

Jani Pehkonen

Piirilevyjen valmistettavuuden parantaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

19.11.2015

| | |
|---|---|
| Tekijä Otsikko | Jani Pehkonen Piirilevyjen valmistettavuuden parantaminen |
| Sivumäärä Aika | 39 sivua 19.11.2015 |
| Tutkinto | insinööri (AMK) |
| Koulutusohjelma | sähkötekniikka |
| Suuntautumisvaihtoehto | elektroniikka ja terveydenhuollon tekniikka |
| Ohjaajat | lehtori Esko Tattari, Metropolia Ammattikorkeakoulu DBS Leader Niku Jalkanen, Palodex Group Oy |
| <p>Tämä työ tehtiin Palodex Group Oy:lle. Työn tavoitteena on selvittää, miten HLEO-minitehtaan saantoa voisi parantaa. Ongelmanratkaisuprosessi käynnistettiin saannon tutkimiseksi ja fokuksiksi valittiin HLEO-minitehtaassa esiintyvät piirikorttivirheet. Työssä syvennytään piirikorttien valmistettavuuteen, valmistuksessa esiintyviin ongelmiin sekä asioihin, jotka kannattaa huomioida jo piirilevyjen suunnitteluvaiheessa.</p> <p>Työn sisältö muodostuu kahdesta osasta. Ensiksi käydään läpi yleisimmät piirilevyjen valmistusmenetelmät, kuten pintaladontatekniikka ja eri juotosprosessit. Osiossa annetaan myös neuvoja yleisimpien valmistusvirheiden ehkäisemiseksi. Valmistusprosesseja ei käydä läpi tarpeettoman yksityiskohtaisesti, jotta työn sisältö pysyisi selkeänä.</p> <p>Toinen osa sisältää tärkeitä huomioita ja riskejä, jotka nousivat esille valmistettavuusanalyysissä. Löydettyihin virheisiin tarjotaan samalla korjaavia ja ehkäiseviä toimenpiteitä. Tutkimus suoritettiin yhteistyössä valmistajan kanssa käyttäen kuutta erilaista piirikorttia. Valituissa piirikorteissa esiintyi eniten virheitä, minkä vuoksi näiden vaikutus minitehtaan saantotavoitteen saavuttamiseksi oli suurin.</p> <p>Yhteenveto tiivistää tärkeimmät analyysissä nousseet havainnot, jotka kannattaa ottaa huomioon tulevaisuuden piirilevyjä suunniteltaessa. Lisäksi korostetaan standardoidun dokumentoinnin tärkeyttä sekä valmistuksessa että testauksessa. Jälkeenpäin suoritettavat ongelmanratkaisut ovat helpommin ja nopeammin tehtävissä, kun eri prosessien dokumentit ovat hyvin laadittuja.</p> | |
| Avainsanat | Piirilevy, valmistus, saanto, stensiili, reflow-juotos, aaltojuotos, ongelmanratkaisu |

| | |
|---|---|
| Author Title | Jani Pehkonen Improving Manufacturability of Printed Circuit Boards |
| Number of Pages Date | 39 pages 19 November 2015 |
| Degree | Bachelor of Engineering |
| Degree Programme | Electrical Engineering |
| Specialisation option | Electronics and Medical Engineering |
| Instructors | Esko Tattari, Senior Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences Niku Jalkanen, DBS Leader, Palodex Group Oy |
| <p>This thesis was made for Palodex Group Oy. The purpose of this work was to improve the first pass yield of HLEO mini factory. Problem solving process was initiated for investigating printed circuit board defects which occurred in HLEO mini factory. The focus was taken towards printed circuit board manufacturing and assembly. Enhancing printed circuit board design for manufacturing is the scope of this work.</p> <p>The thesis contains two different parts. In first part, the most common manufacturing methods for printed circuit boards are reviewed, like surface mount technology and Reflow soldering. Considerations like how to avoid possible defects in certain manufacturing processes are offered. Excessive details of the processes are not reported so that the outline will stay clear.</p> <p>The second part covers the key issues that emerged in manufacturability analysis. Preventive actions for avoiding such defects are presented. The study was performed together with manufacturer for six different printed circuit board assemblies. Selected printed circuit boards had the most impact on the gap, between the mini factory's yield and the goal.</p> <p>The thesis is concluded with some essential design issues which need to be revised in future development of printed circuit boards. It is also crucial to collect highly standardized data in testing environment for easier and more efficient problem solving.</p> | |
| Keywords | Printed circuit board assembly, manufacturing, yield, stencils, reflow soldering, wave soldering, problem solving |

Sisällys

Lyhenteet

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto | 1 |
| 2 | Piirilevyn valmistusprosessi | 2 |
| 2.1 | Piirilevyn valmistus | 3 |
| 2.1.1 | Materiaalit | 3 |
| 2.1.2 | Prosessin kulku | 5 |
| 2.1.3 | Piirilevysuunnittelu | 6 |
| 2.1.4 | Kuvionsiirto, kehitys ja etsaus | 7 |
| 2.1.5 | Poraus | 9 |
| 2.1.6 | Juotosmaski | 11 |
| 2.1.7 | Testaus | 11 |
| 2.2 | Piirilevyn kalustaminen | 12 |
| 2.2.1 | Prosessin kulku | 13 |
| 2.2.2 | Vastaanottotarkastus | 13 |
| 2.2.3 | Pintapuolen SMT-juotosprosessi | 15 |
| 2.2.4 | Pohjapuolen SMT- ja THT-juotosprosessi | 18 |
| 2.2.5 | Käsinladonta ja aaltojuotos / selektiivinen juotos | 19 |
| 2.2.6 | Juotostarkistus | 22 |
| 2.2.7 | Testaus | 23 |
| 3 | Piirikorttien laadunparantamisprosessi | 24 |
| 3.1 | Pintaliitostekniikan ja Reflow-juotoksen riskit | 26 |
| 3.1.1 | Stensiilin ominaisuudet | 29 |
| 3.2 | Käsinladonnan riskit | 31 |
| 3.2.1 | Piirilevyn merkinnät | 31 |
| 3.2.2 | Läpiladottavien komponenttien reikäkoko | 32 |
| 3.3 | Aaltojuotosprosessin riskit | 33 |
| 3.4 | Testauksen riskit | 35 |
| 3.5 | Piirikorttien saannon nykytila | 36 |
| 4 | Yhteenveto | 37 |
| | Lähteet | 39 |

Lyhenteet

| | |
|------|---|
| AOI | Automated Optical Inspection. Automaattinen optinen tarkastus. |
| BGA | Ball Grid Array. Integroitu piiri, jonka pohjassa on pallomaiset juotoskontaktit. |
| CTE | Coefficient of Thermal Expansion. Lämpölaajenemisen kerroin. |
| FPGA | Field Programmable Gate Array. Ohjelmoitavaa logiikkaa sisältävä digitaalinen mikropiiri. |
| NEMA | National Electrical Manufacturers Association. Kansainvälinen elektronikanalan valmistajien yhdistys. |
| PCB | Printed Circuit Board. Piirilevy ilman komponentteja. |
| PCBA | Printed Circuit Board Assembly. Piirilevy komponenttien kanssa. |
| PTH | Plated Through Hole. Metalloitu läpivienti. |
| ROHS | Restriction of Hazardous Substances. Euroopan unionin direktiivi vaarallisten aineiden käytön rajoittamiseen. |
| SMT | Surface Mount Technology. Pintaliitostekniikka. |
| SOIC | Small Outline Integrated Circuit. Pintaliitostekniikkaa käyttävät integroitu piiri. |
| THT | Through Hole Technology. Läpiladottava tekniikka. |

1 Johdanto

Palodex Group Oy on suomalainen terveysteknologian yritys, jonka huippuosaamista on hampaiston ja pään alueen kuvantaminen. Palodex Group Oy suunnittelee, valmistaa, myy ja markkinoi laitteistoja ja ratkaisuja ympäri maailmaa, ja on erityisen tunnettu brändeistään Instrumentarium Dental ja SOREDEX. Tuotevalikoima kattaa intraoraaliset- (suunsisäinen), ekstraoraaliset- (suunulkoinen) ja 3D-kuvantamismenetelmät. Palodex Group Oy:n pääkonttori ja tuotantolaitos sijaitsevat Tuusulassa. Palodex Group Oy kuuluu kansainväliseen Danaher-konserniin. Konserni omistaa yrityksiä eri toimialoilta, kuten hammaslääketieteestä, ympäristö- ja teollisuusteknologiasta sekä mittalaitetekniikasta. Muun muassa Fluke, Tektronix ja Pall kuuluvat Danaheriin. [Palodex Group Oy 2015; Danaher 2015.]

Palodex Group Oy:n menestys riippuu asiakkaiden tyytyväisyydestä. Asiakastyytyväisyyden kulmakivenä on laatu: kaikkien asiakkaille päätyvien tuotteiden tulee täyttää ostajan vaatimukset. Laatua seurataan ja kehitetään jatkuvasti lean-filosofian mukaisin toimintamallein ja menetelmin. Työvaiheiden standardointi, visualisointi, Kaizen-tapahtumat ja jatkuva parantaminen ovat yleisiä yrityksessä. Teollisuudessa laatua mitataan usein käyttäen saantoa eli virheellisten tuotteiden suhdetta virheettömiin. Saanto on hyvä esittää visuaalisena laatumittarina, jota on tehokasta seurata.

Tämän insinööriyön tavoitteena on tutustua piirilevyjen valmistuksen eri prosessivaiheisiin ja perehtyä niissä esiintyviin ongelmiin. Piirilevyjen valmistusprosessit ovat erittäin monimutkaisia, joten tässä työssä keskitytään tyypillisiin valmistusmenetelmiin. Toisena tavoitteena on parantaa Palodex Group Oy:ssä käytettävien piirikorttien valmistettavuutta yhteistyössä valmistajan kanssa. Piirikorttien helppo ja varma valmistettavuus on yksi asia, joka takaa käytettävien piirikorttien korkean laadun. Tämän työn lopussa käydään läpi yleisimpiä valmistushaasteita, jotka tulivat vastaan laadunparannuksen yhteydessä. Piirilevyjen laadunparannus on jatkuva ja pitkä prosessi, joka koostuu monista pienistä korjaavista toimenpiteistä, kun tavoitteena on 100 %:n saanto.

2 Piirilevyn valmistusprosessi

Piirilevyjen historia voidaan jäljittää vuoteen 1936, jolloin syntyi tarve yhdistää elektronisia komponentteja toisiinsa. Tällöin piirilevyn määriteltiin olevan tasainen dielektrinen taso, joka oli tarpeeksi jäykkä kannatellakseen komponentteja. Nämä komponentit yhdistettiin toisiinsa erillisillä johdoilla, mutta nopeasti siirryttiin käyttämään kuparia, joka liimattiin piirilevyn pintaan. Tämä ei kuitenkaan soveltunut massatuotantoon, joten oli pakko keksiä jokin parempi tapa yhdistää komponentit toisiinsa. Keksittiin kaksi mahdollista ratkaisua: joko kokonainen dielektrinen taso pinnoitetaan kuparilla, ja tästä poistetaan etsaamalla ei-halutut kuparialueet, tai toisena vaihtoehtona oli lisätä kuparointi ainoastaan halutuille paikoille dielektrisen tason pintaan. Molemmat tavat ovat edelleen käytössä, mutta ensin mainittu on yleisempi. [Jawitz 1997: 26.1.]

Piirilevyjen valmistus voidaan jaotella kahteen osaan. Ensin valmistetaan piirilevy (PCB), joka koostuu kuparijohtimista, hartsista ja vahvikkeesta. Tämä piirilevy voi olla monikerroksinen sekä sisältää reikiä ja monenlaisia pinnoitteita. Piirilevyn valmistus käsitellään kappaleessa 2.1. Piirilevyn jälkimmäinen valmistusvaihe on sen kalustaminen. Tässä vaiheessa piirilevyille lisätään ja juotetaan kaikki komponentit sekä muut tarvikkeet, joita piirilevy toiminnassaan tarvitsee. Kalustamisen jälkeen piirilevyä voidaan kutsua PCBA:ksi. Kalustamisen vaiheita käsitellään kappaleessa 2.2.

Nyky aikaisten piirilevyjen valmistusprosessit ovat erittäin monimutkaisia sisältäen, sekä kemiallisten reaktioiden sarjoja että mekaanisten laitteiden käsittelyä. Piirilevyjen valmistus on pitkälle automatisoitua volyymituotantoa. Eri prosesseissa on mahdollisuus toimintavikojen syntyyn lopputuotteessa, eikä näiden vikojen korjaaminen jälkikäteen ole aina mahdollista. [Plumbridge ym. 2003: 149.]

2.1 Piirilevyn valmistus

Piirilevyt voidaan jakaa kuuteen ryhmään [Jawitz 1997: 12.1–12.21]:

- tyyppi 1 – yksipuolinen levy
- tyyppi 2 – kaksipuolinen levy
- tyyppi 3 – monikerroksinen levy, jossa ei ole sokeita tai haudattuja läpivientejä
- tyyppi 4 – monikerroksinen levy, jossa on sokeita tai haudattuja läpivientejä
- tyyppi 5 – monikerroksinen levy, jossa on metallinen ydin, eikä ole sokeita tai haudattuja läpivientejä
- tyyppi 6 – monikerroksinen levy, jossa on metallinen ydin sekä sokeita tai haudattuja läpivientejä.

Tässä työssä keskitytään piirilevytyyppien 3 ja 4 piirilevyjen valmistukseen, koska suurin osa Palodex Group Oy:n piirilevyistä on tällaisia. Piirilevyjen valmistus saattaa vaihdella huomattavasti luokitusten sisällä. Tähän vaikuttavat käytettävät materiaalit, valmistusmäärät, loppukäyttökohteet, laadulliset tavoitteet sekä käytettävissä olevat välineet. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi yleisimmin käytössä oleva tapa valmistaa tyyppin 3 ja 4 piirilevyjä.

2.1.1 Materiaalit

Piirilevyn materiaalit voidaan jakaa kolmeen perusosaan: johdinmateriaali, hartsi ja vahvike. Johdinmateriaaliksi on teollisuudessa vakiintunut kupari. Kuparin ominaisuudet, mm. hyvä sähkönjohtavuus ja hinta, tekevät siitä suosituksen. Hartsina käytetään pääosin epoksia tai polyestereitä. Vahvikkeena on yleisesti lasikuitu, mutta erittäin vaativissa sovelluksissa voidaan käyttää Aramidi-kuituja. Valmistuksessa käytetään asiakkaan haluaa yhdistelmää hartseista ja vahvikkeista. Hartsin ja vahvikkeen määrät vaikuttavat voimakkaasti piirilevyn lämpölaajenemiskertoimeen eli CTE-arvoon, dielektrisyysvakioon ϵ_r sekä piirilevyn paksuuteen. Kevyemmät kuidut antavat sileän pinnan piirilevyille, jolloin reikien poraaminen on helppoa, ja dielektrisyysvakio on pieni. Toisaalta kevyet kuidut ovat paljon kalliimpia kuin suuremmat. Käyttötarkoitus määrittää pitkälti käytettävän kombinaation, mm. korkeataajuisissa piireissä dielektrisyysvakio on otettava huomioon. [Jawitz 1997: 9.2–9.9.]

Taulukko 1. NEMA-materiaalien perusluokitukset.

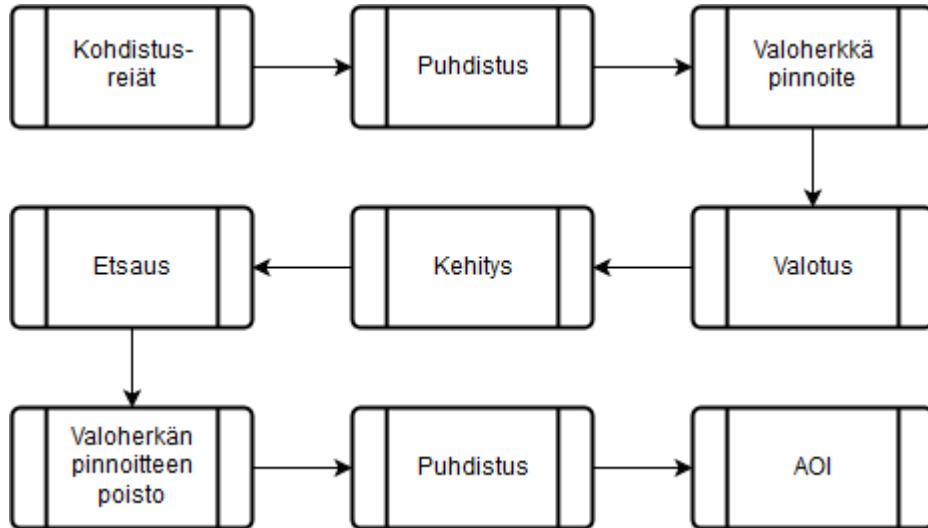
| Luokka | Harts | Vahvike |
|--------|------------|------------------|
| XXXPC | Fenoli | Paperi |
| FR-2 | Fenoli | Paperi |
| FR-3 | Epoksi | Paperi |
| FR-4 | Epoksi | Lasikuitu |
| FR-5 | Epoksi | Lasikuitu |
| FR-6 | Polyesteri | Pleksi |
| G-10 | Epoksi | Lasikuitu |
| CEM-1 | Epoksi | Paperi/Lasikuitu |
| CEM-2 | Epoksi | Paperi/Lasikuitu |
| CEM-3 | Epoksi | Lasikuitu/Pleksi |
| CEM-4 | Epoksi | Lasikuitu/Pleksi |
| CRM-5 | Polyesteri | Lasikuitu/Pleksi |
| CRM-6 | Polyesteri | Lasikuitu/Pleksi |
| CRM-7 | Polyesteri | Pleksi |
| CRM-8 | Polyesteri | Pleksi |

NEMA on tehnyt perusmateriaaleille taulukon 1 mukaiset luokitukset, joiden pohjalta on luotu laajempi ja yleinen standardi IPC-4101. IPC-4101 sisältää spesifikaatiot eri materiaaleille sekä luokittelun eri materiaalien tunnistukseen. [Coombs 2001: 5.7–5.8.]

