteltaessa piirilevyjen materiaaleja muiden ilma-alusten materiaalien kuten hiilikuitukomposiitin, titaanin ja teräksen kanssa käyttämällä eri materiaali-indeksejä, voidaan vertailla lasikuidun ja polyimidin käytettävyyttä. Piirilevyteknikan materiaalien hyödyt realisoituvat parhaiten mittakaavaltaan pienemmissä rakenteissa, kuten miehittämättömissä ilma-aluksissa.

Ilmailu on säännösteltyä toimintaa aina rakenteiden suunnittelusta niiden toteutukseen ja käyttöön asti. Piirilevytekniikan materiaalien ja teollisuuden käyttö ilma-alusten rakenteissa on mahdollista yleiseurooppalaisten ilmailusäädösten puitteissa ottamalla huomioon niiden vaatimukset suunnittelu-, valmistus- ja korjaustöissä.

Kuparisten johdinten integrointi rakenteen sisään ja sen pinnalle on merkittävä etu elektroniikan piirilevytekniikan käytössä ilma-alusten rakenteiden valmistukseen. Näillä johtimilla voidaan tavanomaisen virransyötön lisäksi toteuttaa esimerkiksi mekaanisilta mitoiltaan kriittisiä radiotaajuisia antenneja, rakenteeseen integroitua antureita ja toimi-laitteita, sekä edistää rakenteen kunnonvalvontaa. Rakenteiden korjaamisessa tulee ottaa huomioon sekä sähköiset että mekaaniset ominaisuudet, ja näiden korjauksista mahdollisesti aiheutuvat haitat toisilleen.

Avainsanat: Piirilevy, kevytrakenne, integroitu toiminnallisuus, älykäs rakenne, valmistettavuus, käytönvalvonta

ALKUSANAT

Haluan kiittää Tampereen Teknillisen Yliopiston ja Tampereen Yliopiston henkilökuntaa, kandidaatintyön ohjaajaani, sekä Auria kaikesta saamastani tuesta oppivuosieni varrella.

Tampereella, 12.5.2021

Ossi Mäkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. ELEKTRONIIKAN PIIRILEVYJEN OMINAISUUDET.....	3
2.1 Piirilevyjen materiaalit.....	3
2.1.1 Kupari.....	3
2.1.2 Lasikuitulevy.....	3
2.1.3 Polyimidilevy.....	6
2.1.4 Alumiinilevy.....	6
2.1.5 Keraamiset levyt ja PTFE-levyt.....	7
2.2 Valmistusmenetelmät.....	7
2.2.1 Piirilevyn kemiallinen työstö.....	8
2.2.2 Piirilevyn mekaaninen työstö.....	8
2.2.3 Piirilevyn laminointi ja viimeistely.....	9
2.3 Vertailu lentotekniikan materiaalien kanssa.....	9
3. PIIRILEVYTKÄÄNTEEN OSANA.....	11
3.1 Määräykset ja vaatimukset.....	11
3.2 Ilma-alusten kaapelointi.....	13
3.3 Integroitu toiminnallisuus.....	16
4. PIIRILEVYTKÄÄNTEEN HUOLLETTAVUUS.....	19
4.1 Elinikä.....	19
4.2 Kunnontarkkailu.....	20
4.3 Korjaukset.....	21
4.4 Kierrätettävyys.....	22
5. YHTEENVETO.....	23

KUVALUETTELO

<i>Kuva 1. Erilaisia lasisiirtymän muotoja.....</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 2. Lujitekuidun kulman vaikutus sen antamaan vetolujuuteen.....</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 3. Levykappaleina toteutettu siipi, ja vastaava rakenne jossa integroitua elektroniikkaa... </i>	<i>11</i>
<i>Kuva 4. Mekaniikan, elektroniikan ja aerodynamiikan yhtymäkohdat.....</i>	<i>17</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AMC	Acceptable Means of Compliance; vaatimustenmukaisuuden todentamisdokumentti
ASTM	American Society for Testing and Materials; standardisoimisjärjestö
CS	Certification Specification; ilma-alusten tyyppihyväksyntädokumentti
CTI	Comparative Tracking Index; pintavirtaindeksi
EASA	European Union Aviation Safety Agency; Euroopan Unionin lentoturvallisuusvirasto
EWIS	Electrical Wiring and Interconnect System; ilma-aluksen sähkökytkentäjärjestelmä
FR-4	Eräs palosuojatun, lasikuitu-epoksi -komposiittimateriaalisen piirilevyn luokitus
IEC	International Electrotechnical Committee; standardisoimisjärjestö
IPC	Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits; standardisoimisjärjestö
NEMA	National Electronics Manufacturers Association; standardisoimisjärjestö
Kapton	DuPontin tavaramerkki yrityksen polyimidimateriaaleille
<i>A</i>	Pinta-ala
<i>d</i>	Lujitekuidun paksuus
<i>t_c</i>	Lujitemateriaalin matriisin leikkausmyötölujuus
<i>I</i>	Virta
<i>k</i>	Johtimen sijainnista riippuva vakio
<i>l</i>	Yksittäisen kuidun pituus
<i>l_c</i>	Yksittäisen kuidun kriittinen pituus
<i>σ_r</i>	Lujitekuidun suuntainen jännitys
<i>ΔT</i>	Lämpötilaero
<i>T_d</i>	Dekomposiition lämpötila
<i>T_g</i>	Lasiirtymän lämpötila

1. JOHDANTO

Ilmailu on edelleen kasvava teknologian ala. Ilmailun rajoja ovat aiemmin rikkoneet uudet havainnot aerodynamiikasta, kasvava mekaanisten rakenteiden valmistustaito sekä kehittyvä materiaalitekniikka. Säästöt ilma-aluksen massassa kasvattavat sen suorituskykyä, mutta kasvun rajoja haetaan myös muilta osa-alueilta. Uudet ilmailun sovellukset ja laajentuva toiminnallisuus luovat uusia lokeroita ilma-aluksille.

Elektroniikka on vuosisataisen kehityksensä myötä edelleen kasvava osa ilma-alusten massasta, aina kookkaista kaupallisen ilmailun rahtikoneista pieniin harrastelennokkeihin asti. Piirilevy on vakiintunut elektroniikan valmistusmalliksi aina avaruustekniikasta kuluttajalaitteisiin. Elektroniikan teollisuus vastaa pienempien ja kevyempien laitteiden markkinoiden vaatimuksiin kasvattamalla piirilevyrakenteiden integraatiota. Mittakaavan kutistuessa elektroniikan piirilevystä onkin tullut esimerkiksi matkapuhelimen ja kannettavan tietokoneen rakenteellinen osa, joka kantaa laitteeseen kohdistuvaa mekaanista kuormitusta.

Niin ilma-alusten rakenteissa kuin elektroniikan piirilevyissäkin hyödynnetään lasikuitua ja alumiinia. Ilma-alusten johtimissa käytetty kupari ja eristemuovit ovat niin ikään myös piirilevytekniikan materiaaleja. Sekä lentotekniikassa että elektroniikassa tavoitellaan monasti samankaltaisia ominaisuuksia kuten jäykkyyttä, kestävyyttä, keveyttä ja käyttövarmuutta. Piirilevyteollisuutta voidaan mahdollisesti hyödyntää ilma-alusten valmistuksessa, joko niiden osina tai kokonaisen ilma-aluksen rakenteena.

Elektroniikan teollisuus tähtää ensisijaisesti täyttämään elektroniikan markkinoiden vaatimukset. Teollisuus on optimoitu levymäisten rakenteiden toteuttamiseen, kontrolloiduista materiaaleista tarkkojen automaattisten työstömenetelmien avulla. Materiaalien vaatimukset ovat osittain yhteneväisiä, kuten piirilevyjen kontrolloidut mekaaniset ominaisuudet, niiden käyttäytyminen lämpötilan mukaan sekä huomioitu paloturvallisuus. Piirilevyjen valmistustekniikalla on jo vuosikymmenten ajan tuotettu mitoitukseltaan tarkkoja ja toistettavia kappaleita, joiden mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet voidaan kontrolloida automaattisin testein.

Ilmailu on tiiviisti säännöstelty ala niin kansainvälisin kuin valtiollisin säädöksin, jotta ilmailu olisi turvallista ja luotettavaa. Säädökset kattavat esimerkiksi uuden ilma-aluksen suunnitteluun ja olemassaolevien ilma-alusten huoltoon liittyviä asioita. Säädökset eivät kuitenkaan suoranaisesti määrää käytettyjä materiaaleja ja menetelmiä, vaan velvoittavat todentamaan käytettyjen materiaalien ja menetelmien luotettavuuden sekä toistettavuuden.

Ilma-alusten käytössä kustannustehokkuus on olennainen, mutta vahvasti tilanteista riippuvainen tekijä. Voidaan kuitenkin olettaa, että vähentämällä kokoonpanon vaiheita ja helpottamalla rakenteen kunnonvalvontaa voidaan saavuttaa säästöjä niin valmistuksen kuin käyttökustannusten osalta. Kokoonpanon vaiheita voidaan vähentää integroimalla rakenteeseen sähköistä toiminnallisuutta, jolloin esimerkiksi kaapeleita ja toimilaitteita ei tarvitse asentaa erikseen. Käyttökustannuksia voidaan alentaa esimerkiksi rakenteen sisäisellä

kunnontarkkailulla ja mahdollisesti kevyemmällä rakenteella. On myös mahdollista käyttää olemassaolevaa teollisuutta ilma-alusten osien valmistukseen, jolloin erikoistuneita työkaluja ja työvaiheita voidaan vähentää.

Soveltuvatko elektronikan piirilevytekniikan materiaalit ilma-alusten kevytrakenteisiin? Onko piirilevymateriaalien ja sillä toteutettujen elektronikan rakenteiden käyttäytymistä tutkittu? Millaisia erityisvaatimuksia tulee ottaa huomioon suunniteltaessa kevytrakenteita piirilevytekniikalla valmistettaviksi? Työn tarkoituksena on tutkia yhtymäkohtia elektronikan piirilevytekniikan ja ilma-alusten kevytrakenteiden välillä, ja selvittää vastaukset edellämainittuihin kysymyksiin. Ensimmäisessä osassa tutkitaan kummankin tekniikan alan yhteisiä materiaaleja, ja vertaillaan niitä lentotekniikan yleisiin materiaaleihin. Seuraavaksi tarkastellaan rakenteita ja niiden toteutettavuutta piirilevytekniikan keinoin. Viimeiseksi tehdään katsaus piirilevytekniikan tarjoamiin kevytrakenteen elinkaaren hallinnan keinoihin.

