

Opinnäytetyö (YAMK)

Teknologian johtaminen

Tuotekehitys ja tuotteistaminen

2009

Yngvar Wikström

AALTOJUOTOSPROSESSIN SAANNON PARANTAMINEN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Yngvar Wikström

AALTOJUOTOSPROSESSIN SAANNON PARANTAMINEN

Lounais-Suomen elektroniikkaa valmistavat pk-yritykset siirtyivät EU-direktiivin mukaan käyttämään lyijytöntä aaltojuotosprosessia. Tämä osoittautui laskevan saantoa huomattavasti. Turun yliopisto ja Turun ammattikorkeakoulu ottivat vastuulleen etsiä keinon ratkaista kalliiksi osoittautuneen ongelman.

Perustettiin tutkimusprojekti JOINUS, jonka tavoitteena oli löytää keinot, joilla saanto saataisiin vähintään sille tasolle, jossa se oli ennen direktiivin käyttöönottoa. Hankkeessa kehitettiin testilevy ja testitulosten hallintaan liittyvä ohjelmisto ongelman havainnollistamiseksi. Tutkimuksessa eriteltiin prosessin eri vaiheet ja vikatyypit, joita tutkittiin syvällisemmin pääosin kvantitatiivisin tutkimusmenetelmin. Tutkimuksessa sovellettiin laajasti myös tilasto-matemaattisia menetelmiä. Erityisesti tutkittiin suojakaasun käyttöä aaltojuotosprosessissa.

Tuloksissa havaittiin useita epäkohtia juotoskoneiden rakenteissa. Löydettiin tekijät, joilla todettiin olevan suurin merkitys saantoon. Hankkeen tuloksena virhemäärä onnistuttiin vähintään puolittamaan.

Useimmat hankkeeseen osallistuneet yritykset ovat hyödyntäneet tutkimustuloksia pääasiassa ryhtymällä käyttämään suojakaasua prosesseissaan. Ennen kaikkea yrityksissä on alettu ymmärtää paremmin prosessiensa toimintaa ja itse säätämään niitä projektin myötä.

ASIASANAT: juotto, saanto, tyyppi

Master of Engineering thesis | ABSTRACT

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Degree Programme in Technological Competence | Product Development

December 2009 | 74

Instructor: Timo Tolmunen

Yngvar Wikström

WAVE SOLDER PROCESS YIELD IMPROVEMENT

Small and medium sized electronics manufacturers in the south west of Finland started using leadless wave soldering processes according to the regulations of the EU-directives. This decreased the process yield. The Turku University and the Turku University of Applied Sciences took the responsibility to find a solution to the faced expensive problem.

A research project JOINUS was established having the goal to find a solution where the yield would be at least at the same level as it was before implementing the new directives.

A new test circuit board and analysing software were developed to monitor the actual yield most accurately. The research was sectioned according to the process parts and failure types. Several statistical methods were used. A special attention was given to soldering in protective atmosphere.

Misdesigns in the soldering machine design were found when trying to set up the most ideal parameters. Several types of optimization methods were used. Finally the failure rate was decreased almost to its half thanks to this project but many factors remained unknown.

The companies participating in the project have taken advantage of the project mainly by implementing protective gas in their processes. The most important issue is that they have learned to understand the functionality of their processes thanks to the results from this project.

KEYWORDS: Wave solder, yield, RoHS, Protective gas soldering

Alkusanat

Aaltojuotosprosessin optimoimiseksi perustettiin JOINUS-projekti yhteistyönä Turun ammattikorkeakoulun ja Turun yliopiston kanssa vuonna 2005. JOINUS-projektin rahoittajina olivat TEKES ja 16 Turun alueen yritystä.

Projekti jaettiin useaan osa-alueeseen, joissa yhdistettiin oppimista ja kehittämistä. Projekti on ollut hyödyllinen yrityksille ja omalle pitkäaikaiselle kokemukselle aaltojuotostekniikasta on löytynyt käyttöä.

Aaltojuotoksen kehitystyön mittakaavasta kertoo se, että Turun ammattikorkeakoulussa on tällä hetkellä tekeillä tähän aiheeseen liittyvä peräti kymmenes opinnäytetyö. Lisäksi viisi konferenssijulkaisua aaltojuottamisesta on esitetty konferensseissa vuosien 2006 - 2009 aikana. Pidemmän ajan tavoitteena on, että JOINUS-projektin tuloksista laaditaan käsikirja aaltojuotosprosessin käyttäjille sekä väitöskirja. Tämä opinnäyte on JOINUS-projektin tähänastisten tulosten kooste. Kirjoituskieli on suomi, jotta se tavoittaisi mahdollisimman paljon paikallisten yritysten lukijoita.

Projektin myötä todettiin, että juotosongelmaa ei saada ratkaistuksi pelkästään optimoimalla juotokoneen säätöjä. Ratkaisuna perustettiin tueksi erillinen suojakaasuprojekti, jolla tutkittiin inertin kaasun vaikutuksia juottamiseen. On myös tutkittu piirilevy suunnittelun vaikutuksia saantoon, mutta tämän raportointi on rajattu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

Haluan kiittää kaikkia projektiin osallistuneita hyvästä yhteistyöstä; erityisesti Aulis Tuomista projektin johtamisesta, Ossi Hämeenojaa hyvistä tilastomatemaattisista neuvoista sekä Juhani Falckia ja Olli Kotajaa autenttisen tuotantoympäristön järjestämisestä tutkimustyölle. Timo Tolmuselle kiitos ohjaamisesta sekä Leena Mattilalle ja Sami Hyrynsalmelle ohjaavasta tarkastamisesta.

Turussa 15.12.2009

Yngvar Wikström

JULKAISULUETTELO

Opinnäyte nojautuu kehitystehtävän lisäksi seuraaviin julkaisuihin:

[P1] Y. Wikström, ”Piirilevyn suunnittelu aaltojuotosmenetelmää varten,” *Proc. Elektroniikan Valmistus 2003*, Pori, 2003, ss. 72–76.

[P2] Y. Wikström ja E. Eloranta, ”Managing Flow Solder Production at RoHS Compatible Processes,” *Proc. New Exploratory Technologies NEXT 2005*, Salo, 2005.

[P3] O.Hämeenöja, Y. Wikström ja O. Talvitie, ”Tilastomatemattinen keskuspistevertailu ja CCD-suunnitelma aaltojuotokoneen optimoinnissa, ” *Proc. New Exploratory Technologies NEXT 2006*, Salo, 2006, ss. 9–15.

[P4] Y.Wikström, O. Hämeenöja, A. Tuominen, O. Helppi, J. Tapio ja T. Viljanen, ”Optimization of Leadless Wave Soldering Processes,” *Proc. New Exploratory Technologies NEXT 2007*, Seoul Korea, 2007, ss. 141–145.

[P5] Y.Wikström, M. Ohvo ja A. Tuominen, ”The Impact of Probability in Yield Optimization on Wave Soldering Processes, ” *Proc. International Conference on Electronics Packaging ICEP 2008*, Tokio, Japani, 2008, ss. 119–123.

[P6] Y. Wikström, ”Impacts Of Printed Board SMD Layout Pattern Design on Flow Soldering Process Yield. Design Guidelines for Lead Free Soldering,” *Proc. New Exploratory Technologies NEXT 2009*, Shanghai, Kiina, 2009, ss. 28–36.

Julkaisu P1 on esitetty ennen kehitysprojektin aloittamista. Siinä käsitellään aaltojuotosmenetelmän käyttäytymistä pääosin nojautuen empiirisiin kokemuksiin. Helppokäyttöistä aaltojuotosprosessin mittausmenetelmää kehitetään julkaisussa P2. Tilastollisia tutkimusmenetelmiä sovelletaan aaltojuotostekniikkaan julkaisussa P3. Varsinaiset kehittämissuunnitelman tulokset esitetään julkaisussa P4. Kvantitatiivisten menetelmien soveltuvuutta aaltojuotosmenetelmään kyseenalaistetaan julkaisussa P5. Tästä seuraa, että on löydettävä testausmenetelmä, joka ei ole stokastisesti riippuva mittaus tuloksista ja lisäksi antaa syvempää tietoa ongelmakentästä. Julkaisussa P6 perehdytään piirilevysuunnittelun vaikutukseen aaltojuotosprosessin saantoon. Tämä on toteutettu varsinaisen kehitystehtävän jälkeen eikä sen läpivientiä esitellä tässä opinnäytteessä.

SISÄLTÖ

Alkusanat

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

JULKAISULUETTELO

1 JOHDANTO	1
2 AALTOJUOTOSMENETELMÄN PROSESSIKUVAUS	6
2.1 Fluksi.....	6
2.2 Fluksausvaihe	7
2.3 Esilämmitysvaihe	9
2.4 Juotosvaihe.....	10
3 SAANNON MÄÄRITTELYN TAUSTAA.....	13
3.1 Virheiden laskeminen	14
3.2 Testikortin suunnittelu	17
3.3 Erikokoisten komponenttien huomioiminen	21
3.4 Tietokantaohjelmisto.....	21
3.5 Testikortin testaus	26
4 TESTIJÄRJESTELYT ERI YRITYKSISSÄ	29
4.1 Testaussuunnitelman lähtökohdat	29
4.2 Juotokoneen säätäminen	30
4.3 Testauksen toteuttaminen.....	32
4.4 Materiaalivalinnat	37
5 SUOJAKAASUN KÄYTTÖ	38
5.1 Nestemäisen typen käyttäminen.....	38
5.2 Tyypigeneraattorit.....	41
5.3 Putkisto.....	45
5.4 Kansi	46
5.9 Testiasennus Yritys B:ssä	47
5.5 Kuonan eli epäkurantiksi oksidoituneen tinan määrä	49
6 SAANNON TESTAAMINEN JA OPTIMOINTI	53
6.1 Suora optimointi tulosten perusteella.....	53
6.2 Testitulosten 3-D esitys.....	55
6.3 Optimointimalli tuotteen lämpökuorman mukaan	58
6.4 Tuotantoikkuna kuormitusprofiilina	59
6.5 Juotevalinnan vaikutus juotostulokseen.....	61
6.6 Fluksin valinnan vaikutus juotostulokseen	63
6.7 Ilmastoinnin vaikutus juotostulokseen.....	64
6.8 Tyypigeneraattorin tuottaman typen vertailu nestetyyppeen	65
6.9 Lämpöprofiilin vaikutukset juotostuloksiin	66
6.10 Virheiden spatiaalisen jakauman tutkimus.....	67
6.11 Tulosten tulkinta	67
6.12 Tilastolliset menetelmät	68
7 POHDINTA	69
7.1 Yleisiä havaintoja juotosprosessin optimoinnista	69
7.2 Suojakaasujuotoksessa tutkimattomia asioita	70
7.3 Tutkimusprojektin merkityksestä yrityksiin	71
7.4 Jatkotoimenpiteet	71
8 YHTEENVETO	68
9 LÄHTEET.....	72

1 JOHDANTO

Monessa elektroniikkatuotteita valmistavassa yrityksessä käytetään aaltojuotosprosessia, jossa komponentit liitetään piirilevyyn kuljettamalla ne liitoskohdat alaspäin juoteaallon yli. Juotteena käytetään tinaseosta. Menetelmässä juotetaan levyn läpi ladotut komponentit ja samassa vaiheessa voidaan myös kiinnittää pintaliitettävät komponentit [1]. Aaltojuotosprosessin suurin ongelma on saannon epätasaisuus. Juotosliitokset eivät aina ole halutun muotoiset. Juotosliitokset voivat monella eri tavalla jäädä epämuodostuneiksi aiheuttaen jopa muutoksia piirilevyyn toteutettuihin kytkentöihin tai sähköisesti epäluotettavia liitoksia. Virhetyypeistä kaksi on selvästi muita yleisempiä: oikosulku, jossa kahden eri komponentin liitosten väliin muodostuu silta ja puuttuva juotos, jossa sähköinen liitos puuttuu kokonaan [P1].

Virheiden korjaaminen vie paljon aikaa varsinkin käytettäessä *Restriction of Hazardous Substances* (RoHS) direktiivin [2] mukaista lyijytöntä juotetta, koska sen uudelleen sulattaminen vaatii paljon enemmän lämpöä kuin vielä vuoteen 2006 asti sallittu lyijypitoinen juote. Osa virheistä jää myös juotostarkastuksessa havaitsematta, mikä taas aiheuttaa ongelmia tuotteen testausvaiheessa. Oikosulut saattavat jopa hajottaa elektronisia piirejä, mikäli ne kytkevät virtaa väriin kohtiin.

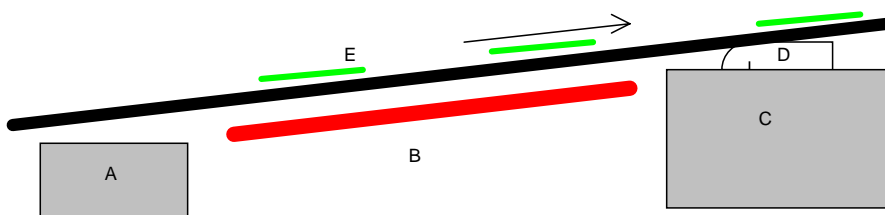
Juotosprosessin parantamiseksi Turun seudun yrityksissä käynnistettiin vuonna 2006 Turun yliopiston ja Turun ammattikorkeakoulun yhteistyöprojekti JOINUS (Joining by Using Statistical Methods) [3]. Projektissa oli mukana 16 teollisuusyritystä ja neljä korkeakoulua. Tutkimusprojektissa työnjako tehtiin juotosmenetelmän mukaan siten, että Turun yliopisto keskittyi juotosmenetelmään, jossa juote tuodaan liitoskohtaan juotepastan muodossa ja sulatetaan uunissa (engl. reflow), ja Turun ammattikorkeakoulu keskittyi aaltojuotosmenetelmään. Juotostestit suoritettiin yhdessä salolaisessa elektroniikkayrityksessä (Yritys A) [P4] sekä Teijossa sijaitsevassa elektroniikan alihankintayrityksessä (Yritys B) [P3]. Ongelmaa lähestyttiin suunnittelemalla testipiirilevy saannon mittaamiseksi [P2]. Oletettiin, että valitsemalla sopivat koneasetukset tilastomatematisilla menetelmillä, voitaisiin määritellä parhaat tulokset tuottavat prosessin asetukset [P2], [P3] ja [4–8].

Tavoitteena oli myös verrata saantoa juotettaessa suojakaasuympäristössä. [9–14].

2 AALTOJUOTOSMENETELMÄN PROSESSIKUVAUS

Tämä prosessikuvaus sisältää useita väittämiä, joiden taustalla on 20 vuoden kokemus juottamisesta. Tietoa on kulkenut suusta suuhun asiantuntijapiirissä tai tieto on syntynyt omista havainnoista. Vastaavia ei ole löytynyt kirjallisuudessa. Suositeltava tietolähde on Klein ja Wassinkin kirja *Soldering in Electronics* [15].

Aaltojuotosprosessissa on kuvan 1 mukaisesti kolme perusvaihetta. Ensin levitetään fluksi jota usein kutsutaan myös juoksutteeksi, eli juotettavat pinnat kastetaan nesteellä, joka sisältää metallipintoja puhdistavia happoja. Seuraavaksi piirilevyä kuumennetaan esilämmitysvyöhykkeessä, jossa fluksin liuottimet kuivuvat ja jäljelle jäävät aktiiviset aineet puhdistavat liitettävät pinnat oksideista. Viimeiseksi tapahtuu juottaminen liitettävien pintojen sukeltaessa juoteaallon läpi, kuten kuvassa 1 kohdassa D on esitetty.



Kuva 1. Aaltojuotosprosessin periaate: A = fluksaus, B = esilämmitys, C = juotepata, D = juoteaalto, E = kuljetinrata.

Juotosprosessi voidaan jakaa juotosta valmisteleviin, juotoksen aikaisiin ja juotoksen jälkeisiin osiin. Prosessin parametrit voivat olla kemiallisia, johon kuuluu fluksin, piirilevyypinnan ja juotteen koostumus. Termisillä säädöillä asetetaan piirilevy, komponentit ja juote oikeaan lämpötilaan. Spatiaalisiin asetuksiin voidaan laskea piirilevyn kulku juoteaalttoon nähden sekä aallon pinnan liikkuminen juotosvaiheen eri kohdissa. Tämän tutkimuksen myötä on havaittu aallon seoksessa, että myös muiden kuin metallisten aineiden vaikutuksella on merkitystä.

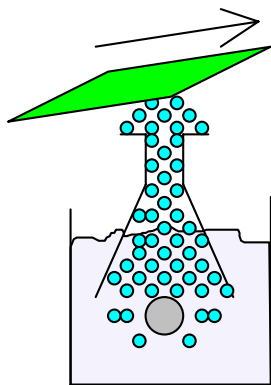
2.1 Fluksi

Juotostapahtuma edellyttää, että liitettävät metallipinnat ovat puhtaita ionisista epäpuhtauksista eli oksideista. Myös ei-ioniset epäpuhtaudet, kuten pöly ja rasva, pienentävät todennäköisyyttä juotoksen onnistumiselle. Tämän takia kannattaa aina käyttää käsineitä käsiteltäessä piirilevyjä. Fluksi toimii siten, että sen liuotin huuhtelee

roskat, pölyt ja rasvat [16]. Jäljelle jäänyt kuivunut hartsi sulaa noin 70 °C:n lämpötilasta alkaen, jolloin siitä eriytyy happoja, jotka redusoivat metalleihin muodostuneita oksideja. Metalliosien pinnalla tapahtuva etsaus edesauttaa juotteen kiinnittymistä. Ioninen aktiivisuus metallipinnoissa näkyy pintaenergian, pinta-jännityksen ja kastokulman muutoksena. Juotos leviää Mankon [17] mukaan niin kauan, kuin oksaalihappoa on läsnä. Fluksin pitää olla mahdollisimman aktiivinen, jotta juotos onnistuisi hyvin. Toisaalta sen pitää olla matala-aktiivinen, ettei piirikortteja tarvitsisi pestä juotoksen jälkeen. Sen pitäisi lisäksi olla vesipohjainen, koska nykyään pyritään vähentämään liuottimien haihtumista ilmakehään. Yrityksessä B on myös havaittu, että liian aktiivinen fluksi on johtanut pienien tinapallojen esiintymiseen piirilevyissä, joissa on ollut tietyn valmistajan juotteenestopinnoite.

2.2 Fluksausvaihe

Fluksauksessa huuhdellaan lika levyn pinnasta ja levitetään metalleja aktivoivaa ainetta juotteen kiinnittämiseksi paremmin. Tavoitteena on kasta juotettavat pinnat juoksuotteella mahdollisimman tasaisesti. Tämä onnistuu usealla eri menetelmällä, mutta kaikilla on omat vaikeutensa. Eniten käytetty menetelmä on vaahdotus [15], jonka toimintaperiaate on esitetty kuvassa 2. Huokoisesta vaahdotinputkesta nousee kuplia suuttimen läpi kastaen yli kulkevaa piirilevyä. Vaahdotus perustuu siihen, että avonaisen astian nesteeseen puhalletaan kuplia vaahdotinputkella. Syntyvä vaahto johdetaan suuttimen kautta ylös piirilevylle.

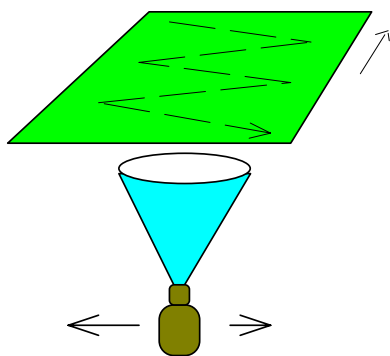


Kuva 2. Poikkileikkaus vaahdotimesta.

Menetelmän heikkoutena on nesteen jatkuva haihtuminen, minkä johdosta sen jäljellä olevan kiinteän aineen osuus on vaikea arvioida. Mikäli käytetään hydrostaattista

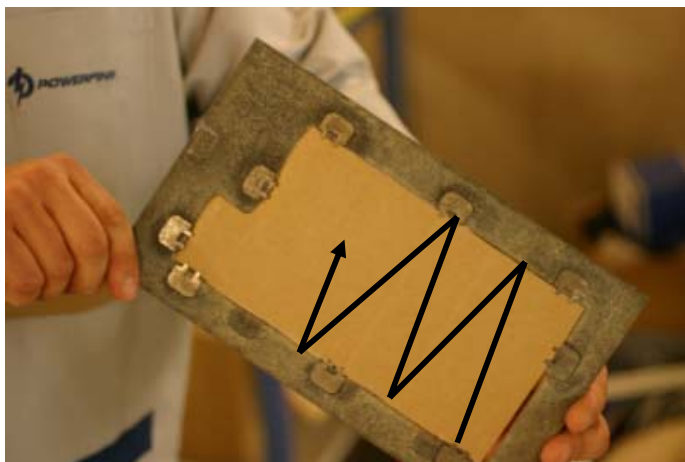
liuotinta fluksissa, kuten isopropanolia, siihen tiivistyy kosteutta huoneilmasta varsinkin kesällä, kun ilman suhteellinen kosteus on korkea. Fluksin piirilevylle levitettävään määrään on vaikea vaikuttaa, tosin liuottimen osuutta voidaan tarvittaessa muuttaa. Lisäksi avoinna oleva astia on tulipaloriski, koska välillä piirilevyltä tippuu pisaroita, jotka voivat syttyä kuuman esilämmittimen päällä. Fluksisäiliö muodostaa myös palokuorman. Monessa yrityksessä, kuten esimerkiksi Teleste Oyj:ssä, on asennettu automaattinen hiilihapposammutusjärjestelmä juotoskoneeseen.

Vaihtoehtoisesti juoksutetta voidaan suihkuttaa fluksi-piirilevyyhin. Suihkutusmenetelmässä [15, 18] neste tulee suoraan säiliöstä ja se puhalletaan piirilevyyhin maaliruiskua muistuttavalla laitteella, joka liikkuu sivusuunnassa edestakaisin piirilevyn kulkusuuntaan nähden kuvan 3 mukaan peittääkseen koko piirilevyn pinnan. Fluksin määrää voidaan säätää muuttamalla nesteen painetta, paineilman painetta tai kuljetinnopeutta [15].



Kuva 3. Fluksin suihkutusta eli spray-fluksaus

Suihkutusmenetelmällä on useita etuja. Neste on aina tasalaatuista, koska se imetään suoraan astiasta. Menetelmä on paloturvallisempi kuin vaahdotus, jossa pidetään herkästi syttyvää ainetta avoimessa astiassa. Nesteen kulutus on myös pienempi, koska haihtuminen ei ole yhtä voimakasta. Fluksin valmistus on myös helpompaa, koska sen ei tarvitse olla vaahtoava. Ongelmana voi olla suuttimen taipumus tukkeutua kuivumisen johdosta, ellei se ole jatkuvassa käytössä. Varsinkin suurella kuljetinnopeudella voidaan havaita epätasainen tulos, koska ympyrämuotoisella suihkulla kerääntyy ensin ainetta kulkureitin keskelle, kuten levittyneisyydestä kuvassa 4 esittää. Levittyneisyydestä asetetaan paperi juotoskehikkoon, johon suihkutettua jälkeä voi tarkastella visuaalisesti.



Kuva 4. Fluksin toimivuutta voidaan tarkastella asettamalla paperi piirilevyn sijasta juotoskehikkoon.

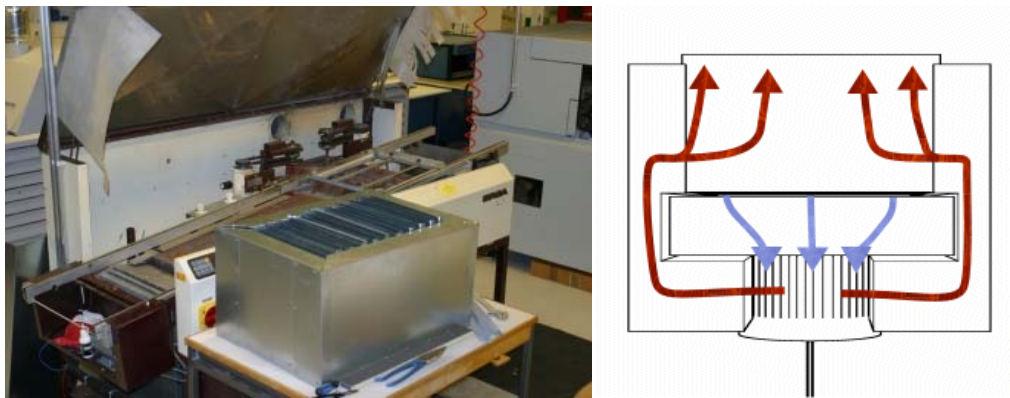
Paperin pitää tulla tasaisesti kastetuksi, eikä pelkästään ohuena siksak-muotoisena viivana. Kuvassa 4 nuoli osoittaa suihkun kulkemaa matkaa. Kun paperi imee osan nesteestä, voidaan silmämääräisesti arvioida määrän jakautumista pinnalle.

2.3 Esilämmitysvaihe

Fluksin kuivattamisen lisäksi pintaliitostekniikassa on tärkeää, että komponentit lämmitetään ennen juotosvaihetta. Komponentteihin kohdistuu lämpösokki kun ne osuvat sulaan juotteeseen, jonka lämpötila on noin 265 °C. Komponenttien osuessa juoteaaltoon lämmön siirto tapahtuu johtumalla sulasta metallista sekä liikkuvan nesteen konvektiolla, koska juoteaalto valuu kuljettimen nähden vastakkaiseen suuntaan. Tavoitteena on lämmittää komponentit siten, että niiden osuessa juoteaaltoon tapahtuisi vain noin 100 °C:n äkillinen lämpötilan nousu. Tätä kutsutaan aaltojuotoksen lämpösokiksi. Komponentteja ei saa lämmittää liian nopeasti, koska niiden eri rakenneosien lämpölaajenemiskertoimet poikkeavat toisistaan paljon. Tämä voi aiheuttaa materiaalin murtumista erityisesti keraamisissa kondensaattoreissa. Komponenttikotelo voi saada sisäisiä halkeamia, kun lämpölaajeneminen alkaa ensin pinnalta. IC-piirien sisältä haihtuu kosteus niin nopeasti, että ne halkeavat (ns. popcorn-ilmiö). Yleinen sääntö on, että komponenttien lämpöä saa nostaa enintään 2–3 °C/s nopeudella [19]. Esilämmityksen aikana fluksin liuottimien pitää kuivua mahdollisimman nopeasti ja tasaisesti. Nesteen kuivuminen nopeutuu ympäröivän ilman virtausnopeuden mukaan. Oikean lämpötilan saavuttamisen lisäksi on tärkeää, että sen

jakautuminen piirilevyn pinnalla on mahdollisimman tasainen. Jokaisen liitosalueen ja komponentin jalan pitää saavuttaa sama lämpötila. Liiallisesta lämmityksestä fluksin vaikutus vähenee ja syntyy enemmän juotosvirheitä. Yksittäisissä kuumissa kohdissa syntyy juotospiikkejä (engl. icicles). Kylmissä kohdissa fluksi ei ehdi puhdistamaan oksideja komponenttien pinnoilta eikä fluksi välttämättä edes ehdi kuivua, jolloin se muodostaa höyrykuplia juoteaalttoon aiheuttaen juotosvirheitä.

Turun ammattikorkeakoulun elektroniikkatuotannon laboratorioon rakennettiin uudentyypinen esilämmitin, koska alkuperäinen lämmitin toimi pitkäaalto-infrapunasäteilyllä, mikä heijastuu kiiltävistä metallipinnoista takaisin eikä lämmitä riittävän tasaisesti. Kuva 5 esittää uutta esilämmitintyyppiä, jossa kuuma ilma nousee joka toisesta raosta ja kiertää takaisin joka toiseen.



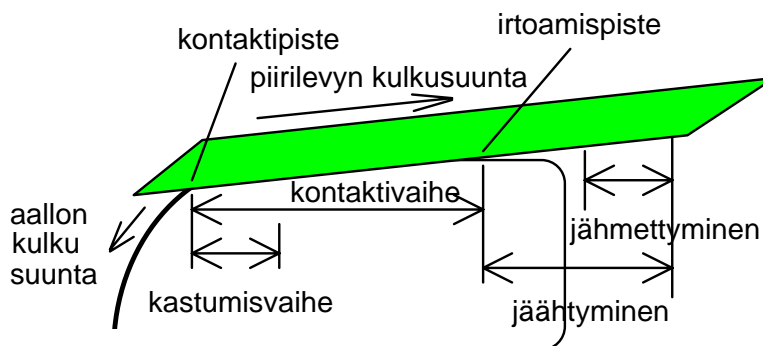
Kuva 5. Tutkimuksen yhteydessä kehitetty konvektioesilämmitin ja sen toimintaperiaate [20].

Ilman kiertonopeus pidetään mahdollisimman korkeana, jotta isotkin pisarat kuivuisivat riittävän nopeasti. Haihtumisnopeus on riippuvainen ympäröivän ilman virtausnopeudesta. Rakennettu prototyyppi toimi odotetulla tavalla. Menetelmän optimoinnissa olisi kaivattu puhalluksen säätöä. Lisäksi tuuletin pitää häiritsevää ääntä.

2.4 Juotosvaihe

Juotosaalto on juotuskoneen tärkein osa. Sula juotosmetalli pumpataan padan altaasta ylös suuttimeen, joka on muotoiltu siten, että se muodostaa vesiputousta muistuttavan jatkuvan aaltoliikkeen. Piirilevy kulkee vastavirtaa siten, että liitettävät kontaktit osuvat virtaavaan juotteeseen. Kuvassa 6 esitetään juotostapahtuman eri vaiheet, ja kuvassa 7

näkyä prosessi käytännössä. Yleensä käsitellään kuhunkin eri vaiheeseen kuluva aika yhtenä kokonaisaikana. Koko juotosvaihe kostumisesta jähmettymiseen kestää tyypillisesti noin 4 sekuntia [15].



Kuva 6. Piirilevyn kulkeminen juotosaallon yli tapahtumavaiheittain [P1].

Liitosalue saa kontaktin juoteaaltoon *kontaktipisteessä*. *Kostumisvaiheessa* sula juote kiinnittyy liitosalueeseen. Edellytyksenä tähän on, että fluksi on poistanut kaikki epäpuhtaudet ja aktivoinut pinnat kevyellä etsauksella. *Kontaktivaihe* jatkuu kuitenkin tätä pidemmälle, koska liitos saadaan entistä lujemmaksi antamalla sulan metallin tehdä yhdisteitä liitoskohdan metallin kanssa, jolloin muodostuu välimetallikerros. Tässä vaiheessa juote nousee piirilevyn rei'istä muodostaen kontaktin metalloidun reiän ja komponentin väliin koko piirilevyn läpi. *Irtoamispisteessä* muodostuu juotosliitoksen geometria. Irtoamispisteen jälkeen alkaa jähmettyminen, joka ei saisi kestää liian pitkään, koska silloin diffuusio ehtii kuluttamaan enemmän metallia komponentin liitosalueelta. Hitaassa jähmettymisessä metallit erkanevat toisistaan muodostaen raerajoja joista murtuminen voi alkaa [21,22]. Toisaalta jähmettyminen ei saisi olla liian nopea, koska komponentteja ei saisi jäähtyä yli 2–3 °C/s nopeudella niiden sisällä olevien rakenneosien vaihtelevien lämpölaajenemiskertoimien vuoksi. Kompromissina on yleensä luonnollinen jäähtyminen. Käytännössä lyijytön juote jähmettyy nopeasti irtoamisen jälkeen. Juote on kiinteässä muodossa jo noin 5 cm:n aallon jälkeen. Lyijyllinen juotos on pidempään sulassa tilassa matalamman sulamispisteen vuoksi.

Irtoamispiste, jossa komponentti nousee aallosta, on kriittisin juotoksen kannalta. Fluksin ansiosta juotteen pintajännityksen pitää olla riittävän suuri, jotta liitoksista tulisi muodoltaan pyöreitä. Juote ei kuitenkaan saa olla liian sitkeää, koska silloin syntyy lyijyttömälle juottamiselle tyypillisiä juotospiikkejä. Jos levyn mukana kulkenut fluksi on joko kulunut pois juotosvaiheessa tai ylikuumentunut, syntyy paljon oikosulkuja. Jos

sen vaikutus on kokonaan hävinnyt, syntyy harsomaisia kuvioita piirilevyille. Lyijyllisellä juotteella on lisäksi etunaan suurempi ominaispaino, joka vetää roikkuvista pisaroista suuremmalla gravitaatiovoimallaan ja pudottaa piikit pois. Pisan geometriaan vaikuttavat juoteaallon pinnan liikkeet, mutta eniten merkitystä vaikuttaa olevan jäljellä olevan fluksin aktiivisuudella juotosvaiheen loppuosassa [17].



Kuva 7. Piirilevyn kulku juotoksessa

Aallon lämpötilan säädössä ei ole yleisiä sääntöjä, vaan säätäminen kannattaa aloittaa valmistajan ohjeistuksesta, joka on tyypillisesti noin 265 °C lyijyttömällä juotteella. On helppo tehdä johtopäätös juotteen lämpötilan nostamiseksi, mutta sen laskeminen saattaa tuoda jopa vielä enemmän etuja. Seuraavaksi esitetään havaintojen perusteella muodostuneita kokemuksia lämpötilan muutoksen seurauksista.

Jos padan lämpötilaa nostetaan,

- oksidoituminen eli kuonan muodostus kasvaa;
- juote notkistuu ja varsinkin, jos kuparin osuus on päässyt kasvamaan, tällä keinolla voidaan väliaikaisesti parantaa juotostuloksia, kunnes kuparin osuus on pienentynyt sitä mukaa, kun pataan on lisätty vain puhdasta kuparitinaa;

- korkeammassa lämpötilassa sulaa vähemmänkin eutektinen seos, mikä näkyy juotepadan pinnalle kerääntyvän osittain sulaneen ja oksidia sisältävän metallin eli juotepuuron vähenemisessä;
- kokonaislämpömäärä kasvaa, jolloin voi olla tarvetta vähentää esilämmitystä;
- komponenttien pinnoitteiden liukeneminen nopeutuu; ja
- komponentteja ja piirilevyjä vaurioituu enemmän.

Jos padan lämpötilaa lasketaan,

- juotteesta tulee ”sitkeämpi”, mikä saattaa olla jopa hyvä oikean geometrian aikaansaamiseksi juotosliitoksissa;
- komponenttien pinnoite liukenee hitaammin, samoin juotospadasta liukenee metallia hitaammin;
- fluksi kestää paremmin juotosprosessia;
- juotospata ja sen osat liukenevat hitaammin juotteeseen.

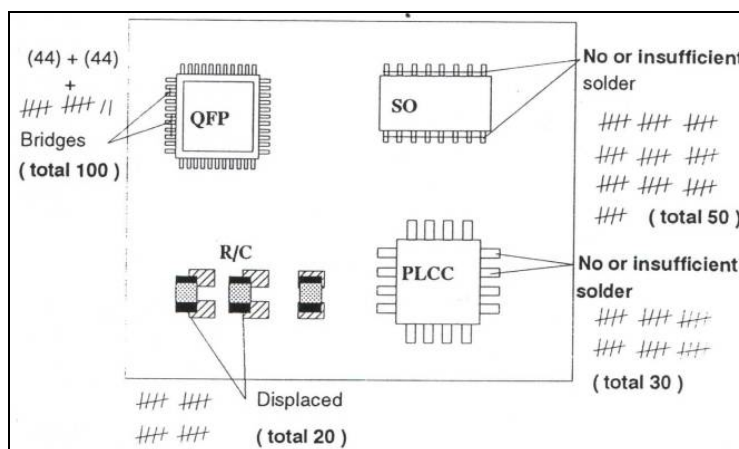
Nämä tulokset ovat lähinnä hypoteeseja, jotka perustuvat omiin havaintoihin [P1]. Näitä pystyy mahdollisesti todistamaan oikeiksi tai vääriksi tulkitsemalla projektin aikana juotettuja testilevyjä [P6]. Tulkitsemista haittaa prosessin korkea kohinataso eli tulosten selittämätön vaihtelu ilman että muutetaan asetuksia [P5].

3 SAANNON MÄÄRITTELYN TAUSTAA

JOINUS-projektia varten suunniteltiin testikortti [P2] saannon mittaamiseen. Suunnittelutavoitteena oli, että käytettäisiin testikorttia, joka simuloisi tuotettavaa piirilevyä mahdollisimman tarkasti. Sen piti olla riittävän hankala juottaa, jotta saataisiin tuloksia myös kunnossa olevalle prosessille. Satunnaisuuden vaikutusta pyrittiin vähentämään käyttämällä hyvin suurta testipisteiden määrää. Prosessin kyvykkyyden mittausta tulisi pystyä tekemään mahdollisimman pienellä otosmäärällä.

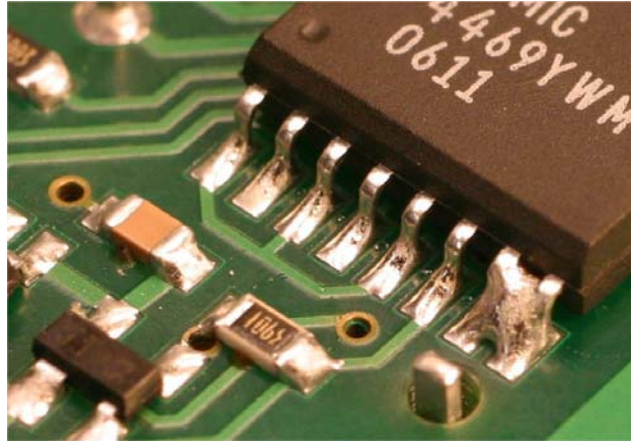
3.1 Virheiden laskeminen

Testikortin tuli olla mahdollisimman yksinkertainen säilyttäen terminen yhteensopivuus todellisen tuotantokortin saannon laskemisen helpottamiseksi. On tärkeää, että saantoarvio olisi jäljitettävissä niin eri prosessien välillä kuin tuotantokortin ja testilevyn välillä. Saannon laskeminen määritellään standardissa IEC1191 [23] virheellisten liitosten määränä kokonaismäärästä. Laskennassa huomioidaan, mikä prosessin vaihe on virheen aiheuttanut. Aaltojuotokselle tyypillinen vika on se, että kaksi eri komponenttia on aiheuttanut oikosulun keskenään. Tämä lasketaan yhdeksi virheeksi. Kun kaksijalkainen komponentti on irronnut kokonaan, se lasketaan kahdeksi virheeksi. Kuva 8 esittää esimerkkiä, jossa juotostarkastusvaiheessa on tutkittu virheiden määrää. Erän suuruus oli 500 piirilevyä. Tällöin liitoksia olisi yhteensä $(16 + 44 + 6 + 16) \times 500 = 41000$. Virheitä laskettiin yhteensä 200 kpl, eli $200 / 41000 \times 10^6 = 4878$ ppm (Parts Per Million).



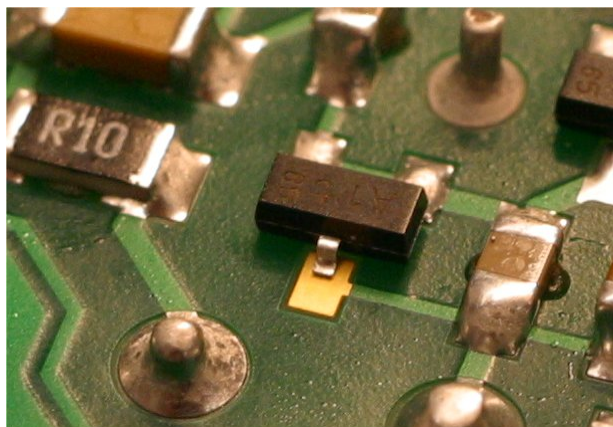
Kuva 8. Esimerkki virhelaskennasta. Huomaa, että kohdassa R/C virheet johtuvat ladonnasta eivätkä juotoksesta. [23]

Kuva 9 esittää tyypillistä oikosulkua joka syntyy juotoksen jäähdytysvaiheesta. Jos fluksin tehokkuus laskee liikaa juotosvaiheen aikana, pintapaine muuttuu ja juotoksista ei tule halutun muotoisia [17]. Kuva 9 esittää oikosulkua, mikä esiintyy IC-piirien kahden viimeisen jalan välissä. Piirilevyn suunnittelulla voidaan vaikuttaa tällaisiin virheisiin.



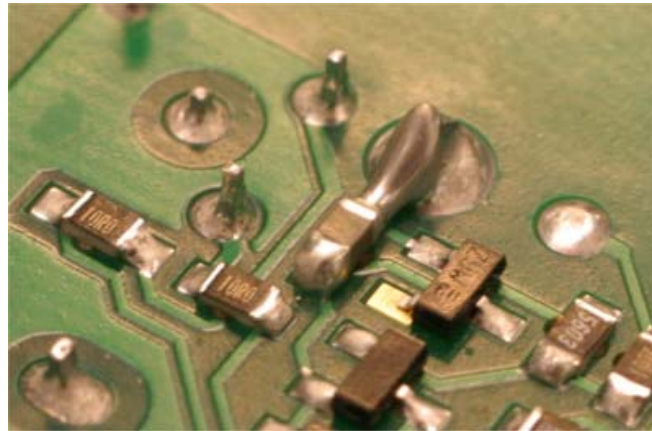
Kuva 9. Oikosulku.