Elektroniikassa erittäin suosittu piirilevyn materiaali on jäykkä FR-4. Se on palamatonta, lasikuidulla vahvistettua epoksipohjaista hartsia. FR-4-materiaalissa hartsin määrä vaihtelee ja hartsin vaihtelusta johtuen FR-4 piirilevyjen T_g arvo vaihtelee. T_g on hartsin lasittumislämpötila, joka on vahvasti verrannollinen piirilevyn CTE-arvoon. IPC-4101 standardi määrittää, että lasittumislämpötila pitää olla vähintään 110 °C, mutta yleisesti se on 130–140 °C tai 170–180 °C. FR-4-luokitus on laaja luokitus, jonka sisällä on yksinkertaisille sovelluksille toimivia materiaalien kombinaatioita kuin myös haastaviin, pientä dielektrisyysvakiota ja alhaista häviötä vaativiin sovelluksiin. Yhteistä kaikille FR-4-materiaaleille on lasikuitu ja epoksipohjainen hartsi, jotka toimivat yleisesti ottaen hyvin yhdessä. Nämä ovat helposti prosessoitavissa sekä halpoja käyttää. [Coombs 2001: 5.2–5.10.]

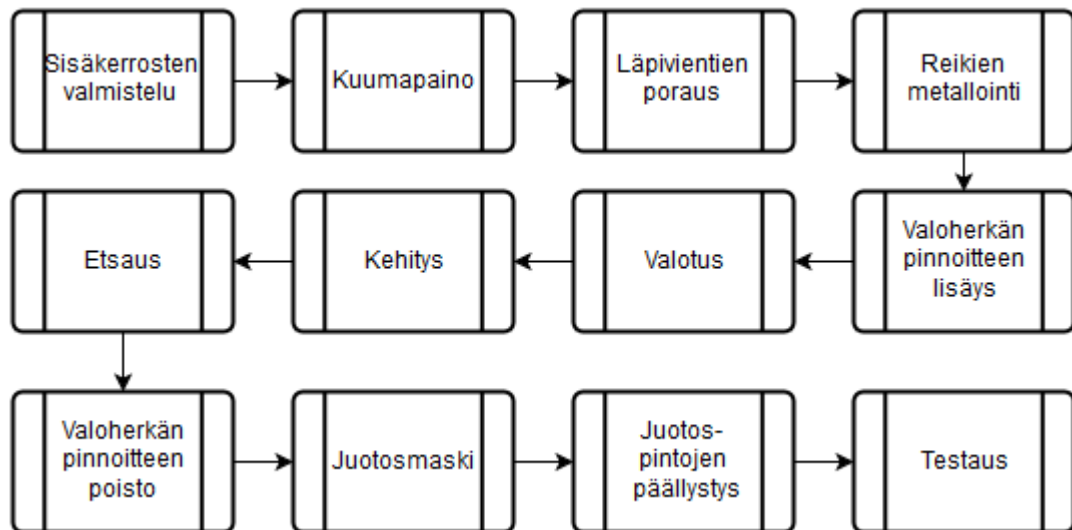
2.1.2 Prosessin kulku

Monikerroslevyn prosessikaavio voidaan jakaa kahteen ryhmään. Ensimmäisessä vaiheessa tehdään sisäkerrokset, ja jälkimmäisessä vaiheessa nämä kerrokset yhdistetään ja valmistetaan uloimmat kerrokset. Tyypin 3 piirilevyn sisäkerrosten prosessikaavio on esitetty kuvassa 1 ja jälkimmäisen vaiheen prosessikaavio kuvassa 2. [Jawitz 1997: 12.9–12.15.]



Kuva 1. Prosessikaavio piirilevyn sisäkerroksille [Jawitz 1997: 12.9]

Prosessin ensimmäisessä vaiheessa sisäkerrokseen stanssataan tai porataan kohdistusreiät. Kohdistusreikien avulla sisäkerrokset kohdistuvat päällekkäin asetettaessa oikein. Toisessa vaiheessa piirilevy puhdistetaan, minkä jälkeen voidaan lisätä valoherkkä pinnoite. Pinnoite valotetaan, minkä jälkeen se kehitetään. Tämän jälkeen kehittymätön pinnoite poistetaan ja paljas kupari etsataan eli syövytetään pois. Lopuksi suoritetaan AOI eli automaattinen optinen tarkastus piirilevyn johdinkuvioinnille.



Kuva 2. Prosessikaavio monikerrospiirilevyille [Jawitz 1997: 12.10]

Kun sisäkerrokset ovat valmiina, siirrytään niiden yhdistämiseen. Aluksi sisäkerrokset valmistellaan yhdistämistä varten, minkä jälkeen ne pinotaan kuumapainoon eli prässäiin. Prässissä piirilevyn sisä- ja ulkokerrokset kiinnittyvät toisiinsa pysyvästi. Prässin jälkeen aloitetaan läpivientien poraus. Porauksen jälkeen reikien sisäpinnat käsitellään ja metalloidaan. Tämän jälkeen voidaan valottaa, kehittää ja etsata molemmille ulkokerroksille omat johdinkuviot. Johdinkuvioiden ollessa valmiit voidaan lisätä juotosmaski. Lopuksi suoritetaan sähköinen jatkuvuus- ja oikosulkutestaus.

2.1.3 Piirilevysuunnittelu

Suunnittelun näkökulmasta piirilevyt voidaan jakaa kahteen ryhmään. Molemmilla ryhmällä on omat tunnusmerkinsä loppukäyttökohteessa. Ensimmäinen ryhmä sisältää piirilevyt, joita on tarkoitus käyttää analogi-, radiotaajuus- tai mikroaaltosovelluksissa. Näille piirilevyille tyypillistä on johdinten yksinkertaiset reitit, tarkat sovitukset impedanssissa, signaalien häviöiden minimointi, yksi- tai kaksikerroksisuus sekä alhainen ja yhdenmukainen dielektrinen vakio. Toiseen ryhmään kuuluvat digitaaliset piirilevyt, joiden ominaisuuksia ovat erittäin monimutkainen johdinreititys, olemassa oleva toleranssi impedanssisovituksille ja signaalien häviöille, monta eri signaali- tai tehokerrosta sekä dielektrisen vakion pieni vaikutus. Seuraavissa kappaleissa käsitellään digitaalipohjaisia piirilevyjä. [Coombs 2001: 13.1–13.9.]

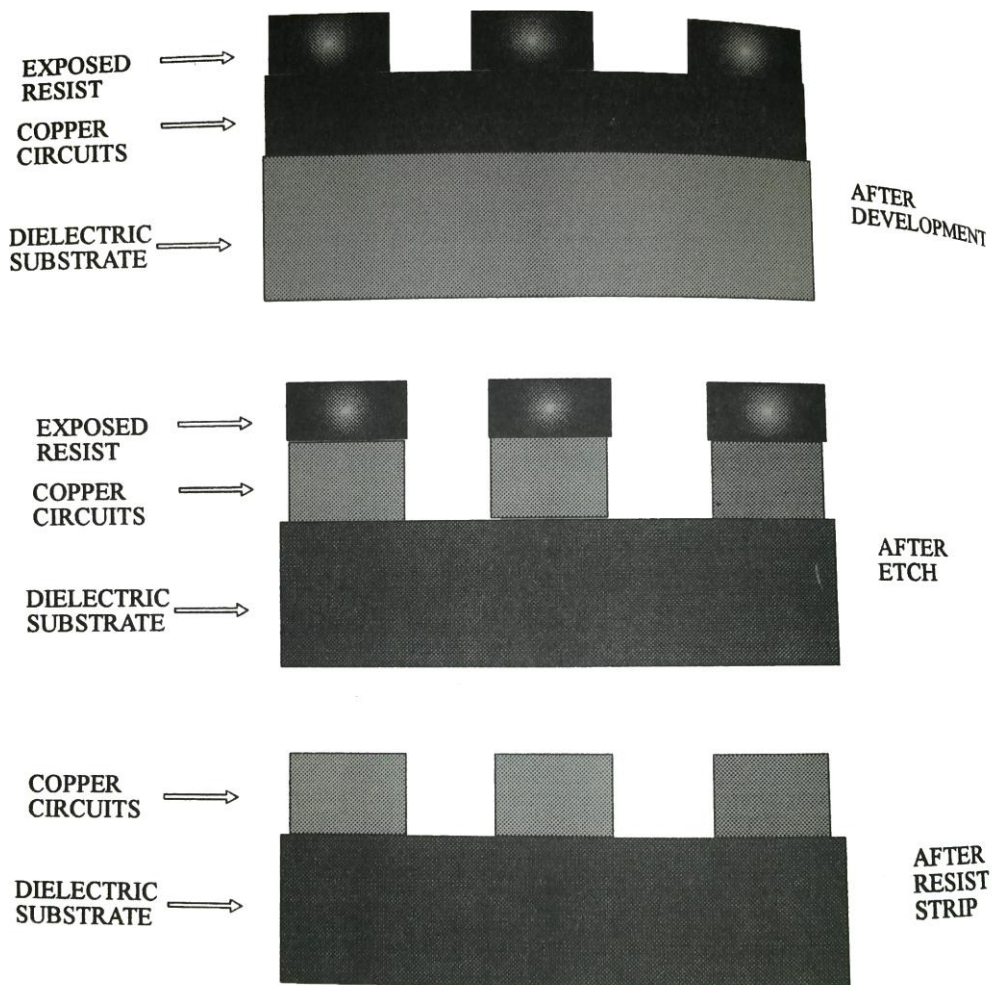
Piirilevyjen suunnittelu noudattaa samoja prosesseja molemmissa ryhmissä. Ensimmäinen vaihe suunnittelussa on määrittää piirilevylle halutut ominaisuudet ja toiminnallisuudet, kuten käyttöympäristö, hinta, suunnittelun aikataulu, teknologioiden valinta, paino ja koko. Nämä päätökset on tärkeä tehdä jo ensimmäisessä vaiheessa, koska tämän pohjalta valitaan käytettävät materiaalit ja työkalut. Toisessa vaiheessa piirretään lohkokaavio, josta nähdään pääfunktiot ja niiden väliset yhteydet. Kolmannessa vaiheessa hahmotellaan kokonaiskuvaa eli pohditaan, montako piirilevyä tarvitaan vai riittääkö vain yksi. Tämän jälkeen tulee tietää, minkä kokoinen piirilevystä tulee. Usein käyttökohde antaa rajat piirilevylle. Viides vaihe on piirtää kytkentäkaavio, jonka jälkeen voidaan alkaa rakentaa komponenttikirjastoa. Ennen komponenttien sommittelua on hyvä simuloida piirin sähköistä toimintaa. Komponenttien sijoittelussa on tärkeää ottaa huomioon nopeiden digitaalipiirien nousu- ja laskuajat sekä ennen itse reitittämistä on hyvä suorittaa arviot signaalijohtimien pituuksista. Tämän perusteella voidaan havaita mahdollisia ongelmia viiveissä tai heijastuksissa. Näiden toimenpiteiden jälkeen yhteydet voidaan reitittää. Reitityksen ja monien tarkistusten jälkeen voidaan luoda tiedostot valmistukseen. Valmistustiedostot ovat yleisesti Gerber-tiedostomuodossa. Usein näitä tiedostoja kutsutaan Gerbereiksi ja niistä löytyy muun muassa käytettävät materiaalit, poraussijainnit, eri maskien suunnitelmat sekä osalistaus. [Coombs 2001: 14.1–14.6.]

2.1.4 Kuvionsiirto, kehitys ja etsaus

Kuvionsiirrolla tarkoitetaan johdinkuvion valmistamista piirilevyn kuparointiin. Jotta piirilevylle saadaan haluttu kuviointi, täytyy piirilevyn kuparointi päällystää valoherkällä pinnoitteella. On tärkeää, että nämä vaiheet suoritetaan puhdastiloissa, joissa on käytössä keltainen valaistus, keskimääräinen ilmankosteus saa olla 40–60 % sekä lämpötila 20–22 °C. Suurin virheiden aiheuttaja on epäpuhtaus. Esimerkiksi hius, jonka halkaisija on noin 0,05 mm, voi aiheuttaa katkoksen johtimeen. [Jawitz 1997: 14.1–14.3.]

Piirilevyn sisäkerroksia tehtäessä johdinkuviointi tulostetaan aluksi erittäin tarkasti läpinäkyvälle kalvolle. Läpinäkyvässä kalvossa johdinkuvio jää läpinäkyväksi ja kaikki muu tulostetaan mustaksi. Eryistä huomiota on annettava johtimien reunoille, koska niissä tulee olla suuri ja tarkka kontrastinen ero. Tämä kalvo asetetaan piirilevyn päälle, johon on lisätty valoherkkä pinnoite. Tämän jälkeen suoritetaan valotus, jossa ultravioletivalo osuu tulostetun kalvon vapaille alueille. Valoherkkä pinnoite polymerisoituu eli kovettuu valottuneilta osilta. Kovettunut alue kehitetään. Kehityksen jälkeen pehmeä alue poistetaan kemiallisesti. Piirilevyssä on tällöin näkyvillä ei-haluttu kupari sekä johdinkuviointi,

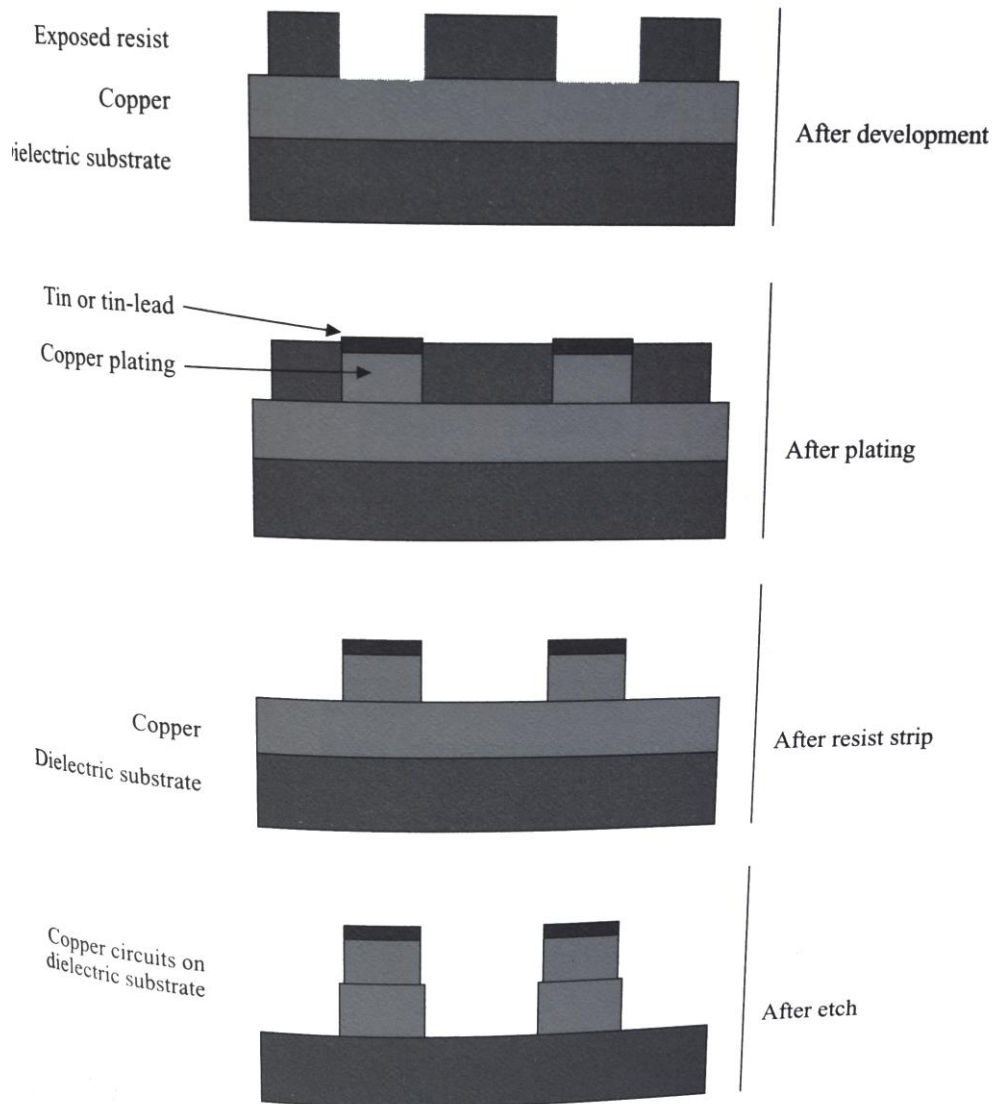
joka on päällystetty kovettuneella pinnoitteella. Ei-haluttu kuparointi on nyt mahdollista etsata pois, kuten kuvassa 3 on esitetty. Etsauksen jälkeen tämä kovettunut pinnoite voidaan poistaa kemiallisesti. Jäljelle jää haluttu kuparinen johdinkuvio. [Jawitz 1997: 14.3–14.12.]