2. ELEKTRONIIKAN PIIRILEVYJEN OMINAISUUDET

2.1 Piirilevyjen materiaalit

Suurin osa elektroniikan piirilevyteollisuuden materiaaleista on kehitetty ensisijaisesti täyttämään elektroniikkasovellusten vaatimukset. Osa näistä vaatimuksista, kuten juotosprosessin vaatima lämmönsieto ja ladottujen elektroniikan komponenttien vaatima jäykkyys, ovat myös ilma-alusten mekaaniselta rakenteelta toivottuja ominaisuuksia. Tässä osiossa listattuja piirilevyjen materiaaleja ovat johdinmateriaalina käytetty kupari ja piirilevyjen alustana toimivat materiaalit, kuten lasikuitu, alumiini, polyimidi, sekä muut muovit ja niistä seostetut materiaalit.

2.1.1 Kupari

Kupari on korkean sähkönjohtavuutensa vuoksi elektroniikassa eniten käytetty johdinmateriaali. Piirilevyjen johtimet valmistetaan piirilevylaminaatin pinnalle laminoidusta kuparifoliosta. Yleisesti piirilevyjen valmistuksessa käytettyjen laminaattien kuparin paksuus on 18–70 mikrometrin luokkaa. [1, s. 130]

Kupari johtaa myös hyvin lämpöä ja auttaa täten jakamaan lämpökuormaa muilta osin ei-metallisella piirilevyllä. Monelle elektroniikan komponentille pääasiallinen jäähdytyskeino on johtuminen komponentin juotosliitosten kautta kupariselle piirilevyn johtimelle. Lämmönjohtavuus voi olla myös haitaksi, jos laitteen osana on esimerkiksi lämpötilan muutoksille herkkä komponentti. Tällöin piirilevyn kupari, ja yleensä myös ylimääräinen piirilevymateriaali, poistetaan tarvittavia johtimia lukuun ottamatta lämmitettävän komponentin ympäriltä.

Kuparia käytetään eri tavoin seostettuna ja käsiteltynä sovelluksessa toivottujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Piirilevyn valmistuksessa aiemmin käytetty menetelmä oli karhentaa kupari levyyn liimattavalta puolelta adheesion parantamiseksi, mutta nykyiset liimat ja laminointimatriisit tarjoavat hyvän lujuuden ilman karhennusta. Nykyisiä materiaaleja käyttämällä kupari voidaan karhentamisen sijaan silottaa laminoitavalta puolelta korkeataajuisten sähköisten ominaisuuksien vaihtelun vähentämiseksi. [1, s. 183]

Kupari kiinnitetään lasikuituiseen piirilevyn tavallisesti laminoinnin yhteydessä laminaatin omalla liimalla. Polyimidin tapauksessa käytetään materiaaleille soveliaita liimakalvoja. Liimakalvoilla voidaan myös parantaa lasikuituisen laminaatin kanssa mekaanisia ominaisuuksia, kuten vetolujuutta, rasituskestävyyttä ja juotosliitosten kestävyyttä. [1, s. 615–677]

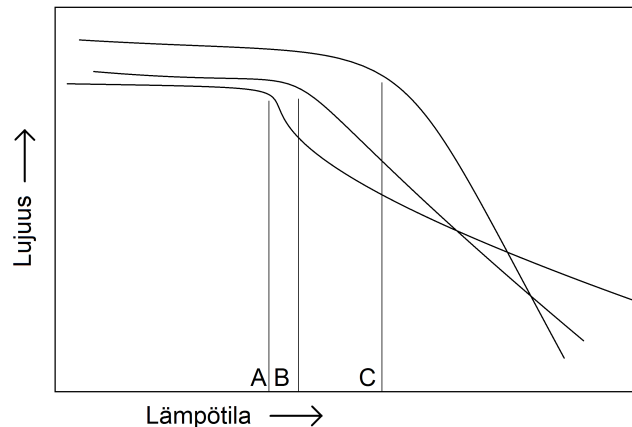
2.1.2 Lasikuitulevy

Lasikuitu on myös ilma-aluksissa laajalti käytetty rakennusmateriaali. Mekaanisiin rakenteisiin valmistettu lasikuitu luokitellaan tavallisesti joko S-lasiksi tai E-lasiksi: S-lasi (structural glass) on suunniteltu täyttämään ensisijaisesti mekaaniset vaatimukset ja E-lasi (electrical glass) ensisijaisesti sähköiset vaatimukset. S-lasi on puristus- ja vetolujuudeltaan mitattavasti E-lasia parempi materiaali, ja S-lasin kemiallinen sietokyky on myös osittain E-lasia parempi. S-lasi on valmistuskustannusten ja -volyymien puolesta kuitenkin verrattain E-lasia kalliimpi materiaali. E-lasia käytetään ilma-alusten toissijaisissa rakenteissa riittävien lujuusominaisuuksiensa puolesta edullisuutensa vuoksi. [2, s. 311]

Ylivertaisesti eniten käytetty elektroniikan piirilevymateriaali on FR-4-lasikuitulevy. FR-4 ei ole sinänsä materiaali vaan materiaalien luokitus, joka on peräisin yhdysvaltalaisen National Electrical Manufacturers Associationin (NEMA) luokituksista. FR-4-levyt valmistetaan kudotusta lasikuitukankaasta ja epoksihartsista. FR tulee sanoista flame retardant ja tarkoittaa suomeksi palonestoa tai palosuojaa. Tämän luokituksen täyttävissä materiaalissa käytettävät epoksihartsit on palosuojattu täyttämään yhdysvaltalaisen Underwriters Laboratoryn UL94 V-0 -luokituksen. UL94 V-0 -luokituksen vaatimusten mukaan palavan materiaalin tulee sammua itsestään kymmenen sekunnin sisällä ja materiaalista saa pudota vain palamattomia pisaroita. [1, s. 165–180]

FR-4-levyjen määritelmä jättää materiaalin mekaaniset ominaisuudet laajalti auki, ja valmistajat määrittelevät tarjoamiensa materiaalien mekaaniset ominaisuudet erikseen. Mekaanisiin ominaisuuksiin eniten vaikuttava tekijä on matriisina käytetyn epoksihartsin lasisiirtymän lämpötila T_g sekä dekompositiolämpötila T_d . Materiaalin lämpötilan noustessa yli T_g :n epoksihartsin lujuus laskee ja lämpötilan laskiessa alle T_g :n epoksihartsin lujuus palautuu lähes ennalleen. Lasisiirtymä ilmenee laajemman lämpötila-alueen ylitse, vaikka T_g ilmoitetaan tarkkana lukuna. [1, s. 165–166]

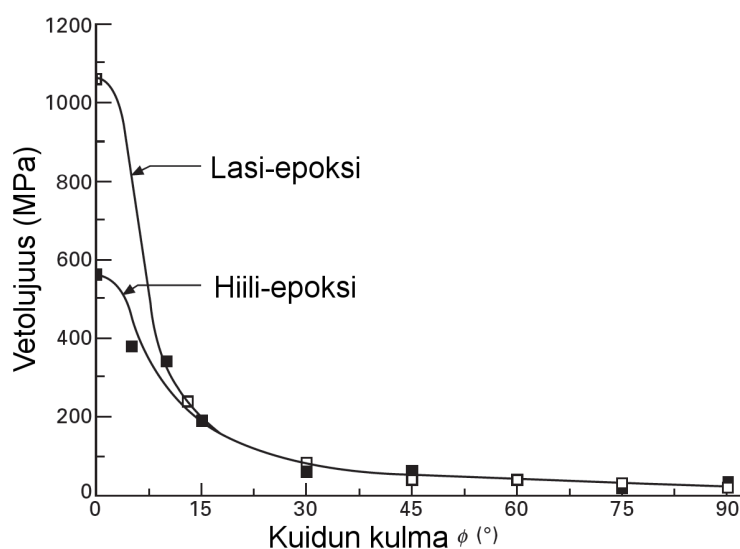
Käyrä on yleensä tätä yksittäistä lukua kuvaavampi, sillä lasisiirtymän jyrkkyys ja vaikutuksen suuruus lämpötilan suhteen riippuu materiaalista. Dekomposition nopeus riippuu vastaavasti lämpötilasta. Dekompositiolämpötilan T_d :n saavuttanut materiaali alkaa hajota, jolloin sen epoksi erkanelee osittain kaasuiksi. Tällöin materiaalin massa laskee ja sen mekaaniset ominaisuudet heikkenevät pysyvästi. [1, s. 166]



Kuva 1. Erilaisia lasisiirtymän muotoja.

Isotrooppisen materiaalin mekaaniset ominaisuudet ovat yhtäläiset jokaiseen suuntaan. Lasikuitulevy ei ole isotrooppinen materiaali, eli sen ominaisuudet vaihtelevat kuormituksen suunnan mukaan. Tämä johtuu materiaalin koostumuksesta, jossa kerrostettu lujitemateriaali antaa rakenteelle jäykkyyden ja matriisi pitää lujitekerroksia paikallaan. Kangaskerrostusten keskinäiset suunnat ja kankaan punostyypit käytännössä määrittelevät materiaalin ominaisuudet käytetyn epoksihartsin ohella. Kuidut kestävät vetoa parhaiten kuidun suuntaan, ja kankaaksi punotussa lasikuidussa kuidut pujottelevat aina jonkin verran. Tällöin kuitujen suoruus ja siitä riippuvainen vetolujuus riippuu käytetystä punostyypistä. [2, s. 317–319]

Suunnitellessa mekaanisia osia lasikuitulevystä tulee ottaa huomioon vahvikekuitujen asento ja pituus. Jo muutaman asteen muutos kuormituksen suunnassa kuidun suuntaan nähdään aiheuttaa suuren muutoksen saavutettavassa vetolujuudessa.



Kuva 2. Lujitekuidun kulman vaikutus sen antamaan vetolujuuteen.
Mukailtu lähteestä [2, s. 373].

Tämä vahvikekuidun pituus tunnetaan kriittisenä pituutena l_c . Mikäli vahvikekuidun pituus on alle kriittisen pituuden, vahvikekuidun saavuttama jännitys on matriisin leikkauslujuuden eikä vahvikekuidun murtolujuuden rajoittama. Kriittiseen pituuteen vaikuttavat vahvikemateriaalin murtolujuus σ_f , vahvikekuidun paksuus d sekä matriisin leikkausmyötölujuus τ_c .

