



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

OLLI MEHTONEN
IKÄÄNNYTTÄMISEN VAIKUTUS ISOTROOPPISILLA SÄHKÖÄ
JOHTAVILLA LIIMOILLA VALMISTETTUJEN LIITOSTEN
ISKUNKESTÄVYYTEEN

Diplomityö

Tarkastaja: TkT Laura Frisk
Tarkastaja ja aihe hyväksytty Tieto-
ja sähkötekniikan tiedekunnan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
8.6.2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Signaalinkäsittelyn ja tietoliikennetekniikan koulutusohjelma

MEHTONEN, OLLI: Ikäännyttämisen vaikutus isotrooppisilla sähköä johtavilla liimoilla valmistettujen liitosten iskunkestävyyteen

Diplomityö, 61 sivua, 6 liitesivua

Heinäkuu 2011

Pääaine: Elektroniikan pakkaus- ja tuotantotekniikka

Tarkastaja: TkT Laura Frisk

Ohjaaja: DI Juha Pippola

Avainsanat: Miniatyrisointi, luotettavuus, isotrooppisesti sähköä johtavat liimat, ikäännyttäminen, pudotustestaus, iskunkestävyys

Yksi elektroniikkateollisuuden jatkuvista kehityssuunnista on laitteiden koon miniatyrisointi. Piirilevyille pyritään mahdollistamaan entistä enemmän toiminnallisuuksia ja komponentteja. Piirilevyjen suunnittelutiheys on mennyt jo niin pitkälle, että perinteisten metallijuotteiden tarkkuusraajat ovat alkaneet tulla vastaan.

Sähköä johtavat liimat ovat yksi tapa saavuttaa entistä tiheämmin suunniteltuja piirilevyjä. Liimojen muita merkittäviä etuja ovat niiden alhainen hinta, alhaiset käsittelylämpötilat, sekä ympäristöystävällisyys verrattuna metallijuotteisiin. Sähköä johtavat liimat eivät kuitenkaan ole lähitulevaisuudessa syrjäyttämässä metallijuotteita elektroniikan yleisimpänä liitosmateriaalina. Yksi suuri syy tähän on se, että tämän hetken kaupallisten liimojen eräät luotettavuusominaisuudet ovat huomattavasti metallijuotteita heikompia. Etenkin iskunkestävyydeltään liimat eivät ole lähelläkään metallijuotteiden tasoa. Kenties vieläkin suurempi syy metallijuotteiden jatkuvaan suosioon on elektroniikkavalmistajien haluttomuus lähteä muokkaamaan tuotantoprosessejansa liimoille sopiviksi.

Tämän työn tavoitteena on tutkia sähköä johtavien liimojen luotettavuusominaisuuksia. Erityisen tutkinnan kohteena ovat isotrooppisesti sähköä johtavat liimat, eli ICA-liimat. Työn teoriaosuudessa käydään läpi sähköä johtavien liimojen ominaisuuksia, elektroniikan luotettavuutta yleisesti sekä erilaisia menetelmiä, joita elektroniikkateollisuus käyttää tuotteiden luotettavuuden parantamiseksi. Työn käytännön osuudessa suunniteltiin ja toteutettiin testi, jossa tutkittiin yhden kaupallisen ICA-liiman luotettavuusominaisuuksia. Erityisesti tarkasteltiin ikäännyttämisen vaikutusta liiman liitosresistanssiin sekä iskunkestävyyteen. Lopuksi muutamalle vikaantuneelle liimaliitokselle suoritettiin vikaantumisanalyysi.

Testit suoritettiin mahdollisimman tarkasti mukaillen JEDEC:n pudotustestistandardia. Testien aikana ilmeni, että liiman liitosresistanssi kasvaa ikäännyttämisen myötä suhteellisen tasaisesti. Pudotustesteissä kävi ilmi, etteivät liimaliitokset kestä kovaa mekaanista rasitusta yhtä hyvin kuin metallijuotteet. Lisäksi kävi ilmi että ikäännyttäminen heikensi merkittävästi liiman iskunkestävyyttä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Program in Electrical Engineering

MEHTONEN, OLLI: Effect of Aging on Mechanical Impact Strength of Joints

Manufactured With Isotropic Conductive Adhesives

Master of Science Thesis, 61 pages, 6 Appendix pages

July 2011

Major: Electronics Packaging and Manufacturing

Examiner: Dr.Tech. Laura Frisk

Supervisor: M.Sc. Juha Pippola

Keywords: Miniaturization, reliability, isotropically conductive adhesives, aging, drop testing, impact strength

One of the trends that have been driving the electronics industry is the miniaturization of circuit boards and components. More functions and integrated circuits are fitted in on the boards. The density of the components on a circuit board is reaching a limit where traditional solders are not accurate enough to create reliable joints.

Electrically conductive adhesives (ECA) provide means to design circuits of even greater density. Other significant advantages that ECAs have over solders are relatively low cost, low processing temperatures, and environmental friendliness. Even though some of their attributes are better than those of solders, ECAs are not going to replace solders as a dominant joint material any time soon. One reason for this is the weak mechanical impact strength of ECA joints, since it is much weaker than the impact strength of solder joints. Probably the greatest reason for the continuous popularity of solders is the manufacturers' reluctance to chance their production lines to the needs of adhesives.

The goal of this work is to study the reliability aspects of the electrically conductive adhesives. The main materials studied in this work are isotropically conductive adhesives, ICAs. The theoretical part of the thesis deals with the main attributes, materials and operation of the ECAs. In addition, the reliability of electronics in general and some of the means to test it is studied. The focus in this part of the theory is on the aging tests and drop tests.

Experimental part of the work consists of designing and performing of a test to study the reliability properties of one commercial ICA. The test boards that are manufactured using the ICA were aged for increasing periods of time. The effect of aging on the contact resistance of the ICA joints was studied. A drop test was performed on the test boards, and the effect of aging on the results of the drop tests was analysed. Also, a failure analysis was conducted on a couple of the joints which were damaged in the test.

The drop test was conducted in accordance to the JEDEC drop test standard. The aging test indicated that aging has an effect on the contact resistance of the ICA joints. The resistance increased as the amount of aging time increased. During the drop tests it became apparent, that ICA joints cannot withstand mechanical shocks at a level required in many electronics applications. It also became apparent that aging has a negative effect on the impact strength of the ICA joints.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Elektroniikan laitokselle.

Työ oli erittäin mielenkiintoinen, ja sen parissa sain hyvää kokemusta siitä, millaista työ elektroniikan luotettavuuden parissa todellisuudessa on. Työ painottui käytännön testeihin, ja osittain sen takia onnistui hyvin pitämään motivaatiotani yllä läpi kevään ja alkukesän.

Suurimmat kiitokset haluan osoittaa työni ohjaajalle Juha Pippolalle, jota ilman työn käytännön tehtävistä ei varmasti olisi tullut mitään. Kiitokset myös tarkastaja Laura Friskille hyvistä neuvoista ja kannustamisesta työn edetessä.

Kiitokset myös vanhemmilleni jatkuneesta tuesta pitkän opintotaipaleen varrella. Lisäksi kiitokset veljelleni sekä läheisimmille ystävilleni, joiden ystävällismielinen naljailu antoi virtaa suorittaa tutkinto kunnialla loppuun.

Tampereella 14.7.2011

Olli Mehtonen

SISÄLLYS

Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vi
1 Johdanto	1
2 Sähköä johtavissa liitoksissa käytetyt liimat	3
2.1 ICA	5
2.1.1 Materiaalit	8
2.2 ACA	10
2.3 NCA	13
2.4 Käyttökohteita ja tulevaisuuden näkymiä	14
3 Elektroniikan luotettavuus	17
3.1 Rasiustyyppit	17
3.2 Vikaantumistyyppit ja -mekanismit	19
3.3 Liimaliitosten luotettavuus	20
3.3.1 Liimaliitosten iskunkestävyys	22
4 Luotettavuustestaus elektroniikassa	25
4.1 Kiihdytetyt luotettavuustestit	25
4.2 Ikäännyttäminen	28
4.3 Pudotustestit	29
4.3.1 Standardi JESD22-B111	30
5 Työssä käytetty testijärjestelmä	36
5.1 Testilevy	36
5.1.1 Työssä käytetyt komponentit	37
5.1.2 Työssä käytetty liima	37
5.2 Ikäännyttäminen	38
5.3 Pudotustesti	39
5.3.1 Kiihtyvyys	40
5.3.2 Piirilevyn venymät ja keskipisteen kiihtyvyys	42
6 Testin tulokset ja niiden analysointi	45
6.1 Resistanssimittaukset	45
6.2 Pudotustestausmittaukset	47
6.2.1 Vanhennuksen vaikutus iskunkestävyyteen	47
6.2.2 Lokaation vaikutus iskunkestävyyteen	51
6.3 Vikaantumisanalyysi	53
7 Yhteenveto	57
Lähteet	59
LIITE 1: VASTUSKETJUJEN RESISTANSSIARVOT	62
LIITE 2: PUDOTUSTESTIEN TULOKSET	65

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

ACA	<i>Anisotropically Conductive Adhesive</i> , vain z-suuntaan sähköä johtava liima
ACF	<i>Anisotropically Conductive Film</i> , ACA:n kalvomainen muoto
ACP	<i>Anisotropically Conductive Paste</i> , ACA:n pastamainen muoto
ALT	<i>Accelerated Life Test</i> , kiihdytetty elinikätesti
CSP	<i>Chip Scale Package</i> , integroitu piisirun kannike
CTE	<i>Co-efficient of Thermal Expansion</i> , lämpölaajenemiskerroin
Daisy-chain	Komponenttien ketjutusrakenne, jossa kontaktit verkotetaan sarjaan
Dummy-komponentti	Komponentti joka simuloi passiivisten komponenttien mekaanisia ominaisuuksia, sähköisiltä ominaisuuksilta vastaa oikosulkua
ECA	<i>Electrically Conductive Adhesive</i> , sähköä johtava liima
ESD	<i>Electro-Static Discharge</i> , sähköstaattinen purkaus
FMEA	<i>Failure Mode Effects Analysis</i> , vikaantumistyyppien ja niiden vaikutusten tutkimukseen käytetty analyysi
FMVT	<i>Failure Mode Verification Test</i> , korkean kiihdytystason elinikätestityyppi
FR4	Yleinen piirilevymateriaali
HALT	<i>Highly Accelerated Life Test</i> , korkean kiihdytystason elinikätesti
IC	<i>Integrated Circuit</i> , miniatyrisoitu elektroninen piiri
ICA	<i>Isotropically Conductive Adhesive</i> , jokaiseen suuntaan sähköä johtava liima
ICP	<i>Intrinsically Conductive Polymer</i> , sisäisesti sähköä johtava polymeeri
IEPE	<i>Internal Electronics Piezo Electric</i> , kiihtyvyyssanturimalli, jossa on sisäänrakennettua elektroniikkaa
ITO	<i>Indium Tin Oxide</i> , läpinäkyvä ja johtava oksidi
JEDEC	<i>Joint Electron Device Engineering Council</i> , esimerkiksi elektroniikkalan standardien kehittämiseen erikoistunut elin
Latchup	IC:ssä esiintyvä ilmiö, jossa tehonsyötön ja maan välille syntyy matalaresistanssinen polku
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> , nestekidenäyttö
MEOST	<i>Multiple Environment Over Stress Test</i> , monen olosuhdemuuttujan elinikätestityyppi
Mikroläpivienti	Monikerrospiirilevyn kerroksien välille tehty johtavalla materiaalilla täytetty aukko

NCA	<i>Non-Conductive Adhesive</i> , liima joka ei johda sähköä
NCMS	<i>National Centre of Manufacturing and Science</i> , Pohjois-Amerikan suurin tieteellinen suunnittelu- ja kehitystyöhön suuntautunut liitto.
PBGA	<i>Plastic Ball Grid Array</i> , integroitujen sirujen kotelointityyppi
PIND	<i>Particle Impact Noise Detection</i> , testi jonka avulla tutkitaan suljetun tilan irrallisten partikkelien määrää
Popcorning	Liiman sisäisen kosteuden äkillisen höyrytymisen aiheuttama vikaantumismekanismi
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> , tunnistamismenetelmä tiedon etälukuun ja -tallentamiseen
Reflow	Elektroniikkakomponenttien piirilevylle juottamiseen käytettävä prosessi
ROHS	<i>Restriction of use of certain Hazardous Substances</i> , ympäristölle haitallisten aineiden, etenkin lyijyn, käyttöä rajoittava direktiivi

1 JOHDANTO

Elektroniikkateollisuudessa kehityssuuntana on aina ollut tuotteiden koon pienentyminen. Miniatyrisaatio mahdollistaa yhä tiheämmän elektroniikan suunnittelun. Elektroniikkapiirilevyjä suunnitellaan jo niin tiheiksi, että perinteisillä metallijuotteilla ovat tarkkuuden rajat tulleet usein jo vastaan. Sähköä johtavat liimat ovat yksi keino saavuttaa vieläkin suurempia tiheyksiä elektroniikkasuunnittelussa.

Sähköä johtavat liimat voidaan jakaa kahteen kategoriaan. Tässä työssä käytettävä liima on isotrooppisesti johtavaa ICA-liimaa. ICA-liimat sisältävät runsaasti johtavia partikkeleita, ja tästä syystä ne johtavat sähköä sekä x-, y-, että z-suunnassa. ICA-liima tuleekin levittää vain sähköä johtaville liitosalueille. Toinen kategoria on anisotrooppisesti johtavat ACA-liimat, joiden suurin eroavaisuus ICA-liimoihin on niiden yksisuuntainen johtavuus. Tämä selittyy huomattavasti pienemmällä johtavien partikkelien pitoisuudella. ACA-liimaa voidaan siis levittää koko substraatille välittämättä liitosalueista, sillä liimamateriaali itsessään ei johda sähköä. Tästä syystä ACA-liimoja käytettäessä ei tarvitse huolehtia mahdollisista oikosuluista.

Sähköä johtavat liimat ovat seosmateriaaleja, joissa mekaanisen liimaliitoksen muodostavaan liimamateriaaliin sekoitetaan sähköä johtavia partikkeleja. Liimamateriaali on tyypillisesti polymeeriä, mutta myös muita materiaaleja käytetään. Polymeerit koostuvat yleensä epoksihartseista sekä niiden kanssa reagoivista kovetinaineista. ICA-liimoissa käytettävät johtavat partikkelit puolestaan ovat tyypillisesti metallia, vaikka myös metallilla päällystettyjä lasi- tai polymeeripartikkelita sekä grafiittia käytetään. Ylivoimaisesti eniten käytetään kuitenkin hopeaa sen oksidien korkean sähkönjohtavuuden vuoksi. ACA-liimoissa yleisimmin käytetty johtava materiaali on nikkeli, joka on mahdollisesti päällystetty kullalla.

Korkean liitostarkkuuden lisäksi sähköä johtavien liimojen suurimpia etuja verrattuna metallijuotteisiin ovat ympäristöystävällisyys, alhaiset käsittelylämpötilat sekä alhainen hinta. Hyödyistä huolimatta liimat eivät ole pystyneet syrjäyttämään juotteita liitosmateriaalimarkkinoiden kärkipaikalta. Eräs suurimmista syistä tähän on liimaliitosten heikompi luotettavuus. Erityisesti iskunkestävyydeltään liimaliitokset ovat huomattavasti heikompia kuin metallijuotteet. Ehkä vielä suurempi syy metalliliitosten suosion säilymiseen on valmistajien haluttomuus lähteä muokkaamaan tuotantolinjojansa liimoille sopiviksi. Muutos aiheuttaisi suuria kertakustannuksia, joten siitä saatavien hyötyjen täytyisi olla todella merkittäviä, jotta valmistaja lähtisi sitä toteuttamaan.

Tässä työssä oli tarkoituksena tutkia sähköä johtavien, erityisesti ICA-liimojen ominaisuuksia luotettavuuden näkökulmasta. Lisäksi työssä suunniteltiin ja tehtiin ICA-

liimaliitoksille testi, jossa tutkittiin ikäännyttämisen vaikutusta liitosten resistansseihin sekä iskunkestävyyteen. Liiman iskunkestävyyttä testattiin standardien mukaisella pudotustestilaitteistolla.

Kappaleessa 2 käydään läpi sähköä johtavien liimojen historiaa, toimintaperiaatteita, materiaaleja, käyttökohteita sekä tulevaisuudennäkymiä. Pääpaino on työn mukaisesti isotrooppisesti johtavissa liimoissa, mutta läpi käydään myös anisotrooppisesti johtavien sekä ei-johtavien liimojen toimintaperiaatteet. Kappale 3 käsittelee yleisesti elektroniikan ja erityisesti liimaliitosten luotettavuutta. Kappaleessa tarkastellaan myös rasituksia joita tuote luonnossa kohtaa sekä elektroniikalle tyypillisiä vikaantumismekanismeja. Kappaleessa 4 perehdytään elektroniikan luotettavuustesteihin, erityisesti työssä käytettyihin ikäännytyks-, ja pudotustestaukseen, sekä testauksessa käytettyihin standardeihin. Kappaleessa 5 esitellään työssä käytetty testijärjestelmä testilevyn, komponenttien, liiman, ikäännyttämismenetelmän sekä varsinaisen pudotustestin osalta. Kappaleessa 6 käydään läpi sekä analysoidaan testien tuloksia. Kappaleessa 7 tehdään yhteenveto työstä ja testin onnistumisesta, sekä kommentoidaan työtä yleisellä tasolla.

2 SÄHKÖÄ JOHTAVISSA LIITOKSISSA KÄYTETYT LIIMAT

Sähköä johtavat liimat (ECA, Electrically Conductive Adhesives) ovat seosmateriaaleja, tyypillisesti polymeerejä, johon on sekoitettu sähköä johtavia partikkeleita. Yleensä liimamateriaali on orgaanista polymeeriä, mutta joskus käytetään myös epäorgaanisia materiaaleja, kuten silikonia. Johtavat partikkelit ovat tyypillisesti metallia, esimerkiksi hopeaa, mutta myös muita metalleja sekä metallilla päällystettyjä polymeeri- tai lasipartikkeleita käytetään. Liimamateriaali määrittää pitkälti liimaseoksen mekaaniset ominaisuudet, ja johtava materiaali puolestaan sähköiset. [1]

Sähköä johtavia liimoja käytetään vaihtoehtona perinteisille juotteille sähköä johtavissa liitoksissa. Historiallisesti ensimmäiset sähköä johtavat liimankaltaiset seokset patentoitiin jo 1926. Nämä alkuaikojen johtavat liimaseokset olivat kuitenkin lähes käyttökeltottomia, sillä ne menettivät johtavuutensa käytössä hyvin nopeasti, tai jossain tapauksissa jo ennen käyttöönottoa. Ensimmäinen nykyisenkaltainen ECA kehitettiin vuonna 1948, kun N.H. Collings et al. yhdisti itsestään kovettuvaa liimaa ja hopeapulveria. [2]

Ensimmäinen dokumentoitu käyttökohde on kuitenkin vasta vuodelta 1956, jolloin johtavan liiman kaltaista seosta käytettiin liittämään puolijohtava kide metallipintaan. Tämän jälkeen ECA:n käyttö yleistyi, ja julkaisut niillä suoritetuista kokeista ja tutkimuksista lisääntyivät. Tutkimusten myötä johtavien liimojen luotettavuusominaisuudet kehittyivät, ja sitä myötä niiden käyttökin lisääntyi. ECA:n hyvät puolet, kuten alhainen käsittelylämpötila, osattiin jo huomioida laitteita suunniteltaessa. [2] Luotettavuusominaisuudet olivat kuitenkin sen verran heikkoja, ettei liimaseoksia ollut lupa käyttää kriittisissä sovelluksissa, kuten armeijan käyttöön tarkoitettussa teknologiassa tai lentokoneteollisuudessa. Suurimmat ongelmat aiheutuivat korroosiosta, metallien migraatiosta sekä kaasuuntumisesta. [3]

Johtavien liimojen halpuus ja alhaiset käsittelylämpötilat pitivät kiinnostuksen teknologiaa kohtaan kuitenkin yllä, ja seuraavien vuosikymmenten aikana kehitystä tapahtui esimerkiksi epoksiliimojen epäpuhtauksien vähentämisen saralla. Tällöin esimerkiksi liimaseosten kloridi-, kalium- ja natriumpitoisuus saatiin laskettua alle 20 ppm:n tasolle. Myös kaasuuntumista onnistuttiin hillitsemään. [3]

ECA-yhdisteiden kehitys on jatkunut kiivaana etenkin lyijyn käytön kieltämisen jälkeen, ja tulevaisuudessa ne tulevatkin haastamaan perinteisemmät juotteet entistä tehokkaammin elektroniikan liitosmateriaalina. Elektroniikan kehitys yhä pienempään suuntaan, halvat hinnat ja mahdollisuus suurempiin tiheyksiin ajavat liimojen kehitystä eteenpäin. Tällä hetkellä kuitenkin liimat eivät vielä kilpaile juotteiden kanssa

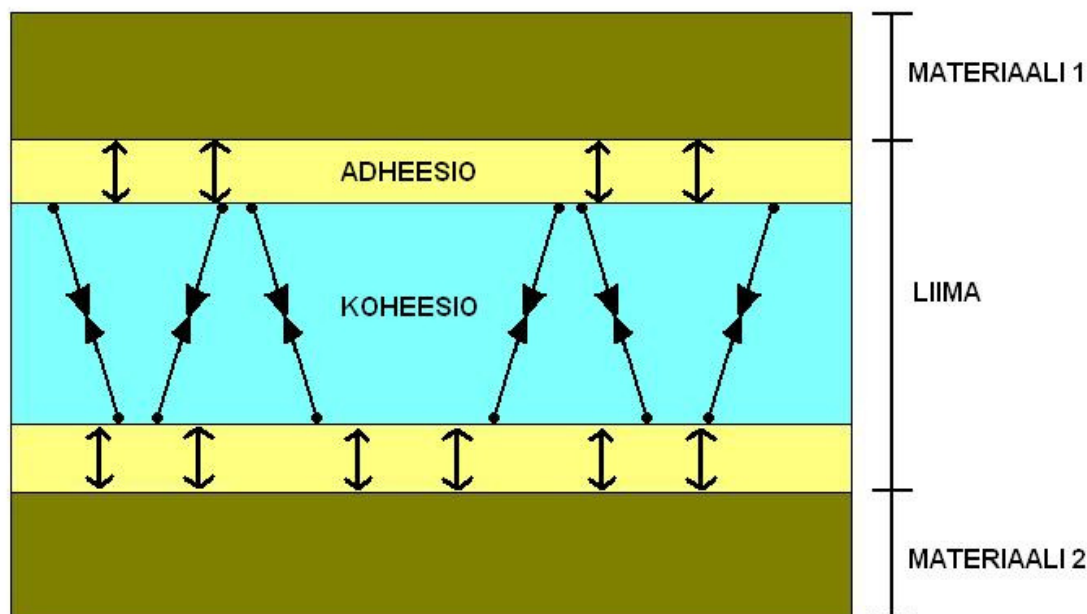
liitosmateriaalimarkkinoiden kärkipaikasta. Taulukossa 1 on eritelty liimojen ja perinteisten juotteiden hyviä ja huonoja puolia [3]:

Taulukko 1. Liitostyyppien hyötyjä ja haittoja [3].

Liitosmateriaali	Hyödyt	Haitat
Metallijuotteet	<ul style="list-style-type: none"> • Sarjatuotanto • Prosessit helposti automatisoitavissa • Pitkä historia – prosessin piirteet tarkasti tiedossa • Virheet korjattavissa • Hyvät sähköiset yhteydet • Hyvä lämmönjohtavuus • Itsekohdistuvuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaatii juoksutteen – riski jäänteiden ja kosteuden aiheuttamasta korroosiosta • Ympäristölliset ongelmat • Ilmakuilien riski isojen komponenttien alla • Korkea käsittelylämpötila reflow-prosessissa • Huono adheesio joidenkin materiaalien (esimerkiksi ITO (Indium Tin Oxide) – johtimissa)
Liimaseokset	<ul style="list-style-type: none"> • Virheet korjattavissa • Alhainen hinta • Alhaiset käsittelylämpötilat • Automatisoitavissa • Materiaalit valittavissa sovelluskohtaisesti • Laaja valikoima kaupallisesti hyvin saatavia materiaaleja • Ympäristöystävällisyys • Kyky lievittää rasiuksia • Joustava liitos • Hyvä adheesio valtaosan materiaaleja kanssa • Nopeasti kovetettavissa • Mahdollista saada suunnattu johtavuus 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaasuuntumisen riski, erityisesti suljetuissa pakkauksissa • Suurin osa liimoista vaatii pitkähkön kovettumisajan (1-2 tuntia) • Rajoittuneet lämmönjohtokyvyt • Liimaan absorptoitunut vesi aiheuttaa reflow-prosessin aikana ongelmia • Ei itsekohdistuvuutta

Liimoilla voi olla erilaisia käyttötarkoituksia elektroniikkatuotteissa. Niitä voidaan käyttää johtamattoman mekaanisen liitoksen muodostamiseen, lämmön tai jännityksen dissipatioon tai sähköisten liitosten muodostamiseen. Liiman avulla saavutetun

mekaanisen liitoksen muodostumista voidaan tarkastella adheesio- ja koheesiovoiman avulla. Adheesiolla tarkoitetaan kahden pinnan vetovoimaa toisiinsa nähden ja koheesiolla aineen sisäisiä, ainetta yhdessä pitäviä voimia. Kuva 1 esittää liimaliitosta jossa nämä voimat on selitetty. [4]



Kuva 1. Adheesio- ja koheesiovoimien havainnollistamiskuva [4].