Kuva 3. Piirilevyn sisäkerrosten etsausprosessi [Jawitz 1997: 14.6.]

Piirilevyn ulkokerroksien johdinkuviot tehdään eri tavalla kuin sisäkerroksien vastaavat. Kuvasta 4 nähdään, että ulkokerroksien kuparointi päällystetään valoherkällä pinnoitteella. Ulkokerroksissa valotukseen käytettävässä tulosteessa tummennettuna on johdinkuvio. Tällöin valotuksessa johdinkuvio jää pehmeäksi, ja niiltä osin valoherkkä pinnoite on poistettavissa. Pinnoitteen poiston jälkeen kuparia ei etsata pois vaan sitä lisätään toinen kerros kuparoinnin päälle. Kuparia lisätään valoherkän pinnoitteen verran ja tämän jälkeen kuparin pintaan lisätään esimerkiksi tinakerros. Tinakerros estää kuparia

syöymästä etsauksessa. Tämän jälkeen kovettunut valoherkkä pinnoite voidaan poistaa, jolloin poistettava kuparointi on etsattavissa. Etsauksen jälkeen piirilevy on valmis seuraaviin prosesseihin. [Jawitz 1997: 14.3–12; 27.1–27.8.]

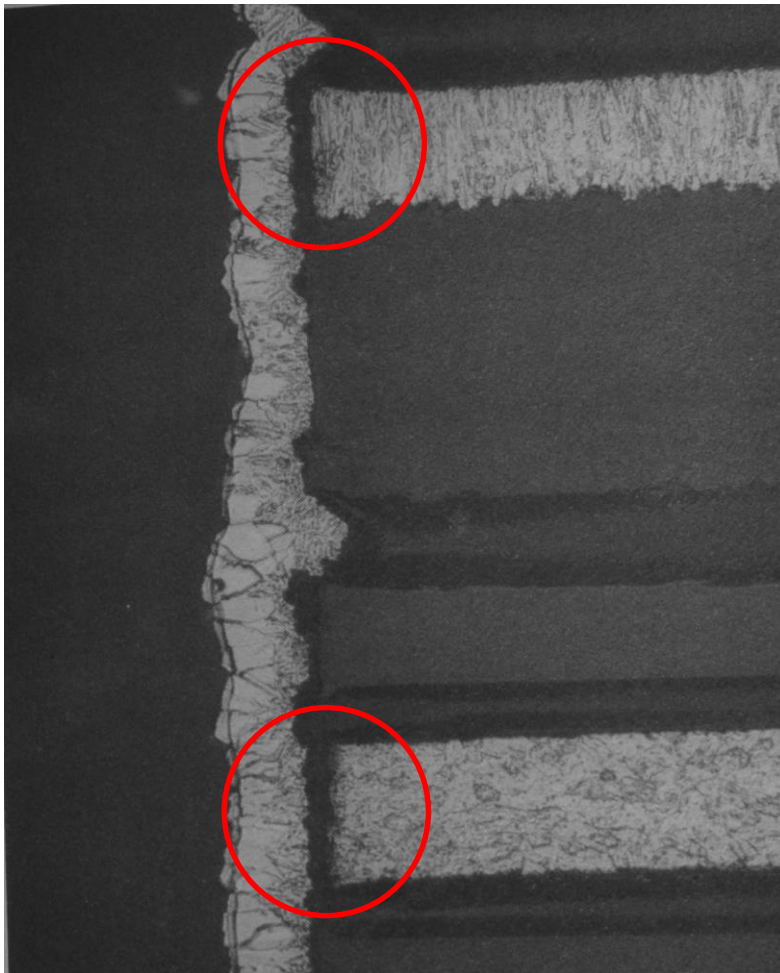


Kuva 4. Piirilevyn ulkokerrosten etsausprosessi [Jawitz 1997: 14.7.]

2.1.5 Poraus

On huomattava, että ennen piirilevyn ulkokerroksien etsausta on piirilevy kasattava yhteen. Yleisesti käytössä olevassa prässäystekniikassa piirilevyt kasataan päällekkäin, ja jokaiseen väliin asetetaan vahvikekerros (eng. prepreg), joka on kyllästetty hartsilla. Levyt lämmitetään ja painetaan toisiaan vasten. Lämpötilan korkeus on riippuvainen hartsin lasittumislämpötilasta. [Jawitz 1997: 9.1–9.42.]

Ennen reikien poraamista piirilevyn molemmat puolet on peitettävä. Piirilevyn päällysmateriaalin tarkoitus on keskittää poranterä, estää päällimmäistä kuparia muodostamasta pursesta sekä estää terää hajoamasta. Pohjamateriaalin tärkeimmät tehtävät on estää purseen muodostuminen pohjapuolelle sekä minimoida porauslämpötilaa. Poraukseen käytetään tietokoneohjattuja laitteita. Näillä laitteilla voidaan porata kolmesta neljään päällekkäistä piirilevyä. Porattavat reiät voivat olla halkaisijaltaan jopa 0,05 mm ja sijainti voidaan määritellä 0,020 mm:n tarkkuudella. Poranterä pyörii paineilmalla, ja pienen reikäkoon takia terän tarvitsee pyöriä vähintään 100 000 kierrosta minuutissa. Päällys- ja pohjamateriaalit sekä terän materiaali riippuvat paljon piirilevyssä käytetyistä materiaaleista. [Jawitz 1997: 19.1–20.28.]



Kuva 5. Porauksen seurauksena tapahtunut hartsin valuma on aiheuttanut katkoksen molemmissa tasoissa. [Jawitz 1997: 21.2]

Reiät täytyy käsitellä porauksen jälkeen. Käsitteilyllä varmistetaan sähköinen johtavuus reiässä sekä kontaktit eri kerrosten välillä. Suurin riski, joka voi syntyä porauksen yhteydessä, on kuvan 5 mukainen hartsin juoksettumisesta johtuva hartsin valuminen. Ennen

reikien päällystämistä täytyy rei'istä puhdistaa ylimääräinen hartsi. Poiston yhteydessä reiän reunat karhentuvat, mikä auttaa metallia tarttumaan reiän seinämiin päällystämisen prosessissa. Käsittelyn jälkeen reiät metalloidaan kuparilla. Reikien kuparointi suoritetaan sarjana kemiallisia reaktioita eikä sähköä käytetä. Reikien kuparointi on erittäin monivaiheinen prosessi, jota ei käydä läpi tässä työssä. [Jawitz 1997: 21.1–21.22; 23.1–23.18.]

2.1.6 Juotosmaski

Juotosmaski eli juotteenestopinnoite (JEP) on pysyvä suojaava pinnoite, jolla on monia tehtäviä piirilevyn valmistuksen sekä käytön kannalta. Juotosmaskin tärkeimpiä tehtäviä on estää tinasiltojen muodostumista, ylimääräistä juotosmetallia tarttumasta piirilevyyn, juotetta likaantumasta, piirilevyn pintaa likaantumasta sekä täyttää johdinten ja kontaktipintojen eli padien välit tunnetulla dielektrisellä materiaalilla. Juotosmaski voi olla väliaikainen tai pysyvä suoja. Tapa, jolla juotosmaski tehdään, riippuu pitkälti halutusta laadusta, luotettavuudesta, hinnasta, piirilevyn koosta sekä valmistajan aikaisemmasta kokemuksesta. Yleensä juotosmaski tehdään silkkipainamalla. [Coombs 2001: 34.1–34.9.]

2.1.7 Testaus

Testaus on viimeinen työvaihe ennen piirilevyn valmistumista. Kattava ja järjestelmällinen testaus varmistaa hyvän laadun ja loppukäyttäjän korkean saannon. Yleisesti käytössä on ”Rule of 10s” eli kymmenyksen sääntö. Tämä tarkoittaa sitä, että virheen havaitseminen vasta piirilevyn kalustamisen jälkeen maksaa kymmenen kertaa enemmän kuin jos virhe olisi löydetty piirilevyä tehdessä. Samaa päättelyketjua käyttäen voidaan arvioida, että mahdolliset piirilevyssä olevat virheet voivat aiheuttaa lisäkustannuksia loppukäyttäjälle moninkertaisesti. Testaus on näin ollen tärkeää ja välttämätöntä piirilevyn valmistuksessa. On kuitenkin ymmärrettävä, ettei 100-prosenttista testausta ole mahdollista toteuttaa. [Coombs 2001: 37.2–37.3.]

Yleisin sähkötön testausmenetelmä on visuaalinen tarkastelu operaattorin toimesta tai automaattinen optinen tarkastus eli AOI. Operaattori pystyy nykypäivänä tarkastamaan ainoastaan kosmeettisia virheitä, muun muassa huonon juotosmaskauksen tai fyysisen vaurion. AOI vertaa optisesti piirilevyn pintaa referenssipiirilevyyn. Tällä tarkastuksella

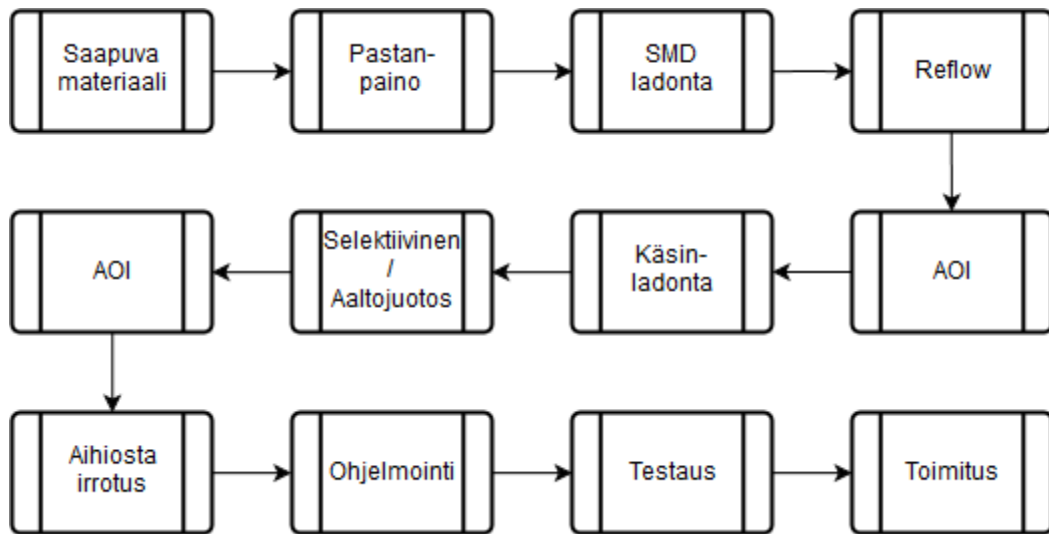
pystytään tarkastamaan mm. johdinkuvioinnit ja reikien sijainnit. AOI on useimmin käytössä sekä piirilevyn sisäkerrosten että uloimpien kerroksien johdinkuvioiden tarkistuksessa. [Coombs 2001: 38.1–38.2.]

Piirilevyn lopputestauksessa suoritetaan sähköinen testi. Testi syöttää loppukäyttökohteen mukaisia virtoja ja jännitteitä sekä mittaa mahdollisia eroja johtavuudessa tai eristeissä. Jatkuvuus- ja eristemittaukset ovat yleisesti käytössä. Jatkuvuustesti tarkastaa kaikki yhtenäiset johtimet tasavirralla ja vertaa tästä saatua resistanssia referenssiarvoihin. Eristemittauksissa piirilevystä mitataan resistanssit tietyistä kohdista ja saatuja tuloksia verrataan referenssiarvoihin. Molemmissa tapauksissa huonoista arvoista syntyy automaattisesti vikaraportti. Näiden kahden testin lisäksi voidaan suorittaa korkean potentiaalinen testaus. Tämä on hyvin samanlainen kuin eristemittaus, mutta tässä käytetään 500–3000 voltin jännitettä. Tavoitteena on löytää tasalaatuisuuspoikkeamia eristemateriaaleista. Muita mahdollisia testauksia ovat muun muassa sisäänrakennettujen komponenttien mittaus ja heijastusten mittaus aikaikkunassa. [Coombs 2001: 38.2–38.13.]

2.2 Piirilevyn kalustaminen

Piirilevyn (PCB) ollessa valmis siirrytään sen kokoonpanossa toiseen vaiheeseen. Yleensä PCB valmistetaan eri yhtiön toimesta kuin missä kalustaminen suoritetaan. Piirilevyn valmistus ja kalustaminen vaativat hyvin erilaisen laitteiston ja niistä seuraavat kustannukset saattavat olla suuret. Piirilevyn kalustaminen on hyvin kontrolloitujen kemiallisten reaktioiden ja automatisoitujen laitteiden prosessisarjoja, aivan kuten piirilevyn valmistuskin. Kalustamisessa keskitytään komponenttien sijoitteluun ja juotoksien tasalaatuisuuteen syntymiseen. Yksi kalustamisen haasteista onkin komponenttien monimuotoisuus: on olemassa perinteisiä läpiladottavia vastuksia kuin myös yli 100-pinnisiä BGA-piirejä. Komponenttien erilaisuus luo haasteita varmojen juotosten syntymiseen.

2.2.1 Prosessin kulku



Kuva 6. Prosessikaavio piirilevyn kalustamisesta

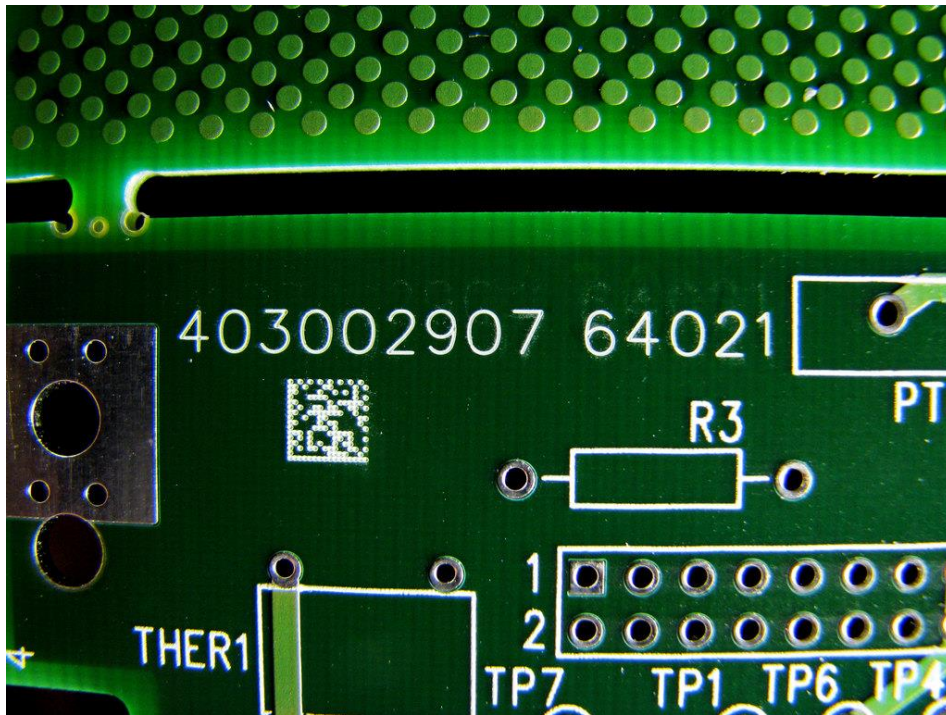
Kuva 6 esittää pelkistetyn prosessikaavion piirilevyn kalustamisesta. Ensimmäisessä vaiheessa piirilevyt, komponentit sekä muu materiaali saapuvat tehtaalle. Piirilevyn kalustusprosessin alkuvaiheessa piirilevyn toiselle puolelle lisätään juotospasta. Pastan päälle voidaan ladata pintaliitoskomponentit (SMT). Tämän jälkeen piirilevy kulkee Reflow-uunin läpi, jossa komponentit juotetaan padeihin. Tarpeen mukaan piirilevyn toiselle puolelle voidaan liimata SMT-komponentit, minkä jälkeen piirilevy kulkee käsinlادontapisteelle, jossa joko operaattori tai laite lisää läpiladottavat komponentit. Tämän vaiheen jälkeen piirilevy on valmis aaltojuotokseen, jossa liimatut SMT-komponentit ja läpiladottavat komponentit (THT) juotetaan. Kun kaikki juotokset on tehty, voidaan suorittaa AOI-testaus, jota seuraa piirilevyjen irrotus aihioista. Lopuksi suoritetaan sähköinen testaus PCBA:ille. Mikäli PCBA:t läpäisevät testit hyväksytysti, piirilevy-kokoonpano on valmis toimitettavaksi loppukäyttäjälle.