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{2\tau_c} \quad (1)$$

Mikäli yksittäisten kuitujen pituus on paljon kriittistä pituutta suurempi ($l \gg l_c$), komposiittimateriaali voi saavuttaa jatkuvakuituisen teoreettisen lujuutensa. [2, s. 340]

Elektroniikan piirilevyteollisuuden käyttämät levymateriaalit toimitetaan yleensä valmiina laminaattilevynä, jonka lujitemateriaalin suuntaus tapahtuu levyä valmistettaessa [1, s. 153]. Yksittäisen lujitekuidun lyhyin pituus riippuu täten lujitemateriaalilevyn asennosta ja levystä leikattavan kappaleen muodosta.

Epoksipohjaisena komposiittina FR-4 on lähtökohtaisesti yhteensopivaa yleisesti ilmailussa käytettyjen polttoaineiden kanssa. Koska elektroniikan tarpeet epoksihartsien valinnassa eivät välttämättä kohtaa lentotekniikan vaatimuksia, tulee käytetyn laminaatin hartsi joka tapauksessa tarkastella erikseen kaikkien ilma-aluksessa potentiaalisesti esiintyvien aineiden ja altistumismahdollisuuden suhteen. [3, s. 361–366] Piirilevyrakenteissa olevat reiät ja läpikuparoinnit voivat tarvita erillistä tarkastelua ja lisäkäsittelyä tiiviitä rakenteita vaadittaessa [1, s. 656].

2.1.3 Polyimidilevy

Polyimidi on imidimonomeerien polymeeri. Polyimidillä on luonteenomainen oranssin-kullankeltainen väri. Sitä käytetään elektroniikassa tavallisesti joustavien piirilevyelementtien valmistamiseen. Tällä muovimateriaalilla on useita elektroniikassa toivottuja ominaisuuksia kuten korkea lämmönsieto, mekaaninen stabiilius ja hyvä kemiallinen sietokyky. Toiminnallinen lämpötila-alue polyimidistä valmistetuille komponenteille voi olla kryogeenisistä lämpötiloista yli 260 °C lämpötilaan. Lyhytaikainen lämmönsieto voi olla jopa 700 °C materiaalista riippuen. Polyimidi kokee myös lasisiirtymän materiaalista riippuvassa lämpötilassa T_g . [1, s. 144]

Ohuina kalvoina valmistettuja polyimidimateriaaleja voidaan lisäksi työstää etsauksella, joka on nopea ja taloudellinen työstömenetelmä. Elektroniikassa käytetyt polyimidimateriaalit sietävät voiteluaineita, alkoholeja, estereitä ja hiilivetyjä sekä tavanomaisia polttoaineita hyvin [1, s. 626]. Kuten FR-4-piirilevyissä, reiät ja läpikuparointi voivat tarvita erillistä käsittelyä ja tarkastelua tiiviitä rakenteita vaadittaessa.

2.1.4 Alumiinilevy

Alumiinin ominaisuuksia muokataan seostamalla sitä muiden metallien kanssa, korostamaan esimerkiksi lujuutta, valettavuutta tai korroosionsietoa. Alumiiniseokset ovat yleinen lentokoneiden ja johdinten materiaali. Alumiinin lämmön- ja sähkönjohtavuus on metallien

kesken lähes yhtä hyvä kuin kuparin. Alumiini ei johtavuutensa vuoksi sovellu sellaisenaan piirilevyn alustamateriaaliksi. Lisäämällä sähköeristekerros ennen kuparifolion laminointia tai käyttämällä eristävää liimakalvoa alumiinin ja kuparin välissä, alumiinia voidaan käyttää piirilevylaminaatin alustana. Alumiinisia piirilevyjä käytetään suurta lämmönjohtavuutta vaativissa sovelluksissa. [1, s. 103]

Ilma-alusten kaapeloinnissa käytetään kasvavassa määrin alumiinia sen keveyden vuoksi. Alumiinisten johdinten käyttö vaatii kupariin verrattuna enemmän huomiota liitosten luotettavuuden suhteen alumiinin lämpölaajenemisen ja nopean hapettumisen vuoksi, sillä alumiinin hapettuessa muodostuva alumiinioksidi on hyvä eriste. Esimerkiksi Airbus A380:n kaapeloinnissa käytetään kupari-nikkelipinnoitettuja alumiinijohtimia merkittävien massasäästöjen vuoksi. Alumiininen johdin voi painaa noin 30–60% vastaavan kuparisen johtimen massasta. [s. 35–36]

Alumiinin etuna on aiemmin esitettyjen materiaalien tapaan luontainen ilma-alusten polttoaineiden ja hydraulikkaneiteiden sietokyky [s. 215]. Jos alumiinilevy palvelee jostain muusta materiaalista valmistetun joustavan piirilevyn alustana, yhtenäinen alumiinista valmistettu alusta voi täyttää tarvittavat tiivysvaatimukset piirilevylle valmistetuista läpivienneistä ja rei'istä huolimatta.

2.1.5 Keraamiset levyt ja PTFE-levyt

Alumiinioksidista ja muista keraameista sekä muoveista, kuten PTFE ja hiilivetymuovit, valmistetut piirilevyjen pohjalevyt ovat pääasiassa mikroaaltoelektronikan materiaaleja. Näiden materiaalien mekaaniset ominaisuudet ja valmistuskustannukset vaihtelevat suuresti, ja ne ovat lähtökohtaisesti FR-4-lasikuitulaminaattia kalliimpia. PTFE-seostetut ja hiilivety-pohjaiset levyt ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan lasikuituisia heikompia niin lujuuden kuin jäykkyyden suhteen. Keraamit ovat jäykempiä, mutta niiden vetolujuus on heikko.

Näitä käytetään pääasiassa korkeataajuisissa sovelluksissa, ja siksi niitä ei tarkastella tässä työssä. Niillä voi olla sovelluksia, mikäli jossain ilma-aluksen osassa tarvitaan vaikkapa millimetriaaltoelektronikkaa.

2.2 Valmistusmenetelmät

Piirilevyprosessi on tavallisesti suunniteltu käyttämään yhtenäisestä piirilevymateriaalista valmistettuja aihioita, joissa piirilevyt kulkevat prosessin lävitse ja jotka erotellaan vasta kun tuotantoprosessi on valmis. Piirilevyaihio kulkee yleensä useamman vuorottelevan kemiallisen ja mekaanisen työstövaiheen lävitse, ennenkuin se on valmis. Monet nykyään käytetyistä piirilevyistä valmistetaan useammasta kerroksesta piirilevylaminaattia, jotka laminoidaan liimaamalla toistensa päälle. [1, s. 101–113]

Rajoituksia piirilevystä valmistettujen rakenteiden mittakaavalle asettavat työstön rajat ja valmistettujen aihoiden mittakaava. Piirilevymateriaalin valmistettavat standardikoot, esimerkiksi

1020 mm kertaa 1220 mm ja 1220 mm kertaa 2440 mm, asettavat lähtökohtaisia rajoja suurimmalle yhtenäiselle kappaleelle joka voidaan tuottaa piirilevyvalmistuksen olemassaolevaa laitteistoa ja teollisuutta käyttäen. [1, s. 656–657]

Teollisuus vastaa tarvittaessa myös suurempien kappaleiden valmistamiseen. Miehittämättömän ilma-aluksen siipirakenteen kaapelointia varten on valmistettu esimerkiksi 26 metriä pitkä, taipuisa polyimidi-piirilevy. [1]

2.2.1 Piirilevyn kemiallinen työstö

Kuparin poisto etsauksella on elektroniikan piirilevytuotannon olennainen vaihe. Etsaus on materiaalia poistavaa kemiallista työstöä. Piirilevyn valmistus tapahtuu valtaosin valmiista laminaateista, joille laminoituja yhtenäisiä kuparipintoja työstetään etsaamalla. Haluttu etsausalue rajataan maskilla, joka valmistetaan laminaatin pinnalle yleensä valoherkällä kalvolla tai muulla käytettyä etsaustapaa sietävällä menetelmällä. [1, s. 646]

Kuparin kemiallisen poiston lisäksi sitä myös lisätään levyille kemiallisesti. Johtimien valmistamiseen laminaatin lävitse käytetään useimmin läpivientejä. Nämä valmistetaan työstämällä ensin laminaatin lävitse halutut reiät ja kasvattamalla niiden sisäpinnalle kuparia sähkökemiallisella pinnoituksella. Läpiviennit voivat olla myös umpinaisia, jolloin ne valmistetaan kasvattamalla reikä umpeen tai täyttämällä se kuparitapilla. [1, s. 644]

Etsausta voidaan käyttää myös polyimidin työstämiseen, jolloin menetelmä on samanlainen. Työstöalue rajataan maskilla, joka suojaa haluttua materiaalia etsauskemikaalilta. Työstön jälkeen maski poistetaan pesulla tai liuotuksella. [1, s. 626]

2.2.2 Piirilevyn mekaaninen työstö

Piirilevyteollisuudessa käytetään enimmäkseen lastuavaa työstöä piirilevyn leikkaamisessa haluttuun kokoon ja muotoon. Piirilevyjen leikkuulaitteet ovat valtaosin tietokoneohjattuja porakoneita ja jyrsimiä. [1, s. 658]

Piirilevyjen mekaanista työstöä rajoittaa vaatimus kuljettaa piirilevy kemiallisten ja juotosprosessien läpi. Yksittäiset piirilevyt on kiinnitetty aihioon tavalla, jolla ne voidaan erotella valmiista aihioista: kapeilla silloilla jotka voidaan leikata, jyrsityillä urilla jotka voidaan taittaa, tai heikentämällä materiaalia reikäriveillä jotka voidaan murtaa. Monasti käytetty menetelmä on yhdistelmä ennaltamainittuja menetelmiä. [1, s. 658]

Mikäli tietyt alueet piirilevyllä ovat kriittisiä mekaanisten mittojen puolesta, nämä alueet on syytä jättää vapaaksi kiinnityksistä aihioon. Piirilevyn valmistukseen voidaan lisätä myös ylimääräinen työvaihe yksittäisen piirilevyn mittatarkaksi työstämiseen paneelista erottamisen jälkeen.