Liiman adheesio ja koheesiovoimat kehittyvät kovettumisen aikana. Optimaalinen kovettumisaika näiden voimien suhteen määritetään yleensä empiirisesti mittaamalla liiman vääntö-, veto- tai leikkauslujuutta erilaisilla kovettumisajoilla ja kovettumislämpötiloilla. [3]

Sähköä johtavat liimat voidaan jakaa kahteen kategoriaan: isotrooppisiin (ICA, Isotropic Conductive Adhesives) ja anisotrooppisiin (ACA, Anisotropic Conductive Adhesives) sähköä johtaviin liimoihin. Merkittävin ero näiden välillä on se, että ICA-liimoissa johtavia partikkeleita on enemmän, tyypillisesti jopa 70-80% seoksen painosta sekä 25-30% seoksen tilavuudesta. Liimaseos johtaakin sähköä jokaiseen kolmeen (x, y ja z) suuntaan. ACA-liimoissa puolestaan johtavien partikkeleiden määrä on huomattavasti vähäisempi, ja ne johtavat vain z-suuntaan liittämisen jälkeen. Joissain tapauksissa sähköjohtavissa liitoksissa saatetaan käyttää myös liimoja, jotka eivät itsessään johda sähköä. Näitä kutsutaan ei-johtaviksi liimoiksi (NCA, Non-Conductive Adhesives). Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan näitä liimatyyppejä tarkemmin. [1, 3]

2.1 ICA

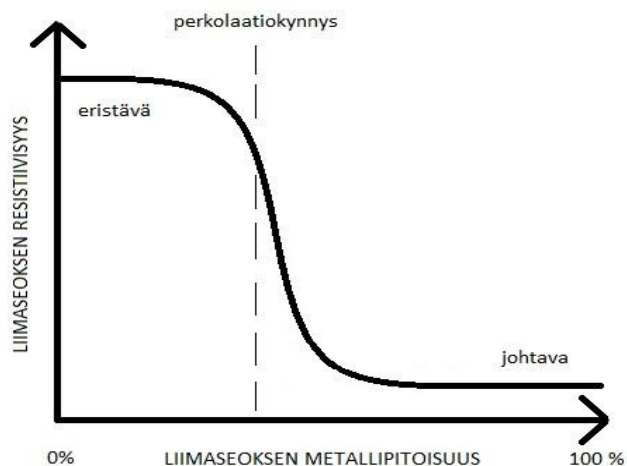
ICA-liimat ovat yleensä liimahartsien seoksia, jotka sisältävät suuren määrän sähköä johtavia täyteaineita, tyypillisesti hopeahiutaleita. Liimaseokseen, johon sisältyy hartsin lisäksi kovetinainetta, on mahdollista lisätä myös muita lisäaineita. Tällaisia ovat esimerkiksi katalyytti, liuottimet, ohenneaineet ja muut täyteaineet. [4]

ICA-seos on heikosti sähköä johtava ennen liiman kovettumista. Kovettimen tehtävä on reagoida liimaseoksen hartsiain kanssa ja näin muodostaa polymeeriketjuja. Katalyytin tehtävä on jouduttaa kovettumisreaktiota. Liuottimien avulla liima levittäytyy paremmin substraattimateriaalin pinnalle, ja liimaliitoksen muodostuttua tulee varmistaa liuottimien vapaa haihtuminen liimasta. Ohenneaineilla pystytään vaikuttamaan liiman viskositeettiin sekä modifioimaan liiman prosessointiolosuhteita, mikäli tarvetta esiintyy. Muilla täyteaineilla voidaan parantaa liimassa erilaisia ominaisuuksia, joista muutamia on lueteltu alla [4]:

- Hinnan alentaminen
- Sidoslujuus
- Työskentelyominaisuudet
- Lämmönjohtavuus
- Lämpölaajeneminen
- Lämpöstabiilius
- Käyttöikä
- Kutistuman ja jännityksen pienentäminen kovettumisen aikana

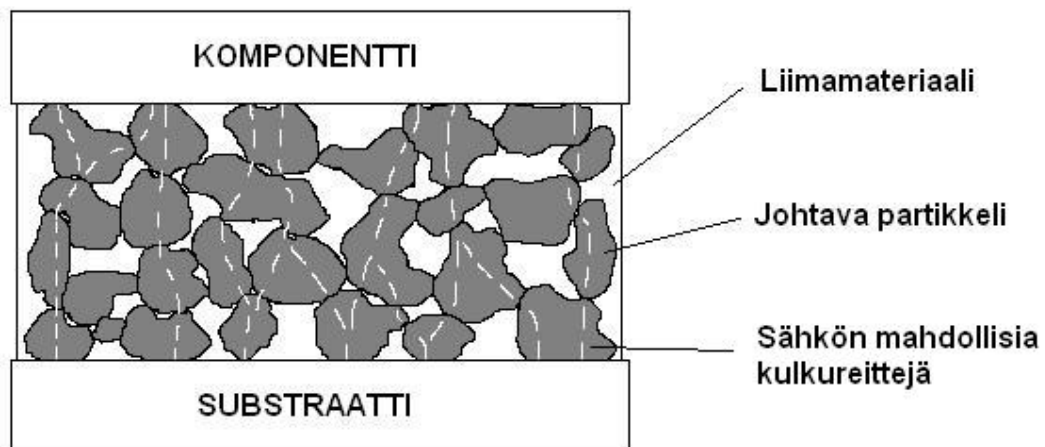
ICA-liiman kovettuessa sen sähköjohtavuus kasvaa merkittävästi. ICA:n johtavuusmekanismia ei kuitenkaan vielä täysin ymmärretä, vaan se on tutkimuksen alla. Alan kirjallisuudessa on esitetty, että kovettumisen aiheuttama kutistuminen sekä liuottimien haihtuminen vaikuttavat johtavuuden kasvuun, mutta näille hypoteeseille ei ole vielä esitetty pitävää todistusta. [5]

ICA-liimat sisältävät sähköä johtavaa täyteainetta vähintään sen perkolaatiopistettä vastaavan pitoisuuden verran. Tällöin täyteainehiutaleet pääsevät koskettamaan toisiaan muodostaen verkkomaisen, sähköä johtavan rakenteen. Kun liiman metallipitoisuutta lisätään, sen johtavuus paranee alkuun vain hieman, kunnes perkolaatiopisteen ylittyessä liiman johtavuus kasvaa äkillisesti. Tällöin liimaseokseen syntyy ensimmäinen jatkuva metallipolku. [6] Kuva 2 esittää perkolaatiokynnyksen ylittämisen vaikutusta liiman johtavuuteen.



Kuva 2. Metallipitoisuuden vaikutus liiman johtamiseen [6].

ICA-liiman johtavien partikkelien geometriset ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti. Yhdenkokoisia pallomaisia partikkeita käytetään esimerkiksi liimojen koneellisessa mallinnuksessa. Todellisuudessa kuitenkin pallojen koko yleensä vaihtelee, koska pienemmät pallot mahtuvat suurempien pallojen väleihin muodostaen tiiviimmän verkon. Vieläkin laajemmassa käytössä ovat lastumaisen rakenteen omaavat partikkelit, joilla on palloja parempi suhde kosketuspinnan ja tilavuuden välillä. Kuvassa 3 on esitelty tyypillisen ICA-liitoksen poikkileikkaus. Kuten kuvasta nähdään, liitokseen muodostuu sähkölle useita eri vaihtoehtoisia reittejä, joita pitkin se voi kulkea komponentista substraattiin. [7]



Kuva 3. ICA-liitoksen poikkileikkaus [4].

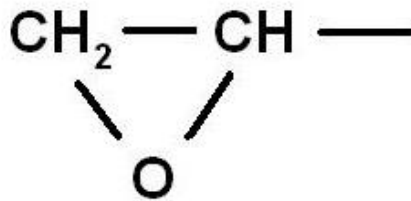
Myös pitkänomaisia partikkelirakenteita on käytössä, sekä piikkimäisten partikkelirakenteiden käyttämisestä on testattu. Tällöin partikkelin perusrakenne olisi pallomainen, mutta siitä erkanisi piikkimäisiä ulokkeita. Ulukkeiden olisi tarkoitus lävistää liitokseen syntyvät oksidikerrokset näin lisäten liimaliitoksen pitkäaikaista luotettavuutta. [7]

ICA-liima johtaa isotrooppisesti jokaiseen suuntaan, joten sitä tulee levittää vain niille pinnoille joiden kuuluu johtaa sähköä. ICA-liiman sähkönjohtokykyyn voidaan vaikuttaa esimerkiksi johtavan täyteaineen materiaalin ja pitoisuuden valinnalla. Myös täyteaineen partikkelikoko sekä liiman kovettumisolosuhteet vaikuttavat. [4]

ICA-liiman tehtäviä ovat siis sekä sähköisen, että mekaanisen liitoksen luominen. Liitoksen mekaaninen kestävyys ja sidoslujus määräytyy seoksen liimamateriaalin ominaisuuksien sekä suhteellisen määrän mukaan. Onkin oltava tarkkana, ettei metallipitoisuutta kasvateta mekaanisen kestävyuden kustannuksella, etenkin kun liimaseoksen sähkönjohtokyky ei merkittävästi parane perkolaatiokynnyksen ylityttyä. [5]

2.1.1 Materiaalit

Suurin osa sähköä johtavista liimoista ovat epoksipohjaisia, kuten myös tässä työssä käytetty ICA-liima. Myös silikoni- sekä polyimidipohjaisia liimoja käytetään. Kaupallisia epoksiliimoja on saatavilla monessa eri olomuodossa, esimerkiksi nestemäisenä, pastana, filminä sekä kiinteässä muodossa. Epoksipohjaisen ICA:n liimamateriaali sisältää pääosin epoksihartsia ja kovetinta. Epokseja on kuitenkin useita erilaisia. Yksi yhteinen tekijä kaikille epokseille on niiden reaktiivinen oksiraanirakenne, joka on esitelty kuvassa 4. [4]



Kuva 4. Epoksiliimoissa esiintyvä reaktiivinen oksiraanirakenne. [4]

Suurin osa kaupallisten liimojen epokseista perustuu bisfenoli-A:n, bisfenoli-B:n tai muiden fenolihydrateiden diglysidyylietteriin. Ensinmainittu valmistetaan yleensä askelpolymeraatiolla, jonka alussa yhdisteessä on läsnä ylimäärin olevaa epikloorihyבריiniä, bisfenoli-A:ta sekä jotain alkaalia, esimerkiksi natriumhydroksidia. Polymerointi lopetetaan, kun hartseille haluttu viskositeetti saavutetaan. Tyypillisesti haluttu viskositeetti on välillä 8-20 Pa·s. [4]

Epoksiliimoissa käytetty kovetin voi olla jo lisättynä epoksin joukkoon (yksikomponenttinen liima) tai se lisätään ennen käyttöä (kaksikomponenttiliima). Valtaosa kaupallisista yksikomponenttisistä epoksiliimoista ovat lämpökovettuvia. Kaksikomponenttiliimat voivat olla joko huoneenlämmössä tai korotetussa lämpötilassa kovettuvia. [4]

Korotetussa lämpötilassa kovettuville liimoille tyypillisiä ominaisuuksia ovat korkea ristosilloittumisaste sekä lasisiirtymälämpötila. Nämä johtavat korkeaan leikkauslujuuteen sekä parempaan ympäristöolosuhteiden kestoon kuin huoneenlämpötilassa kovettuvilla liimoilla. Sen sijaan sitkeys sekä vetolujuus ovat yleensä parempia huoneenlämpötilassa kovettuvilla liimoilla. Korkean lämpötilan kovettimissa tyypillisiä kovetinaineita ovat anhybridit. Huoneen lämpötilassa kovettuvissa liimoissa puolestaan käytetään esimerkiksi amiineja sekä polyamideja. Kovettuminen voidaan kuitenkin hoitaa melkein millä tahansa aineella, joka sisältää labiilin vedyn tai hydroksaaliryhmän. Taulukossa 2 on esitelty usein käytettyjen kovettimien hyviä ja huonoja puolia: [4]

Taulukko 2. Usein käytettyjen kovettimien hyviä ja huonoja puolia [4].

Kovetin	Edut	Haitat
Alifaattiset amiinit	<ul style="list-style-type: none"> • Nopea kovettuminen • Alhainen kovettumislämpötila • Alhainen viskositeetti • Alhainen hinta 	<ul style="list-style-type: none"> • Kriittinen sekoitussuhde • Vahva ihon ärsyttävä • Usein eksotermien
Polyamidit	<ul style="list-style-type: none"> • Alhainen myrkyllisyys • Hyvä joustavuus ja kimmoisuus • Hyvä sitkeys • Alhainen kovettumislämpötila 	<ul style="list-style-type: none"> • Korkeampi hinta kuin amiineilla • Korkea viskositeetti • Alhainen lämpötilan kesto • Kaasuuntuu helposti
Aromaattiset amiinit	<ul style="list-style-type: none"> • Kohtuullinen lämpötilan kesto • Hyvä kemikaalien kesto 	<ul style="list-style-type: none"> • Kiinteä huoneen lämpötilassa, vaikea sekoittaa epoksin kanssa • Korkea kovettumislämpötila • Pitkä kovettumisaika
Lewisin hapot	<ul style="list-style-type: none"> • Korkea lämpötilan kesto • Pitkä käytettävyyssäikä 	<ul style="list-style-type: none"> • Usein eksotermien • Huono kosteudenkesto, korroosioriski

Polyimidipohjaisilla liimoilla on tyypillisesti huomattavasti korkeampi lämpötilan kesto kuin epoksipohjaisilla liimoilla. Ne kehitettiin alunperin NASA:ssa pääasiallisesti avaruusteollisuuden käyttökohteisiin. Polyimidipohjaiset liimat ovatkin hyvin kalliita. Polyimidiliimat voidaan jakaa kahteen kategoriaan niiden kovettumistavan mukaan. Lämmön avulla kovettuvat polyimidiliimat sisältävät prekursoreita sekä muita lisäaineita. Kovettuminen tapahtuu korkeissa, jopa yli 400°C:n lämpötiloissa, ilman erillisen kovettimen läsnäoloa. Tällöin vesi eliminoituu prekursorista, tiivistäen imidirenkaita ja luoden erittäin pysyvän imidirakenteen. [4]

Additiopolymeroinnin avulla kovettuvissa polyimidiliimoissa puolestaan kovettuminen tapahtuu jo ennestään imidisoituneiden prekursorien additiopolymeroinnin avulla. Tällöin kovettamiseen ei tarvita korkeita lämpötiloja, eikä kovettumisen sivutuotteena synny vettä. [4]

Ylivoimaisesti yleisimmin käytetty johtava täyteaine ICA-liimoissa on hopea. Suurin syy sen käyttöön on hopeaoksidin korkea sähkönjohtavuus. Tätä ominaisuutta ei löydy muiden halvempien metallien oksideilta. Hopean johtavuus ei muutu käytännössä lainkaan sen hapettuessa. Toisin on muiden johtavina täyteaineina käytettävien metallien, kuten kuparin tai nikkelin kanssa. Itse asiassa näiden metallien oksidit toimivat liitoksissa eristeenä. Toisaalta taas hapettumattomien metallien, kuten kullan käyttö on liian kallista. Hopeapartikkeleista on myös helppo muokata halutun muotoisia,

joka osaltaan tekee siitä kultaa houkuttelevamman käyttömateriaalin. Optimaalinen hopeapartikkelien verkko seokseen saadaan kun yhdistetään sopivassa suhteessa lastujen ja pallojen muotoisia partikkeleita. Lastut tarjoavat paremman johtavuuden laajemman kontaktipinnan ansiosta, ja niiden limittäytymisestä syntyvät aukot täyttyvät pienemmillä pallomaisilla partikkeleilla. Nämä ominaisuudet tekevät hopeasta parhaan vaihtoehdon kun otetaan huomioon hinta ja käyttöominaisuudet. [7]

Kuparin käytölle suurimpana esteenä on juuri sen herkkyys hapettumiselle. Kuparia käytettäessä pitäisi keksiä keino rajoittaa hapettumisreaktiota lämmön ja kosteuden vaikutuksesta. Hapen pääsyä liimamateriaaliin on käytännössä mahdoton estää, joten hapettumisen vähentämiseksi on kehitetty erilaisia keinoja. Yksi keino on tyyppipohjaisten yhdisteiden lisääminen liimamateriaaliin, koska kupari muodostaa vakaita yhdisteitä näiden kanssa, näin vähentäen hapettumistaan. Toinen tapa on päällystää kupari jalommalla metallilla, kuten hopealla. Tämä antaa liimaseokselle hieman lisää stabiilisuutta, mutta monissa sovelluksissa ei riittävästi. [7]

Nikkeli hapettuu hitaammin kuin kupari, joten siinä mielessä se sopii liimaseoksiin hieman paremmin. Sen ehkäpä suurin haittapuoli on sen jäykkyys. Siitä on vaikea muokata sopivan kokoisia ja muotoisia partikkeleja, ja tästä johtuen nikkelpohjaisilla liimoilla resistanssi kohoaa usein kaksinkertaisesti esimerkiksi hopeaan verrattuna. Sen sijaan nikkelistä on helppo muodostaa pallon muotoisia partikkeleja, ja tästä syystä sitä käytetään usein ACA-liimoissa. Nikkeli voidaan myös helposti päällystää esimerkiksi kullalla, jolloin partikkelien hapettuminen on vähäisempi ongelma. Toisaalta tällöin liimaseoksen hinta nousee huomattavasti. [7]

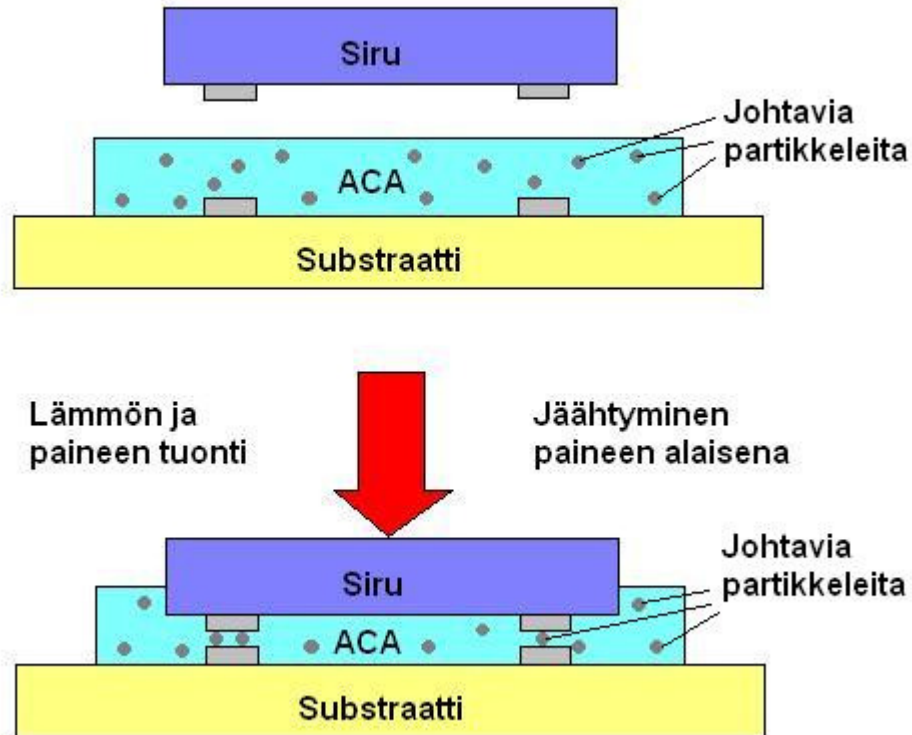
Myös hiilen sähköä johtavia muotoja, erityisesti grafiittia, käytetään joskus johtavana materiaalina ICA-liimoissa. Sen johtavuus on kuitenkin niin huono verrattuna hopeaan, että käyttökohteet ovat erittäin rajoitetut. Esimerkiksi joitain laskimia on rakennettu käyttäen hiilipohjaisia liimoja, samalla kun ne toimivat myös laskimen musteena. [7]

Yksi tutkijoiden suuren mielenkiinnon kohde on metallipäällysteiset partikkelit. Partikkelit saattavat olla joko metallia tai epämetallia, ja ne päällystetään johtavalla aineella, tyypillisesti hopealla, nikkelillä tai kullalla. Teknologian kiinnostavuuden syynä on se, että se mahdollistaa liimaseoksen hinnan huomattavan alentamisen. Usein päällystettävät partikkelit ovat joko lasia tai jotain polymeeriä, jolloin partikkelien ja liimamateriaalin lämpölaajenemiskerroin (CTE, Coefficient of Thermal Expansion) ovat hyvin lähellä toisiaan. [7]

2.2 ACA

ACA-liimat johtavat sähköä vain z-suunnassa. ACA-liimaan on sisällytetty johtavia partikkeleita huomattavasti vähemmän kuin ICA-liimaan, tyypillisesti vain noin 0,5-5 tilavuusprosenttia. Liimaseoksen perkolaatiopiste ei siis lähellekään ylity, vaan liima alkaa johtamaan vasta kun se puristetaan z-suunnassa kuvan 5 esimerkin mukaisesti. Kuvasta nähdään myös se, että ACA-liimaa voidaan levittää liitosalueiden lisäksi myös

pinnoille joiden ei haluta johtavan sähköä. Se ei muodosta sähköä johtavaa yhteyttä vierekkäisten liitosten väliin, muodostaen oikosulkuja, vaan johtaa vain z-suuntaan komponentin ja substraatin liitosalueiden välillä. [4]



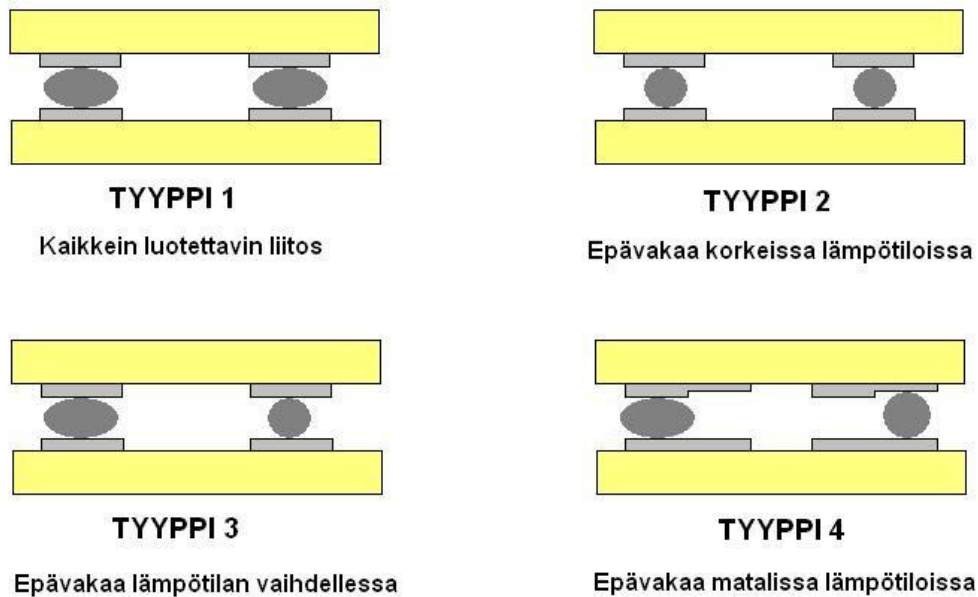
Kuva 5. Anisotrooppisen sähköä johtavan liiman toimintaperiaate [4].

Sidoksen muodostumisprosessi on erittäin kriittinen ACA-liiman toimivuuden kannalta, koska sekä mekaaninen että sähköinen yhteys muodostuvat sen aikana. Liitokseen kohdistetaan painetta ja lämpöä samanaikaisesti, kunnes johtavat partikkelit muodostavat sillan johtavien pintojen välille. Kun sähköinen yhteys on luotu, liima kovetetaan esimerkiksi lämmön avulla alkuun saatetulla kemikaalisella reaktiolla tai jäädytyksellä. [8]

Liitokseen tulee kohdistaa riittävän korkeaa lämpötilaa sekä riittävän suurta painetta tarpeeksi pitkä aika. Lisäksi paineen tulee kohdistua tasaisesti komponentin koko pinta-alalle. Paineen vaikutuksesta johtavat materiaalit puristuvat pintojen välillä, ja pyrkimys palata alkuperäiseen muotoon pitää jatkuvasti yllä sähköistä kontaktia. Ideaalitapauksessa partikkelit ovat puristuneet tarpeeksi jotta kontaktialue olisi mahdollisimman suuri. Kuitenkaan liikaa painetta ei voi liitokseen kohdistaa, etteivät partikkelit murtuisi liikaa. Partikkelien tulee kuitenkin joka tapauksessa murtua vähän, sillä tämä on liitoksen kannalta välttämätöntä. Paineen kohdistamisen tasaisuus on tärkeää liitoksen pitkäaikaisen luotettavuuden varmistamiseksi. [9]

Kuvassa 6 on esitelty erilaisia puristumistasoja ja niiden vaikutuksia liitoksen luotettavuuteen. Tyypin 1 liitoksessa partikkelit ovat puristuneet tasaisesti kaikkialla, ja

sähkön kulku on esteetöntä kaikissa lämpötiloissa. Tyypin 2 liitoksilla tulee ongelmia korkeissa lämpötiloissa, kun liimamatriisi laajenee enemmän kuin johtavat partikkelit. Tyypin 3 liitoksissa on erikokoisia partikkeleita. Pienempien partikkelien kontakteista tulee heikompia, ja tällöin sähköinen yhteys saattaa katketa sekä korkeissa että matalissa lämpötiloissa. 4-tyypin liitoksissa ongelmat syntyvät liitosalueiden korkeuseroista. Toiset partikkelit eivät puristu yhtä tehokkaasti kuin toiset, joka johtaa siihen että matalissa lämpötiloissa kutistuminen aiheuttaa ongelmia. [9]



Kuva 6. Erilaisilla muodostuneita ACA-liitoksia ja niihin liittyviä ongelmia [9].

ACA:n liimamateriaalina käytetään yleisimmin epoksia. Myös muita materiaaleja voidaan käyttää, mikäli se on hyödyllistä kyseisessä sovelluksessa. Johtavat partikkelit puolestaan voivat olla esimerkiksi metallilla pinnoitettuja polymeeripalloja, jolloin partikkelien ja ympäröivän liimamateriaalin CTE:t ovat lähempänä toisiaan. CTE-erot ovat luotettavuuden kannalta ongelmallisia, joten niiden minimointi on usein tärkeää. Muita materiaaleja joita ACA-liimoissa käytetään johtavina partikkeleina ovat esimerkiksi juotepallot tai muut metallipartikkelit. Metalleista useimmiten käytetään nikkeliä tai kullalla päällystettyä nikkeliä sen vuoksi, että nikkeli on helposti muokattavissa pallon muotoon. Kullalla päällystäminen vähentää nikkelin oksidoitumisesta aiheutuvia ongelmia. Lämpimiltään johtavat partikkelit ovat tyypillisesti 3-10 μm . [4, 10]

ACA:t jaotellaan usein niiden muodon mukaan kalvoihin (ACF, Anisotropic Conductive Film) ja pastoihin (ACP, Anisotropic Conductive Paste). Taulukossa 3 on esitetty millaisia ominaisuuseroja näillä ACA-muodoilla on. [4]

Taulukko 3. ACF:n ja ACP:n eroja [4].

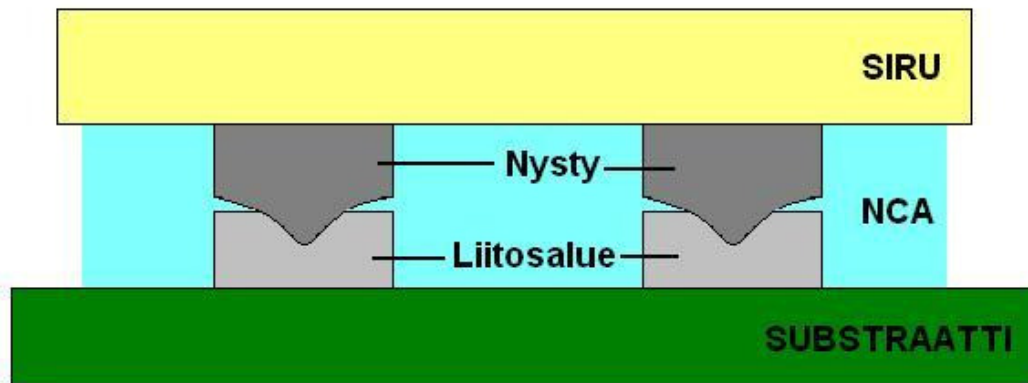
	ACF	ACP
Käyttö	Leikataan kalvo sopivan kokoiseksi ja sijoitetaan kohteeseen	Annostellaan esim. dispensoimalla tai stensiilin avulla
Johtavien partikkelien määrän arviointi	Helppoa	Vaikeaa
Minimijakoväli	Pienempi	Suurempi
Hinta	Korkeampi	Alhaisempi

Johtuen huomattavasti alhaisemmasta johtavien täytepartikkelien määrästä, ACA-liimoista on mahdollista saada mekaanisesti kestävämpiä ja sidoslujuudeltaan vahvempia kuin ICA-liimoista. ACF-liimoilla etuna on myös niiden helppo käytettävyys epätasaisilla pinnoilla. Verrattuna metallijuotteisiin, ACA-liitosten suurimpia etuja ovat niiden kyky toimia erilaisilla pinnoilla, kuten ITO-päällystetyllä lasilla tai joustavilla kalvoilla, alhaiset käsittelylämpötilat sekä mahdollisuus todella tiheään suunnitteluun. Toisaalta ACA-liitoksen toimintakyky ja luotettavuus ovat erittäin paljon herkempiä liitoksen suunnittelulle, substraatin ja komponentin ominaisuuksille sekä prosessointiolosuhteille. [9]

2.3 NCA

Myös sähköä johtamattomia liimoja käytetään usein elektroniikassa erilaisten materiaalien välisten mekaanisten liitosten luomiseen. Liitosliimalta vaaditaan riittävää veto- ja leikkauslujuutta jotta se kestäisi käytössä esiintyvää räsitystä, kuten mekaanisia iskuja, lämpörasituksia ja kosteutta. [3]

Joissain tapauksissa NCA-liimaa käytetään myös sähköä johtavan liitoksen luomiseen. Tällöin liimaa käytetään luomaan liitokseen mekaaninen jännitys kahden johtavan pinnan välille. Liiman tulee toimia täydellisenä eristeenä jotta oikosuluilta vältyttäisiin. Tutkimusten mukaan NCA-liitoksilla pystytään saavuttamaan suunnilleen samantasoinen luotettavuus kuin ACA-liimoilla. NCA-liitoksissa koko liitosalue toimii sähköisenä kontaktipintana, ja on täten huomattavasti suurempi kuin ACA:n satunnaisten partikkelien luoma kontaktipinta. NCA:ta käytettäessä usein sirunpuoleiset kontaktinystyt valmistetaan nastamaisiksi, jolloin liitosprosessissa kontaktiin kohdistettava paine puristaa nystyä kasaan parantaen liitoksen sähköistä kontaktia ja luotettavuutta. Kuvassa 7 on esimerkinomainen läpileikkaus NCA-liimalla luodusta liitoksesta [7, 10].