2.2.2 Vastaanottotarkastus

Tavaran vastaanotossa tarkastetaan, että saapunut materiaali on tilauksen ja ajantasaisen version mukaista sekä ROHS-hyväksyttyä. Euroopan unionin ROHS-direktiivi kieltää ongelmallisten aineiden käytön elektroniikassa. Tämä koskee varsinkin lyijyä, elohopeaa ja kadmiumia. Lyijy on ollut pitkään yksi käytetyimmistä aineista elektroniikkateollisuudessa. Lyijyä on käytetty komponenteissa, piirilevyissä sekä juotomateriaalina. Näin ol-

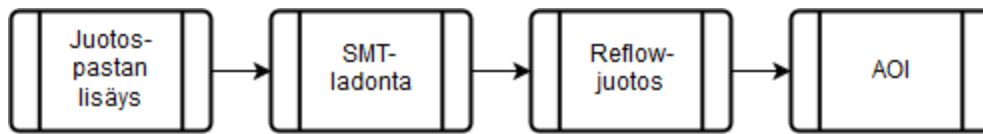
len on tärkeää, että kaikki saapuva materiaali on ROHS-hyväksyttyä. Saapuvan materiaalin vastaanotossa voidaan lisäksi suorittaa erillisiä laadunmittauksia saapuviin tuotteisiin. [Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2011/65/EU, 13.10.2015.]

Materiaalin ollessa kunnossa aloitetaan piirilevyn kalustusprosessi. Ensimmäisessä vaiheessa piirilevyn pintaan lisätään yksilötunniste. Yksilötunniste voidaan polttaa juotosmaskiin laserilla tai lisätä tarrana piirilevyn pintaan. Yksilötunnisteena voi toimia esimerkiksi kuvan 7 mukainen 2D-koodi. Yksilötunniste luetaan tietokoneelle jokaisessa prosessivaiheessa. Tunnisteen alle kerätään tiedot piirikortin valmistuksesta ja jäljitettävyydestä. Muun muassa kaikkien käytettyjen komponenttien tiedot löytyvät tämän yksilötunnisteen takaa. Yksilötunnisteesta löytyy kaikki mahdolliset korjaustoimenpiteet, joita piirikortille on tehty valmistuksen aikana. Yleinen tapa on kirjata myös kaikki poikkeavuudet normaalista valmistustavasta.



Kuva 7. 2D-koodi on merkitty laserilla piirilevyn pintaan. [Control Micro Systems 2015.]

2.2.3 Pintapuolen SMT-juotosprosessi



Kuva 8. Pintapuolen SMT-juotosprosessi

Lasermerkkauksen jälkeen piirilevyn pintapuolelle eli top-puolelle juotetaan kaikki SMT-komponentit. Prosessi kulkee kuvan 8 mukaisesti. On yleistä, että pintapuolelle ladotaan kaikki aktiiviset ja osa passiivisista komponenteista, kun pohjapuolelle juotetaan ainoastaan passiivisiä komponentteja. [Coombs 2001: 41.11.]

Juotospasta koostuu pulverimaisesta juotosmetallista, liuottimesta sekä fluksista. Juotosmetallin koostumus eli raekoko riippuu pitkälti juotettavien komponenttien paedeista. Juotosmetalli kiinnittää padit Reflow-juotoksessa. Liuotin pitää pastan koostumuksen helposti prosessoitavana. Fluksin tehtävänä on puhdistaa juotospinnat ja juotosmetalli epäpuhtauksista ja hapettumisista ennen juotosta. Fluksin fysikaalinen koostumus riippuu juotospintojen metalleista. Juotospasta voidaan lisätä piirilevyn pintaan käyttäen erilaisia dispensereitä, mutta yleensä käytetään pastan painoa, jossa hyödynnetään stensiiliä ja raakkelia. Stensiiliä käyttävät laitteet ovat paljon nopeampia kuin dispense-ri pohjaiset laitteet. Stensiili asetetaan piirilevyn päälle ja sen päälle lisätään juotospasta. Raakkelia käyttäen laite pyyhkäisee juotospastan stensiilissä olevien aukkojen kautta piirilevyn pintaan. Pyyhkäisyyn nopeus ja paine ovat tarkoin säädettyjä. Tämän jälkeen stensiili nostetaan ylöspäin ja haluttu määrä juotospastaa on jäänyt juotospinnoille. Pastan juottumisominaisuudet heikkenevät ajan myötä, mutta normaalissa ympäristössä juotospasta säilyy piirilevyn päällä useita tunteja. [Hwang 2005: 122–131; Plumbridge ym. 2003: 153–154.]

Komponenttien ladonta suoritetaan hyvin automatisoiduilla laitteella. Usein käytössä olevat laitteet ovat siltanosturityyppisiä (eng. gantry-style), joissa komponentteja sijoittava suutinosa liikkuu piirilevyn pysyessä paikallaan. Laitteen suutinosa voi koostua monesta eri suuttimesta, jolloin ladonta-aika nopeutuu. Käytettävä suutin riippuu pitkälti käsiteltävän komponentin fyysisestä koosta. Esimerkiksi 0402-kokoluokan vastus tarvitsee hyvin erikokoisen suuttimen kuin 144-pinninen FPGA-piiri. Suuttimet toimivat usein pneumatikalla, jossa komponentin nosto suoritetaan alipaineen avulla. Juotospastan tahmainen

olemus pitää komponentit paikoillaan Reflow-juotukseen asti. Ladontalaitteen toiminta kulkee seuraavasti:

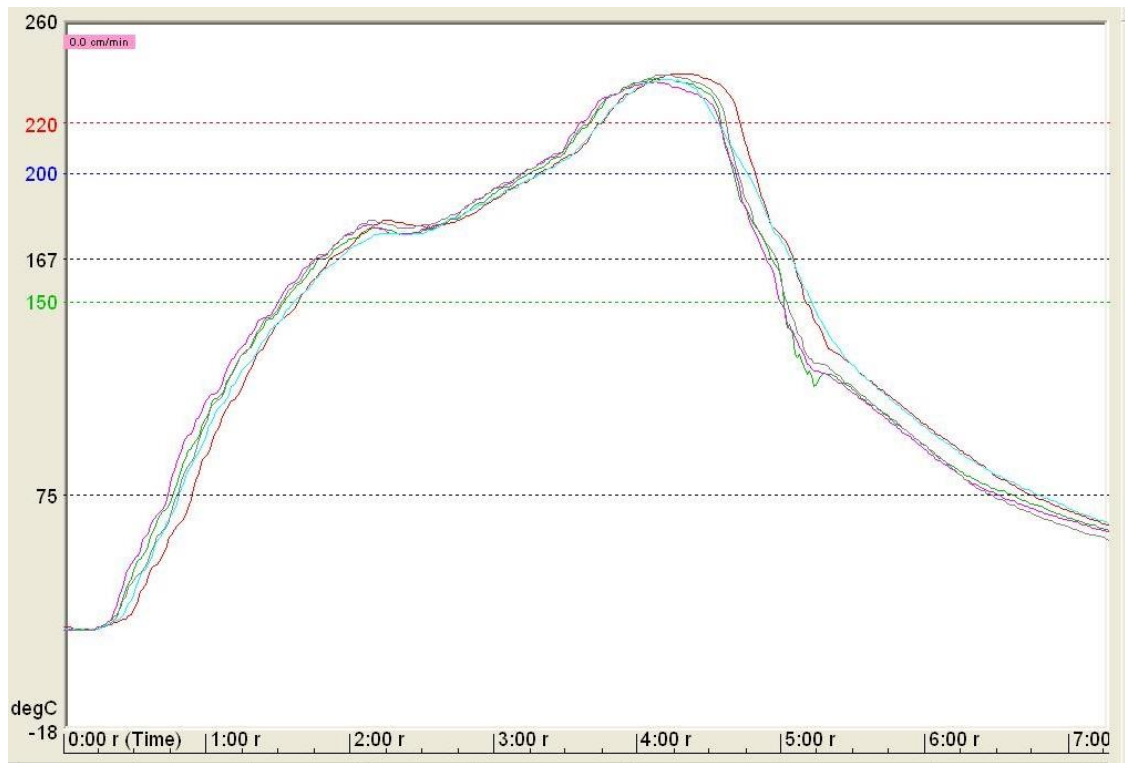
1. Laite valitsee oikeankokoisen suuttimen.
2. Laite nostaa suuttimella komponentin.
3. Komponentin asento rekisteröidään suuttimen päässä.
4. Komponentti asetetaan määrätylle paikalle.

Yleensä komponentit tulevat laitteeseen kelassa, jossa komponentit ovat koteloituna nauhan sisään. Ladontalaite pyörittää automaattisesti kelaa eteenpäin aina kun kyseisestä kelasta on poimittu komponentti. Pintaladontalaitteilla nopeus voi olla jopa 100 000 komponenttia tunnissa. [Coombs 2001: 41.11–41.15; Plumbridge ym. 2003: 150–155.]

Komponenttien asettamisen jälkeen ladottu piirilevy viedään Reflow-uuniin. Uunin lämpötila on hyvin tarkkaan kontrolloitu. Tarkoituksena on nostaa juotospastan lämpötilaa juoksettumiseen saakka, mutta samalla minimoida piirilevyn ja komponenttien lämpenemistä. Reflow-juotokselle haasteita tuottavat erityisesti komponenttien erilaiset lämpömassat. Mustat ja pienet komponentit lämpenevät paljon nopeammin kuin valkoiset ja suuret. Lopuksi juotosmetallin viilentyessä syntyy kiinteä juotos. [Plumbridge ym. 2003: 155–156.]

Reflow-profiili on keskeisessä osassa Reflow-juotoksessa. Se kuvastaa uunissa kulkevan piirilevyn lämpötilaa ajan funktiona. Profiili koostuu neljästä vaiheesta, jotka ovat havaittavissa kuvasta 9. Ensimmäisessä vaiheessa piirilevy kulkee esilämmitysvyöhykkeen läpi. Tarkoituksena on nostaa koko piirilevyn lämpötilaa mahdollisimman tasaisesti. Äkillinen ja epäsäännöllinen lämpötilan nousu aiheuttaa komponenttien ja piirilevyn materiaaleissa erisuuruista lämpölaajenemista. Tästä voi seurata muun muassa komponenttien koteloiden murtumista. Toinen tärkeä vaihe esilämmityksen aikana on liuotinaineen höyrystyminen pois juotospastasta. Liian nopea lämpötilan nousu voi aiheuttaa juotospastan kiehumista ja roiskumista ympärille. Tästä voi seurata esimerkiksi tinapalloja, jotka voivat aiheuttaa oikosulkuja juotospintojen välissä. Esilämmityksen aikana lämpötila saa nousta maksimissaan 4 °C per sekunti, jotta virheitä vältytään. [Coombs 2001: 43.22–43.23; Hwang 2005: 238–272.]

Toisessa vaiheessa saavutetaan fluksin aktivoitumislämpötila, joka normaalisti on noin 170 °C. Tätä lämpötilaa ylläpidetään yleensä 60–120 sekuntia, jotta fluksi saa tarpeeksi aikaa toimiakseen. Jos lämpötilaa nostetaan liian nopeasti, fluksi voi reagoida liian voimakkaasti, jolloin juotospinnat voivat hapettua ennen juotosmetallin sulamista. [Coombs 2001: 43.23–43.24; Plumbridge ym. 2003: 157.]

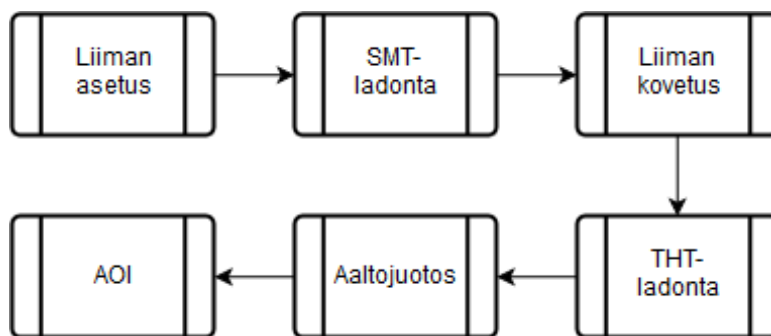


Kuva 9. Reflow-profiili. Käyrän kulmakerroin ei ylitä missään vaiheessa yli 4 °C. Fluksin aktivoituminen on tapahtunut 180 °C:ssa ja huippu on 240 °C:ssa.

Reflow-juotos suoritetaan kolmannessa vaiheessa. Tällöin lämpötilaa nostetaan juotosmetallien juoksettumislämpötilan yläpuolelle. Lämpötila käy hetkellisesti noin 25 celsiusastetta juoksettumislämpötilan yläpuolella, mutta ei kuitenkaan korkeammalla kuin mitä heikoin komponentti kestäisi. Lämpötila ei saa nousta kolmannessakaan vaiheessa yli 4 °C:tta per sekunti. Juotosmetallin viskositeetti laskee voimakkaasti tässä lämpötilassa, jolloin sopivan pintajännityksen ansiosta juotosmetalli asettuu piirilevyn johdinkuviolle sekä komponentin juotospintoihin tasaisesti. Tasaisen juotoksen syntyminen voi epäonnistua esimerkiksi, jos piirilevyn johdinkuviot ovat erikokoiset tai toinen juotospinta on yhteydessä laajaan lämpömassaan (mm. maa-alue). Siten juotoksen onnistuminen riippuu pitkälti myös piirilevyn suunnittelusta. [Coombs 2001: 43.24; Plumbridge ym. 2003: 157.]

Viimeinen vaihe on jäähditys. Piirilevy kulkee jäähditysvyöhykkeen läpi, jossa lämpötilaa lasketaan. Lämpötilan laskun täytyy noudattaa samoja periaatteita kuin nousunkin, eli lämpötila ei saa muuttua yli 4 °C per sekunti. Tasaisella lämpötilan laskulla taataan komponenttien paikallaanpysyvyys ennen juotosten kovettumista. Hätiköidyllä jäähdityksellä voidaan pilata muuten onnistunut Reflow-juotos. [Coombs 2001: 43.24; Plumbridge ym. 2003: 157.]

2.2.4 Pohjapuolen SMT- ja THT-juotosprosessi



Kuva 10. Piirilevyn pohjapuolen juotosprosessi [Coombs 2001: 41.12]

Piirilevyn pohjapuolen SMT-komponentit voidaan juottaa samalla tavalla Reflow-prosessissa kuin pintapuolen komponentit. Tässä piilee kuitenkin riski, koska usein monikerrospiirilevyissä käytetään pintaliitoskomponenttien lisäksi läpilandottavia komponentteja. Läpilandottavat komponentit juotetaan pääsääntöisesti selektiivisellä tai koko aaltojuotoksella. Jos pohjapuolen pintaliitoskomponentit juotettaisiin Reflow-juotoksessa ennen aaltojuotosta, on mahdollista, että komponentit joutuvat aaltojuotoksessa uudestaan korkean lämpötilan alaisuuteen. Kuitenkin on kehitetty useita tapoja välttää kyseessä oleva tilanne, mutta monesti pohjapuolen pintaliitoskomponentit juotetaan samaan aikaan aaltojuotoksessa läpilandottavien komponenttien kanssa, jolloin prosessi kulkee kuvan 10 mukaisesti.

Aaltojuotoksen aikana pohjapuolen pintaliitoskomponentit ovat piirilevyn alapuolella, jolloin tarvitaan liimaa, jotta komponentit pysyisivät paikoillaan. Komponenttien kiinnitykseen voidaan käyttää epoksipohjaista liimaa. Käytettävän liiman täytyy kestää korkeaa lämpötilaa, fluksin vaikutusta sekä aaltojuotosta, eikä se saa haitata piirilevyn sähköisiä ominaisuuksia ajan saatossa. Epoksipohjaisilla liimoilla on loistava lämmönkestävyys, mutta osa epokseista saattaa imeä kosteutta sisäänsä, jolloin ne eivät sovellu käytettäväksi. Sidosaine voidaan lisätä piirilevylle samoin kuin juotospasta kappaleessa 2.2.3.

Muita vaihtoehtoisia menetelmiä ovat nasta- tai ruiskupohjaiset järjestelmät. [Coombs 2001: 41.19–41.23.]

Sidosaineen lisäyksen jälkeen pintaliitoskomponentit lisätään piirilevyn pintaan käyttäen ladontalaitetta. Sidosaineen määrän kanssa täytyy olla tarkkana, ettei sidosainetta joudu juotospintoihin komponentin lisäyksen aikana. Pienikin sidosaineen määrä juotospinnoissa voi aiheuttaa juotoksen epäonnistumisen. Tämän jälkeen sidosaine kovetetaan. Käytettävä menetelmä riippuu sidosaineen koostumuksesta. Usein käytettävät sidosaineet reagoivat lämpöön, minkä vuoksi piirilevy kuljetetaan uunin läpi, joka on tavallisesti sama Reflow-uuni, jossa Reflow-juotos tehtiin. Uunin lämpötilaa on ainoastaan laskettu. [Coombs 2001: 41.23–41.24.]