Piirilevyjä ei yleensä erotella aihioista ennenkuin valmistus on suoritettu loppuun komponenttien ladontaa ja juotosprosessia myöten. Ennen piirilevyjen erottelua niille tehdään monesti myös sähköinen ja visuaalinen tarkastus. Volyymistä riippuen nämä tarkastukset voivat olla automaattisia. [1, s. 1244–1245]

2.2.3 Piirilevyn laminointi ja viimeistely

Useammasta kerroksesta koostuva piirilevy kokoonpannaan liimalla laminoiden, kun yksittäisten kerrosten työstövaiheet ovat valmiit. Useampaa liimattua kerrosta koskevat työstövaiheet tehdään yksittäisten kerrosten yhtenäiseksi laminoinnin jälkeen. Kun levy on muilta osin valmis, se tavallisesti pinnoitetaan juotosmaskilla ja juotettavuutta parantavalla käsittelyllä. [1, s. 636–642]

Kerroksittain laminointi mahdollistaa vaihtelevan paksuisten rakenteiden valmistuksen laminaatista. Laminoinnissa on mahdollista käyttää myös vaihtelevia materiaaleja, mitä hyödynnetään esimerkiksi joustavia ja jäykkiä elementtejä sisältävän piirikortin valmistuksessa. Tällä tavoin voidaan valmistaa esimerkiksi useampi jäykkä lasikuituinen piirikortti, jotka ovat jo valmiiksi kytköksissä toisiinsa joustavan polyimidikerroksen ansiosta. [1, s. 290]

Laminoinnissa käytetty liima tai liimakalvo on myös merkittävässä roolissa piirilevyn korkeataajuisia ominaisuuksia tarkasteltaessa. Liima-aineen permittiivisyys ja dielektriset häviöt tulee huomioida, mikäli piirilevylaminaatilta vaaditaan mekaanisten ominaisuuksien lisäksi soveltuvuutta korkeataajuisille kytkennöille. [1, s. 203] Liima-aineelta toivotaan myös sitkeyttä. Liima-aineessa muodostuvat halkeamat voivat johtaa kuparijohdinten venymän kasvuun ja murtumiin [5, s. 11]. Tavanomaisesti adheesion parantamiseksi karhennettu kuparifolio voi olla syytä korvata karhentamattomalla tai jopa kiillotetulla kuparilla mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi, jos kuparin väsyminen tulee suorituskykyä rajoittavaksi tekijäksi. Tällöin laminaatin valmistukseen tarvitaan sileällä kuparilla riittävän adheesion tarjoavaa liima-ainetta ja laminointiprosessia. [6, s. 8–11]

Levyille painetaan tavallisesti myös grafiikkaa, tavanomaisesti silkkipainannalla. Levyille painetaan tavallisesti esimerkiksi mallinumero, revisionumero, sekä komponenttien referenssikoodit niiden ladontaa ja tunnistamista varten.

2.3 Vertailu lentotekniikan materiaalien kanssa

Piirilevymateriaaleista lasikuitu ja alumiini ovat yleisiä ilma-alusten materiaaleja. Introduction to Aerospace Materialsin mukaan materiaalien runsaudesta huolimatta ominaisuuksiltaan lentotekniikkaan soveltuvia materiaaleja on arviolta alle sata, erilaiset metalliseokset, komposiitit, polymeerit ja keraamit mukaan luettuna [2, s. 5].

Lentotekniikan materiaalivalinnassa tulee huomioida kaikki komponentille asetettavat vaatimukset. Materiaalien jäykkyys ja lujuus voidaan ilmaista myös tiheyden suhteen, ja huomioimalla sovelluksen muoto ja kuormitustapa näillä luvuilla voidaan indeksoida materiaaleja. Materiaalien ominaisuuksia voidaan näiden indeksien perusteella vertailla numeerisesti ja asetella taulukoihin. Esimerkiksi jäykkyysrajoitetun osan suunnittelussa voidaan käyttää materiaalien hyvyyden tarkasteluun massaindeksiä kimmomodulin toisessa potenssissa palkille ja kimmomodulin kolmannessa potenssissa paneelille. [2, s. 576]

Yksittäisten materiaalien ominaisuudet eroavat materiaaleille ilmoitetuista tavanomaisista

ominaisuuksista, mutta niitä voidaan käyttää alustavaan vertailuun ja haarukointiin. Seuraavassa taulukossa on vertailtu piirilevyjen materiaaleja (e-lasikuitu/epoksi, polyimidi, kupari ja alumiini) ja lentotekniikan materiaaleja (hiilikuitu/epoksi, titaani, teräs ja kuusipuu). Indekseinä käytetään tiheyden suhteen E/ρ tankokappaleille vedossa, E/ρ^2 palkeille taivutuksessa ja E/ρ^3 levyrakenteille taivutuksessa vertailtaessa jäykkyyksirajoitettuja rakenteita, sekä σ/ρ tankokappaleille vedossa ja σ/ρ^2 palkeille taivutuksessa vertailtaessa lujuusrajoitettuja rakenteita. [2, s. 579]

Taulukko 1 Materiaalien vertailua indeksien avulla. Mukailtu lähteistä [2] ja [3].

Materiaali	Tiheys (g/cm ³)	Kimmomoduli (GPa)	E/ρ (GPa m ³ /kg)	E/ρ^2 (GPa m ⁶ /kg ²) ^{*10⁶}	E/ρ^3 (GPa m ⁹ /kg ³) ^{*10⁹}	Vetolujuus (MPa)	σ/ρ (MPa m ³ /kg)	σ/ρ^2 (MPa m ⁶ /kg ²) ^{*10⁶}
Lasi-epoksi	2,1	22	0,01	4,9	2,4	600	0,29	136
Polyimidi	1,34	7,8	0,006	4,3	3,2	250	0,19	139
Kupari	8,9	133	0,015	1,7	0,2	260	0,03	3,3
Alumiini	2,7	70	0,026	9,6	3,6	525	0,22	72
Hiili-epoksi	1,7	120	0,071	42	25	700	0,41	242
Titaani	4,5	110	0,024	5,4	1,2	1000	0,19	49
Teräs	7,8	210	0,026	3,5	0,4	2000	0,25	33
Kuusipuu	0,5	12	0,022	48	96	70	0,14	280

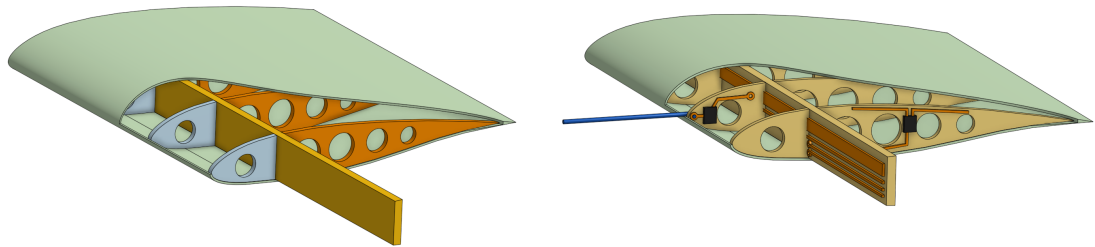
Taulukosta on nähtävissä, että hiilikuitukomposiiteilla voidaan odottaa hyvää suorituskykyä jäykkyyksirajoitetuissa rakenteissa, ja teräksillä ja titaaneilla lujuusrajoitetuissa rakenteissa. Lasikuitukomposiitit ovat kilpailukykyisiä lujuuden suhteen, mutta jäykkyys jää matalaksi verrattuna hiilikuitukomposiitteihin ja alumiiniin. Lasikuitua käytetään yleensä edullisuutensa puolesta toissijaisissa rakenteissa kuten hyttikalusteissa ja verhoilussa. [2, s. 584–589]

Kuusipuu on mukana kattavuuden vuoksi. Kuusipuu oli pitkään yleinen lentokonemateriaali, kunnes tasalaatuisemmat metallit ja keinomateriaalit syrjäyttivät sen muissa ominaisuuksissa, valmistettavuudessa, ja hankintakustannuksissa. [2, s. 21]

Polyimidin (DuPont Kapton E) ja kuparin ominaisuudet on lisätty taulukkoon Printed Circuits Handbookin tietojen pohjalta. [1, s. 1470]

3. PIIRILEVYTTÄ RAKENTEEN OSANA

Lasikuituiset piirilevyt materiaalit eivät ole tavanomainen ilma-alusten rakennemateriaali edellisen luvun lopussa mainituista syistä. Piirilevyteknikka onkin muodostunut lähes vuosisataisessa käytössä ensisijaisesti vastaamaan elektroniikan rakenteiden tarpeisiin tarjoamalla niin mekaanisilta kuin sähköisiltä ominaisuuksiltaan monimutkaisten integroitujen elektronisten rakenteiden valmistamiseen soveltuvan alustan, jonka kokoonpano on yksinkertaista ja valmistuskustannukset ovat edulliset. Piirilevyteknikan yleiset käytännöt tiedostoformaattien ja materiaalien suhteen mahdollistavat rakenteiden toteuttamisen useammalla sopimusvalmistajalla. [1, s. 377]



Kuva 3. Levykappaleina toteutettu siipi, ja vastaava rakenne jossa integroitua elektroniikkaa.

Ilma-alusten rakenteisiin voidaan integroida toiminnallisuutta piirilevyteknikan keinoin. Integroidulla toiminnallisuudella on mahdollista säästää rakenteen massaa poistamalla ylimääräisiä liitoksia, kannattimia ja eristeitä, vähentää erillisiä kokoonpanovaiheita integroinnissa, sekä kasvattaa rakenteen käyttövarmuutta sisäisen kunnontarkkailun keinoin. [7 s. 4–7] Myös piirilevyteknikalla toteutettujen ilma-alusten rakenteiden tulee kuitenkin noudattaa ilmailuun liittyviä määräyksiä ja vaatimuksia.

3.1 Määräykset ja vaatimukset

Euroopan Unionin lentoturvallisuusvirasto EASA säätelee asetuksin lentoturvallisuuteen liittyviä asioita, kuten ilma-alusten suunnittelua ja niiden valmistuksessa käytettyjä menetelmiä sekä materiaaleja. Nämä asetukset on kerätty ilma-alusten tyypeittäin CS (Certification Specification) -dokumentteihin, jotka käsittelevät ilma-alusten tyyppihyväksyntään vaadittuja ominaisuuksia, ja AMC (Acceptable Means of Compliance) -dokumentteihin, jotka käsittelevät vaatimustenmukaisuuden todentamiseen hyväksytyjä menetelmiä ja tapoja.

Vaikka jotkin materiaalit on kehitetty erityisesti ilma-aluksissa käytettäväksi, ne eivät ole ainoita materiaaleja joita ilma-aluksissa voidaan käyttää. Ilma-alusten osien materiaaleina voidaan oikeastaan käyttää mitä tahansa materiaalia, joka täyttää kyseiselle osalle asetettavat mekaaniset ja kemialliset vaatimukset. Vaikka ilma-aluksen osissa käytettäisiin ns. perinteisiä lentotekniikan materiaaleja kuten eräitä alumiiniseoksia, niistä valmistettujen osien soveltuvuus tulee silti todentaa erikseen asiaankuuluvan AMC-dokumentin vaatimalla tavalla. Piirilevyteknikassa yleisesti käytetty FR-4-materiaali luokitellaan muiden lasikuituisten

piirilevymateriaalien tapaan komposiittimateriaaleihin.