Kuva 7. NCA-liitoksen poikkileikkaus [10].

NCA-liitoksissa suositaan kultajohtimia, mikäli se on hintatason puitteissa mahdollista. Kullan käyttö mahdollistaa hyvin johtavan liitoksen muodostamisen minimaalisella puristusvoimalla. Esimerkiksi Japanissa on käytetty prosessia, jossa kultanystyinen siru liitetään lasiselle piirilevyille käyttäen ultraviolettivalolla kovetettavaa NCA-liimaa. Prosessissa piirilevy päällystetään liimalla, siru painetaan piirilevyn liitosalueita vasten ja liima kovetetaan UV-säteilytyksellä. Kovettumisen aikana tapahtuva liiman polymeraatio aiheuttaa kutistumista, jolloin liitosalueille kohdentuu mekaanista jännitystä mahdollistamaan jatkuvan sähköisen yhteyden. [7]

NCA-liimoja käytetään paljon näyttöteknologiassa sekä CSP (Chip Scale Package) –teknologiassa liitosmateriaalina niiden helpon käytettävyyden, halvan hinnan sekä alhaisten prosessointilämpötilojen vuoksi. NCA-liimojen etuna on myös niiden sovelluskohtainen muokattavuus. Liimaan voi lisätä ei-johtavia partikkeleita optimoimaan sen mekaanisia ominaisuuksia, lämpöominaisuuksia tai jopa hintaa. [11] Eräät sovellukset ovat olleet kaupallisessa käytössä jo useita vuosia. Pitkäaikaisessa käytössä on ilmentynyt vikaantumisia polymeerien relaksaation johdosta. [7]

2.4 Käyttökohteita ja tulevaisuuden näkymiä

Johtavat liimat hallitsevat tällä hetkellä vain muutamaa erikoisalaa markkinoilla. Esimerkiksi nestekidenäyttöjen (LCD, Liquid Crystal Display) lasiliitosten materiaalina liimat korvasivat metallijuotteet jo kauan sitten, ja tähän asiaan tulee tuskin muutosta. ACA-liimat ovat paneelinäytöissä vallalla oleva liitosmateriaali. Toinen sovellus, missä sähköä johtavia liimoja käytetään paljon, on RFID (Radio Frequency Identification) -tunnisteet. On kuitenkin todettava, että metallijuotteet ovat muutoin dominoiva liitostapa elektroniikan alalla. [7]

Jotta voitaisiin kuvitella ECA-liiman korvaavan metallijuotteet jossain tietyssä sovelluksessa, täytyy sille löytää merkittäviä hyötyjä verrattuna juotteisiin. On valmistajan kannalta kallista muokata tuotantolinjaa siten, että uuden liitosmateriaalin käyttö olisi mahdollista. Monet valmistajat pitävät liimojen ympäristöystävällisyyttä tärkeänä ominaisuutena, mutta se ei yleensä riitä muutoksen tekemiseen. Nykypäivän markkinoilla liimojen pitää kyseisessä sovelluksessa myös vähentää kustannuksia, parantaa tehokkuutta tai lisätä tuotettavuutta jotta niiden käyttöönottoa voitaisiin edes harkita. [7]

Yksi merkittävä etu liimojen tuotantoprosessissa verrattuna juotteisiin on niiden huomattavasti alhaisempi käsittelylämpötila. Juotteiden kanssa työskentelevät valmistajat joutuvat tekemään työtä huomioiden juotosprosessin korkeat lämpötilat, ja tämä usein näkyy lopputuotteiden hinnassa. Liimojen kanssa sen sijaan prosessointilämpötilat eivät kohoa missään vaiheessa erittäin korkealle. [7]

Esimerkiksi PET (polyeteenitereftalaatti) - pohjaiset joustavat piirilevyt hyötyvät erittäin paljon matalista käsittelylämpötiloista. Itse asiassa valtaosa lämpöstabiloituista polyesterifilmeistä vaatii alle 150°C:n prosessointilämpötiloja. Suurin osa ECA-liimoista pystytään kovettamaan tätä alhaisemmissa lämpötiloissa. Joustava elektroniikka onkin yksi liimateollisuuden lupaavimmista aloista. [7]

Toinen etu liimoilla on se, että niiden avulla voidaan tehdä erittäin tiheitä liitoksia. Sekä ICA- että ACA-liimoja pystytään käyttämään ongelmitta esimerkiksi kääntösiruliitoksissa. [7]

Etuna voidaan pitää myös sitä, että liimoilla liittäminen onnistuu lähes minkä tahansa substraatti- ja komponenttimateriaalin välillä. Joidenkin materiaalien välille on mahdollista luoda juoteliihosta. Esimerkiksi lasin päälle sijoitettuihin ITO-johtimiin liimaliitokset tekeminen onnistuu vaivatta, kun taas juotteiden kanssa saattaa tulla ongelmia saada metalli pysymään johtimen päällä. Tämä on syy miksi liimoja käytetään LCD-näyttöjen yhteydessä. [7]

Johtavia liimoja on alettu myös käyttämään monikerroslevyissä kerrosten välisinä johtimina. Joissain monikerroslevyissä käytetään ACA-kalvoa kerroksien välissä. Kun levyiltä vaadittu komponenttitiheys kasvaa ja entistä pienempien läpivientien poraamisen kustannukset nousevat, voidaan odottaa kasvua johtavien liimakerrosten suosiossa. [7]

Yksi ECA-teollisuuden merkittävistä tutkimuksenkohteista on sisäisesti johtavat polymeerit (ICP, Intrinsically Conductive Polymers). ICP-materiaalit ovat orgaanisia polymeerimateriaaleja, jotka kykenevät johtamaan sähköä. ICP:n kehitys on vielä alkuvaiheessa. Mikäli niistä saataisiin kehitettyä pitkäaikaisesti stabiili seos, teknologian tarjoamat mahdollisuudet avaisivat merkittävästi uusia ovia kehitykselle. Tästä syystä ICP-teknologiasta tehdään jatkuvasti tutkimusta. Laboratorio-olosuhteissa erään ICP-seoksen sähkönjohtavuus ollaan saatu jopa 70%:n tasolle kuparin johtavuudesta. Kuitenkin vielä toistaiseksi ICP-sovellusten vaikea prosessoitavuus sekä kemiallinen epästabiilius pitävät ne poissa kaupallisilta markkinoilta. [7]

Erilaiset teknologiat vaativat liitosmateriaalilta erilaisia toiminnallisuuksia. Taulukossa 4 on lueteltu eri teknologioiden tyypillisiä vaatimuksia sekä esimerkkejä mitä liimoja näiden teknologioiden sovelluksien kanssa voitaisiin käyttää. [3]

Taulukko 4. Eri teknologioihin soveltuvia liimoja [3].

Teknologia	Tyypilliset vaatimukset liimalle	Esimerkki käytettävästä liimasta
PBGA (Plastic Ball Grid Array)	Alhaiset rasitukset Korkea lämmönjohtavuus	Epoksiseokset Silikonimateriaalit
Kääntösirut	Johtavuus yhteen suuntaan Isotrooppisesti johtavat nystyt	ACA- tai ICA-liimat pastana tai kalvona
Hermeettiset sovellukset	Korkea sidosluku Alhainen kosteuden absorptio	Polyimidi Hopeatäytteiset syaniittiesterit
CSP	Alhaiset elastiset kertoimet Hyvä mekaaninen lujuus Rasitusten ja kosteuden sieto	Epoksiseokset Syaniittiesterit Silikonimateriaalit
Chip-on-Board	Alhaiset elastiset kertoimet Uudelleentyöstettävyys	ACA- ja ICA-liimat Epoksiseokset

On erittäin todennäköistä, etteivät johtavat liimat ainakaan vielä lähitulevaisuudessa ohita juotteiden asemaa markkinoiden selkeänä päävaihtoehtona liitosmateriaaliksi. Liimateknologian kehityksen jatkuessa etenkin luotettavuuden ja lämpöominaisuuksien suhteen tilanne saattaa kuitenkin vielä muuttua. Sitä ennen tutkijoiden on kuitenkin opittava tuntemaan liimateknologian ominaisuudet syvällisemmin, jotta ratkaisut suurimpiin ongelma-kohtiin, kuten iskunkestävyyteen, voitaisiin löytää. [12]

3 ELEKTRONIIKAN LUOTETTAVUUS

Elektroniikan tuotannossa vallitsevana kehityssuuntana on ollut panostaminen tuotteiden luotettavuuteen. Elektroniikan alan kirjallisuudessa tuotteen luotettavuus määritellään todennäköisyytenä sille, että tuote toimii ilman vikaantumisia annetun ajanjakson ajan määrättyissä olosuhteissa. Ajanjakso sekä olosuhteet ovat jokaiselle tuotteelle yksilöllisiä ja ne riippuvat tuotteen arvioidusta käyttöiästä sekä sille suunnitellusta käyttöympäristöstä. [13]

Elektroniikkalaitte voi vikaantua monilla eri tavoilla. Käyttöympäristössään laite kokee jatkuvasti erityyppisiä ja –tasoisia rasituksia. Ennen pitkää nämä rasitukset johtavat laitteen vikaantumiseen tavalla tai toisella.

3.1 Rasitustyypit

Jo elektroniikkatuotteen valmistusprosessi saattaa aiheuttaa sille rasituksia, jotka jo valmistusvaiheessa tai myöhemmin aiheuttavat vikaantumisia. Joissain tapauksissa vikaantuminen voi johtua jo tuotantoprosessissa syntyneestä virheestä. Erityisesti piisiruja valmistaessa osaan tuotteista ilmaantuu pieniä vikoja. Toisinaan nämä viat ovat niin vakavia, että koko siru joudutaan hylkäämään. Joskus taas vika voi olla vaikea havaita tuotantovaiheessa, tai sitä saatetaan pitää suhteellisen harmittomana, mutta se saattaa kuitenkin myöhemmin olla osatekijänä tuotteen vikaantumisessa. Tuotantovaiheessa syntyvät viat liittyvät usein materiaalin dimensionaalisiin ominaisuuksiin tai kemiallisiin epäpuhtauksiin. [14] Itse piirilevyn valmistuksessa on myös lukuisia vaiheita, joissa jokaisessa voidaan törmätä mahdollisiin ongelmiin luotettavuuden suhteen. Esimerkiksi hapetuksessa ja etsauksessa piiriin saattaa tarttua kemiallisia epäpuhtauksia. Valotusvaiheessa fotoresistin huonosti suunniteltu kuviointi tai resistin huono sijoitus voi myöhemmin aiheuttaa ongelmia tai valotusvaihe voi kestää liian kauan tai liian vähän aikaa. [13]

Elektroniikkalaitteen kuljetus aiheuttaa laitteelle monia rasituksia. Näistä vakavimpia lienee kuljetuksen aiheuttama värinä sekä äkilliset mekaaniset iskut. Värinää kuljetuksessa aiheuttaa teiden ja rautateiden epätasaisuudet sekä aerodynaamiset ilmiöt ilmassa. Nämä rasitukset voivat aiheuttaa tuotteen rakenteissa murtumia väsymisen tai äkillisten mekaanisten iskujen johdosta. [13]

Käyttöympäristö altistaa laitteen monille erilaisille rasituksille. Näitä voivat olla esimerkiksi korkeat ja matalat lämpötilat sekä niiden äkilliset vaihtelut, kosteus, kemiallinen altistus, säteily, paineen vaihtelut sekä erilaiset mekaaniset ja biologiset epäpuhtaudet kuten pöly ja mikrobit. [13]

Ääriämpötilat sekä lämpötilan vaihtelu voivat aiheuttaa monia erilaisia ongelmia laitteessa. Lämpötilan nopea vaihtelu aiheuttaa usein väsymistä etenkin liitosten kohdalla, mikäli tuotteen suunnittelussa ei ole otettu tarkasti huomioon rajapinta-aineiden lämpölaajenemiskertoimia. Korkeiden lämpötilojen aiheuttamat ongelmat liittyvät usein niiden edesauttamiin kemiallisiin reaktioihin piirin sisällä, tai niiden aiheuttamiin komponenttien sähköisten parametrien muutoksiin. Matalat lämpötilat aiheuttavat puolestaan mm. materiaalien haurastumista, sekä aiheuttavat sähköisiä ongelmia etenkin jos ympäristössä on paljon kosteutta. Tällöin kosteus tiivistyy laitteen pinnoille, jossa se voi sulaessaan aiheuttaa oikosulkuja tai korroosiota, mikäli laitteen pinnoilla on epäpuhtauksia. [13]

Yleisin korroosiota aiheuttava epäpuhtaus on suola, jota esiintyy etenkin merien lähistöillä. Korroosion aiheuttamia ongelmia ovat esimerkiksi johdinten väliset vuotovirrat, kasvaneet kontaktiresistanssit sekä rappeutuneet materiaalit. Laitteen käyttöympäristössä saattaa myös esiintyä laitteen toiminnalle haitallista säteilyä, joka on ongelma etenkin avaruusteknologiassa. Säteily saattaa aiheuttaa toiminnallisia ongelmia etenkin laitteen puolijohteissa. [13]

Laite voi kokea myös sähköisiä rasituksia, jotka saattavat syntyä joko ulkoisista tai sisäisistä lähteistä. Tyypillisiä ulkoisia sähköisiä rasituksia ovat esimerkiksi ESD (Electro-Static Discharge)-purkaukset, jotka saattavat aiheutua staattisesti varautuneen kappaleen, kuten ihmisen, kosketuksesta laitteeseen. ESD-purkauksesta vapautuva jännite on vähintään 3000V, mikäli ihminen tuntee purkauksen. Purkauksen tapahduttua piirin sisällä kulkeva hetkittäinen virta kohoaa suureksi, jolloin piirin sisäiset metalli- ja piiseosjohtimet voivat ilman riittäviä suoja mekanismeja tuhoutua höyrystymällä. [15] Taulukossa 5 on listattuna erilaisten komponenttien suuntaa antavia ylijännitteiden kestoisuuksia.

Taulukko 5. Komponenttien ylijännitekestoisuuksia [15].

Komponenttityyppi	Vioittumisjännite [V]
CMOS	250-3000
MOSFET	100-200
JFET	140-7000
Bipolaari-transistori	380-7000
Operaatiovahvistin	190-2500
Tyristori	680-1000
Kalvovastus	300-3000

Äkilliset virtapiikit puolestaan nostavat laitteiden lämpötiloja ja ilman kunnollisia suojakytkentöjä saattavat tuhota herkkiä komponentteja, kuten transistoreja. Mikäli korkea virta on jatkuvaa, se saattaa myös aiheuttaa komponenttien parametrien muutoksia. Sähkövirta aiheuttaa myös magneettikenttiä, jotka huonosti suunnitelluissa laitekokonaisuuksissa saattavat häiritä laitteen muiden osien toimintaa.

3.2 Vikaantumistyytit ja -mekanismit

Edellisessä kappaleessa mainitut rasitukset voivat johtaa laitteen vikaantumiseen monin eri tavoin. Usein lopullinen vikaantumismekanismi on monien rasitusten kombinaation lopputulema. Laitteen vikaantumismekanismilla tarkoitetaan sitä tapahtumien sarjaa, joka laitteen vikaantumiseen on johtanut. Vikaantumistyyppillä puolestaan tarkoitetaan sitä vikaa, joka laitteesta ulospäin näkyy vikaantumistapahtuman jälkeen. Taulukossa 6 on listattu elektroniikkakomponenteille ominaisimpia vikaantumistyyppijä. [14]

Taulukko 6. Komponenteille ominaisimpia vikaantumistyyppijä [14].

Komponentti	Vikaantumistyyppi
Vastukset	Parametrien muutos Avoin piiri
Kondensaattorit	Oikosulku Avoin piiri Liiallinen vuotovirta Parametrien muutos
Diodit	Korkea estosuuntainen virta Avoin piiri Oikosulku
Transistorit	Avoin piiri Kollektorin ja kannan välinen vuoto Liian alhainen vahvistus Oikosulku
Johtimet / liittimet	Avoin piiri Pätkiminen Oikosulku

Passiivikomponentit ovat yleisesti ajateltuna luotettavia. Nekin kuitenkin voivat vikaantua, etenkin korkeissa lämpötiloissa tai suuren sähköisen rasituksen alla. Pahimmassa tapauksessa passiivikomponentti saattaa alkaa käyttäytymään kuten oikosulku tai avoin piiri. Tietyt kemikaaliset epäpuhtaudet voivat johtaa myös passiivikomponentin kohinaisuuden lisääntymiseen. Puolijohteissa valtaosa vikaantumisista liittyy virrankulun ongelmiin. Ne saattavat olla perua jo tuotantoprosessissa ilmaantuneista lähes huomaamattomista vioista, tai huonosti suunnitellusta jäähdytyksestä jonka johdosta puolijohteen lämpötilat nousevat liikaa. [14]

Elektroniikkalaitteiden vikaantumisiin johtavat mekanismit voidaan yleisesti ottaen jaotella kahteen luokkaan; liikarasiuksesta johtuviin sekä käytöstä aiheutuvasta kulumisesta johtuviin mekanismeihin. Nämä voidaan vielä jaotella mekaanisen, sähköisen ja kemiallisen rasituksen alakategorioihin.

Mekaaninen liikarasiutus, kuten esimerkiksi äkilliset iskut, aiheuttavat laitteessa murtumia erityisesti juote- ja liimaliitoksissa. Jatkuva käyttö kuluttaa laitetta erilaisilla tavoilla. Mekaanisia kulumismekanismeja ovat esimerkiksi väsyminen ja viruminen. Väsymistä tapahtuu kun liitokseen kohdistuu syklistä rasitusta esimerkiksi lämpötilan vaihdellessa tai värinän johdosta. Väsyminen johtaa lopulta jännitysalueella murtumaan, joka juoteliitoksessa voi saada alkunsa esimerkiksi epätasaisuuksista juotteen sisällä tai pinnalla. Rasituksen jatkuessa särö lähtee kasvamaan, ja sen saavuttaessa kriittisen koon tapahtuu nopea lopullinen vaurioituminen. [16]

Virumisella puolestaan tarkoitetaan kappaleeseen kohdistuvan pitkäaikaisen jännityksen aiheuttamaa muodonmuutosta tai vauriota. Tällainen pitkäaikainen jännitys voi olla esimerkiksi korkea lämpötila, joka aineiden rajapinnoilla aiheuttaa erisuuruista lämpölaajenemiskertoimista johtuvia jännityksiä. [16]

Laitteella saattaa esiintyä myös sisäisiä sähköisiä ongelmia. Tällaisia ovat esimerkiksi elektromigraatio, jossa johtimen metalliatomit liikkuvat varauksenkuljettajien törmäyksien johdosta. Tämä on ongelma etenkin kapeissa johtimissa, ja pahimmassa tapauksessa saattaa johtaa avoimen piirin muodostumiseen. Elektromigraatio on käytöstä aiheutuvaa kulumista. [13] Yksi toistuva ongelma IC:iden (Integrated Circuit) kanssa on tilanne, jossa IC:n tehonsyötön ja maan välille syntyy matalaresistanssinen polku. Tätä ilmiötä kutsutaan englanninkielisellä termillä *latchup*, ja se johtaa piirin totaaliseen tuhoutumiseen. Latchup on yksi esimerkki sähköisestä liikarasiutuksesta. [14]

3.3 Liimaliitosten luotettavuus

Liimaliitoksia lähemmin tarkasteltaessa yleisimmät vikaantumismekanismit ovat adheesion menetys, korkea lämpöimpedanssi, sähköisen yhteyden katkeaminen tai liitosresistanssin kasvu sekä korrosio. Jossain määrin esiintyy myös vuotovirtoja metallien migraation johdosta sekä jopa oikosulkuja. [3]

Adheesion menetys, eli toisin sanoen delaminaatio tarkoittaa sitä, että liima irtoaa alustastaan tai erilliset liimakerrokset irtoavat toisistaan. Tämä voi johtaa IC:n, substraattien, jäähdytyslevyjen tai minkä tahansa liimalla liitettyjen komponenttien irtoamiseen piiristä. Onkin tärkeää saada liiman mekaaninen kestävyys sekä rajapintojen välinen adheesio säilymään laitteelle suunnitellun käyttöiän ajan kaikenlaisissa ympäristöissä. Delaminaatio voi myös olla vain osittaista. Tällöin liitos murtuu osittain, kunnes ajan myötä tapahtuu totaalinen irtautuminen. Delaminaatioon johtavia tai vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi [3]:

- Huonosti valittu liimamateriaali
- Riittämätön liiman kovettamisaika ja –lämpötila
- Riittämätön liimaliitospintojen puhdistaminen, jolloin pinnoille jää epäpuhtauksia
- Huono tai epätasainen liimakerros
- Jännitykset, jotka aiheutuvat esimerkiksi suurista lämpölaajenemiskerrointen eroista tai huonosta kovettumisesta
- Liimaliitoksen sisäiset ilma- tai kosteuskuplat
- Suuret määrät absorboitunutta kosteutta liimaliitoksessa

Liimaseoksen adheesiota on pyritty kehittämään erilaisilla menetelmillä. Inada et al. suorittaman tutkimusten mukaan johtavien partikkelien orientaation satunnaistaminen parantaa liiman adheesiokykyä. Myös erilaisilla lisäaineilla on pyritty parantamaan liimojen adheesiota. Tällaisia ovat esimerkiksi pinta-aktiiviset aineet, joita on käytetty parantamaan johtavien partikkelien ja liimamateriaalin välistä adheesiota. [17]

Laitteen ylikuumennus saattaa johtaa liiman lämpöimpedanssin kasvuun, joka puolestaan johtaa lämmönjohtavuuden huonontumiseen. Liiman lämmönjohtavuus on kriittisen tärkeä ominaisuus etenkin suuren tehonkulutuksen laitteissa, jotka tuottavat paljon lämpöä. [3] Esimerkiksi puolijohteista on ensiarvoisen tärkeää saada lämpö esteettä johtumaan jäähdytyslementteihin.

Sähköisen yhteyden katkeaminen tai liitosresistanssin kasvaminen saattavat aiheutua monista erilaisista mekanismeista. Delaminaation lisäksi tällaisia ovat esimerkiksi kosteuden aiheuttama johtavien liimojen sähköinen epästabiilisuus etenkin epäjaloilla metallipinnoilla sekä alumiinipinnoilla hapetus- ja korroosioprosessien johdosta. [3] Vesimolekyylit pääsevät helpokosti tunkeutumaan liimamateriaalin sisään ja oksidoivat liitosmateriaalin. Erinäiset tutkimukset ovatkin osoittaneet, että etenkin kosteissa ja lämpimissä olosuhteissa jaloja metalleja, kuten kultaa ja hopeaa sisältävissä liitoksissa esiintyy huomattavasti vähemmän liitosresistanssin kasvua kuin tinalyijy-seosta tai kuparia sisältävissä liitoksissa. [9]

Kosteus voi myös synnyttää liimaan ja rajapinnoille kuplia piirin kokoamisen, testauksen ja käytön aikana. Tämän on todettu aiheuttavan vikaantumisia esimerkiksi reflow-prosessin aikana, jolloin liima altistuu korkeille lämpötiloille. Tällöin kosteuden äkillinen höyrystyminen ja poistuminen johtaa rasituksiin jotka aiheuttavat murtumia sekä delaminaatiota. Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä *popcorning*. [3]

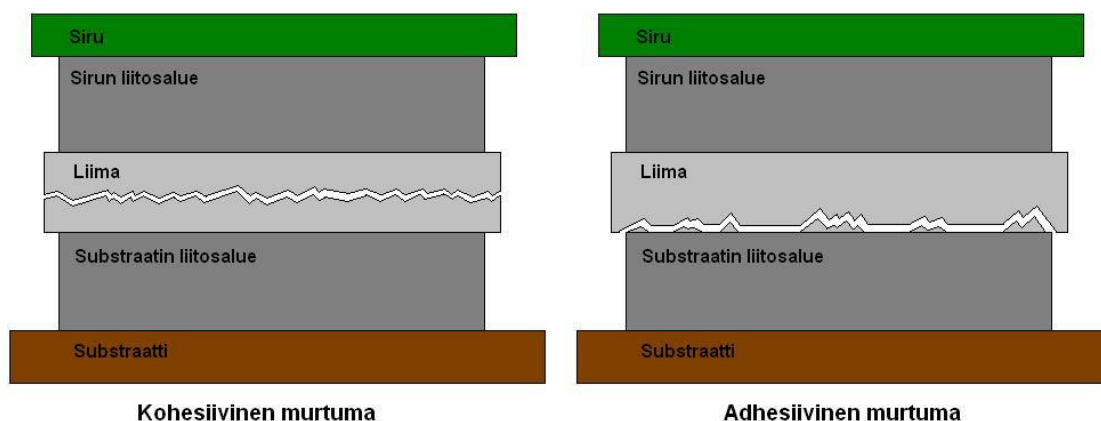
Käyttöolosuhteissa ECA-liima saattaa altistua moninaisille rasituksille. Lämpimät ja kosteat ympäristöt aiheuttavat ongelmia liimaliitosten luotettavuudelle. Liimamateriaaliin absorboitunut kosteus saattaa vaikuttaa heikentävästi myös liiman lämpöominaisuuksiin, kuten lasisiirtymälämpötilaan, kostutusominaisuuksiin, sekä mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi vetolujuuteen ja vikaantumiseen vaadittavaan jännitykseen. [17]

Yksi ongelmia aiheuttava tekijä johtavia liimaliitoksia käyttävissä laitteissa ovat irralliset liimapartikkelit. Raju käsittely tai jatkuva värinä saattaa aiheuttaa liimaliitoksissa partikkelien irtoamista. Nämä partikkelit saattavat kiillautua tiiviisti suunniteltujen vierekkäisten johdinvetojen väliin, ja mikäli kyse on johtavista partikkeleista ne saattavat aiheuttaa oikosulun. Ei-johtavat liimapartikkelit puolestaan saattavat törmätä ja vahingoittaa esimerkiksi ohuita johtoja tai kalvoja. Korkeaa luotettavuutta vaativille piireille voidaan tehdä PIND (Particle Impact Noise Detection)-testi, jolla varmistetaan ettei hermeettisesti suljetussa laitteessa ole irrallisia partikkeleita. Jos halutaan varmistaa, etteivät partikkelit aiheuta ongelmia myöskään testin jälkeen, piiri voidaan päällystää esimerkiksi epoksilla, uretaanilla tai paryleenillä, tarkoituksena immobilisoida irralliset partikkelit. [3]

On ilmeistä, että liiman luotettavuuteen vaikuttaa olennaisesti sen riittävä kovettumisaika ja -lämpötila, jotta saavutetaan tietty sähköisen ja mekaanisen toiminnallisuuden taso. Toisaalta, kun liima on kovettunut tämän tietyn tason yli, sen ominaisuudet eivät enää parannu merkittävästi vaikka sen annettaisiin kovettua kauemmin. [9]

3.3.1 Liimaliitosten iskunkestävyys

Kenties suurin ongelma liimaliitosten luotettavuudelle on niiden huono iskunkestävyys, ja tämä onkin yksi suurimmista esteistä johtavien liimojen laajalle käyttöönnotolle elektroniikassa. Ilman riittävää iskunkestävyyttä liimaliitokset eivät kestä tuotannossa ja normaalissa käytössä tapahtuvia iskuja. Erityisesti tämä on ongelma ICA-liitoksissa. [9] Mekaaniset iskut aiheuttavat liimaliitoksessa väsymistä, ja pahimmassa tapauksessa suoran murtuman. Murtuma saattaa syntyä liimamateriaalin sisälle, jolloin puhutaan kohesiivisestä murtumasta tai liiman ja komponentin tai substraatin välille, jolloin puhutaan adhesiivisestä murtumasta. Kuvassa 8 on esimerkkitaupukset kohesiivisestä ja adhesiivisestä murtumasta. [4]



Kuva 8. Esimerkkikuvat kohesiivisestä ja adhesiivisestä murtumasta [4].