2.2.5 Käsinladonta ja aaltojuotos / selektiivinen juotos

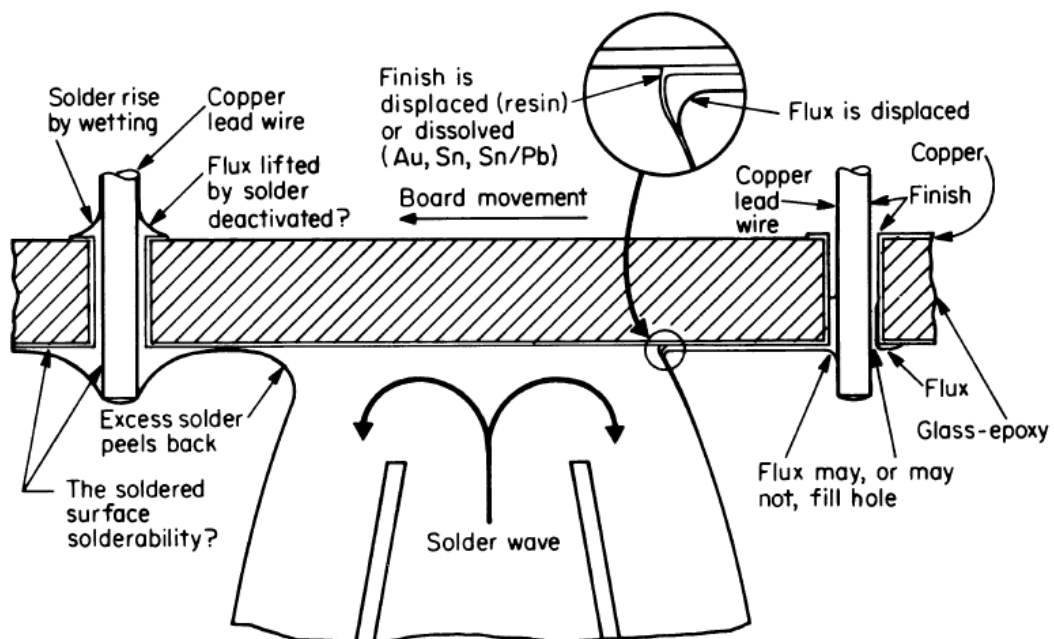
Läpiladottavat komponentit asetetaan piirilevyyden pääsääntöisesti operaattorin toimesta. On olemassa laitteita, jotka pystyvät asettamaan tietynlaisia läpiladottavia komponentteja, joita käytetään jos läpiladottavia komponentteja on erittäin paljon. Käsinasennettavat komponentit voivat vaatia pelkän paikalleen asettelun lisäksi muita toimenpiteitä. Esimerkiksi joissakin liittimissä on kohdistusnastoja, jotka täytyy painaa piirilevyn reiän läpi käyttäen ”suurta” voimaa. Käsinladonnassa tavoitellaan 300–400 komponentin asennusta tunnissa, joka on huomattavasti alhaisempi kuin pintaladontalaitteiden. Komponenttien asettamisen jälkeen piirilevyt ovat valmiita aaltojuotokseen. [Coombs 2001: 41.25; Plumbridge ym. 2003: 150–151.]

Aaltojuotosprosessissa piirilevy kulkee neljän vaiheen läpi. Näitä ovat fluksin lisäys, esilämmitys, aaltojuotos ja jäähdytys. Fluksi voidaan lisätä käyttämällä vaahto-, aalto- tai suihkutusprosessia. Spray-tyyppinen suihkutusprosessi on yleisesti käytössä. Suihkuttamalla fluksin määrää ja sijaintia voidaan tarkasti kontrolloida, jolloin koko piirilevyn pohja ei altistu fluksille. Suihkutusprosessin huonona puolena on fluksin hieno koostumus. Koostumuksesta johtuen fluksin käsittely ennen suihkutusta vaatii enemmän huolellisuutta kuin muissa prosesseissa. Fluksin tarkoitus on sama kuin Reflow-juotoksessa eli puhdistaa juotospinnat ennen juotosta. [Coombs 2001: 43.33–43.34; Plumbridge ym. 2003: 157–159.]

Esilämmityksen idea on sama kuin Reflow-juotoksessa, mutta aaltojuotoksessa sen tärkeys korostuu. Esilämmityksen aikana fluksin tulee aktivoitua ja puhdistaa juotospinnat.

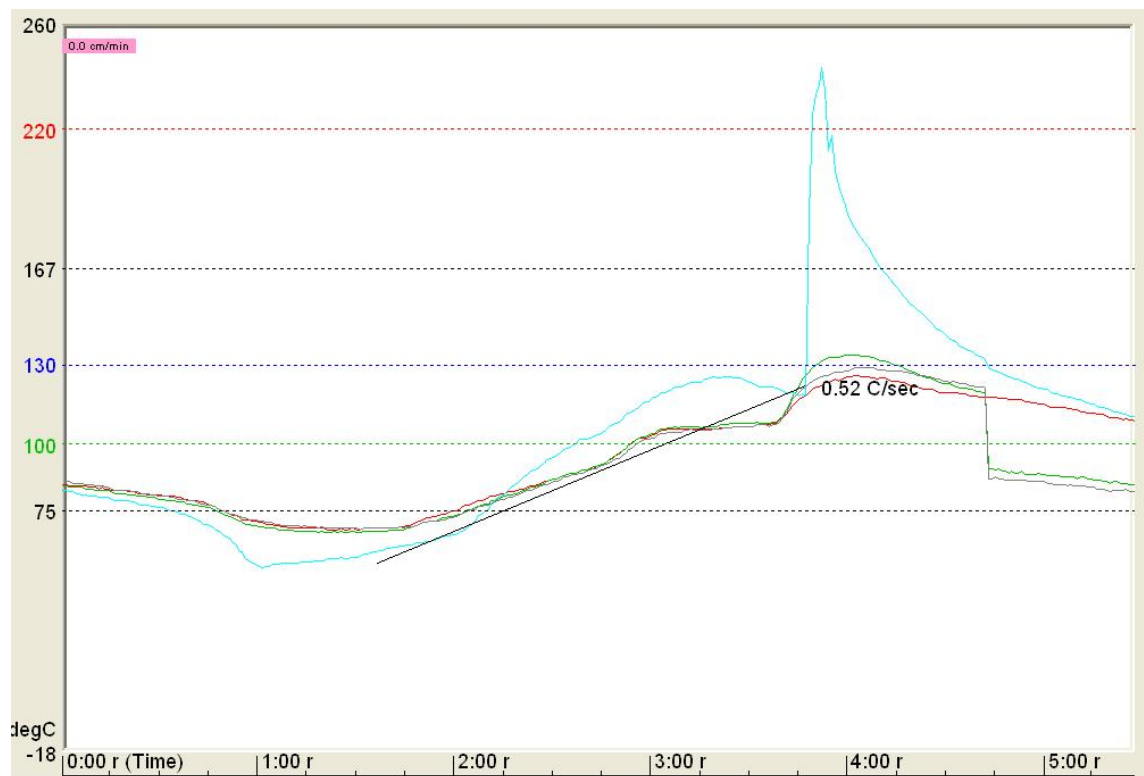
Fluksi ei saa kuitenkaan reagoida loppuun asti esilämmityksen aikana, jotta juotospinnat eivät jäisi vapaiksi ennen aaltojuotosta. Usein aallon ja esilämmittimen välissä on lyhyt väli, joka synnyttää prosessiin lämpötilan notkahduksen. Aaltojuotoksessa juottuminen tapahtuu 10–30 kertaa nopeammin kuin Reflow-juotoksessa. Esilämmitys suojaa myös komponentteja hajoamasta äkilliseen lämpötilan nousuun, kuten Reflow-juotoksessa. [Coombs 2001: 43.34–43.35; Plumbridge ym. 2003: 159.]

Aaltojuotoksessa käytetään sulaa juotosmetallia, joka pumpataan suuttimesta ylöspäin. Paine on kontrolloitu siten, että juotosmetalli valuu suuttimen sivuilta alaspäin. Näin saadaan tehtyä seisova aaltoliike juotosmetallille. Suuttimen koko, pumppausnopeus, juotosmetallin lämpötila sekä kulma, jossa piirilevy osuu juotosmetalliin, ja piirilevyn nopeus ovat tarkoin säädettyjä. Sula juotosmetalli juoksettuu tasaisesti osuessaan juotospintoihin. Kapilaari-ilmion seurauksena sula juotosmetalli nousee läpiladottavien ja sisältä kuparoitujen reikien kautta pintapuolen juotospinnoille (kuva 6.). Tällöin tapahtuu läpiladottavan komponentin täydellinen juottuminen. Pohjapuolen pintaliitoskomponentit juottuvat sulan juotosmetallin kosketuksen seurauksena juotospintoihin. Piirilevyn lämpötila alkaa laskea tasaisesti aallon jälkeen. Lämpötilan laskua voidaan kontrolloida koneellisesti, tai lämpötila voi laskea normaalisti huonelämpötilaan, mutta lämpötilan muutos ei saisi olla nopeampaa kuin 4 °C per sekunti. [Coombs 2001: 43.35–43.36.]



Kuva 11. Aaltojuotoksen toimintaperiaate [Coombs 2001: 43.38]

Yleensä aaltojuotos toteutetaan käyttäen paikallaan seisovaa, koko piirilevyn levyistä aaltoa, jonka ylitse piirilevy kulkee tasaisella nopeudella. Tämä prosessi on esillä kuvassa 11. Tällöin sula juotosmetalli pyyhkäisee koko piirilevyn pohjan ja kaikkien pohjalle ladottujen pintaliitoskomponenttien ylitse. Tällä menetelmällä saavutetaan erittäin nopea juotosnopeus. Pintaliitoskomponenttien altistumista aallon tuomalle lämpökuormalle voidaan vähentää käyttämällä eristealustaa piirilevyn alla. Eristealustassa on reiät kaikkien juotospintojen kohdilla, mutta komponentit ovat suojassa sen alla. Eristealustan käyttö tuo omat haasteensa aaltojuotokseen, ja toinen keino komponenttien lämpökuorman vähentämiseen on käyttää selektiivistä aaltojuotosta. Selektiivisessä aaltojuotoksessa aalto on pieni, esimerkiksi yhden juotospinnan kokoinen. Prosessi voidaan toteuttaa joko pitämällä piirilevy paikallansa ja liikuttamalla aaltoa, jolloin aalto pyyhkäisee ainoastaan juotospintojen yli, tai toisena vaihtoehtona on pitää aalto paikallaan ja liikuttaa piirilevyä. Liikutettavaa osaa voidaan säätää x-, y- ja z-koordinaatistossa, jolloin aallon pyyhkäisemät paikat voidaan tarkoin määrittää. Selektiivinen juotos on asteen hitaampi kuin normaali aaltojuotos, mutta sen juotoslaatu on parempi. Selektiivinen juotos myös rasittaa lämpökuormalla komponentteja huomattavasti vähemmän, jolloin laatu paranee. [Empfasis 2009.]



Kuva 12. Aaltojuotosprofiili

Kuvan 12 aaltojuotosprofiili kuvastaa esilämmityksen, aaltojuotoksen ja viilennyksen lämpötilat ajan funktiona. Syyainin värinen käyrä kertoo lämpötilan juotospinnoissa, kun muut mittapääät ovat kiinnitettynä toisalle piirilevyä. Välillä 1:30–3:15 tapahtuu esilämmitys, jossa piirilevyn lämpötilaa nostetaan. Tällä välillä juotospintojen lämpötila nousee 50 celsiusasteesta lähes 130 celsiusasteeseen. Tämän jälkeen käyrästä on havaittavissa pieni lämpötilan notkahdus, joka syntyy esilämmitintunnelin lopussa. 3:45 piirilevy ja juotospinta saavuttavat aallon, jossa lämpötila nousee hetkellisesti 250 celsiusasteeseen. Tämän jälkeen lämpötila laskee mahdollisimman tasaisesti takaisin ympäristön lämpötilaan. Aaltojuotosprofiili on hyvä työkalu juotoslämpötilojen ja -aikojen tarkasteluun. Jokaisella piirilevyllä tulisi olla yksilöity aaltojuotosprofiili, joka täyttää käytettävän piirilevyn, komponenttien ja fluksin vaatimukset.

2.2.6 Juotostarkistus

Piirilevyn laatua valvotaan pitkin kalustusprosessia, ja mitä useammin valvontaa tehdään, niin sitä parempi. Korjauksen hinta nousee usein hyvin nopeasti, kuten kappaleessa 2.1.7 todettiin. Piirilevyn kalustuksessa tarkistusta voidaan suorittaa operaattorin toimesta visuaalisesti, AOI-, röntgen-, akustisilla- tai lämpökuvantamislaitteilla. Käytettävät laitteet riippuvat testattavasta piirilevystä. Usein automatisoituja laitteita suositaan ennen operaattoreita, koska ne eivät väsy eikä laitteiden antamalla tuloksilla ole operaattorista johtuvia eroja. Valmistusvirheiden löytyminen ajoissa takaa myös virheen juuriin löytymisen helpommin, jolloin korjaavat toimenpiteet on helpompi kohdistaa oikein. [Coombs 2001: 50.1–50.4.]

Visuaalinen tarkistus on operaattorin toimesta suoritettavaa vertailua kahden asian välillä. Operaattori normaalisti tutkii piirilevystä määritellyt kohdat mikroskoopilla ja vertailee näitä referenssiin. Operaattorin toimesta suoritettava vertailu riippuu aina kyseisen operaattorin arviointikyvystä. Usein operaattori suorittaaakin enemmän prosessivaiheen tarkastelua kuin yksittäisten virheiden etsintää. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi sitä, että juotospastan lisäyksen jälkeen operaattori tarkistaa pienimmän juotospinnan tilanteen. Jos tämä on kunnossa, oletetaan, että kyseinen prosessi on toiminut, kuten on suunniteltu. Visuaalisen tarkistuksen vahvuutena on sekä kosmeettisten että ilmiselvien virheiden havaitsemiset, kuten komponenttien väärinpäin asettelu tai kokonaan puuttuminen. Operaattorille haasteita tuovat komponenttien jatkuvasti pienenevät koot ja niiden kasvava määrä. On tutkittu, että kokenut operaattori pystyy luotettavasti tarkistamaan viisi juotospintaa sekunnissa, mutta jo 4000 juotoksen piirilevyyn kuluisi 15 minuuttia, joka on

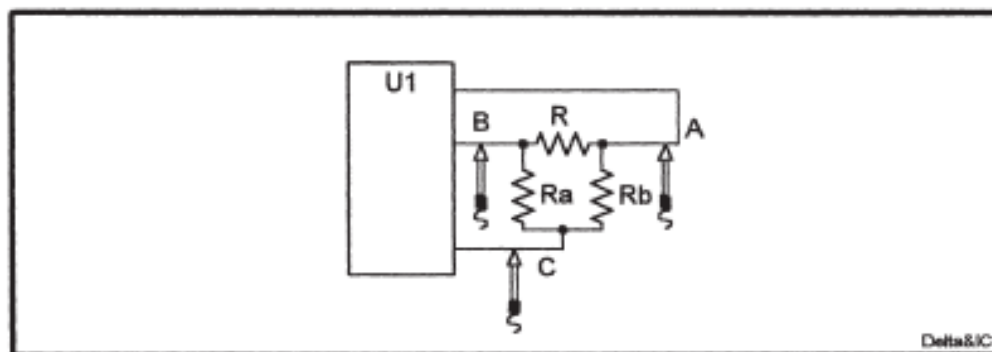
usein liian kauan. Automaattiset laitteet ovatkin voittaneet tarkistukset, jotka vaativat useaa toistoa tai pienien kappaleiden mittaamista. [Coombs 2001: 50.4–50.9.]

Automaattisia tarkastuksia suoritetaan pääasiassa juotospastalle, komponenttien sijoittelulle ja juotosten muodostumiselle. Juotospastan lisäyksen jälkeen piirilevystä voidaan mitata esimerkiksi juotospastan tiheyttä, sen peittämää aluetta, korkeutta tai kohdistusta juotospintaan. Nämä mittaukset antavat tietoa juotospastan viskositeetistä, stensiillistä, puhtaudesta, raakkelin nopeudesta ja paineesta. Komponenttien sijoittelun jälkeen on mahdollista havaita muun muassa komponenttien asettumista tai niiden puuttumista. Juotoksista pystytään mittaamaan juotospaksuuksia, juotosmetallin tasalaatuisuutta sekä komponentin lopullista asettumista. Mittaustulokset antavat arvokasta tietoa aikaisemmista prosesseista. Usein automaattisia tarkastuksia suorittava laite tekee yhden yllämainituista mittauksista. [Coombs 2001: 50.9–50.11.]

2.2.7 Testaus

Piirilevyjen valmistusvirheet havaitaan parhaiten toiminnallisuustestein eli piirilevy kytetään samoin kuin loppukäyttökohteessa ja suoritetaan yksilöidyt testit. Tällainen testaus on usein liian kallista ja erittäin haastavaa toteuttaa. Nykyaikaiset testilaitteet ovat helposti ohjelmoitavissa, ja ne pystyvät suorittamaan paljon pienempiä toiminnallisuustestejä. Testilaitteissa sähköinen yhteys luodaan käyttäen testipiikkejä eikä loppukäyttökohteessa käytettävien liittimien kautta. Testipiikit painetaan piirilevyn pintaan suunniteltujen testipisteiden päälle, jolloin muodostuu sähköinen yhteys. Ideana testauksessa on käsitellä komponentit yksitellen, vaikka ne ovat osana kytkentää. Testaus jaetaan analogiseen ja digitaaliseen testaukseen. [Coombs 2001: 52.7–52.11.]