Esimerkiksi EASA:n AMC-20 -dokumentissa, General Acceptable Means of Compliance for Airworthiness of Products, Parts and Appliances, ilmoitetaan eräänä hyväksyttävänä tapana komposiittirakenteisten ilma-alusten rakenteiden lentokelpoisuuden sertifiointiin (AMC 20-29) seuraavaa menettelyä: Kaikki rakenteissa käytettävät komposiittimateriaalit ja prosessit kvalifoidaan tuottamaan toistettavia ja luotettavia suunnitteluratkaisuja riittävällä määrällä valmistuskokeita ja testejä. Kunkin komposiittimateriaalin lopullinen mekaaninen käyttäytyminen voi vaihdella suuresti riippuen valmistettujen osien tuotantomenetelmistä. [3, s. 361]

Materiaalien ja prosessien hallinnasta AMC 20-29(a) velvoittaa laatimaan määritelmät kattamaan materiaalit, niiden käsittelyn ja valmistusmenetelmät. Materiaalimäärittely on tarpeen tasalaatuisten materiaalien hankintaan, ja materiaalin laadunvalvonta tulee toteuttaa eräkohtaisin hyväksyntätarkastuksin tai statistisella prosessin kontrollilla. Koekappaleita varten käytettyjen valmistusmenetelmien tulee vastata tuotanto-osien valmistusta varten käytettyjä menetelmiä, ja sekä koekappaleiden että tuotanto-osien suunnittelussa tulee noudattaa materiaalien ja prosessien määritelmiä. Valmistusprosessien käyttöönoton ja hyväksynnän jälkeen tehtävät muutokset valmistusprosesseihin velvoittavat uuden hyväksyntämenettelyn läpikäyntiä ennen muutosten käyttöönottoa. [3, s. 361–362]

Hyväksyntävaatimusten tulee kattaa kaikki oleelliset fyysiset ja kemialliset tekijät materiaalien laadun ja käytettyjen prosessien osalta. Materiaalien hyväksyntää varten tulee olla testit koostumusta, jäykkyyttä, lujuutta, kestävyyttä ja luotettavuutta varten. Laadunvalvonnan avainparametrit tulee määritellä, ja niitä tulee seurata valmistusprosessissa. On suositeltavaa, että ilma-alusten valmistajat tekevät yhteistyötä materiaalien ja työvälineiden valmistajien kanssa vaatimusten täyttämiseksi. [3, s. 361–362]

AMC 20-29(b) mukaan valmistuksen toteutuksen suunnittelussa tulee ottaa huomioon hyväksytyjen materiaalien ja työmenetelmien määritelmien mukaiset toleranssit. Toleranssien toteutuminen tulee myös varmistaa testeillä. On syytä huomioida toleransseihin vaikuttavat olosuhteet valmistuksen yhteydessä, kuten materiaalien käsittely ja varastointiolosuhteet, vaihtoehtoiset työmenetelmät, valmistettujen osien käsittely ja tarkastus, sekä työntekijöiden koulutus. [3, s. 362–363]

AMC 20-29(c) ohjeistaa hyväksyttävien prosessien kehittämiseen liimaliitoksille niin komposiittiosille kuin metalliosille, sekä niiden välille. Hyväksyttävä liimaliitosprosessi on dokumentoitu toistettavien ja luotettavien liitosten todentamisen jälkeen, ja dokumentaatio kattaa kaikki prosessin vaiheet mukaanlukien materiaalien säilytys, liimapintojen valmistelu, liitettävien osien mittatarkkuus, liiman annostelu, liitoksen paksuuden hallinta, liitoksen puristusaine, liiman asettumisen ympäristönhallinta, valmiiden liitosten käsittely ja tarkastusmenetelmät, sekä työntekijöiden koulutus. [3, s. 363]

CS 23.573(a) mukaan millä tahansa liimaliitoksella, jonka pettäminen voisi aiheuttaa ilma-aluksen katastrofaalisen menetyksen, tulee olla riittävä kuormituskapasiteetti jonka

todentaminen suoritetaan yhdellä kolmesta tavasta. Ensimmäinen tapa on riittävän saumalujuuden määrittäminen analyysillä ja tilastollisilla menetelmillä osittaisen sauman vaurioitumisen huomioiden. Toinen tapa on tarkasteltavan liimasauman kuormittaminen kokeellisesti kriittisen kuormituksen tasolle. Kolmas tapa on toistettavalla ja luotettavalla rikkomattoman aineenkoetuksen menetelmällä suoritettu lujuuden vahvistava tarkastus jokaiselle liimasaumalle. Nämä todentamisen tavat eivät kuitenkaan poista tarvetta AMC 20-29(c) mukaisesti kehitetylle ja hyväksytylle prosessille. Liimaliitoksen pettäminen ei ole koskaan hyväksyttävä vioittumistapa, ja se vaatii vastuullisilta suunnittelijoilta välitöntä toimintaa vioittumiselle alttiiden rakenteiden tunnistamiseksi ja suunnitelmien laatimista niiden korjaamiseksi. [3, s. 363–364]

Ilmailuun liittyvien määräysten ja vaatimusten mukainen elektroniikan piirilevyteollisuuden käyttö ilma-alusten osien valmistamiseen on mahdollista noudattamalla materiaalien seuranta aina valmistajalta loppukokoonpanoon asti, toteuttamalla tarvittavat materiaalien ja työmenetelmien kokeet, sekä ottamalla kappaleiden suunnittelussa huomioon käytettävät työmenetelmät ja materiaalit.

3.2 Ilma-alusten kaapelointi

Nykyisellään ilma-alusten kaapelointia ja sähköisiä kytkentöjä käsitellään omana järjestelmänään aiheen monimutkaisuuden vuoksi. Järjestelmästä käytetään englanniksi nimeä Electrical Wiring and Interconnect System (EWIS). Dokumentin CS-25 (Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes) mukaan EWIS kattaa ilma-aluksen johtimet ja kaapelit, virransyöttötangot, liitoskohdat ja liittimet, maadoitusvälineet, johdinjatkokset sekä johdinten suojaukseen, kiinnittämiseen, ja merkintään käytetyt materiaalit, ja tiivisteet. [8, s. 213]

Piirilevyteknikalla valmistettujen komponenttien on mahdollista täyttää nykyiset ilma-aluksia koskevat EWIS -vaatimukset. CS25.1703 mukaan kunkin EWIS-komponentin tulee olla tehtäväänsä nähden tarkoituksenmukainen, ja sen materiaalit tulee valita sijoituspaikkaansa nähden minimoimaan ryömivän valokaaren (arc tracking) riski sekä tunnettu kertyvän kosteuden todennäköisyys. [8, s. 213]

Ryömivä valokaari voi syntyä, kun osittainen tai kokonainen kaaripurkaus syttyy johdinten välille vioittuneen eristeen lävitse, ja eriste hiltty kaaripurkauksen lämmöstä riittävästi muodostaakseen purkauskohtaan johtavan sillan. Tällainen purkaus voi muodostua kosteus-, paine- potentiaali- ja lämpötilaolosuhteiden ansiosta, ja ryömiä pitkin eristettä johtimen pinnalla. Erityisesti paineen vaihtelun myötä tiivistyvistä kosteudesta syttyvät purkaukset voivat luoda maan pinnalla vaikeasti toistettavia vikatilanteita. Standardissa IEC 60112 kuvaillaan testimenetelmä materiaalien luokitteluun pintavirtaindeksillä (Comparative Trackind Index, CTI), ja standardeissa ASTM D2303 sekä IEC 60587 luokitellaan eri eristemateriaaleja eroosion ja valokaarialttiuden mukaan. Nykyisissä ilma-aluksissa käytetään valokaarivikasuoja vaurioiden minimointiin, mutta ryömivää valokaarta voidaan ehkäistä ainoastaan materiaalien valinnalla ja

suunnittelulla. [9, s.3–11]

Järjestelmään liittyvää EWIS:iä tulee käsitellä osana järjestelmää, jos järjestelmä on tyyppihyväksynnän tai käyttösääntöjen vaatima. Jokainen EWIS-komponentti tulee suunnitella riittävällä fyysisellä erotuksella joko etäisyyden tai eristyksen kautta muihin EWIS-komponentteihin, jotta yksittäisen komponentin vaurio ei synnyttäisi vaaratilannetta muille komponenteille. EWIS-komponentit tulee myös erottaa samalla tavalla ilma-aluksen polttoaine-, hydraulikka- ja vesijärjestelmistä. [8, s. 215]

CS-25 velvoittaa myös ottamaan EWIS suunnittelussa huomioon erotuksen eri teholähteiden paluujohdimmilla sekä signaalikaapeleilla. Signaalikaapeleiden sijoittelussa tulee ottaa huomioon keskinäiset häiriöt, kytketyminen ja ylikuuluminen. [8, s. 214]

Elektroniikan kirjallisuuden mukaan piirilevyllä toteutettujen johdinten suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä ovat johdinten vaatima poikkipinta-ala virrantiheyteen nähden, käyttöjännitteen sanelema riittävä etäisyys johdinten välillä läpilyönnin estämiseksi, sekä johdinten korkeataajuiset ominaisuudet. On myös muita ominaisuuksia kuten piirilevylaminaatin vuotovirta sekä mittatarkkuutta vaativien osien lämpölaajeneminen. [9, s. 5-6]

Johdinten virrantiheys vaikuttaa olennaisesti piirilevyn mekaaniseen elinikään lämpenemisen kautta. Piirilevyn lämpeneminen vaikuttaa myös levyllä kokoonpantujen elektroniikan komponenttien elinikään. On olemassa erilaisia piirilevyn johdinten suunnittelun ohjenuorana toimivia standardeja kuten IPC-2221, joissa on taulukoitu ohjearvoja johdinten koolle riippuen johtimen sijainnista ja käyttötiheydestä [1, s. 616–630] Lujitemuovisen ilma-aluksen rakenteen suunnittelussa tulee ottaa huomioon lasisiirtymästä aiheutuva mekaanisten ominaisuuksien heikkeneminen, joko koko rakenteessa tai paikallisesti [10, s. 43–44]. Tällainen lämpeneminen on luonteeltaan paikallista kunkin piirilevyyn valmistetun johtimen kohdalla.