NCMS (National Centre of Manufacturing and Science) on suunnitellut ICA-liitoksille pudotustestin, joka määrittelee onko liimaliitoksen iskunkestävyys riittävän hyvä. Sen mukaan ICA-liitoksilla valmistetun piirilevyn on kestävä kuusi pudotusta kovalle alustalle 1,5:n metrin (60:n tuuman) korkeudelta, jotta sitä voitaisiin kyseisessä sovelluksessa harkita juotteen korvaajaksi. [17]

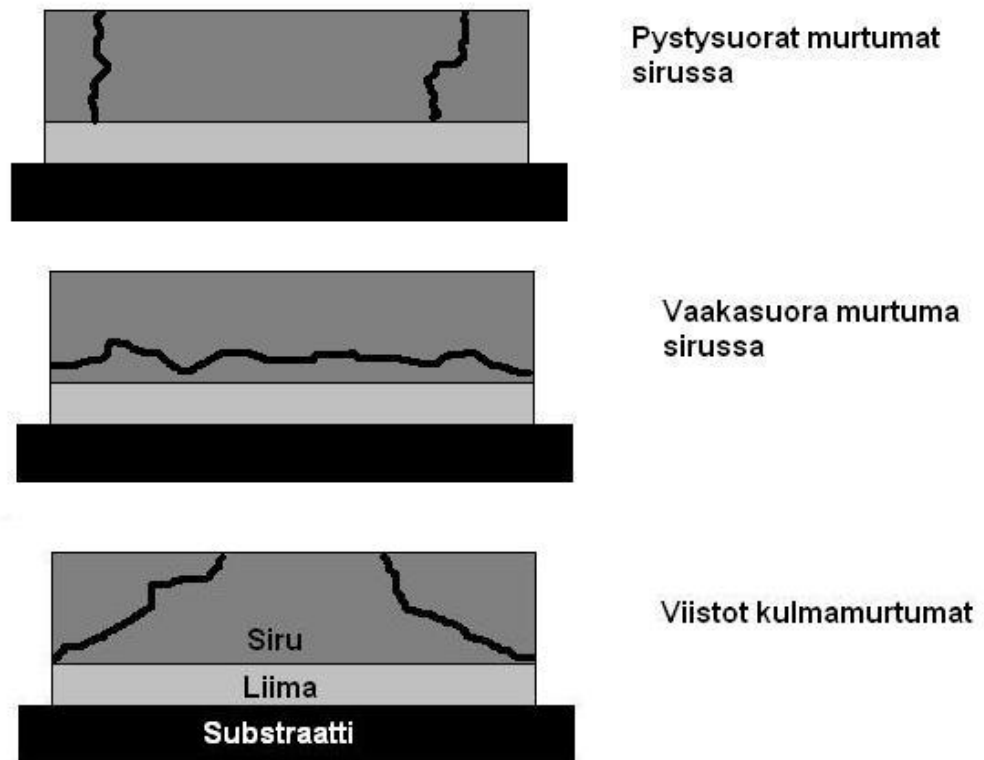
Xue et al. ovat toisaalta kehittäneet toisenlaisen pudotustestin, jossa tutkitaan ECA-liimojen iskunkestävyyttä putoavan kiilan avulla. Testissä ECA-liiman avulla valmistettu piirilevy kiinnitetään pystysuunnassa kiilaan, joka päästetään putoamaan kanavaa pitkin kovalle alustalle. Tämän testin etuna on se, että liiman iskunkestävyyden määrittämisen lisäksi sen avulla pystytään saamaan hyödyllistä tietoa esimerkiksi liimamateriaalin iskun aikana kokemista värähtelytaajuuksista. Tätä informaatiota voidaan käyttää hyväksi teknologian jatkokehityksessä. [17]

Sähköä johtavien liimojen iskunkestävyyttä pyritään jatkuvasti kehittämään. Erinäisissä tutkimuksissa on todettu, että ICA-liimalle ominainen häviökerroin näyttelee suurta osaa pudotustestien tulosten, ja täten myös liiman iskunkestävyyden suhteen. Kyseisissä tutkimuksissa käytettiin FEA-analyysiä apuna iskun aikana liimassa esiintyvien luonnollisten värähtelytaajuuksien arvioinnissa. Tulokset osoittivat, että FEA-analyysin arvioimalla taajuusalueella korkean häviökertoimen omaavat liimat suoriutuivat pudotustesteistä parhaiten. [17]

Liimojen iskunkestävyyttä on pyritty parantamaan esimerkiksi johtavien partikkelien pitoisuutta vähentämällä. Tämän menetelmän kanssa tulee kuitenkin olla tarkkana, sillä se saattaa herkästi johtaa sähköisten ominaisuuksien heikkenemiseen. On myös pyritty kehittämään hartsimateriaaleja, jotka pystyisivät absorpoimaan iskusta syntyvän energian itseensä. Yksi tutkimuskohde liimaliitosten iskunkestävyyden parantamiseksi ovat erilaiset liitosten päälle lisättävät pinnoitteet. [17]

Keil et al. löysivät tutkimuksissaan yksinkertaisen keinon parantaa liimaliitoksen iskunkestävyyttä. He lisäsivät liimaseokseen mikrokokoisia hiilikuituja. Niiden avulla mekaanisten iskujen aiheuttamat voimat jakautuivat tasaisemmin liitokseen. He päätyivät tutkimuksissaan myös siihen tulokseen, että pudotustesteistä selviämisprosentti korreloi suoraan liiman häviökertoimen kanssa. Korkeamman häviökertoimen omaavat liimat selvisivät testeistä paremmin. [17]

Liimaliitoksen murtumisen lisäksi myös itse piisiru saattaa murtua eri tavoilla suurten mekaanisten jännitysten johdosta. Kuvassa 9 on esitelty erilaisia mahdollisia murtumia sirussa. [3]



Kuva 9. Erityyppisiä murtumia liimaliitoksissa ja siruissa. [3]

Liiman luotettavuutta ja sen vaikutusta koko elektroniikkalaitteen toimintaan tulisi pohtia jo liimaa valittaessa, ja valinta tulisi suorittaa laitteen suunnittelun yhteydessä. Valintaan vaikuttavat liiman käyttötarkoitus, odotettu käyttöympäristö sekä sille suunniteltu käyttöikä. [3]

4 LUOTETTAVUUSTESTAUS ELEKTRONIIKASSA

Nykyaikaisen elektroniikkalaitteen suunnittelussa suuri osa ajasta käytetään laitteen testaukseen. Suunnittelijan on todella vaikeaa ennustaa laitteeseen käytössä kohdistuvat rasitukset, ja näiden vaikutus laitteen toimintaan. Erilaisten luotettavuustestien avulla voidaan simuloida valtaosaa ympäristössä esiintyvistä rasituksista, sekä myös näiden kombinaatioita. Suunnitteluvaiheessa testeistä saatavaa tietoa voidaankin käyttää tuotteen luotettavuusominaisuuksien kehittämiseen.

Karkeasti jaoteltuna luotettavuustestit voidaan jakaa kahteen kategoriaan: testeihin joissa pyritään vikaannuttamaan laite, ja testeihin joista laitteen toivotaan selviävän ehjänä. Jälkimmäisessä tapauksessa testit ovat yleensä laadullista testausta, jossa pyritään osoittamaan että tuote täyttää sille asetetut laadulliset kriteerit. Usein laadullisissa testeissä tutkitaan tuotteen vikaantumisprosenttia joko tietystä otannasta tai tietyn ajanjakson aikana. [18]

Suuri osa nykyaikaisista luotettavuustesteistä kuuluu kuitenkin ensimmäiseen kategoriaan. Testien pyrkimyksenä on saada laite vikaantumaan, jotta sen heikot kohdat saataisiin selville ja vaikutettua niihin seuraavalla suunnittelusykliä. Usein vikaantuminen varmistetaan rasiustason nostolla askeleittain. Mikäli laite ei tietyllä tasolla tiettyä rasitusta vikaannu, nostetaan rasituksen tasoa ylöspäin, ja näin jatketaan kunnes laite vikaantuu.

4.1 Kiihdytetyt luotettavuustestit

Edellä mainitun kaltaisia korkean rasiustason testejä kutsutaan joko kiihdytetyiksi elinikätesteiksi (Accelerated Life Tests, ALTs) tai voimakkaasti kiihdytetyiksi elinikätesteiksi (Highly Accelerated Life Tests, HALTs). Eroina näillä kahdella on testeissä käytetty näytemäärä sekä aika. HALT:ssa näytemäärät ovat pienempiä ja sekä kiihdytyskertoimet suurempia. Tällöin tulokset saadaan nopeammin ja sitä kautta tuote nopeammin takaisin suunnittelupöydälle. Toisaalta ALT:n tulokset ovat tarkempia ja realistisempia. [18] Vikaantumismekanismien ja niiden esiintymistodennäköisyyksien määrittämisen lisäksi testien tavoitteena on usein määrittää tuotteen käyttöolosuhteiden ja tuhoutumiseen johtavien olosuhteiden rajat. [19]

Syitä, miksi tuotteita testataan korkeilla rasiustasoilla joihin ei normaalikäytössä todennäköisesti törmättäisi, on monia. Ensinnäkin se helpottaa ennakoimaan kaukana tulevaisuudessa tapahtuvia vikaantumisia ja syitä jotka niihin johtavat. Toiseksi, kiihdytettyjen testien avulla on helpompi selvittää tuotteen vikaantumistodennäköisyys,

sekä mahdollisesti arvioida tuotteen keskimääräistä elinikää. Lisäksi tuotteen testaamiseen käytetty aika ja raha ovat valmistajalle arvokkaita. Kiihdytetty testaus vähentää testaukseen kulutettua aikaa, luonnollisesti vähentäen siihen käytettyjä resursseja sekä nopeuttaen tuotteen lopullista markkinoilletuontia. [14]

Nykyaikaisimmat kiihdytetyt testit koostuvat monesta vaiheesta. Alkuvaiheissa pyritään määrittämään laitteelle potentiaalisia vikaantumismekanismeja sen oletetuissa käyttöolosuhteissa. Tämän jälkeen suunnitellaan, miten ennakoituja ja ennakoimattomia vikaantumisia aiheuttavat rasitukset saataisiin tehokkaimmin sisällytettyä testiin. Varsinainen testivaihe yleensä aloitetaan yksittäisestä rasituksesta, jonka tasoa nostetaan kunnes laite vikaantuu. Tätä vaihetta suoritetaan jokaiselle alkuvaiheessa suunnitellulle rasitukselle niin kauan kuin järkevältä tuntuu. Lopuksi vielä prosessia toistetaan erilaisilla rasitusten kombinaatioilla, niissä rajoissa kuin se on mahdollista käytettävillä testilaitteistoilla. [14]

Kun testattava tuote lopulta saadaan vikaantumaan, on testaajan syytä miettiä kahta kysymystä. Voiko tämä vikaantumismekanismi esiintyä normaalikäytössä, kun aikaväli on pidempi ja rasitukset mahdollisesti erilaiset? Entä onko sen esiintymistä mahdollista estää kohtuullisella vaivalla? Mikäli vastaus molempiin on kyllä, testi on onnistunut, sillä se on antanut tietoa miten parantaa tuotetta. [14]

On olemassa lukuisia erilaisia korkean kiihdytystason testimenetelmiä. Ne ovat pääpiirteiltään samanlaisia, mutta eroavat hieman painoarvoiltaan. Toiset testit käyttävät enemmän aikaa vikaantumisten tarkkaan analysoimiseen, kun taas toiset pyrkivät mahdollisimman nopeaan suunnittelusykliin jolloin tuote saadaan markkinoille mahdollisimman nopeasti. Esimerkki tarkkaan analyysiin painottuvasta testimenetelmästä on FMVT (Failure Mode Verification Test, vikaantumistyyppin varmennustesti), jossa tyypillisesti käytetään apuna tuotteen suunnitteluvaiheen alussa suoritettua vikaantumisanalyysiä, kuten FMEA:ta (Failure Mode Effects Analysis, vikaantumistyyppin syntyanalyysi). FMVT:ssä käytetään hyvin pieniä näytemääriä, usein ainoastaan yhtä näytettä. [18] Vastaavasti mahdollisimman nopeisiin tuloksiin pyrkivästä testimenetelmästä esimerkkinä voidaan mainita MEOST (Multiple Environment Over Stress Test, monen olosuhdemuuttujan elinikätesti). Tehokkuuteen, ajankäyttöön sekä kustannuksiin suhteutettuna moni asiantuntija pitää MEOST:ia tämän hetken parhaana luotettavuustestausmetodina. Se vähentää esimerkiksi takuu-suunnittelu- ja testauskustannuksia. Se säästää myös aikaa, joka kuluu suunnittelu- ja tuotantotsykliin. [20] Myös käytetyissä rasitustasoissa on eroja. Taulukossa 7 on esitelty eri testien käyttämiä rasitustasoja:

Taulukko 7. Testeissä käytettyjä rasitustasoja [20].

200%	Tuhotaso
~170%	Ylirasitustason maksimi
~130%	Toiminnallisuustaso
100%	Käyttötason maksimi
0%	Huoneympäristö

Käyttötason maksimi määritellään tutkimalla suunnittelussa spesifikoituja käyttötasoja, asiakkaan vaatimuksia sekä loppukäytössä todennäköisesti esiintyviä maksimikäyttötasoja. Näistä valitaan suurin raskaus käyttötason maksimiksi. Toiminnallisuustasolla tarkoitetaan raskautasoa, jossa tuote vikaantuu palautuvasti siten, että tasoa laskemalla vikaantuminen korjaantuu. Tuhotaso on luonnollisesti taso, jossa laite tuhoutuu peruuttamattomasti. Ylirasituksen maksimitaso on suunnilleen puolivälissä kahta edellistä. [20]

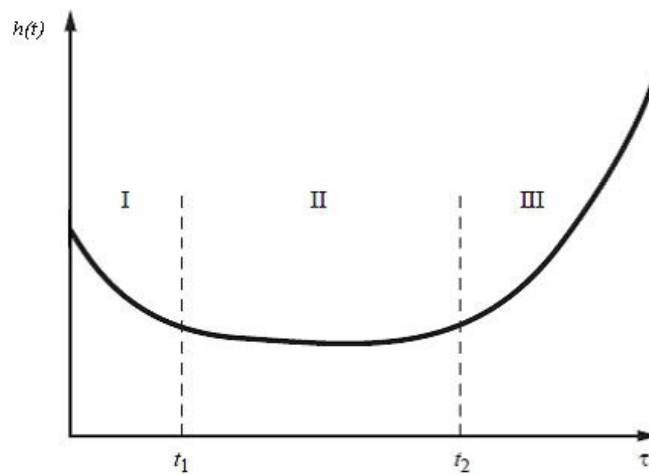
Useat voimakkaasti kiihdytetyt testit (esim. HALT, FMVT) vievät raskautuksen lopulta hyvin lähelle tuhotasoa. Osa luotettavuustutkijoista puolestaan on sitä mieltä, että on resurssien tuhlausta viedä raskautukset niin korkealle. Heidän suosimissa testeissä käytetään yleensä ylirasituksen maksimitasoa korkeimpana raskautustasona. Esimerkiksi MEOST:n kehittäjät jakavat tämän näkemyksen. [20]

Kiihdytettyjä testimenetelmiä kehitetään myös palvelemaan tuotannon prosesseja. Tämä tarkoittaa sitä, että kun laite on saatu tuotantolinjalle, on valmistajan mahdollista suorittaa laadunvalvontaa testin pohjalta rakennetun raskautustestiympäristön avulla. Tämä ympäristö on yleensä optimoitu kyseiselle tuotteelle. Tuotantolinjalta asetetaan esimerkiksi kuukauden välein muutama näyte testiin, joka on tyypillisesti hieman pienempi raskautustasoltaan ja –määrältään kuin varsinainen suunnitteluvaiheessa käytetty testi. Tässä vaiheessa testiin saatetaan altistaa myös tahallisesti vioitettuja näytteitä, jotta voitaisiin varmistua siitä että testi pystyy havaitsemaan violliset laitteet. [14]

Kiihdytetyissä testeissä on myös omat ongelmansa. Testin tulosten tarkkuuteen vaikuttavat monet asiat. Raskautustyyppien lisääminen toisaalta kasvattaa testin tarkkuutta, mutta toisaalta lisää tarvittavien näytteiden määrää. Lisäksi kiihdytetyissä olosuhteissa saatujen tulosten muuttamiseksi normaaleita olosuhteita vastaaviksi on löydettävä testiin soveltuva matemaattinen malli. Mallin valinta on oleellinen testin tarkkuutta ajatellessa, koska väärä malli johtaa suurella todennäköisyydellä vääriin tietoon. Vääriä tietoja voidaan saada myös, mikäli tuotteen vikaantumismekanismi määritellään virheellisesti. [19] Yksi ongelma testin suunnittelussa on ajankäytön vaikea ennustettavuus. Kun tuotetta halutaan testata vikaantumiseen asti, testiin kuluva aika vaihtelee joskus runsaastikin.

Tuotteen elinikää voidaan kuvata esimerkiksi kylpyammekäyrällä. Käyrä muodostaa laakson muotoisen kuvaajan, joka esitellään kuvassa 10. Alkuosa (I-vaihe) kuvaa tuotteen sisäänajokautta, eli aikaa ennen markkinoille laskemista. Tällöin vikaantumistaajuus on korkealla, mutta sen suunta on jatkuvan testauksen ja tuotteen kehityksen myötä alaspäin. Tällöin valtaosa vikaantumisista johtuu mm. hajonneista tai viollisista komponenteista sekä tuotantoprosessin virheistä. Kuvaajan keskivaihe (II-vaihe) esittää tuotteen käyttöaikaa, jolloin sen vikaantumistaajuus on alimmillaan ja suhteellisen vakio. Käyttöajan vallitseva vikaantumismuoto on satunnaisvikaantumiset. Tuotteen ikääntyessä (III-vaihe) vikaantumistaajuus lähtee taas jyrkkään nousuun. Tällöin vikaantumiset alkavat johtua enenevässä määrin vanhentumisen aiheuttamasta kulumisesta. Kuvaajan pysty akselin $h(t)$ tarkoittaa tuotteen vikaantumistaajuutta

kyseisellä ajanhetkellä. Vaaka-akselille merkityt ajanhetket t_1 sekä t_2 kuvaavat suunnilleen niitä ajanhetkiä jolloin vaihesiirtymä tapahtuu. [13]



Kuva 10. Kylpyammekäyrä. [13]

Varsinaisista testeistä saatujen tulosten muuntaminen luettavaan muotoon onnistuu esimerkiksi erilaisilla elinikäjakaumilla. Ehkä eniten käytetyin näistä on Weibull-jakauma, joka sopii kuvaamaan kaikkia kolmea eliniän vaihetta, ja siksi se onkin kenties monipuolisin elinikäjakauma. [21]

Tämän työn puitteissa on tarkoitus käyttää kahdenlaisia testejä. ICA-liimoilla valmistettujen liitosten iskunkestävyyttä testataan pudotustesteillä. Lisäksi osa testilevyistä ikäännytetään, jotta saadaan tutkittua sen vaikutus liiman iskunkestävyyteen. Seuraavissa kappaleissa tarkastellaan näitä menetelmiä tarkemmin.

4.2 Ikäännyttäminen

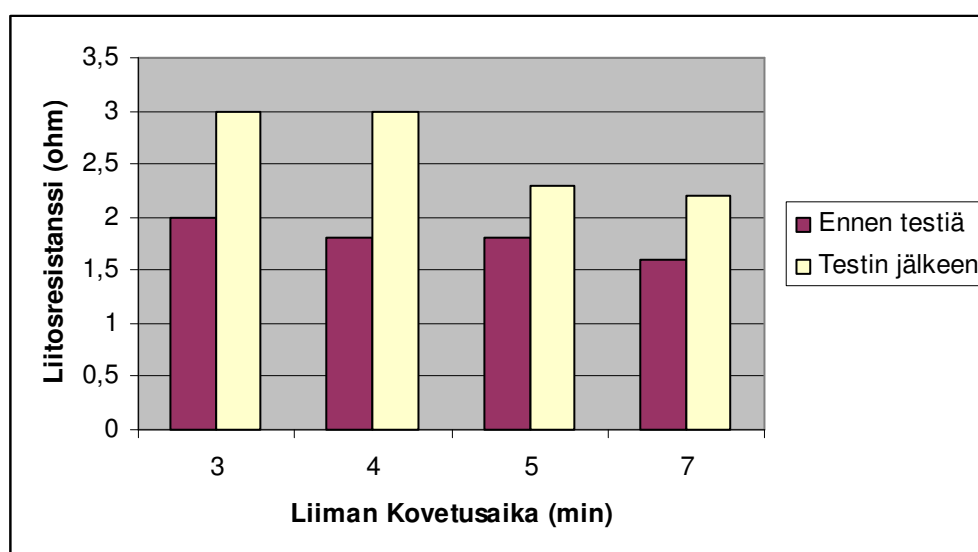
Kiihdytetty ikäännyttäminen on testityyppi, jossa käytetään kovennettuja olosuhteita kuten lämpöä, kosteutta, värinää jne. nopeuttamaan tuotteen normaalia ikääntymisprosessia. Sen avulla pyritään tutkimaan normaaleissa käyttöolosuhteissa esiintyvien rasitusten pitkäaikaista vaikutusta tuotteeseen lyhyemmässä ajassa, tyypillisesti laboratoriossa käyttäen standardisoituja menetelmiä.

Yksi yleisimmistä sähköisen liitoksen vikaantumissyistä ovat murtumat, jotka aiheutuvat esimerkiksi komponentin ja piirilevyn CTE-erojen aiheuttamista jännityksistä muuttuvissa lämpötiloissa. Mm. tämänkaltaisten ongelmien vaikutusta laitteen luotettavuuteen pyritään tutkimaan ikäännyttämistesteillä. Usein ikäännyttämistestit liitetään jonkun toisen testityypin, kuten pudotustestien yhteyteen, jotta saataisiin selville ikääntymisen vaikutus kyseiseen luotettavuusominaisuuteen. On suotavaa myös tutkia eriateisen ikäännyttämisen vaikutus tuotteeseen. Tämä tarkoittaa sitä, että osa testilevyistä on hyvä pitää ikäännyttävissä olosuhteissa pitempään kuin toiset. Tyypillisiä porraskäyviä on esimerkiksi 3, 10, 20 ja 40 päivää. Myös

ikäännyttämislämpötilaa voidaan vaihdella, usein se on kuitenkin jotain 85 °C:n ja 175 °C:n välillä. [22]

Nykyisillä sähköä johtavilla liimoilla on riittävän hyvät johtavuusominaisuudet valtaosassa sovelluksista. Silti lähes kaikki sähköä johtavat liimatyyppit reagoivat korkeisiin lämpötila- ja kosteusolosuhteisiin kohonneilla liitosresistanssiarvoilla. Näin käy etenkin kun on kyseessä liitos epäjalon metallin kanssa. [23]

Esimerkkinä ikäännyttämisen vaikutuksesta liimaliitoksen resistanssiin voidaan esittää Liu et al. [9] tekemä koe. Kokeessa tutkittiin epoksipohjaisen ICA-liitoksen resistanssia ennen ja jälkeen 1000 tuntia kestäneen ikäännyttämisen. Ikäännytys suoritettiin 85 °C:ssa sekä suhteellisella kosteusprosentilla 85%. Lisäksi käytettiin eri mittaisia liiman kovetusaikoja. Kuvassa 11 on esitelty kokeen tulokset:



Kuva 11. Ikäännyttämisen ja kovetusaajan vaikutus liimaliitoksen resistanssiin [9].

Kuvasta huomataan, että lyhyillä kovetusaajoilla liitosresistanssi kasvaa ikäännytyessä jopa 50%. Sen sijaan kun kovetusaika on riittävä, jää resistanssin kasvukin kohtuullisen pieneksi. Syy tähän on se, että alikovettunut liimaliitos absorboi kosteutta huomattavasti helpommin kuin riittävästi kovettunut liitos. Kosteus puolestaan aiheuttaa epäjalossa metalleissa hapettumista. Kun vastaava testi suoritettiin jaloja metalleja sisältäneillä liitoksilla, ei liitosresistanssi kasvanut juurikaan, edes pienimmillä kovetusaajoilla. [9]

NCMS on määritellyt liimaliitoksen resistanssistabiiliuden ehdoksi sen, että liitosresistanssi ei nouse enempää kuin 20% 500:n tunnin 85°C/85% ikäännytystestin aikana. [5]

4.3 Pudotustestit

Pudotustestausta suoritetaan monesta syystä: helpottamaan vahvempien ja iskunkestävämpien kannettavien tuotteiden suunnittelua, simuloimaan tuotannossa,

kuljetuksessa ja käytössä esiintyviä rasituksia sekä kiihdytetyn elinikätestauksen yhteydessä. [24]

Karkeasti pudotustestaus voidaan jakaa kahteen kategoriaan: rajoitettuun piirilevytason testaukseen sekä vapaaseen tuotetason testaukseen. Näistä huomattavasti yleisempää on rajoitettu piirilevytason testaus. Siinä testaus suoritetaan tarkasti kontrolloiduissa olosuhteissa usein standardinmukaisella piirilevyllä ja komponenteilla. Sen etuja ovat mm. toistettavuus sekä iskuolosuhteiden kontrolloitavuus. Tällä tarkoitetaan, että iskupulssin leveys ja muoto pystytään suhteellisen tarkasti määrittämään pudotuskorkeuden ja iskupinnan materiaalin avulla. Lisäksi satunnaiset iskun jälkeiset kimmokkeet pystytään yleensä eliminoimaan. Tähän toisaalta liittyy myös rajoitetun piirilevytason testauksen suurin heikkous. Nimittäin tällaiset kimmokkeet ovat tyypillisiä myös luonnollisissa olosuhteissa. Viimeisimmät tutkimukset ovat osoittaneet, että nämä kimmokeiskut näyttelevät usein isoa osaa laitteen vikaantumisessa. [24]

Vapaassa tuotetason testauksessa puolestaan testiobjektina on kokonainen tuote, joka päästetään vapaasti putoamaan kovalle pinnalle. Sen avulla pystytään simuloimaan tuotteen käyttöolosuhteissa kokemia rasituksia hyvin. Toisaalta testin toistettavuus on erittäin huono, koska tuotteen orientaatiota iskuhetkellä sekä mahdollisia kimmokkeita on mahdoton ennustaa etukäteen. [24]

4.3.1 Standardi JESD22-B111

Elektroniikkalaitteiden testauksessa tarvitaan standardeja testien yhdenmukaistamiseksi, sekä testien tulosten vertailun helpottamiseksi. Pudotustestien osalta standardisointi on vielä alkuvaiheessa, mutta yleisimmin pudotustestien pohjana käytetään JEDEC:n (Joint Electron Devices Engineering Council) luomaa JESD22-B111 (Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products) standardia, joka koskee piirilevytason pudotustestiä kannettavien elektroniikkalaitteiden komponenteille. [25] Standardi on tarkoitettu normaaleita juoteliitoksia sisältäville laitteille, mutta koska liimaliitoksille ei ole vielä kehitetty omaa pudotustestistandardia, käytetään sitä tässä työssä suoritettavien testien pohjana. Seuraavaksi tarkastellaan JESD22-B111:tä tarkemmin. Muita pudotustestaukseen liittyviä standardeita ovat mm. JESD22-B110A (Subassembly Mechanical Shock) [26], jonka arvoja JESD22-B111 käyttää testiparametreina sekä IPC-9703 (Mechanical Shock Test Guidelines for Solder Joint Reliability), joka käsittelee juoteliitosten mekaanisten iskutestien ohjeistuksia. [27]

JESD22-B111 on kehitetty määrittämään ja vertailemaan piirilevyjen sekä pintaliitoskomponenttien iskunkestävyyttä standardoidussa pudotustestissä. Se standardisoi käytetyn testipiirilevyn, laitteiston sekä itse testimetodin, siten että testi on helppo järjestää uudestaan. Testin tulosten korrelaatiota käyttöolosuhteisiin ei ole vielä saatu varmennettua, joten toistaiseksi sitä tuleekin lähinnä käyttää komponenttien vertailuun ja laitteiden suunnittelun apuvälineenä, eikä niinkään laadunvalvontamenetelmänä. [25]

Testattavien komponenttien maksimikooksi on määritelty 15mm * 15mm, koska tätä suurempia komponentteja ei yleensä käytetä kannettavissa elektroniikkalaitteissa. Testissä voidaan käyttää lukuisia erilaisia puolijohdekomponentteja ja –kokoonpanoja sekä kaikenlaisia passiivisia komponentteja. Kaikki testissä käytettävät komponentit tulee liittää daisy-chain rakenteella, jotta komponenttiliitosten resistanssimittaukset onnistuisivat ongelmitta. Daisy-chain rakenteessa kontaktit verkotetaan sarjaan siten, että jo yhden liitoskontaktin vaurioituminen huomataan resistanssimittauksessa. Rakenne voidaan valmistaa joko sirulle tai vaihtoehtoisesti komponentin substraattitasolle. [25]

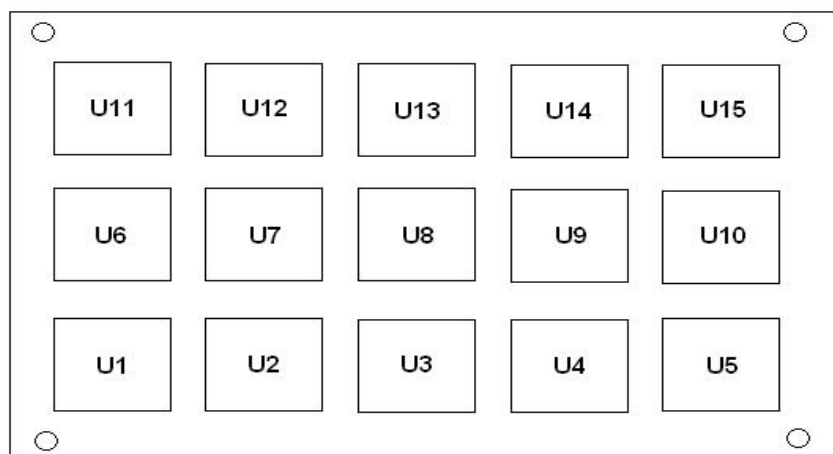
Testissä määritelty piirilevy on mitoiltaan 132mm * 77mm ja paksuudeltaan 1mm. Piirilevyn materiaalina tulee käyttää yleisiä käytössä olevia materiaaleja, kuten FR4:ä. Piirilevyksi suositellaan 1+6+1 monikerrospiirilevyä, jossa päällimmäisessä kerroksessa on tyypillisesti liitosalueet ja johdotukset ja alimmaisessa näiden lisäksi daisy-chain rakenne. Kuudessa välikerroksessa on kuparia, jonka peittoalueet on tarkemmin nähtävissä taulukossa 8. Neljän sisimmäisen metallikerroksen paksuus on 18 mikronia, ja neljän päällimmäisen 35 mikronia. Metallikerrosten väleissä on eristekerros tyypillisesti materiaaliltaan FR4:ää. Uloimmaisten eristekerrosten paksuus on 65 mikronia ja sisimmäisten 130 mikronia. Näiden mittojen on katsottu vastaavan yleisesti kannettavissa laitteissa käytettävää piirilevyrakennetta. [25]

Taulukko 8. Testilevyn rakenne [25].