Ensiksi analogisessa testauksessa tarkistetaan, ettei oikosulkuja ole olemassa. Testaus suoritetaan syöttäen alhaista tasajännitettä. Oikosulut on hyvä korjata ennen seuraavia testejä piirilevyn vaurioitumisen välttämiseksi. Seuraavaksi testataan analogiset komponentit, kuten vastukset, kondensaattorit, kelat ja diodit. Analogisten komponenttien testauksen haasteita ovat moninaiset yhteydet komponenttien välillä. Esimerkiksi vastuksen resistanssia mitatessa voi tasavirta jakautua moneen haaraan, jolloin mittaustulos on väärä. Tästä syystä mittaukset toteutetaan lähes aina kolmipistemittauksena, kuten kuvassa 13 on esitetty. [Coombs 2001: 52.11–52.13.]



Kuva 13. Kolmipistemittauksen periaate. [Coombs 2001: 52.12.]

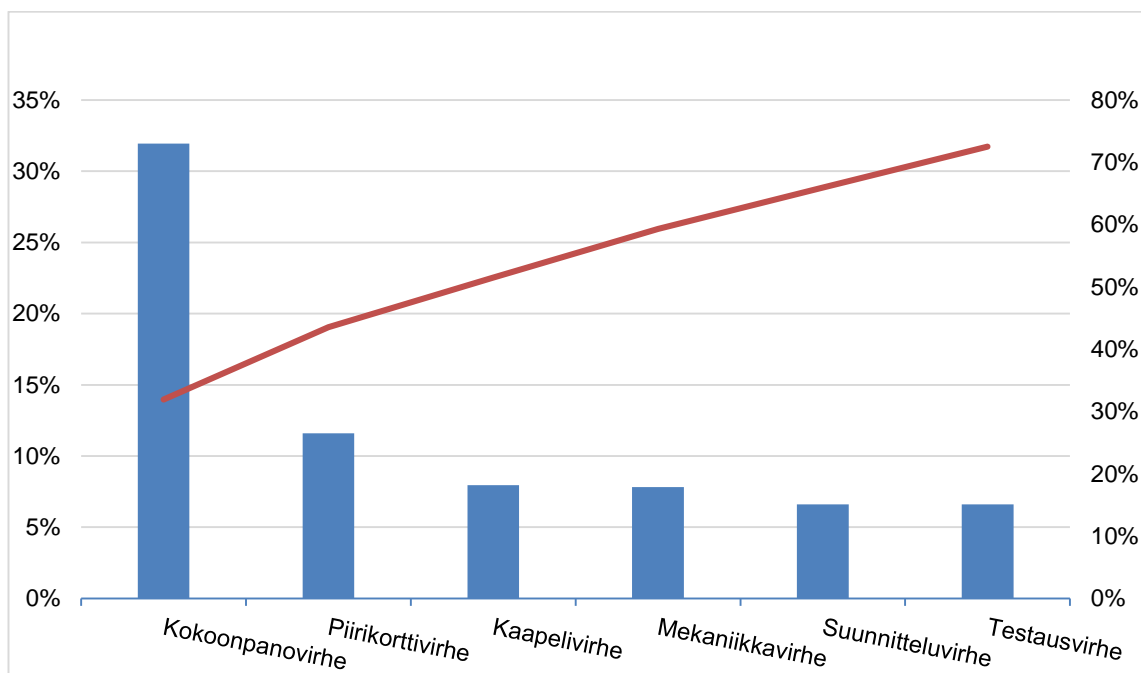
Digitaalisessa testauksessa keskitytään piirilevyn digitaalisiin komponentteihin. Digitaalisessa testauksessa piirilevy on jännitteinen, jotta IC-piirien portit toimisivat. Testaus suoritetaan mahdollisimman läheltä jokaisen IC-piirin nastaa. Virheen tapahtuessa sen syy on helposti löydettävissä, koska testissä ei ole muita piirejä häiritsemässä. Usein on mahdollista suorittaa monen erillisen IC-piirin samanaikaista testausta. [Coombs 2001: 52.13–52.15.]

3 Piirikorttien laadunparantamisprosessi

Talvella 2014 Palodex Group Oy huomasi, että HLEO-minitehtaan saanto ei ollut tavoitteessaan. Tämän pohjalta aloitettiin ongelmanratkaisuprosessi, jonka tehtävänä oli selvittää, miksi tavoitetta ei ollut saavutettu sekä löytää toimenpiteet tilanteen korjaamiseksi. Saannolla tarkoitetaan testauksessa havaittavien viallisten laitteiden suhdetta ehjiin laitteisiin, kuten kaavassa 1 on esitetty. Esimerkiksi, jos sadasta valmistuneesta laitteesta kaksi on ollut virheellisiä, niin tällöin saanto on 98 %. Tavoite on saavuttaa 100 %:n saanto.

$$Saanto = 100 * \frac{\text{Virheellisten laitteiden lkm}}{\text{Virheettömien laitteiden lkm}} \quad (1)$$

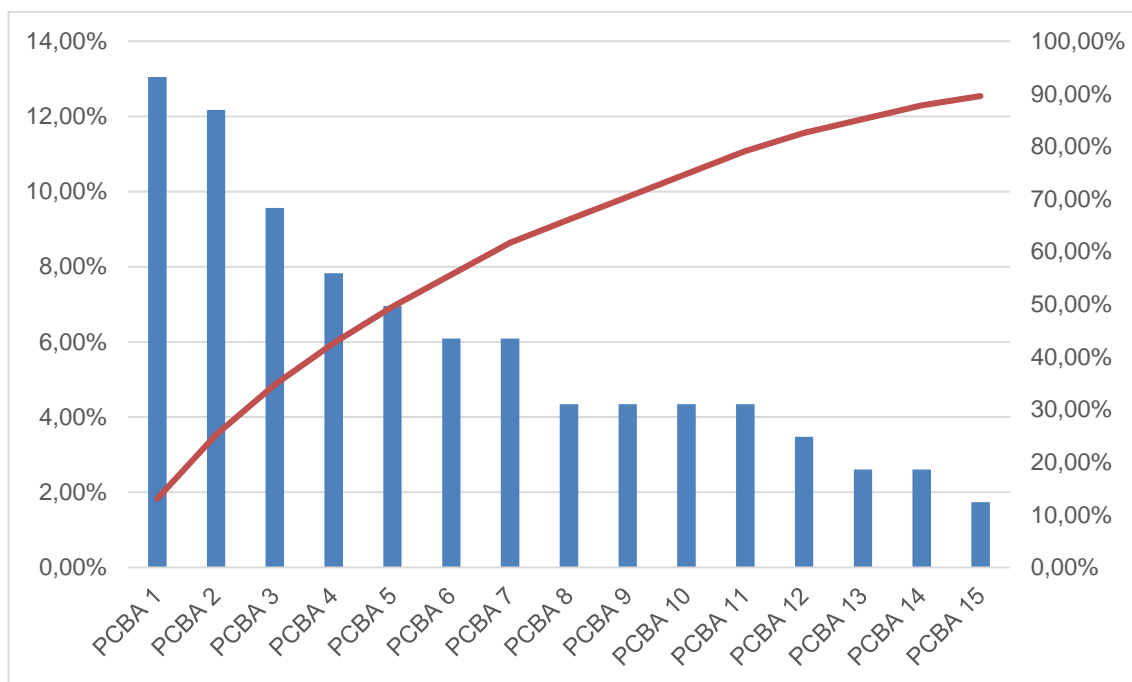
HLEO-minitehtaan vuoden 2014 saannon virheiden jakauma oli kuvan 14 mukainen. Pareto-menetelmän mukaan suurimmat virheen aiheuttajat ovat olleet kokoonpanovirheet sekä piirikortit. Paretot tunnetaan myös 80–20-sääntönä eli oletetaan, että 20 % virheistä aiheuttaa 80 % ongelmista. Paretoon nojautuen kokoonpano- ja piirikorttivilheet päätettiin valita tarkemman tutkimuksen alle. Loput virhetyypit jätettiin ongelmanratkaisuprosessin ulkopuolelle.



Kuva 14. HLEO-minitehtaan virheiden jakauma Pareto-kaaviona.

Piirikorttien ongelmat voivat johtua esimerkiksi suunnitteluvirheistä, vaikeasta valmistettavuudesta, puutteellisesta testauksesta tai logistiikkaketjun käsittelyvirheistä. Virheiden vaihtelevuuden pohjalta päätettiin keskittyä piirikorttien valmistettavuuden parantamiseen yhteistyössä valmistajan kanssa. Päätöksenteossa otettiin huomioon alihankkijan piirilävyjen testausaannot, jotka olivat jääneet tavoitteestaan. Testausaanto implikoi vahvasti piirikorttien valmistusvaikeuksista, jotka saattoivat päästä vaikuttamaan Palodexin saantoon.

Palodex on kerännyt kattavat historiatiedot laitteidensa valmistuksesta ja testauksesta, joten piirikortit oli mahdollista luokitella vikaantumistapahtumien mukaan. Kuvasta 15 nähdään, että osaa piirikorteista on vaihdettu reilusti useammin kuin toisia. Toisen tyyppisestä luokittelusta ei muodostunut yhtä selvää piirikorttien jakaumaa. Pareto-menetelmän ja valmistajan testausaannon perusteella voitiin valita kuusi piirikorttia, jotka otettiin valmistajan kanssa tarkempaan tutkintaan. Kuvasta 15 nähdään, että yli 50 % piirikorttinvirheistä on liittynyt näihin piirikortteihin.



Kuva 15. Piirilevyjen jakauma havaittujen virheiden mukaan.

Valituille kuudelle piirikortille tehtiin valmistettavuusanalyysi. Analyysissä ryhmä asiantuntijoita, niin valmistajan kuin Palodex Group Oy:n puolelta, kävi kaikki piirikortin valmistusvaiheet läpi. Valmistusvaiheissa ilmenneet riskit ja olemassa olevat ongelmat raportoitiin piirikorteittain, jolloin saatiin kattava listaus mahdollisista riskeistä. Kappaleissa 3.1–3.4 käsitellään yleisimpiä prosessikohtaisia havaintoja ja korjaavia toimenpiteitä.

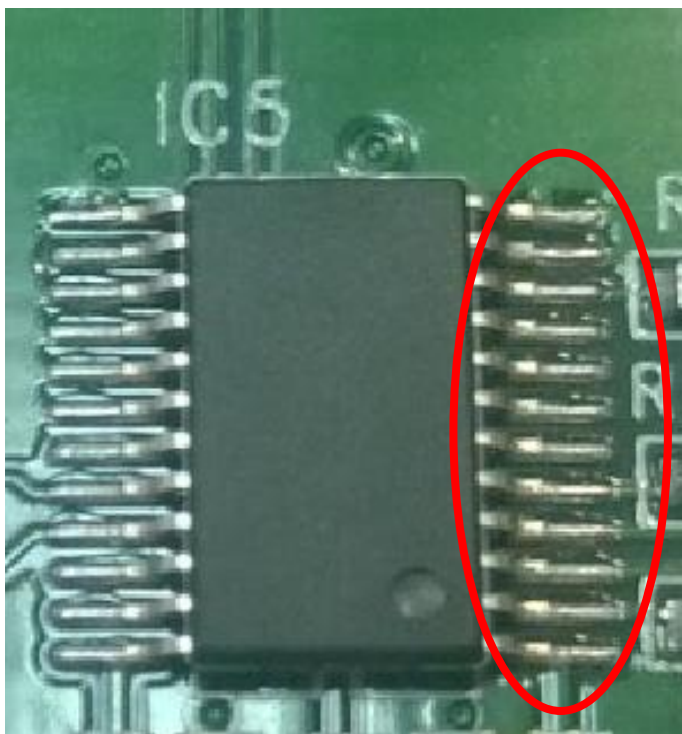
3.1 Pintaliitostekniikan ja Reflow-juotoksen riskit

Pintaliitoskomponenttien ladonnassa huomattiin, että käytössä olevassa vastusverkossa etäisyys komponenttien koteloiden välillä on 0,15 mm. Tämä etäisyys ei täyttänyt suunnitelman mukaista sähköistä eristävyyttä. Piirilevyllä etäisyys padien välillä on 0,47 mm. Vastukset ovat kokoluokan 0402 koteloinnilla varustettuja, eli niiden mitat ovat 1 x 0,5 x 0,35 mm. Valmistajan kokemuksen mukaan komponenttien koteloiden välillä tulisi olla vähintään 0,4 mm välimatkaa, jotta laaturiskit pienenisivät huomattavasti.

IPC määrittää, että suorakulmaiset pintaladontakomponentit saavat olla 50 % padeista sivussa, kunhan juotosmetalli peittää vähintään 50 % komponentin ja pädin juotospinnasta. Tähän pohjautuen 0402-kokoluokan komponenteille on sallittua olla 0,25 mm si-

vussa padeilta. Kahden vierekkäisen komponentin oikosulun välttämiseksi padien välinen etäisyys tulisi olla vähintään 0,50 mm. Pitää kuitenkin muistaa, että kaikki arvot sisältävät todellisuudessa toleransseja, joten piirilevyn padien suunnittelu ei ole niin yksiselitteistä. [IPC-A-610 2010: 8.3.2.1.]

Komponenttien valmistajat ilmoittavat suositukset heidän komponenttiensa padeille. Nämä suunnittelusäännöt ovat usein liian ihanteellisia, ja onkin hyvä tarkistaa mitoituksia useasta eri lähteestä. IPC-7351 on standardointiorganisaation yleinen ohjeistus pintaliitoskomponenttien padikuviolle. IPC-7351 antaa myös sähköisen työkalun padikuvioiden sovittamiseen. Padien suunnittelussa on hyvä ottaa huomioon valmistajan kokemukset. Piirilevyn valmistettavuus voi vaihdella käytettävissä olevan laitekannan vuoksi, joten suunnitteluvaiheessa kannattaa olla yhteistyössä valmistajan kanssa, niin riskit saadaan minimoitua.

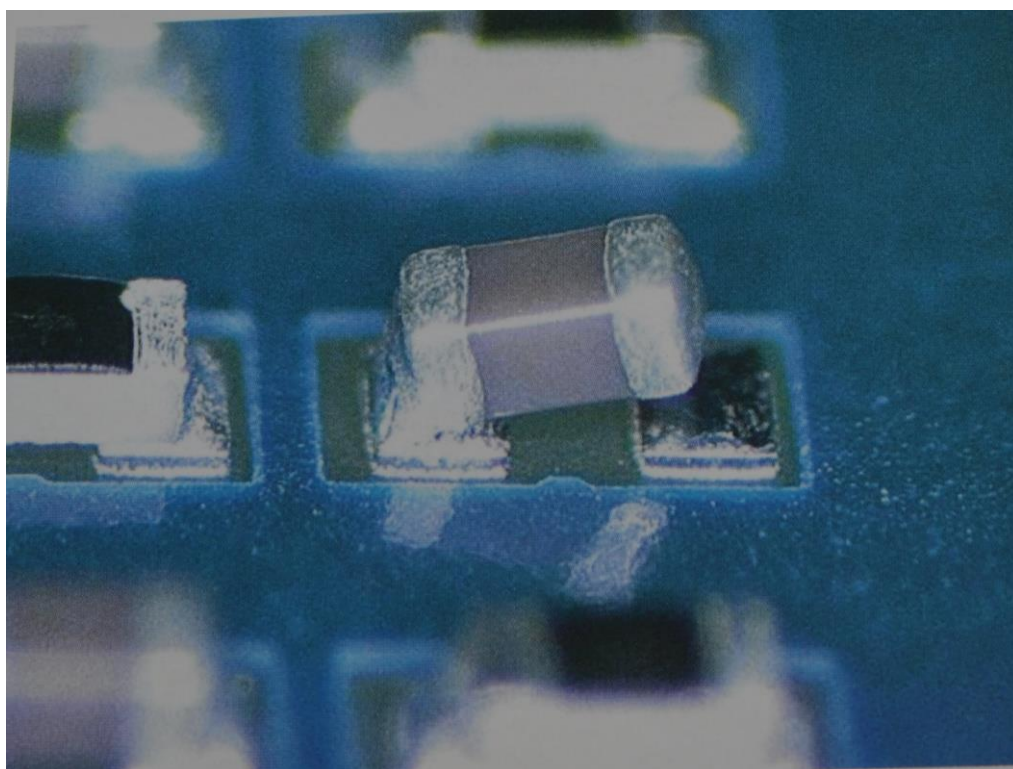


Kuva 16. IC-piirin padit ovat liian pitkät, jolloin todennäköisyys oikosulkuihin on suuri.

Reflow-juotoksen yhteydessä havaittiin, että joissakin tapauksissa passiivisten komponenttien toinen juotospinta nousi ylös juotoksesta, jolloin sähköistä yhteyttä ei muodostunut. Ilmiö tunnetaan teollisuudessa hautakivi-ilmiönä, ja siitä on esimerkki kuvassa 17. Havaituissa tapauksissa käytössä olleet padit olivat suhteellisen kaukana toisistaan sekä

liian kapeat komponentin leveyteen nähden. Padikuvionti ei vastannut komponentin valmistajan suosituksia eikä IPC-7351:tä.