Standardissa IPC-2221A, "Generic Standard on Printed Board Design", ilmoitetaan käyrillä suositukset johdinten poikkipinta-alalle johtimessa kulkevan virran suhteen. Käyrät on laskettu kaavalla

$$I = k \Delta T^{0,44} A^{0,725} , \quad (2)$$

jossa I on johtimessa kulkeva virta, k johtimen sijainnista riippuva vakio ($k=0,048$ piirilevyn ulkopuolisille johtimille ja $k=0,024$ piirilevyn sisäisille johtimille FR-4-materiaalilla), ΔT lämpötilan nousu Celsius-asteissa, ja A johtimen poikkipinta-ala neliömileinä. Mittayksikkö mil on tuuman tuhannesosa. Kaava 2 voidaan myös kirjoittaa muotoon

$$A = \left(\frac{I}{k \Delta T^{0,44}} \right)^{\frac{1}{0,725}} , \quad (3)$$

jolloin tuloksena saadaan johtimelta vaadittu poikkipinta-ala neliömileinä johtimessa kulkevan virran ja sallitun lämpötilan nousun suhteen. On huomattava, että kuparikerroksen paksuus voi kasvaa laminaatin alkuperäisestä kuparin paksuudesta levyn reikien ja läpivientien

läpikuparoinnin yhteydessä osana valmistusprosessia. IPC-2221A suosittaa kuitenkin lopullisessa suunnittelussa käytettäväksi kunkin valmistajan tarjoamia materiaaliikohtaisia arvoja virrantiheyden ja johdinvälysten suhteen. [11, s. 85–87]

IPC-2221A määrittelee myös jännite-erosta riippuen suositeltavan välyksen johdinten välille.

Taulukko 2 Standardin mukaiset johdinten minimivälilykset. Mukailtu lähteestä [11, s. 43].

Jännite johdinten välillä DC/AC pK	Minimivälilyks						
	Paljas piirilevy				Kokoonpantu piirilevy		
	B1	B2	B3	B4	A5	A6	A7
0-15 V	0,05 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,13 mm	0,13 mm	0,13 mm
16-30 V	0,05 mm	0,1 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,13 mm	0,25 mm	0,13 mm
31-50 V	0,1 mm	0,6 mm	0,6 mm	0,13 mm	0,13 mm	0,4 mm	0,13 mm
51-100 V	0,1 mm	0,6 mm	1,5 mm	0,13 mm	0,13 mm	0,5 mm	0,13 mm
101-150 V	0,2 mm	0,6 mm	3,2 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,8 mm	0,4 mm
151-170 V	0,2 mm	1,25 mm	3,2 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,8 mm	0,4 mm
171-250 V	0,2 mm	1,25 mm	6,4 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,8 mm	0,4 mm
251-300 V	0,2 mm	1,25 mm	12,5 mm	0,4 mm	0,4 mm	0,8 mm	0,8 mm
301-500 V	0,25 mm	2,5 mm	12,5 mm	0,8 mm	0,8 mm	1,5 mm	0,8 mm
> 500 V	2,5 µm/V	5 µm/V	25 µm/V	3,05 µm/V	3,05 µm/V	3,05 µm/V	3,05 µm/V

Taulukkoa luetaan seuraavasti:

- B1 sisäisille johtimille, missä tahansa korkeudessa
- B2 pinnoittamattomille, ulkoisille johtimille, merenpinnasta 3050m korkeuteen
- B3 pinnoittamattomille, ulkoisille johtimille, yli 3050m korkeudessa
- B4 ulkoisille johtimille pysyväällä polymeeripinnoitteella, missä tahansa korkeudessa
- A5 ulkoisille johtimille conformal coating -pinnoituksella, missä tahansa korkeudessa
- A6 komponenttijohtimille tai liitoksille, pinnoittamatta, merenpinnasta 3050m korkeuteen
- A7 komponenttijohtimille tai liitoksille, conformal coating -pinnoituksella, missä tahansa korkeudessa

Standardissa otetaan huomioon toimintakorkeuden vaikutus läpilyöntilujuuteen [11, s. 43].

Standardissa IPC-2221A ei kuitenkaan oteta kantaa lentotekniikalle erityisiin olosuhteisiin ryömivän valokaaren syntymisen varalle. Lentotekniikassa tulee huomioida potentiaalisesti rakenteiden pinnalle lentokorkeuden vaihtelussa tiivistyvä kosteus, sekä ulkoisen kontaminaation ja eristettä vaurioittavan roskaantumisen mahdollisuus [9, s. 1].

Korkeataajusten johtimien mitoitukseen IPC-2221A tarjoaa laskennallisia menetelmiä, joissa huomioidaan johtimen veto maatasen päällä tai maatasojen välillä piirilevyn sisällä. Maataso

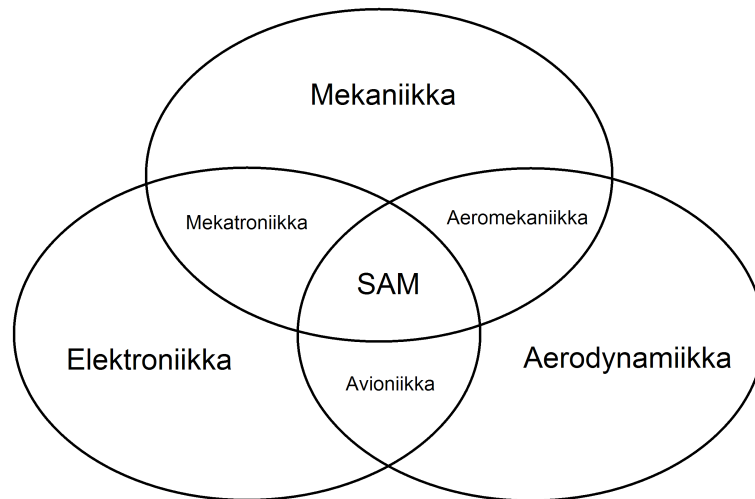
tarkoittaa piirilevyllä yhtenäiseksi jätettyä kuparipintaa. Mitoitus on suurelta riippuvainen piirilevymateriaalista ja signaalin johdotustavasta. [11, s. 53–58]

IPC-2223B, ”Sectional Standard for Flexible Printed Boards” tarjoaa lisää ohjenuoria joustavien piirilevyjen suunnitteluun. Tällaisia piirilevyjä ovat esimerkiksi polyimidikalvosta valmistetut piirilevyt. Näiden suunnitteluun tarjotaan lähtökohtaisesti samoja mitoitusmenetelmiä kuin kiinteille piirilevyille, ja sama suositus materiaaliikohtaisten arvojen käyttämisestä toistetaan. [12, s. 39]

Joustavien piirilevyjen suunnittelussa tulee ottaa huomioon kaavan 3 ohella myös mekaaninen kuormitus. Päällekkäisten kerrosten taivutuksessa syntyvä kerrosten erisuuntainen kuormitus. Tämä veto ja puristus voi johtaa kerrosten delaminaatioon taivutussäteen alittaessa kriittisen mitan. Mikäli mahdollista, taivutettavat johtimet tulisi suunnitella ensisijaisesti kulkemaan yhdessä kerroksessa, vierekkäin, ja yhdensuuntaisesti, riittävällä välyksellä. Mikäli päällekkäisissä kerroksissa kulkevia johtimia ei voida välttää, on suositeltavaa asemoida johtimet lomittain eri kerroksiin. Päällekkäin kulkevat johtimet aiheuttavat toisilleen taivutuksessa suuremman kuormituksen kuin lomittain asetellut johtimet. Taivutettaessa johtimen korkeataajuiset ominaisuudet voivat muuttua deformaation johdosta, ellei johtimen ja eristeen geometriaa pidetä taivutuksesta huolimatta yhtäläisenä valitsemalla soveltuva liima-aine. [12, s. 25–34]

3.3 Integroitu toiminnallisuus

Rakenteeseen integroidulla toiminnallisuudella tarkoitetaan piirilevytekniikalla valmistetusta ilma-aluksen rakenteellisesta komponentista puhuttaessa elektroniikan tai aerodynaamiikan toiminnallisuutta, joka on olennaisesti sisällytetty rakenteellisen komponentin toteutukseen. Rakenteelliset, elektroniset ja aerodynaamiset toiminnallisuudet voivat täten yhdistyä; näitä ratkaisuja kutsutaan perinteisesti mekatroniikaksi, avioniikaksi tai aeromekaniikaksi. Elektronisen, aerodynaamisen ja mekaanisen toiminnallisuuden yhdistymää voitaisiin kutsua sähköaeromekaaniseksi rakenteeksi. [7, s. 1–2]



Kuva 4. Mekaniikan, elektroniikan ja aerodynamiikan yhtymäkohdat. Mukailtu lähteestä [7, s. 2]

Piirilevytekniikan rajoitukset huomioon ottaen täysin sähköaeromekaanisia rakenteita nähdään ainoastaan tietyssä kokonsa ja toiminnallisuutensa puolesta rajoitetussa osassa miehittämättömiä ilma-aluksia. Tällaisia ratkaisuja voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi metsäpalojen seurannassa tai muissa tilanteissa, joissa edulliset valmistuskustannukset, automaattisen kokoonpanon yksinkertaisuus ja nopeus, sekä rajallisen suorituskyvyn riittävyys yhdistyvät. Tällaisia ratkaisuja on esitetty perinteisen paperiliidokin sekä vaahteransiemenen inspiroimina rakenteina. [7, s. 4–6]

Rakenteen koko sanelee myös suurelta sille integroitavan toiminnallisuuden luokkaa. Suuremmissa rakenteissa piirilevytekniikalla voidaan toteuttaa esimerkiksi kaapelisarjoja [1], ja pienemmässä mittakaavassa yksinkertaisemmat ja edullisemmat materiaalit nousevat kilpailukykyisiksi vaihtoehdoiksi suuremmissa rakenteissa suorituskykyisten materiaalien ohelle. Polyimidin työstettävyys syövytysprosessilla ja lasikuidun lastuava työstö jyrsimällä ovat nopeita, toistettavia ja edullisia työstömenetelmiä [13, s. 1–3].

Isotrooppisena materiaalina polyimidi voi palvella mittakaavaltaan pienissä rakenteissa paremmin kuin lasikuitu, jonka polyimidiin verrattuna huomattava lujuusetu vaatii toteutuakseen riittävän vahvikekuitujen pituuden [10, s. 73–77]. Kaavan 1 perusteella voidaan arvioida suhteessa lyhyiden vahvikekuitujen tarjoaman lujuuden luokkaa.