Kuva 10 esittää tyypillistä puuttuvaa juotosta. Yksi liitoksista on jäänyt kokonaan kostumatta. Kuvasta ei ole tunnistettavissa syitä vikaantumiseen. Todennäköisesti virhe johtuu juotoskoneesta tapahtuvista satunnaisista virheistä tai liitosalueen juotettavuus ei ole riittävä. Piirilevyn suunnittelulla voisi olla merkitystä, mutta komponenttien välinen etäisyys näyttää olevan melko suuri.



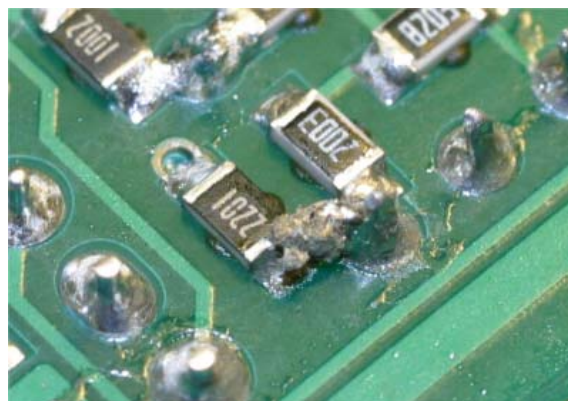
Kuva 10. Puuttuva juotos.

Kuvassa 11 on juotospiikki sekä puuttuva juotos. Isot juotekertymät ovat tyypillisiä ongelmia lyijyttömässä juottamisessa. Juotteen pinta oksidoiduu erittäin nopeasti jopa suojakaasun ympäröimänä [9]. Jos fluksin vaikutus on riittävä tai suuri, pintajännitys kasvaa ja muodostuu pulleita juotoksia. Mikäli fluksin aktiivisuus on vähäinen, pintajännitys pienenee ja juotoksista tulee ohuita ja piikkimäisiä. Mitä useampi vierekkäin läpiladottu jalka ja mitä pidemmät ne ovat, sitä todennäköisemmin juotospiikki syntyy. Piirilevyn suunnittelulla voidaan paikallisesti kompensoida tilannetta. Olisi syytä suunnitella piirilevyn kuviot kolmessa dimensiossa.



Kuva 11. Juotospiikki sekä puuttuva juotos

Kuvan 12 tapauksessa virheeseen liittyy juotteen seassa kulkeva kuona joka ei ole noussut juotteen pinnalle niin, että sitä olisi voinut kerätä pois. Ongelma on tyypillinen juotuskoneissa, joissa on pieni juotospata. Virheiden todennäköisyyttä voidaan vähentää puhdistamalla pinnalle ja suuttimen sisälle kerääntynyt kuona useammin.



Kuva 12. Liitokseen on tarttunut kuonaa juoteaallon pinnalta.

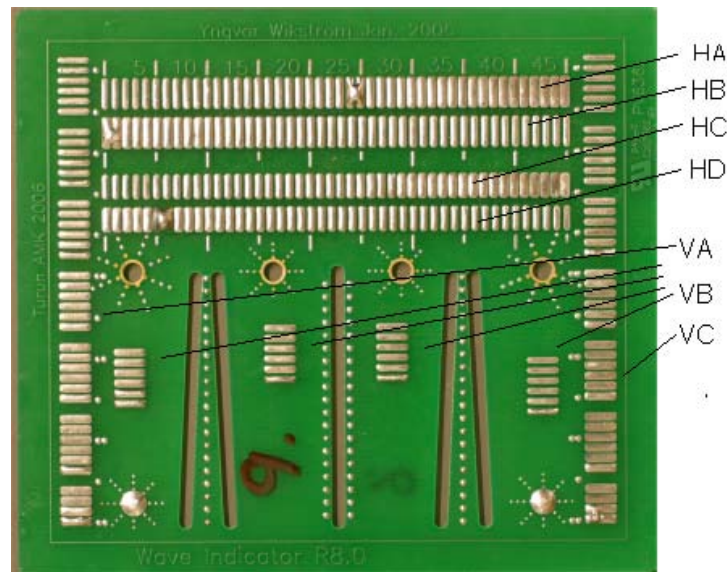
Virheitä aiheuttavia tekijöitä on lukuisia. Juotosmenetelmän suosio on laskussa, koska ei edes tunneta kaikkia virheisiin liittyviä tekijöitä. Lisäksi yhteen virheeseen voi liittyä useita tekijöitä, josta usein jää epäselväksi mitä kannattaa tehdä virheiden todennäköisyyden pienentämiseksi. Monet virheet jäävät kokonaan selittämättömiksi [P6].

3.2 Testikortin suunnittelu

Lopullinen testikortti on muotoutunut usean kokeiluversion kautta [P2]. Tärkeimpänä tavoitteena on ollut erilaisten virhetyyppien saaminen esille tuotantoprosessissa. Testikortin suunnittelussa painotettiin prosessin ominaisuutta tuottaa oikosulkuja sekä jättää liitosalueita kostumatta. Oikosulkujen testaamiseksi suunniteltiin liitosalueita tiheästi vierekkäin vaakasuorin (H) ja pystysuorin (V) rivein. Juotosten puuttumista pyrittiin aiheuttamaan erilaisilla katvealueilla.

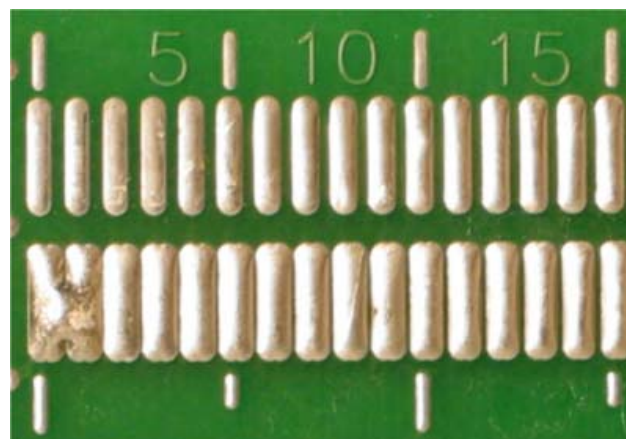
Oikosulkutestien liitosalueiden välit valittiin sen mukaan, että saataisiin vaihteleva vaikeusaste. Aikaisemmissa piirilevyversioissa [P2] havaittiin, että 0,6 mm on suurin rako, joka on aikaisemmissa testilevyversioissa mennyt oikosulkuun. Kapeimmaksi valittiin sellainen rako, joka on piirilevyn valmistuksen mahdollisuuksien äärirajoilla eli 0,11 mm. Suunniteltu peruskuvio näkyy kuvassa 13 (HA – HD) ja se toistuu hajonnan vaikutusten tasaamiseksi. Lisäksi pyrittiin symmetriaan kääntämällä joka toinen kuvio toisin päin, jotta juotuskoneen poikittaissuunnassa tapahtuvia vaihteluita voitaisiin havaita. Kuvio esiintyy myös kulkusuunnassa (VA – VC). Silloin sen toiminta muistuttaa IC-piirien viimeisten jalkojen kuviota. Kahden viimeisen jalan väliin on taipumus muodostua oikosulku, joten piirilevyn ylimääräinen pinta täytettiin IC-piirien liitosalueita muistuttavilla kuvioilla.

Kortin koko valittiin siten, että piirilevytehtaan vakio työaihio saataisiin mahdollisimman täyteen ja siten hinta mahdollisimman alhaiseksi. Kortti suunniteltiin Autocad-ohjelmistolla, jolla erimittaisten kuvioiden toteuttaminen oli helppoa.



Kuva 13. Juotettu testikortti numero 9.

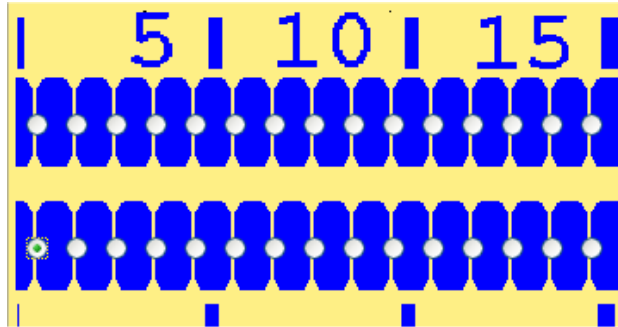
Kuvan 13 esimerkkikortissa on vain neljä oikosulkua, mikä on keskiarvoa paljon pienempi määrä. Oikosulut, kuten kuvassa 14 alhaalla, lasketaan sekä lukumäärältään että raon kokonaisleveydeltään. Jälkimmäisessä tapauksessa lasketaan tinasiltojen matka yhteen, yksikössä μm . Tämä korostaa tilannetta, jossa valmistettavassa piirilevyssä on tiheästi asennettuja komponentteja ja juotosprosessin laaduntuottokyky on äärirajoillaan. Näin testissä annetaan suurempi merkitys vakaville virheille, jossa oikosulku on syntynyt kauempaa toisistaan olevien liitosalueiden väliin.



Kuva 14. On sattunut juotosvirhe. Ohuimmassa, leveydeltään $110 \mu\text{m}$ raossa vasemmalla alhaalla on syntynyt oikosulku. Tämän yläpuolella näkyy levein väli, joka on $600 \mu\text{m}$.

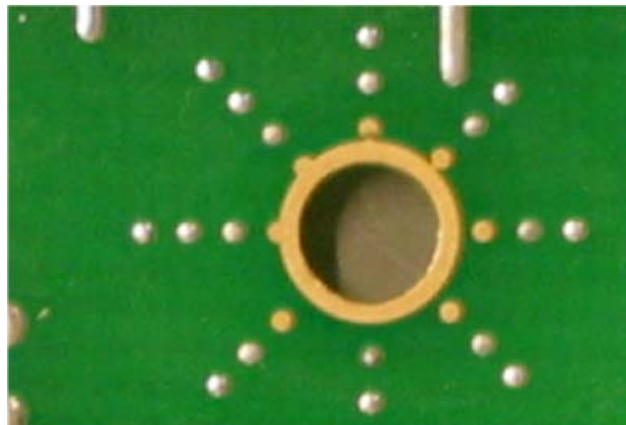
Tietojen keräämisen helpottamiseksi tehtiin keskitetty tietokantajärjestelmä, jonka avulla tutkimuksien tekemiseen tarvitaan vain internetiselain. Ohjelmistoa esitellään luvussa 3.4.

Tietojen siirto tietokantaan tapahtuu graafisen www-käyttöliittymän kautta klikkaamalla oikosulussa olevaa kohtaa. Kuva 15 osoittaa käyttöliittymän vastaavaa kohtaa kuin kuva 14. Numeroiden tarkoitus on helpottaa oikosulkujen paikantamista.



Kuva 15. Graafinen käyttöliittymä muistuttaa testikorttia.

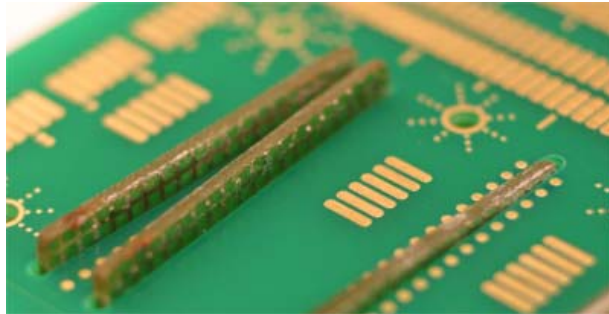
Testikortissa on erilaisia katveja aiheuttavia esteitä. Sellaisia voidaan suunnitella vapaasti, kunhan niiden korkeus ei ylitä 5 mm:ä. Kortissa on käytetty ruostumattomia M3 kuusiokoloruuveja, joiden kannat aiheuttavat katveja. Kuvassa 16 voidaan havaita kostumattomia täpliä, jotka ovat syntyneet ruuvien kannan katveessa. Testituloksena lasketaan kostumattomien täplien lukumäärä ja syötetään luku tietokantaan.



Kuva 16. Puuttuvien juotosten määrä ruuvien kannan katveessa.

Lisäksi testilevyssä on hahloja, joihin asennetaan piirilevystä tehtyjä 5 mm:n korkuisia seiniä, kuten esimerkiksi kuvassa 17. Näitä ei käytetty kaikissa testiajoissa, koska syy

juotosten puuttumiseen on eri kuin oikosulkujen muodostumiseen ja lisäksi niiden tuennan kanssa oli ongelmia. Tuki vääntyi toistuvasta lämpökäsittelystä johtuen.

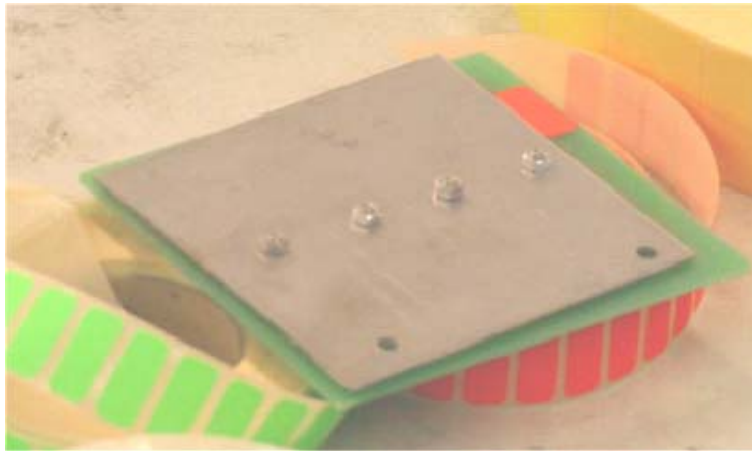


Kuva 17. Katveja saavat aikaan 5 mm:n seinät.

Katveiden avulla mitataan juotosprosessin kykyä kastaa kaikkia liitosalueita. Paremman kaston aikaansaamiseksi voidaan käyttää toista, ns. chip-aaltoa. Chip-aalto on pyörteinen ylimääräinen aalto, joka valuu vastakkaiseen suuntaan katvealueisiin yltämiseksi. Testeissä tapahtui melko harvoin, että liitosalueita jäi kastamatta. Tämän takia Yritys A:ssa suoritetuissa testeissä on käytetty vain neljää ruuvia asian mittaamiseksi, koska katveista ei ole odotettavissa kovin hyödyllistä informaatiota. Tilanne olisi toinen, jos ei käytettäisi chip-aaltoa. Silloin juotuskoneen ominaisuus jättää liitosalueita juottumatta tulisi paremmin esille. Koska kahdella aallolla on lisäksi yhteisvaikutuksena kokonaislämpökuorma, tekisi chip-aallon poiskytkeminen testistä epärealistisen.

3.3 Erikokoisten komponenttien huomioiminen

Testilevy soveltuu tarkoitukseensa hyvin, vaikka se ei sisällä lämpöä absorboivia komponentteja. Jotta testitulokset olisivat mahdollisimman helposti siirrettävissä tyypilliseen tuotantoprosessiin, levyllä tehtiin ylimääräinen lämpökuorma. Tähän tarkoitukseen 1 mm paksu ruostumaton ohutlevy osoittautui sopivaksi. Kuvan 18 esittämän lämpökuorman vaikutus tuloksiin vastaa aikaisempien testien mukaan korttia, johon on läpiladottu tiheästi IC-piirejä. Ruostumaton teräs sisältää nikkeliä, joka toimii diffuusion estona. Muu materiaali, kuten esimerkiksi alumiini, olisi voinut olla tuhoisa juotteelle osuessaan siihen.



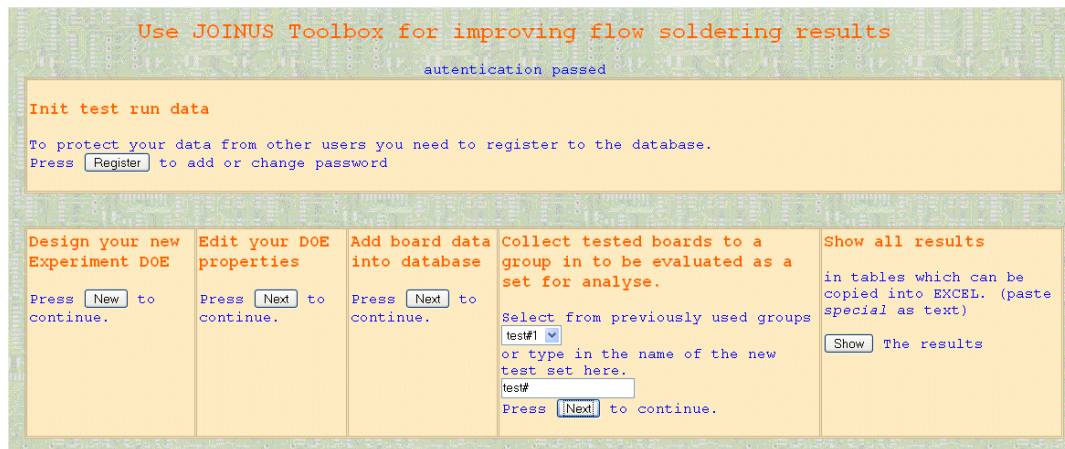
Kuva 18 Tähän korttiin on lämpökuormaksi asennettu ruostumaton ohutlevy hyödyntäen ruuveja, joilla mitataan katvealueen vaikutusta.

Testausrutiinin kehityttyä, käytettiin metallilevyjä vain tapauksissa, joissa tutkittiin, kuinka pieni lämpömäärä vielä riittää tyydyttävään saantoon. Maksimilämpömäärää haettaessa metallilevy saa aikaiseksi vain kohennetun lämmönkeston, eikä testi anna lisäinformaatiota.

3.4 Tietokantaohjelmisto

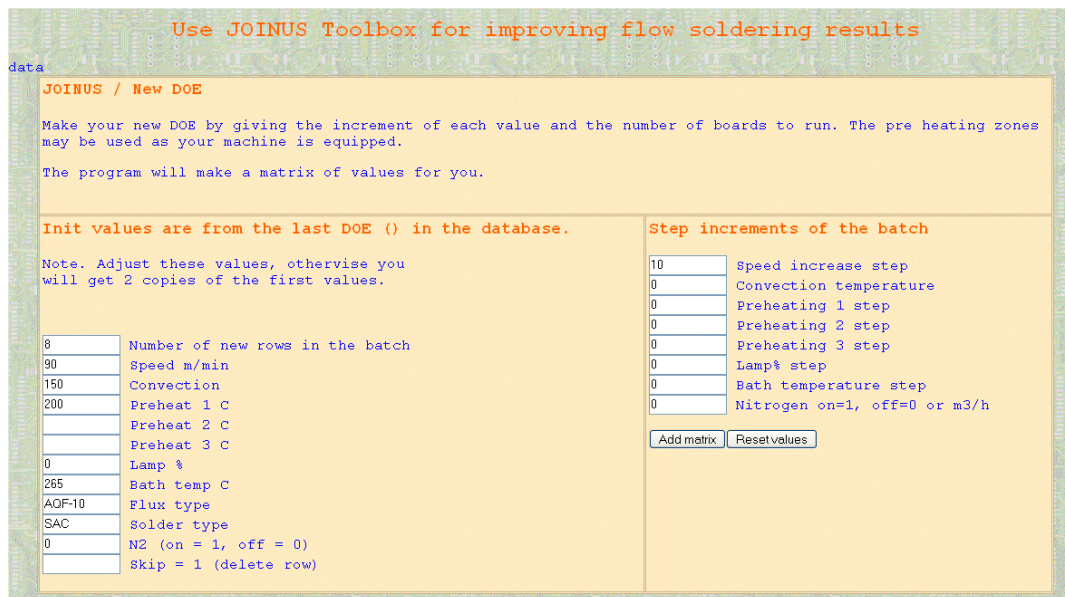
Vikatietojen lukemisen helpottamiseksi laadittiin ohjelmisto [P2], jonka graafinen käyttöliittymä on ulkonäöltään mahdollisimman lähellä testikorttia. Virheiden merkitseminen tapahtuu, kuten kuvissa 15 ja 25, klikkaamalla kuvioita. Ohjelma laskee virheiden määrän ja raon yhteislevyden. Ohjelmisto toimii verkossa. Se on tietokantapohjainen ja löytyy osoitteesta <http://elektroniikka.turkuamk.fi/joinus>. Kaikkien projektiin osallistuneiden yritysten tulisi pystyä käyttämään sitä mahdollisimman helposti. Yrityskohtainen testidata voidaan suojata salasanalla. Yrityksillä on mahdollisuus hankkia myös testilevyjä omaan käyttöön.

Ohjelmiston pääkohdat käsitellään seuraavaksi kuvan 19 mukaan vasemmalta oikealle.



Kuva 19. JOINUS Toolbox -ohjelmiston päävalikko [24].

Ohjelmisto tukee testaussekvenssien ja suunnitelmien (engl. Design of Experiments, DoE) luontia. Voidaan helposti tehdä esimerkiksi testisarja, jossa kuljettimen nopeutta lisätään tietty määrä jokaiselle kortille antamalla sarjan pituus ja muutoksen määrä askelta kohti. Kuvan 20 oikeassa sarakkeessa määritellään, paljonko vasemman sarakkeen arvoa kasvatetaan testiä kohden.



Kuva 20. Testisarjan luonti [24].

Seuraavassa toiminnossa voidaan tarkistaa ja muuttaa arvoja testisarjassa. Esimerkiksi Minitab-ohjelman [25] antama testaussekvenssi voidaan syöttää käyttöliittymään, kuten kuvassa 21 näkyy. Tässä esimerkissä on kyseessä ortogonaalinen matriisi L8, jossa on neljä muuttujaa. Yhtälöryhmän ratkaisu edellyttää, että on yhtä monta yhtälöä kuin

tekijöitä. Testien määrä on silloin tekijöiden määrän neliö. Suunnittelemalla yhtälöryhmät ortogonaalisen matriisin mukaan, jonka transpoosi on sen käänteismatriisi $Q^T Q = Q Q^T = I$, voidaan vähentää testattavien muuttujien arvoja. Tuloksena on lyhennetty testisekvenssi. Ortogonaalimatriiseja on vain rajattu määrä, joten testin lähtökohta on sopivan matriisin etsiminen [26, s.8].

Use JOINUS Toolbox for improving flow soldering results

Update DOE values

To remove a line, mark skip = 1 and update. White background = No boards linked to this number.
Operator = teku080311

Board picture

DOE	Speed	Convection	PreHeat1	PreHeat2	PreHeat3	Lamp%	Bath C	Flux	Solder	N2-1	Skip=1	Change
437	100	230	0	0	0	0	250	Cobar385C	SAC	0	0	Update
436	80	170	0	0	0	0	265	AQF-10	SAC	0	0	Update
435	100	230	0	0	0	0	265	AQF-10	SAC	0	0	Update
434	80	230	0	0	0	0	250	AQF-10	SAC	0	0	Update
433	100	170	0	0	0	0	265	Cobar385C	SAC	0	0	Update
432	80	230	0	0	0	0	265	Cobar385C	SAC	0	0	Update
431	100	170	0	0	0	0	250	AQF-10	SAC	0	0	Update
430	80	170	0	0	0	0	250	Cobar385C	SAC	0	0	Update

Kuva 21. Asetusarvojen tarkennus [24].

Tämän jälkeen voidaan syöttää piirilevyjen tiedot tietokantaan kuvien 22 ja 23 mukaan. Piirilevyiltä löydetyt oikosulut merkitään vastaaviin kohtiin käyttöliittymässä. Vastaavan paikan löytämisestä on helpotettu numeroin ja palkein. Ohjelma laskee sekä virheiden lukumäärät että oikosulkujen matkat yhteen.

Mark the horizontal bridges at the center of the testboard.
The numbers are HA 1-45, HB 1-45, HC 1-45, HD 1-45

5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 |

Submit Reset

Kuva 22. Oikosulkujen HA-HD-syöttö [24].

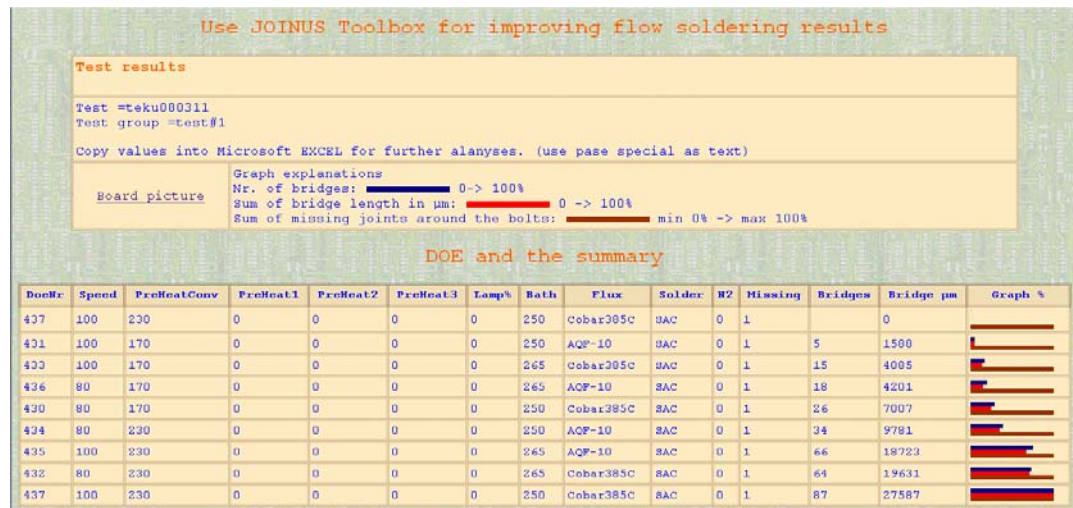
Ohjelmiston käyttöliittymä suunniteltiin graafisesti muistuttamaan testilevyä mahdollisimman tarkasti. Tavoitteena oli, että ohjelmisto helpottaisi ja nopeuttaisi tietojen syöttöä. Oikosulkuvirheet merkitään kirjaamalla vastaavia kohtia lomakkeessa, kuten kuvassa 22 näkyy. Kostumattomat liitosalueet merkitään vain lukumäärältään kuvan 23 mukaan. Näiden virheiden lisäksi voidaan kuvata vapaamuotoisesti levyn ulkonäköä, kuten kostumattomien liitosalueiden, harson tai juotepiikkien esiintymistä.

The screenshot shows a software interface with a yellow background. At the top, there are three input fields labeled 'Slot1 0', 'Slot2 0', and 'Slot3 0'. Below these is a central instruction: 'Mark the number of non-wetted dots around the bolt heads outside the circle.' Underneath this instruction is the label 'Bolt 1-6'. The main area contains a 2x4 grid of diagrams, each showing a bolt head with a central circle and surrounding dots. Below each diagram is an input field labeled 'Bolt1 0' through 'Bolt6 0'. At the bottom of the grid is a large white text area with the instruction 'Enter Notes to describe the problems.' Below the text area are two buttons: 'Submit' and 'Reset'.

Kuva 23. Kostumattomien liitosalueiden määrän syöttö [24].

Kun levyn tiedot liitetään testisuunnitelmaan syötön yhteydessä, voidaan helposti jäljittää asetuksia ja tuloksia. Yhteen suunnitelmaan voidaan liittää useamman levyn tietoja, jos esimerkiksi halutaan tutkia juotosten hajontaa tietyllä asetusarvolla.

Ohjelmistoon lisättiin yksinkertainen analyysityökalu, johon voidaan koota tiettyjen levyjen tietoja ja esittää tiedot yksinkertaisella graafisella toiminnolla. HTML-ohjelmointikielessä ei ole helppokäyttöisiä työkaluja graafisten käyrien esittämiseksi, joten tässä tapauksessa jouduttiin käyttämään palkkiformaattia. Esimerkkitestissä (kuva 24) suoritettiin Taguchin L8-optimointi, jossa etsitään neljän muuttujan parasta yhdistelmää 8 testin avulla [P5],[8]. Ohjelmisto ei tue tulosten tulkintaa, vaan jatkokäsittely tapahtuu esimerkiksi Excelissä [27] tai Minitab [25] ohjelmassa.

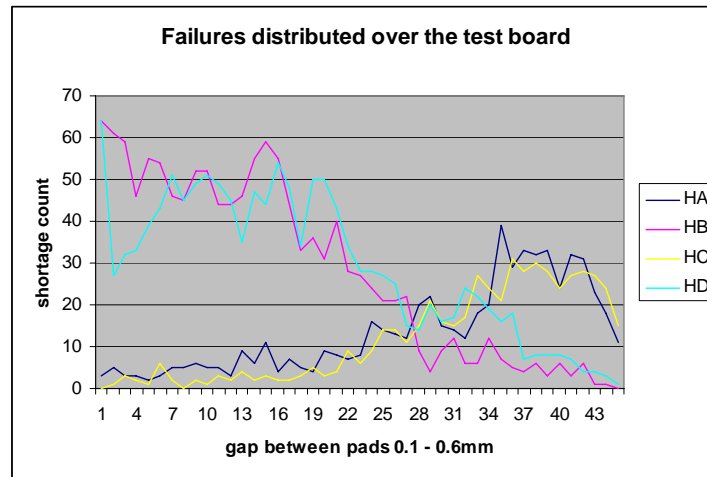


Kuva 24. Esimerkki yksinkertaisesta graafisesta esityksestä. [24]

Viimeisessä osassa esitetään kaikki testin tulokset kopioitavaksi muihin analyysiohjelmiin. Tulokset on jaettu kolmeen osaan, koska Microsoftin Excel [27] ei pysty käsittelemään enempää kuin 256 saraketta kerralla. Tuloksissa on valmiiksi lasketut summat sekä lukumäärän että oikosulun pituuden osalta.

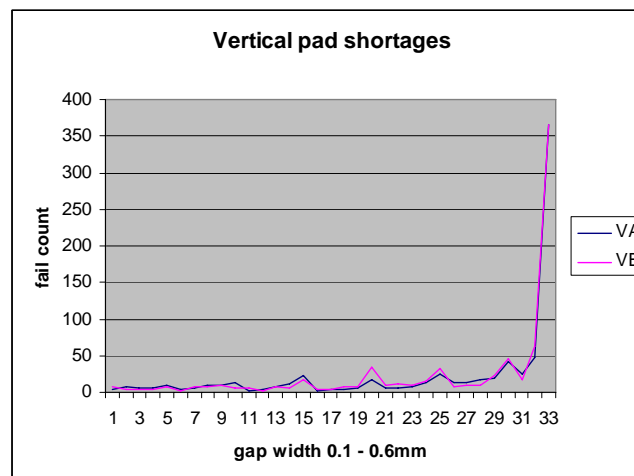
3.5 Testikortin testaus

Testikortin tavoitteena oli saada aikaiseksi mahdollisimman suuri dynamiikka, jossa hyvin juotettu kortti sisältää vähintään yhden virheellisen juotoksen ja huonosti juotettu sisältää vähintään yhden virheettömän juotoksen. Kuvassa 25 on testikuvioiden HA-HD todennäköisyys saada oikosulku. Jakaumassa on käytetty kaikki tietokannassa esiintyneet kortit juotettuina erilaisilla asetuksilla. HA- ja HC-alueiden kohdalla liitosalueiden välinen rako kasvaa vasemmalta oikealle ja HB sekä HD-alue päinvastoin. Ainoastaan HD:n kohdalla on näkyvissä trendi, että testilevyn pinnassa on kohta, joka juottuu erityisen hyvin.



Kuva 25. Testikortin virheiden määrä horisontaalisilla liitosalueryhmillä niiden välisen raon leveyden funktiona.[P4]

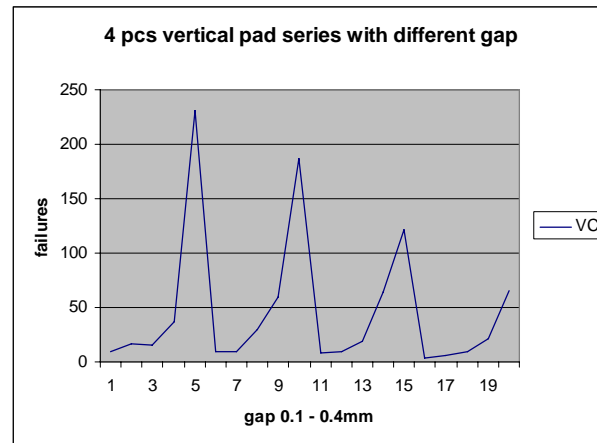
Kuva 26 osoittaa, että vertikaalisesti asetettujen ryhmien osalta esiintyy tilastossa viimeisten liitosalueiden kohdalla suurin osa virheistä mikä johtuu juotosprosessin perusominaisuudesta muodostaa oikosulku kahden viimeisen liitosalueen väliin. Siksi käytetään ylimääräistä liitosaluetta ottamaan juotepisara.



Kuva 26. Vertikaalisten ryhmien vikaantuminen.

Piirilevyn jäljelle jääneelle vapaalle tilalle on sijoitettu neljä itsenäistä liitosalueyhmää, jotka käytännössä simuloivat IC-piirien juottamista. Tietokannassa liitosalueet on numeroitu peräkkäisiksi. Kunkin sarjan viimeiset kaksi liitosaluetta muodostavat kuvassa 27 näkyvät säännölliset piikit. Täpläryhmät poikkeavat toisistaan niiden

välisen rakojen mukaan. Tästä seuraa kuvasta 27 havaittava laskeva trendi virhemäärässä.



Kuva 27. Lyhyiksi vertikaaliryhmiksi muotoiltujen liitosalueyhmien tulokset. Piikit syntyvät siitä, kun liitosaluesarjasta kaksi viimeistä liitosaluetta juottuvat helposti yhteen.

Testikortti osoittautui onnistuneeksi. Siitä tuli hyvin edullinen, koska piirilevytehtaan käyttämän aihion koko otettiin huomioon. Täten valmistuksessa jää mahdollisimman vähän pois leikattavia reunoja aihiossa. Myös piirilevyn valmistusvaiheet minimoitiin. Valmistuksessa esiintyi ongelma, että ohuimmissa väleissä nikkelillä oli taipumus kiinnittyä suoraan piirilevyn pintaan. Valmistaja ratkaisi ongelman suojapinnoitteella.

4 TESTIJÄRJESTELYT ERI YRITYKSISSÄ

JOINUS-projektin puitteissa oli sovittu, että tutkijat voivat suorittaa tarpeelliset testit osallistuvien yritysten juotoskoneilla, kunhan eivät häiritse tuotantotoimintaa. Käytännössä löytyi helposti sopiva aika, useimmiten iltapäivisin siitä alkaen, kun jo klo 06.00 aamulla aloittaneet työntekijät olivat lähteneet, mutta toimistossa oltiin vielä paikalla. Usein jouduttiin säätämään lämpötilat tietyille tuotteelle sopiviksi kesken sarjan ja odottamaan, kunnes lämpötilat olivat palautuneet testeihin sopiviksi.

4.1 Testaussuunnitelman lähtökohdat

Periaatteessa optimoinnin voisi suorittaa juottamalla kaikilla eri asetusarvojen kombinaatioilla ja valita yhdistelmä, joka tuottaa parhaan lopputuloksen. Alkuperäisenä tavoitteena oli tehdä koesuunnitelma, joka sisältäisi tilastomatemaattisten menetelmien antamien mahdollisuuksien mukaan minimimäärän testikortteja juotettavaksi. Työ aloitettiin haarukoimalla koko toiminta-alue. Taulukko 1 esittää osaa käytetystä koesuunnitelmasta [28], jossa valitaan systemaattisesti kombinaatio erilaisia parametreja, joita halutaan tutkia.

Taulukko 1. Ote koesuunnitelmasta [28].

1	Nämä kortit ajetaan ennen tyyppien käyttöönottoa.						
2	Tyyppi päällä / pois						
3	Suure	Levy#	Nopeus	Esilämpö	Lämpö koneessa	Fluksin tyyppi	Kaasu
4	Alkuarvo						
5	mittaa esilämpökäyrä	1	70	70-290-290-10	40,7	IF2005C	
6		2	80		40,4	IF2005C	
7		3	90		48,5	IF2005C	
8		4	100		48,7	IF2005C	
9		5	110		49,0	IF2005C	
10		6	120		50,1	IF2005C	
11	mittaa esilämpökäyrä	7	70	85-310-310-10	52,4	IF2005C	
12		8	80		52,5	IF2005C	
13		9	90		52,3	IF2005C	
14		10	100		52,3	IF2005C	
15		11	110		52,6	IF2005C	
16		12	120		52,4	IF2005C	
17	mittaa esilämpökäyrä	13	70	100-330-330-10	45,4	IF2005C	
18		14	80		46,5	IF2005C	
19		15	90		45,4	IF2005C	

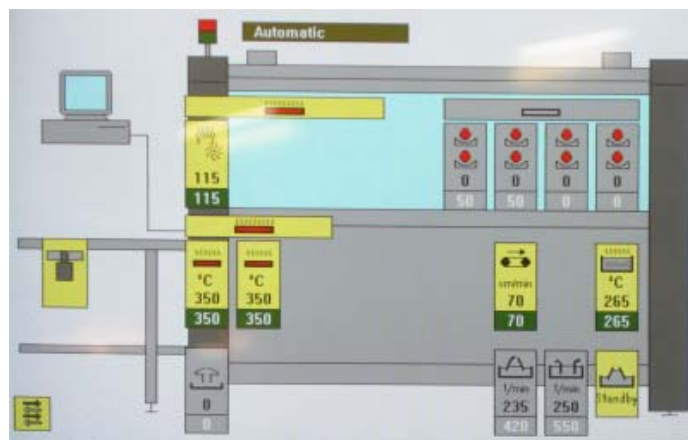
Testisuunnitelman edetessä merkittiin myös juotoskoneen sisällä oleva lämpötila, jokaiselle lämmitysyhdistelmälle lämpöprofiili sekä käytetyn paineilman kastepiste/kosteus. Oletettiin, että käytössä olevat prosessin asetusarvot eivät voisi olla kovin kaukana parhaista mahdollisista. Näin olettaen suoritettiin testiajoja muuttamalla parametreja, kunnes tulokset selkeästi huonontuivat. Ensimmäiset mittaustulokset osoittautuivat kuitenkin hyvin epäluotettaviksi. Tulokset eivät parantuneet tai huonon-

tuneet odotetulla tavalla parametreja muuttamalla. Tuloksissa havaittiin siis suuri kohinataso. Lisäksi havaittiin, että samoilla arvoilla voi saada erilaisia tuloksia eri aikaan. Käyttäytyminen osoittautui lisäksi stokastiseksi. Maanantaita pidettiin huonona juotospäivänä. Riippumatta juotuskoneen huolloista saatiin maanantaisin aina huonommat tulokset kuin muina päivinä. Koska juote on jähmeänä viikonlopun yli, alettiin epäillä mahdollista kiderakenteen muutosta. Tätä ilmiötä ei ollut huomattu pelkästään Yritys A:ssa, vaan se oli todettu yleiseksi ongelmaksi. Tästä syystä muuallakin kuin Yritys A:ssa oli tapana pitää juotuskone lämpimänä myös sunnuntaisin, jotta se ei tekisi virheitä viikon ensimmäisenä lämpimänä pidettävänä päivänä. Juotosprosessin optimoinniksi oli aikaisemmin toteutettu useita vastaavia testisarjoja huonoin tuloksin. Prosesseja oli yritetty optimoida sekä Taguchi- että keskus- pistemenetelmällä, [P3],[8],[26],[28–29]. Molemmissa menetelmissä tuloksena oli, että prosessin hajonta on suuri. Lisäksi tarvittaisiin suuri määrä testejä pitkältä ajalta, jotta mittaustulokset voitaisiin keskiarvoistamalla saada näyttämään riittävän oikeilta menetelmän hyödyntämiseksi. Tulokset osoittivat, että ongelman aiheuttaja on jokin muu kuin käytetyt muuttujat [P5].

4.2 Juotuskoneen säätäminen

Yritys A:ssa käytetty juotuskone on tyyppiä ERSA EWS350, ja sen lämpö- ja nopeusasetukset suoritetaan erillisellä PC-tietokoneella. Kyseisessä yrityksessä on ollut tapana asettaa eri parametreja jokaiselle juotettavalle tuotetyypille yksilöllisesti.

Juotuskoneen käyttöliittymän mukaan, juotuskone oli kalustettu yhdellä kuumailmapuhallus- eli konvektioyksiköllä (kuvassa 28 lukema 115 °C vasemmalla) sekä kahdella infrapunalämmitinyksiköllä (kuvassa 28 lukemat 350 °C alhaalla vasemmalla). Lisäksi se oli varustettu infrapunalampuilla, joiden tarkoitus oli lämmittää piirilevyn pintaa ennen osumista juoteaaltoon. Näiden tehon määrä asetetaan prosenttiluvulla. Esimerkiksi 50 % tarkoittaa, että lamppu on puolet ajasta valaistuna noin 0,1 s pulsseissa. Lamppujen tehoa voidaan säätää nopeasti. Yleensä tehdään tuotekohtaiset asetukset lamppujen avulla sen mukaan, kuinka paljon tuotteen komponentit absorboivat lämpöä. Taulukossa 1 esimerkiksi 70-290-290-10 tarkoittaa, että konvektion lämpötila on 70 °C, molemmat IR-yksiköt 290 °C ja IR-lamput välkkyvät siten, että ne valaisevat 10 % ajasta.