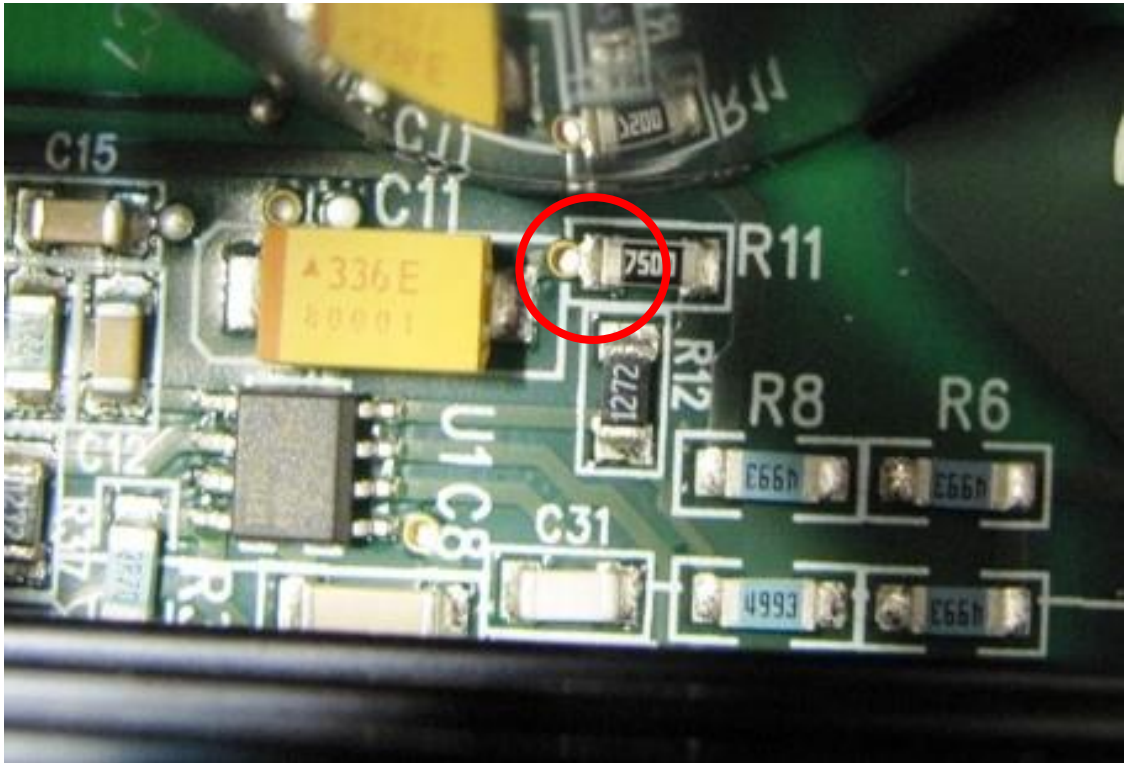
IPC-A-610 määrittää, ettei hautakivi-ilmiötä saa ilmetä piirilevykokoonpanossa. Ilmiöön liittyen on myös määritetty, kuinka komponentti tulee kohdistaa pituussuunnassa padeihin. Komponentti ei saa ylittää pituussuunnassa padia missään tapauksessa. Komponentti saa jäädä vajaaksi padistä, eli sen ei tarvitse ylettää padille saakka, kunhan juotosmetallin kiinnittyminen pädin ja komponentin välillä on havaittavissa. [IPC-A-610 2010: 8.3.2.2; 8.3.8.]



Kuva 17. Hautakivi-ilmiössä komponentin toinen pää voi nousta kokonaan ilmaan juotoksesta. [IPC-A-610 2010: 8-30.]

Padien suunnittelussa tulee olla erittäin tarkkana, kuten kappaleessa 3.1.1. todettiin. Hautakivi-ilmiön syntymisen välttämiseksi suositellaan, että komponentin rungon tulee peittää 50 % padeista, jolloin komponentin paino jakautuu mahdollisimman tasaisesti molemmille padeille. Molemmissa padeissa tulee olla samansuuruisen lämpömassa ja juotospastan määrä mahdollisimman sama. Tällöin juotospastan juoksettumisen yhteydessä vaikuttavat voimat ovat yhtä suuret, jolloin komponentti asettuu hyvin todennäköisesti suoraan paikallensa eikä hautakivi-ilmiötä esiinny. [Alpha 2015a: 14.]

Yksittäisissä tapauksissa reiät toimivat pintaliitoskomponenttien vieressä niin sanottuina tinavarkaina. Tinavarkaalla tarkoitetaan tilannetta, jossa komponentin juottamiseen käytetty juotosmetalli kulkeutuu sille kuulumattomaan paikkaan. Silloin alkuperäinen juotos jää vajaaksi. Tinavarkailta pystyy välttymään, kun piirilevyn suunnittelussa noudatetaan samoja komponenttien välisiä vähimmäisetäisyyksiä testipisteille ja läpivienneille. Kuvasssa 18 vastuksen R11 vieressä, etäisyydellä 0,08 mm, on läpivienti, joka suurella todennäköisyydellä toimii tinavarkana.



Kuva 18. Vastuksen R11 vieressä oleva läpivienti toimii tinavarkana.

3.1.1 Stensiilin ominaisuudet

Valmistajalta saadun datan mukaan aika ajoin pintapuolen SMT-IC-piireissä on esiintynyt oikosulkuja. Pääosin IC-piireissä käytetyt padikuviot ovat olleet oikeanlaisia. Pintapuolen IC-piirit juotetaan Reflow-juotoksessa käyttäen juotospastaa. Juotospastan vääränlainen käyttö aiheuttaa helposti oikosulkuja padien välillä. Stensiilit vaikuttavat suuresti juotospastan annosteluun, jolloin stensiilin laatu vaikuttaa suoraan juotoksen laatuun. On kuitenkin ymmärrettävä, että muut prosessinaikaiset vaiheet ja parametrit vaikuttavat yhtä lailla juotoksen syntyyn.

Stensiilin materiaalina käytetään messinkiä, ruostumatonta terästä, molybdeenia, seos 42:ta tai sähköisesti muodostettua nikkeliä. Stensiilin valmistus voi tapahtua kemiallisesti etsaamalla, laserleikkauksella, sähköisesti hiomalla, sähköisesti päällystämällä tai sähköisesti kasvattamalla. Jokaisella materiaalilla ja valmistustavalla on omat hyvät ja huonot puolensa, jotka on hyvä ottaa huomioon stensiilin valintaa tehdessä. Stensiilin laatua mitataan muun muassa aukkojen seinämien jyrkkyydellä ja sileydellä, aukkojen kohdistuksen tarkkuudella, materiaalin fyysisellä ja kemiallisella kestävyydellä sekä hinnalla. Yleinen stensiilin valmistustapa on laser-leikkaus, jota seuraa aukkojen seinämien sähköinen päällystys. [Hwang 2005: 143–149.]

Stensiilin suunnittelun lähtökohtana on optimoida padeille lisättävän juotospastan määrää. Määrää rajoitetaan stensiilin paksuudella tai aukkojen pinta-alalla. Empiiriset tutkimukset osoittavat kaavan 2 mukaisen riippuvuuden stensiilin paksuuden ja aukkojen pinta-alan suhteen, jota tulisi kunnioittaa stensiiliä suunniteltaessa. [Hwang 2005: 139–140.]

$$\frac{\text{Aukkojen pinta-ala}}{\text{Stensiilin paksuus}} > 1,6 \quad (2)$$

Juotettavan komponentin padikuvio vaikuttaa vahvasti stensiilin ominaisuuksiin. Käytäntö on näyttänyt, että stensiilin aukon tulee olla pienempi kuin padikuvion, jotta juotospastaa ei tule liikaa padille. Stensiilin aukkojen muotoilu riippuu juotettavasta komponentista. Olemassa on esimerkiksi kolmion-, kyöneleen-, ympyrän- neliön- tai timantinmuotoisia aukkoja. Stensiilin aukon pinta-alan suhde komponentin padikuvioon tulee olla kaavan 3 mukainen. [Hwang 2005: 140.]

$$\frac{\text{Padin pinta-ala}}{\text{Stensiilin aukon pinta-ala}} > 0,65 \quad (3)$$

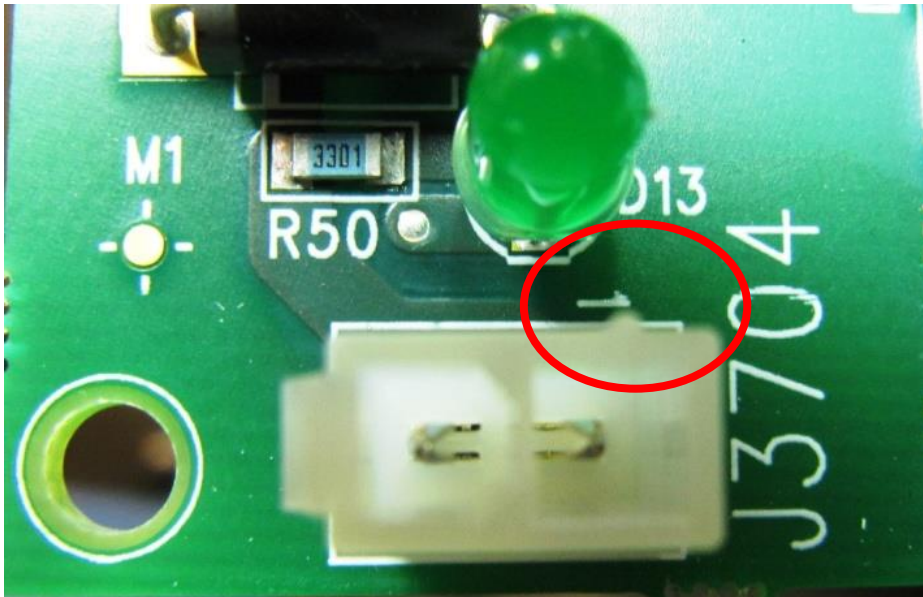
Myös stensiilin paksuutta voi tarvittaessa vaihdella aukkoikohtaisesti valmistamalla stensiili kerroksittain. Stensiilin paksuus voi olla ainoastaan 0,025 mm, jolloin kerroksia voi liimata päällekkäin. Esimerkiksi kolmikerroksinen stensiili, jossa alin kerros on 0,125 mm, keskimäinen 0,025 mm ja päällimmäisin 0,05 mm paksu, on hyvin yleinen. Kyseinen stensiili täyttää tarkkajakoisten komponenttien sekä yleisimpien passiivisten komponenttien ehdot. Stensiilin paksuuden osuus kattaa myös eri liitintyyppisiä ja tehosovelluksiin tarvittavia suurempia juotosvahvuuksia. [Hwang 2005: 140–143.]

Stensiilien ollessa oikein suunniteltuja ja laadukkaasti valmistettuja on aika ottaa huomioon muut prosessinaikaiset haasteet. Käytettävässä raakelissa tulee huomioida sen materiaali ja kovuus, juotospastan pyyhkäisykulma sekä raakelin pinnan tasaisuus. Juotospastasta tulee selvittää reologiset ominaisuudet, kuten raekoko ja juoksettavuuslämpötilat sekä säilyvyysaika käytössä. Kun edellä mainitut asiat ovat kunnossa, voidaan keskittyä raakelin luomaan paineeseen. Suurempi paine ei tarkoita, että juotospasta menisi paremmin aukkoihin. Aluksi on hyvä pitää alhaisempaa painetta, mutta paineen kasvatus loppua kohden takaa sileän viimeistelyn. Pyyhkäisy nopeus on suoraan verrannollinen stensiilin paksuuteen; paksummat stensiilit vaativat hitaamman pyyhkäisyn kuin ohuet. Kuitenkin oikean nopeuden säätäminen vaatii käytännössä kokemusta. [Hwang 2005: 136–139.]

3.2 Käsinladonnan riskit

3.2.1 Piirilevyn merkinnät

Käsinladontaa pidetään riskialttiimpana komponenttien sijoitteluna kuin koneellista ladontaa. Operaattoreilla tulee olla selkeät ohjeet, siihen kuinka toimia, eikä piirilevyllä saa olla epäselvyyksiä komponenttien sijoittelussa. Valituissa piirilevyissä operaattorien toimintaa haittasivat joidenkin komponenttien kohdalla silkkipainon puutteelliset merkinnät. Joidenkin polaaristen komponenttien kohdalla ei ollut suuntamerkkejä käytössä, jolloin väärinasennuksen riski oli suuri. Esimerkiksi ledejä oli merkitty osasijoittelukuvaan ja silkkipainoon eri tavoin. Silkkipainossa piirretty suorareuna kuvastaa ledin miinusjalkaa, mutta osasijoittelukuvassa tämän jalan vieressä on plusmerkki. Toisessa tapauksessa epäselvyyttä aiheutti liittimien silkkipainossa olevat suuntamerkit. Tässä liittimen ensimmäinen nasta on merkattu numerolla yksi, johon liittimen sivussa oleva pieni väkänen tulee olla kohdistettuna. Kuva 19 havainnollistaa tapahtumaa. Silkkipainoon ei ole ollenkaan kuvattuna liittimen kiinnitysväkästä, josta liittimen suunta on helppo havaita. Näiden tapauksien kohdalla silkkipainoa ja osasijoittelukuvaa on päivitetty, mutta virheiden estämisen kannalta parempi ratkaisu olisi kehittää Poka-yoke. Poka-yokella tarkoitetaan sellaista kokoonpanoa, jossa virheitä ei pysty tekemään, eli tässä tapauksessa liittimet voisi korvata sellaisilla, joissa on suuntanasta, jolloin liittimiä ei voi asentaa väärin päin. [SixSigma 2015.]



Kuva 19. Liittimen oikeanpuoleisen pinnan yläpuolella oleva suuntamerkki on vaikeasti erotettävissä.

3.2.2 Lämpiladottavien komponenttien reikäkoko

Ennen aaltojuotosta huomattiin, että joissakin tapauksessa korkeat lämpiladottavat komponentit kaatuivat, esimerkiksi elektrolyyttikondensaattorit. Kaatumisen syynä olivat komponentille tehdyt liian suuret reiät. Käytössä olevien elektrolyyttikondensaattoreiden jalkojen paksuudet ovat 0,6 mm, kun piirilevyllä olevat reiät ovat 2,0 mm. Valmistajan suositus reikäkooksi on 1 mm. Palodex Group Oy:n suunnittelijoiden mukaan kyseiset elektrolyyttikondensaattorit ovat aiemmin olleet paksumpijalkaisia, joten komponenttien päivittyessä reikäkoko ei ole havaittu muuttua. Täten komponenttien vaihtumisissa tulee ottaa kaikki vaikutusalueet huomioon. Usein jokaiselle komponentille on nimetty korvaava komponentti mahdollisten toimitus- tai valmistusvaikeuksien varalle, myös näissä tapauksissa on tärkeää muistaa tarkistaa, että kaikki käytettävät komponentit ovat samanlaisia fyysisiltä mitoiltaan.

Komponenttien tuentaan voidaan käyttää erilaisia juotoksenaikaisia tukia, mutta niiden käyttö lisää aina valmistuskustannuksia. Juotos voi myös epäonnistua liian suurien reikien vaikutuksesta. Suuret reiät estävät kapilaari-ilmiön syntyä, jonka vaikutuksesta juotosmetalli nousee aaltojuotoksessa reiän lävitse piirilevyn pintapuolelle täyttäen reiän kokonaan juotosmetallilla. Liian ahtaat reiät taas estävät fluksin pääsemistä reikiin, jolloin reiän metallointia ei saada puhdistettua ennen aaltoa, minkä takia juotosmetallikaan ei

pääse nousemaan pintapuolelle. IPC-A-610 määrittää, että reikien tulee täytyä vähintään 50 % juotosmetallilla sekä yli 14-jalkaisissa komponenteissa täyttymistä täytyy olla vähintään 1,2 mm. [IPC-A-610 2010: 7.3.5.1.]

Vaikka on hyväksyttyä, ettei juotosmetalli nouse pintapuolelle, tavoitteena on kuitenkin saavuttaa nousu. Reiän sisäistä juotosmetallin nousua on erittäin haastavaa mitata, jos ei ole siihen tarkoitettua röntgenlaitteistoa käytettävissä. Juotosmetallin noustessa pintapuolelle voidaan sanoa juotoksen onnistuneen. Valmistettavuusanalyysissä havaittiin jokaisella piirilevyllä esiintyvän joissakin tapauksissa vajaata juotosmetallin täyttöä, mutta ainoastaan huonoimmista tapauksista tähän reagoitiin. Esimerkiksi kuvassa 20 komponentin toisen jalan reikä on 1.7 mm halkaisijaltaan, kun toinen reikä on 1,0 mm. Tällöin komponentin korotusosa mahtuu suurempaan reikään asettaen komponentin viinon. Lisäksi pienemmän reiän ahtaus estää juotosmetallin nousun pintapuolelle.



Kuva 20. Oikeanpuoleinen reikä on liian suuri, kun taas vasemmanpuoleinen liian pieni.