Nykyisissä elektroniikan laitteissa tavanomaisena integroidun toiminnallisuuden rakenteena nähdään esimerkiksi FR-4-piirilevyille toteutettuja antennia. Piirilevyn kuparinen johdinkerrok tarjoaa matalaresistanssisen ja fotoetsaustekniikalla työstettynä suhteellisen mittatarkan tavan toteuttaa antennin johdinten osuus, ja piirilevyn lasikuituinen ydin tukee antennia mekaanisesti säilyttäen sen osien välisen suuntauksen. FR-4-levyn lasikuitu on kelvoinen materiaali aina VHF-taajuuksille asti, ja tietyin rajauksin UHF-taajuuksille. [1, s. 184]

Muita yleisiä integroidun toiminnallisuuden rakenteita ovat piirilevyille valmistetut elektroniikan

komponentit kuten vastukset, induktorit ja kondensaattorit. Näitä voidaan käyttää myös sähkömagneettisessa tai mekaanisessa kytkeytymisessä rakenteeseen ja ympäristöön, jolloin niitä voidaan soveltaa antureissa mittaamaan rakenteen sisäisiä ominaisuuksia tai sen ulkoista ympäristöä.

4. PIIRILEVYRAKENTEEN HUOLLETTAVUUS

Ilma-alusten suunnittelua ja valmistusta säätelevien asetusten mukaan ilma-aluksen rakenteen tulee olla riittävän pitkäikäinen, huollettavissa ja korjattavissa, sekä sen kunnan tarkkailtavissa [4]. Myös taloudelliset ja eettiset näkökulmat kannustavat suunnittelemaan ilma-aluksen rakenteelle mahdollisimman pitkää ja luotettavaa käyttöaika.

Integroitu toiminnallisuus monimutkaistaa piirilevystä valmistetun mekaanisen rakenteen huoltoa. Se lisää omalta osaltaan huollon haastavuutta rakenteen monimutkaisuuden johdosta, mutta samalla tarjoaa uusia keinoja rakenteen kunnonvalvontaan.

4.1 Elinikä

Alumiinin ja lasikuidun eliniästä ilma-alusten rakenteen materiaalina on julkaistu runsaasti tutkimuksia. Mikäli ilma-alus on suunniteltu oikein, ja sitä käytetään suunnitellulla tavalla, ilma-aluksen elinikää rajoittaa pääasiassa materiaalien väsymiskäyttäytyminen. Kuitukomposiittimateriaaleilla on metalleihin verrattuna hyvä väsymisen sieto. [10, s. 18]

Lasikuituinen piirilevylaminaatti tarjoaa aiemmin esitettyjen rajoitusten puitteissa väsymiskäyttäytymiseltään houkuttelevan vaihtoehdon. Koska piirilevyn johtimet on toteutettu kuparilla, täytyy kuparin erityinen väsymiskäyttäytyminen ottaa huomioon. FR-4-piirilevylaminaatista tehdyn rakenteen toistuvan kuormituksen kestoa ja väsymiskäyttäytymistä on tutkittu venymäliuskakokeilla, joissa piirilevylaminaatissa on kapeita ja leveitä johtimia. Useamman materiaalin komposiittina FR-4-piirilevylaminaatin väsymiskäyttäytyminen riippuu suhteellisesta koostumuksesta. Kuparin vaikutus lasi-epoksikomposiittiin riippuu kuparin suhteellisesta määrästä, kuparijohdinten rakenteen geometriasta, ja kuormituksen suuruudesta verrattuna vetolujuuteen.

Eräissä kokeissa mitattiin FR-4-materiaalisten, tavanomaisella piirilevyprosessilla toteutettujen, ohuilla johtimilla valmistettujen koekappaleiden väsymiskäyttäytymistä. Koekappaleiden paksuus oli 1,52 millimetriä ja leveys koalueelta 25,4 millimetriä. Koekappaleissa oli kaksi kappaletta 0,152 mm johtimia per koekappale tai kaksi kappaletta 0,254 mm johtimia per koekappale. Materiaalin valmistusta ei seurattu tutkimuksen yhteydessä, mutta materiaali ja menetelmät edustivat tavallisia piirilevyteollisuudessa hyväksytyjä materiaaleja ja menetelmiä. [5, s. 3–4]

Kun edellä kuvattuja koekappaleita kuormitettiin yli 50% kappaleen laskennallisesta murtolujuudesta, jokaisessa tutkituista näytteistä lasikuitumateriaali petti ennen kuparisten johdinten vaurioitumista. Kokeiden yhteydessä havaittiin myös FR-4-laminaatilla kuparisten johdinten kestävästä väsymisestä paremmin lasikuitukerrosten välissä kuin suoraan laminaatin pinnalla, jossa epoksihartsilla syntyvät halkeamat johtivat sen pinnalla olevien kuparijohdinten halkeamiin. [5, s. 7]

Vastaavasti tutkittaessa väsymiskäyttäytymistä FR-4-materiaalisten, 2,03 millimetriä paksujen ja

koealueelta 25,4 millimetriä leveiden koekappaleiden osalta, joiden sisällä kulki 12,7 millimetrin levyinen ja 0,127 millimetrin paksuinen kuparinen johdin, havaittiin väsytykskokeessa syntyneiden johtimen halkeamien korreloivan kuparin ja lasikuidun välisen delaminaation kanssa. Tutkimuksessa ei vedetty selvää syy-seuraussuhdetta delaminaatiosta katkeavaan johtimeen tai johtimen katkeamisesta delaminaatioon, mutta hypoteettisesti esitettiin johtimessa alkavan halkeaman tukeutumista lasikuitumateriaaliin, kunnes delaminaatio alkaa halkeaman kohdalta ja altistaa johtimessa alkaneen halkeaman etenemiselle. Tässä tapauksessa prosessi olisi vahvasti yhteenkytketty. [14, s. 2-11]

Polyimidin ja kuparijohdinten väsymiskäyttäytymistä tutkittaessa on havaittu polyimidikalvolla olevan positiivinen vaikutus kuparijohtimien väsymiskäyttäytymiseen. Tutkimuksessa oli vertailtu paljaita kuparijohtimia ja polyimidikalvoja, sekä polyimidikalvosta ja kuparista valmistettua piirilevyä, joissa kuparijohtimien pintaa oli karhennettu adheesion parantamiseksi, sekä vastaavanlaisia piirilevyjä joiden kuparijohtimet olivat pinnaltaan kiillotettuja. Pelkillä kuparijohtimilla oli kaikista huonoin väsymiskäyttäytyminen, ja johtimia tukeva polyimidikalvo paransi väsymisominaisuuksia. Polyimidinen piirilevy jonka kuparijohdinmateriaali oli kiillotettu, menestyi väsymiskokeissa huomattavasti karheaa johdinmateriaalia paremmin. Kuparin esikäsitteilyllä ja polyimidi-kupari -piirilevyn valmistustekniikalla oli merkittävä vaikutus väsymiskäyttäytymiseen. [6, s. 8]

Näiden tulosten perusteella olisi suositeltavaa suunnitella kupariset johdinrakenteet komposiittirakenteen sisälle, ja asemoida johtimet altistumaan mahdollisimman vähäiselle muodonmuutokselle rakenteen elinkaaren tavanomaisen rasituksen aikana. Koska valmistustekniikka ja tarjolla oleva materiaalien kirjo vaikuttavat vahvasti piirilevystä valmistetun kappaleen väsymiskäyttäytymiseen, tulisi koekappaleita hyödyntää mahdollisuuksien mukaan materiaalien ja menetelmien yhteisvaikutuksen todentamiseen [5, s. 11].

Väsymiskäyttäytymiseltään parempina vaihtoehtoina kuparisille johtimille on esitetty johtavilla materiaaleilla seostettuja kestopuoveja, mutta näitä voidaan käyttää vain matalavirtaisille sovelluksille niiden kupariin nähden alemman sähkönjohtavuuden vuoksi [15, s. 585–590]. Ne eivät myöskään ole tavanomainen materiaali piirilevyteollisuudessa, jolloin rakenteen hankintahinta ja valmistuksen monimutkaisuus kasvaa [1, s.302].

4.2 Kunnontarkkailu

Ilma-alusten kunnontarkkailu tapahtuu pääosin visuaalisilla tarkastuksilla, joita varten rakenteessa on oltava riittävät aukot ja luukut. Komposiittirakenteiden kunnontarkkailu on kuitenkin monimutkaisempaa materiaalin sisällä esiintyvien vaurioiden kuten delaminaation vuoksi. Näiden paljastaminen vaatii tavanomaisesti erillisiä rikkomattoman aineenkoestuksen menetelmiä käytettäviä testauslaitteita. Komposiittirakenteiden kuntoa voidaan seurata myös rakenteeseen integroiduilla antureilla. Tavanomaiset ilma-aluksen komposiittirakenteeseen integroitavat kunnontarkkailun menetelmät ovat rakenteeseen lisättyjä johtimia tai valokuituja, joiden fyysiset ominaisuudet muuttuvat venymästä, halkeamasta tai katkeamasta. [10, s. 644]

Piirilevytekniikalla valmistettu rakenne tarjoavaa mahdollisuuden sisällyttää johtimia rakenteen sisälle ja pintoihin. Jos esimerkiksi kuparijohtimet vaurioituvat väsymisen johdosta herkemmin FR-4-laminaatin pinnalla kuin sen sisällä [5, s. 11], voidaan esittää ratkaisuksi laminaatista valmistetun komponentin kunnonvalvontaan materiaalin pinnalle vedettyjä tarkkailujohtimia, mikäli rakenteen lentokelpoisuuden kannalta kriittiset johtimet on valmistettu rakenteen sisään. Nämä tarkkailujohtimet voivat samalla palvella jotain ilma-aluksen lentokelpoisuuden kannalta ei-kriittistä tarkoitusta.

Rakenteeseen integroidut johtimet voivat tarjota tietoa johtimen resistanssin muutoksen tai katkeamisen lisäksi myös korkeataajusten ominaisuuksiensa muutoksista. TDR -menetelmällä (Time Domain Reflectometry, aikatazon heijastusmittaus) voidaan mitata materiaalin permittiivisyyden muutoksia johtimen välittömässä ympäristössä. Tällaisia permittiivisyyden muutoksia voi syntyä esimerkiksi lujitekuitukerrosten delaminaatiosta tai epoksihartsin dekompositiosta. [16, s. 8–11]

Eräs huomattava piirilevyrakenteen etu voi olla mekaaniseen komponenttiin integroidun kunnontarkkailun keinojen testattavuus sellaisenaan piirilevyrakenteen valmistamisen jälkeen. Piirilevyteollisuuden automaattisilla testivälineillä rakenteeseen valmistetut johtimet voidaan testata osana valmistusprosessia. Käytettäessä monimutkaisempaa kunnontarkkailun sähköistä menetelmää kuten edellämainittua TDR -menetelmää, rakennekomponenttia voidaan testata välittömästi sen valmistamisen jälkeen ennen ilma-alukseen integrointia.