Piirilevyn kerros	Paksuus (mikronia)	Kuparin peittoalue (%)
Juotosmaski	20	
Kerros 1	35	Liitosalueet ja johdotukset
Kerros 2	35	40% daisy-chain rakenne mukaanluettuna
Kerros 3	18	70%
Kerros 4	18	70%
Kerros 5	18	70%
Kerros 6	18	70%
Kerros 7	35	40%
Kerros 8	35	Liitosalueet, johdotukset ja daisy-chain rakenne
Juotosmaski	20	

Levyn ylä- ja alapuolen piirilevysuunnitelman tulee olla symmetrinen. Koska tyypillisellä piirilevyllä voi olla kombinaatio perinteisistä liitosalueista sekä mikroläpivienneistä, halutaan standardin avulla testata molempia. Tällöin piirilevyn toiselle puolelle komponenttien liitosalueet tehdään mikroläpivienteinä ja toiselle perinteiset liitosalueet. Levyä testataan kuitenkin niin, että komponentit ovat kiinnitetty vain yhdelle puolelle piirilevyä kerrallaan, ellei etukäteen tiedetä lopputuotteessa olevan komponentteja molemmin puolin. [25]

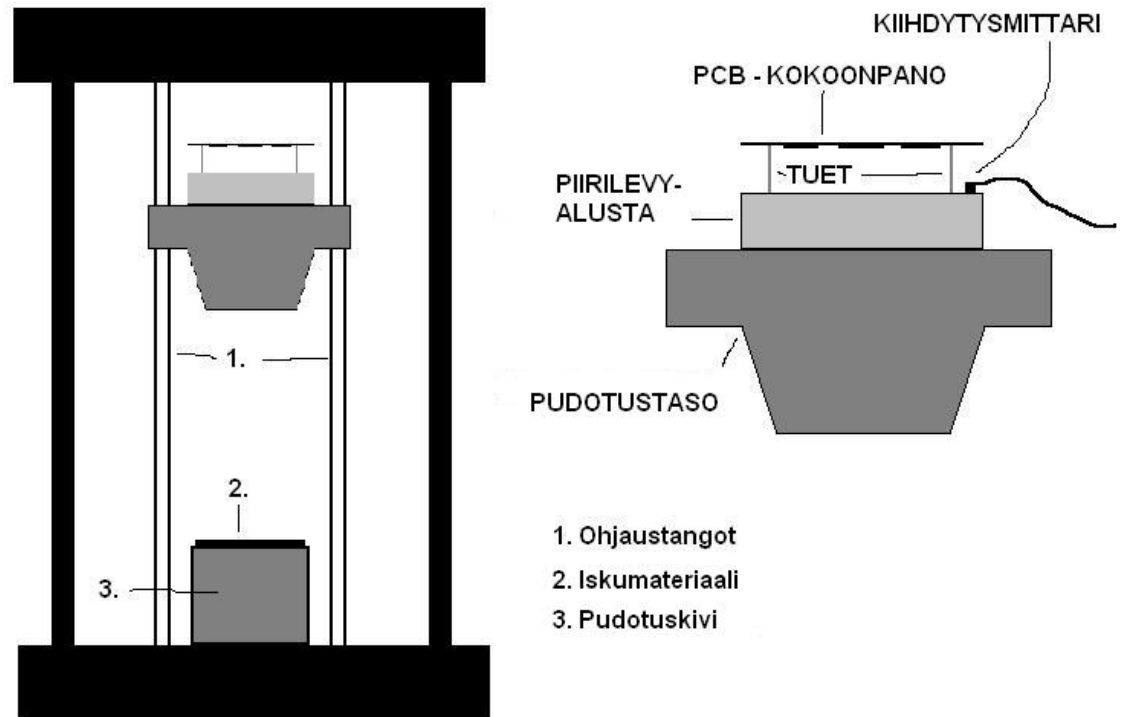
Testipiirilevylle voidaan sijoittaa maksimissaan 15 komponenttia kerrallaan. Komponenttien välillä tulee olla x-suunnassa vähintään 5 mm:ä sekä y-suunnassa 8 mm:ä. Yhdelle puolelle testilevyä tulee asettaa vain samankokoisia ja -tyyppisiä komponentteja, muuten tulosten analysointi vaikeutuisi liikaa. Testilevyn jokaisessa kulmassa tulee olla reikä ennalta määritetyssä paikassa pudotustestin laitteistoa varten. Testilevy kasataan käyttäen hyvin tunnettuja menetelmiä. [25] Kuvassa 12 on esitelty suositeltava layout testilevylle.



Kuva 12. Standardin JESD22-B111 mukainen piirilevysuunnitelma [25].

Mikäli komponentteja asetellaan levylle täydet 15, katsotaan riittäväksi määräksi testilevyjä 4, jolloin komponentteja tarvitaan yhteensä 120 (levyistä käytetään molemmat puolet). Neljä levyä riittää, vaikka komponentteja olisi vain 5 per puoli. Mikäli levyllä on vain yksi komponentti, on syytä käyttää vähintään 10 testilevyä. Mikäli komponentteja käytetään vähemmän kuin täydet 15, on syytä miettiä niiden sijoittelua tarkasti. Ensimmäisenä tulee käyttää levyn keskikohta (U8), koska siinä on voimakkain vääntymä iskutilanteissa. Tämän jälkeen olennaisimmat paikat ovat tyypillisesti lähellä tukipisteitä, eli testilevyyn porattavia reikiä. Aivan kulmapaikkoja ei suositella, vaan mikäli kyseessä on esimerkiksi viiden komponentin kokoonpano, tulisi komponenttien muodostaa X-kuvio levyn keskipisteeseen. Tällöin viiden komponentin systeemissä käytettäisiin paikat U2, U4, U8, U12 ja U14. [25]

Iskutestilaitteisto tulee sijoittaa vankalle laboratoriopöydälle tai muuten vakaalle pohjalle. Sen täytyy pystyä ehkäisemään testilevyn kimmokkeet, jotta yhdessä testitapahtumassa levyyen kohdistuisi vain yksi isku. Kuvassa 13 on esitetty tyypillinen pudotustestilaitteisto, sekä testilevyn kiinnityssysteemi. Laitteistossa pudotustaso tippuu ohjaustankoja pitkin ja törmää pudotuskiveen. Kivi on yleensä päällystetty iskupinnalla, jonka avulla saavutetaan haluttu huippukiihtyvyyttä (G) sekä pulssinleveys. Pudotustason pohja on yleensä hieman pyöristetty pienen iskukontaktipinnan varmistamiseksi. [25]



Kuva 13. Standardin mukainen pudotustestilaitteisto [25].

Piirilevyalusta tukineen tulee liittää kiinteästi pudotustasoon, ja se toimii testilevyjen kiinnityspohjana. Testilevy kiinnitetään alustaan neljällä ruuvilla ennaltamäärätyistä rei'istä. Kokemukset erilaisista asetteluista ovat osoittaneet, että levyn asettaminen vaakatasoon siten, että komponentit ovat testilevyn alapinnalla, johtaa maksimaaliseen levyn taipumaan. Tällöin se on myös paras asetelma, kun tavoitteena on saada testilevy vikaantumaa. Testiä voidaan suorittaa myös muilla asetelmilla, mutta ne eivät korvaa tätä vaadittua asetelmaa. [25]

Testilevyyn tai piirilevyalustaan tulee myös liittää kevyt kiihtyvyyssmittari, jonka avulla tutkitaan levyn kiihtyvyysovastetta. Mittarin tulee olla mahdollisimman kevyt, ettei se merkittävästi muuta levyn dynaamista painoa ja täten itsessään vaikuta kiihtyvyysovasteeseen. Lisäksi levyille voidaan liittää antureita mittaamaan levyn eri alueisiin kohdistuvia jännityksiä. [25]

JEESD22-B111 käyttää iskupulssille perustasonaan 1500 G:n huippukiihtyvyyttä, sekä 0,5 ms:n pulssinleveyttä. Pulssi on muodoltaan puolikas siniaalto, ja sen leveys lasketaan siitä, kun sen kiihtyvyys on saavuttanut 10% huippuarvostaan loppuen siihen kun sen kiihtyvyys on laskenut uudestaan 10% samaisesta huippuarvosta. [25] Nämä olosuhteet ovat JEDEC:n määrittelemät B-luokan iskuolosuhteet [26]. Standardin mukaan testi tulee suorittaa ainakin B-luokan iskuolosuhteissa, jotta se olisi vertailukelpoinen muiden standardin mukaan suoritettujen testien kanssa. Tämän lisäksi testi voidaan haluttaessa suorittaa myös muissa iskuolosuhteissa. Testin alussa saatetaan

tarvita useampi pudotus, jotta voitaisiin määritellä oikea pudotuskorkeus haluttujen iskuolosuhteiden (pulssinleveys ja huippukiihtyvyys) saavuttamiseksi. Testin aikana G saa poiketa 20 % määritellystä huippukiihtyvyydestä ja pulssinleveys 30 % suuntaansa [26]. Taulukossa 9 on määritelty JEDEC:n määrittelemät iskuolosuhdeluokat.

Taulukko 9. JEDEC:n määrittelemät iskuolosuhteet [26].

Luokka	Verrannollinen pudotuskorkeus (cm)	Nopeuden muutos (cm/s)	Huippukiihtyvyys (G)	Pulssinleveys (ms)
H	150	543	2900	0,3
G	130	505	2000	0,4
B	112	467	1500	0,5
F	76,2	386	900	0,7
A	50,8	316	500	1,0
E	33,0	254	340	1,2
D	17,8	187	200	1,5
C	7,62	122	100	2,0

Ennen varsinaista testiä jokaisen daisy-chain rakenteen alkuresistanssi tulee mitata ja merkitä ylös. Tämän jälkeen pudotuslaatta tiputetaan ennen testiä määritellystä korkeudesta, ja samaan aikaan jokaisen rakenteen resistansseja mitataan reaaliaikaisesti. Mittauslaitteistona tulee käyttää vähintään 50 000 näytettä sekunnissa ottavaa tiedonkeruujärjestelmää tai tapahtumailmaisinta, joka ilmaisee yli yhden millisekunnin kestävät 1000 Ω :n resistanssiylitykset. Suurtaajuusmittauksen osalta vikatapahtumana pidetään yli 100 Ω :n resistanssia tai yli 20 %:n resistanssin nousua mikäli alkuperäinen resistanssiarvo on yli 85 Ω :a. Myös silmin havaittava osan irtoaminen tai muodonmuutos lasketaan vikatapahtumaksi, vaikkei vaadittavaa resistanssin lisäystä tapahtuisikaan. Molemmissa mittausmenetelmissä vaurioitumiskriteerinä on se, että ensimmäisen vikatapahtumahavainnon jälkeen suoritettavissa viidessä pudotuksessa sama vika havaitaan vähintään kolme kertaa. [25]

Tiputuksia suoritetaan niin kauan, kunnes 80% komponenteista on vikaantunut. Kuitenkin maksimimäärä pudotuksille on 30, huolimatta siitä onko kyseessä yksi- vai kaksipuolinen piirilevy. Jokaisen pudotuksen aiheuttama iskupulssi mitataan, jotta varmistutaan siitä että pudotus on aiheuttanut standardin määrittämien spesifikaatioiden mukaiset iskuolosuhteet toleranssien rajoissa. Mikäli iskuolosuhteet alkavat etääntyä halutuista, voidaan pudotuskorkeutta muuttaa tarvittaessa. [25]

Jokainen vaurioitumiskriteerit täyttävä vikaantuminen kirjataan ylös. Kun testi on suoritettu, levyiltä valitaan 5 komponenttia, joille suoritetaan vikaantumisanalyysi. Komponentit valitaan piirilevyn eri kohdista. Vikaantuneille komponenteille pyritään määrittämään vikaantumiseen johtanut mekanismi sekä juurisyy, joka tähän tapahtumaan johti. Vikaantumiset jaotellaan komponenttien, liitosten sekä piirilevyn vikaantumisiin. Liitosten vikaantuminen voi tarkoittaa piirilevyn liitosalueen ja juotteen

välisiä vikaantumisia, juotemateriaalin sisällä tapahtuvia vikaantumisia tai juotteen ja komponentin välisen liitosalueen vikaantumisia. [25]

Suoritettu testi tulee raportoida huolella, ja raportin tulee sisältää ainakin seuraavat asiat [25]:

- Yksittäisten komponenttien sekä koko piirilevyn massat.
- Komponenttien dimensionaaliset mitat, sisään- ja ulostulot, sirujen mitat, kerrosten paksuudet sekä liitosalueiden mitat.
- Koteloinnin, komponenttien, liitoksien sekä substraattien materiaalit.
- Levyn dimensionaaliset mitat ja materiaaliset ominaisuudet kuten paksuus, liitosalueiden koot, materiaalikertoimet sekä lasittumispiste (T_g).
- Piirin kokoonpanon tiedot liittyen esimerkiksi stensiileihin, juotteisiin ja reflow-profiiliin.
- Testin olosuhteet, kuten pudotuskorkeus, iskupinnan materiaali sekä iskupulssin profiili.
- Testilevyn kokemat voimat, kuten kiihtyvyys, venymä sekä muodonmuutosnopeus.
- Daisy-chain rakenteiden alkuresistanssit.
- Vikaantumisten havaitsemiseen käytetty mittauslaitteisto sekä vaurioitumiskriteerit.
- Testin tulokset, kuten jokaiselle piirilevyn lokaatiolle ominainen vikaantumiseen tarvittavien pudotusten määrä, määritellyt vikaantumismekanismit sekä näitä esittävät kuvat.
- Tilastollinen analyysi vikaantumisista, kuten normaalijakauma ja keskihajonta. Mikäli riittävä määrä komponentteja on vikaantunut, myös Weibull- tai lognormaalinen analyysi olisi suotavaa tehdä.

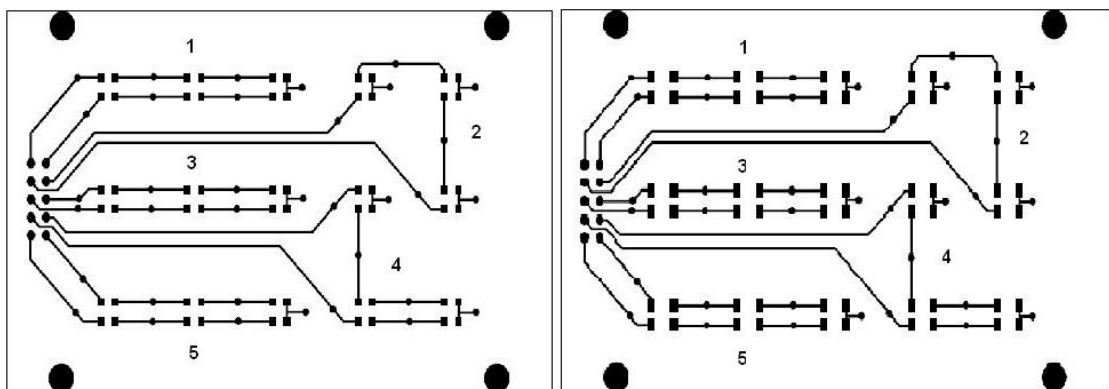
Haluttaessa analysoida piirilevyn lokaatioita, joilla on samankaltainen vääntymä iskutilanteessa (esim. U3, U8 ja U13), voidaan vikaantumismekanismien määrittelyvaiheessa lokaatiot yhdistää ryhmiksi. Kaikille lokaatioille ei siis välttämättä tarvitse tehdä erillistä analyysiä. [25]

5 TYÖSSÄ KÄYTETTY TESTIJÄRJESTELMÄ

Työn tarkoituksena oli tutkia ikäännyttämisen vaikutusta ICA-liiman iskunkestävyyteen. Testauksia varten valmistettiin 20 kappaletta testilevyjä JESD22-B111 standardia mukaillen. Puolet levyistä valmistettiin pienillä 0Ω :n vastuksilla, eli ns. dummy-vastuksilla, ja puolet vastaavasti isoilla 0Ω :n dummy-vastuksilla. Erikokoisia vastuksia käytettiin, jotta voitaisiin tutkia myös komponentin koon vaikutusta liiman iskunkestävyyteen. Kaksi levyä kumpaakin komponenttikoko pudotustestattiin ilman ikäännyttämistä. Neljää levyä (kaksi pientä ja kaksi isoa) ikäännytetttiin 50 tuntia $85 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa ja 85% :n suhteellisessa kosteudessa. Vastaavissa olosuhteissa ikäännytetttiin neljää (2+2) levyä 100 tuntia, ja vielä neljää (2+2) levyä 200 tuntia. Viimeiset neljä levyä varattiin pudotustestin parametrien, kuten pudotuskorkeuden, määrittelyä varten.

5.1 Testilevy

Testilevyt valmistettiin mukaillen JESD22-B111 standardia. Levy ei kuitenkaan ollut standardin vaatimaa 1+6+1 - monikerroslevy, vaan kaksipuolinen piirilevy. Jokaiselle standardin osoittamalle alueelle sijoitettiin kaksi komponenttia, ja komponenteista tehtiin yhteensä viisi kuuden komponentin daisy-chainia. Standardin mukaan levyjä tarvittaisiin neljä kappaletta per komponenttikoko per ikäännytyssaste, mutta koska levyille aseteltiin kaksinkertainen määrä komponentteja, nähtiin tarpeelliseksi valmistaa vain kaksi levyä molempia komponenttikokoja jokaista ikäännytyssastetta kohti. Testilevyjä valmistettiin kahdenlaisia: sekä isoille, että pienille komponenteille tarkoitettuja. Kuvassa 14 on esitetty testilevyjen piirilevy-suunnitelmat ja johdotukset. Daisy-chainit on numeroitu mittaustulosten tulkintaa helpottavasti.

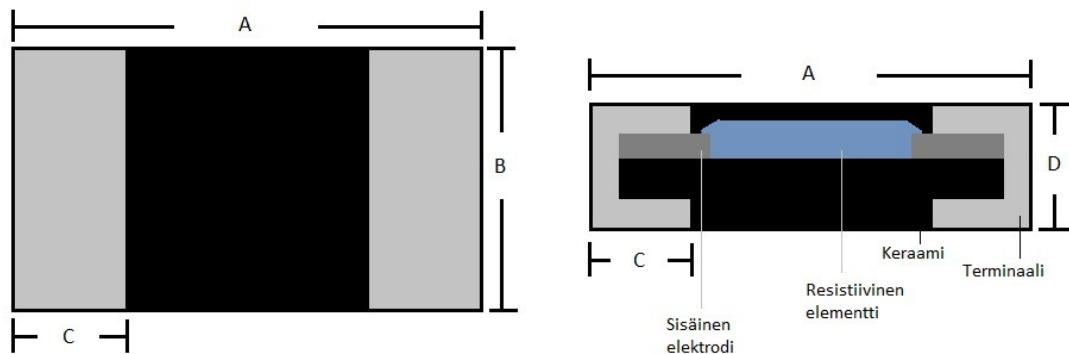


Kuva 14. Testilevyjen kytkennät, vasemmalla pien- ja oikealla suurkomponenttilevy.

Levyllä on lisätty mittauspisteitä jokaisen yksittäisen komponentin molemmin puolin, jotta tarvittaessa voidaan tarkastella yksittäisen komponentin parametrejä. Vastusketjujen resistanssimittauksissa käytettiin mittauspisteitä jotka olivat lähellä varsinaista ketjua, etteivät pitkien johdinvetojen aiheuttamat resistanssit vaikuttaisi mittaustuloksiin. Etenkin ketjujen 2 ja 4 kohdalla johdinvedot ovat pitkiä.

5.1.1 Työssä käytetyt komponentit

Työssä käytetyt pienemmät komponentit olivat Toplinen SR1206P4A-sarjan vastuksia ja suuremmat komponentit Farnell Element 14:n RC2010JK-070RL-sarjan vastuksia. Kuvassa 15 on esitelty komponenttien poikkileikkaus sekä komponenttien mitat.



Kuva 15. Työssä käytettyjen komponenttien mitat [28].

	Pienempi vastus (mm) kotelotyyppi 1206	Isompi vastus (mm) kotelotyyppi 2010
A	3,2	5
B	1,6	2,5
C	0,5	0,5
D	0,56	0,55

Molemmat komponentit ovat ROHS (The Restriction of the use of certain Hazardous Substances) - yhteensopivia. Ne ovat rakennettu korkealuokkaisen keraamisen rungon päälle. Resistiivinen elementti koostuu jalojen metallien ja lasin seoksesta, joka on päällystetty toisella lasilla ympäristötekijöiden vuoksi. Resistiiviset elementit on yhdistetty terminaaleihin sisäisillä elektrodeilla sähköisen kontaktin varmistamiseksi. [28]

5.1.2 Työssä käytetty liima

Työssä käytettiin Namicsin H9654-liimaa, joka on tyypillinen ICA-liima hopeapartikkeleilla. Kyseisen liiman ominaisuuksiin kuuluu alhainen kovettumislämpötila, alhainen resistiivisyys tilavuuden suhteen sekä korkea sidoslujuus. Taulukossa 10 on lueteltu liiman tärkeimmät parametrit. Tikstrooppinen indeksi kuvaa liiman ominaisuutta, joka kertoo kuinka paljon viskositeetti muuttuu ainetta

sekoitettaessa. Datalehden mukaan arvot ovat suuntaa-antavia, eivätkä aina pidä tarkalleen paikkaansa. [29]

Taulukko 10. Työssä käytetyn liiman parametrit [29].

Viskositeetti [Pa*s] @ 25°C	Tiksotrooppinen indeksi	Resistanssi tilavuuden suhteen [Ω*cm]	Sidoslujuus [N/mm ²]
36	6.8	$5.0 * 10^{-4}$	25

Liima levitettiin komponenttien liitoskohtiin dispensoimalla, käyttäen apua paineilmalla toimivaa dispenserää. Tämän jälkeen komponentit ladottiin levyille käsin. Kun levyn kaikki komponentit oli ladottu paikalleen, laitettiin levyt datalehden ohjeiden mukaisesti 100°C - asteiseen uuniin tunniksi, jotta liima ehtisi kovettumaan kunnolla. [29]

5.2 Ikäännyttäminen

Testilevyjen ikäännytyks suoritettiin testikaapissa siten, että ensin ikäännytetttiin kaikkia kahtatoista levyä 50 tuntia. Tämän jälkeen kaapista poistettiin neljä levyä, ja jäljelle jäävät asetettiin uudestaan samaan 50:n tunnin mittaiseen testiin. Toisen testin jälkeen kaapista otettiin jälleen neljä levyä pois. Jäljelle jääneet neljä levyä altistettiin vielä sadan tunnin ikäännytykselle. Testikaappi, jota ikäännyttämisessä käytettiin, oli Especin PL-1K, ja se on esitelty kuvassa 16.



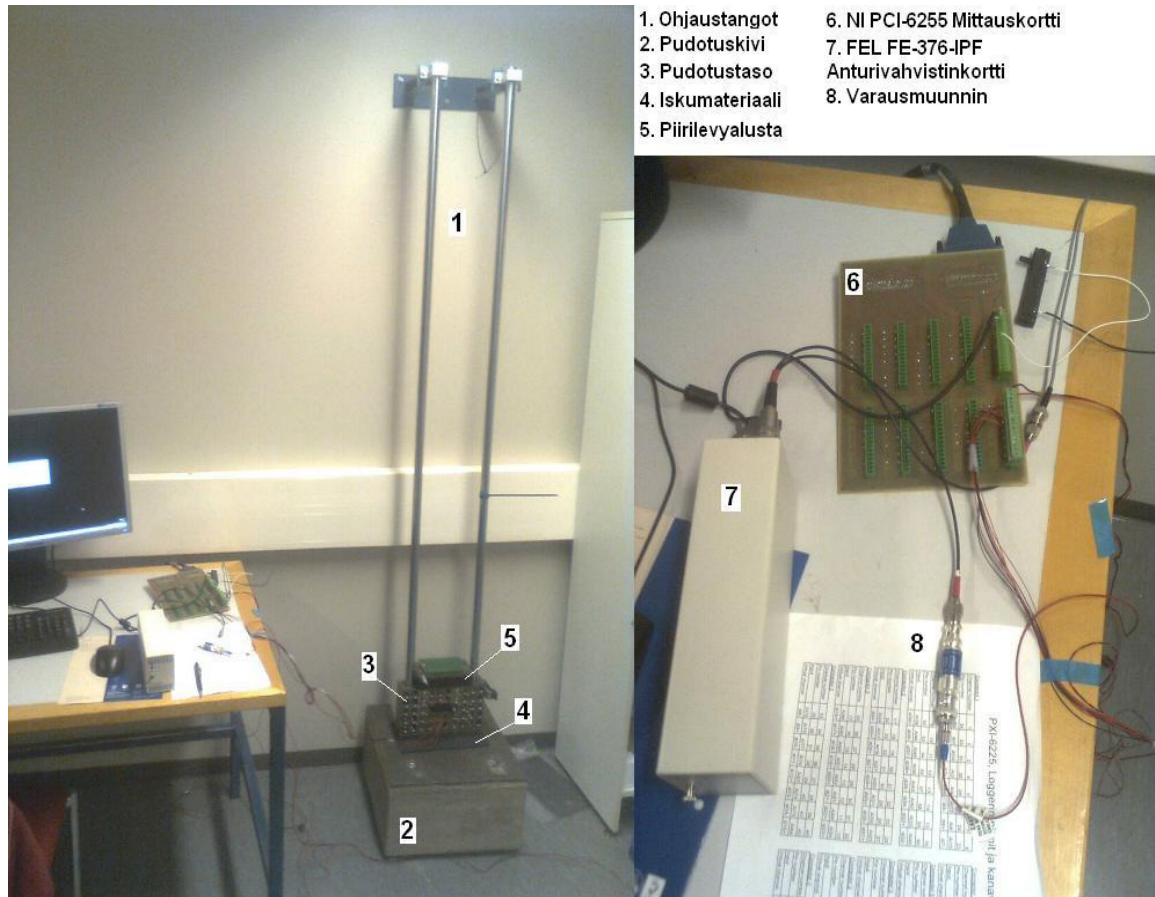
Kuva 16. Ikäännyttämisessä käytetty testikaappi Espec PL-1K.