Kuva 28. Juotuskoneen käyttöliittymä.

Esilämmityksen säätö perustuu siihen, että fluksista pitää haihduttaa liuotin. Mikäli käytetään vesipohjaista fluksia, tarvitaan kuivattamiseen enemmän lämpöä. Kun perustyypin fluksin liuottimet ovat haihtuneet, kiinteä aines, joka yleensä on hartsia sulaa liuottimien haihduttua, noin 70–90 °C lämmöstä alkaen, jolloin siitä eriytyvät hapot puhdistivat juotettavat pinnat oksideista [17]. Tämän tehtävän lisäksi pintaliitoskomponentteja esilämmitetään siten, että niiden lämpötila olisi korkeintaan noin 100 °C alle juoteaallon lämpötilan. Näin voidaan pienentää lämpösokkia. Lisäksi pitää ottaa huomioon piirilevyn alle suihkutetun fluksin lämmönkesto, joka vaihtelee tuotetyypeittäin.

Fluksi vaikuttaa juotosprosessin loppuun saakka. Komponenttien kostuminen riippuu siitä, kuinka hyvin hapot ovat onnistuneet puhdistamaan pintoja. Puhtaus vaikuttaa kostumisnopeuteen. Kun esilämmitys aika on paikallisesti jäänyt lyhyeksi, esimerkiksi jos piirilevyssä on koloja, joihin kerääntyy paljon fluksia, piirilevy ei ole vielä valmis juotukseen. Tietyt kohdat ovat runsaan haihduttamistarpeen johdosta liian kylmät ja puhdistusprosessi ei pääse käyntiin ajoissa. Fluksi vaikuttaa vielä juotosvaiheen loppuosassa. Jos fluksia on ollut sopivasti, muovautuvat juotosliitokset pyöreälinjaisiksi (suuri pintajännitys). Jos fluksia on ollut liian vähän tai jos se on saanut liikaa lämpöä, juotoksista tulee harsomaisia tai piikkimäisiä (pieni pintajännitys) [17]. Liika lämpö vaikuttaa olevan kokonaisuus, jossa esilämmityksellä, juotosaallon lämpötilalla ja kontaktiajalla on yhteisvaikutus.

Suurin ratkaistava ongelma on saada sekä pienille että suurille komponenteille sopiva määrä lämpöä ja nopea kuivuminen. Infrapunalämmittäjien säteily heijastuu takaisin

metallisista pinnoista, ja merkittävä määrä lämmöstä kohdistuu mustiin pintaliitoskomponentteihin, mikä kasvattaa lämpötilaeroa jo muuten pienten komponenttien haitaksi. Tehokkain esilämmitys saadaan aikaiseksi pakotetulla konvektiolla, missä lisäksi ilman virtaus kiihdyttää haihtumista [19].

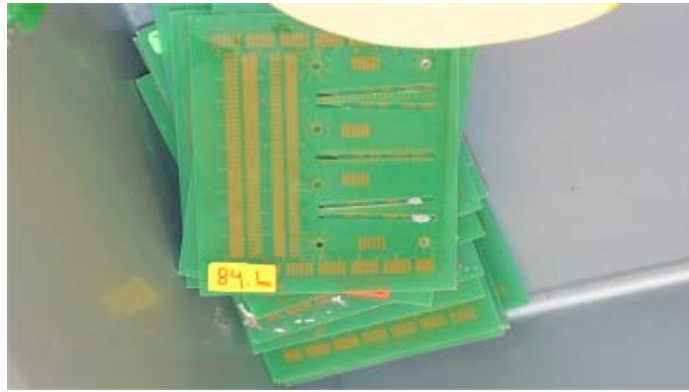
Juotospadan lämpötilaa ei ole tapana säätää sen jälkeen, kun prosessi on saatu kuntoon. Lämpötilan tulee olla 250 °C:n ja 280 °C:n välissä. Liian pieni lämpötila tuottaa paljon puuttuvia juotoksia sekä oikosulkuja. Liian suuri lämpötila rasittaa komponentteja, kasvattaa kuonan syntymisvauhtia ja ylikuumentaa fluksia, joka ”palaa” aiheuttaen juotospiikkejä ja oikosulkuja [17].

Kuljetinnopeus vaikuttaa kaikkiin muihin säätöihin. Kun nopeus kasvaa, piirikortti jää kylmemmäksi oltuaan lyhyemmän aikaa esilämmityksessä. Juotuskohdan uintinopeus aallon liikkeeseen nähden muuttuu, kuten myös uintiaika. Kuljettimen nopeuden säädöllä saadaan aikaan nopea kokonaislämpömäärän muutos juotosprosessissa, koska sekä esilämmitysaika että kontaktiaika muuttuvat samansuuntaisesti. Kuljetinnopeuden säädön vaikutus esilämmityksen säätöön on esimerkki parametrien yhdysvaikutuksesta.

4.3 Testauksen toteuttaminen

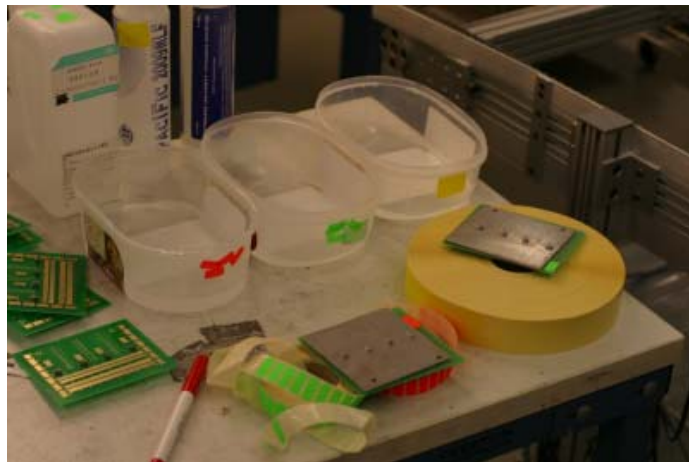
Testin päätavoite oli löytää kombinaatio erilaisista säädöistä, joilla saavutettaisiin paras mahdollinen juotostulos. Odotuksena oli, että yhdistelmä löydetäisiin helposti ja ongelma olisi ratkaistu. Testaamisen alussa ei ollut tietoa kokeensuunnittelusta, eikä myöskään tilastomatemaattisten menetelmien mahdollisuuksista. Testikortteja oli kokeiltu jo aikaisemmin, joten odotettiin, että tulokset saataisiin melko nopeasti. Vasta testauksen edetessä perehdyttiin koesuunnitteluun ja Minitab-ohjelmistoon [25].

Kokemuksen mukaan kortit merkittiin ennen juotosta koesuunnitelman indeksinumerolla (Kuvat 29 ja 30), koska kiireessä ne sekaantuivat helposti. Tarran väri kertoi käytetyn fluksin tyypin. Kirjain L tarkoittaa, että siihen on kiinnitetty lämpökuorma, joka on 1 mm paksu ruostumaton pelti. Kuvassa 34 on esimerkki, jossa piirilevyt ylittävät juoteaallon.



Kuva 29. Kortit numeroitiin koesuunnitelman mukaan.

Piirilevy upotettiin astiaan siten, että alapinta kostui kokonaan. Eri fluksit merkittiin värillisillä etiketeillä toimituspakkauksella, astialla ja piirilevyllä, kuten kuvassa 30. Kuvassa 30 on kaksi lämpökuormalla varustettua testilevyä valmiina juotokseen. Fluksaus suoritettiin käsin upottamalla, jotta eri nesteet eivät sekoittuisi keskenään. Fluksin vaihtaminen juotokoneeseen olisi kestänyt liian kauan. Ongelmana on tietenkin, että fluksin määrää ei voida säätää. Käytetyllä menetelmällä varmistettiin, että piirilevyyn tarttui aina sama määrä fluksia.



Kuva 30. Käytetyssä fluksaustavassa kastettiin levyjen alapuoli nesteeseen.

Menetelmällä pystyttiin nopeasti vaihtamaan fluksista toiseen ja samalla kerralla saatiin yhtä aikaa jopa 2–4 eri fluksia mukaan samaan juotostapahtumaan, kuten voidaan erottaa kuvan 31 näkyvässä tapauksessa, jossa juotetaan samanaikaisesti kolmella eri fluksilla. Testissä ei ole otettu huomioon mahdollisia fluksien yhteisvaikutuksia. Fluksi saattaa jättää aallon pinnalle kemikaaleja, jotka vaikuttavat seuraavan levyn

juottamisen. Yleinen käsitys on [30], että pienen määrän fluksin kaataminen aallon pinnalle parantaa juotoslaatua.



Kuva 31. Kolme korttia on valmiina menossa juotuskoneeseen, jossa jokaisessa on eri fluksi.

Levyt juotettiin heti kun juotuskone oli saavuttanut tavoitelämpötilat, kuten kuvissa 32 ja 33. Usein testiajot keskeytyivät siihen, että samalla juotuskoneella juotettiin myös yrityksen omia tuotteita eri asetuksilla.

Juotuskoneen asetuksia voitiin muuttaa ohjelmallisesti hyvin nopeasti. Ohjelmisto piti huolta siitä, että jokainen kortti sai ohjelman mukaiset ajoparametrit. Erotin pidatti juotoskehikkoa siihen asti, että lämpötilat olivat spesifikaatioiden mukaiset. Esilämpöä saatiin nopeasti muutettua ylöspäin, mutta alaspäin säädettäessä joutui odottamaan 10–30 minuuttia. Juotospadan lämpötilan säätäminen oli aina hidasta. Tyypillisesti saatiin odottaa noin puoli tuntia. Tästä johtuen pyrittiin laatimaan koesuunnitelmaa siten, että juotospadan lämpötila vaihtuisi mahdollisimman harvoin.

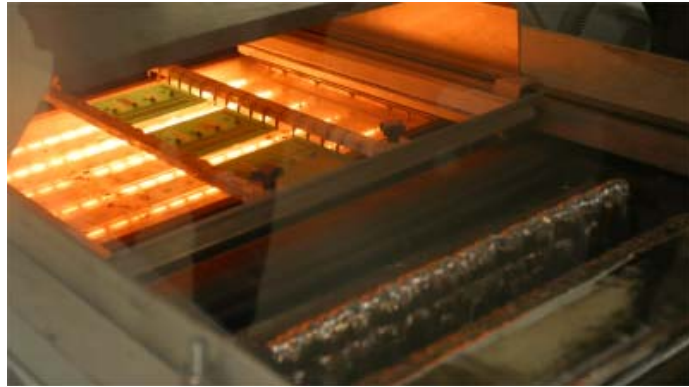
Esilämmitysmäärä valittiin tyypillisen hyväksi todetun juotoslämpötilan mukaan. Juotuskoneen eri lämmittimiä voidaan säätää erikseen, mutta jos mahdollisista asetuksista valitaan koesuunnitelmaan monen parametrin yhdistelmä, kokeiden määrä kaksinkertaistuu jokaisen lisäparametrin myötä. Toki voidaan valita sellainen koesuunnitelman tyyppi, jossa kokeiden määrää voidaan supistaa asetusten yhdysvaikutusten havaitsemisen kustannuksella.

Käytetyn koesuunnitelman strategia oli ensin suorittaa pieni koemäärä ja kasvattaa otosmäärää saatujen tulosten perusteella laajentaen vaihtoehtomäärää tarpeen mukaan.

Esilämmitystä koneessa oli kolme erilaista. Kuumailmapuhallus, jota kutsutaan konvektioksi. Tämän eduiksi voidaan katsoa sen tehokkuus komponenttien lämmityksessä, koska ilmapuhalluksen nopeus vaikuttaa juotettavien komponenttien lämmönnoitusnopeuteen [19]. Vastaavasti mitä kovemmin puhalletaan, sitä pienempi lämpötila riittää. Puhaltamalla kovemmin, mutta pienemmällä lämmöllä, voidaan säästää komponentteja ja kuivuvaa fluksia liiallisesta kuumuudesta. Fluksin liuottimien on tarkoitus kuivua mahdollisimman nopeasti ja täydellisesti esilämmityksen alkuvaiheessa. Konvektiolämmityksen etu on, että neste haihtuu siinä nopeammin mitä suurempi puhallusnopeus on. Näiden ominaisuuksien perusteella voidaan arvioida, että konvektiolämmitin sopii parhaiten aaltojuotosmenetelmälle [19].

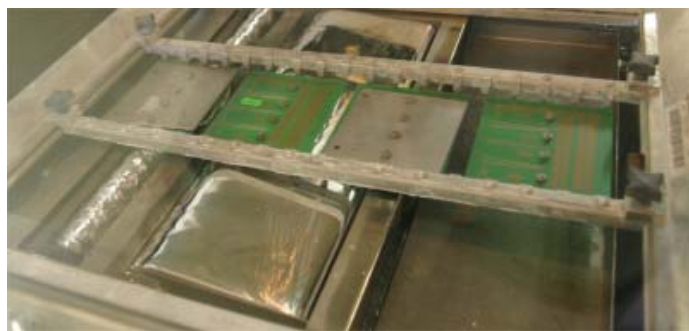
Lisäksi juotuskoneessa oli infrapunaesilämmittimiä. Niitä ei erota kuvista, koska niiden yläpuolelle oli lisätty kansi, jotta komponentit lämpenisivät enemmän piirilevyn yläpuolella. Tuotteissa oli usein kuparisia jäähdytysprofiileja ja paksusta kuparilangasta käämittyjä kuristimia, joiden piirilevyn läpi kulkevaa paksua jalkaa pitkin esilämmitysenergiaa karkaa piirilevyn yläpuolelle, josta seuraa että fluksin lämpökäsittely jää kesken aiheuttaen juotosvirheitä. Lämmityksen tyyppi on pitkäaaltoinen infrapuna. Tämä soveltuu sinänsä hyvin elektroniikkarakenteen lämmittämiseen koska sen energia leviää tasaisesti erilaisiin pintoihin eikä selkeästi heijastu kiiltävistä liitospinnoista. Ongelmana pitkäaaltoisella infrapunalla on sen tehokkuus. Lämpöenergian siirtyminen määräytyy Planckin [31] lain mukaan säteilijän ja kohteen välisestä lämpötilaerosta. Pitkäaaltoisen infrapunasäteilijän lämpötila on suuruusluokaltaan 300 °C ja tavoitelämpötila on noin 150 °C.

Juotuskoneessa on myös infrapunalamppuja (kuva 33). Niiden tarkoitus on pääosin lämmittää komponentteja ja piirilevyn pintaa lämpöshokin pienentämiseksi. Kvartsilamput palavat vain piirilevyn kulkiessa niiden yli. Tehoa säädetään sykäyksissä noin kymmenen kertaa sekunnissa. Tehon säätö tapahtuu pulssin pituutta muuttamalla. Kaikissa testissä Yritys A:ssa pidettiin lamppujen tehoa 10 %:ssa kokonaistehosta.



Kuva 32. Kortit ovat esilämmityksen viimeisessä osassa, jossa on infrapunalamppuja. Edessä näkyy chip-aalto.

Aallon säätöihin testissä ei tehty muutoksia. Säädöt oli tehty luvussa 2.3 esitetyn kuvauksen mukaisesti. Kuvassa 33 voidaan havaita, että aalto valuu yli reunan myös kulkusuunnassa. Valutus pyritään säätämään siten, että aallon pinta kulkee juotettavan piirilevyn tahdissa. Pinnan kulkunopeutta voidaan lisätä laskemalla oikean reunan kynnystä tai valitsemalla kapeampi aallonrakenne, jossa kynnys on lähempänä pistettä, jossa piirilevy nousee aallosta. Kuvan 33 aalto on varustettu suojakaasulaitteistolla. Aallon ympäri kulkevan ruostumattoman reunan alla kulkee putkisto, jonka rei'istä typpikaasu puhalletaan. Luvussa 5 käsitellään tarkemmin suojakaasun käyttöä.



Kuva 33. Neljä piirilevyä joissa on kahta eri fluksia kulkee juotosaaltojen yli. Joka toisessa on lämpökuorma kiinnitettynä.

Testien tekeminen onnistuu parhaiten, kun siihen osallistuu useita henkilöitä. Vähiten virheitä tapahtuu, kun yksi henkilö keskittyy asetusarvoihin varmistaen, että ne tulevat koesuunnitelman mukaisiksi.

4.4 Materiaalivalinnat

Testissä haluttiin käyttää sellaisia flukseja ja juotteita, joita on hyvin saatavilla ja jotka ovat jo hyväksi todettuja. Tavoitteena oli oppia säätämään konetta, ei arvioida lukuisia tuotteita.

Interfluksilta valittiin useassa yrityksessä käytössä oleva korkean lämpötilakeston IF2005C ja lisäksi vesipohjainen IF2009-MLM. Multicorelta valittiin täysin uusi fluksi MF200. Lisäksi valittiin aikaisemmassa vertailussa [8] hyvin pärjännyt vesipohjainen AQF-10 Ama-Promilta.

Yritys A:ssa oli juotteena käytössä SAC eli tina-hopea-kupari, mutta se vaihdettiin projektin aikana tina-kupari-nikkeliin nimikkeellä SN100C, koska sen oli väitetty tuottavan parempia tuloksia, muodostavan vähemmän kuonaa ja kuluttavan juotospataa vähemmän. Juotteen vaihtamisella SAC:sta SN100C:ksi ei osoittanut olevan suurempaa merkitystä juottamisessa eikä kuonan muodostamisessa. Sen sijaan havaittiin tulosten paranemista parin ensimmäisen viikon jälkeen. Suurin säästö tässä tapauksessa lienee siinä, että hopeattoman juotteen kilohinta on 5–10 € pienempi.

5 SUOJAKAASUN KÄYTTÖ

Jo pitkään on tiedetty, että suojakaasun käyttäminen parantaa juotostuloksia, mutta yleinen käsitys on ollut, että hyöty on marginaalinen [32]. Juotoksista tulee kiiltävämpiä ja virhemäärä ehkä hieman pienenee suojakaasun käytön myötä. Tutkimuksen alkuvaiheessa ei ollut löytynyt sellaista säätökohtaa juotosprosessissa, jolla virhemääriä olisi saatu merkittävästi vähenemään. Projektin alkaessa ei huomioitu, että kannattaisi testata suojakaasun vaikutusta saantoon. Aihepiiristä on saatu tietopaketteja AGA:lta [12] ja Linde AG:lta [33,34]. Näiden yritysten julkaisuihin nojautuen, päädyttiin myös typpikaasun koekäyttöön [10]. Tutkimuksessa haluttiin verrata eri vaihtoehtoja tuottaa suojakaasua eri puhtausasteella ja miten syöttäminen juotoskoneeseen tapahtuu. Saanto on riippuvainen puhtausasteesta [11]. Lisäksi otetaan taloudellista kantaa arvioimalla säästöjä tinan kulutuksessa.

5.1 Nestemäisen typen käyttäminen

Typen voi joko hankkia valmiina nestemäisenä tai se voidaan tuottaa paineilmasta typpigeneraattorilla. Tietyin edellytyksin voidaan päästä alhaisempaan yksikköhintaan valmistamalla kaasu suodattamalla happi paineilmasta. Paineilman sähkönkulutus on noin 0,5 kWh tuotettu typpikaasukuutiometriä kohti, mutta hankittava laitteisto on melko kallis. Karkea kustannuslaskenta antaa typpigeneraattorille takaisinmaksuajaksi 3–7 vuotta nestetyypen käyttöön verrattuna. Nestetyppi on varma valinta. Se toimitetaan -196 °C :na astiaan, jonka paine pidetään noin 10 barissa.

Typpigeneraattorissa typpikaasu erotetaan ilmasta suodattamalla erikokoiset kaasumolekyylit toisistaan. Menetelmällä on käyttökustannukset puolellaan, mutta kokemuksia saadaan vasta, kun laite on ollut jonkin aikaa käytössä. Epävarmat tekijät ovat seuraavat:

- hankintahinta;
- laitteen oikea mitoitus;
- sääolosuhteiden vaikutus toimintaan;
- paineilman riittävyys ja puhtaus;

- tavoitteellisen jäännöshappiosuuden arvo (0,1 – 1 % vai 0,01 – 0,00001 %); ja
- suodatinaineen vaihtoväli.

Suojakaasun on peitettävä aaltoa aina, kun juote on sulana. Tyypillisesti syötetään juotoshetkellä kaasua suuremmalla virtauksella kuin joutoaikana. Kaasua syötetään 4–5 m³/h:n virtauksella aina juotteen ollessa yli 200 °C sulattamisen ja jäähdyttämisen aikana sekä juottaessa 8–10 m³/h. Tyypigeneraattori osoittautui kuormittavan paineilmakompressoria yllättävän paljon.

Nestemäisen typen käyttö toteutetaan tuomalla kaasu jäähdytettynä nestemäiseksi matalapaineiseen lämpöeristettyyn säiliöön, josta johdetaan lauhduttimessa kaasuuntunutta typpeä putkea pitkin tehtaan sisälle.

Nesteratkaisu on käyttäjän kannalta vaivaton:

- ei ole puhtausongelmia, jäännöshappipitoisuus on lähes nolla;
- jos tuotannon olemassaolo tai volyymi muuttuu, voidaan syöttömäärää tarvittaessa kasvattaa helposti, rajana on lauhduttimen teho;
- yhdestä puhelinnumerosta ratkaisu eri ongelmiin; ja
- se on edullinen kokonaisratkaisu;

Jos on pitkiä käyttökatkoksia, luonnollinen höyrystyminen vaikuttaa kulutukseen. Suuruusluokaltaan 8 kg haihtuu päivässä 3 m³ säiliöllä. Höyrystyminen nostaa painetta säiliössä yli varoventtiilin 20 barin rajan. Erikoisauto tuo –196 °C:n nesteen ja täyttää pihalla olevaan säiliön joko hitaasti omalla paineellaan enimmillään 4 baria tai pumpun avulla muutamassa minuutissa. Omalla paineella täyttäminen edellyttää, että vastapaine päästetään säiliöstä, jolloin merkittävä määrä kaasua karkaa ilmaan. Käytännössä pitää järjestää 64 A:n sähköliittymä täyttöä varten. Kuvassa 34 tuodaan projektille tarvittavaa suojsakaasua. Kuvassa vasemmalla on höyrystin, jonka tarkoitus on muuttaa säiliön alaosasta johdettava nestemäinen typpi kaasuksi, jonka lämpötila vastaa ulkoilmaa. Talvella lauhduttimen pintaan kerääntynyttä huurretta on poistettava.



Kuva 34. Typpikaasulaitteiston asennus ja täyttö Yritys A:ssa.

Kaasun käyttäminen on luvanvaraista. Kuvassa 35 tarkastaja mittaa kahdet rinnakkaiset varoventtiilit ja tutkii, että asennusvaatimukset täyttyvät sekä laatii näistä tarkastuspöytäkirjan. Säiliön asennukseen ja täyttöön kului aikaa vain pari tuntia. Putkisto oli asennettu etukäteen.



Kuva 35. Varoventtiilin tarkastus.

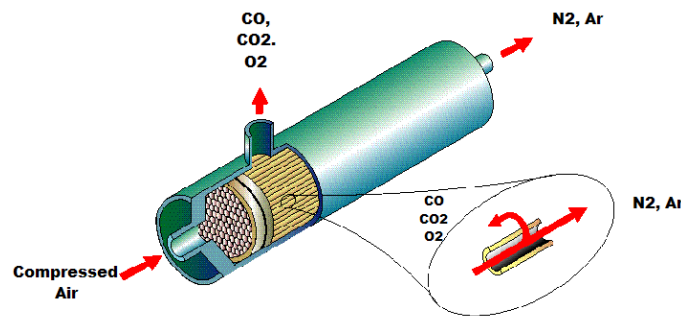
Käytetyn säiliön nimelliskoko oli 3 m³, mutta sitä ei saada aivan täyteen, koska yläosaan kertyy täytettäessä kaasua, joka ei ole täydellisesti nesteytynyt. Sopiva säiliön täyttömäärä on 2 000 kg. Paine kasvaa haihtumisen myötä kohti satoja bareja, ellei ylipainetta päästetä yläkautta pois. Säiliön eriste hidastaa sisällön lämpenemistä sen verran, että varoventtiilistä karkaavan kaasun määrä ei ole merkittävää, mikäli säiliö on oikein mitoitettu ja käyttö on tasaista. Häviävän kaasun määrä on vakio, koska säiliön sisälämpötila ja sisäpinta-ala pysyvät vakiona. Tyypillisesti lasketaan, että 1 % nimellistäytöstä haihtuu vuorokaudessa. Yläkautta poistuvaa kaasua voitaisiin

hyödyntää sellaiseen käyttöön, jolla ei ole vastapainetta, kuten komponenttien säilytyskaappeihin.

5.2 Typpigeneraattorit

Generaattoreita on kolme eri tyyppiä. Massiivisessa käytössä kaasu kannattaa tehdä tislamalla ilmaa. Näin tehdään suurissa teollisuuslaitoksissa. Tällöin tislamo on yleensä AGA:n tai vastaavan kaasun toimittajan omistama.

Yksinkertainen membraanitoiminen generaattori [35],[36], jonka toimintaperiaate näkyy kuvassa 36 on passiivinen mekaaninen suodatinyksikkö, joka sisältää putkimaisia kuituja. Kuitujen seinissä on reikiä, joiden halkaisija vastaa happimolekyylin kokoa. Suodatus toimii paremmin lämpimässä, joten sen voi sijoittaa kuuman juotoskoneen sisälle. Laite on pieni ja yksinkertainen, mutta sillä saadaan tyyppiä, jonka puhtausaste on vain 99 %. Esitteissä on näkynyt lupauksia jopa 99,9 % puhtaudesta, mutta kun tuotto on käänteisesti riippuvainen puhtauteen, puhtaus ei ole yhtä tärkeä kuin tuottomäärä koska aallon päältä on mitattu huomattavasti suurempia jäännöshappiarvoja.



Kuva 37. Membraanigeneraattorin toimintaperiaate [35].

PSA-tekniikan (engl. Pressure Swing Adsorption) [37] molekyyliseulassa (engl. Carbon Molecular Sieve, CMS) ilman happimolekyylit tarttuvat materiaaliin korkeassa ilmanpaineessa. Seulan reiät ovat niin pienet, että happimolekyylit pääsevät materiaalin sisälle, kun taas typpimolekyylit jäävät ulkopuolelle. Kun happimolekyylejä on jonkin aikaa kerääntynyt, typpi kerätään paisunta-astiaan. Paine palautetaan nopeasti, jolloin happi karkaa ilman kanssa laitteesta. Tämä prosessi toistuu muutaman minuutin pituisina sykleinä. Prosessi on siis fyysikaalinen, ei kemiallinen. Huuhtelun aikana typen saanti ei lakkaa, vaan suodattimia on pareittain, jolloin kaasun saannista saadaan

paisunta-astian avulla jatkuvaksi. Poistuvan happipitoisen ilman happipitoisuus on noin kaksinkertainen normaaliin ilmaan verrattuna, joten se ei ole vaarallista ihmiselle eikä aiheuta palovaaraa.

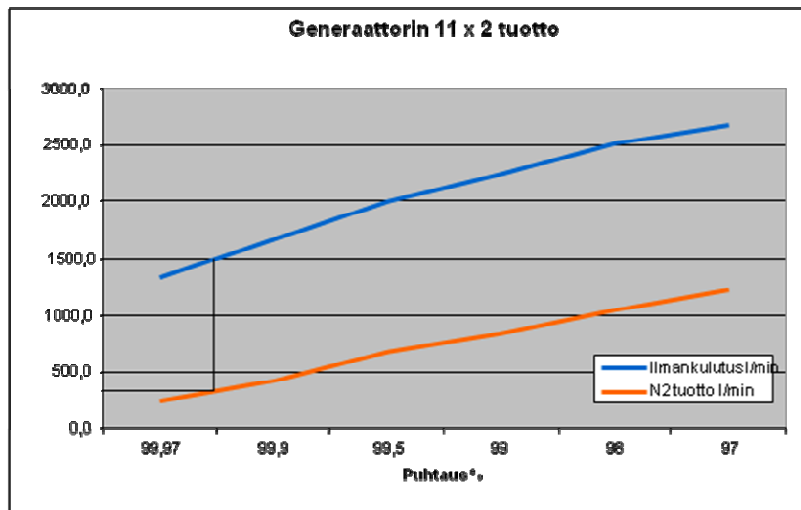
Kuvassa 37 esitetään projektissa käytetty 1,5 m korkea ja 2 m pitkä PSA-laitteisto. Edessä näkyy auton äänenvaimennin, jonka tarkoitus on vaimentaa aivastusta muistuttavaa kovaa puhallusääntä, jota laitteisto tuottaa vaihtaessaan kennojen päästösuuntaa.



Kuva 37. Laser Gasin toimittama 11 x 2 generaattori sisältää 11 paria suodattimia.

Typhen tuotto merkitään tyypillisesti kuutiometreinä tunnissa, kun taas paineilma ilmaistaan litroina tai kuutiometreinä minuutissa. Tässä dokumentissa pyritään esittämään molemmat yksiköt rinnakkain, jotta lukijan olisi helpompi omaksua mittakaavat oikein.

Asennettu laitteisto on tyypiltään 11×2 . Kuvan 39 käyrät pohjautuvat tämän liitteen 2 taulukkoon. Spesifikaation mukaan laitteisto tuottaisi 99,97 % typpeä maksimissaan 300 l/min. Tällöin kompressorin tuotto pitää olla vähintään 1 500 l/min. Tämä vastaa myös tehtyjä havaintoja asennuspaikalla (käyrää on laajennettu alaspäin toimittajan laatiman spesifikaation nähden, jotta voitaisiin arvioida paineilman tarvetta myös tyhjäkäyntitilassa). Asennuksessa on huomioitava, että tuotetun kaasun käyttöpaine ei ole samoissa lukemissa kuin nestetyypiratkaisussa, vaan pienempi.



Kuva 39. Tyypigeneraattorin 11 x 2 (PSA) tuotto- ja kulutustaulukko muutettuna käyriksi. 1,5 m³/paineilmaa/min antaa maksimissaan 300 l/min tyypeä.

PSA-laitteisto ei vaadi erityistä asennusympäristöä. Se ei tuota lämpöä eikä kylmää, mutta pareittain toimivien suodattimien suunnanvaihto puhaltaa äkillisesti happipitoisen ilman puuskahduksena, joten putken pää on syytä sijoittaa tilaan, jossa voimakas puhallusääni ei häiritse. Membraanitoiminen generaattori ei pidä häiritsevää ääntä.

Taulukko 2 kertoo, kuinka suuri paineilman kulutus on erikokoisilla PSA-generaattoreilla. Elektroniikkatuotannossa käsitellään useimmiten paineilmaa litroina minuutissa eikä kuutioina tunnissa, joten taulukkoon on lisätty muunnos litroiksi. Mallimerkintä kertoo samalla molekyyliuodatinparien määrästä.

Taulukko 2. Esimerkki PSA tyypigeneraattorien tuotosta ja niiden paineilman kulutuksesta .

Malli	1 x 2	2 x 2	3 x 2	4 x 2	5 x 2	6 x 2	7 x 2	8 x 2	9 x 2	10 x 2	11 x 2
Tuotto [m ³ /h]	2,3	4,6	6,8	9	11	14	16	18	20	23	25
Tuotto [l/min]	38	77	113	150	183	233	267	300	333	383	417
Kulutus [m ³ /h]	9,2	18,4	27	36	45	56	64	72	80	92	100
Kulutus [l/min]	153	307	450	600	750	933	1067	1200	1333	1533	1667

Kaasun puhtausaste on verrannollinen hetkelliseen kulutukseen. Taulukosta 3 selviää tuoton, kulutuksen ja puhtausasteen suhde 11 × 2 -generaattorilla. Laitteiston kuntoa tulee valvoa jatkuvalla tyypipitoisuusmittauksella.

Taulukko 3. PSA tyypigeneraattorin 11 x 2 tuottama puhtausprosentti ja volyyymi eri ilmamäärillä.

LaserGas Midi 11 x 2					
O ₂ [%]	N ₂ [%]	tuotto [m ³ /h]	N ₂ tuotto [l/min]	kulutus [m ³ /h]	Ilmankulutus [l/min]
0,03	99,97	14	233,3	80	1333,3
0,1	99,9	25,0	416,7	100,0	1666,7
0,5	99,5	40,0	666,7	120,0	2000,0
1,0	99	50,0	833,3	135,0	2250,0
2,0	98	63,0	1050,0	151,0	2516,7
3,0	97	73,0	1216,7	161,0	2683,3

5.3 Putkisto

Nestetyypisäiliön nimellispaine on 10 baria. Yritys A:ssa asennettiin kupariputki säiliön lauhduttimelta aaltojuotoskoneeseen. Tämän viereen sijoitettiin kaksi paineen alenninta lopullisten virtausmäärien säätöön [33]. Juotoskoneelle saapuva putki jaetaan kahteen suuntaan ja säädetään tarvittavan virtausmäärän mukaan. Anemometriltä voidaan lukea kaasun kulutus suoraan kuutiometreissä tuntia kohti. Toinen haara on tyhjäkäynnille, jossa virtaus on 4–5 m³/h, ja toinen juotokselle, tässä virtaus on 8–9 m³/h. Yhdessä tyhjäkäynnin kanssa juotosajan virtaukseksi tulee 10–15 m³/h. Linde AG:n [33] ohjeen mukaan kaasun kulutus olisi 4–8 m³/h, joka on jonkin verran pienempi kuin asennuksessa käytetty. Jos juotosaika on lyhyt, voidaan kaasun kulutusta vähentää tyhjäkäyntiajan mukaan. Virtaus pidetään tyhjäkäyntiasennossa vain aallon lämpötilan ollessa yli 200 °C. Asento valitaan karkeasti kellokytkimellä käynnistyväksi tunti juotoskoneen käynnistymisen jälkeen. Vastaavasti kytketään typpikaasu pois tunti juotoskoneen sammuttamisen jälkeen. Virtauksen säätö tapahtuu kahdessa vaiheessa,

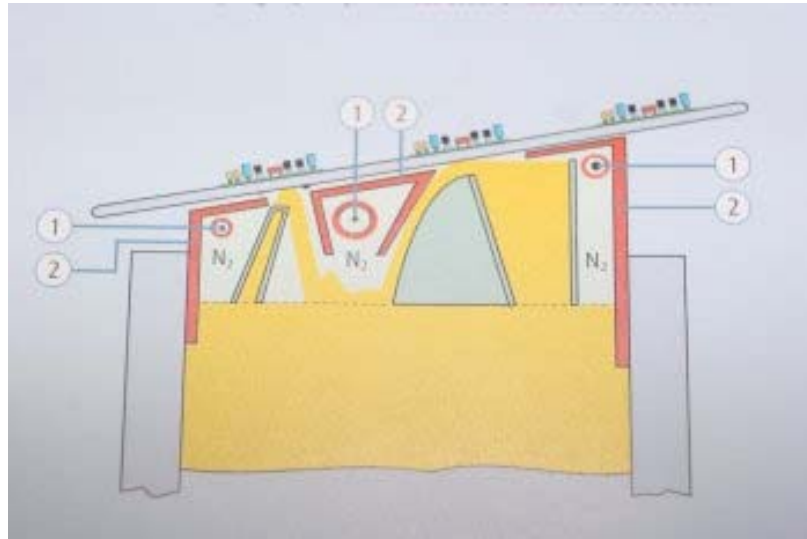
ensin painetta alentamalla punaisesta säätöruuvista, toiseksi hienosäätö mustasta nupista, jolloin lasiputkeen nouseva teräskuula indikoi virtauksen määrän. Musta neliönmuotoinen yksikkö on sähköinen venttiili, jolla virtaus käynnistetään. Kuvassa 40 säädetään lopullisia paineita juotoskoneelle. Isosta venttiilistä säädetään välipaine ja anemometrin yläosassa olevasta venttiilistä kaasumäärä. Vasemmanpuoleinen syöttää aina, kun juotoskone on käynnissä ja oikeanpuoleinen juotettaessa.



Kuva 40. Virtauksen säätöyksikkö.

5.4 Kansi

Yritys A:ssa on Linde AG:n kehittämä jälkiasennukseen soveltuva kuvan 41 mukainen kansi. Sen voi asentaa kaikkiin aaltojuotoskoneisiin, mutta ei sellaisenaan, vaan juotospadasta otetaan tarkat mitat ja lisäksi kaulus viimeistellään ennen toimitusta. Suunnittelun tavoitteena on saada aalto peitetyksi inertillä kaasulla eli kaasulla, joka ei reagoi ympäröimänsä elementtien kanssa. Käytännössä jalokaasut ja typpi toteuttavat tämän ehdon. Kaasun pitää olla mahdollisimman puhdas, jotta sen jäännöshappi vaikuttaisi mahdollisimman vähän sulaan juotteeseen. Kaasua ei saa puhaltaa liian voimakkaasti aallon kriittisiin kohtiin, koska silloin tämä taas häiritsee aallon takaosassa, mikä puolestaan aiheuttaa oikosulkuja. Kuvan 42 perusteella, Linden kehittämällä toimintaperiaatteella saadaan mahdollisimman pieni puhallus riittämään lähes inertin atmosfääriin ylläpitämiseen. Tärkeää on myös, että putkiston rei'istä tuleva puhallus ei osu suoraan kohtaan, jossa piirilevy nousee aallosta, koska silloin se jäähdyttäisi sitä aiheuttaen uusia ongelmia.



Kuva 41. Linde AG on suunnitellut lähes aukottoman kammion aallon pinnalle. Järjestelmä on asennettu Yritys A:n testijuotoskoneeseen. [38, 33]

Sisäänpuhallus (1) on asennettu siten, että suurempaa virtausta ei esiinny kriittisissä kohdissa. Kammio on saatu alaosaltaan hermeettiseksi upottamalla seinät juotteeseen (2). Uudemmassa patentissa aaltojen välistä sisäänpuhallusta on muutettu todennäköisesti ylläpidon helpottamiseksi. Uudemmassa versiossa kuvan 41 kohtaa 2 on korvattu yksinkertaisemmalla kourulla [39].

5.9 Testiasennus Yritys B:ssä

Yritys B on hyvin pieni alihankkija. Liiketoiminnan volyyymi oli sen verran pieni, että investointi vastaavaan laitteistoon kuin Yritys A teki ei ollut mahdollista. Yritys B:llä oli kuitenkin innostusta päästä vastaavaan juotoslaatuun.

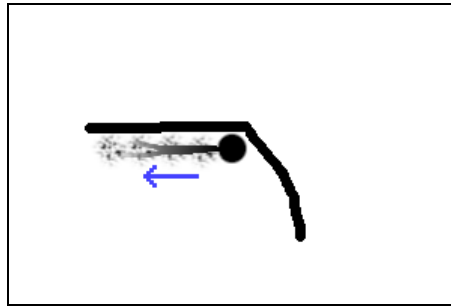
Yritys B:n juotoskoneen varustukseen kuuluu suojakansi, jota voidaan asettaa aallon päälle. Se pidetään aallon päällä, kunnes koneella juotetaan. Kaikki päivän tuotteet juotetaan yhtenä eränä. Aikaisemmin havaittiin Yritys A:ssä, että suojakaasu vaikuttaa juotukseen pitkäaikaisena juotteen puhdistusprosessina. Juotosten laatu seuraa suojakaasun käyttöä usean viikon viiveellä. Siksi haluttiin testata, voidaanko pitää tätä tehtyä havaintoa yleisenä ilmiönä. Kannen alle syötettiin pienehkö määrä typpikaasua sen aikaa, kun koneella ei juotettu. Sen jälkeen odotettiin vastaavia havaintoja tällä menetelmällä. Kaasu tuotetaan tässä tapauksessa paineilmasta yksinkertaisimman

mahdollisen laitteiston eli membraanitoimisen generaattorin avulla. Kaasu haluttiin tuoda koneeseen kohtaan, jossa se voisi vaikuttaa myös juotoksen aikana. Kovin suurta volyyymiä ei käytettävissä olevalla kalustolla voi saada aikaan, koska 600 l/min kapasiteetin mäntäkompressorin tuotosta ei voitu käyttää kuin osa suojakaasun valmistamiseksi. Testauskellällä ei oltu valmiita investoimaan tehdasvalmisteiseen kanteen, koska juotuskoneen tuoma kassavirta ei ollut yhtä suuri kuin Yritys A:ssa.

Kaasun syöttöä varten rakennettiin kuvan 42 mukainen putki, jossa on pieniä reikiä suunnattuna suoraan aaltoa kohti. Tämä osoittautui välittömästi keskeneräiseksi ratkaisuksi. Nopeasti kulkeva kaasu veti mukaansa happea sisältävää ilmaa, joka haittaa juotosten syntymistä. Ilmeisesti pinta jäähtyy liian nopeasti. Ilman sekoittumisen estämiseksi typen kanssa tarvittaisiin kuvan 43 mukainen suojapelti, joka estäisi huoneilman kulkemista puhalluksen mukana sulaan tinaan.



Kuva 42. Aallon eteen asennettiin kupariputkesta väännetty suutin kaasun syöttämiseksi.



Kuva 43. Tarvittavan ohjauspelin (musta viiva putken yläpuolella) toimintaperiaate.