4.3 Korjaukset

Lujitekuituisen materiaalin korjaukset ovat kirjallisuudessa tunnettu menetelmä. Vaurioitunut osa rakennetta poistetaan, ehjä rakenne viistetään, ja vaurioituneeseen kohtaan laminoidaan uutta materiaalia viisteen suuntaisesti. Lopulta uusi rakenne hiotaan yhdenmukaiseksi alkuperäisen kanssa. [10, s. 553]

Johtimia sisältävän piirilevy materiaalisena rakenteen korjaaminen riippuu ratkaisevasti rakenteen muodosta. Rakenteessa, jossa johtimet kulkevat materiaalin sisällä, ne tulee korjata samalla rakenteen kanssa, tai toteuttaa jotain muuta kautta. Piirilevy materiaalin ilma-aluksen rakenne voi sisältää johtimia, joilla on poikkipinta-alan ohella muita vaadittuja sähköisiä ominaisuuksia, kuten korkeataajuisen elektroniikan ja antennien tapauksessa [7, s. 3]. Nämä sähköiset ominaisuudet riippuvat johdinten geometriasta sekä ympäröivän materiaalin ominaisuuksista (esimerkiksi permittiivisyys), ja niiden säilyttäminen tulee ottaa huomioon korjauksia suunniteltaessa ja toteutettaessa. Rakenteeseen toteutettujen johdinten ja muiden sähköisten elementtien vaaditut ominaisuudet ja niiden toleranssit tulee määritellä osaksi rakenteen valmistus- ja huoltodokumentaatiota.

Rakenteen sisältämät johtimet voivat vaurioitua myös sähköisestä rasituksesta, esimerkiksi oikosulku tapauksessa. Sisäisten johdinten katkeamisen tapauksessa on syytä harkita mahdollisen delaminaation riskiä vaurioituneen johtimen kohdalla, sillä tutkimusten perusteella

rakenteen sisäisen kuparin katkoskohdat johtavat jännityskeskittymään ja mahdolliseen delaminaatioon rakenteen toistuvan kuormituksen myötä [14, s. 11].

4.4 Kierrätettävyys

Rakenteiden kierrätys on eettisistä, laillisista ja nykyisin kasvavassa määrin taloudellisista syistä osa niiden elinkaarta. Rakenteet voidaan suunnitella kierrätettäviksi joko moduuleina tai kokonaisuudessaan.

Elektroniikan piirilevyjä hävitettiin jätteenä 45 miljoonan tonnin vuotuisella määrällä vuonna 2015. Elektroniikan kierrätys on kasvavassa määrin taloudellisesti kiinnostavaa jalometallien vuoksi, joiden pitoisuudet ovat piirilevyjätteessä kyseisten jalometallien luontaisia lähteitä merkittävästi suuremmat. [17, s. 1]

Laitteiden suunnittelu kierrätystä ja uusiokäyttöä varten on tärkeä osa jätteen vähentämisen strategiaa. Elektroniikan piirilevyjäte on kuitenkin vähemmän uusiokäytettävissä useammasta syystä. Komponentit voivat olla tiiviisti integroituja ja niiden uusiokäytettävyys on hyvin tapauskohtaista. [17, s. 4]

Piirilevyjätteen uusiokäyttöä vaikeuttaa myös ylimääräisten materiaalien käyttö. Muovien, keraamien ja metallien osuus piirilevyjätteessä tekee yksittäisten materiaalien irrottamisesta ja erottelusta vaikeampaa. Erityisesti metallien keskinäisten, suhteellisen vähäisten määrien erottelu toisistaan on monimutkaisempaa. Piirilevyjätteen kaupallinen arvo on kuitenkin pääasiassa sitoutunut sen sisältämiin metalleihin. [17, s. 4]

Piirilevytekniikalla toteutettujen integroitujen aerosähkömekaanisten rakenteiden kierrätettävyttä voidaan pääasiallisesti parantaa kiinnittämällä huomiota materiaalien eroteltavuuteen toisistaan. Jos jotkin rakenteen osat ovat uusiokäytettävissä sellaisinaan joko nykyiseen tai johonkin muuhun tarkoitukseen, kierrätysnäkökulmasta ne tulisi säilyttää erillisinä osina jotka voidaan helposti erotella rakenteesta. Jos ilma-alus sisältää komponentteja joiden elinikä on huomattavan rajallinen verrattuna muuhun rakenteeseen, niiden korvattavuus pidentää rakenteen käyttöikä.

5. YHTEENVETO

Elektroniikan piirilevytekniikka tarjoaa materiaaliensa ja työmenetelmiensä puolesta olemassaolevan järjestelmän kevyiden levyrakenteiden valmistamiseen. Kolmiulotteiset rakenteet tulee toteuttaa kaksiulotteisista levyistä ottamalla niiden suunnittelussa huomioon piirilevyprosessin yleiset rajoitukset. Integroidut sähköiset rakenteet tarjoavat tapauskohtaisesti etuja vähentämällä kokoonpanon vaiheita, integroimalla toimilaitteen osaksi rakenteellista komponenttia, ja mahdollistamalla rakenteen osana toimivan kunnontarkkailun testaamista ennen integrointia.

Säädökset koskien ilma-alusten suunnittelua, materiaaleja, työmenetelmiä ja huoltoa eivät ota kantaa toteutuksen yksityiskohtiin, kunhan ne täyttävät säädösten vaatimukset. Täten on mahdollista hyödyntää olemassaolevaa piirilevyteollisuutta täydentämällä sen olemassaolevaa laatu järjestelmää ja itsekontrollia niiltä osin joilta se ei täytä ilmailun säädösten vaatimuksia.

Piirilevyteollisuus tarjoaa jo nykyisin ratkaisuja yksittäisiin ilma-alusten komponentteihin, kuten johdinsarjat ja antennit. Tällöin sen suomia etuja tiettyjen rakenteiden massan, kokoonpantavuuden ja kustannusten suhteen voidaan hyödyntää valikoivasti tukemaan tavanomaisia ilma-alusten valmistusmenetelmiä. Joissain osa-alueissa näitä ratkaisuja hyödynnetään jo laajalti.

Elektroniikan integrointi osaksi ilma-aluksen rakennetta voi parantaa sen kunnonvalvontaa, mutta myös kasvattaa rakenteen monimutkaisuutta sen huoltoa ja korjaamista ajatellen. Elektroniikan piirilevyjen, komponenttien ja juotosliitosten väsymiskäyttäytyminen on tutkittu tekniikan ala. Alalta löytyy paljon kirjallisuutta ja käytännön menetelmiä tietokoneavusteiseen mallinnukseen ja simulointiin. Olemassaolevien työkalujen hyödyntäminen ilma-alusten suunnittelun kannalta olennaisten rasitus- ja lämpökäyttäytymisen ennustamiseen on mahdollista.

Kirjallisuudessa esiintyvät esimerkit piirilevytekniikasta ilma-alusten rakenteessa lisääntyvät ilma-alusten koon pienentyessä, muutamia poikkeuksia lukuunottamatta. Kokonaisuudessaan piirilevytekniikalla toteutetut esimerkit ilma-alusten rungoista ovat kooltaan pieniä miehittämättömiä ilma-aluksia ja lennokkeja. Kookkain esimerkki on kärkiväliltään suureen aurinkosähkökäyttöiseen moottoripurjelentokoneeseen valmistettu johdinsarja.

Mekaanisessa suunnittelussa tulee huomioida mittakaavan vaikutus vaadittuihin ominaisuuksiin. Ilma-alusten mittakaavan pienentyessä huippumateriaalien, kuten hiilikuitujen ja titaanien, etu taloudellisempiin materiaaleihin, kuten lasikuidut ja muovit, kapenee rakenteen minimimittojen ja käsittelykuormien noustessa rajoittaviksi tekijöiksi. Joissain tapauksissa, kuten kertakäyttöisissä antureissa luonnonkatastrofien seurantaan, voi olla järkevää käyttää edullisinta mahdollista materiaalia joka täyttää muut rakenteelle asetetut vaatimukset.

LÄHTEET

- [1] C. F. Jr. Coombs, Printed Circuits Handbook, 6th Edition, McGraw-Hill, 2008.
- [2] A. P. Mouritz, Introduction to Aerospace Materials, Woodhead Publishing, 2012.
- [3] General Acceptable Means of Compliance for Airworthiness of Products, Parts and Appliances (AMC-20), European Union Aviation Safety Agency, 2020.
- [4] Advancing multifunctional composite wings and fuselage structures, Composites World (August), Gardner Business Media, 2019.
- [5] H. Kim, M. González, Fatigue failure of printed circuit board chemically etched copper traces in multifunctional composite structures, Journal of Composite Materials, 2014.
- [6] D. F. Beck, D. F. Susan, N. R. Sorensen, G. E. Thayer, Fatigue Behavior of Thin Cu Foils and Cu/Kapton Flexible Circuits, Sandia National Laboratories, 2008.
- [7] P. E. Pounds, S. P. N. Singh, Integrated Electro-Aeromechanical Structures for Low-Cost, Self-Deploying Environment Sensors and Disposable UAVs, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013.
- [8] Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25), European Union Aviation Safety Agency, 2020.
- [9] J-R. Riba, A. Gomez-Pau, M. Moreno-Eguilaz, S. Bogarra, Arc Tracking Control in Insulation Systems for Aeronautic Applications: Challenges, Opportunities, and Research Needs, MDPI, 2020.
- [10] M. C. Y. Niu, Composite Airframe Structures: Practical Design Information and Data, Conmilit Press, 1992.
- [11] IPC-2221A Generic Standard on Printed Board Design, Institute for Printed Circuits, 2003.
- [12] IPC-2223B Sectional Standard for Flexible Printed Boards, Institute for Printed Circuits, 2007.
- [13] A. S. Yuanyushkin, D. A. Rychkov, D.V. Lobanov, Surface quality of the fiberglass composite material after milling, Applied Mechanics and Materials, 2014.
- [14] H. Kim, M. Park, K. Hsieh, Fatigue fracture of embedded copper conductors in multifunctional composite structures, Composites Science and Technology, 2005.
- [15] A. Javidinejad, S. P. Joshi, Design and structural testing of smart composite structures with embedded conductive thermoplastic film, Smart Material Structures, 1999.
- [16] G. Pandey, E. T. Thostenson, D. Heider, Electric Time Domain Reflectometry Sensors for Non-Invasive Structural Health Monitoring of Glass Fiber Composites, PIER, 2013.
- [17] B. Ghosh, M.K. Ghosh, P. Parhi, P.S. Mukherjee, B.K. Mishra, Waste Printed Circuit Boards Recycling: an extensive assessment of current status, Journal of Cleaner Production, Elsevier, 2015.