Jokaisen testilevyn kunkin daisy-chainin resistanssit mitattiin sekä ennen että jälkeen ikäännytystestin. Resistanssit mitattiin kunkin ketjun molemmissa päissä sijaitsevista mittapisteistä. Nämä mittaukset suoritettiin, jotta voitaisiin varmistua siitä, etteivät testilevyt vikaantuneet ikäännyttämisen aikana. Liitteessä 1 on lueteltuna vastusketjujen alkuresistanssit sekä resistanssit ikäännyttämisen jälkeen. Levyjen nimissä olevat kokoluokat kuvaavat levyissä käytettyjen komponenttien kokoa. Pienikomponenttisista levyistä 1 ja 2 valittiin käytettäväksi pudotustestin parametrien määrittämiseen niiden huonon liitosjäljen vuoksi. Levyt 9 ja 10 valittiin levyiksi jotka pudotustestattiin ilman ikäännytystä. Isokomponenttisista levyistä pudotustestiparametrien määrittelyyn valikoitui 1 ja 2, sekä ilman ikäännytystä testattavaksi levyt 3 ja 4.

5.3 Pudotustesti

Pudotustesteissä käytettiin Juha Pippolan Tampereen Teknillisen Yliopiston Elektroniikan laitoksen pakkaus- ja tuotantotekniikan osastolle diplomityössään suunnittelemaa laitteistoa. [30] Laitteisto on suunniteltu JESD22-B111 standardin mukaisesti ja sen vähimmäisvaatimuksiksi on asetettu standardin JESD22-B110A mukainen testaustaso B [26].

Testauslaitteisto on esitelty kuvassa 17. Ohjaustangot ovat 200 cm:ä pitkät ja halkaisijaltaan 25 mm, ja ne ovat kiinnitetty laboratorion lattiaan ja seinään tukevasti käyttäen ruuveja. Pudotustasona käytetään kaupallisesti saatavilla olevaa työstetystä alumiinista valmistettua tasoa. Tason päällä on vaihdettava piirilevyalusta, joka on 10 mm paksua teräslevyä. Alustan ja tason välissä tukena käytetään puista välikapalletta. Pudotuskivenä käytetään valettua betonipöytää. Betonipöydän paino on noin 70 kg, ja sen alle on kiinnitetty säädettävät kumijalat helpottamaan sen kohdistusta pudotustasoon nähden. Betonipöydän päälle on kiinnitetty 10 mm paksu teräslevy kohtisuoran iskupinnan varmistamiseksi. Pudotustason ja pudotuskiven välisenä iskumateriaalina käytetään kahta 1,5 mm:n paksuista kumimattoa, jolloin iskupinnan kokonaispaksuudeksi tulee 3 mm. Matot ovat kaupallisia ja kyseistä tarkoitusta varten kehitettyjä. Testauslaitteistosta puuttuu standardinmukainen automaattinen jarrumekanismi, joka ehkäisisi iskun jälkeiset kimmokkeet. Tästä syystä kimmokkeiden ehkäisy suoritetaan testin aikana manuaalisesti. [30]

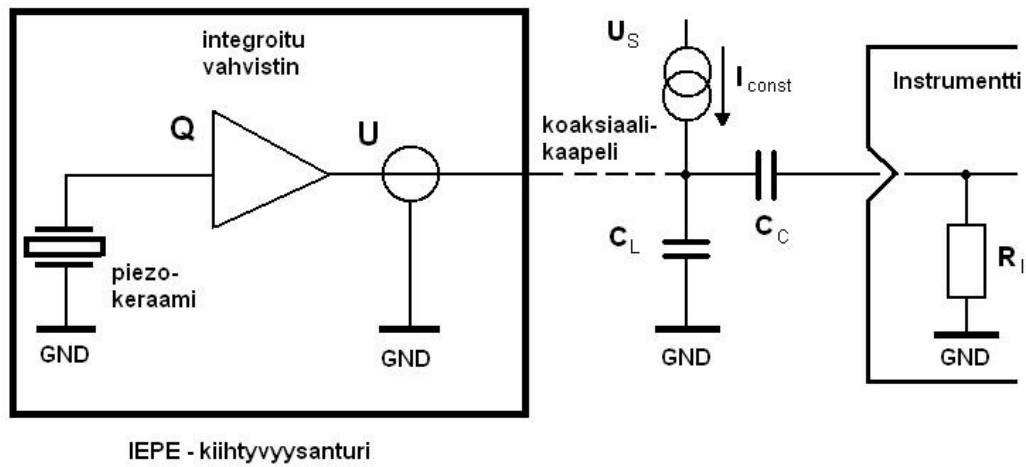


Kuva 17. Pudotustestilaitteisto.

Testilevytä tulevien antureiden, kiihtyvyyssanturin sekä venymäliuskojen ulostulojen varsinainen mittaus tapahtuu National Instrumentsin PCI-6255 mittauskortilla. Kortti kiinnitetään tietokoneen PCI-paikkaan, ja siinä on 80 kanavaa. Sen näytteenottotaajuus on 250 kHz, joka jaetaan mittauksessa käytettävien kanavien kesken. Mittausdata muunnetaan luettavaan muotoon National Instrumentsin LabView ohjelmistolla. [30]

5.3.1 Kiihtyvyys

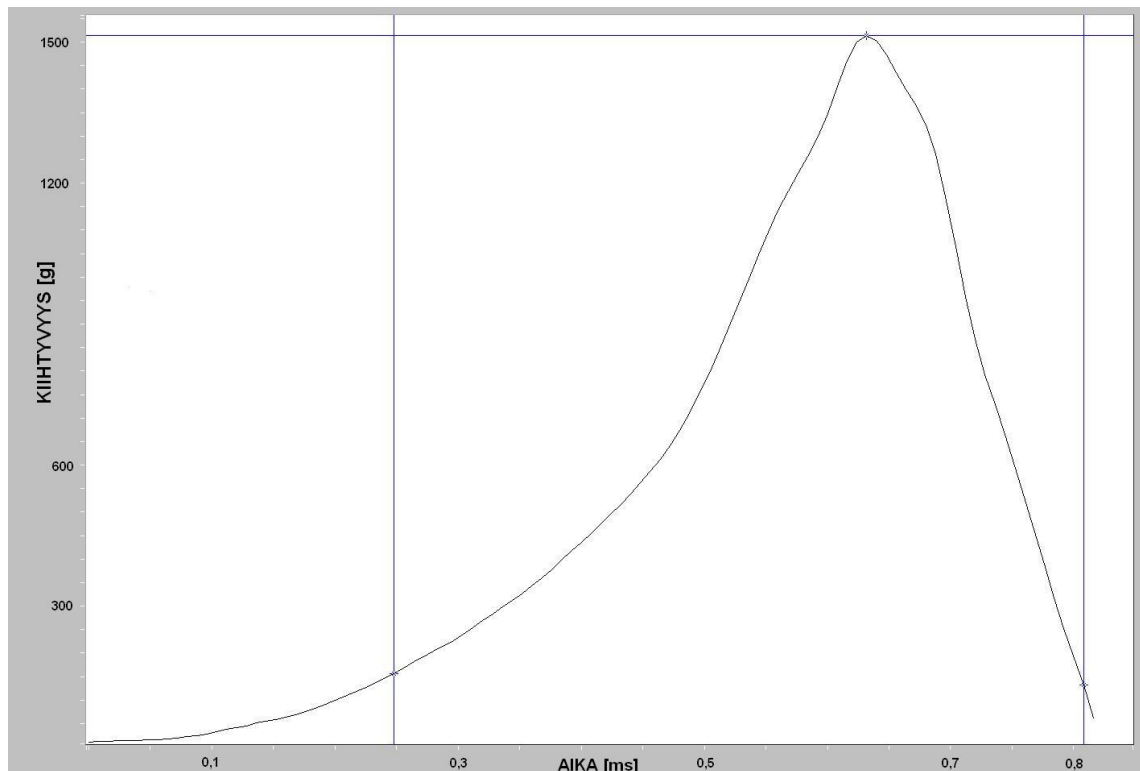
Varsinaisen iskutestaamisen lisäksi laitteistolla voidaan mitata pudotustason kokemia kiihtyvyyden muutoksia sekä tulevaisuudessa piirilevyn venymiä. Kiihtyvyyksien mittaamisessa käytetään Endevcon mallin 2255B-1 IEPE (Internal Electronics Piezo Electric) - kiihtyvyyssanturia. Anturin vahvistus- ja virtapäätteenä toimii Fylde Electronic Laboratoriesin FE-MM4 kotelo, joka on varustettu kaksikanavaisella FE-376-IPF anturivahvistinkortilla. IEPE-anturit sisältävät integroitua elektroniikkaa, joka ottaa tehonsa sisäisestä vakiovirtalähteestä. [30] Tyypillinen standardinmukainen IEPE-anturin piirikytkentä on esitelty kuvassa 18.



Kuva 18. IEPE-anturin piirikytkentä [31].

IEPE-anturin ulostulo on pieni-impedanssinen. Vakiovirta kuljetetaan anturille tyypillisesti samaa johtoa pitkin mittaussignaalin kanssa, mutta pienestä impedanssistaan johtuen IEPE-anturi ei ole herkkä kaapelin suhteen. Toisin sanoen, erityisen alhaisen kohinan kaapelille ei ole tarvetta, vaan normaali koaksiaalikaapeli on riittävä. Anturissa pietsokiteen varaus muuttuu siihen kohdistuvan voiman mukaan. Sisäinen elektroniikka muuttaa pietsokiteen varauksen helpommin mitattavaan muotoon, tässä tapauksessa jännitteeksi. Ulostulon herkkyys määritellään luokassa mV/g , joka tarkoittaa sitä että yhden pudotuskiihtyvyyden monikerta kasvattaa anturin ulostuloa yhdellä millivoltilla. [30, 31]

Työssä toteutetuissa testeissä tavoitehuippukiihtyvyydeksi asetettiin standardin JESD22-B111 mukainen 1500G . Kyseinen huippukiihtyvyys haettiin kokeilumenetelmällä käyttäen yhtä testilevyä. Levyä pudotettiin eri korkeuksista, kunnes todettiin että 53 cm:n korkeudelta päästään tasaisesti riittävän lähelle kyseistä kiihtyvyyttä. Tämä pudotuskorkeus on siinäkin mielessä hyvä, koska se vastaa melko hyvin sellaista korkeutta miltä arkipäivän elektroniikka voisi tosielämässään pudota. Kuvassa 19 on esitelty kuvaaja testilevyn kiihtyvyydestä kyseiseltä korkeudelta pudotettaessa.



Kuva 19. Testilevyn kokemat kiihtyvyyden muutokset pudotuksen aikana.

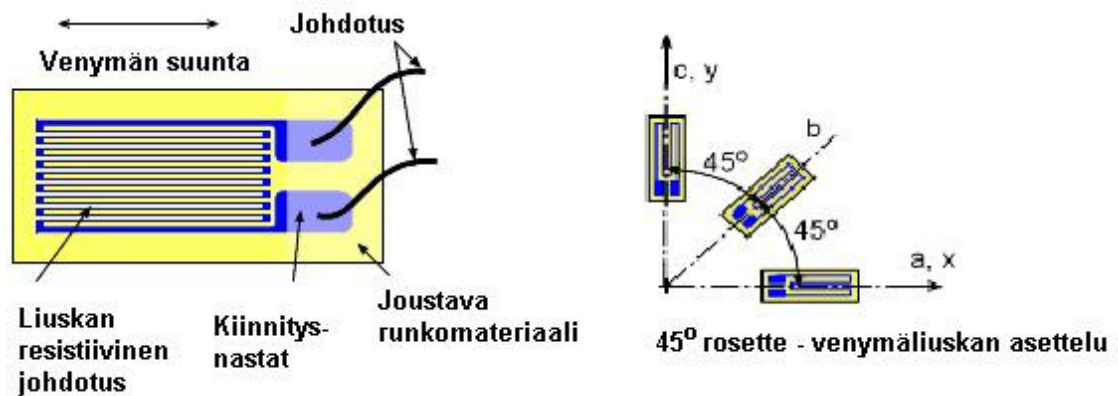
Kyseisessä pudotuksessa huippukiihtyvyys oli 1514 G, joka on hyvin standardin määrittelemien toleranssien sisällä. Myös iskupulssinleveys on standardinmukaisissa rajoissa. Pulssinleveys tässä pudotuksessa oli 0,46 ms, kun standardi määrittelee tavoitelluksi pulssinleveydeksi 0,5 ms. [25]

5.3.2 Piirilevyn venymät ja keskipisteen kiihtyvyys

Venymien mittaus ei vielä toistaiseksi laitteistolla onnistu, mutta valmius sen käyttöönottoon on olemassa. Venymien mittaukseen tullaan käyttämään KFG-1-120-D17-11L1M2S 45° rosette – venymäliuskoja. Valinta on kohdistunut niihin, koska liuskojen CTE on hyvin lähellä piirilevymateriaalien CTE:tä. Liuskojen mittauksia varten laitteistoon on suunniteltu 3-kanavainen Wheatstonen siltakytkentä, jonka ulostulot vielä vahvistetaan operaatiovahvistimilla toteutettujen differentiaalivahvistimien avulla. [30]

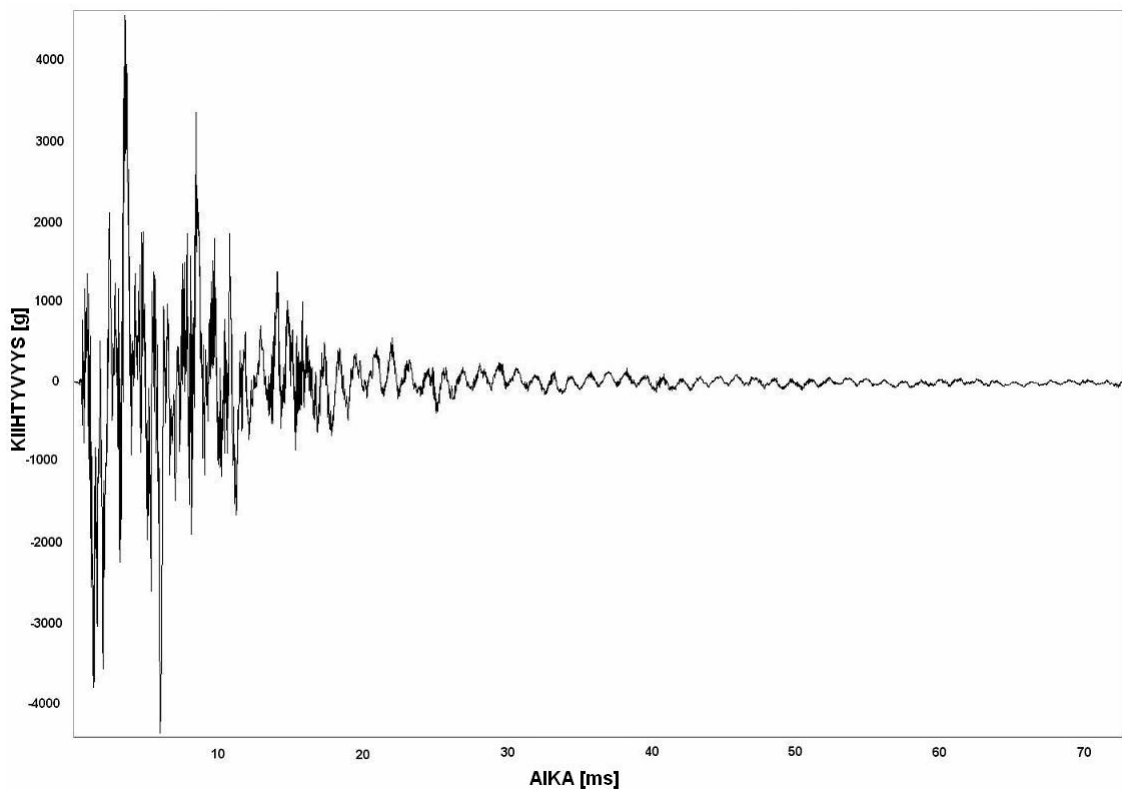
Rosette-liuskojen avulla mekaaniset siirtymät pystytään muuttamaan sähköisesti mitattavaksi signaaliksi, tyypillisesti resistanssiksi. Käytetty anturi perustuu resistiiviseen metallijohdotukseen. Liuskan rakenne on joustava ja kun siihen kohdistuu johdotuksen suuntainen venymä, myös metallijohdotus venyy ja täten resistanssi kasvaa. Yksi liuska pystyy siis mittaamaan venymää vain yhteen suuntaan. Kahdella liuskalla saadaan venymä x- ja y-suuntaan. Käyttöön on tarkoitus ottaa kolmen liuskan systeemi, jossa kolmannella liuskalla otetaan huomioon myös leikkausvenymä. [30]

Kuvassa 20 esitellään tyypillinen yksittäisen venymäliuskan rakenne sekä 45° rosette – venymäliuskan asettelu.



Kuva 20. Tyypillinen resistiiviseen johdotukseen perustuvan venymäliuskan rakenne, sekä 45° rosette-liuskojen asettelu. [32]

Koska venymien mittaus ei käytössä olleella laitteistolla vielä ollut mahdollista, suoritettiin sen sijaan esimerkinomaisesti yhden testilevyn keskipisteestä erillisellä kiihtyvyyssanturilla mittaus, jolla selvitettiin kyseisen pisteen kokemat kiihtyvyydet iskun hetkellä. Mittauspaikaksi valittiin keskipiste, koska sen kokemat jännitykset ovat iskuhetkellä suurimpia. Mittauksesta saatu kuvaaja on esitelty kuvassa 21.



Kuva 21. Testilevyn keskipisteen kokemat kiihtyvyydet iskun aikana.

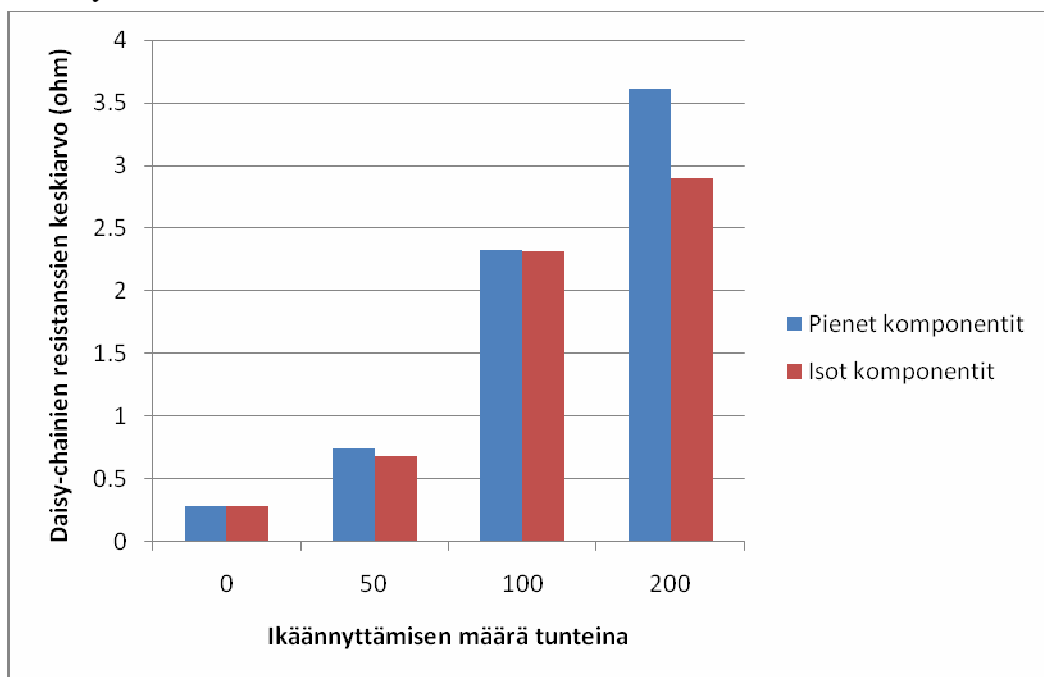
Iskun jälkeen levyn keskipiste värähtelee pystysuunnassa, kiihtyvyyden noustessa parhaimmillaan yli 4000:n g:n. Tärinä kuitenkin tasoittuu kohtuullisen nopeasti, ja jo 50 ms:n jälkeen levyn keskipiste ei enää juurikaan heilahtelee.

6 TESTIN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa analysoidaan sekä ikäännytyksen että pudotustesteistä saatuja tuloksia ja niiden merkitystä ICA-liiman luotettavuuteen tarkemmin. Luvussa tarkastellaan myös pudotustestilaitteiston ja testimenetelmän vaikutusta vaurioihin vikaantuneiden komponenttien lokaatioita analysoiden. Lisäksi tarkastellaan kolmen pienen sekä kolmen suuren komponentin vikaantuneen liitoksen läpileikkausta sekä mikroskooppikuvia vikaantuneista liitosalueista. Näiden kuvien avulla analysoidaan ICA-liitosten potentiaalisimpia vikaantumismekanismia.

6.1 Resistanssimittaukset

Valmistettujen testilevyjen vastusketjuista mitattiin resistanssit sekä ennen, että jälkeen ikäännytyksen. Tämä tehtiin jotta voitiin varmistua siitä, etteivät vastusketjut vaurioituneet ennen pudotustestiä. Resistanssimittausten avulla voitiin myös tutkia ikäännytyksen aikana tapahtuvan resistanssin kasvun vaikutusta pudotustestissä vikaantumiseen. Täydelliset tulokset resistanssimittauksista on eritelty liitteessä 1. Kuvassa 22 on esiteltyä testilevyjen vastusketjujen liitosresistanssien keskiarvo ikäännyttämisen aikana.



Kuva 22. Daisy-chainien resistanssien kasvu ikäännyttämisen myötä.

Kaaviosta nähdään, että ketjuresistanssit kasvavat ikäännyttämisen aikana. Kasvu tasaantuu kuitenkin mitä pitemmälle mennään. Ensimmäisten ikäännyttämisasteiden välillä liitosresistanssi on lähes kolminkertaistunut. Viimeisten ikäännyttämisasteiden välinen ero on huomattavasti pienempi. Kuvaajan pienien komponenttien 200 tuntia ikäännyneiden ketjujen keskiarvosta on jätetty kolme ketjua pois, sillä niiden resistanssit olivat nousseet yli 10 ohmin, ja näiden sisällyttäminen olisi vääristänyt kuvaajaa. Kaikki kyseiset kolme ketjua löytyivät samalta levyltä. Syy ketjuresistanssin kasvuun oli tarkempien vastusmittausten perusteella yksittäisissä komponentissa tai jopa yksittäisissä liimaliitoksissa, joiden resistanssit olivat kasvaneet erilaisten tekijöiden vaikutuksesta. Erot yksittäisten vastusketjujen resistansseissa saattavat selittyä käsintehtyillä liimaliitoksilla, joissa pienetkin virheet moninkertaistuvat ikäännyttämisen myötä. Toisaalta, hyvin usein liimaliitoksen resistanssin kasvu liittyy materiaalien CTE-eroihin, ja näiden aiheuttamiin rasituksiin liitoksen sisällä lämpötilan vaihtelun aikana. Myös liimaliitoksiin absorpoituva kosteus vaikuttaa liitosresistanssien kasvuun. Tuloksista myös huomataan, etteivät testilevyjen liitokset täytä NCMS:n asettamaa resistanssistabiiliuden ehtoa [5]. Taulukossa 11 on vielä eritelty tarkat vastuskeskiarvot sekä resistanssien keskihajonta ikäännyttämisastetta kohden.

Taulukko 11. Resistanssimittausten keskiarvot ja keskihajonnat.

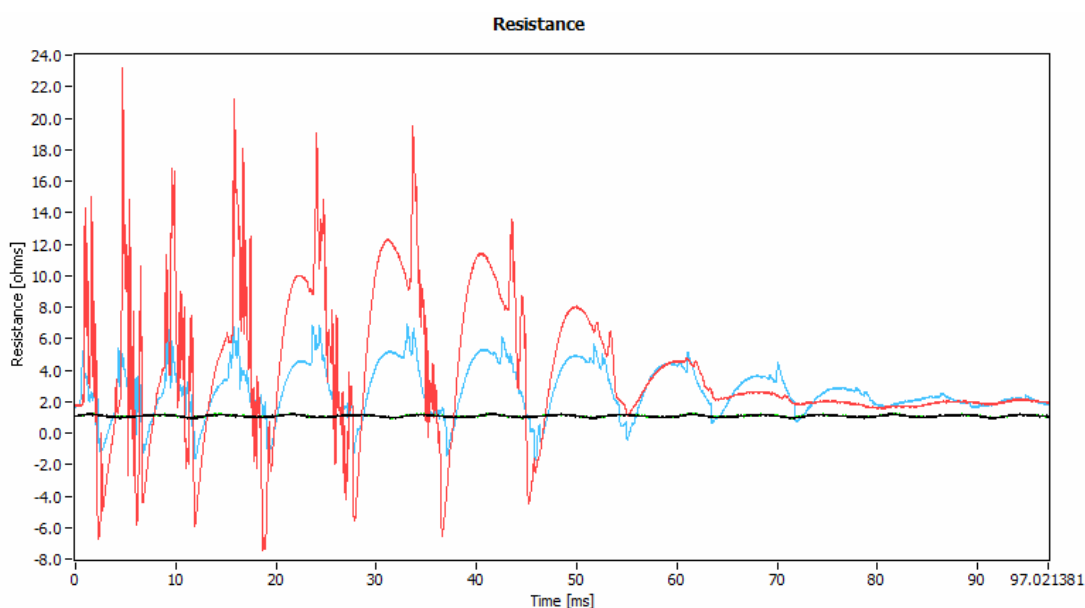
Levy	Resistanssikeskiarvo (Ω)	Keskihajonta
P 0h	0,28	0,02
P 50h	0,74	0,17
P 100h	2,33	0,80
P 200h	3,61	0,89
I 0h	0,28	0,01
I 50h	0,69	0,13
I 100h	2,32	1,02
I 200h	2,90	1,13

Taulukosta nähdään, että keskihajonnat noudattavat molemmilla komponenttimalleilla samaa kaavaa. Keskihajonta kasvaa ikäännyttämisasteen kasvaessa. Tämä kehitys oli odotettavissa, sillä liimaliitokset ketjuissa oli käsintehtyjä, ja pienikin eroavaisuus liitoksessa voi vaikuttaa merkittävästi resistanssin kasvuun ikäännytyksen aikana.

Tulokset korreloivat melko hyvin aiheesta aikaisemmin tehtyjen tutkimuksen kanssa. Esimerkiksi kappaleessa 4.2. esitelty Liu et al. tekemä tutkimus [9] osoitti liitoksissa kohtuullista resistanssin kasvua riippuen liiman kovettumisajasta. Tässä tutkimuksessa resistanssien kasvu oli hieman rajumpaa, mutta toisaalta lähtöresistanssit pienempiä. 200 tunnin ikäännyttämisen jälkeen päädyttiin kuitenkin jotakuinkin samoille resistanssiarvoille kun Liu et al. 1000 tunnin jälkeen. [9]

6.2 Pudotustestausmittaukset

Vastusketjujen resistanssia tutkittiin pudotusten aikana reaaliajassa. Mittauskortti lähetti antureilta saamansa mittaustiedon Labview-ohjelmistolle, joka puolestaan muunsi tiedon käyttäjälle havainnolliseen muotoon. Ohjelmistolla pystyi tarkastelemaan samanaikaisesti kunkin vastusketjun iskun aikaista huippuresistanssia, sekä resistanssin muutosta reaaliajassa. Kuvassa 23 esitellään yhden tiputuksen aikana yhden testilevyn vastusketjujen kokemat resistanssimuutokset.