Linde AG:n ratkaisu, jota hyödynnetään Yritys A:ssa, osoittautui tähän tehtävään todella hyväksi. Kokeilu Yritys B:ssä jatkui edelleen, koska pyrittiin löytämään poikkeuksellisen edullinen ratkaisu, joka kuitenkin parantaa tuloksia oleellisesti. Kokemukset kaasun valmistuksesta Yritys B:ssä membraanilaitteistolla olivat hyvät. Tämän, kuvassa 44 osittain näkyvän laitteiston fyysinen koko on vain murto-osa PSA-laitteistosta. Se koostuu n. 50 mm paksusta alumiiniputkesta, jonka pituus oli n. 70 cm, jonka toisessa päässä yksi liitin ja toisessa kaksi. Toinen oli typelle ja toinen hapelle.



Kuva 44. Alhaalla on membraanigeneraattori ja ylhäällä paineilman aktiivihiihliuodatin (kuvassa asennettuna Turun ammattikorkeakoulun juotuskoneeseen).

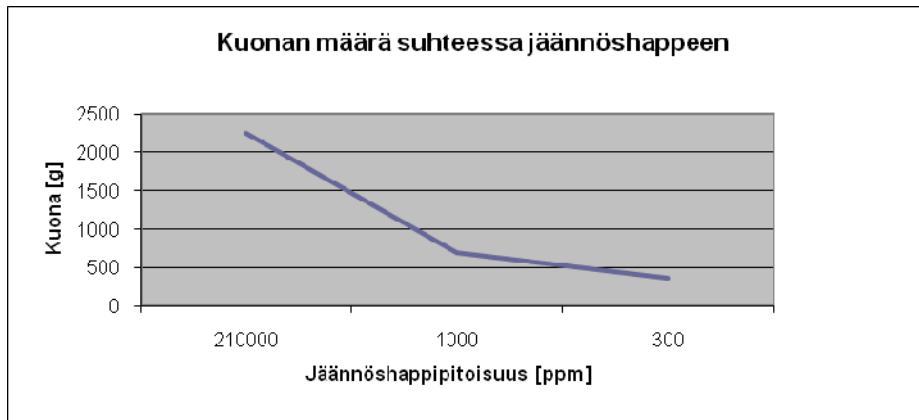
Mäntäkompressorin tuottaman rajallisen paineilman puhtauden vuoksi, asennettiin mahdolliselle paineilman seassa kulkevalle öljylle membraania paljon isompi aktiivihiihliuodatin. Koko laitteisto mahtui hyvin juotuskoneen alla olevaan kaappiin.

Yritys B:n kokeilu ei tuottanut odotettuja hyötyjä. Juotostuloksissa ei saavutettu selkeästi näkyvää parannusta. Todettiin, että kunnan parannuksia voidaan saavuttaa vain kunnollisen kannen avulla. Tässä tapauksessa suojakaasun syöttömäärä on pieni, joten onnistuminen edellyttäisi, että koko aaltoa koteloitaisiin siten, että ilma ei pääsisi aallon lähelle. Piirilevy kulkisi kahden luukun kautta. [P3]

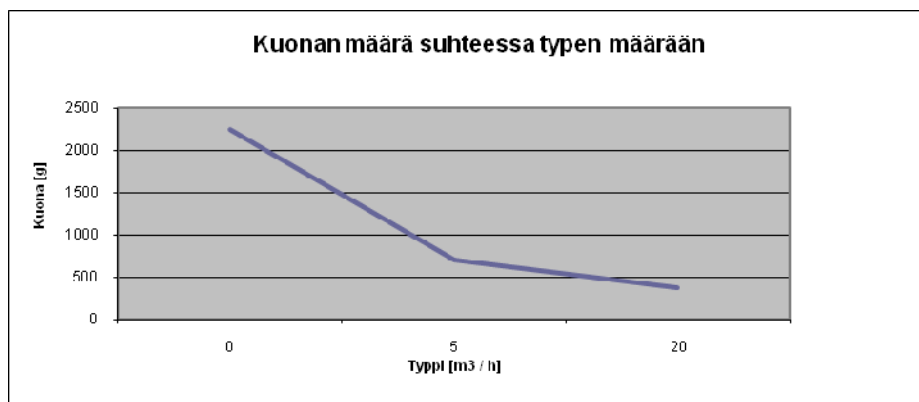
5.5 Kuonan eli epäkurantiksi oksidoituneen tinan määrä

Espoo-Vantaan ammattikorkeakoulussa EVTEK:ssä (nykyinen Metropolia) on mitattu typen käyttömäärän vaikutusta kuonan muodostumiseen. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että typen jäännöshappipitoisuudella on lähes eksponentiaalinen vaikutus kuonan syntymiselle [40].

Testin jonka tulokset näkyvät kuvissa 45 ja 46 mukaan saavutetaan 70 %:in säästö, kun suojakaasua käytetään 5 m³/h ja 84 %:in säästö, kun kaasun volyyymi on 20 m³/h. Tosin pitää huomioida fluksin aiheuttamaa kuonan määrää, joka muodostuu juotettaessa piirikortteja. Tästä johtuvat tuotantoprosessissa tehdyn tutkimuksen ja laboratoriossa tehdyn tutkimuksen erot. Oikeampi tulos saataisiin tutkimalla lisäksi piirilevyn neliömetrikohtaista kuonan muodostusta.

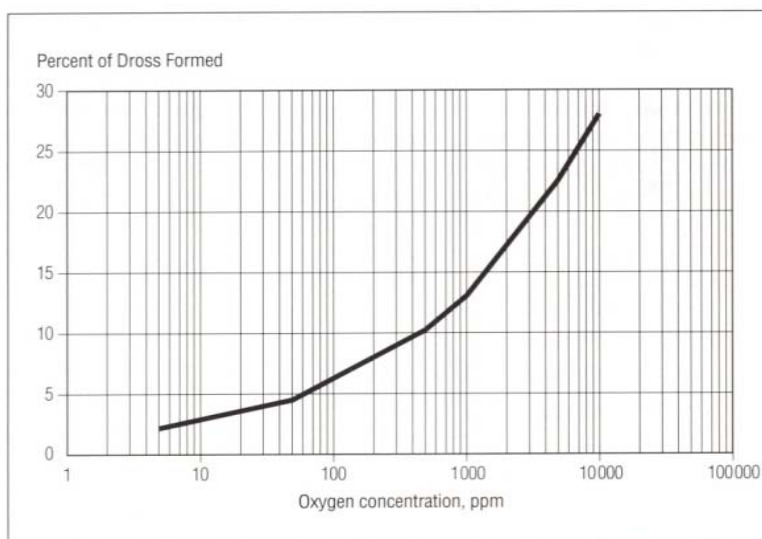


Kuva 45. tutkimustulos kuonan syntymisen riippuvuudesta jäännöshappipitoisuuteen. [40]



Kuva 46. mukaan 5 m³/h vähentää kuonan syntymistä 70 %:lla ja 20 m³/h 83 %:lla. [40]

Ennen testiä Yritys A:lla kului 10 kg juotostinaa viikossa, mitä pidettiin hälyttävänä rahallisena menona (kilohinta v. 2007 oli 20 – 25 €/kg). Tämä oli alkuperäinen syy kokeilla suojakaasujuotosta. Toimittajien antamien tietojen mukaan syntyvän kuonan määrä laskee alle puoleen. Tähän ei tuotantotilanteessa päästy. Syy tähän lienee se, että piirilevyn mukana kulkeva fluksi sisältää happoja, jotka tuottavat juotosprosessin aikana kuonaa. Typen ansiosta kuonan määrä on Yritys A:lla vähentynyt 40 %:lla eli 6 kg:aan viikossa. Käytännössä saavutettiin n. 100 €:n säästö viikossa. Käytetty jälki-asennusputkisto ei myöskään ollut täydellinen. Aallon päältä mitattiin kylmänä noin 7 % jäännöshapetta (happipitoisuus), joten tällä ratkaisulla ei päästä kovin puhtaaseen tyyppiseokseen. Vastaavia tutkimuksia on Torsten Holm [12] tehnyt AGA:lla. Julkaisun sivulla 14 mainitaan, että oksidoitumiseen riittää hyvinkin pieni määrä hapetta, kuten kuva 47 esittää.



Kuva 47. Kuonan muodostuminen jäännöshappipitoisuuden funktiona. [12]

Vastaava tutkimus on tehty Espoo-Vantaan ammattikorkeakoulussa [40], jossa Joinus-projektissa käytetty tyyppigeneraattori aikaisemmin on ollut lainassa. Tuloksia valitettavasti ei voida verrata toisiinsa, koska Lechokin [12] testissä on käytetty enintään 10 000 ppm happijäännöspitoisuutta, kun taas Tuppurainen on Evtex:ssä mitannut parhaimmillaan 30 000 ppm. Yritys A:ssa mitattu 7 % on yli kaksinkertainen edellä mainituista. Tämä selittyy osittain sillä, että mittaaminen juuri juotoskohdasta on vaikea toteuttaa ilman, että aalto on päällä. Lisäksi Yritys A:n laitteessa ei ollut

juoteaallon pumppuakselien kohdat suojattuina, jolloin paljon typpeä vuosi sitä kautta ilmaan.

Suojakaasulaitteistolle voidaan laskea takaisinmaksuaikaa jo juotteen säästöllä. Yritys A:n tuotantomäärät huomioon ottaen, kun 1 m³:n kaasun valmistukseen kuluu 0,5 kWh ja laitteiston hankintahinta on n. 20 000€, investoinnin takaisinmaksuajaksi saadaan noin 3 vuotta. Laskelmia ei tässä esitetä, koska yksikköhinnat ovat luottamuksellisia.

Turun ammattikorkeakoulun juotoskoneessa on aloitettu testi kuonan palauttamisesta tinaksi. Tinadioksidi SnO₂ pelkistetään hiilellä, jolloin saadaan Sn ja CO₂. SnO:sta saadaan vastaavasti CO ja Sn, jolloin juotoskone pitää olla ilmastoitu, koska hiilimonoksidi on myrkyllistä ihmiselle. Tutkittavaksi jää, tapahtuuko pelkistymistä 260 °C:n lämpötilassa juoteaallon pinnalla, johon on levitetty 0,5 cm:n paksuinen kerros aktiivihiiltä. Vaikka testi on vasta alullaan, tulokset vaikuttavat rohkaisevilta. Juotepuuroa esiintyy huomattavasti vähemmän ja juotteen pintajännitys on muuttunut haluttuun suuntaan. Ilmeisesti hiilessä esiintyvät muut aineet vaikuttavat hieman samalla tavalla kuin hartsi, joka on fluksin osana. Testin aloittamisen jälkeen ei ole tarvinnut kahteen viikkoon poistaa kuonaa aallon pinnalta. Aktiivihiilipöly suojaa samalla juotteen pintaa ilman hapelta. Kuonan muodostukseen voi myös vaikuttaa erilaisilla lisäaineilla juotteessa [41].

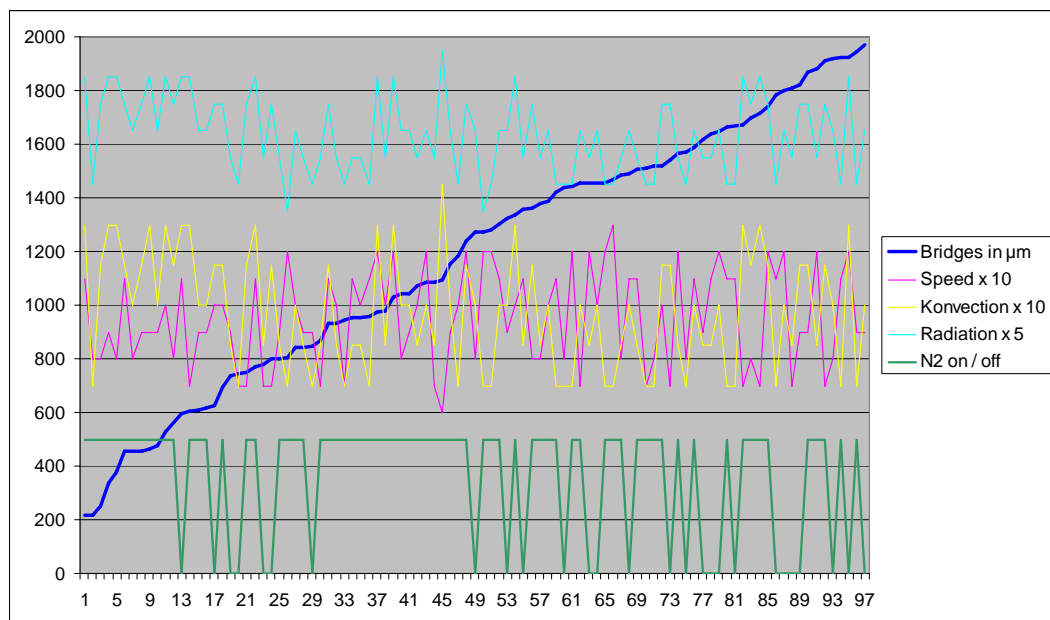
Juotteen vaihtaminen SAC:sta [4] SN100C:ksi [42] piti parantaa juotostuloksia huomattavasti. Työntekijät vaativat ensin juotteen vaihtamista takaisin, koska kesti 2–3 viikkoa ennen kuin juotteen ominaisuudet normalisoituivat siten, että virhetaso vastasi aikaisempaa. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että juotteen joukossa on joitakin oksideja, jotka vähitellen nousevat juotteen pintaan ja poistuvat kuonan muodossa. Mikäli käytetään suojakaasua, fluksin aktivaattorit muuttavat havaintojen mukaan pinnalle nousevaa oksidia kuonaksi, kunnes tasapaino saavutetaan. Kuonan poistumisen myötä juotteesta tulee puhtaampi. Ellei käytetä suojakaasua, koko juote sisältää oksidia tai muita tuntemattomia aineita, joita ei havaita massaspektrometrillä ja joiden poistumiseen kuluu pitkä aika. Pidemmällä aikajaksolla ei havaittu huomattavaa eroa kahden eri juotteen laaduntuottokyvyssä.

6 SAANNON TESTAAMINEN JA OPTIMOINTI

Optimoinnin tulos ei ole suoraviivaisesti saatavana testituloksista, koska juotosprosessin luonne on ailahteleva. Tapahtuu luontaisia stokastisia muutoksia lyhyenkin ajan sisällä. Käytettyjen testikorttien runsas määrä kuitenkin paljastaa selviä trendejä eli kuviteltuja regressiosuoria käyttäytymiselle. Testikortteja on juotettu noin 500. Tavoitteena oli, että päästäisiin kaikista virheistä eroon, mutta ainakin Yritys A:ssa asennetun juotoskoneen laaduntuottokyky on edelleen puutteellinen, mutta sitä on saatu huomattavasti paremmaksi.

6.1 Suora optimointi tulosten perusteella

Yksinkertaisin optimointi olisi kokeilla kaikkia asetusten yhdistelmiä ja valita niistä ne arvot, jotka antavat parhaat tulokset. Lajitellaan siis kaikki tulokset nousevan vikaprosentin mukaan. Kuvan 48 mukaan ei ole havaittavissa selkeää logiikkaa, miten eri asetukset, kuten esilämpö ja kuljetinnopeus, vaikuttavat juotostulokseen.

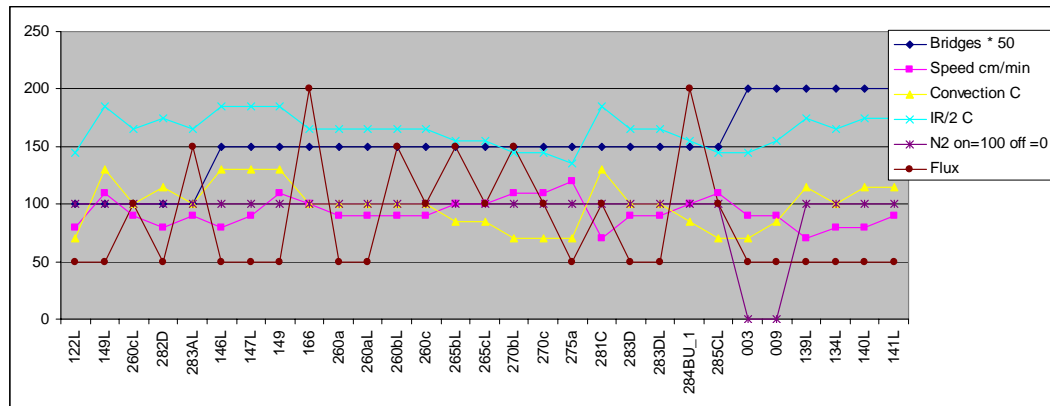


Kuva 48. Kaikki juotostulokset on lajiteltu yhteenlaskettujen oikosulkujen pituuksien mukaan. Kuva osoittaa, että ei ole selkeitä säännönmukaisuuksia asetusarvojen ja juotostulosten välillä.[P4]

Käyrät näyttävät, että juotostulokset eivät olisi riippuvaisia asetuksista, koska asetusten sekä suurilla että pienillä arvoilla esiintyy virhekkään molemmilla päissä. Oli

odotettavissa, että esilämmityksien ja kuljetinnopeuksien regressiosuorat osoittaisivat tiettyä kulmaa, joka osoittaisi miten kukin säätö erikseen vaikuttaisi tuloksiin.

Käyrien lähtökohdat kuvissa 49 ja 50 on poimittu kuvan 48 käyrästä. Parhaat tulokset otetaan seuraavaksi tarkemmin tutkittavaksi. Lisää tietoa löytyy liitteen 3 kuvista 1 ja 2.

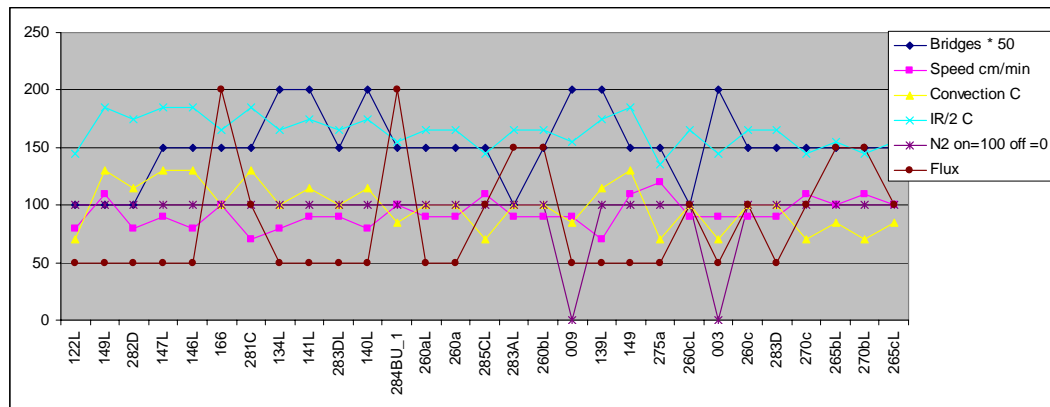


Kuva 49. 28 parhaat tulokset ja niiden asetusparametrit. Fluksi kohdassa 50=IF2005C, fluksi 100=IF2009-MLF, fluksi 150=MF200 ja fluksi 200=AQF10. Lajittelukriteerinä on oikosulkujen lukumäärä. Vaaka-akselilla piirilevyihin merkityt numerot.

Käyrän mukaan ensimmäiset tulokset vasemmalla ovat tärkeimmät. Niistä näkee, millä asetuksilla on saatu testin 500 testilevystä parhaat tulokset:

- Kolme ensimmäistä levyä on ollut lämpökuormituksella, siis lämpökuorma kiinnitettynä.
- Kaksi parasta tulosta on saatu fluksilla IF2005C.
- Konvektioesilämmitys on ollut 70–130 °C.
- Infrapunälämmittimen pintalämpö on ollut 300–350 °C.
- Kuljettimen nopeus on ollut 80–110 cm/min.
- Vasta 25:s tulos on ilman suojakaasua.

Kuvassa 50 lajittelukriteeriksi asetettiin ei oikosulkujen määrän sijasta niiden yhteispituus, joka osoittaa, kuinka leveät täplien välit ovat juottuneet yhteen. Tämä antaa tuotettavamman tuloksen, koska siinä huomioidaan suuria oikosulkuja enemmän kuin pieniä.



Kuva 50. Kuten edellinen kuva, mutta lajitteluperusteena on juotesiltojen kokonaispituus kappalemäärän sijasta. Fluksi kohdassa 50=IF2005C, fluksi 100=IF2009-MLF, fluksi 150=MF200 ja fluksi 200=AQF10

Näin saadaan hieman erilainen jakauma asetusrvoille ja trendi on paremmin havaittavissa. Parhaiten juottuneista piirilevyistä on laskettu keskiarvo ja esitetään seuraavassa listassa, joka on siten tämän optimointitehtävän tulos:

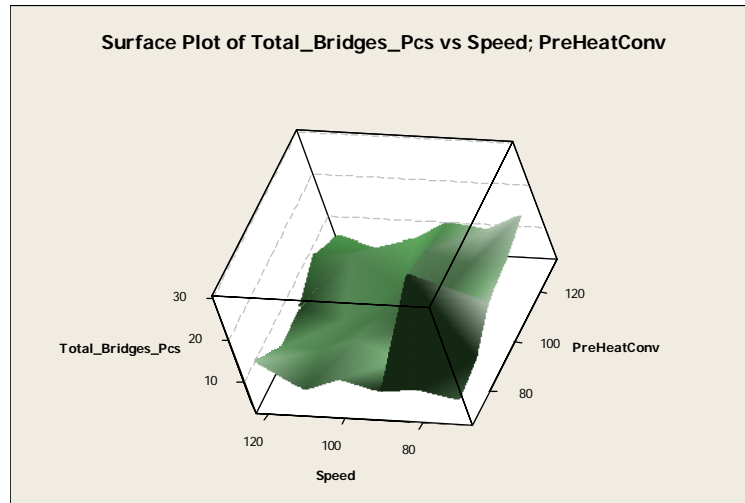
- kuljettimen nopeus 92 cm/min;
- konvektion lämpötila 99 °C;
- infrapunalämmittimien asetus 330 °C;
- suojakaasu käytössä; ja
- flukseista IF2005C esiintyy 17 kertaa, IF2009-MLF 5 kertaa, MF200 4 kertaa ja AQF-10 2 kertaa.

Tämä tulos osoittaa, että tehtaalla käytetyt parametrit ovat olleet kohdallaan, koska eivät poikkeaa näistä mainittavasti. Testausmenetelmä auttaa juotoskoneen saamiseksi hyvään kuntoon, vaikka käyrä kuvassa 50 antaa ymmärtää, että joko ei ole väliä, mitä arvoja käytetään, tai että tutkimus on ollut riittämätön.

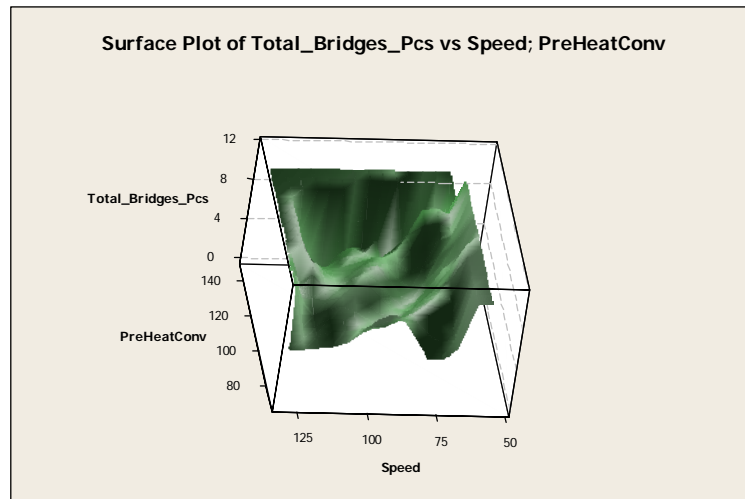
6.2 Testitulosten 3-D esitys

Olisi ihanteellista, jos voitaisiin tehdä matemaattinen malli, joka kuvaisi juotoskoneen käyttäytymistä eri säädöillä. Tämän tarkastelun tavoitteena on löytää mahdollisia kuvioita, kuten esimerkiksi ns. banaanilaakso pinnan tasolla. JOINUS-projektissa on kerääntynyt niin paljon tuloksia, että joitakin 3D-malleja on mahdollista tulostaa. Kuva

51 esittää kuljetinnopeuden ja esilämmityksen määrän yhteisvaikutusta oikosulkujen syntymiseen ilman suojakaasua. Kuva 52 osoittaa vastaavaa tilannetta käytettäessä suojakaasua. Tulokset on esitetty Microsoft Excel taulukonlaskentaohjelmaa käyttäen.

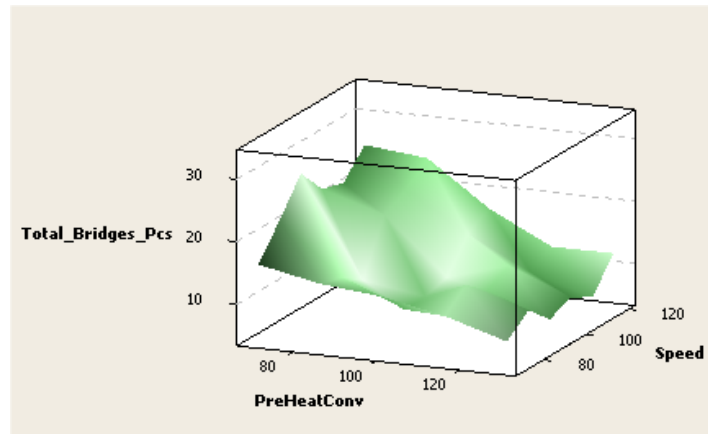


Kuva 51. Kuljetinnopeuden ja esilämmityksen määrän yhteisvaikutus oikosulkujen syntymiseen ilman suojakaasua.



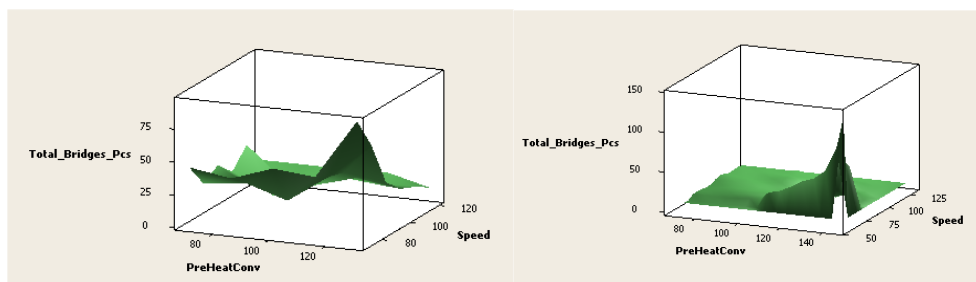
Kuva 52. Kuljetinnopeuden ja esilämmityksen yhteisvaikutus oikosulkuihin käytettäessä suojakaasua.

Kuva 53 osoittaa, että fluksi on merkitsevä tekijä juotostuloksissa. Kuva osoittaa, että Multicoren uusi vesipohjainen MF200 vaatii riittävän korkeaa esilämpöä toimiakseen. Virhemäärä laskee oikealle kohti korkeampaa esilämpöä. Perusteluna on, että veden haihduttaminen vaatii enemmän lämpöenergiaa kuin alkoholipohjaisten fluksien kohdalla.



Kuva 53. Fluksi MF200 ilman suojakaasua. Muuttujina olivat kuljettimen nopeus ja esilämmitys.

Kuvien 54a ja 54b:n mukaan juotosprosessin käyttäytyminen muuttuu radikaalisesti suojakaasun ansiosta. 3D-kuvaajat menevät paljon syvemmälle ja pysyvät syvällä laajalla alueella. Suojakaasuttomassa prosessissa kuvaaja kertoo, että pienellä nopeudella ja vähäisellä esilämmityksellä saadaan erittäin heikko tulos. Suojakaasujuotokset osoittavat parhaita tuloksia, kun nopeus on 120 cm/min ja esilämmitys on 120 - 130 °C. Molemmat 3D-pintakuvat (kuva 55a ja 55b) ovat juoksutteella IF2005C, josta oli eniten testituloksia (130 testilevyä). Tuloksena saadaan pieni virheprosentti kaikilla kombinaatioilla, jossa lämmitystä ei ole liikaa. Suojakaasulla virhetaso on paljon matalampi.

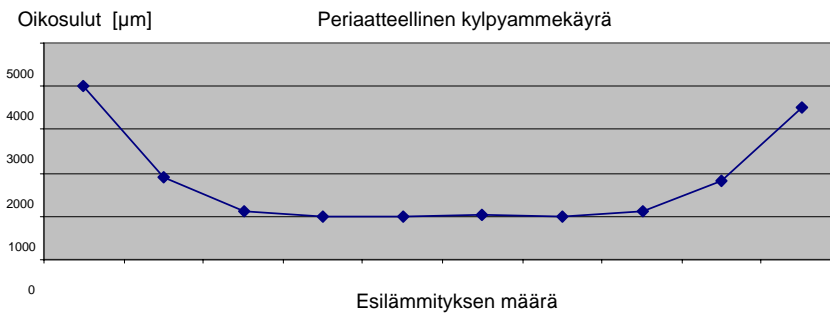


Kuva 54. Vesipohjainen fluksi AQF10 ilman suojakaasua vasemmalla (a) ja suojakaasulla oikealla (b).

Vesipohjaisella fluksilla oli odotettavissa, että se tarvitsisi paljon lämpöä kuivuakseen ja toimiakseen hyvin. Testi osoittaa päinvastaisia tuloksia. Tietyn lämpömäärän ylittyessä virheprosentti kasvaa nopeasti. Testin tulokset osoittavat selviä käyttäytymismalleja, mutta on epävarmaa, riittävätkö nämä tiedot parametrien valintaan.

6.3 Optimointimalli tuotteen lämpökuorman mukaan

Yritys A:ssa käytetään erilaisia asetusarvoja jokaiselle eri juotettavalle piirilevyille sen mukaan, kuinka paljon siihen on ladottu painavia komponentteja. On itsestään selvää, että painava komponentti lämpenee hitaammin kuin kevyt. Testipiirilevy kuuluu kategoriaan erittäin kevyt, koska siinä ei ole lainkaan komponentteja. Kokeiltiin erilaisilla lämpökuormilla ja lopulta päädyttiin kiinnittämään testilevyn päälle 1 mm:n pelti lämpökuormaksi. Yritys C:ssä tehdyissä testeissä lisäpelti on osoittautunut normalisoivan lämpökäyttäytymistä siten, että se saadaan käyttäytymään kuten tyypillinen piirilevy, joka on ladottu täyteen läpiladottuja IC-piirejä. Testilevy ilman peltiä käyttäytyy siis kuin valmistettava piirikortti, jossa on vain kevyitä pintaliitoskomponentteja. Tästä voidaan päätellä, että paljasta testikorttia kevyempiä tuotteita ei ole tarvetta juottaa, koska siinä ei ole lainkaan komponentteja, mutta korttia painavampia tuotantolevyjä on juotettava. Testikortti ilman peltiä simuloi tuotantokortin kevyitä rakenteita ja pellillinen testikortti vastaa täyteen ladottua korttia. Tästä voidaan päätellä, että tämän tyyppinen testikortti soveltuu parhaiten suurimman sallitun lämpömäärän etsimiseen ja juotuskoneen esilämmitys asetetaan maksimilämpötilan tulosten mukaan. Tästä seuraa johtopäätös, että testikortista saatuja tuloksia voidaan soveltaa kuten periaatteellinen kylpyammekäyrä kuvassa 55.



Kuva 55. Kylpyammekäyrä vertauskuvana tuotantoikkunaan.

Kylpyammekäyrällä testikortin tulokset tärkeimmät asettuvat päätyihin, jossa käyrä oikealla ja vasemmalla alkaa nousta pohjalta. ”Kylpyammeen” pituus kuvaa tuotantoikkunaa. Ikkunan leveys määrää kuinka pieniä ja isoja komponentteja pystytään

juottamaan samassa piirilevyssä. Säätojen ollessa kohdallaan saadaan sekä pienten että isojen komponenttien juotostulokset mahdollisimman hyväksi. Toki kiinnostaa myös yhtä paljon ”kylpyammeen” syvyys, eli millä säädöillä saadaan mahdollisimman vähän virheitä. Kokonaisvirhemäärä on kuitenkin tärkein mitä pyritään vähentämään.

6.4 Tuotantoikkuna kuormitusprofiilina

Juotosprosessissa voidaan käyttää käsitettä tuotantoikkuna. Sillä voidaan tarkoittaa lämpötila-aluetta, jonka sisällä saadaan hyviä juotostuloksia. Komponentti jolla on suuri massa lämpenee esilämmityksessä vähemmän kuin pieni. Omia ongelmia aiheuttavat suuret läpiladotut osat, joiden jalvoja pitkin esilämmityksen lämpö johtuu komponenttiin, joka on piirilevyn yläpuolella. Käytännössä hankalimmat komponentit eivät saavuta haluttua lämpötilaa esilämmityksen aikana, mutta koska ne ovat helppoja juottaa, ne eivät välttämättä kylmänäkään johda näkyvään juotosvirheeseen. Juotteen on tarkoitus nousta komponentin jalkaa pitkin piirilevyn yläpuolelle muodostaen juotosliitos myös sille puolelle. Tämä ei yleensä toteudu tyydyttävästi painavien komponenttien osalta. Kun komponentin jalka ei saa osakseen riittävää määrää lämpöä, sen voi havaita suhisevasta äänestä, joka syntyy, kun fluksin liuotin kiehahtaa komponentin osuessa juoteaaltoon.

Tuotantoikkuna on siis kuin kylpyammekäyrä, jonka sisällä juotosten saanto on hyvä. On tärkeää säätää juotoskone siten, että sen toiminta-alue on mahdollisimman keskellä tuotantoikkunaa. Parempi juotosprosessi vastaa syvempää ja leveämpää kylpyammetta.

Tuotantoikkuna määriteltiin esilämmityksen kokonaisuutena, johon liittyy kuljettimen nopeus. Mitä hitaammin kuljetin kulkee, sitä kauemmin piirikortti lämpenee esilämmittimessä. Jotta myös esilämmittimen säätö liittyisi tuotantoikkunaan, nostettiin lämpötilaa samalla, kun kuljetinnopeutta laskettiin. Lisävaikutus piirilevyn kuormittamisesta pellin avulla antaa hyödyllistä informaatiota vain silloin, kun esilämmitysmäärä on normaali tai vähäinen. Näin päädyttiin taulukon 4 mukaiseen ajojärjestykseen, jota käytettiin jatkossa testausmallina. Lähtökohtana oli kasvattaa esilämmitystä ja samalla laskea kuljetinnopeutta. Kuljetinnopeuden säätö vaikuttaa aikaan, jona komponentit ovat sulassa juotteessa. Yhdistelmällä simuloidaan eripainoista materiaalia piirilevyllä sekä fluksin toiminta-aluetta.

Yksi testi käsittää kuutta testilevyä viidellä eri parametrijohdistelmällä. Testimalli antaa kattavaa informaatiota, jonka avulla voidaan esimerkiksi verrata eri flukseja, koska kukin fluksityyppi antaa parhaat tulokset eri parametreilla.

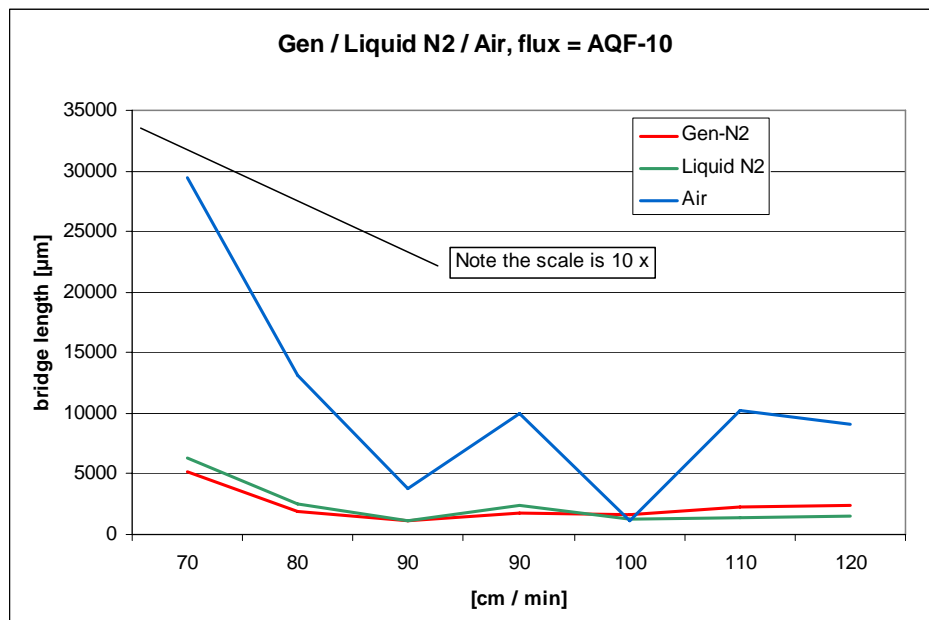
Taulukko 4. Perustuotantoikkunan esilämmön asetusarvot. Jos virheitä ei ollut vielä huomattavan paljon testattiin vielä 120 cm/min nopeudella.

Kuljetinnopeus [m/min]	Esilämmitys konvektio – IR [°C]	Pelti asennettuna
110	70-290	kyllä
100	85-310	kyllä
90	100-330	kyllä ja ei
80	115-350	ilman
70	130-370	ilman

Tuotantoikkuna osoittautui käteväksi. Sillä saa helposti verrattua asioita toisiinsa. Kuvassa 60 on hyvä esimerkki. Ilma-atmosfäärissä (korkealta lähtevä Air-käyrä) oikosulkujen määrä kasvaa nopeasti lämpömäärän kasvaessa. Samaan kuvaan on yhdistetty vastaavat tulokset suojakaasujohtamisessa.

Kuvassa 56 alimpana lähtevä punainen käyrä on saatu käyttämällä typpigeneraattorilla tuotettua tyyppiä. Vihreä käyrä, joka lähtee keskimmäisenä, on tulos, joka on saatu käyttämällä nestetyppiä. Käyristä on tärkeintä huomata, että suojakaasu leventää tuotantoikkunaa todella paljon. Käytännössä tyyppiä käyttö sallii paljon paremmin erikokoisten komponenttien käyttöä samalla piirilevyllä.

Kuva 57 paljastaa myös selkeästi projektissa havaitun tärkeän juotosprosessin ominaisuuden, että tulosten vaihtelu eli kohina pienenee huomattavasti, kun käytetään suojakaasua. Nimittäin yhden testikortin osalta on satunnaisesti saatu yhtä hyviä tuloksia kuin suojakaasutapauksessa. Asteikkoon kannattaa myös kiinnittää huomiota. Testattaessa suojakaasussa virhekertymä on yleensä alle 5 000 µm. Kuvassa 57 näkyy, että ilmassa juottaminen (kuvan sininen viiva) venyttää asteikkoa seitsemän kertaa korkeammaksi kuin vertailutuloksissa.



Kuva 56. Juottaminen ilma-atmosfäärissä (sininen viiva) tuottaa hyvin vaihtelevia tuloksia. Yksikkönä on aiheutuneiden oikosulkujen yhteispituus mikrometreinä testilevyllä. Koneen asetukset olivat taulukon 4 mukaiset.

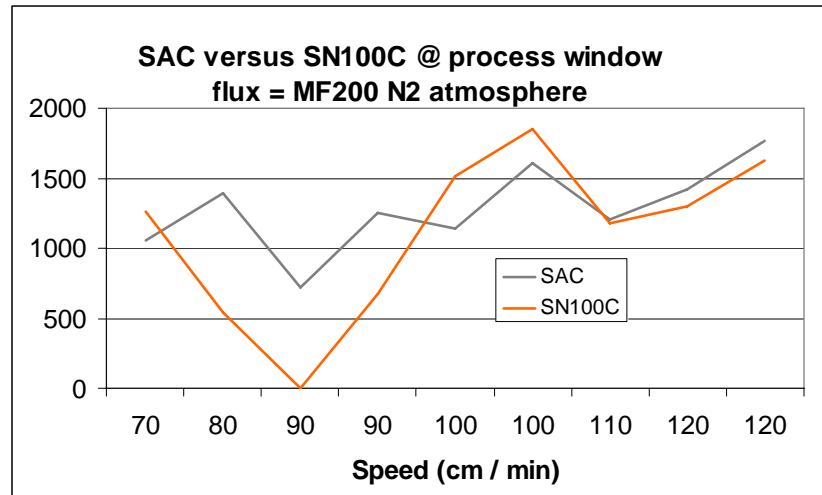
Vikaprosenttia voisi kuvata eräs koe-erä tuotantokortteja, jossa ilmassa juotettuna löytyi 35 vikaa levyä kohti ja suojakaasussa vain 8 vikaa. Varsinaisia ppm-arvoja ei ole laskettu kyseisistä tuotteista. Muut vastaavat testitulokset esitetään liitteessä 1.