3.3 Aaltojuotosprosessin riskit

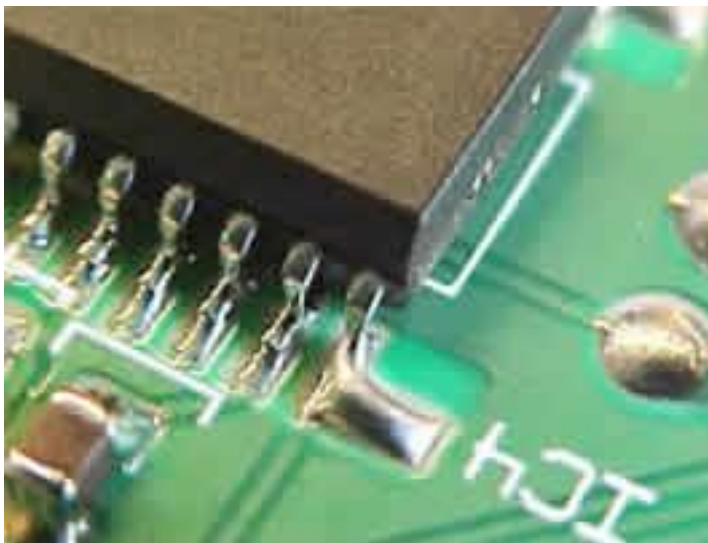
Valmistettavuusanalyseissä löydetyt syyt komponenttien huonoon juottumiseen olivat piirilevyn suuret lämpömassat, komponenttien pitkät jalat, jättöpadien puute ja reikien sijainnit padien läheisyydessä. Suurilla lämpömassoilla tarkoitetaan laajoja maa-alueita piirilevyn sisäkerroksissa, eli juotettavan komponentin toinen jalka on suoraan yhteydessä maa-alueeseen. Tämän seurauksena juotettavan jalan lämpötila on alhaisempi

kuin viereisen, koska lämpöä johtuu maa-alueeseen. Alhaisempi lämpötila aiheuttaa heikompa reagoimista fluksissa, jolloin juottuminen on heikompa. Virheen oireet ovat juotosmetallin heikko nouseminen pintapuolelle tai padien täydellinen juottumattomuus. [Alpha 2015b.]

Liittimien jaloissa havaittiin usein olevan oikosulkuja. Liittimien jalat ovat herkkiä oikosulkujen muodostumiselle, koska etäisyydet jalkojen välissä ovat pieniä. Pitkät jalat asettuvat herkästi vinoon, jolloin ne ovat lyhyitä jalkoja lähempänä toisistaan. Oikosulkuja aiheuttavissa liittimissä jalkojen pituudet olivat noin 2,5 mm, joka oli enemmän kuin niissä liittimissä, joissa oikosulkuja ei esiintynyt.

IPC-A-610 määrittää kuitenkin, että komponentin jalat saavat tulla enintään 2,5 mm esille piirilevyn toiselta puolelta. Standardi ei määritä vähimmäisetäisyyttä, mutta suosituksena on, että komponenttien jalat pystyisivät erottumaan juotoksesta. Havaittujen liittimien jalat olivat näin ollen standardinmukaisia. Analyysin pohjalta voi todeta, että aaltojuotosprosessin aikaisilta oikosuluilta välttyään entistä paremmin, kun jalkojen pituudet ovat alle 2,5 mm. [IPC-A-610 2010: 7.3.3.]

Ongelmia oikosulkujen kanssa ilmeni myös juotettaessa pintaliitostekniikkaa aaltojuotoksessa. Kuvasta 11 näkee, kuinka aallon irtautuessa juotospinnasta se vetää ylimääräisen juotosmetallin mukanaan. Jos pintaliitospadeja ei ole suunniteltu oikein aaltojuotosta varten, niin usein IC-piireissä voi esiintyä oikosulkuja.



Kuva 21. SOIC-piirin viimeisen jalan jälkeen oleva jättöpadi vähentää huomattavasti oikosulkujen riskiä. [Tarr 2015.]

Oikosulkuja voi välttää tekemällä kuvan 21 mukaiset jättöpädit IC-piireille. Piirilevyn kuluuunta täytyy olla tiedossa suunnitteluvaiheessa, jotta jättöpädiä tekeminen on mahdollista. Jättöpädit ovat usein kolme kertaa pidempiä kuin IC-piirin pädit. Jättöpädiä ideana on kerätä juotoksesta irtoava ylimääräinen juotosmetalli kontrolloidusti jättöpädiä, jolla minimoidaan juotosmetallin kertymistä IC-piirin jalkojen välille. Oikosulkuja voi myös minimoida tekemällä IC-piirin pädiästä tasaisesti lyhenevät loppua kohti. Ensimmäisenä aaltoon osuvien pädiä tulisi olla suurempia kuin pädiä, jotka irtoavat aallosta viimeisenä. Kontrolloitu pädiä pieneneminen vähentää ylimääräisen juotosmetallin vetäytymistä, jolloin oikosulun riski viimeisien jalkojen välillä pienenee.

3.4 Testauksen riskit

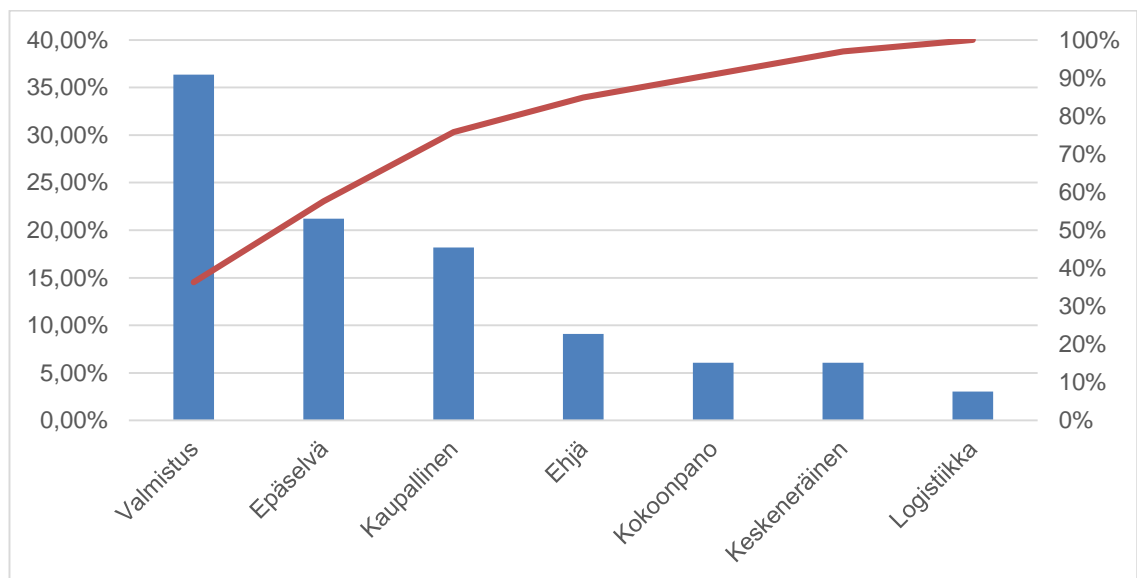
Piirilevyn lopputestauksesta saadun datan perusteella testauksessa on esiintynyt välillä satunnaisia virheitä, jotka ovat poistuneet, kun on suoritettu uudelleentestaus. Testaus suoritetaan piikkipedillä, jossa kaikille piirilevyille on suunniteltu yksilölliset testipisteet. Satunnaisia testausvirheitä aiheuttaa testipiikkien fluksisuus. Piirikorttien testipisteet ovat osittain fluksin peitossa, jolloin fluksia pääsee testipiikkeihin aiheuttaen huonoa kontaktia. Kestävänä, korjaavana toimenpiteenä olisi hyvä, jos testipisteet eivät olisi liian lähellä komponenttien jalkoja, jolloin fluksin lisäyksessä olisi mahdollista varoa testipisteitä. Nopeana ja helppona ehkäisevänä toimenpiteenä on testipiikkien puhdistuksen lisääminen ennakoivan huollon piiriin. Tällä saadaan minimoitua fluksin määrää testipiikeissä, jolloin testausvirheet vähenevät.

Toinen testauksessa saatu huomio kosketti testauksessa säädettäviä komponentteja. Yhdessä tapauksessa dippikytkimiä on asetettu muuntajan alle. Dippikytkimien käyttö on vaikeaa ja aikaa vievää pienen tilan vuoksi. Olisi suositeltavaa, että säädettävät komponentit sijoitettaisiin helposti viritettävälle. Säädettävien komponenttien säätövaroihin on myös hyvä kiinnittää huomiota, jotta testausprosessi nopeutuu. Esimerkiksi käytössä olevan trimmerin säätövara on niin pieni, että jännitteiden osuminen halutulle asteikolle on työlästä. Suunnitteluvaiheessa tulee ottaa huomioon valitut komponentit. Mitä helpommin säädöt ovat tehtävissä, sitä kustannustehokkaammin testaus voidaan suorittaa.

3.5 Piirikorttien saannon nykytila

Valmistettavuusanalyysin pohjalta toteutettujen suunnittelumuutoksien vaikutuksia ei havaita kokoonpanon saannossa heti. Lisäksi olemassa olevat varastot kulutetaan loppuun ennen uuden designin käyttöönottoa. Ensimmäinen suunnittelumuutos toteutettiin alkukesästä, ja valmistajalta saadun datan perusteella suunta on oikea. Syksyllä toteutettiin kahteen piirikorttiin suunnittelumuutokset, ja ne otetaan käyttöön ennen joulua. Loppujen kolmen piirilevyn suunnittelumuutokset on tarkoitus toteuttaa samaan aikaan tulevien toiminnallisuuspäivityksien kanssa.

Keväällä 2015 piirikorttivrheitä aloitettiin luokitella ja tutkia kattavammin, jotta tapahtuvista virheistä tiedettäisiin enemmän. Kuvassa 22 on esitetty vuoden 2015 piirikorttivrheidien jakauma alkuperäisen syyn mukaan. Siitä voidaan havaita, että noin kolmasosa Palodex Group Oy:ssä vastaantulevista piirikorttivrheistä on valmistuksessa aiheutuneita. Keväällä valittu ongelmanratkaisun fokus on näin ollut oikea. Kuvan 22 toiseksi suurin lohko on ”Epäselvä”, jolla tarkoitetaan sitä, ettei vian juurisyitä ole saatu kohtuullisella työllä selvitettyä. Epäselvien tapauksien syyt ovat todennäköisesti suunnitteluongelmia, koska näissä tapauksissa ei ole havaittu valmistuksesta johtuvia virheitä.



Kuva 22. Piirikorttivrheidien juurisyiden jakauma vuonna 2015

On hyvä huomata, että lähes viidennes virheistä on ilmennyt kaupallisesti myynnissä olevissa korteissa. Kaupallisesti myytävät kortit ovat usein erittäin laadukkaita, mutta kuitenkin kyseiset kortit ovat esiintyneet vuoden 2014 aikana suurella osalla Palodexissa

ilmaantuvissa piirikorttivyöryissä. Muiden piirikorttien aiheuttamaa kaupallisten piirikorttien hajoamista pitäisi tutkia tarkemmin varsinkin, kun neljänneksi suurin sektori on ollut tapauksia, joissa piirikortit ovat olleet täysin ehjiä ja toimineet seuraavassa kokoonpanossa.

4 Yhteenveto

Työn tavoitteena on parantaa HLEO-minitehtaan piirikorttisaantoa, sekä perehtyä piirilevyjen valmistusmenetelmiin ja niissä yleisesti esiintyviin haasteisiin. Valmistusprosessien monimuotoisuus ja piirilevykohtaisesti räätälöidyt prosessivaiheet toivat opinnäytetyölle suuria haasteita. Täytyy ymmärtää, että jokaisen piirilevyn design on yksilönsä, joten ei ole olemassa yhtä prosessiketjua, mitä voisi soveltaa kaikkiin piirilevyihin. Tästä johtuen valmistusmenetelmien läpikäyminen ja tiivistäminen oli vaikeaa. Yhtenä päähuomiona voidaan pitää piirilevyjen valmistettavuuden huomioimista suunnitteluvaiheessa. Suunnittelijan tulee tietää, mitä valmistusprosesseja käytetään piirilevyn teossa. Tällöin pystytään minimoimaan eri prosesseissa ilmenevät valmistushaasteet.

Piirilevyn suunnitteluvaiheeseen vaikuttaa eri valmistusprosessien kustannukset. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä vähemmän monimutkaisia valmistusprosesseja vaaditaan piirilevyn valmistukseen, sen edullisemmaksi piirilevy tulee. Käytettävien valmistusprosessien määrän minimointi vähentää myös mahdollisten valmistusenaikaisten virheiden syntyä, mikä edesauttaa kustannuksien pienentämisessä. Huonosti toteutettu piirilevyn suunnittelu luo usein suuria haasteita valmistukseen, jolloin myös valmistuksen jälkeiset kustannukset kasvavat, kuten heikko saanto sekä reklamaatioiden kasvu. On suositeltavaa, ettei valmistettavuutta jätetä huomioimatta uuden tuotteen piirilevy-suunnittelussa, koska usein loppukäyttäjälle jälkeenkäynnin aiheutuvat kustannukset ja ongelmat ovat suuria.

Opinnäytetyön toisena tavoitteena oli parantaa Palodex Group Oy:ssä käytettävien piirikorttien laatua. Piirikorttien valmistettavuus valittiin fokuksiksi, mikä jälkeenkäynnin katsottuna oli oikea vaihtoehto. Valmistajan kanssa toteutetut valmistettavuusanalyysit koituivat varsin kattaviksi ja näiden seurauksena saatiin paljon pieniä parannuksia aikaiseksi. Suuria parannuksia valmiisiin ja kauan käytettyihin kortteihin on vaikea toteuttaa, koska usein vaadittaisiin piirikorttien uudelleensuunnittelua. Valmistettavuusanalyysien ansiosta yhteistyö valmistajan kanssa syventyi, mikä tulevaisuudessa mahdollistaa sen, että

ongelmatilanteiden ratkaisuja on helpompi selvittää. Toisena positiivisena asiana on valmistajalle saatu kuva Palodex Group Oy:n jatkuvasta halusta tehdä asioita paremmin, joka on yksi kulmakivi Palodex Group Oy:n toiminnassa. Tämän pohjalta valmistaja on ymmärtänyt lean-periaatteita ja niistä koituvien hyötyjen olevan kannattavia myös itselensä.

Suurimpana haasteena piirikorttien laadunparannuksessa voidaan pitää olemassa olevan datan vaikeaa käsittelyä. Virhetilanteista kerättävä data on varsin kattavaa, mutta usein vaikeasti luokiteltavissa. Takautuvien virheiden selvittämisen onnistumiselle tärkeää on historiatietojen helppo muokattavuus. Tämän hetken virhetilanteiden raportointiin käytetään standardoitua lomaketta, jonka pääkenttinä toimivat virhekuvaus, johon tulee selittää havainnot virheen tapahtuessa. Toiseen kenttään operaattori kertoo tekemänsä korjaavan toimenpiteen. Virheiden raportointitavoissa on suuria eroja operaattoreiden välillä, jolloin virheiden luokittelu on haastavaa. Lean-periaatteita käyttäen olisi hyvä, että raportointiin tehtäisiin kattava standardoitu työtapa. Tässä voisi auttaa yksityiskohtaisemman lomakkeen täyttö, joka vaatisi esimerkiksi operaattoria suorittamaan lyhyen ongelmanratkaisun, jotta kaikki kentät saisivat vastauksen. Standardoitu raportointitapa helpottaisi virheiden luokittelua ja nopeuttaisi systemaattisten vikojen huomaimista ja ratkaisemista.

Lähteet

Alpha. 2015a. Verkkodokumentti. SMT Troubleshooting Guide. <<http://alpha.alent.com/Products/Alpha-Troubleshooting-Guides>>. Luettu 1.11.2015.

Alpha. 2015b. Verkkodokumentti. Wave Soldering Troubleshooting Guide. <<http://alpha.alent.com/Products/Alpha-Troubleshooting-Guides>>. Luettu 1.11.2015.

Control Micro Systems. 2015. Verkkodokumentti. PCB Marking & Depaneling <<http://www.cmslaser.com/industrial-applications-for-lasers/pcb>>. Luettu 28.10.2015.

Coombs, C. F Jr. 2001. Printed Circuit Handbook. New York: McGraw-Hill companies.

Danaher. 2015. Verkkodokumentti. <<http://www.danaher.com/>>. Luettu 30.10.2015.

Empfasis. 2009. Wave versus Selective Soldering. <<http://www.empf.org/empfasis/2009/mar09/wave.html>>. Luettu 20.10.2015

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2011/65/EU. <<http://eur-lex.europa.eu/LxUriServ/LxUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:FI:PDF>>. Luettu 13.10.2015.

Hwang, Jennie 2005. Implementing Lead-Free Electronics. New York: McGraw-Hill companies.

IPC-A-610. Acceptability of Electronics Assemblies. 2010.

ISixSigma. 2015. Verkkodokumentti. <<http://www.isixsigma.com/dictionary/poka-yoke/>>. Luettu 27.10.2015.

Jawitz, Martin. 1997. Printed Circuit Board Materials Handbook. New York: McGraw-Hill companies.

Palodex Group Oy. 2015. Verkkodokumentti. Company brochure. <<http://www.palodexgroup.com/en/#company>>. Luettu 30.10.2015.

Plumbridge, W. J., Matela R. J., Westwater, A. 2003. Structural Integrity and Reliability in Electronics. Lontoo: Kluwer Academic Publishers.

Tarr, Martin. 2015. Verkkodokumentti. <http://www.mtarr.co.uk/courses/topics/0170_wsp/index.html>. Luettu 27.10.2015.