Kuva 23. Testilevyn vastusketjujen kokemat resistanssimuutokset.

Kuvaajasta nähdään että kyseisen testilevyn kohdalla kahdessa vastusketjussa vikaantuminen on käynnistynyt, vaikka vaurion määritelmän mukainen resistanssi (100Ω) ei vielä ylitykkään. Kolmen muun vastusketjun resistanssi pysyttelee vakiona hieman yli yhdessä ohmissa koko pudotuksen ajan, joten niiden kohdalla vaurioituminen ei vielä ole käynnistynyt. Resistansseissa tapahtuva heilahtelu selittyy piirilevyn iskun jälkeisellä värähtelyllä, jota käsiteltiin luvussa 5.3.2. Värähtely aiheuttaa liimaliitoksissa jännityksiä. Liitoksissa syntyneet pienet murtumat laajenevat, ja sähköinen yhteys huononee. Tärinän laannuttua liitoksiin kohdistunut jännitys lakkaa, ja sähköinen yhteys palaa ennalleen.

6.2.1 Vanhennuksen vaikutus iskunkestävyyteen

Työssä testattiin eriasteisesti ikäännytettyjen sekä erikokoisille komponenteille tehtyjen ICA-liimaliitosten iskunkestävyyttä. Jokainen valmistettu levy testattiin siten, että sitä pudotettiin 53 cm:n korkeudelta niin kauan, että vähintään 80%, eli 4/5 vastusketjusta vaurioitui. Kuitenkin maksimissaan jokaista levyä pudotettiin standardin mukaisesti 30

kertaa. Vaurion määritelmänä pidettiin standardin JESD22-B111 mukaisesti sitä, että pudotuksen aikana ketjun resistanssi nousi hetkellisesti yli 100Ω :n. Tämän jälkeen vikatapahtuman tuli toistua vähintään kolmessa seuraavasta viidestä pudotuksesta, jotta vaurioitumisesta voitiin varmistua.

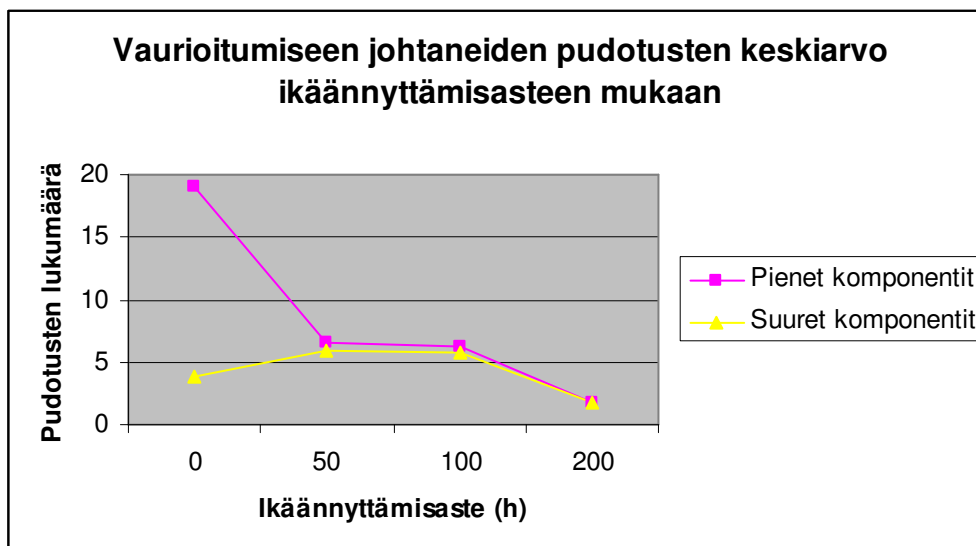
Taulukossa 12 on eritelty pudotustestien tulokset. Pudotusten lukumäärä kertoo kuinka monta pudotusta kunkin ikääntymisasteen molemmat levyt kestivät. Mikäli 4/5 levyn ketjuista vikaantui ennen 30:tta pudotusta, tuli viimeiseen vaurioon johtaneen pudotuksen jälkeen suorittaa vielä vähintään kolme pudotusta, jotta viimeisestäkin vauriosta saatiin varmuus. Toisessa sarakkeessa kerrotaan kullekkin ikääntymisasteelle keskiarvo, monellako pudotuksella ketjut vaurioituivat, sekä pudotuskeskiarvolle laskettu keskihajonta. Tämä luku kuvaa hyvin ketjujen ja levyjen todellista kestoa. Tarkemmat tulokset ovat eritelty liitteessä 2.

Taulukko 12. Pudotustestien tulokset.

	Pudotusten lukumäärä (levy1/levy2)	Vaurioitumiseen johtaneiden pudotusten keskiarvo (keskihajonta)	Ehjien ketjujen lukumäärä testin jälkeen	Ehjien ketjujen resistanssien keskiarvo (Ω)
P 0h	30 / 30	19 (4,67)	6	5,3
P 50h	16 / 30	6,5 (4,17)	4	2,6
P100h	13 / 17	6,3 (3,41)	1	5,7
P 200h	6 / 30	1,8 (0,64)	5	6,1
I 0h	10 / 11	3,9 (2,13)	2	2,8
I 50h	17 / 7	5,9 (5,10)	2	3,8
I 100h	8 / 22	5,8 (5,40)	2	4,0
I 200h	5 / 5	1,4 (0,48)	0	-

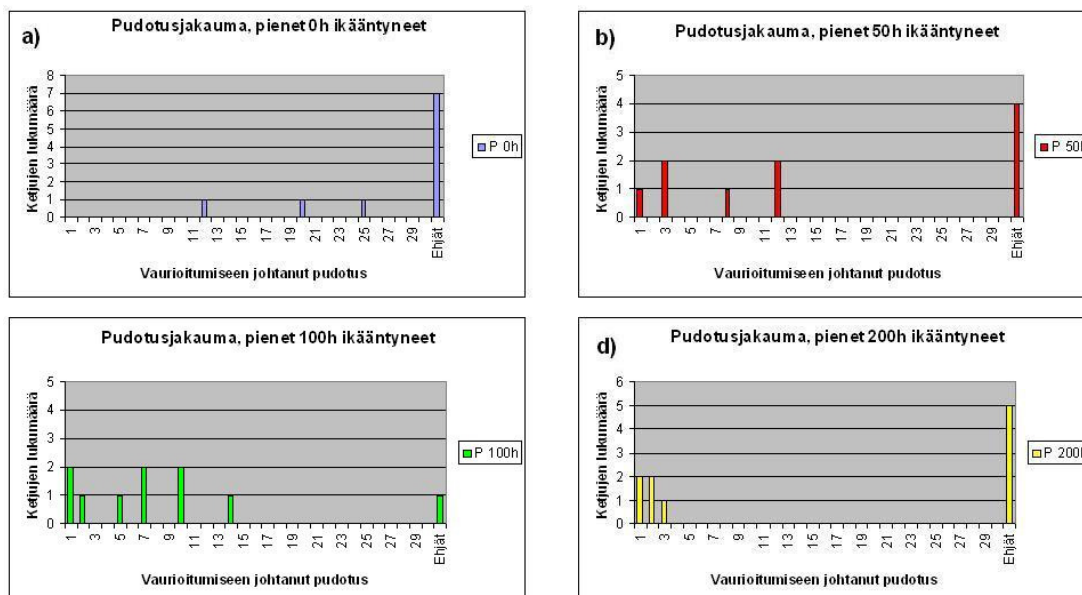
Pienikomponenttisten levyjen kohdalla taulukosta näkee selvän korrelaation ikäännyttämisen vaikutuksesta iskunkestävyyteen. Tästä poikkeuksena toinen 200h ikäännytettyistä levyistä kesti ennakoitua paremmin, kun siitä vaurioitui vain yksi ketju 30 pudotuksen aikana. Muuten vaurioitumiseen johtaneiden pudotusten lukumäärä laski tasaisesti ikäännytysajan kasvaessa.

Isoilla komponenteilla varustetut levyt sen sijaan olivat muuten iskunkestoltaan keskenään suunnilleen yhtä hyviä, mutta 200h ikäännytettyt levyt vaurioituivat huomattavasti nopeammin kuin muut. Itse asiassa kaikki 200h ikäännytettyt isojen komponenttien vastusketjut vaurioituivat viimeistään toisella pudotuksella. Isommilla komponenteilla vallitseva vikaantumismekanismi ilmeisesti muuttui riittävän ikääntymisen myötä. Vikaantumismekanismia tutkitaan tarkemmin kappaleessa 6.5. Kuvassa 24 esitellään ketjujen vaurioitumisen ikäännytysvaste havainnollisemmassa muodossa.



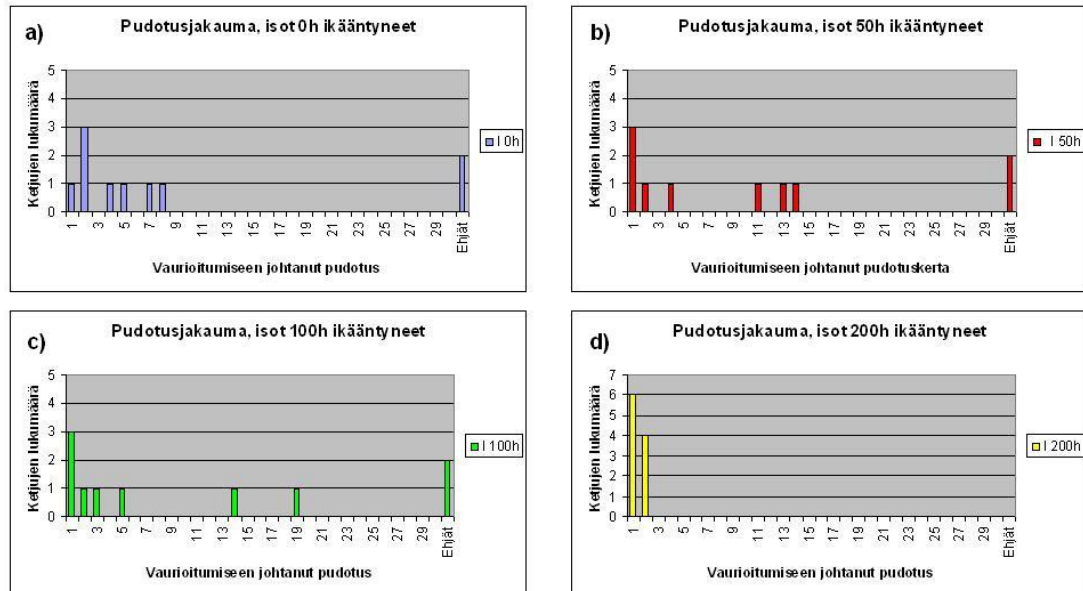
Kuva 24. Ketjujen vaurioituminen ikäännyttämistasteen mukaan.

Kuvaajasta näkee kuinka pienillä komponenteilla luotujen vastusketjujen keskimääräinen pudotusmäärä laskee suhteellisen tasaisesti ikäännyttämisen myötä. Suurilla komponenteilla puolestaan lasku tapahtuu vasta 200 tunnin ikäännyttämistasteella. Edellinen kuvaaja ei huomioi lainkaan testissä vikaantumattomia ketjuja. Kuvissa 25 ja 26 esitetään yksityiskohtaisemmin graafisessa muodossa kuinka monta pudotusta kunkin ikäännyttämistasteen vastusketjut kestivät. Näihin kuvaajiin on myös eritelty ehjäksi jääneiden ketjujen lukumäärä.



Kuva 25. Pienien komponenttilevyjen vastusketjujen pudotusjakaumat.

Pienien komponenttien levyillä nähdään kuinka ikäännyttäminen vaikuttaa vastusketjujen iskunkestoisuuteen. Vaurioitumiseen johtaneet pudotukset siirtyvät kohti pienempiä lukuja ikäännyttämisen kasvaessa. Samalla ehjien ketjujen lukumäärä pienenee, lukuunottamatta 200 tuntia ikäänntyneiden palkkia, jota hieman vääristää toisen levyn vastusketjujen yllättävän hyvä iskunkestoisuus. Kuvassa 26 on vastaavat jakaumat isokomponenttisille levyille.



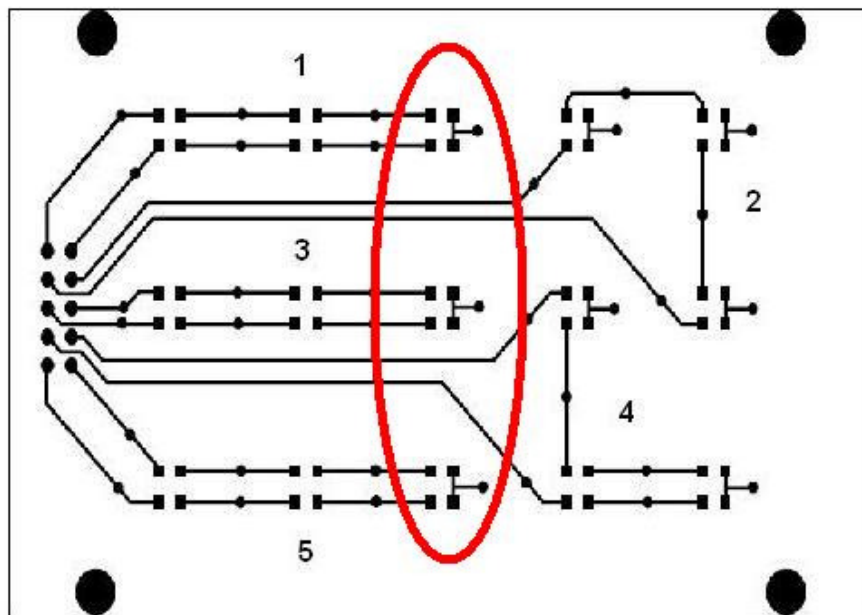
Kuva 26. Isojen komponenttilevyjen vastusketjujen pudotusjakaumat.

Suurten komponenttien levyillä vaurioitumiseen johtaneiden pudotusten jakauma on muilla ikäännyttämisaikavälillä samansuuntainen, paitsi 200 tuntia ikäänntyneillä levyillä, jotka vaurioituivat heti kahden ensimmäisen pudotuksen aikana. Muiden ikäännyttämisaikavälillä suurin osa vaurioitumisista tapahtui ensimmäisten pudotusten aikana, mutta muutama satunnainen ketju kesti hieman pidempään.

Testilevyn jokaisesta ketjusta mitattiin ikäännyttämistä edeltävä sekä sen jälkeinen resistanssi. Kävi ilmi että komponenttien liitosresistanssi kasvaa levyjä ikäännytettyä sitä enemmän, mitä kauemmin levyjä ikäännytetään. Ketjujen liitosresistanssien kasvujen välille syntyi yllättävänkin suuria eroja. Joillain yksittäisillä ketjuilla resistanssit kasvoivat 200h ikäännyttämisen aikana jopa yli 10Ω:n. Tällä resistanssin kasvulla ei kuitenkaan näytä olevan mitään korrelaatiota pudotustestissä vikaantumiseen. Yhden levyn kohdalla selkeästi suurimman alkuliitosresistanssin omannut ketju oli ainoa joka selvisi pudotustestistä vaurioitumatta.

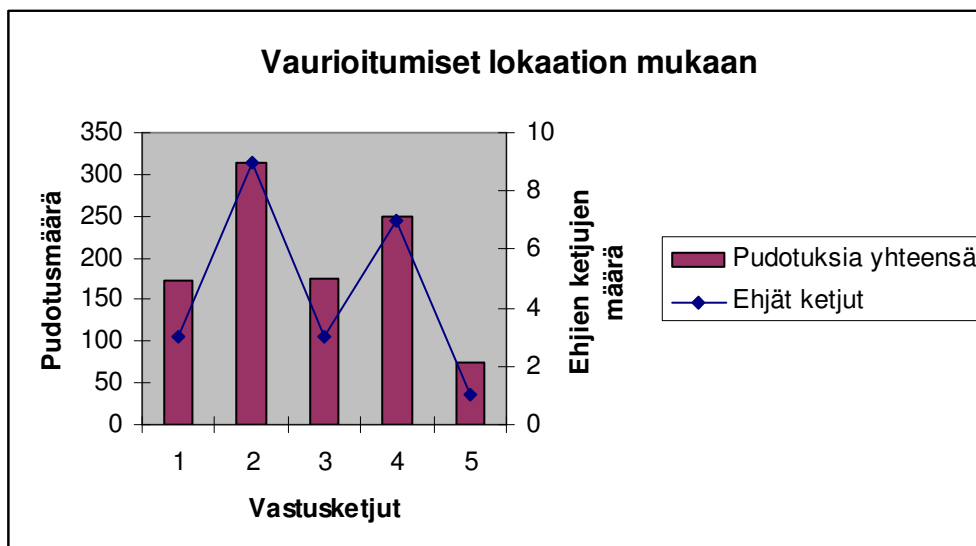
6.2.2 Lokaation vaikutus iskunkestävyyteen

Testien aikana kävi selväksi, että komponenttien sijainnilla testilevyllä oli suurikin merkitys niiden vaurioitumiseen. Etenkin levyn keskilinja, joka on eritelty kuvassa 27, oli altis vaurioille. Tämä johtuu siitä, että kyseisissä kohdissa testilevyn iskun aikana kokemat venymät ja siten komponentteihin kohdistuvat jännitykset ovat suurimmillaan. Valtaosassa levyistä keskilinjan komponentteja tai yksittäisiä liimaliitoksia oli irronnut kokonaan paikoiltaan. Irtoamisia oli tapahtunut myös muissa lokaatioissa, muttei läheskään niin paljoa kuin keskilinjalla.



Kuva 27. Testilevyn keskilinja.

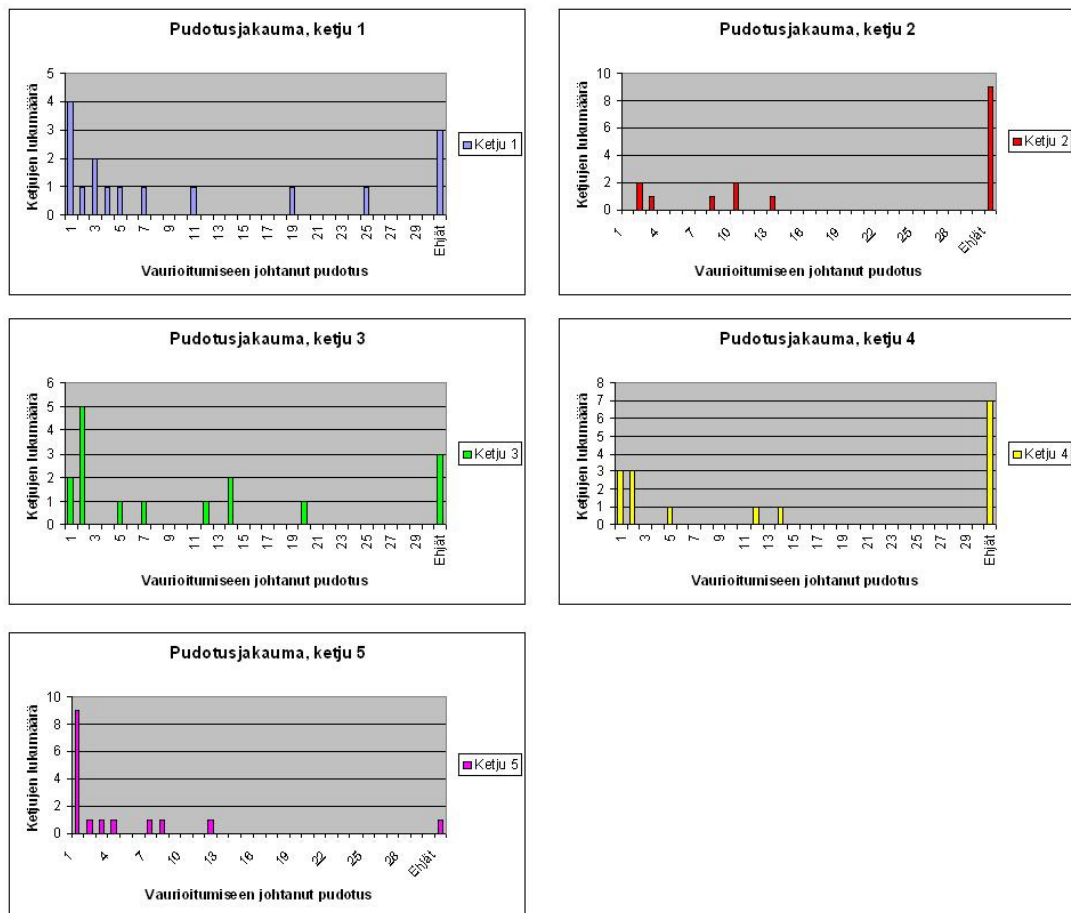
Kuvassa 28 eri vastusketjujen iskunkestoisuus on eritelty tarkemmin. Kuvaajaan on laskettu kunkin vastusketjun ehjänä pysymä pudotusmäärä. Toisin sanoen kuvaajan palkki esittää kaikista 16:sta testilevystä yhteenlaskettua pudotusmäärää, jonka kukin ketju pysyi ehjänä. Mikäli jonkun testilevyn jokin ketju ei vaurioitunut testin aikana, merkittiin kyseisen levyn osalta ketjun pudotusmääräksi 30. Kuvaajassa on vielä eritelty jokaisen ketjun osalta lukumäärä, joka kuvaa kyseisiä testin aikana vaurioitumattomia ketjuja.



Kuva 28. Vastusketjujen pudotusmäärät.

Kuten kuvaajasta nähdään, keskilinjalla olevat ketjut ja etenkin ketju numero 5 oli herkkä vaurioitumaan. Keskimääräisesti kyseinen ketju vaurioitui 4,7 pudotuksen jälkeen, ja vain kertaalleen se kesti kaikkien 30 pudotuksen läpi. Ketju 1 vaurioitui keskimäärin 10,8 pudotuksen jälkeen ja ketjulla 3 vastaava luku oli 10,9. Ketjut 2 sekä 4 kestivät pudotuksia huomattavasti paremmin. Suunnilleen puolet näistä ketjuista selvisivät läpi koko testin. Ketjun 2 pudotuskeskiarvo oli 19,6 ja ketjulla 4 se oli 15,6.

Kuvassa 29 on eritelty jokaisen vastusketjun pudotusjakaumat tarkemmin. Jakaumista on havaittavissa syy edellisen kuvaajan tuloksille. Ketjujen 2 ja 4 ehjien ketjujen lukumäärä on huomattavasti suurempi kuin ketjujen 1, 3 ja 5. Keskilinjalla ketjujen jakaumat painottuvat muutenkin voimakkaammin vähäisille pudotusmäärille. Muutamia satunnaisia vaurioitumisia on tapahtunut suuremmilla pudotusmäärillä. Etenkin ketju 5 vaurioitui erityisen nopeasti. Vaurioituminen tapahtui peräti yhdeksän kertaa kuudestatoista jo ensimmäisellä pudotuksella. On mahdollista, että tämä johtuu pudotustestilaitteiston, erityisesti piirilevyalustan ruuvikiinnikkeiden pienistä eroavaisuuksista. Mikäli levyn toinen laita kokee kiinnityksen johdosta rajumpaa jännitystä kuin toinen, voi iskun aikaiset värinästä johtuvat räsäykset voimistua merkittävästi. Ketjujen 2 ja 4 jakaumat ovat huomattavasti tasaisempia. Nekin kyllä painottuvat vähäisille pudotusmäärille, mutta eivät läheskään niin voimakkaasti kuin keskilinjalla ketjut.



Kuva 29. Vastusketjujen pudotusjakaumat.

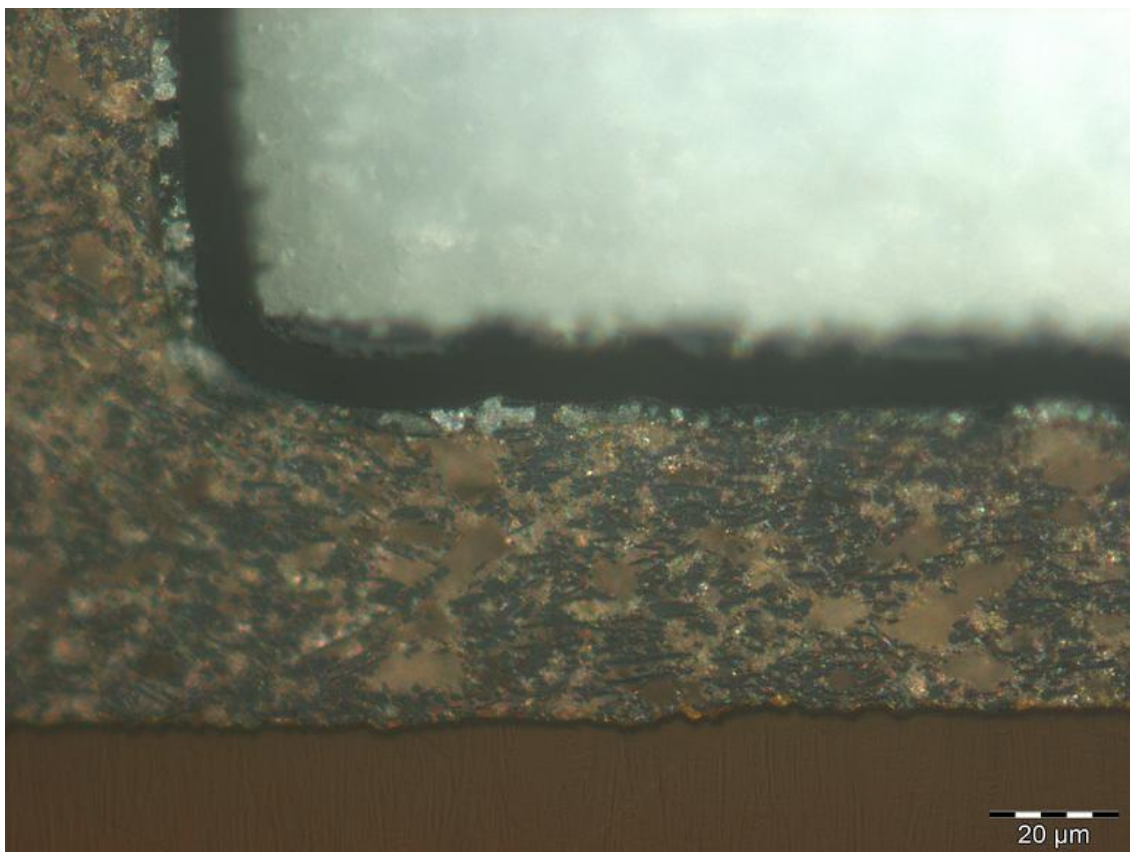
Vertailupohjaa tämänkaltaiselle tutkimukselle, jossa olisi tutkittu komponentin sijainnin vaikutusta liimaliitoksen kestävyys, on vaikea löytää. Sen sijaan asiaa on tutkittu metallijuotteilla, ja tulokset ovat olleet hyvin samansuuntaisia. Esimerkiksi Tee et al.[33] päätyivät tutkimuksissaan tuloksiin, että mekaaninen isku aiheuttaa piirilevyssä värähtelyä, joka on voimakkaimmillaan levyn keskiosassa. Voimakas värähtely edesauttaa juoteliioksen väsymistä ja täten nopeuttaa vikaantumista. [33]

6.3 Vikaantumisanalyysi

Pudotustestin jälkeen kuudesta testilevystä otettiin lähempään tarkasteluun yksi vaurioitunut liitos, siten että tarkasteltavaksi saatiin kolme pientä komponenttia sekä kolme suurta komponenttia. Liitokset valettiin epoksiin ja hiottiin siten, että niistä saatiin poikkileikkaus mikroskoopilla tutkittavaksi. Tarkasteltavaksi otetuissa liitoksissa havaittiin murtumia joko liiman sisällä, tai liiman ja liitosalueen välillä. Yhtäkään liiman ja komponentin välistä murtumaa ei kuitenkaan osunut tarkasteltavaksi. Käytössä oli mikroskooppi jolla oli mahdollisuus tarkastella 50-, 200-, 500- sekä 1000-kertaisia suurennoksia. Lisäksi käytössä oli stereomikroskooppi, jonka kuvat olivat hieman

epätarkempia sekä suurennokset pienempiä. Kyseistä mikroskooppia käytettiin kun haluttiin saada koko komponentti yhteen kuvaan, sillä läpileikkauksien tutkimiseen käytetty mikroskooppi oli tähän tarkoitukseen liian tarkka.