6.5 Juotevalinnan vaikutus juotostulokseen

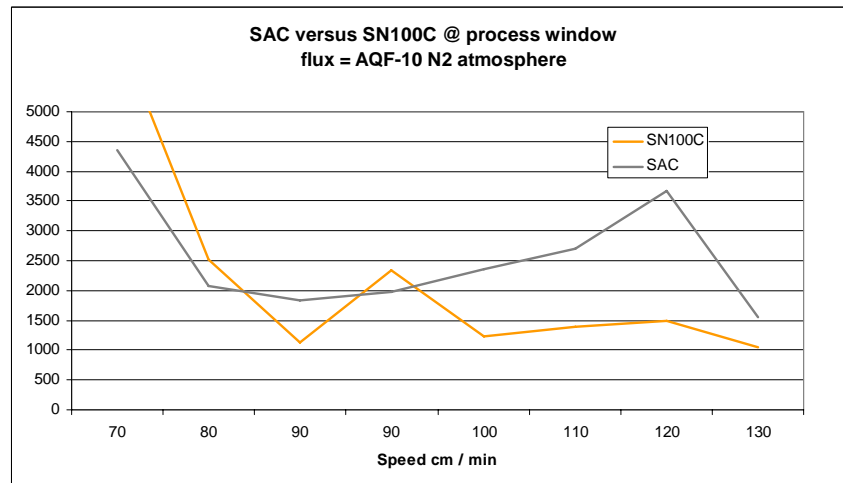
Juote vaihdettiin projektin aikana, joten voitiin vertailla juotostuloksia kahdella eri juotteella. Projektin alussa yritys A:ssa oli käytössä SAC-juote ($\text{Sn}_{95,5}\text{Ag}_{3,8}\text{Cu}_{0,7}$). Vaihdon jälkeen oli suuria odotuksia uudelle SN100C-juotteelle ($\text{SnCu}_{0,7}\text{Ni}$), joka toimittajan mukaan on edullisempi, aiheuttaa vähemmän juotosvirheitä ja ennen kaikkea kuluttaa diffuusiolla juotospadan juotteen seassa olevia rakenneosia juotteeseen vähemmän juotteen nikkelpitoisuutensa ansioista [42]. Nikkelin diffuusionopeus pienenee eutektisen tasapainopisteen [43] ollessa lähempänä.

SN100C on tullut markkinoille myöhemmin kuin SAC-juotteet, mutta kilpailu jatkuu. Uusia tuotemerkkejä joiden koostumus muistuttaa CN100C:tä hyvin läheltä saattaa Elektronik i Norden-lehden mukaan tulla Suomen markkinoille lähiaikoina, kuten esimerkiksi K100 ja ESM100.

Tuloksista kuvissa 57 ja 58 voitaisiin päätellä, että SN100C olisi paljon parempi kuin SAC-juote, mutta tässä pitää kuitenkin ottaa huomioon, että myös suojakaasullisessa prosessissa tapahtuu jonkin verran satunnaista vaihtelua.



Kuva 57. Juotostulosten vertailu SAC:n ja SN100C:n välillä. Molemmissa tapauksissa on käytetty suojakaasua. Padan lämpötila on molemmissa tapauksissa ollut 265 °C ja suojakaasu on ollut käytössä. Koneen asetukset olivat taulukon 4 mukaiset. Pysty akselin yksikkönä on oikosulkujen yhteispituus [µm].

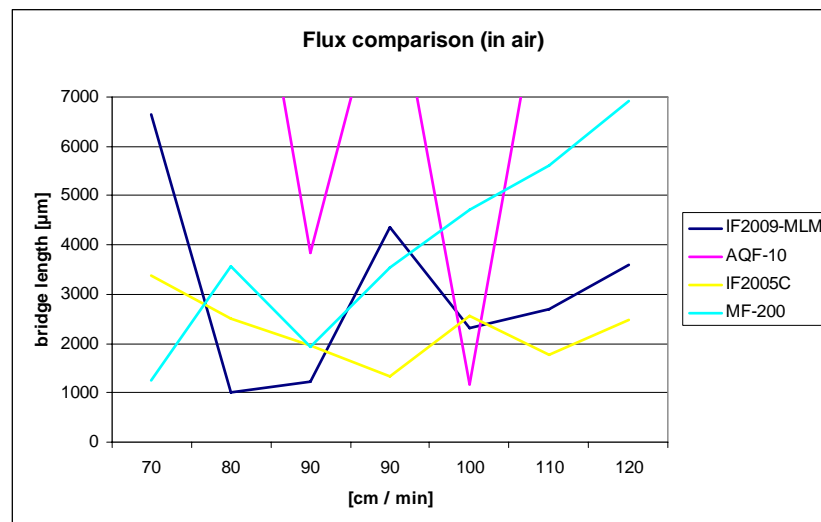


Kuva 58. Juotteella AQF-10 antaa siistit kylpyammekäyrät, jotka varoittavat käyttämästä liian suurta esilämmitystä. On huomattava, että esilämmitys kasvaa vasemmalle, suojakaasujuotos. Koneen asetukset olivat taulukon 4 mukaiset. Pysty akselin yksikkönä on oikosulkujen yhteispituus [µm].

Molempien käyrien erot ovat sen verran pienet, että kohinan eli satunnaisten tekijöiden vaikutus heikentää käyrien luotettavuutta. Kaikki tulokset jotka jäävät alle 2 000 µm ovat niin hyviä, että pienikin muutos tulee selvästi näkyviin kuvaajassa. Testin toistaminen saattaa muuttaa paremmuusjärjestystä näin pienillä eroilla tuloksissa.

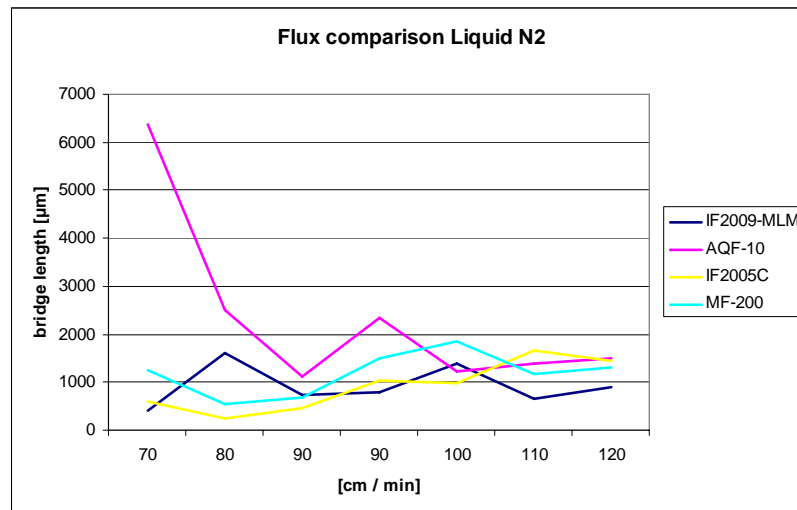
6.6 Fluksin valinnan vaikutus juotostulokseen

Monessa yrityksessä fluksi on valittu vertaamalla eri tuotteita samoilla koneasetuksilla. Tässä testissä on käytetty erilaisia asetuksia jokaisella fluksilla, joten testistä on saatavilla tuloksia, joita on saatu kunkin tuotteen parhailla asetuksilla. Varsinkin vesipohjainen AQF-10 käyttäytyy hyvin eri tavalla kuin alkoholipohjaiset fluksit. Fluksia ei voi valita yksinomaan näiden tulosten perusteella, koska pitää ottaa huomioon myös sivuvaikutukset, kuten suuttimen taipumus tukkiutua, juotoskoneen likaantuminen, piirilevyn likaantuminen, hajuhaitta, hinta ym. Tuotantoikkunatesti soveltuu hyvin fluksivertailuun, koska se kertoo lämmönkestävyydestä. Kuvista 50 ja 60 selviää, miten suuri merkitys fluksilla on juotostuloksiin. Molemmissa kuvissa on sama pysty-asteikko.



Kuva 59. Käytettyjen fluksien juotostulokset ilma-atmosfäärissä juotettuina. Koneen asetukset olivat taulukon 4 mukaiset.

Kuvan 60 tulokset osoittavat suuria eroja eri fluksien välillä. Vertaillessa kuvia 59 ja 60 voidaan havaita, että suojakaasu pudottaa oikosulkujen määrää murto-osaan kaikilla eri flukseilla. Nämä kuvat esittävät tutkimuksen merkitsevimmät tulokset.



Kuva 60. Juotostulokset suojakaasussa juotettuina. Koneen asetukset olivat taulukon 4 mukaiset.

Juotostuloksia ei voida verrata keskenään sellaisenaan, koska fluksit käyttäytyvät hyvin eri tavalla. Vaaka-akselissa pitää ottaa huomioon myös se, että esilämmitysmäärä kasvaa vasemmalle kuljetinnopeuden pienetessä tuotantoikkunan mukaan (taulukko 4). Asteikolla näkyy vain kuljetinnopeus. Sama asetelma koskee kaikkia testin vastaavia tuloksia. Testituloksissa on poistettu selvästi epäonnistuneita tapauksia, jotka poikkeavat paljon käyrästä.

6.7 Ilmastoinnin vaikutus juotostulokseen

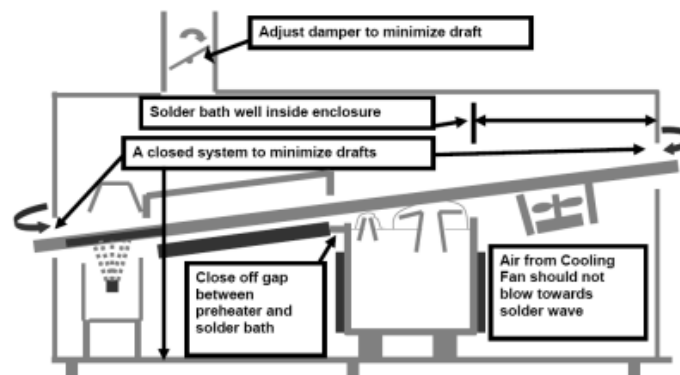
Koska perimmäiset syyt stokastiseen käyttäytymiseen olivat edelleen löytämättä, tehtiin erilaisia testejä, joilla voitaisiin löytää tuntemattomia muuttujia, joilla olisi merkitsevä vaikutus juotostuloksiin. Ensin mitattiin fluksauksessa käytettävän paineilman kosteuden muutoksia työpäivän aikana. Mutta koska kosteus oli hyvin pieni, tämä todettiin merkitsemättömäksi. Toisessa juotuskoneessa havaittiin, että poistoilman määrä vaihteli merkittävästi. Tämän vuoksi tehtiin ammattikorkeakoulun juotuskoneella testi, jossa laitetuulettimella puhallettiin ilmaa tuulettimella 0,15 – 1 m etäisyyksiltä juoteaallon takaosaan, ja testitulokset kirjattiin. Tuloksista kuvassa 61 voidaan päätellä, että kun puhallin on kohtuullisen lähellä juotosprosessia, ei tapahdu radikaalia muutosta. Ei ole uskottavaa, että juotuskoneen ilmastoinnilla olisi suurempaa merkitystä juotostuloksiin. Rivillä 1 = ei puhallusta, rivillä 2 puhallettiin 1 m etäisyydellä, rivillä 3 = 0,5 m, rivillä 4 = 0,25 m ja viimeinen rivi 5 = 0,15 m. Ylin palkki (sininen) on

oikosulkujen määrä, keskimäinen (punainen) on oikosulkujen summapituus mikrometreissä ja alin (ruskea) on puuttuvien juotosten määrä. Luku Bridge μm osoittaa oikosulkujen yhteenlaskettua pituutta.

Bridge μm	Graph %
2000	
2816	
2869	
2283	
2467	

Kuva 61. Aaltoon puhallettiin laitetuulettimella.

Testissä käytettiin SAC-juotetta, mutta SN100C saattaa käyttäytyä eri tavalla, koska SN100C esitteessä kuvan 62 mukaan on maininta, että pitää varoa kaikkea vetoa aaltoon päin.



Kuva 62. SN100C esitteessä on maininta vedosta [42],[44](kuva 9.2).

Juotevalmistajan [42] mukaan juotuskoneessa pitää säätää ilmanpoisto minimiin, sulkea piirilevyn kulkuaukot juotuskoneeseen, ilmarako esilämmityksen ja juotepadan välillä pitää sulkea sekä jäähdytystuuletinta pitää suunnata aallosta pois päin.

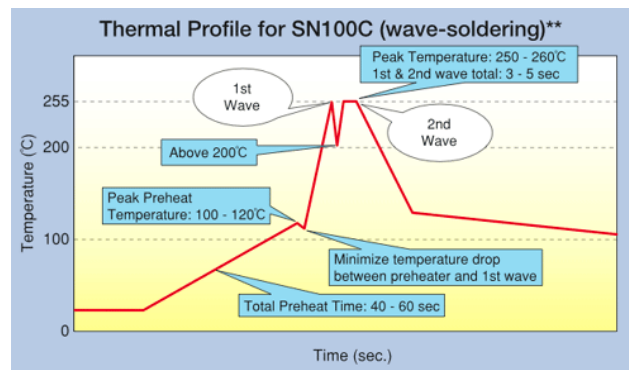
6.8 Typpigeneraattorin tuottaman typen vertailu nestetyyppeen

Molemmat kaasulähteet olivat muutaman päivän ajan yhtäaikaisesti asennettuna siten, että lähdettä voitiin vaihtaa vaihtventtiiliä kääntämällä. Testin alkuperäisenä tavoitteena oli testata juottamista eri kaasumäärillä. Tässä kohdassa oli yllättävää, että

typpigeneraattorilla saatiin maksimissaan 15 m³/h virtaus. Generaattorin spesifikaatioita tutkittua todettiin, että havainto oli oikea. Maksimituotto oli saavutettu. Nestetyypeä saatiin helposti tulemaan jopa 20 m³/h. Kuvassa 57 luvussa 6.4 nähdään suojakaasun puhtauden vaikutus käytettäessä AQF-10 fluksia. Myös muilla fluksityypeillä on saatu vastaavia tuloksia. Käytännössä hyvin pieni ero on selitettävissä sillä, että juotokoneessa on mitattu n. 7 % happijäämä aallon päältä mitattuna, jolloin syötettävän kaasun puhtaudella ei todistettavasti ole kovin suurta merkitystä. Syötettävän kaasun happijäämä 0,05% tai 0,005% on yhdentekevä 7 %:iin nähden. Typpigeneraattorin tuotto suurensi taulukon 3 mukaan kolminkertaiseksi jos sallittaisiin 1 % jäännöshappea. Voitaisiin käyttää pienempää typpigeneraattoria jos typen syöttömenetelmää onnistaisiin kehittämään edelleen.

6.9 Lämpöprofiilin vaikutukset juotostuloksiin

Esilämmityksen aikana on tärkeää, että fluksi lämmitetään valmistajan antamien ohjeiden mukaan, tosin empiirinen testaus antaa tarkemmat tiedot. Esilämmitysprofiili otettiin talteen kaikilla käytetyillä lämmitysnopeus -yhdistelmillä. Kuva 63 esittää juotevalmistajan antaman esimerkin lämpötilaprofiilista. Esilämmityksen säätöjen vaikutusta juotostuloksiin on tutkittu tarkemmin Arho Suomen diplomityössä [19].

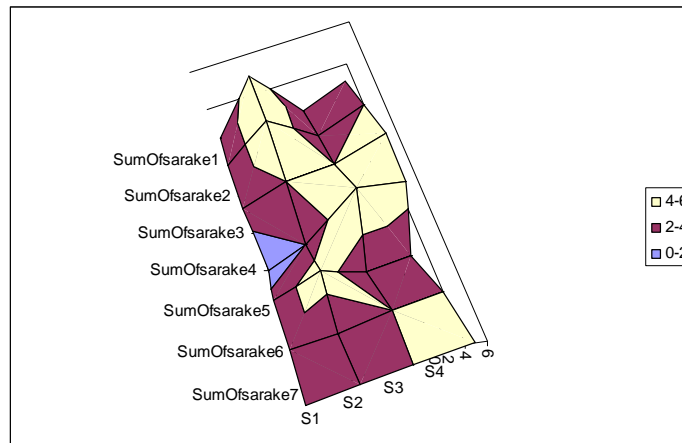


Kuva 63. Valmistajan suosittelema esilämmitysprofiili [42].

Tutkimuksen [19] mukaan pitkäaaltoinen IR-lämmitys lämmittää piirilevyn alapintaa epätasaisesti. Vaihteluja pintalämpötilassa esiintyy niin testien välillä kuin spatiaalisesti piirilevyn eri kohdissa.

6.10 Virheiden spatiaalisen jakauman tutkimus

Tietyllä juotoskoneella juotettiin kortteja, joissa oli hyvin vaikeasti juotettavia kohtia. Kortti oli pieni, joten niitä oli sijoitettu $3 \times 7 = 21$ kpl jokaiseen aihioon. Virhelukumäärästä voitiin kuvan 64 mukaan arvioida, minkälainen vaikutus juotoskohdan paikalla on todennäköisyyteen epäonnistua. Kuviossa jokainen ruutu osoittaa yhtä pientä piirikorttia.



Kuva 64. Juotosvirheiden jakautuminen aihioilla sijaitsevilla pikkukorteilla. Jokainen ruutu esittää yhtä korttia. Juotossuunta oli ylhäältä alaspäin.

Ruudun väri kertoo kohdassa esiintyvien juotosvirheiden määrän. Tulos kuvassa 65 muodostaa selvän kuvion, mutta virhejakauman muoto on vaikeasti selitettävissä. Arvailuksi jää mahdollisten kaasukuplien liikkuminen piirilevyn alla.

6.11 Tulosten tulkinta

Mittaustuloksilla on prosessin luonteesta johtuva kohinakerroin, joten jokin pieni epäjatkuvuuskohta käyrällä saattaa todennäköisesti johtua satunnaisesta tekijästä. Vesipohjaisella AQF-10 fluksilla saatiin vuosi aikaisemmin paremmat tulokset kuin yhdelläkään toisella fluksilla. Tätä ei ole pystytty selittämään, vaan spekuloidaan, että silloin olisi käytetty erää, joka sisälsi enemmän aktivaattoria (oksaalihappoa). Tätä tukee se, että fluksilla oli taipumus tiettyä suojapinnoitetyyppejä käyttäessä levittää pieniä juotepalloja piirilevyn ei-metalliselle pinnalle.

Ensin on valittava fluksityyppi. Tutkimuksessa ei voida suosia tiettyä toimittajaa, mutta tuloksista saattaa silti olla hyötyä. Muut käyttöön liittyvät seikat voivat olla tärkeämpiä kuin pieni ero tuloksissa. Tärkeämpää on katsoa, miten fluksi käyttäytyy omilla tuotteilla, onko tuotantoikkuna sopivan leveä, mitä asiakas vaatii ionisista jäänteistä piirilevyllä, vai tuleeko tuote, sisä- vai ulkokäyttöön.

Taulukko 5. Esilämmityksen asetus kuljettimen nopeuden mukaan. IR-lamput ovat kaikissa testeissä olleet 10 % ajasta valaistuna

Speed	PreHeatConv	PreHeat1 -2
70	130	370
80	115	350
90	100	330
90	100	330
100	85	310
110	70	290
120	70	290

Testilevyjä hankkiessa pitää olla tietoinen, että optimiarvot eivät ole testikortin parhaat tulokset, vaan testilevy ilman lisäpainoa indikoi parhaiten maksimaalista sallittua lämpö määrää. Koneen asetukset pitäisi asettaa sen mukaan, missä kylpyammekäyrä vasemmalla puolella alkaa nousta. Käyrän vaaka-akselissa on kuljettimen nopeus (Speed-sarake). Taulukossa 5 on kylpyammekäyrien tutkimuksissa käytetyt esilämmitysmäärät koneella ERS A EWS350.

6.12 Tilastolliset menetelmät

JOINUS-projektin tavoitteiksi asetettiin tulosten löytäminen tilastomenetelmien avulla. Näitä on toki hyödynnetty vaihtelevalla menestyksellä, mutta yrityksissä A ja B ei ole hyödynnetty DoE-menetelmiä. Yrityksessä B suoritettiin keskuspiestemenetelmää hyödyntäen Ossi Hämeenajan johtama testi, jonka yhteenvedossa todettiin, että vain noin 30 % virheistä voidaan vähentää optimoimalla säätöjä. Lisäksi todettiin samassa yhteenvedossa, että käytetyt lämpö määrät olivat symmetriseen kylpyammekäyrään nähden liian korkeat. [P3] Tämän jälkeen Turun ammattikorkeakoulun opinnäytetöissä [26], [28] ja [29] on tutkittu DoE-menetelmien soveltuvuutta juotosprosessiin, jossa on korkea kohinataso. Menetelmällä ei ole pystytty osoittamaan että juotuskoneen säädöt olisivat olleet pielessä. Ongelman ydin on, että kun tarvitaan paljon otoksia johtuen suuresta hajonnasta muuttuu prosessin laaduntuottokyky testauksen aikana.

7 POHDINTA

Projekti osoitti lähinnä, että juottaminen on vaikeaa ja siihen tarvitaan vielä laajempaa tutkimusta sen hallintaan saattamiseksi. Liitteessä 1 on lista muista tästä osaprojektista laadituista julkaisuista. Näissä tutkimuksissa on pyritty ratkaisemaan ongelmaa vain juotosprosessin parametreja muuttamalla. Muita yhtä tärkeitä juotossaantoon liittyviä vaikuttajia ovat juotettavien pintojen materiaalit ja niiden kunto, piirilevyn suunnittelun merkitys, koneladonnan vaikutus ja juotuskoneen huolto. Lisäksi olisi syytä tutkia fluksin vaikutusta juotteen pintajännitykseen sekä pintajännityksen vaikutusta juotossaantoon.

7.1 Yleisiä havaintoja juotosprosessin optimoinnista

Tähän mennessä tehtyjen tutkimusten perusteella ei löytynyt ratkaisua, millä saanto olisi saatu halutulle tasolle. Karkeasti voidaan kuvata, että pastajuotosmenetelmillä voidaan päästä 10 kertaa korkeampaan saantoon kuin aaltojuotosmenetelmillä. Eniten vaikutusta oli suojakaasun käytöllä. Tällä voitiin vähentää virhemäärät puoleen muuttamatta muita asetuksia. Seuraavaksi suurin merkitys oli fluksin valinnalla. Muut asetukset eivät ole kovin herkkiä muutoksille, mutta toki niiden pitää olla likimain kohdallaan. Sekä yrityksessä A että B käytettiin jo ennen JOINUS-projektia perusasetuksia esilämmityksestä, kuljetinnopeudesta ja juotepadan lämpötilasta, jotka osuvat mitatun tuotantoikkunan sisälle. Yrityksessä B kasvatettiin fluksin määrää hyvällä menestyksellä. Projektin myötä havaittiin useita ilmiöitä, joita ei mainita lähteissä ja jotka vaatisivat syvempää tutkimusta. Tärkein vaikuttaja on itse aalto, sen materiaalin koostumus, sen liikkeet ja fluksin kautta käytettävät kemikaalit. Seuraavia havaintoja on tehty:

- Juoteaalto absorboi oksidia, mikä tekee siitä suurimman satunnaisen vaihtelun aiheuttajan. Vastaavasta väitteestä ei ole löytynyt mainintaa tutkituissa julkaisuissa, mutta tehdyt havainnot viittaavat tähän. J. Sitek ja K. Bukat [45] mainitsevat julkaisussaan, että aalto on stabiilimpi suojakaasukäytössä.
- Absorboitunut oksidi voidaan poistaa kemiallisesti fosforilla, juoteöljyllä tai hapolla, kuten fluksilla [15].

- Vaihtoehtoisesti voidaan vähentää oksidin syntymistä suojakaasulla. Fluksi pitää aaltoa puhtaana kun juotetaan. Turun ammattikorkeakoululla on tekeillä kokeilu vähentää oksidin syntymistä hiilellä. $\text{SnO}_2 + 2\text{C} = 2\text{CO} + \text{Sn}$ [46]
- Suojakaasun lisävaikutus on juotoksen muodostumisessa. Juote on tehtyjen havaintojen mukaan nyt pinnaltaan ”notkeampi” kuin ennen.
- Suojakaasua käytettäessä prosessin hajonta / kohina pienenee huomattavasti eikä juotostulos enää riipu niin paljon siitä ”millä tuulella” juotoskone on [19].
- Kokonaisprosessia tutkimalla on selvinnyt, että ailahteleva käyttäytyminen johtuu juoteaallostaa, eikä esilämmityksestä ja asetuksista [P5]. Hämeenojan [P3] mukaan voidaan parantaa juotosprosessia vain 30 %:lla valitsemalla parhaat termiset ja kinesteettiset parametrit.
- Lyijyllisessä prosessissa suojakaasun käyttö oli lähinnä tutkimuksellista, mutta lyijyttömässä prosessissa se on edellytys kilpailukykyiseen toimintaan.

7.2. Suojakaasujuotoksessa tutkimattomia asioita

Kirjallisuudessa [7], [12], [32] ja [38] mainitaan hyvin suuria suojakaasun virtauksen 20–30 m³ volyymeja. Yritys A:n asennus on säädetty n. $4 \text{ m}^3 + 8 \text{ m}^3/\text{h} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$. Käytetty kansi ei ole kovin ekologinen, koska kaasu pääsee leviämään joka suuntaan. Aallon ympäröimää aluetta voisi koteloida jäännöshappipitoisuuden vähentämiseksi. Tarvittaisiin tarkempaa selvitystä pienien kaasumäärien riittävydestä.

Olisi periaatteessa hyvä idea tehdä yksi yksinkertainen testi juottamalla tuotantolevyjä eri tyhjäkäyntipuhalluksella. Tämä ei kuitenkaan onnistu, koska tulokset on havaittu muuttuvan vasta muutaman viikon käytön jälkeen. Päivä ilman kaasua ei ole tuotannolle ongelma, koska saanto ei huonone välittömästi kovin paljon. Tästä on herännyt ajatus, että suojakaasun etu olisi saavutettavissa muulla kuin suojakaasulla. Aktiivihiili saattaisi tehdä saman asian [46].

7.3 Tutkimusprojektin merkityksestä yrityksiin

Suojakaasun käyttöönotto yrityksissä osoittautui tutkimuksen merkittävimmäksi edistysaskeleeksi. Typpigeneraattorin toimittaja on maininnut toimittaneensa noin kymmenkunta laitteistoa aaltojuotosprosessin parantamiseksi. Tästä voidaan todeta, että projekti on ollut yleishyödyllinen myös niille yrityksille, jotka eivät ole osallistuneet JOINUS projektiin. Tutkimuksen toiseksi tärkein tulos on osallistuneiden yritysten kasvanut tietämys siitä, miten he itse voivat ratkaista esille tulevia ongelmia.

7.4 Jatkotoimenpiteet

Voidaan väittää, että koska juotoskone välillä juottaa joitakin kortteja täysin virheettömästi, syy virheisiin ei ole yksin juotoskoneessa vaan siinä, miten sitä käytetään. Väite viittaa siihen, että kannattaa kiinnittää huomiota myös epäoleellisilta tuntuviin seikkoihin, kuten komponenttien ja piirilevyjen juotettavuuteen sekä komponenttien sijoitteluun piirilevyille.

Projektin tavoitteena oli myös laatia suunnitteluohjeet piirilevysuunnittelijoille. Komponenttien sijoittelulla on suuri merkitys juotosten saantoon. Ongelmana ei ole komponenttien välinen etäisyys, vaan näiden sijoittelu keskenään. Läpiladontatekniikan ja pintaliitostekniikan yhdistely vaatii myös suunnittelusääntöjä. [P6], [47]

Lyijyttömässä juottamisessa esiintyy runsaasti aikaisemmin harvoja virhetyyppejä, joista mainittakoon juotospiikit ja ”limaiset” juotokset, joiden vähentämiseksi tarvitaan aivan uudenlaista koulutusmateriaalia [48].

Tämänhetkiset jälkiasennettavat suojakaasun putkistot ja suojakaasun kannet ovat arvokkaasta patentista huolimatta puutteelliset. Juotospataa on suojattava nykyistä paremmin kaasun kulutuksen ja jäännöshapen vähentämiseksi.

Tärkeimmäksi virheiden aiheuttajaksi on osoittautunut juote ja sen toiminta. Tämän tutkimiseksi pitää käyttää kvalitatiivisia menetelmiä, kemiaa ja virtausoppia.

Mainituista asioista, kiireellisin jatkokehitystehtävä olisi kootun tiedon perusteella laatia uudet ohjeet piirilevysuunnittelijoille komponenttisijoittelusta johtuvien virheiden

vähentämiseksi. Myös muiden virhetyyppien kuin oikosulkujen ja puuttuvien juotosten, kuten juotospiikkien, syyt tulisi tutkia [P6], [47].

8 YHTEENVETO

Kehittämistehtävässä haettiin menetelmää, jonka avulla aaltojuotoskonetta voitaisiin säätää optimaalisesti. Pyrittiin lähestyä ongelmaa useita tutkimusmenetelmiä käyttäen. Suojakaasujärjestelmän soveltaminen oli merkittävä osa projektia. Tulokset osoittivat, että suojakaasujärjestelmä parantaa juotostuloksia huomattavasti.

Toista kymmentä yritystä hankki suojakaasujärjestelmän tämän projektin tulosten ansiosta.

Osallistuneiden yritysten prosessiosaaminen on kasvanut. Nyt osataan itse säätää juotuskoneeseen parhaat parametrit.

Juotosvirheitä syntyy edelleen, vaikka jäljelle jäävä määrä on alle puolet alkuperäisestä. Näiden vähentämiseksi tarvitaan lisää tutkimustyötä. Esimerkiksi piirilevyn suunnittelun merkitystä on jo ryhdytty selvittämään.

9 LÄHTEET

- [1] A. Forsten, H. Steen, I. Wiling ja J. Friedrich, ”Development and Validation of Lead-free Wave Soldering Process,” *Proc. Soldering & Surface Mount Technology* (UK), ss. 29–34. 2000, Saatavilla: <http://www.emeraldinsight.com/>
- [2] 2002/95/EC, *Restriction of the use of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi, 2003.
- [3] K. Sunell, Joinus projektin tietopankki, Devera Oy, Turku, 2007, [WWW-dokumenttiarkisto], Saatavilla: <http://www.devera.fi/joinus/>
- [4] M. Arra, D. Shangguan, S. Yi, R. Thalhammer ja H. Fockenberger, ”Development of Lead-free Wave Soldering Process,” *IEEE Trans. Electron. Packag. Manufact.*, vol. 25, no.4, ss. 289–299, 2002.
- [5] W. M. Cheng ja H. Y. Wu, ”Lessons Learnt From Lead-free Soldering Implementation – real example,” *Proc. Asian Green Electronics*, Shanghai, Kiina, ss. 42–50, 2005.
- [6] ”Fundamentals of Wave Soldering Equipment Technology (Grundlagen der Wellenlot-Anlagentechnik),” *Productronic* 1999, Saksa, vol 9, ss. 34–35, 1999.
- [7] S. Stoyanov, C. Bailey, N. Saxena ja S. Adams, ”Optimising the Wave Soldering Process for Lead-free Solders,” *Proc. Asian Green Electronics 2005*, ss. 125–128, 2005.
- [8] J. Tapio, *Aaltojuotosprosessin optimointi*, insinööriyö, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2006, 34 s.
- [9] C. C. Dong, B. F. Ross ja A. Schwarz, ”N₂ Inerting for Reflow of Lead-free Solders: Study demonstrates the benefit of N₂,” *Proc. Advanced Packaging*, ss. 29–31, 2003.

- [10] A. Ali, *Suojakaasun käyttäminen aaltojuotoksessa*, insinööriö, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2007, 27 s.
- [11] M. Theriault, P. Wolff, R. Passman ja K. Redwitz, ”Improving the Wave Soldering Process with New Nitrogen Retrofit Systems,” *Proc. Nepcon West*. Anaheim, USA, 10 s., 1999. Saatavilla:
http://www.airliquide.com/file/otherelement/pj/pdf-tech-paper/n2_reprofit_59338.pdf
- [12] T. Holm (AGA Ab), ”Controlled Atmospheres: Soldering of Printed Circuit Boards,” Lidingö: Sweden, 1993, 37 s.
- [13] D. Buckley, ”Nitrogen is the Key to Lead-free [solder] Wetting,” *Proc. Electronic Production*, s. 29, 2000.
- [14] W. Falinski, H. Hackiewicz, G. Koziol ja J. Borecki, ”Problems and Preliminary Trials in Lead-free Soldering,” *Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress*, vol.1, ss. 74–78, 2004.
- [15] W. Klein, *Soldering in Electronics*, Isle of Man: Electrochemical Publications Limited, 1984, 470 s.
- [16] A. S. Ibrahim ja A. I. Ellis, ”Soldering Flux,” EP1200226, 2002.
- [17] H. H. Manko, *Solders and Soldering*, New York: McGraw-Hill, 1979, 540 s.
- [18] ”Spray Fluxing System Made for Wave Soldering Machines,” *Adv. Mater. Proc.*, s. 19, 2005.
- [19] A. Suominen, *Heat Behaviour of Lead-free Wave Soldering*, diplomityö, Turun yliopisto, Turku, 2007, 80 s.
- [20] Y. Wikström, Aaltojuotokoneen uudentyyppisen esilämmittimen kehittäminen, (tuotteistuksen asiantuntijaksi) projektityö, Turun yliopisto, Turku, 2007, 9 s.

- [21] A. Tuominen, *Elektroniikan pakkaustekniikan opintojakso*. Turun yliopisto, Turku, 2008, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.it.utu.fi/>
- [22] L. Snugovsky, P. Snugovsky, D.D. Perovic ja J.W. Rutter, ”Effect of cooling rate on microstructure of Ag-Cu-Sn solder alloy,” *Materials Science and Technology*, vol. 21, no. 1, ss. 61–68, 2005.
- [23] IEC1191 *Requirements for Terminal Soldered Assemblies*, International Engineering Consortium, vol. 1–4, 1988.
- [24] JOINUS Toolbox (software) Version 1.0, Y. Wikström, 2006.
- [25] Minitab (software) Version 15, Minitab Inc, 2007.
- [26] T. Viljanen, *Aaltojuotosprosessin optimointi Taguchi-menetelmällä*, insinööriyö, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2007, 24 s.
- [27] Excel (software) Version 2007, Microsoft, 2007.
- [28] O. Helppi, *Teollinen koesuunnittelu*, insinööriyö, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2006, 33 s.
- [29] M. Ohvo, *Optimointimenetelmän valinta aaltojuotosprosessin optimoinnissa*, insinööriyö, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2007, 50 s.
- [30] H. Sjögren, henkilökohtainen keskustelu, 1995.
- [31] M. Planck, *The Theory of Heat Radiation*, 3rd ed., Philadelphia: P. Blakiston's Son & Co, 1914, 410 s.
- [32] T. Fryer, ”Nitrogen is more than just hot air [lead-free soldering in a nitrogen atmosphere],” *Proc. Electronics Manufacture and Test*, ss. 21–22, 2001.
- [33] ”Solderflex -LIS Local Inerting System Data Sheet”, Linde A.G.,Tanska, 2006, 10 s.

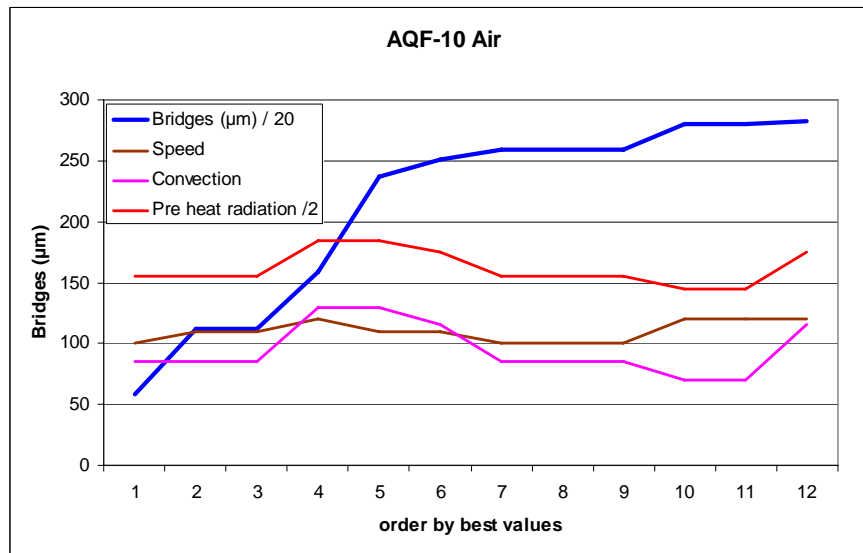
- [34] A. G. Linde ja A. G. Handels, ”Process for Wave Soldering with Lead-free Solder Materials (Verfahren zum Wellenloten mit bleifreien Lotmaterialien),” European Patent Application 740 975 A1, 1996.
- [35] On Site Gas Systems Inc. What is membrane technology and how does it work? (2007), [www-dokumentti], Saatavilla: http://www.onsitegas.com/what_is_membrane.asp
- [36] Innovative Gas Systems. Nitrogen Membrane Generators. , [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.igs-global.com/generon/default.htm>
- [37] Innovative Gas Systems, Products>Nitrogen PSA>Technology , [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.igs-global.com/nitroswing/technology.htm>
- [38] E. Wandke ja H. Isler, ”Method and Apparatus for Wave Soldering under Protective Gas,” DE19541445, May 15 1997.
- [39] S. Berengo ja E. Wandke, ”Wave Soldering Device,” EP1796863, June 20, 2007.
- [40] J. Tuppurainen, ”Kuonan muodostuksen tutkimusraportti,” Espoo, 2006.
- [41] T. Takemoto, Y.J. Joo, S. Mawatari ja R. Kato, ”Reduction of Dross Formation during Wave Soldering using Lead-free Solders,” *Proc. Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokio, Japani, ss. 1131–1136, 2001.
- [42] T. Nishimura, ”SN100C”, 2007, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.nihonsuperior.co.jp/english/sn100c/appraisal.html>
- [43] J.H.L. Pang, B.S. Xiong ja T.H. Low, ”Low Cycle Fatigue Study of Lead free 99.3Sn-0.7Cu Solder Alloy,” *International Journal of Fatigue*, Vol.26, no.8, ss. 865–872, 2004.
- [44] K. Sukanuma, *Lead-Free Soldering in Electronics*, New York: USA, Marcel Dekker, Inc., 2004, 342 s.

- [45] J. Sitek ja K. Bukat, ”Influence of Flux Activity on Process Parameters and Solder Joints in Lead-free Wave Soldering,” *Proc. Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress 2005*, ss. 84–89, 2005.
- [46] R. Padilla ja H. Y. Sohn, ”The Reduction of Stannic Oxide with Carbon,” *Proc. Metallurgical and Materials Transactions B*, s. 109, 1978.
- [47] M. Olshin, *Piirilevynsuunnittelun vaikutukset juotteen nousuun aaltojuotoksessa*, insinööri työ, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2007, 35 s.
- [48] T. Kujala, *Visuaalinen työkalu aaltojuotosprosessin säätöön*, insinööri työ, Turun ammattikorkeakoulu, Turku, 2009, 47 s.

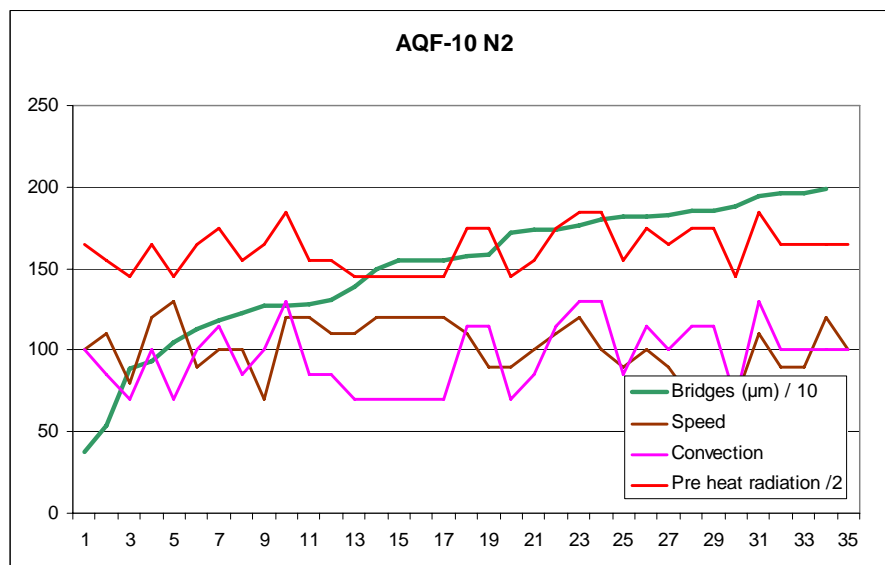
Liite 1. Testitulokset

Tässä tutkimuksessa on varioitu juotteen tyyppiä ja ympäröivää kaasua. Tässä liitteessä Vaaka-akselin arvot eivät ole pelkästään nopeuden muutos, vaan asetusarvot ovat taulukon 4 mukaiset.