Kappaleessa 2.1. käsiteltiin ICA-liimojen ominaisuuksia. Kuvassa 30 on poikkileikkaus ICA-liimalla toteutetusta liitoksesta, ja siitä ilmenee hyvin johtavien hopeapartikkelien suhde liimamateriaaliin, sekä se miten sähköä johtavat reitit liiman sisällä muodostuvat.



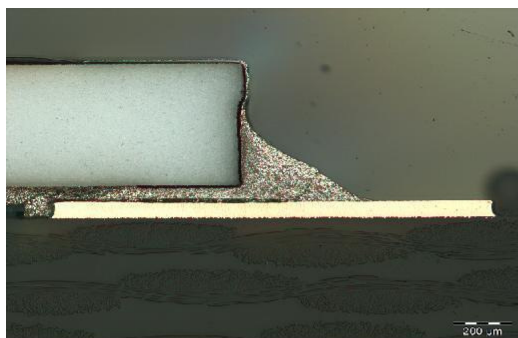
Kuva 30. ICA-liitoksen poikkileikkaus.

Kuten kuvasta havaitaan, hopeapartikkeleita on liiman seassa kohtuullisen suuri määrä. Johtavien partikkeleiden ja liimamateriaalin suhteen kanssa tulee olla erittäin tarkkana, jotta liimaseoksen sähkönjohtokykyä ei kasvateta liikaa adheesiokyvyn kustannuksella.

Tämä onkin usein ICA-liimojen yksi suurimmista ongelmista. Riittävän suurille tai usein toistuville mekaanisille shokeille altistuessaan liimaseoksen adheesio pettää huomattavasti perinteisiä juotteita nopeammin. Adheesio voi pettää joko liimaseoksen ja komponentin väliltä tai liimaseoksen ja liitosalueen väliltä. Lisäksi liimaseoksen sisälle saattaa syntyä murtuma.

Kuvassa 31 on esitettyä mikroskooppikuvat liiman ja liitosalueen välisestä murtumasta sekä liimaseoksen sisäisestä murtumasta. Kuvan a)- ja b)-kohdan tapauksessa nähdään 50- ja 200-kertaisena suurennoksena miten liitosalueen ja liiman

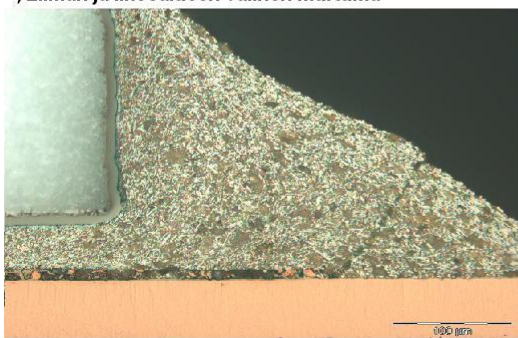
välinen adheesio on antanut periksi. Murtuma siirtyy kuitenkin liiman sisäiseksi ennen liima-alueen reunaa. Kokonaan liiman sisällä kulkeva murtuma on kuvattu 50- sekä 500-kertaisena c)- ja d)-kohdissa. Tämänyyppiset murtumat eivät sinällään vielä aina tarkoita piiriin toiminnallisuuden täydellistä menettämistä, vaan piiri saattaa vielä toimia aivan normaaliin tapaan. Murtumat kuitenkin jatkavat kasvamistaan ja leviämistään, kunnes jossain vaiheessa koko komponentti irtoaa tai muutoin sähköinen yhteys katkeaa.



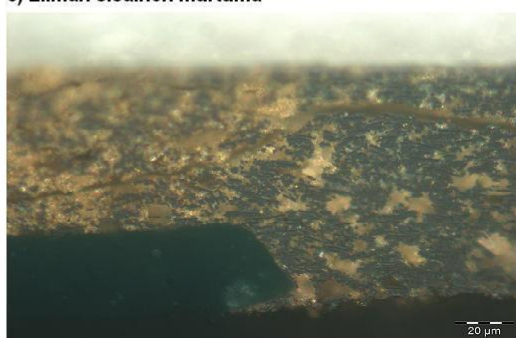
a) Liiman ja liitosalueen välinen murtuma



c) Liiman sisäinen murtuma



b) Edellinen 4 kertaa suurempana



d) Edellinen 10 kertaa suurempana

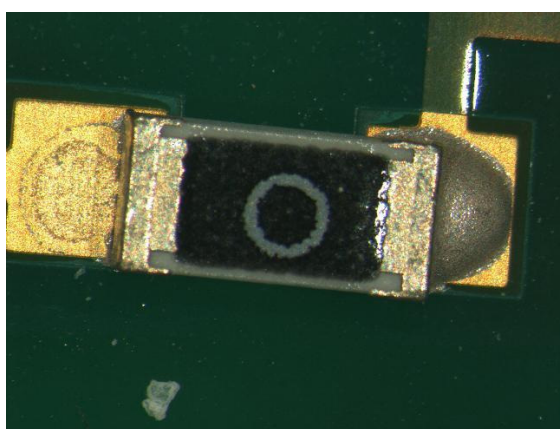
Kuva 31. Pudotustestin aiheuttamia murtumia.

Vastaavia tuloksia on saatu aiheesta aikasemmin tehdyissä tutkimuksissa. Esimerkiksi Liu et al. [9] testeissään havaitsivat murtumia, jotka alkoivat pystysuunnassa komponentin ja liimaliitoksen yläosan välillä. Ajan myötä murtuma eteni vaakatasoon komponentin ja liiman välille ja lopulta komponentin taitoskohdassa siirtyi liiman sisään. Siitä murtuma eteni liiman ja liitosalueen välille ja johti lopulliseen vaurioitumiseen. [9]

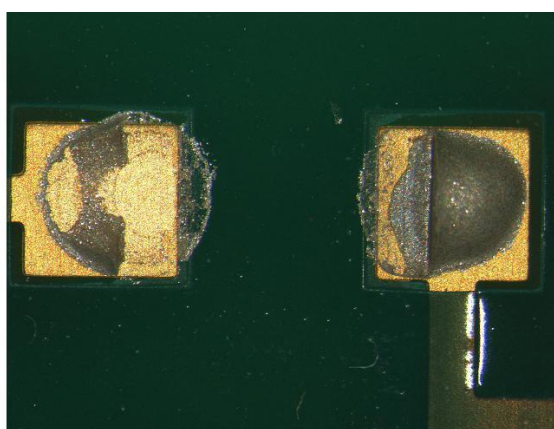
Joissain tutkimuksissa murtumia on löydetty jo kovettamisen jälkeen ennen varsinaisia ikäännyttämistestejä. Ikäännyttämisen aikana kyseiset murtumat ovat kehittyneet suuremmiksi. Tästä on raportoinut mm. Li et al. [34]. Botter et al. [35] määritteli ikäännyttämisen aikana syntyvien murtumien syyksi oksidien muodostumisen. Äskettäin tehdyssä tutkimuksessa ICA-liitosten heikkenemisestä kosteissa olosuhteissa Xu et al. [36] määritteli, että liimamateriaalin ja substraatin rajapintaan kohdistuva kosteushyökkäys voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa kosteus alkaa irrottamaan liimamateriaalia sijoiltaan

rajapinnalla. Toisessa vaiheessa alkaa metallin hapettuminen, ja kolmannessa rajapintaan muodostuu heikko oksidikerros. [9]

Suoritetuissa pudotustesteissä lähes jokaisen levyn kohdalla syntyneet murtumat johtivat ennenpitkää useampien komponenttien irtoamiseen. Joistain komponenteista irtosi vain liimaliitos toiselta puolelta, jolloin toisen puolen liimaliitos piti komponenttia vielä kiinni levyssä. Kuvassa 32 on esitelty kaksi edellä kuvattua tilannetta. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on esillä tilanne jossa toinen liimaliitos on irronnut, mutta komponentti pysyy vielä paikallaan toisen liimaliitoksen avulla. Kuvan b)-kohdassa komponentti on irronnut kokonaan. Vasemmanpuoleisen liitoksen murtuma on tapahtunut liiman ja liitosalueen välillä, kun taas oikeanpuoleisen liitoksen murtuma on tapahtunut liiman ja komponentin välillä.



a) Komponentti vielä paikallaan, mutta vasemmanpuoleisesta liitoksesta liima irronnut.



b) Komponentti irronnut kokonaan.

Kuva 32. Pudotustestissä esiintyneitä vaurioitumistyypppejä.

Poikkileikattujen komponenttien otanta oli niin pieni, ettei pitävää korrelaatiota komponenttikoon ja ikäännyttämisen aikamäärän vaikutuksesta vikaantumistyyppiin voi muodostaa. Kaikissa kolmessa poikkileikatussa pienessä komponentissa murtuma oli liiman sisällä. Isoissa komponenteissa sen sijaan murtuma oli useimmiten liiman ja liitosalueen välillä, vaikka muutamia liiman sisäisiäkin murtumia oli havaittavissa. Tämä saattaisi viitata siihen, että suurempien komponenttien isompi massa aiheuttaisi liiman ja liitosalueen välisen adheesioherkeyden menetyksen herkemmin. Puolestaan pienempimassaisilla komponenteilla adheesio pitää, mutta murtumat syntyvät liiman sisään. Otanta oli kuitenkin niin pieni, ettei siitä voi tehdä pitäviä johtopäätöksiä.

Suurien komponenttien osalta ilmeistä oli, että vallitseva vikaantumismekanismi muuttui ikäännytyssasteen noustessa 100:sta tunnista 200:an tuntiin. Alhaisemman ikäännyttämistasteen levyissä murtumat syntyivät korkeammilla pudotusmäärillä, mutta korkeimmalla ikäännytyssasteella ketjut vaurioituivat heti viimeistään toisella pudotuksella. Riittävän pitkä ikäännytyks aiheuttaa liimamateriaalin adheesiovien ominaisuuksien heikkenemistä, jolloin kookkaammat ja massaltaan suuremmat komponentit irtoavat herkemmin.

7 YHTEENVETO

Elektroniikkalaitteiden kehittyessä jatkuvasti pienempään suuntaan teollisuuden on kehitettävä uusia menetelmiä pakatakseen piirilevyt entistä tiheämmin. Tässä suhteessa sähköä johtavat liimat ovat yksi tulevaisuuden liitosteknologioista. Liimojen avulla tuotteista saadaan myös edullisempia ja ympäristöystävällisempiä. Toistaiseksi vielä sähköä johtavat liimat eivät kilpaile markkinajohtajan asemasta metallijuotteiden kanssa, mutta mikäli niiden kehitys jatkuu kiivaana, saattaa tilanne olla tulevaisuudessa toinen.

Liimaliitosten huonohko pitkäaikainen luotettavuus on niiden kenties merkittävin heikkous verrattuna juoteliitoksiin. Liimaliitokset reagoivat huonosti kosteisiin ja lämpimiin olosuhteisiin, sillä silloin niiden rajapinnoille alkaa muodostua sähköistä ja mekaanista liitosta heikentäviä tekijöitä. Esimerkki tällaisesta tekijästä on oksidikerros. Kenties suurin ongelma liimaliitosten, erityisesti ICA-liitoksen, käytön kannalta on kuitenkin niiden heikko iskunkestävyys. Tämä onkin valmistajien muutoshaluttomuuden lisäksi ehkä suurin este johtavien liimojen laajalle käyttöönotolle elektroniikassa. Ilman riittävää iskunkestävyyttä ECA-liitokset eivät kestä tuotannossa ja normaalissa käytössä tapahtuvia iskuja. Mekaaniset iskut aiheuttavat liimaliitoksessa väsymistä, ja pahimmassa tapauksessa suoran murtuman. Pelkkä murtuma ei vielä välttämättä katkaise sähköistä yhteyttä, mutta rasituksen jatkuessa murtuma laajenee ja johtaa lopulta liitoksen vaurioitumiseen ja pahimmassa tapauksessa koko laitteen vikaantumiseen.

Tässä työssä tutkittiin isotrooppisesti sähköä johtavien ICA-liimojen luotettavuusominaisuuksia, erityisesti ikäännyttämisen vaikutusta ICA-liimojen liitosresistansseihin sekä iskunkestävyyteen.

Ikäännyttäminen suoritettiin Especin valmistamassa olosuhdekaapissa, jossa testilevyjä altistettiin 85°C:n lämpötilalle ja 85%:n suhteelliselle kosteusprosentille 0:n, 50:n, 100:n ja 200:n tunnin ajan. Testilevyjen vastusketjuista mitattiin resistanssit sekä ennen, että jälkeen ikäännytystestin. Resistanssimittausten tulokset noudattivat hyvin odotuksia. Ikäännytmisasteen noustessa vastusketjujen resistanssitkin kasvoivat suhteellisen tasaisesti. Syynä resistanssin nousulle ikäännytystestien aikana on alan kirjallisuudessa esitetty mm. liimaliitoksiin absorpoitunutta kosteutta, joka aiheuttaa liitoksista hapettumista. Epäjalojen metallien oksidit toimivat liitoksissa eristeinä, ja täten kasvattavat liitosresistanssia. Vesi rajapinnoilla myös heikentää liiman adhesiivisia ominaisuuksia.

Pudotustestit suoritettiin Tampereen Teknillisen Yliopiston Elektroniikan Laitoksen pudotustestauslaitteistolla, jolla oli mahdollista suorittaa JEDEC:n pudotustestausstandardien mukaisia testejä. Pudotustestienkin tulokset olivat odotetunlaisia. Standardi, jonka pohjalta testi suoritettiin, on suunniteltu perinteisten metallijuotteiden testaamiseen. Oli odotettavissa, ettei suurin osa testatuista vastusketjuista kestäisi samaa mekaanista rasitusta, mitä metallijuotteilta vaaditaan. Näin testissä myös kävi, ja ikäännyttämisen kasvulla oli havaittavissa selkeä korrelaatio liitosten iskunkestävyyteen. Etenkin 200 tuntia ikäännytettyt levyt olivat herkkiä iskuille. Testien perusteella on selvää, että liimaliitosten iskunkestävyyksien tulee parantua vielä huomattavasti ennen kuin niiden on mahdollista haastaa metallijuotteet liitosmateriaalimarkkinoilla.

Testit sujuivat pääsääntöisesti hyvin. Jälkikäteen ajateltuna pudotustesti olisi pitänyt suorittaa hieman eri tavalla todenmukaisemman mittausdatan saamiseksi. Standardia noudatettiin hieman liian tarkasti, ja tästä syystä mittaustulosten käsittely todenmukaisten analyysien muotoon hankaloitui. Metallijuotteilla standardinmukainen menettely toimii paremmin kuin sähköä johtavilla liimoilla, vaikka juotteillakin etenkin kehitysvaiheessa on tärkeää vikaantumiseen asti testaaminen.

Tässä työssä olisi ollut järkevämpää viedä pudotustestit loppuun asti siten, että jokaista ketjua olisi pudotettu 30 kertaa tai niin kauan, kunnes kaikki ketjut olisivat vaurioituneet. Tällöin mittausdatasta olisi tullut havainnollisempaa. Suurin tuloksia vääristävä tekijä on standardin määrittämä pudotusmäärä. 30 pudotusta ei korreloi kovin hyvin sen määrän kanssa, mikä pudotuksissa vei 80% ketjuista vikaantumiseen. Toisia levyjä ei pudotettu nyt kuin kymmenkunta kertaa, jolloin niihin jäi vielä yksi ketju vaurioitumatta. Tämäkin ketju olisi saattanut vaurioitua mikäli levyä oltaisiin pudotettu täydet 30 kertaa. Pudotustestiä tulisi muuttaa ainakin siten, että testi suoritetaan joka levyllä loppuun asti. Toisin sanoen joka levyä tulisi tiputtaa mielellään niin kauan kunnes kaikki vastusketjut vaurioituvat, eikä 80% ketjuista kuten standardi määrittää. Maksimipudotusmäärän voi asettaa standardinmukaisesti 30:neen, mikäli sellaisen näkee tarpeelliseksi.

Testiin oltaisiin saatu hieman vertailupohjaa, mikäli oltaisiin testattu myös toista liimaa. Tämä olisi voinut olla esimerkiksi toisen valmistajan ICA-liimaa. Vaihtoehtoisesti oltaisiin voitu ottaa vertailuun myös jokin kaupallinen ACA-liima, joka oletettavasti olisi ollut jossain määrin ICA-liimaa kestävämpää. Tämä olisi kuitenkin moninkertaistanut työn määrän, joten alkuvaiheessa päätettiin keskittyä vain yhteen liimaan.

LÄHTEET

- [1] Luyckx, G., Dreezen, G. Electrically Conductive Adhesives as Solder Alternative: A Feasible Challenge. ICI Belgium. 13 s.
- [2] Nicolics, J., Mündlein, M. Electrically Conductive Adhesives. Institute of Sensor and Actuator Systems. s. 571-610.
- [3] Licari, J., Swanson, D. Adhesives Technology for Electronic Applications. William Andrew Publishing 2005. 459 s.
- [4] Hämäläinen, H. Polymeerimateriaalit Elektroniikassa. POLYKO-seminaari 7.5.2010. 86 s.
- [5] Wong, C.P., Lu, D, Tong, Q.K. Conductivity Mechanisms of Isotropic Conductive Adhesives. IEEE journal on Electronics Packaging Manufacturing, volume 22 #3 1999. s. 223-227.
- [6] Morris, J.E. Electrically Conductive Adhesives: A Comprehensive Review. Electrochemical Press 1999. s. 37-77.
- [7] Liu, J. Conductive Adhesives for Electronics Packaging. Electrochemical Publications 1999. 432 s.
- [8] Wong, C.P., Lu, D. Development of Solder Replacement Isotropic Conductive Adhesives. IEEE Electronics Packaging Technology Conference 2000. s. 214-221.
- [9] Liu, J., Salmela, O., Särkkä, J., Morris, J., Tegehall, P-E., Andersson, C. Reliability in Microtechnology: Interconnect, Devices and Systems. Springer 2011. 204 s.
- [10] Frisk, L. Reliability of Anisotropic Conductive Adhesive Bonded Flip Chip Joints on Organic Substrates. TUT 2007. 63 s.
- [11] Yim, M-J., Hwang, J-S., Kwon, W., Jang, K-W., Paik, K-W. Highly Reliable Non-Conductive Adhesives for Flip Chip CSP Applications. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, volume 26 #2 2003. s. 150-155.
- [12] Morris, J. E. Isotropic Conductive Adhesives: Future Trends, Possibilities and Risks. Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics 2005. s. 233-234.

- [13] Ohring, M. Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices. Academic Press 1998. 692 s.
- [14] O'Connor, P. D. T. Practical Reliability Engineering 4th Ed. Wiley 2002. 513 s.
- [15] Alajoki, M., Smolander, S. Elektroniikkalaitteen suunnittelu – ESD. [WWW] [viitattu 26.1.2011] saatavissa: <http://www.tkk.fi/Yksikot/Elektroniikka/Kurssit/171/Materiaali-2001/ESD.pdf>
- [16] Callister, W.D. Jr. Materials Science and Engineering, an Introduction 6th Ed. Wiley 2003. 820 s.
- [17] Mir, I., Kumar, D. Recent Advances in Isotropic Conductive Adhesives for Electronics Packaging Applications. International Journal of Adhesion and Adhesives 28 (2008). s. 362-371.
- [18] Suhir, E. Accelerated Life Testing (ALT) in Microelectronics and Photonics: It's Role, Attributes, Challenges, Pitfalls, and Interaction With Qualification Tests. Journal of Electronic Packaging 124(2002)2 s. 281-291.
- [19] Porter, A. Accelerated Testing and Validation. Elsevier 2004. 242 s.
- [20] Bhote & Bhote. World Class Reliability. Amacom 2004. 218 s.
- [21] Weibull.com. Weibull Distribution. [WWW] [viitattu 9.2.2011] saatavissa: http://www.weibull.com/AccelTestWeb/weibull_distribution.htm
- [22] Chiu, T-C., Zeng, K., Stierman, R., Edwards, D., Ano, K. Effect of Thermal Aging on Board Level Drop Reliability for Pb-free Packages. Electronic Components and Technology Conference 2004. s. 1256-1262.
- [23] Lau, J.H., Wong, C.P., Lee, N.C., Lee S.W.R. Electronics Manufacturing With Lead-free, Halogen-Free & Conductive-Adhesive Materials. McGraw-Hill 2003. 630 s.
- [24] Goyal, S., Buratynski, E.K. Methods for Realistic Drop-Testing. Microcircuits & Electronic Packaging 23(2000)1. s. 45-52.
- [25] JESD22-B111. Board Level Drop Test Method of Components for Handheld Electronic Products. USA 2003, JEDEC Solid State Technology Association. 13 s.
- [26] JESD22-B110A. Subassembly Mechanical Shock. USA 2004, JEDEC Solid State Technology Association. 9 s.

- [27] IPC/JEDEC-9703. Mechanical Shock Test Guidelines for Solder Joint Reliability. USA 2009, IPC. 37 s.
- [28] Yageo/Phicomp. Datasheet RC2010 Product Specification. Jul 15, 2008 V.3. 8 s.
- [29] Namics. Datasheet Silver Conductive Adhesive H9654. Unimec 2007. 1 s.
- [30] Pippola, J. Elektroniikan Pudotustestaus ja Testauslaitteiston Suunnittelu. TTY 2010. 60 s.
- [31] MMF. IEPE Standard. [WWW] [Viitattu 25.3.2011] saatavissa: http://www.mmf.de/iepe_standard.htm
- [32] Mechanics eBook. Strain Gages and Strain Rosette. [WWW] [Viitattu 1.4.2011] saatavissa: http://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?doc=&topic=me&chap_sec=08.3&page=theory
- [33] Tee, T. Y., Luan, J-e., Pek, E., Lim, C.T., Zhong, Z. Advanced Experimental and Simulation Techniques for Analysis of Dynamic Responses During Drop Impact. 54th Electronic Components and Technology Conference 2004. s. 1088-1094.
- [34] Li et al. Reliability and Failure Mechanism of Isotropically Conductive Adhesives Joints. 45th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), IEEE 1995. s. 114-120.
- [35] Botter, H., Van Der Plas, R.B., Arunjunai, A. Factors That Influence the Electrical Contact Resistance of Isotropic Conductive Adhesive Joints During Climate Chamber Testing. International Journal of Microelectronic Packaging Materials and Technologies. Vol 1, 1998. s. 177-185.
- [36] Xu, S.Y., Dillard, D.A., Dillard, J.G. Environmental Aging Effects on the Durability of Electrically Conductive Adhesive Joints. International Journal of Adhesion and Adhesives. Vol 23, 2003. s. 235-250.

LIITE 1: VASTUSKETJUJEN RESISTANSSIARVOT

Levy	Daisy-chain	R alussa (Ω)	50 h jälkeen (Ω)	100 h jälkeen (Ω)	200 h jälkeen (Ω)
Pieni 1	1	0,386			
	2	0,298			
	3	0,335			
	4	0,295			
	5	0,371			
Pieni 2	1	0,350			
	2	0,336			
	3	0,399			
	4	0,329			
	5	0,324			
Pieni 3	1	0,239	0,424		
	2	0,274	0,613		
	3	0,264	0,607		
	4	0,312	0,890		
	5	0,238	0,514		
Pieni 4	1	0,303	0,671		
	2	0,288	0,787		
	3	0,303	0,815		
	4	0,320	1,000		
	5	0,318	1,081		
Pieni 5	1	0,280		3,052	
	2	0,260		2,592	
	3	0,295		1,924	
	4	0,359		4,401	
	5	0,314		3,081	
Pieni 6	1	0,275		1,192	
	2	0,245		0,970	
	3	0,279		1,933	
	4	0,269		1,611	
	5	0,285		2,533	
Pieni 7	1	0,316			12,988
	2	0,255			5,209
	3	0,302			10,735
	4	0,255			2,619
	5	0,302			13,196

Pieni 8	1	0,295			3,873
	2	0,258			2,906
	3	0,275			5,290
	4	0,259			2,706
	5	0,270			2,702
Pieni 9	1	0,275			
	2	0,256			
	3	0,294			
	4	0,273			
	5	0,263			
Pieni 10	1	0,299			
	2	0,289			
	3	0,316			
	4	0,274			
	5	0,300			
Iso 1	1	0,283			
	2	0,303			
	3	0,305			
	4	0,283			
	5	0,297			
Iso 2	1	0,287			
	2	0,276			
	3	0,293			
	4	0,298			
	5	0,279			
Iso 3	1	0,290			
	2	0,264			
	3	0,297			
	4	0,306			
	5	0,262			
Iso 4	1	0,292			
	2	0,273			
	3	0,287			
	4	0,266			
	5	0,287			
Iso 5	1	0,266	0,837		
	2	0,269	0,814		
	3	0,257	0,576		
	4	0,260	0,582		
	5	0,249	0,348		

Iso 6	1	0,292	0,860		
	2	0,272	0,761		
	3	0,279	0,655		
	4	0,274	0,806		
	5	0,276	0,623		
Iso 7	1	0,305		1,470	
	2	0,304		3,067	
	3	0,292		1,165	
	4	0,272		1,123	
	5	0,289		0,851	
Iso 8	1	0,277		1,903	
	2	0,310		3,252	
	3	0,281		3,175	
	4	0,307		4,855	
	5	0,313		2,308	
Iso 9	1	0,300			1,979
	2	0,271			1,324
	3	0,315			2,252
	4	0,278			2,952
	5	0,304			3,027
Iso 10	1	0,271			6,009
	2	0,253			1,814
	3	0,285			4,480
	4	0,245			1,468
	5	0,258			3,700

LIITE 2: PUDOTUSTESTIEN TULOKSET

Levy	Daisy-chain	Vaurioon johtanut pudotuskerta	Resistanssi testin jälkeen (Ω)
Pieni 3 (50h) Pudotuksia yhteensä 16	1	1	-
	2	-	1,9
	3	12	-
	4	12	-
	5	3	-
Pieni 4 (50h) Pudotuksia yhteensä 30	1	3	-
	2	-	1,8
	3	-	4,4
	4	-	2,3
	5	8	-
Pieni 5 (100h) Pudotuksia yhteensä 13	1	5	-
	2	10	-
	3	1	-
	4	-	5,7
	5	1	-
Pieni 6 (100h) Pudotuksia yhteensä 17	1	7	-
	2	10	-
	3	2	-
	4	14	-
	5	7	-
Pieni 7 (200h) Pudotuksia Yhteensä 6	1	3	-
	2	-	3,5
	3	2	-
	4	2	-
	5	1	-
Pieni 8 (200h) Pudotuksia Yhteensä 30	1	-	5,6
	2	-	4,4
	3	-	4,3
	4	-	12,7
	5	1	-
Pieni 9 (0h) Pudotuksia yhteensä 30	1	25	-
	2	-	1,3
	3	-	23,2
	4	-	1,3
	5	-	6,9

Pieni 10 (0h) Pudotuksia yhteensä 30	1	-	1,6
	2	-	1,4
	3	20	-
	4	-	1,3
	5	12	-
Iso 3 (0h) Pudotuksia yhteensä 10	1	1	-
	2	-	3,4
	3	7	-
	4	5	-
	5	4	-
Iso 4 (0h) Pudotuksia yhteensä 11	1	2	-
	2	8	-
	3	2	-
	4	-	2,1
	5	2	-
Iso 5 (50h) Pudotuksia yhteensä 17	1	11	-
	2	13	-
	3	14	-
	4	-	5,1
	5	1	-
Iso 6 (50h) Pudotuksia yhteensä 7	1	4	-
	2	-	2,4
	3	2	-
	4	1	-
	5	1	-
Iso 7 (100h) Pudotuksia yhteensä 8	1	-	3,0
	2	3	-
	3	5	-
	4	2	-
	5	1	-
Iso 8 (100h) Pudotuksia yhteensä 22	1	19	-
	2	-	4,9
	3	14	-
	4	1	-
	5	1	-
Iso 9 (200h) Pudotuksia yhteensä 5	1	1	-
	2	2	-
	3	2	-
	4	1	-
	5	1	-

Iso 10 (200h) Pudotuksia yhteensä 5	1	1	-
	2	2	-
	3	1	-
	4	2	-
	5	1	-