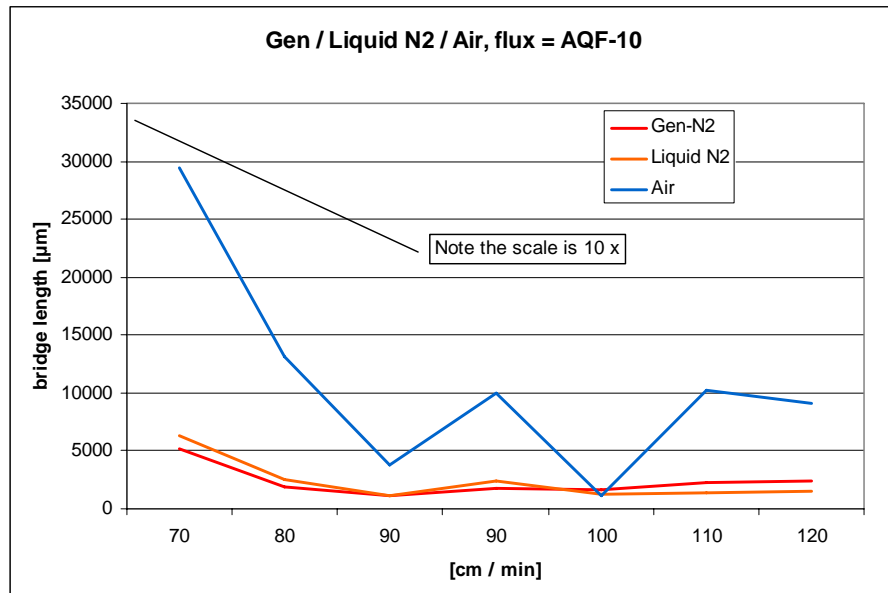
Juottaminen fluksilla AQF-10 (Amaprom)



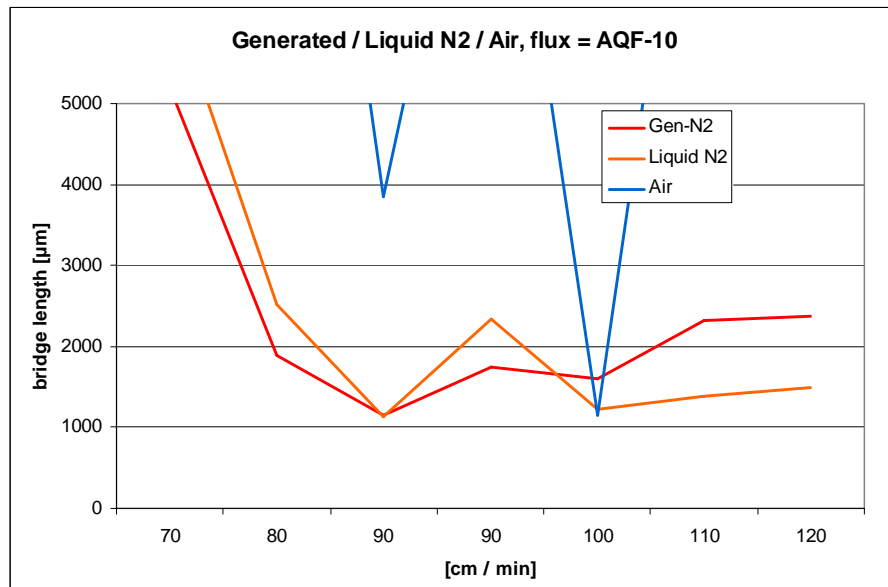
Kuva 1. Parametrit, millä on saatu 12 parasta juotostulosta AQF-10 fluksilla ilma-atmosfäärissä.



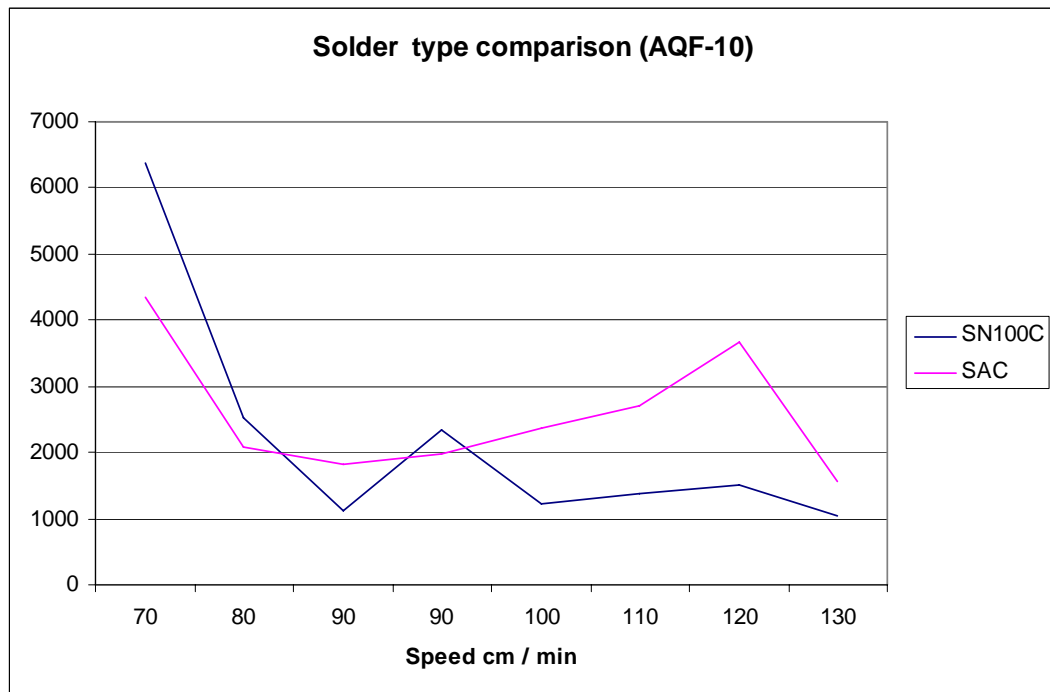
Kuva 2. Oikosulkujen kannalta parhaat 35 parametrit typpi-atmosfäärissä.



Kuva 3. Suojakaasun vaikutus oikosulkuihin.

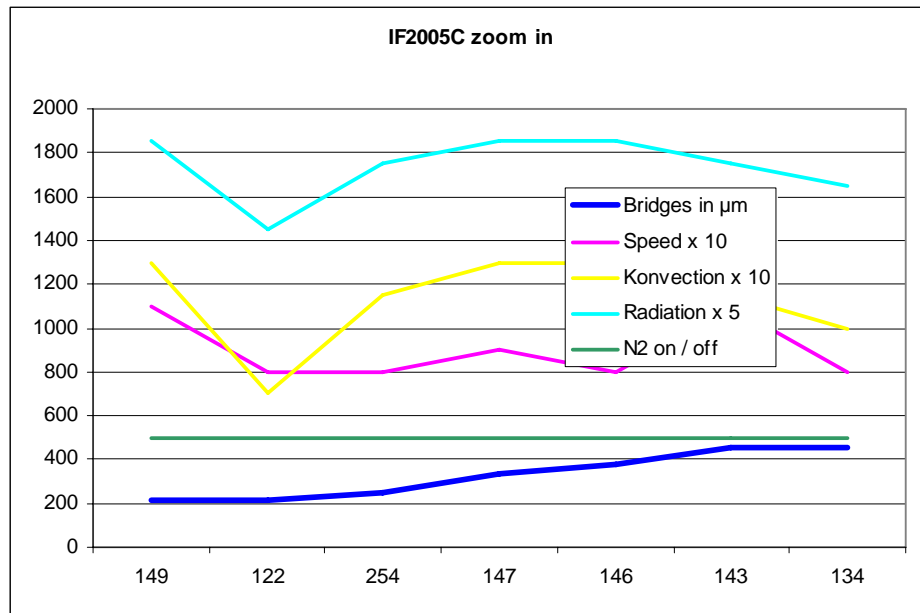


Kuva 4. Sama kuin edellinen kuva, mutta asteikolla 0-5000 μm .

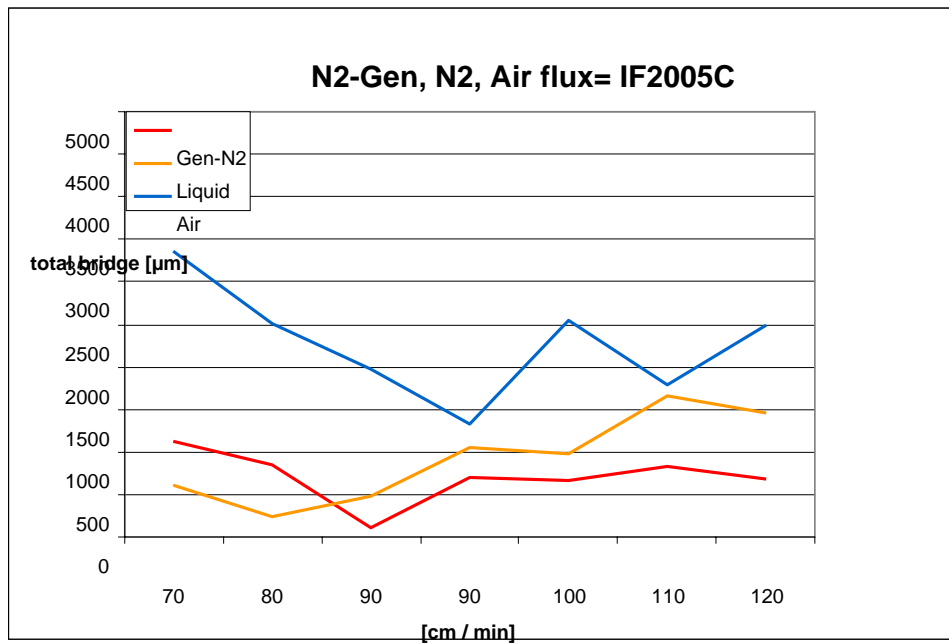


Kuva 5. Juotteen tyyppin vaikutus oikosulkuihin (AQF-10).

Juottaminen fluksilla IF2005C (Interflux)

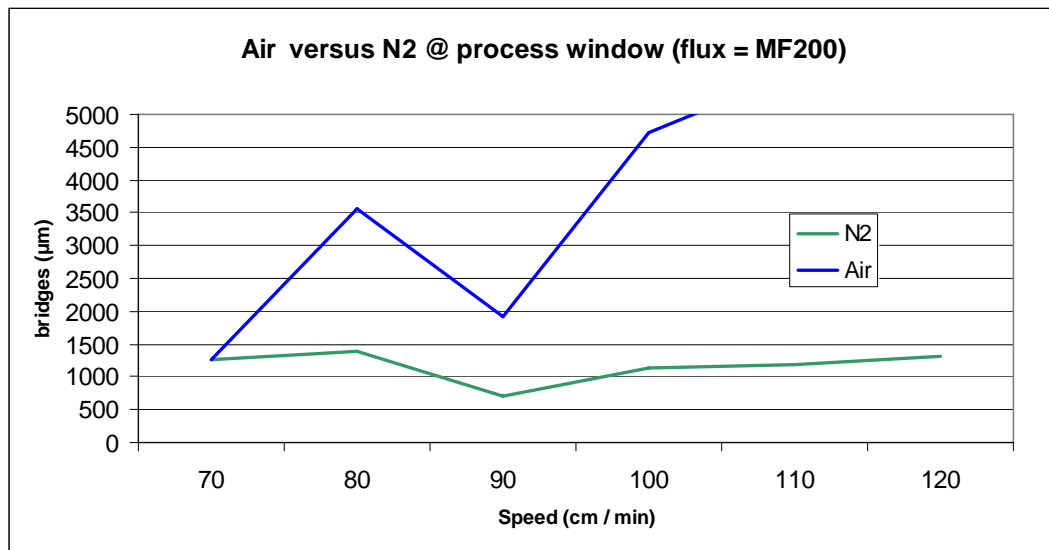


Kuva 6. Parhaat parametrit fluksille IF2005C.

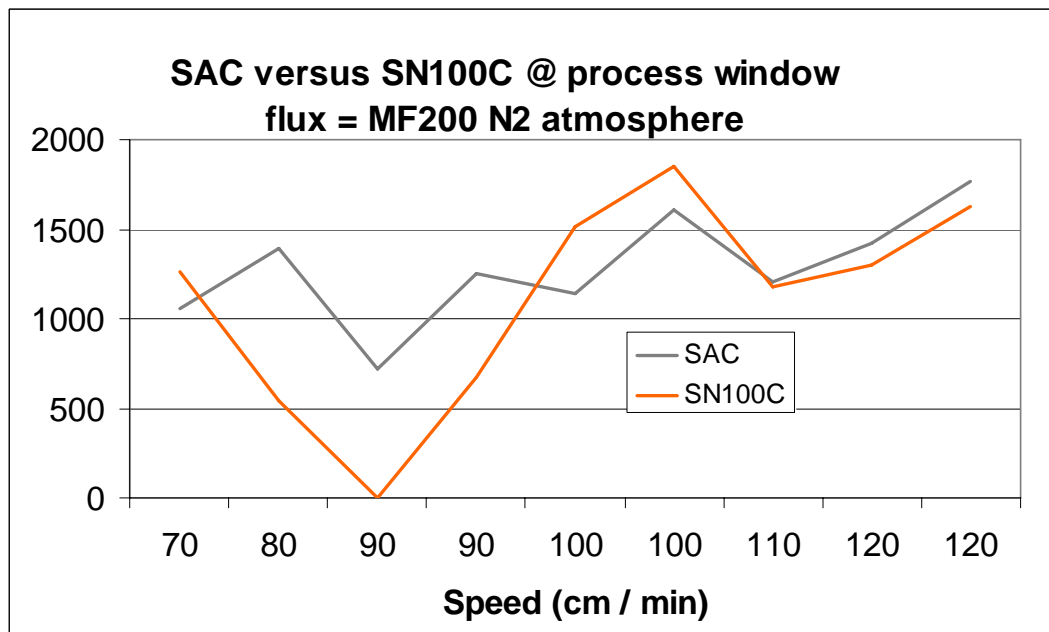


Kuva 7. Atmosfäärin vaikutus oikosulkuihin (IF2005C).

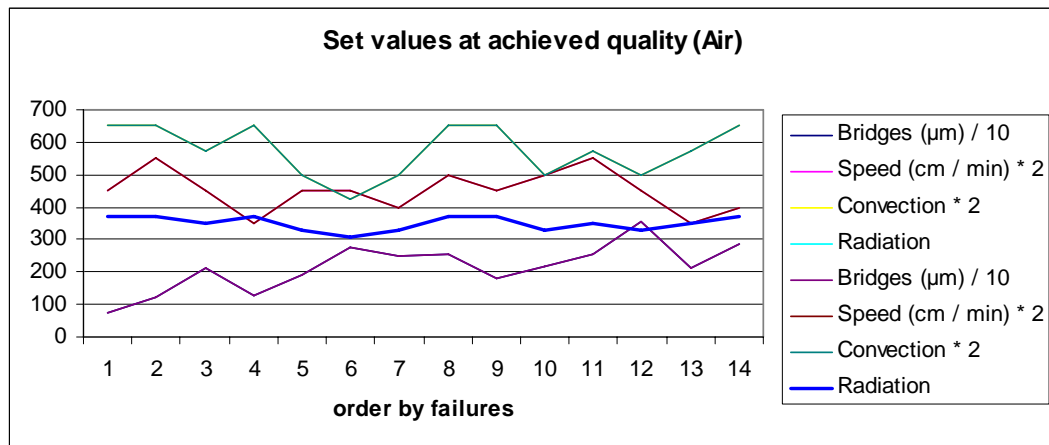
Juottaminen fluksilla MF200 (Multicore)



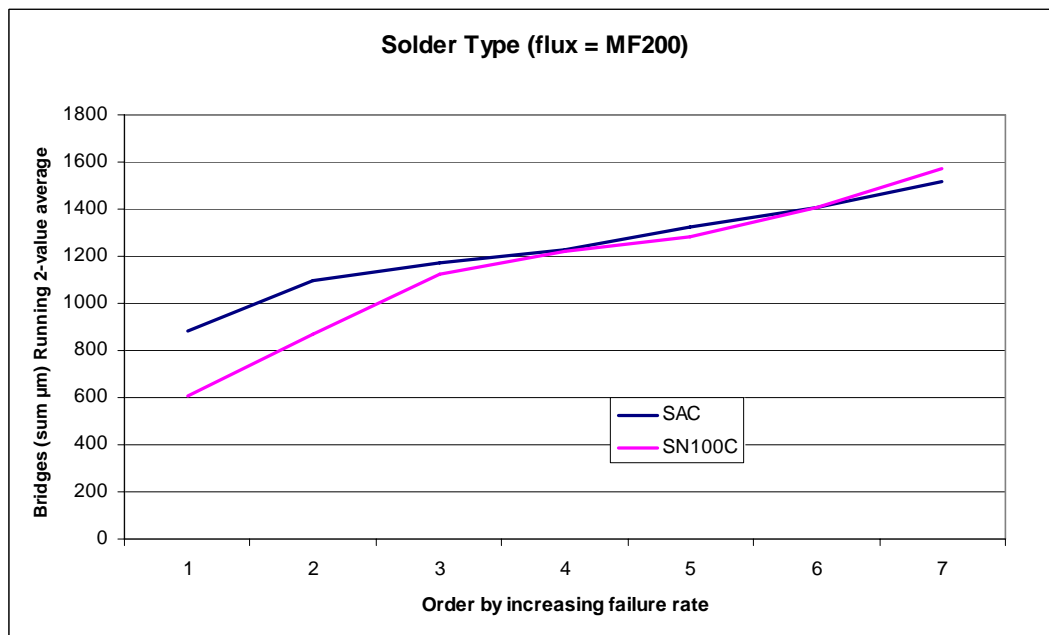
Kuva 8. Suojakaasun vaikutus oikosulkuihin.



Kuva 9. Juotteen tyyppin vaikutus oikosulkuihin.

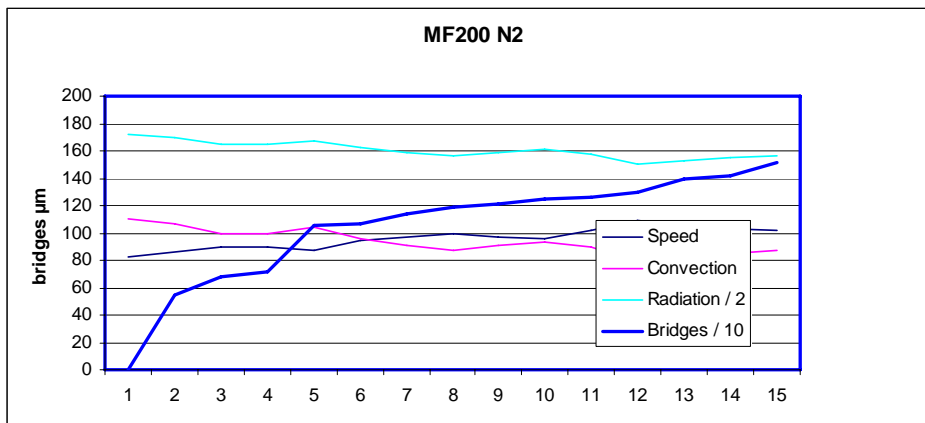


Kuva 10. Parhaat paramertit oiksulkujen suhteen fluksilla MF200.

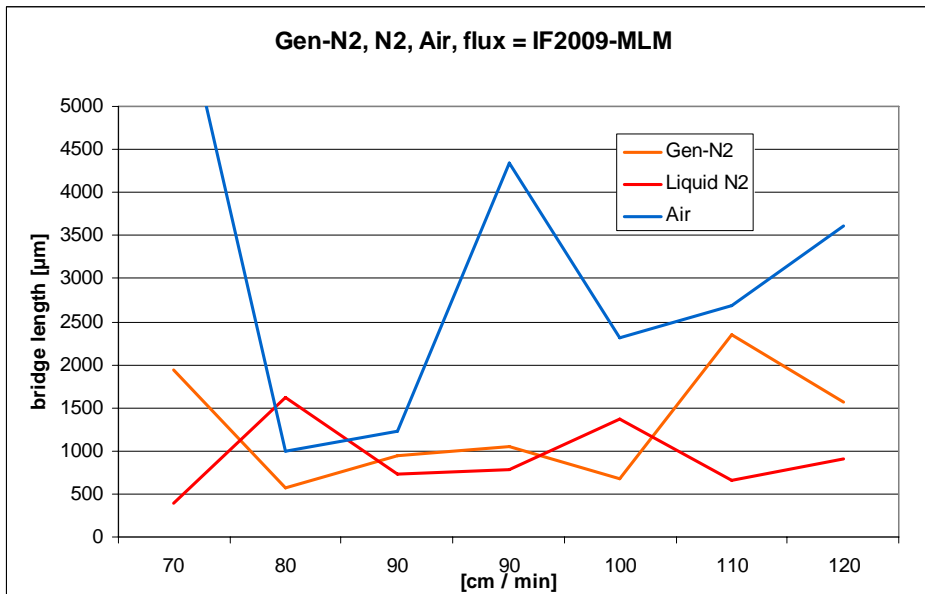


Kuva 11. Juotteen tyypin vaikutus (MF200, N2).

Juottaminen fluksilla IF2009-MLM (Interflux)

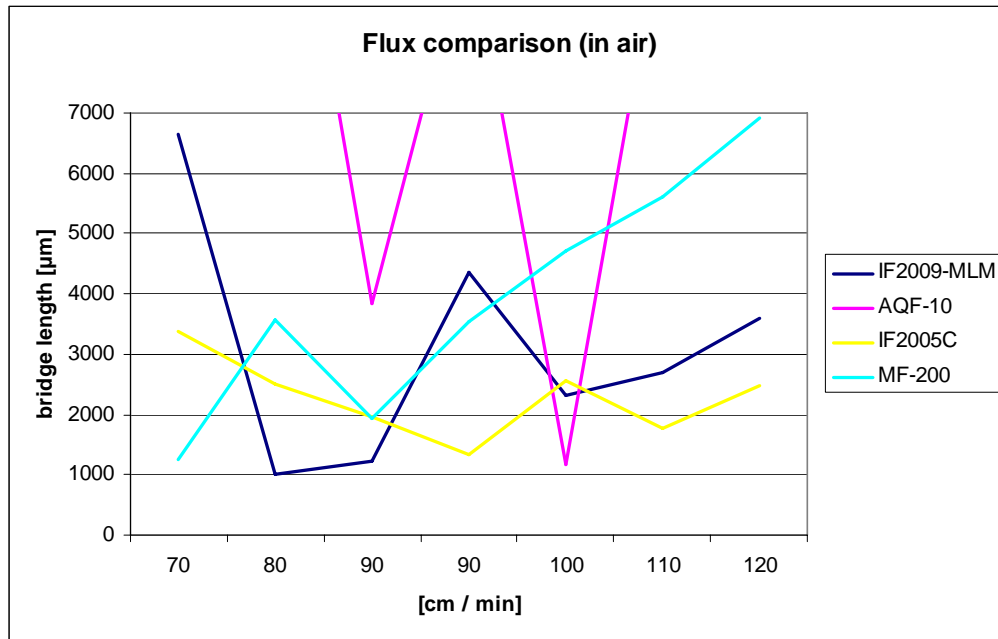


Kuva 12. Parhaat parametrit (MF200, N2).

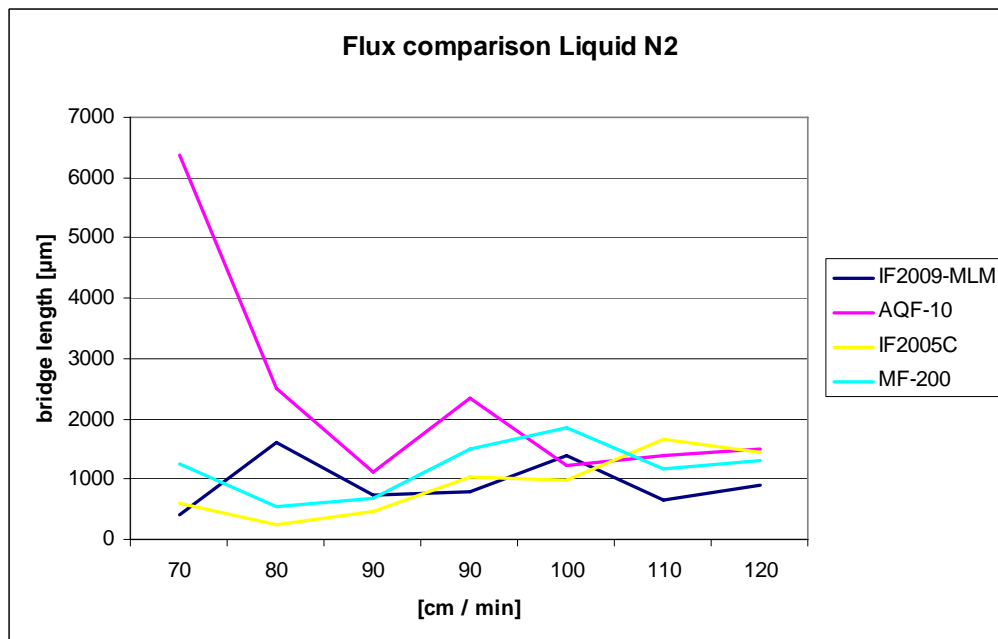


Kuva 13. Suojakaasun vaikutus oikosulkuihin.

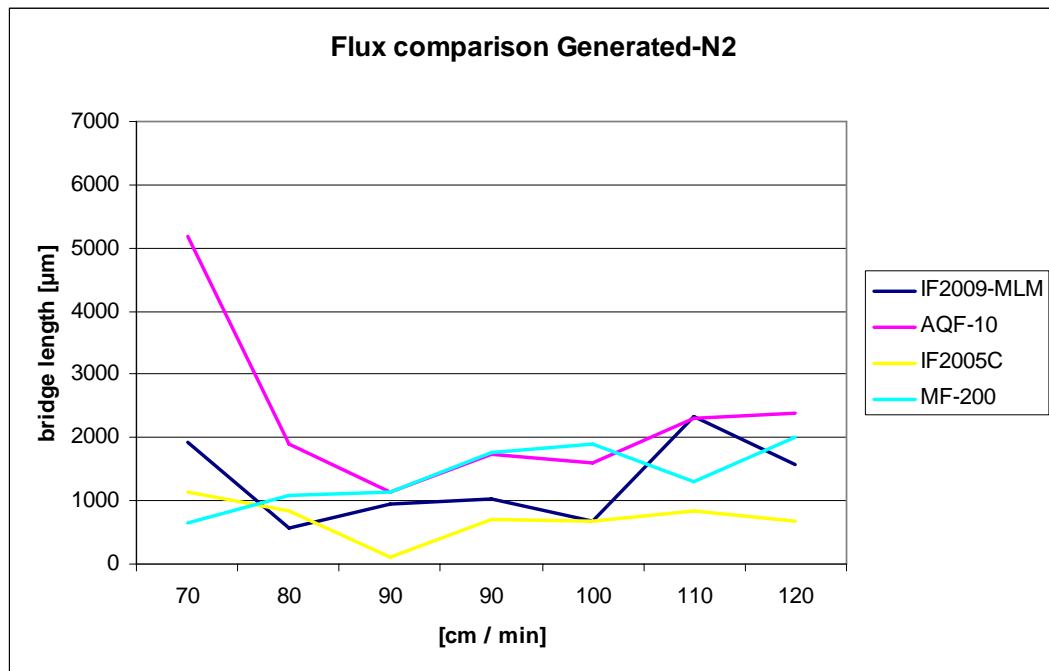
Fluksivertailu



Kuva 14. Projektissa käytettyjen fluksien vertailu juottaessa ilmassa. Huomaa suurta hajontaa!



Kuva 15. Vastaava fluksivertailu kuin edellinen kuva, paitsi suojakaasulla.



Kuva 16. Fluksivertailu suojakaasu ympäristössä, jossa typpi on tuotettu paikallisesti typpigeneraattorilla.

References

P1



Piirilevyn suunnittelu aaltojuotosmenetelmää varten

Tämän artikkelin ei ole tarkoitus antaa suunnittelijalle valmiita liitosalueiden mittoja koska jokainen prosessi on erilainen vaan lähinnä tuoda esille ne ongelmat jotka aalto tuo mukanaan sekä myöskin vihjeitä niistä ratkaisuista joita jokaisen yrityksen on löydettävä. Näihin tuloksiin olen päätenyt opettajani Atso Forsténin kanssa käytyjen keskustelujen pohjalta.

Aaltojuotostekniikka on myös tulevaisuuden juotosmenetelmä.

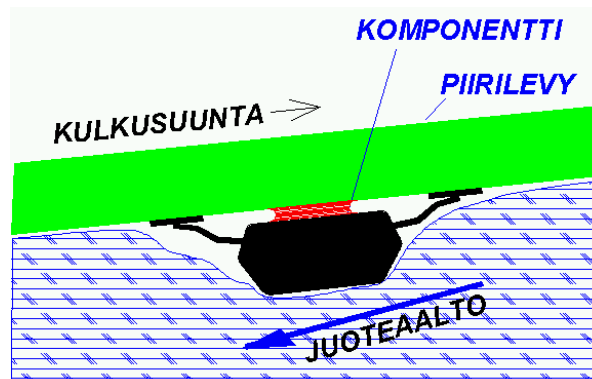
Aaltojuotostekniikan ylivoima perustuu kykyyn yhdistää tuotteen monet erilaiset rakenneosat yhdessä työvaiheessa. Aaltojuotostekniikkaa pidetään nykyään poistuvana juotosmenetelmänä pastajuotoksen yleistyessä pienten pintaliitoskomponenttien käyttöönoton myötä.

Elektromagneettiset häiriöt EMC joudutaan tuotteessa usein kesyttämään tiiviillä metallikotelolla. Piirilevyn kiinnitetään liittimiä joihin kohdistuu pieniä voimia kaapelia liitettäessä. Levyn kiinnitetään muita piirilevyjä esimerkiksi pystyasentoon. Jopa tuotemoduulin runko voidaan käsittää piirilevyn juotettavana komponenttina. Tuotteen ominaisuuksia joita voidaan rakentaa aaltojuotosmenetelmää hyödyntäen, voidaan luetella lähes loputtomiin. Siksi kyseinen menetelmä tulee soveltumaan tulevaisuuden tuotantotekniikkaan, varsinkin kun tuote on pienehkö ja valmistussarjat ovat kohtuullisen pitkiä.

Suunnittelun lähtökotana on aallon liike.

Aallon ensimmäinen kosketus piirilevyn pintaan nostaa ensin piirilevyn pinnalla olevan kuivatun juoksutteen lämpötilaa nopeasti. Mikäli pinnassa on onkaloita, esimerkiksi painavan komponentin alla jossa juoksute ei ole täysin kuivunut, tapahtuu kuivuminen kiehuen juotostapahtuman aikana tuottaen juotosta häiritseviä kaasukuplia. Komponentteja jää kastumatta. Erityisesti piirilevyn kiinnityskynsien kohtaan jäänyt fluksi kiehahtaa suhisten. Kuuntelemalla mahdollista suhinaa juoteaallolla, voidaan havaita mahdollisesti liian heikko esilämmitysmäärä.

Ensimmäisen puolen sekunnin aikana komponentin liitoskohtien pitää kastua juotteeseen. Edellytykset tähän ovat: aallon kosketus metallisiin osiin, fluksin aktivaattori on etsannut pinnat "halukkaiksi" tarttua juotteeseen ja lämpötila on riittävä. Kastumiseen kuluu aikaa. Piirilevyn pinnalle jäänyt ylimääräinen aktiivinen osa fluksista vaikuttaa juoteaallon pinnan ominaisuuksiin vastaavalla tavalla kuin liitosalueisiin, pelkistäen oksideja ja näin pienentäen juotteen pintajännitystä niin että juoksevuus paranee.



Kuva 1 Katvealueen muodostuminen komponentin osuttua juoteaalltoon



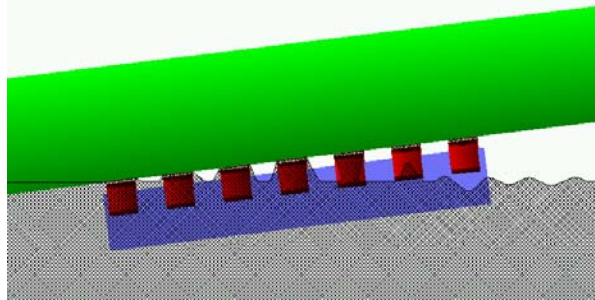
Kuva 2 Aallon pintajännityksen muodostama katvealue ylhäältä.



Komponentin uidessa aallon lävitse on tärkeintä että lämpö riittää leviämään komponenttien jalkoja pitkin piirilevyn toiselle puolelle täyttäen läpivientiholkkit ja muodostaen piirilevyn yläpuolelle asti oikean muotoisen lujan juotosliitoksen. Pintaliitoskomponenttien tilanne on päinvastainen, näiden kotelon on suojattava sen sisäistä rakennetta liian nopeasta ja liian suuresta kuumenemisestä. Vastaavasti sisäisten ja ulkoisten rakenteiden lämpölaajenemiskertointen pitäisi mahdollistaa että sisäiset, kotelon ja piirilevyn välisen jännityksen pysyvän hallittuna jäähtytysvaiheen loppuun asti. Näistä ristiriidoista johtuen päädytään useimmiten maltilliseen juoteaallon lämpötilaan. 245-250°C (lyijytön 260)

Juotosjäljen tarkkuus määrää sallitut komponenttityypit ja niiden sijoittelutiheyden.

Juotosvaiheen loppuosasta eli taka-aallosta komponentti nousee varovasti. Liitosalueeseen jää juuri sopiva määrä juotetta luotettavan ja helposti tarkastettavan liitoksen aikaansaamiseksi. Onnistumiseen liittyy kuitenkin monta tekijää. Juotuskoneen puolesta aallon pinnan kuuluu kulkea samaa vauhtia kuin piirilevy. Siinä ei saa esiintyä värinää, pyörteitä eikä muita tahattomia aaltoliikkeitä.

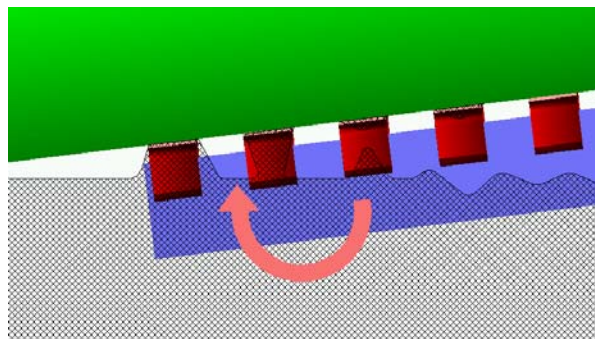


Kuva 3 Liitosalueen muodostus aiheuttaa aaltoliikkeitä jotka häiritsevät juotosliitoksen muotoilemista.

Komponenteista ja liitosalueista johtuvat taka-aallon liikkeet on minimoitava jo suunnitteluvaiheessa. Kun heität pienen kiven veteen, syntyy pieniä rengasmaisia aaltoja. Isommasta kivistä tietenkin suuremmat. Piirilevyyn pitää siis liimaantua mahdollisimman pienet pisarat joiden on palattava aaltoon mahdollisimman huomaamattomasti.



Kuva 4 Aaltoilun syntyminen (kuva TS 21.2.03)



Kuva 5 Kolmanneksi viimeksi nousevan jalan aiheuttama aaltoliike vaikuttaa kahden viimeisen jalan taipumiseen oikosulkuihin.



Edellä mainitut seikat ohjaavat suunnittelun valitsemaan pinta-alaltaan pienet liitosalueet. Kastumisen kannalta on tärkeää että liitosalueet ulottuvat mahdollisimman kauas rungosta mutta oikosulkujen kannalta olisi parempi että olisivat lyhyemmät, ainakin viimeisten jalkojen osalta. Tutuilla tinavarkaillakin tämä ongelma vähenee merkittävästi. Kahden viimeisen jalan kohdalla tilanne poikkeaa myös siltä osin että komponentin kotelo nousee tällöin aallosta vaikuttaen aallon pinnan liikkeisiin.

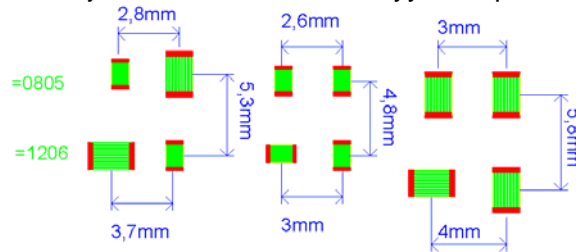
Liitosalueiden suunnittelu voidaan jakaa kolmeen osaan aallon eri kohtien vaatimusten mukaan.

1. Kastuminen
2. Imeytyminen
3. Irtoaminen

Heikko kastuminen johtaa puuttuviin juotoksiin.

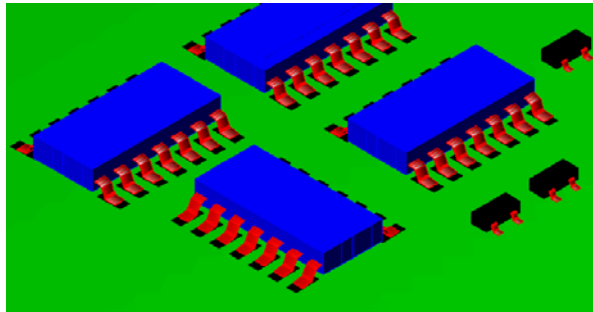
Juoteaalto on pinnaltaan nahkamainen, eli ei taivu pienellä säteellä koskettaakseen komponenttien väleissä olevia liitosalueita. Fluksin toiminta parantaa tilannetta mutta myös suunnittelulla on suuri merkitys.

Helppoin tapa korjata tilannetta on jättää riittävän suuri etäisyys komponenttien välille.



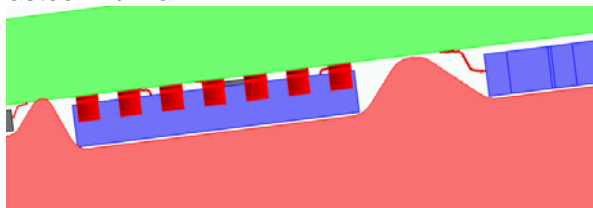
Kuva 6 Philipsin esitteen mukaiset komponenttietäisyydet.

Helppo on ottaa käyttöön komponenttivalmistajan ohjeet, mutta muutama komponentti voi jäädä asettelemta.



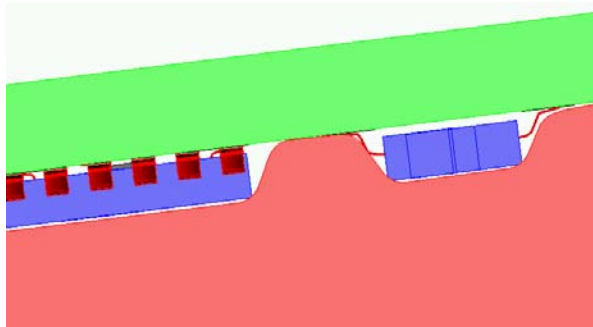
Kuva 7 Komponentteja sijoitettu säännöllä etäisyys = kaksi kertaa komponentin korkeus.

Yleinen nyrkkisääntö on että komponenttietäisyys on kaksi kertaan komponentin korkeus, mikä antaa sitkeälle aallon pinnalle 45 asteen kulman.



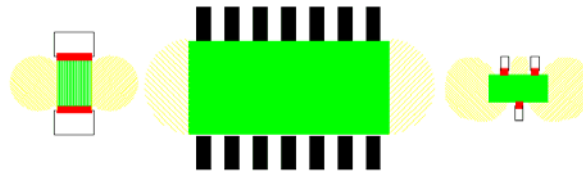
Kuva 8 Aallon pinta ulottuu kohteisiin 15 asteen kulmalta.

Tilanne muuttuu toisenlaiseksi kun aallon pinta on tarttunut jalan metalliosaan.



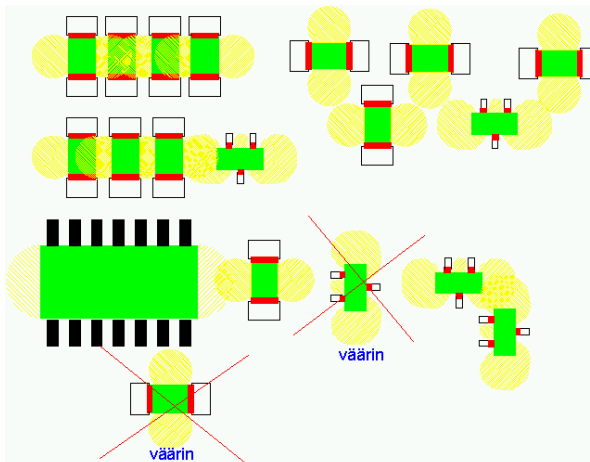
Kuva 9 Aallon katvealue on pienentynyt, katso myös kuvaa 2C.

Kastuminen ei ole mahdollista niin kauan kuin ei-metalliset osat suorastaan hylkivät juotteen pintaa. Syntyy tilanne jossa pelisäännöksi muodostuu - asetta katvealueeseen osat joita ei juoteta.



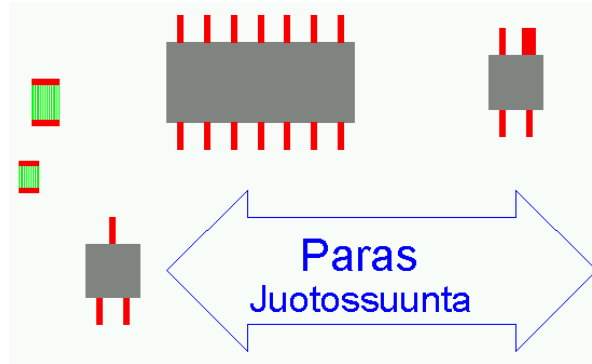
Kuva 10 Asettamalla ei-metalliset osat vastakkain vähenee katve-alueen merkitys.

Päinvastainen tilanne syntyy kun yksikin metalliosa on onnistunut imaisemaan aallon pinnan piirilevylle asti. Aallon on helppo päästä koskettamaan lähellä olevaa liitosaluetta mikäli sen toisella puolella ei ole katvealuetta.

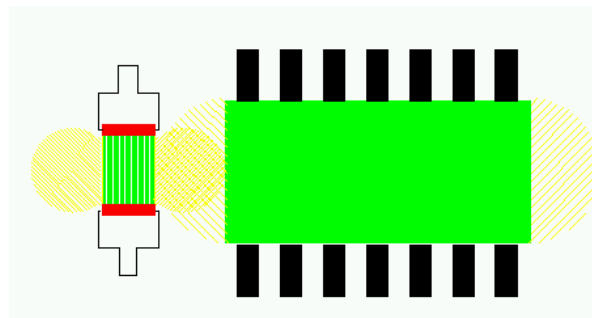


Kuva 11 Kokoelma hyviä ja huonoja komponenttisijoituksia. Juotossuunta on vasen-oikea.

Uusi sääntö on: käännä metalliosat vastakkain ja katveet vastakkain. Näin voidaan saavuttaa lähes sama sijoittelutiheys kuin pastajuotosmenetelmällä. Samasta syystä ja lisäksi aallon virtauksesta johtuen kannattaa sijoittaa komponentit jalat kohtisuoraan aaltoon nähden.

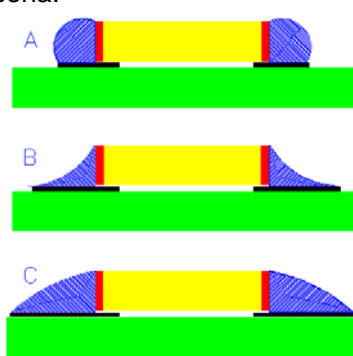


Kuva 12 Juotossuunta



Kuva 13 T-muotoiseksi modifioidut liitosalueet.

Periaatteessa kastuvuus paranee liitosalueiden koon mukaan. Mikäli testin jälkeen havaitaan puutteellisuutta juotoksissa voidaan yksittäisiä liitosalueita pidentää esimerkiksi tekemällä johtimen suojapinnitteeseen avaus, tai systemaattisesti mikäli komponentti on korkea. Tärkeää on kuitenkin pitää lopullinen juotosliitos oikean muotoisena.

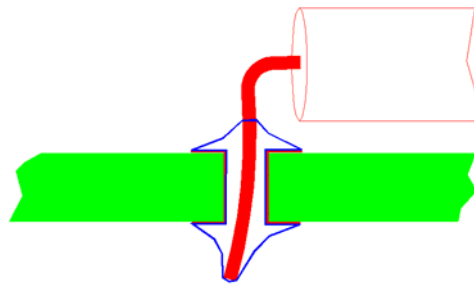


Kuva 14 Liitoksen pitää olla myös joustava, kuten B-kohdassa.

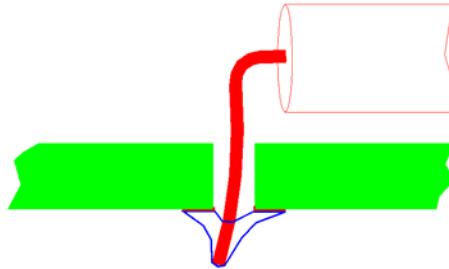
Lisäksi kannattaa varautua siihen, että IC-piirin alle on voinut jäädä kuivumatonta fluksia, joka juotoksen aikana höyrystyy pakoon.

Imeytymisvaihe ei onneksi liity pintaliitostekniikkaan.

Läpiladottavien komponenttien on muodostettava luotettava liitos piirilevyn molemmin puolin. Läpiladontatekniikassa tarkastellaan myöskin piirilevyn yläpuolta.



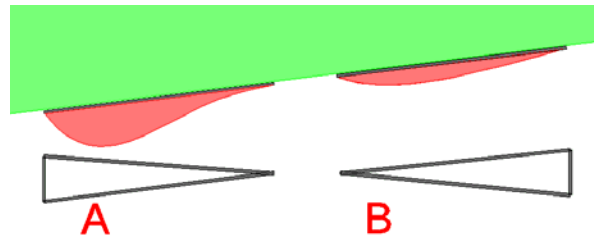
Kuva 15 Kaksipuolisen piirilevyn juotosliitos on imeytynyt jalkaa pitkin ylös.



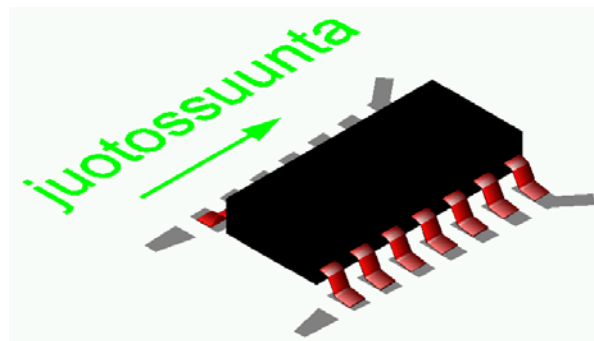
Kuva 16 Vastaavasti yksipuolisen piirilevyn tarkastus ei paljasta heikkoa liitosta, koska imeytyminen reikään ei ole hallittu.

Irtoamisvaiheessa muodostuu oikosulkuja.

Isommat liitosalueet saavat aikaan enemmän aaltoliikettä. Lisäksi muodolla on suuri merkitys. Kun tavoitteena on, että pieni määrä juotetta jää roikkumaan piirilevyyn, on parempi että liitosalue kapenee juotoksen myötä.



Kuva 17 Liitosalue A on loppuosaltaan leveä ja B kapeampi.



Kuva 18 SO-kotelon säännönmukaiset liitosalueet

Kuvan mukaisella liitosalueella kaikkia mainittuja sääntöjä on noudatettu.

1. Komponentin etuosassa on siivet. Nämä ovat tuskin tarpeelliset normaalissa tilanteessa mutta mikäli on paljon katvealueita, saattavat tulla tarpeeseen.
2. Liitosalueiden pituus pienenee vähitellen jotta aallon pinta pysyisi rauhallisena.
3. Juotevarkaita on kavennettu edellisen aiheen opetuksesta.

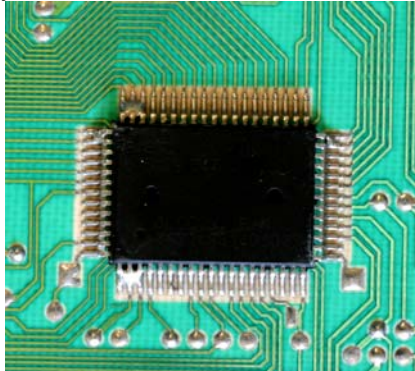
Yhteenveto:



- Valitse vain komponentteja jotka soveltuvat aaltojuotokseen muotonsa, lämpötilansa, ja hermeettisyytensä suhteen.
- Komponenteissa ei saa esiintyä alumiini-, sinkki- tai messinkipinnoitteita.
- Liitosalueiden geometria on suunniteltava tarkasti.
 - Arvioi ladontakoneiden sijoittelun toleranssit ja varmista että komponentti tulee aina olemaan kokonaan liitosalueella. Jos kone on epätarkka, suurena liitosalueet.
 - Prosessin taipumus oikosulkuihin
 - Puuttuvat juotokset
 - SO-koteloiden ja muiden "Gull Wing" jalkojen liitosten problematiikka.
 - Liitosalueiden komponenttikohtainen modifiointi saannon parantamiseksi.
- Käännä komponentit juotossuunnan mukaan
- Käytä hyväksi katvealueet
- Tee juotostestit prototyypillä ja käytä ideoita hyväksesi liitosalueiden modifiointiin lopullisessa versiossa.
- Tee käytännön testejä ja vie parhaat tulokset CAD-kirjastoon.
- Vältä sijoitusta lähelle piirilevyn reunoja ja sen irtileikkauskohtia.
- Sijoittelutiheys optimoidaan tekemällä em. sääntöihin kompromisseja.

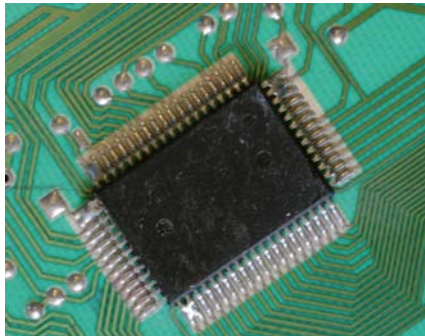
Esimerkkejä tuotteista.

100-jalkainen FlatPack on yritetty juottaa aallossa. Kulku on vasemmalta oikealle.



Kuva 19: Komponentti on juotettu suorassa.

Tulos paranee sijoittamalla komponentti 15-45 asteen kulmaan.



Kuva 20: Tulos ilman tinavarkaita



Kuva 21: Onnistunut liitosalue.

Lähteitä:

- Kokemuksia suunnitteluohjeiden kehittämisestä Teleste OYJ:llä vuosina 1986-2000.
- VTT / Projekti Kotel 2: Luotettavuus pintaliitostekniikassa
- Wassinkin kirjat
- Opetusmateriaalini Turun ammattikorkeakoululla: <http://dalton.dc.turkuamk.fi>

P2

Managing flow solder production window at RoHS compatible processes.

Yngvar Wikström, Eero E Eloranta
Turku Polytechnic, Sepänkatu 1, 20700 TURKU
E-mail yngvar.wikstrom@turkuamk.fi
eero.eloranta@students.turkuamk.fi

Abstract

Before 1/7 2006 all flow soldering process equipment have been adapted to the RoHS directive. It has already become aware that achieving the same process yield, as used to, a very narrow process window must be performed. Which are the adequate parameters of the process window, how to measure the parameters, are the main questions to maintenance staff and furthermore how to convincingly consult the R&D about the even more critical board layout requirements is the even higher challenge to the process engineers.

Until implementation of the RoHS, the flow solder parameters were measured by picking temperature at some points, looking at the results and if not satisfied adjusting by using the trial and error method until a reasonable result was achieved. Now the process window at the leadless process is so narrow that parameters, which were not of importance before, have to be recognized and continuously monitored. The influence of many parameters cannot be visualized just by inspecting the soldering result at a specific moment. Some parameters can be managed only by analyzing using statistic process control and mathematical tools.

There is need for test boards to monitor the soldering results, giving a quality factor as for example one figure for missing joints and one for solder bridges. Also other factors are of interest. The board must produce statistical data.

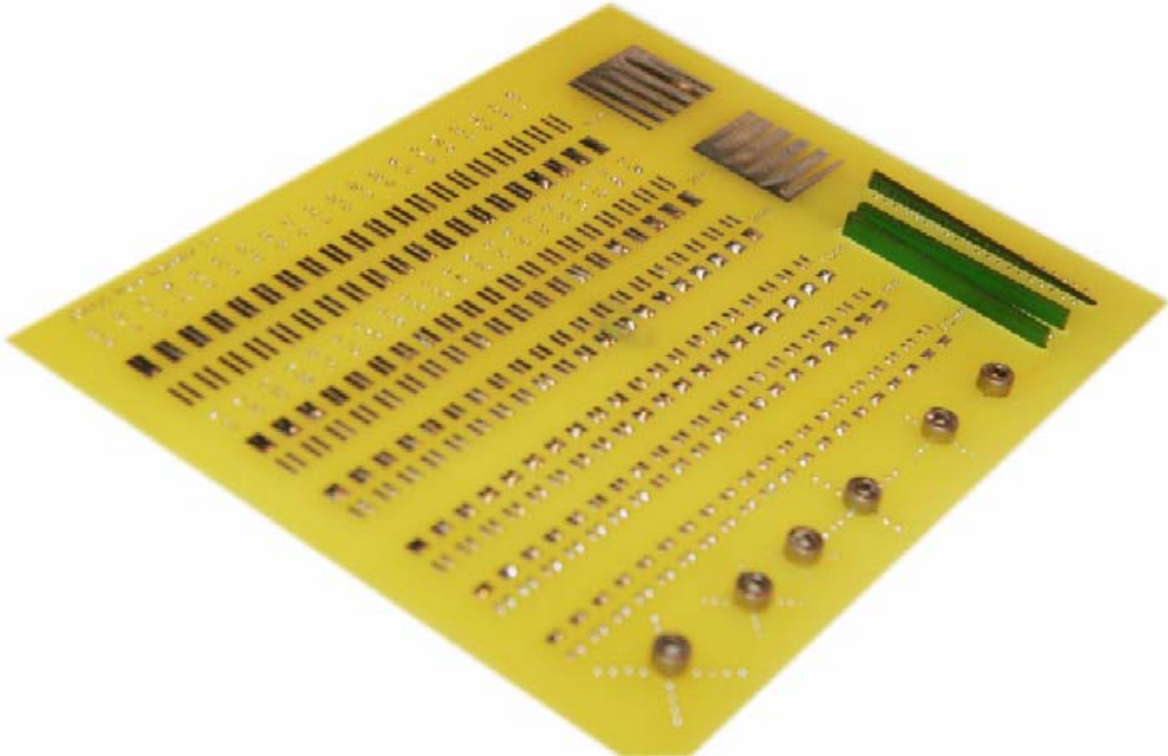


Figure 1. The wave solder test board "Waveindicator 1.0"

1. Test board approach

It is known, adjustments can be made to a wave-soldering machine by tuning heat, speed, height et.c. If there are several products on the line, one never knows if the tuning gave real advantages. If a comparison between different consumables like flux or tin, it is like navigating in mist.

The speech about statistical tools implemented at the production process, was the main force to the initiative to design a test board for wave soldering. Similar solutions have been used at my former employer, so it is not a question of any invention, but there is no general-purpose cheap board available to be connected to statistical tools for example the SixSigma-method.

2. Board options

When reading the literature about soldering techniques from Wassink, a large diagram is found about failure types and the reasons for failures. It is not possible to make a low-cost board to measure all categories. Most of them can be monitored by looking at standard products. The condition of the soldering machine can be simplified to the properties of producing solder bridges and totally missing solder joints.

3. Solder bridges

When everything is correct in the soldering process the process should give a 100% yield.

- pre-heating
- correct solder alloy
- no contaminations
- correct bath temperature
- correct conveyor speed vs. bath surface speed, correct PCB height
- no vibrations
- correct maintained and installed
- correct PCB layout design,

If one of parameters is out of spec, the cause can be easily fixed but if many parameters are wrong, statistical tools are needed if the parameters cannot be adjusted separately. With leadless soldering method which is new, nobody even knows all the parameters.

The idea behind this test board is that a good machine is capable of soldering smaller components. This is realized by a series of pads with various difficulties. Several rows of pads has been designed to be able to choose the best options at the final board. Pad length is 0.5 mm to 4 mm. The total number in a row is 20. The rows are doubled so that the gap starts on the first row from the left and the second line from the right.

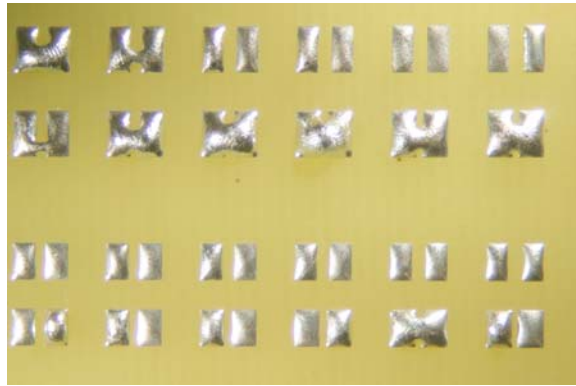


Figure 2. Variable difficulty pads.

The pads have been by gap from 0.05 mm to 1.0 mm.

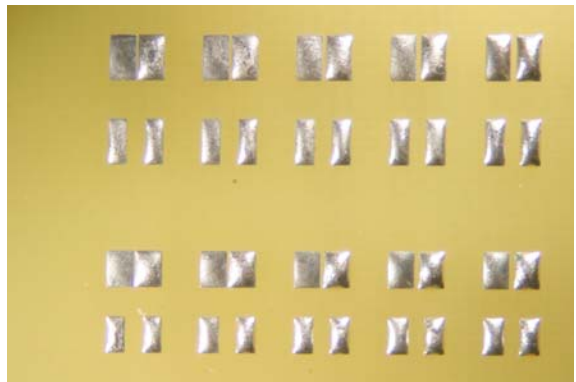


Figure 3. Smallest gap on the left and on the right.

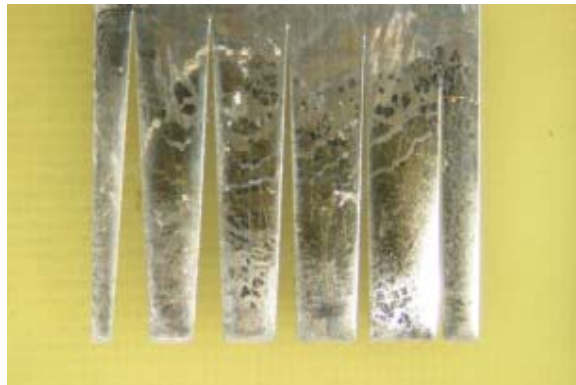


Figure 4. Finger pattern.

Also a pattern with fingers was tried. The idea was that wave would solder the gaps between the fingers, but it never did.

4. Missing solder joint

A solder joint is usually missing as a impact of shadowing components. The surface of a wave has characteristics of being too "hard" to fit between two components.

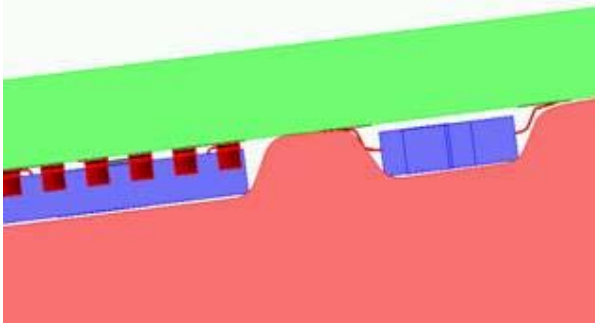


Figure 5. Wave trying to fit between two components.

The idea behind the test board is to barriers of various heights and to measure how close to the wave surface can reach. The barrier may be at most 4 mm high not to hit the bottom of solder wave.

On the board there are three types of barriers. One is set up by M3 RST bolt heads. Theses have also a property of consuming a lot of heat. On the board there are six different patterns to choose from.



Figure 6. Two types of bolt head patterns. Two solders are missing.

Next barriers are mounted into milled slots of two types. First is realized by two 4 mm walls with decreasing distance. Between the walls there are pads to get soaked or not soaked.

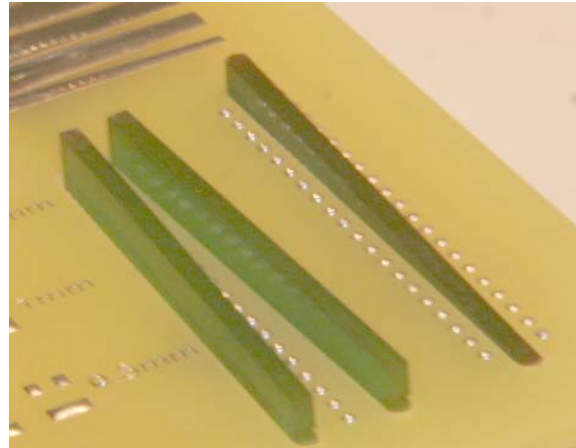


Figure 7. Two walls and 20 pads between.



Figure 8. Soaked pads are counted.

The other idea is to count the soaked pads along a wall of variable height 0-4 mm.

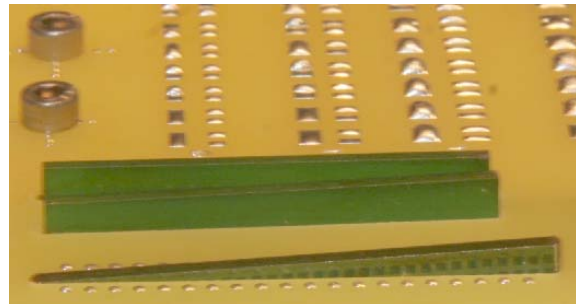


Figure 9. One slot 0-4 mm is to make the 20 pads on each side more or less avoid the wave.

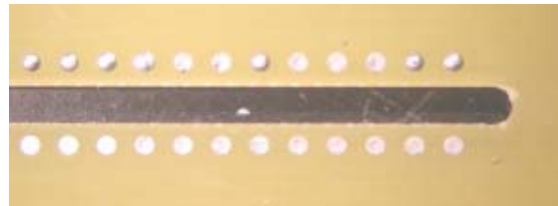


Figure 10. Number of solder joints are counted.

5. What to do with the results

As there are a lot of data, it is better saving all on a database. Therefore a system is developed on Ms-ACCESS.

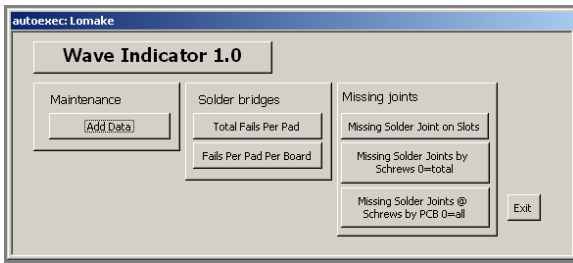


Figure 11. Main menu

Most effort is set on the input of information. It has to be so fast and simple that it cannot be a reason for not filling in the values.

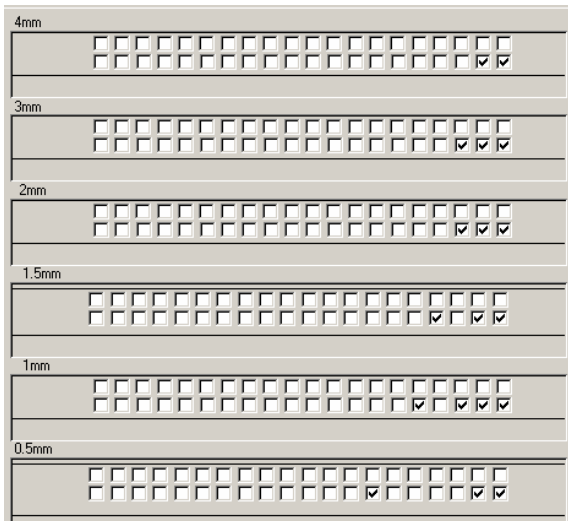


Figure 12. To fill in bridges is so easy, just click on the pattern.

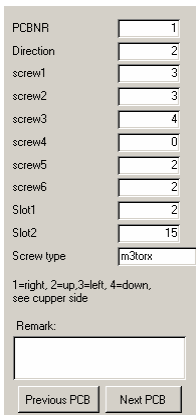


Figure 13. Missed pads have to be counted and filled in as numbers.

6. Analysing the results

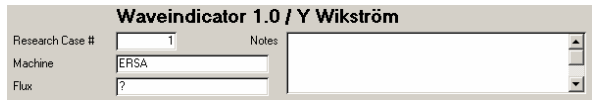


Figure 14. The data is grouped by problem case but all data can also be analyzed together.

Ms-ACCESS you can program using the SQL-interface, which gives you lots of opportunities to more complicated structures. There some statistical tools ready and others you can do by yourself. It is easy to interface to other statistical software as Minitab and SPSS.

6.1 Bridges

PCBNR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
2																				1	1	1	3	6	6	
3																								1	4	6
4			1	2	1	1										1	1	1			3	4	3	6	6	
5		2	1																						5	6
6	5	2	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	2	1	1	2	1	4	4	4	5	5	6	
7	2	1	1						1	1										2	2	5	5	4	6	6
8	5	1	1	1	2	1									1	1			2	1	2	3	5	4	6	6
9	2	3	3	2	1	1					1	1	5	4	4	4	6	4	5	6	5	5	6	6	6	
11	6	3	3	1	1		1	1							2	1	4	5	2	5	6	6	6	6	6	
12	3	1																						3	5	6
13	5	1	1	1	1	1	1	1							1	1	2	1	2	3	4	4	4	4	6	6

Figure 15. Bridges by pad and PCB. Cross-Tab query.

The board has been tested on three soldering machines and various fluxes on the last 4 boards. What can be seen, there are only few boards where this instrument gives too little information. A modification of the pads may help to make the soldering even more difficult. Further can be noticed that there are no bridges on pads 11-27 (gap > 0.55 mm) so these easy ones may be removed. On the other hand dross and other non-systematic occurrence can be found on a large area.

6.2 Missing joints

PCBNR	screw1	screw2	screw3	screw4	screw5	screw6
1	9	13	24	3	12	13
2	3	3	4	0	2	2
3	0	2	5	0	2	2
4	1	2	5	0	3	2
5	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	0	0	3	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	5	6	7	3	5	6
13	0	0	0	0	0	0

Figure 16. Missing joints around the bolts

PCBNR	All	Total
0	74	
1	14	
2	11	
3	13	
4	1	
5	0	
6	0	
7	0	
8	3	
9	0	
11	0	
12	32	
13	0	

Figure 17. Missing joints around the bolts. (0=all)

Missing solder is much more complicated than the bridges because if the chip-wave is adjusted high enough, there will be hardly no joints missing. If the chip-wave is turned off, like board 12, a lot of non-soaked pads are counted. Maybe an adjustment of the lambda-wave is to be performed and not the chip-wave. By putting the bolts in pairs, there is supposed to be more missed joints.

PCBNR	Slot1	Slot2
1	2	15
2	11	39
3	12	40
4	0	0
5	9	29
6	20	40
7	20	40
8	20	40
9	20	40
11	20	40
12	0	0
13	20	40
*	0	0

Figure 18. Number of performed joints at the slots.



Figure 19. The 20 + 40 pads.

The idea with barriers in slots is new. It worked fine with boards 1,2,3 and 5 which were soldered with the same machine. It looked like soldering from left to right, a better result was achieved. Almost 50% of pads were soaked. When soldering with another leadless and one leaded process, all pads were soaked. When turning off the chip-wave, no pads were soaked.

7. Conclusions

The board looks like it works even better than expected. A few modifications shall be made to achieve a larger dynamic working area. Though the bridging was working excellent but missing solder is not very good if the chip wave is on. Perhaps the slots should have two different directions.

Making the shape of pads for bridging to zigzag- or L-shape there must become more failures.

The basic idea was to choose the "best" pads and make the board as small as possible but a large amount of pads decreases the deviation in results.

October 2, 2005

Yngvar Wikström

P3

Tilastomatemattinen keskuspiestevertailu ja CCD- suunnitelma aaltojuotoskoneen optimoinnissa

Ossi Hämeenoja¹, Yngvar Wikström², Olli Talvitie³,
Olli Helppi², Aulis Tuominen⁴

1) Salon Seudun Kehittämiskeskus

Tehdaskatu 13, 24100 SALO

2) Turun Ammattikorkeakoulu

3) Assy oy

4) Turun yliopisto

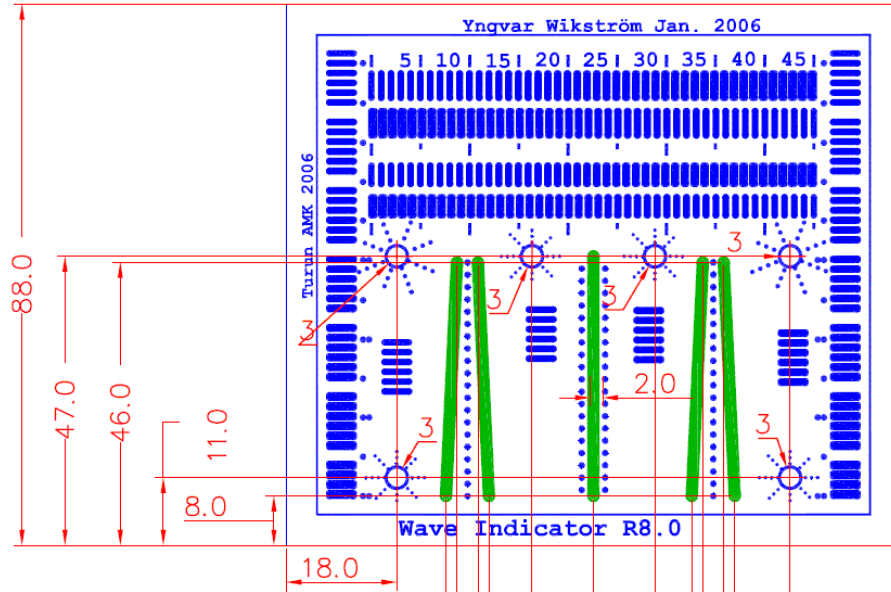
Tiivistelmä

Tässä artikkelissa esitetään aaltojuotoskoneen optimoinnissa saadut tulokset, kun menetelminä on käytetty teollista kokeensuunnittelumenetelmää CCD (Central Composite Design) ja keskuspiestevertailua.

1. Johdanto

Aaltojuotoskoneen optimointia on suoritettu Assy oy: n aaltojuotoskoneella ERSA ETS-330. Koelevynä oli Yngvar Wikströmin suunnittelema levy, minkä layout selviää kuvasta yksi.

Kuva 1: aaltojuotoskoeajossa käytetty levy



Koesuunnitelma on CCD (Central Composition Design)- suunnitelma, jolloin on mahdollista sovittaa toisen asteen mallia ja samalla saadaan käyttöön ns. keskuspiisteet, jotta voidaan vertailla tekijöitä, joita ei ole haluttu sisällyttää varsinaiseen koesuunnitelmaan.

Koneen säätöparametreista valittiin neljä perustekijää ja yksi tekijä keskuspiistevertailua varten. Lisäksi mukana oli yksi kategorinen tekijä eli levynmassan lisäys, joka saatiin aikaan kiinnittämällä koelevyn alle lisämateriaalia.

Vasteita on kolme kappaletta eli horisontaalijuottuvuus sekä pienten että suurten pulttien juottuvuus.

Data on analysoitu tilastomatematisella ohjelmistolla NCSS ja ne esitetään kohdassa kaksi.

2. Koesuunnitelman antamat tulokset

Vertailu koskien lisämateriaalin vaikutusta vasteisiin.

Koska lisämateriaali on luonteeltaan käsittelytekijä, niin eri vasteiden kohdalla on testinä käytettävä parittaista T-testiä. Tulokset ovat taulukossa yksi.

Taulukko 1: Parittaisen T-testin tulokset

Vaste	Vaihtoehtoinen Hypoteesi	T-arvo	P-taso
<i>Horisontaalijuottuvuus</i>	$H_{kaP} - H_{ka2} < 0$	0.0876	0.930830
<i>'Pultti iso'</i>	$B_{bigP} - B_{big2} < 0$	-3.9280	0.000243
<i>'Pieni Pultti'</i>	$B_{smallP} - B_{small2} < 0$	-4.4274	0.000062

Huomataan, että lisämateriaalilla ei ole stokastista vaikutusta Horisontaalijuottuvuuteen mutta sekä Ison- ja Pienen Pultin kohdalla lisämateriaali parantaa juottuvuutta.

2.2 Keskuspistevertailu

Vertaillaan eri kategorioita. Testaus on syytä suorittaa epäparametrisen testin, joka on tässä järjestykseen perustuva Kruskal-Wallisin yksisuuntainen ANOVA-testi, avulla.

Tulostuksessa yksi ovat testin tulokset vasteelle BBig eli Iso-pultti.

Tulostus 1:

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

Ho: All medians are equal.

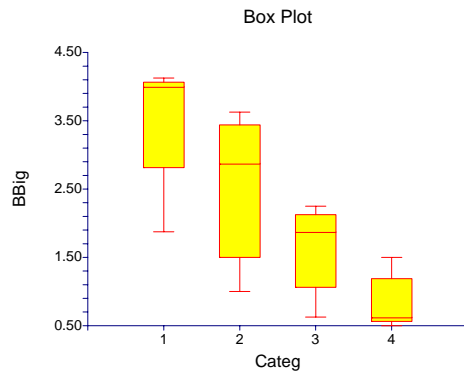
Ha: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Square (H)	Prob Level
Not Corrected for Ties	3	12.65143	0.005454
Corrected for Ties	3	12.72799	0.005263

Kuviossa kaksi on vasteelle Bbig muodostettu Box-plot.

Kuvio 2:



Tulostuksessa kaksi ovat testin tulokset vasteelle BSmall eli Pieni-pultti.

Tulostus 2:

Kruskal-Wallis One-Way ANOVA on Ranks

Hypotheses

Ho: All medians are equal.

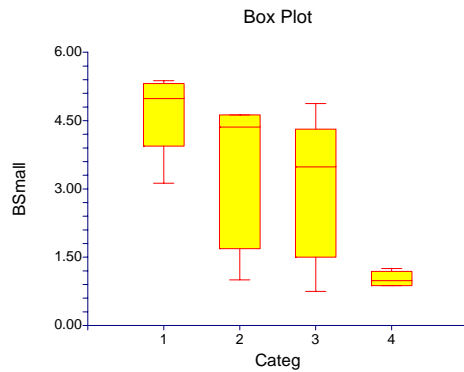
Ha: At least two medians are different.

Test Results

Method	DF	Chi-Square (H)	Prob Level
Not Corrected for Ties	3	10.58	0.014228
Corrected for Ties	3	10.60392	0.014072

Kuviossa kolme on vasteelle BSmall muodostettu Box-plot.

Kuvio 3:



Tuloksista huomataan, että kategoriat poikkeavat toisistaan stokastisesti, joten saamme, että kategoria neljä poikkeaa toisista kategorioista merkitsevästi. Kategoriat ovat 1: perusajo, 2: perusajo + lisämässä, 3: perusajo+muuttuja E, 4: perusajo + lisämässä + muuttuja E
Tulema on se, että kategoria neljä antaa parhaan tuloksen vasteille BBig ja BSmall.
Horisontaalijuottuvuuden kohdalla kaikki kategoriat käyttäytyivät stokastisesti samalla tavalla.

Vasteiden, Horisontaalijuottuvuus, BBig ja BSmall, toisen asteen mallit

Tulostuksessa kolme on aineistosta saatu paras malli vasteelle Horisontaalijuottuvuus.

Tulostus 3:

Response: Horisontaalijuottuvuus_john

ANOVA

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	23.25	7	3.32	11.00	< 0.0001
A	3.77	1	3.77	12.49	0.0019
B	0.19	1	0.19	0.62	0.4410
C	6.81	1	6.81	22.54	< 0.0001
D	4.48	1	4.48	14.84	0.0009
B ²	3.44	1	3.44	11.38	0.0027
C ²	4.07	1	4.07	13.47	0.0013
BC	1.24	1	1.24	4.10	0.0552

Toisen asteen malliksi Horisontaalijuottuvuudelle saadaan.:

$$\text{Horisontaalijuottuvuus_john} = -0.60 - 0.40 * A - 0.088 * B + 0.53 * C + 0.43 * D + 0.35 * B^2 + 0.38 * C^2 + 0.28 * B * C$$

Tulostuksessa neljä on aineistosta saatu paras malli vasteelle BBig.

Tulostus 4:

Response: Bbig

ANOVA

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	21.56	6	3.59	6.50	0.0004
<i>B</i>	7.32	1	7.32	13.23	0.0014
<i>C</i>	0.32	1	0.32	0.57	0.4580
<i>D</i>	0.51	1	0.51	0.92	0.3466
<i>C</i> ²	5.17	1	5.17	9.35	0.0056
<i>BC</i>	4.25	1	4.25	7.69	0.0108
<i>CD</i>	4.00	1	4.00	7.23	0.0131

Toisen asteen malliksi vasteelle Bbig saadaan.:

$$\mathbf{Bbig} = +3.47 + 0.55 * B - 0.11 * C + 0.15 * D - 0.42 * C^2 - 0.52 * B * C + -0.50 * C * D$$

Tulostuksessa viisi on aineistosta saatu paras malli vasteelle BSmall.

Tulostus 5:

Response: Bsmall

ANOVA

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	30.24	5	6.05	5.71	0.0013
<i>B</i>	5.75	1	5.75	5.43	0.0286
<i>C</i>	10.67	1	10.67	10.06	0.0041
<i>D</i>	0.37	1	0.37	0.35	0.5575
<i>C</i> ²	7.50	1	7.50	7.08	0.0137
<i>CD</i>	5.94	1	5.94	5.61	0.0263

Toisen asteen malliksi vasteelle BSmall saadaan.

$$\mathbf{Bsmall} = +4.46 + 0.49 * B - 0.67 * C - 0.13 * D - 0.51 * C^2 - 0.61 * C * D$$

3. Yhteenveto

Suoritetun kokeen antamat tulokset osoittivat sen, että valitut tekijät ovat tärkeitä, jotta aaltojuotoksen tuloksesta saadaan laadukas. Toinen tulos on se, että tekijöillä on yhdysvaikutuksia keskenään ja toisen asteen malli on hyvä selittämään juotostapahtuman käyttäytymistä, mutta mikäli halutaan parantaa vielä lopputuloksen laatua pitää konfirmaatioajojen suorittamisen jälkeen selvittää lisätekiöiden vaikutus tulokseen.

P4

Optimization of Leadless Wave Soldering Process

Y Wikström², O Hämeenoja¹, A Tuominen¹, O Helppi², J Tapio², T Viljanen²

¹University of Turku, Finland

²Turku University of Applied Sciences, Finland

Corresponding email yngvar.wikstrom@turkuamk.fi

Abstract

The change from leaded to leadless wave soldering, resulted in a 2 to 5 time increase of malformed solder joints. The type of problem can best be explained in the following words: When 10 boards are soldered, two of them may contain 50% of the total failures. A research project JOINUS / wave soldering was started to find the reasons and to get rid of these problems.

Keywords

Wave solder, yield, RoHS, Protective gas soldering

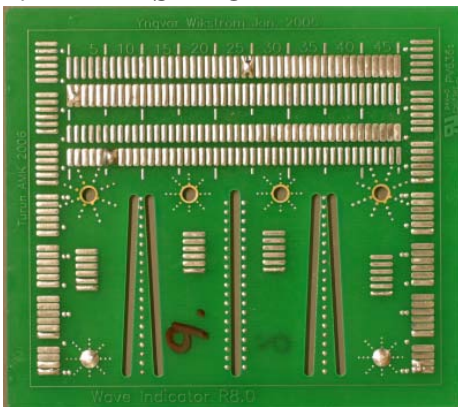
INTRODUCTION

The optimal solution to the problem was expected to be found by finding the right combination of machine settings and material selection. A soldering machine (ERSA EWS330) in almost full time production was used for the tests. A test board was designed for monitoring the impacts of the adjustments. The DOE (Design Of Experiments) was upgraded several times during the research to adapt the tests to the new observations. [1]

NATURE OF THE PROBLEM

The wave soldering process has never reached the yield of a reflow process. The layout design has always been risk-based. The higher density of components the higher risk of malformed joints. Guidelines for layout-design have been developed but even if strictly followed there is usually a failure rate in the area of 1000 to 10000ppm. Companies waited until the last minute to go for leadless process because they expected the machine, alloy and flux manufacturers to come out with the right solution but they did not find the ultimate products in time [2]. When implementing the leadless solder process the failure rate may be increased 2 – 5 times.

1. THE TEST BOARD



Picture 1. The test board of this project.

A new test board was designed to meet the requirements of giving accurate impacts on soldering ability both under good and bad conditions. It was expected to be many tests to run, so the board had to be as cheap as possible with no components. The board should be able to indicate different types of malfunctions. To indicate fails depending on the position over the wave, the patterns were laid out symmetrically. The pads are numbered to make it easy to point out the bridges for the data collection database system which has a look-alike web-based graphical interface.

1. 1 The functions of the pattern sets

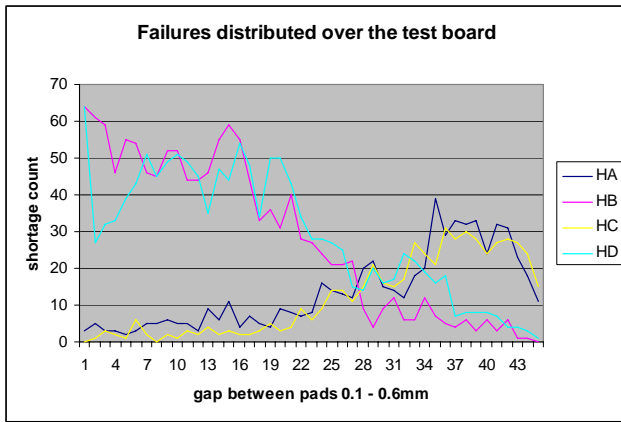
The horizontal patterns are used for counting the number of shortages and also to monitor the width of the bridges. There are 45 gaps between pads having gap widths linearly from 0.11 to 0.6mm. The idea is that it is a bigger mistake if a wide gap incidentally is bridged than a narrow gap. The same pattern is repeated for increased stability as the larger number of pads give better possibilities of counting averages. The same pattern is repeated mirrored and also vertically but now in small groups to simulate pads of integrated circuits. The star-shaped patterns in the middle section simulate shadowing around components when test board is populated with M3 Socket Head Cap Screws. The read-out is here taken by counting the non wetted pads. The vertically milled slots together with enclosed patterns are also for measuring the wetting capability when 5mm high walls are inserted into the slots. (Not used in this test)

The test board has no components mounted, so it cannot exactly simulate a populated board. Therefore a heat absorbing load of 1mm thick steel plate is attached to one part of the test boards (marked L). This is important especially when testing using low pre-heat values.

1.2 Reliability of the test board

All the test results from the database are used to show how the gap between pads impact the behavior of bridging. Picture 2 also shows that there is a slight difference in right to left directions of the patterns. Note the height difference on the curve between HA and HB.

The patterns HB and HC gap increase from right to left, others from left to right.



Picture 2. The result from all the 450 test-boards indicate the impact of the count of shorts on the gap widths.

2. DESIGN OF EXPERIMENTS

The aim of the testing was to use highly sophisticated statistical methods for studying the behaviour of the soldering process. After reading about the experience from similar tests, the most useful information was achieved by practical analysis.

Several **multi variable tests** were designed and analysed on different soldering machines, three different ERSAs and one was JEMME Talos.

The following test methods were used in the project. Tests 1-3 have different test sets.

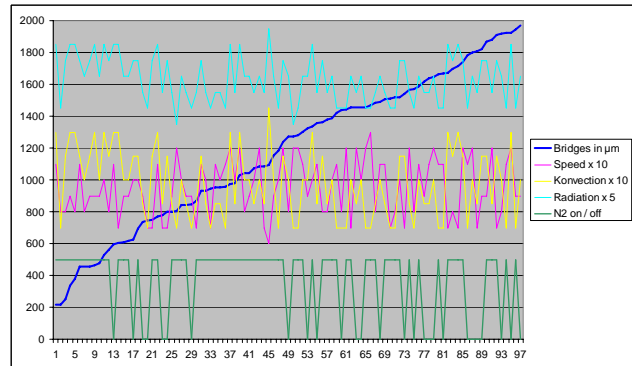
1. **Factorial** (35 test boards). This test indicated *flux type and flux volume* as the most significant impact. A water based flux gave best results. A high noise level was recorded. [3]
2. **Taguchi** (18 boards). This test indicated primarily that the noise level is too high. The read-outs are not stable enough for the method of analysing. [4]
3. **CCD** (Central Composite Design) and Central Point method. This indicated that variables are very dependent on each other and the noise level is high. Test summary was that there are significant factors which were not chosen as variables. (= noise) [5]
4. To avoid the impact of the high noise level, a **full matrix** test set was run using one type of flux, all combinations of values for the conveyor speed, pre-heating, component size (= metal plate attached to the board) and nitrogen on/off were included to get rid of the problems of the orthogonal matrix methods.
5. A **process window** graph was designed to give a rough picture of how much heat the process at least requires and at most it can take. This test set contains of three variables; conveyor speed, pre-heat and component size. This method shows the width of the process window and also how to adjust the total heating by a simple rule "give the *smallest component maximum heat*" (right corner of the bath tube curve) heavy components will not be over heated anyway. This method was developed from (4) by removing tests which did not give any usable information. The same test set has been repeated with different types of flux and with nitrogen.

3. OPTIMIZING

Searching the best settings for the machine.

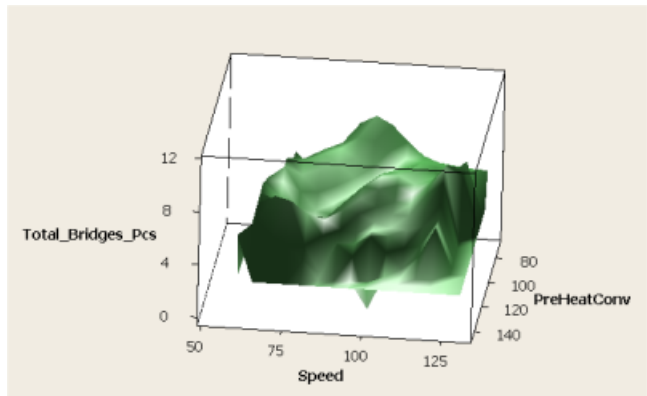
3.1 Least bridging equals best performance?

The easiest way of finding the optimal set values for the process is to try all alternatives and choose the best ones. When looking at Picture 3, there cannot be found any trends for which any typical set values would give the best performance.



Picture 3. The set values in a 2D view sorted by increasing solder bridging. The X-axis shows the total length of bridges.

In Picture 4 as an example is shown the behavior of the process using different speed and pre heating. In this case the protective gas has been used. This pattern does not look very smooth even if it is true that there is a valley where speed is about 90cm/min and pre-heating convection setting is about 100°C.



Picture 4. A 3D-vision of the values above. All the test results in number of bridges where the protective gas is on.

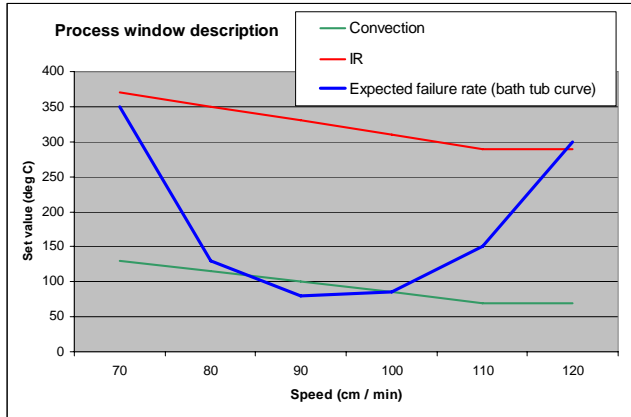
The best result for this ERSA EWS330 using this test method was the following from Picture 3:

- Three best results were carrying the heat load (= populated with components)
- Two best results were achieved using flux IF2005C
- Convection heat in the area 70 - 130°C (99 °C optimum)
- Infra-red heater 300-350 °C (330 °C optimum)
- Conveyor speed 80 - 110 cm/min (92cm/min optimum)
- The 25 best values were found using protective gas

3.2 The process window method

The test method described above is not very cost effective. 6 x speed, 5 x pre-heat 2 x board load and N x flux types takes so

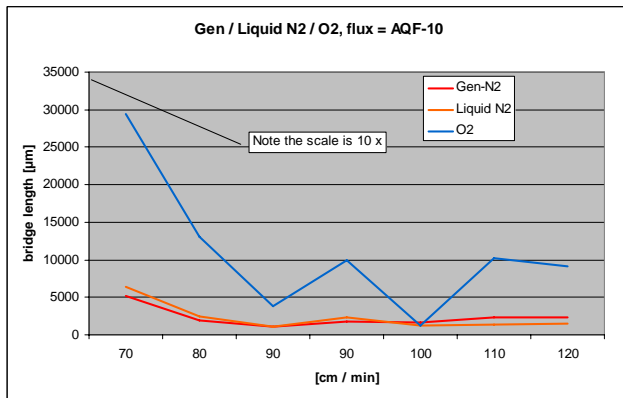
long time that the total behavior of the machine may change during the test procedure. If a protective gas is not used there is no idea of trying at all. Therefore we decided to change all values at a time so that the total amount of heat go from minimum to maximum until the results will give a clear indication of going up. This helps a lot when a single variable is tested, like comparing fluxes to each others. A good process gives a wide window allowing a wide selection of component sizes. Picture 6 shows the principle of the bath-tub curve where the failure rate rises because of too much heat on the left and too much on he right.



Picture 5. An idea of how a process window might look like.

Table 1. Values used for the process window method.

Conveyor speed	Pre heat convection + IR	Load (plate)
110cm/min	70-290°C	Yes
100	85-310	Yes
90	100-330	Yes + No
80	115-350	No
70	130-370	No

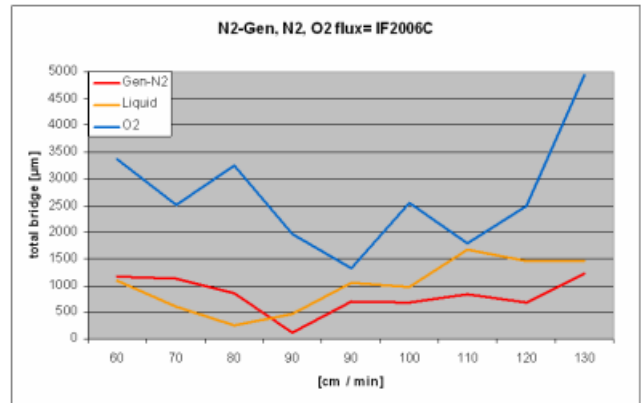


Picture 6. Process window for water based flux AQF-10 in air, liquid N₂ and generated N₂. The X-axis now also includes the pre-heat values from Table 1.

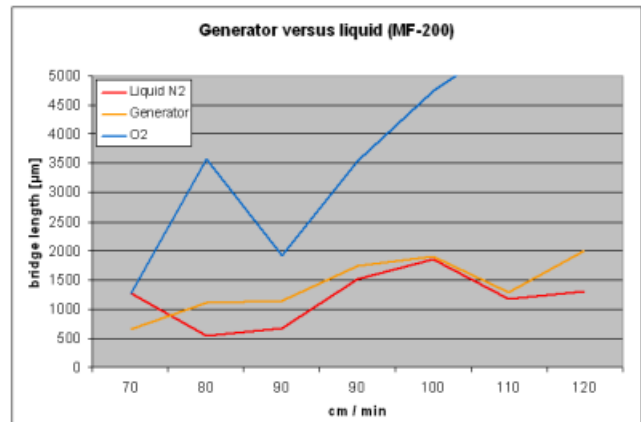
The results will show the impact of flux and protective gas. Picture 7 shows the nature of a process. Using air, there is a great

difference in machine settings but using N₂ the process window is much wider.

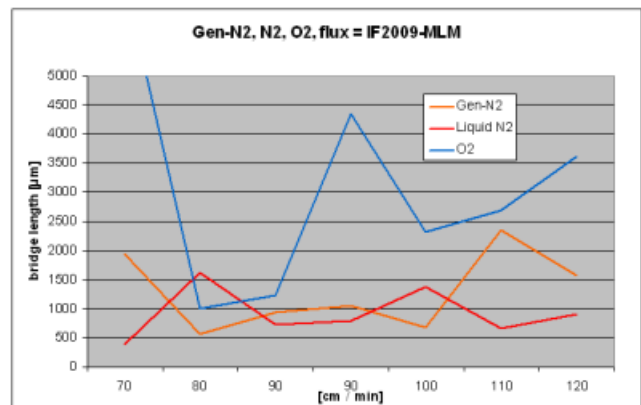
The nitrogen is either from liquid or produced by Pressure Swing Adsorption PSA (99.87% purity). Used volume was 5m³/h idle and 14m³/h when soldering. The assembly was a Solderflex® retrofit from Linde AG.



Picture 7. Process window for flux IF-2005C in air, liquid N₂ and generated N₂. The X-axis now also includes the pre-heat values from table 1.



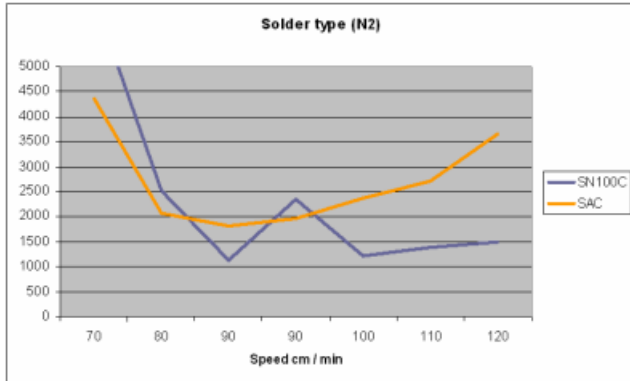
Picture 8. Process window for flux MF200 in air, liquid N₂ and generated N₂. X-axis now also includes the pre-heat values from table 1.



Picture 9. Process window for the water based VOC-free flux IF2009-MLF in air, liquid N₂ and generated N₂. X-axis includes now also the pre-heat values from Table 1.

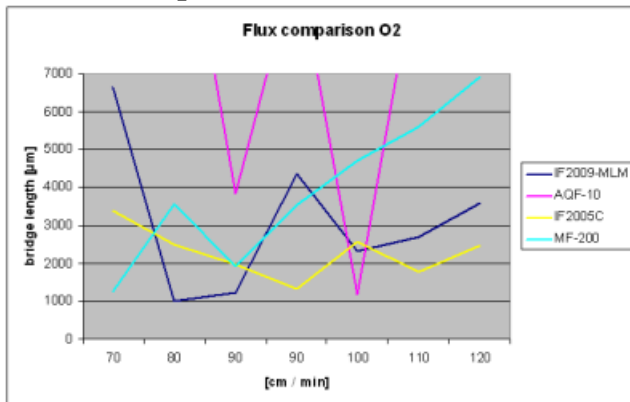
3.3 The impact of the solder type

During the test period the solder bath was changed from SAC to SN100C. The first reaction was that it was a bad idea but after about two weeks the results reached the same yield as of SAC.

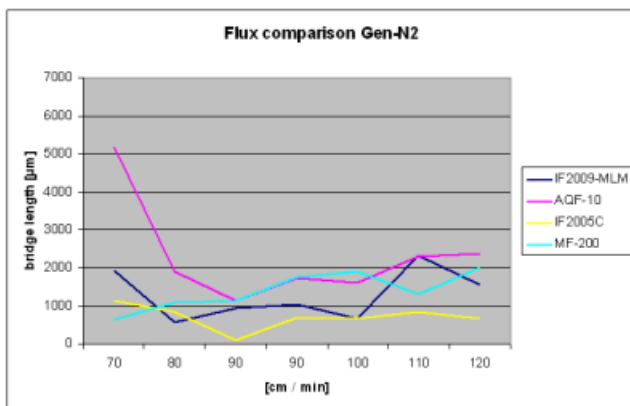


Picture 10. Using water based flux type AQF-10 a significant difference can be seen in the process window.

3.4 Flux comparison



Picture 11. A comparison between the behaviors of fluxes in O₂ atmosphere.



Picture 12. A comparison between the behaviors of fluxes in N₂ atmosphere. Note the scale is same as in Picture 12.

The influence of N₂ flow rate was not paid attention to as we discovered that N₂ only gradually changes the behaviour of the solder bath and the impact of a change in the flow rate cannot be accurately measured until 2-3 weeks stabilization. A comment from the workers was that one day without nitrogen did not have much impact on the soldering process.

CONCLUSION

The figures published describe the great impact of protective gas. When calculating the value of the saved solder in form of less dross production, the cost of nitrogen becomes almost zero. The increased quality comes for free. The impact of the protective gas is a decreasing in faults by about 50 – 80% depending on the boards produced. The impact of correct pre-heat and conveyor speed is only about 10% compared to that.

During the final part of this project attention is paid to PCB layout design to get rid of the rest of the leadless typical issues.

Other not yet proofed observations from the project:

- The solder bath absorbs oxide which is the main reason for the high noise level. (unpredictable soldering yield workers say the yield is poor specially on Mondays)
- This oxide can be chemically removed using phosphor, solder oil or acid (included in flux)
- Alternatively the bath can be protected from oxidation by using protective gas. The acid of the flux on the components will slowly remove the absorbed oxide.
- The protective gas will also have an impact on the formation of the solder joint by a change in the wetting angle
- When using protective gas, the yield is more stable and predictable. [6]

During the time of leaded soldering the use of nitrogen was something for freaks, now it is a natural part of the wave solder process.

REFERENCES

[1] Helppi, O., Design of Experiments, Design of experiments, DoE, 2006.

[2] Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of January 2003 on the restriction of the use of hazardous substances in electrical and electronic equipment. 2003.

[3] Tapio, J., Optimization of wave soldering process, 2006.

[4] Viljanen, T., Wave soldering process optimization with Taguchi design, wave soldering, DOE, design of experiment, Taguchi design, 2007.

[5] O. Hämeenoja, Y. Wikström, O. Talvitie, O. Helppi and A. Tuominen, "Tilastomatemaattinen keskuspiestevirtailu ja CCD-suunnitelma aaltojuotokseen optimoinnissa,"

[6] J. Sitek and K. Bukat, "Influence of flux activity on process parameters and solder joints in lead-free wave soldering," 2005, pp. 84-89.

The Impact of Probability in Yield Optimization on Wave Soldering Processes

Wikström Yngvar¹, Ohvo Marko¹, Tuominen Aulis²

¹Electronics Production dept. Turku University of Applied Sciences. Turku. Finland

²Productization dept. Turku University. Salo, Finland

Corresponding email yngvar.wikstrom@turkuamk.fi

Abstract

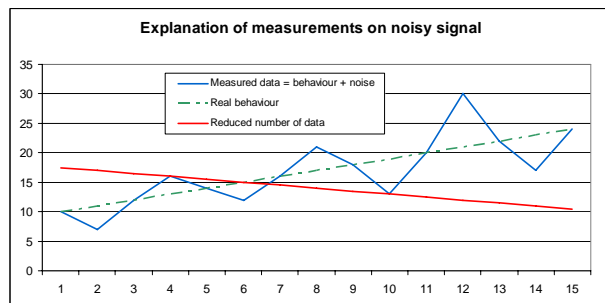
This document, describes the impact of noise in measurements when optimizing a process with many unknown parameters like in this example a wave soldering process. Several different types of optimization methods have been tested. The statistical methods are in the literature described as being capable of solving any type of problem but in this case they have not proven the expected usability. A simulation and an optimization procedure are simulated, performed and documented. This research is a step ahead in the process of solving the mystery of weak capabilities of a wave soldering process.

Keywords

Wave soldering, yield optimization, orthogonal matrix.

INTRODUCTION

The implementation of leadless solder as a requirement of the RoHS directive of the European Union caused major loss in process yield of the wave soldering. Advanced statistical methods were used to find the optimal settings for machines. The tests ended up in unusable results. Are the measurements taken stochastically at the wrong moment?



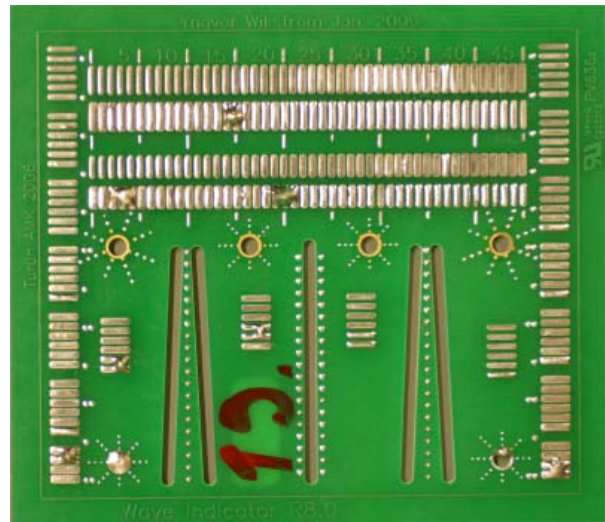
Picture 1. Wrong conclusion as an impact of stochastically randomization during measuring.

1. THE PRE PROGRAM

A multi-purpose test board was designed which should be able to indicate:

- Even the smallest change in solder ability
- Both short bridges and missing joints
- The failing rate in a wide dynamic range
- The fails' distribution over the over the board area
- The pattern direction dependence.

It should be easy to read the results into analyzing software. There should be an on board averaging factor by repeating the same patterns to reduce random effect. It should also be low-cost, so the size was optimized to the PCB-manufacturer's pallet size. The finish should be NiAu plated because this causes the most typical problems. It can also be stored for a reasonable long period before use.



Picture 2. One test board used in the project [1].

2. OPTIMIZATION BASICS

Solder problems occur on the soldered boards mainly as solder bridges or totally missing joints. The defects can be counted at soldered products and so can an optimization be performed. The problem with this type of optimization is that there are so many unknown parameters that change over time that the side-effect of one adjustment compensates the influences.

The yield is usually measured in ppm. on missing joints and shortages of produced boards. A machine is expected to output its best performance when the parameters are set correctly.

The method of optimizing by testing many different setting and picking the combination which produce the best performance is not working.

As many parameters are depending on each other, a lot of tests should be done to check every single combination.

The optimization can also be done by finding the limits of the process in form of a bath-tube curve and adjust put settings into the middle of the bath-tube, also giving attention to the filling of trough-holes which prefers low conveyor speed.

Using DoE (Design of Experiments) and statistical methods, the number of tests to perform can be reduced to a minimum [2].

3. THE BEHAVIOUR OF A WAVE SOLDERING PROCESS

The soldering result stochastically changes over time. It is for instance observed that the yield is worst on Mondays which may theoretically be explained by slow metallic crystallization during the weekend and a delay in the amorphization. During the day the mood can change even from one board to another. Sometimes the reason to this is found, but usually not.

The influence of flux type selection is almost as drastic as the selection of the machine type or manufacturer. After a flux change, all the parameters are to be re-optimized.

Parameters depend on each other mainly because the property of flux is to require a minimum to a maximum of total heating starting from the pre-heating zone and ending after the soldering process as the solder joint has become solid. Adjusting conveyor speed will add both pre-heating time and flow time. If convection is used, the impact of wind-speed will dry the flux earlier and the activation of it can start earlier. [3]

4. RESULTS FROM OPTIMIZATIONS BY STATISTICAL METHODS

The experience from three different methods on different machines is shortly the following:

- i. Taguchi. The noise level was higher than the impact of changes in parameters. [4],[5],[6]
- ii. CCD Optimization of selected parameters can increase yield only by 15%. 85% remain unknown.[7]
- iii. Factorial two level DoE. An efficient method which only give information about which factors are important. Result: The minimum amount of flux is most important.[8],[9]

The main difference between the methods described is how the combination of parameters is set up in the DoE.

5. A CASE STUDY

An optimization procedure (iii) was performed at a company as a bachelor's thesis. Seven different basic adjustments were selected using only two levels to reduce the number of test boards to solder. Two levels are enough for the first screening study.

5.1 How to set up a DoE

There are numerous types of known good DoE setups. An easy way of getting reliable combinations of settings is to use software for statistical methods like Minitab [10]. Maybe the Central Composite Design, CCD is the most famous.

Table 1. Parameters used in this case study.

	Pre Heat	FlowDepth	Flow Time (s)	Chip-wave	temp	Flux amount	Flux type
1 =	IR1:350 °C IR2:390 °C	Upper edge	4°	On	260 °C	Poor	AQF-10
-1 =	IR1:290 °C IR2:330 °C	Touching	6°	Off	270 °C	Standard	QT-392

How many test boards are needed for this test? The answer is $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 128$ pcs. If the test plan DoE is set up as an orthogonal matrix, fewer boards will do. It is of greatest importance to set up a proper Design of Experiments if not a full matrix is being used. In this case (i) a Plancett – Burman Design based DoE was used with 48 runs.

Table 2. An orthogonal matrix L8 for 7 parameters takes the least effort to realize.

factor / board	1	2	3	4	5	6	7
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
3	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1
4	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
5	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
7	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1

5.2 How to calculate the results.

How to use orthogonal matrixes is described in a large variety of quality orientated literature. In this case a Taguchi method described is followed.

- a) Select the results for values -1 and calculate the average.
- b) Select the results for values +1 and calculate the average.
- c) Now, on a chart, draw a line between these points.
- d) Repeat for each parameter.

Analyze the resulted lines and determine:

- the more rapidly the line change vertically, the more important is the variable
- if two lines are in parallel there is no cross dependence between parameters, the bigger angle between the more dependent they are and must be optimized together.

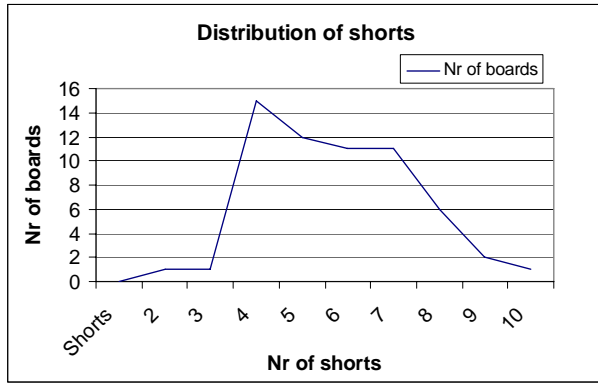
6. SIMULATING ACCURACY ADDING NOISE DISTRIBUTION

To be able to make accurate adjustments on a process where the noise level is very high is like sending information using a spread spectrum modulated signal at lower level than the noise. The information is detected by correlation to a known key signal. In this case, the modulation is the relatively small adjustments of parameters and the noise is the fact that this type of process is not well controlled.

6.1 The noise used in this experiment

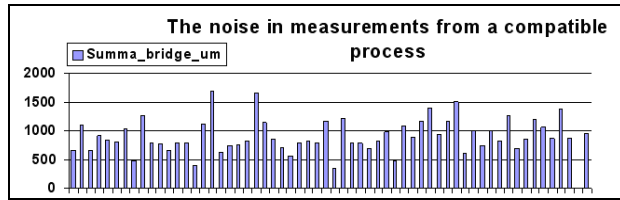
In this document, research results among simulations of the noise impact are presented.

Picture 3 shows the result of spreading in yield measurements. The board has about 300 gaps between pads, so if there are 7 failures it equals a rate of about 20 000ppm. (Compared to others this process is very stable with no Nitrogen but instead phosphorus is used in the solder bath.) It is a typical behavior of this test board not to have any zero-fail cases.



Picture 3. Histogram of probability on the failures of 60 boards soldered two for each 10 minutes. All tests are done using the same settings.

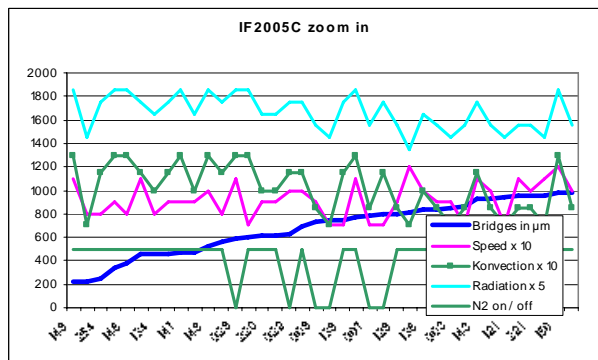
If only a single printed board was used for each measurement in the analysis, according to the picture 3 above, the detected value would be between 1 and 9 with a greater probability on 4-8. The shape of the distribution is not alike a clock curve for this process.



Picture 4. The same as picture 3. Measurements are in total bridge length in μm . (Less handicap for narrow gaps between pads.)

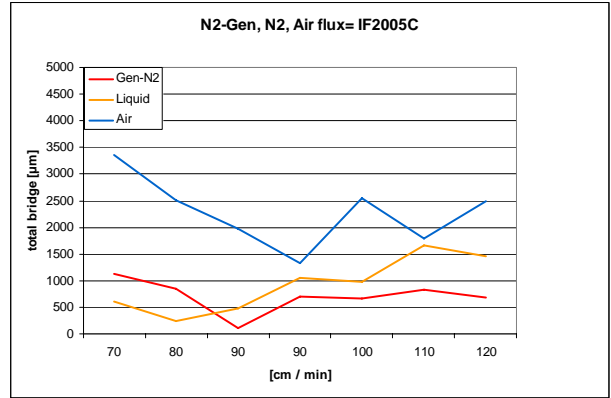
6.2 The background of this experiment

The aim was to find the answer to why the measured yield from a wave soldering machine looks like having no correlation to the adjustments of working parameters. In picture 5 the optimization is done by trying every settings combination of conveyor speed, pre-heating and Nitrogen on/off. [11] The values behind the chart are ordered by least failures. Common sense says the best settings are the ones which give least failures but the curves of parameters show that there is hardly any correlation between yield and machine settings.



Picture 5. Result from a series of measurements on an ERSA ETS330 wave soldering machine [12].

As this method turned out not to be a usable optimization method, the strategy was changed to measurement of the upper and lower limits where the failure rate rapidly goes up. A bath-tube typed shape was achieved.



Picture 6. Speed and pre-heating were changed until failure rate increased to the left. Also note the impact of protective gas. (Flux = IF2005C)

From this curve of picture 6 a bath-tube type shape can be seen. This curve can be analyzed by measuring the width of curve from left to right. The curve should be possible wide being able to solder both heavy and light components. The height of the curve shows the yield level. Here is noticed there is a significant difference between soldering in air or in nitrogen atmosphere.

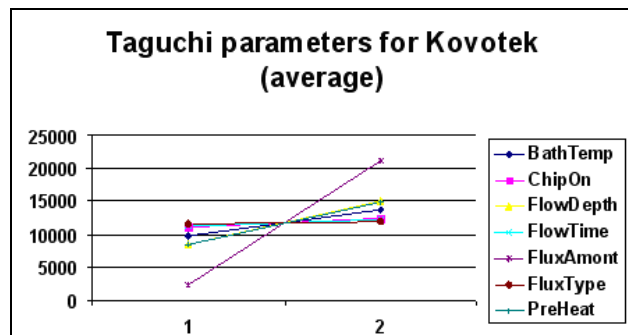
6.3 The calculation methods

First a quick check using Minitab, just to get to know the shape of results to expect. The management system for the test result analyze is based on a database system with a web-based user interface.

Now, tables were added for the DoEs and the required calculations were made using SQL-language. MsACCESS was used for plotting. There is a goal for productization of the process.

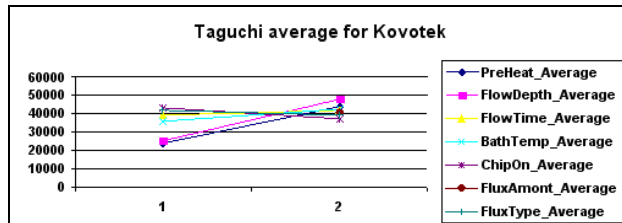
6.4 Reading the results

Referring to picture 7 the lines give the same information as they do using Minitab. The most significant actor was the flux amount. This was very useful information to the companies participating in the JOINUS-project. The other parameters show there is not much common effects between parameters.



Picture 7. The basic result without noise added.

In picture 8 there are some components of random noise over the measured results. If stochastically the measurements were taken at a different moment, the amount of flux was not significant. Instead there were common behavior with FlowTime, BathTemp and FluxAmount to FlowDepth and PreHeat. It also shows that only FlowDepth and PreHeat are significant.



Picture 8. The same as picture 7 but there is noise over the test results.

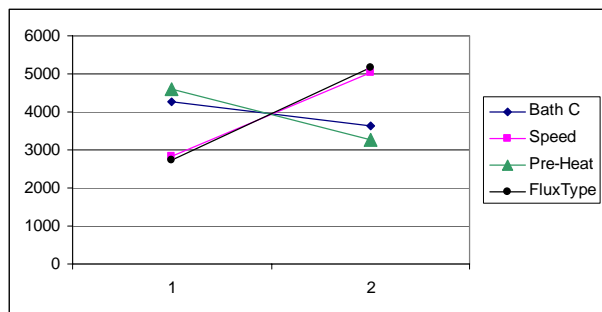
Following four pictures show the worst case scenarios eg. *Monte Carlo Analyze* where the minimum maximum for each end of lines are picked out from the 2880 virtual samples and show the most hectic values. Minimum to minimum are not calculated.

7. FIELD TEST

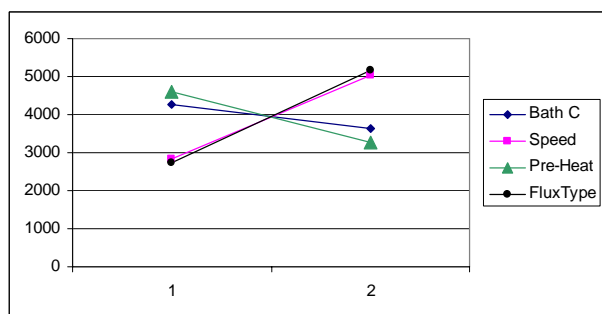
For demonstration purpose the same Fractional Factorial L8 test was repeated 6 times on different days. The parameters varied were A= Bath temperature 250C and 265C, B= conveyor speed 80 and 100cm/min, C= Pre Heating convection temperature 175C and 230C (min and max) D= Flux type; Cobar385C and AQF-10.

Table 3. Sample DoE on ERSA EST350 at Turku University of Applied Sciences including the first day's results.

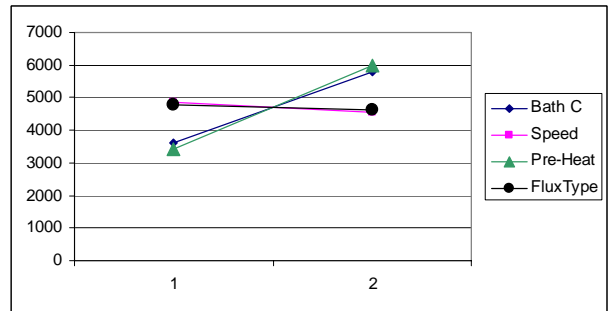
StdOrder	RunOrder	A	B	C	D	result
7	1	-1	1	1	-1	468
1	2	-1	-1	-1	-1	2066
8	3	1	1	1	1	1065
5	4	-1	-1	1	1	1196
2	5	1	-1	-1	1	4790
4	6	1	1	-1	-1	11429
3	7	-1	1	-1	1	4144
6	8	1	-1	1	-1	4362



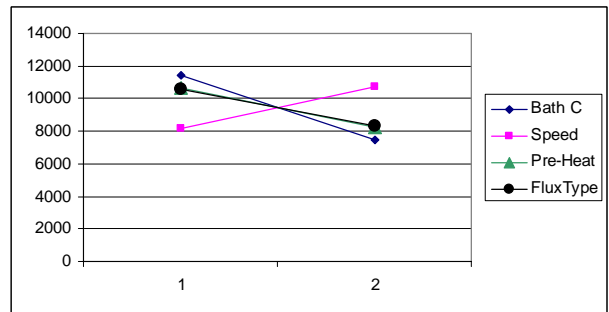
Picture 9. Test results from the L8 test on day one. The most significant parameters are pre-heating and flux type.



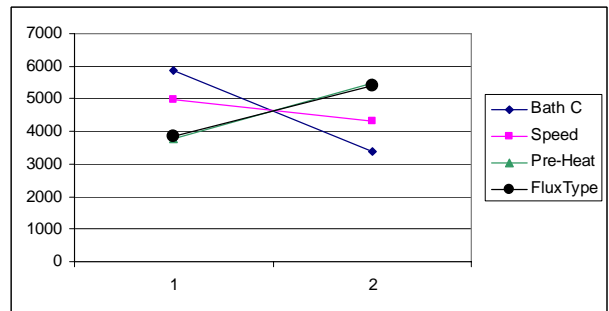
Picture 10. Test results from day two. Most important factor is conveyor speed. The impact of bath temperature has changed direction.



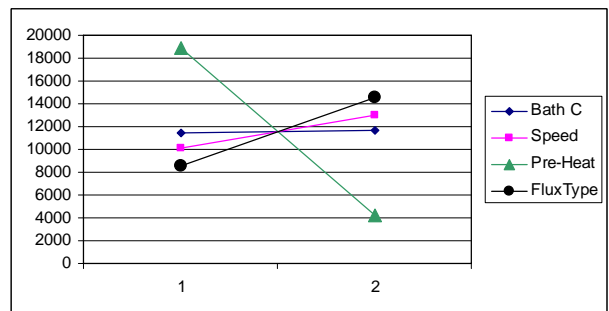
Picture 11. Test results from day three. No impact on speed or flux type.



Picture 12. Test result from day 4, a bad day. Solder bath in bad condition, oxide residues. The impact on speed has changed. Note the double quantity of fails!!



Picture 13. Test results from day 5. After some maintenance the fail rate is decreased but all curves are opposite to day one.



Picture 14. Day 6. A significant impact on pre heating. None of the parameters was steady enough to even keep the same direction. Note the 3 times quantity of failing.

The readings from the same test made during three following days on the same machine give a figure about the fluctuation in the behavior. Have to agree with Ossi Hämeenoja [7] about that optimizing these parameters correctly only 15% of total performance is affected by selected variables as long as they are not far away from normally used values.

7. CONCLUSIONS

This research is a step ahead in the process of solving the mystery of weak capabilities of a wave soldering process.

The batch of L8 test sets performed resulted in a need of a specification for a minimum number of test boards needed to make the process examination reliable.

The simulation of noise was calculated on a L48 test set which gave a reasonable influence by the random figures taken from test data where no changes were made on the parameters.

Using ANOVA, no extra useful information about the process behavior is achieved.

Among the different types of tests, the bath-tube analyze gives most information per spoiled test board.

The metallurgical condition of the wave itself has the biggest influence on process yield. Use nitrogen.

Convection based pre-heating make the flux dry before heating and a better heat distribution is achieved giving more stable heat environment among components reducing the probability of unexplained malformed joints.

After getting this working properly as a system, it should be automated and the machine should do self-tuning when idle.

REFERENCES

[1] Y. Wikström and E. Eloranta, " *Managing flow solder production at RoHS compatible processes.*," in *New Exploratory Technologies*, 2005,

[2] "Forrest W" and "Breyfogle III", *Implementing Six Sigma*. NewYork: John Wiley & Sons Inc, 1999, pp. 791.

[3] W. Klein R, *Soldering in Electronics*. ,Second Edition ed.Isle of Man: Electrochemical Publications Limited, 1984, pp. 470.

[4] Viljanen T, " *Wave soldering process optimization with Taguchi design*," June 2007.

[5] E. Karjalainen, *Teollinen Koesuunnittelu*. Mänttä: Metalliteollisuuden Kustnnus Oy, 1992, pp. 162.

[6] E. "Karjalainen, *Tuoteen Ja Prosessin Optimointi Koesuunnittelulla Taguchi-Menetelmä*. Mänttä: Metalliteollisuuden Kustnnus Oy, 1989, pp. 95.

[7] O. Hämeenoja, Y. Wikström and O. Talvitie, " *Tilastomatemattinen keskuspiistevertailu ja CCD-suunnitelma aaltjuotoskoneen optimoinnissa*," in *New Exploratory Technologies 200*, pp. 9.

[8] O. Helppi, "Design of Experiments," 2006.

[9] J. Tapio, " *Optimization of wave soldering process*," May 2006.

[10] "Minitab Inc", " *Minitab 15*," vol. 15, January 2007. 2007.

[11] A. Suominen, " *Heat behaviour of lead-free wave soldering*," September 2007.

[12] Y. Wikström, O. Hämeenoja, A. Tuominen, O. Helppi, J. Tapio and T. Viljanen, " *Optimization of leadless wave soldering process*," in *NEXT 2007 KOREA the 4th Conference on New Exploratory Technologies*, 2007, pp. 79.

Impacts of Printed Board SMD Layout Pattern Design on Flow Soldering Process Yield. Design Guidelines for Lead free Soldering

Y Wikström, T Kujala, A Tuominen

Department of electronics
Turku University of Applied Science
Turku University
Turku, Finland

Abstract

The overall aim was to solve the problem with low yield in a Wave soldering process. This part is a triangulation based research with focus on the design quality of the printed board artwork. The research is based on perception of test boards and soldered products, statistical methods, publications, theoretic approach and survey. Qualitative research is proofed by experiments in laboratory conditions. As the behavior of lead less soldering is different compared to leaded, new educational materials was needed. This research fulfills the demand trough this publication which is written to be used by any printed board artwork designer.

1. Introduction

Obviously there are not too many guidelines which include other issues than component footprints for PWB designers. In reality there are many challenges to meet. The component required density is tighter than the footprint rules from the component manufacturer. Some component cannot be situated based on thermal issues and optimal orientation is in conflict with the electrical requirements. In this latest case the electrical engineer always win because if the product does not meet the electrical specifications it will never be produced. When the requirements of yield are not met, the product will be produced anyway but with economical losses because of expensive rework along the line.

1.1 Background

In 2006 a research project “JOINUS” was established by Turku University to solve the problems occurred in lead-less soldering using statistical methods. Reflow soldering problems were taken into control but wave soldering yield was not yet on the expected level when the project was officially finished 2008. Though a lot of understanding was achieved and the yield was though doubled when implementing inert gas retrofit in the companies involved [1,2,3,4,5,6].

1.2 Field experience

In the production supervisor point of view there is only one problem – the soldering machine. Sometimes the result is better and the other time it is worse. The outcome of inspection of every board after the wave soldering production during one week was that the fails were of many different types. In this case only the quality and not the quantity were counted but there were three main categories of problems. Materials problems were in forms of component types, solder mask types and contamination. The wave was maladjusted and there were problems that may be corrected by changing the PWB layout. According to reliability there were many examples of excess solder joints which did not affect on the yield as there were no electrical impacts.

Many fails were observed which could be avoided if the artwork was changed. Unfortunately there were spots on the PWB where no fails were expected. Any design rules were followed.

2. Printed board design guidelines

The artwork design guidelines have to be split into two: Pre-Design rules which describe how the artwork should be designed and Post-Design rules which describe how to make modifications to the artwork to avoid fails frequently occurred.

2.1 Pre-design guidelines

In literature there can be found typical footprints for wave soldered components. Best choice is the data sheets from the component manufacturer [7].

2.1.1 Typical guidelines for SMT

The guidelines usually include examples foot prints and component distance. Sometimes also include the minimum component distance. It has to be considered that the foot prints used have to be fine tuned for each process. In fig 1 the length of the foot print d impact on solder skips. The longer toe the better is the yield. This is in conflict with component density on board. The smaller pads, the more components can be populated on board. The distance t between the pads is dependent on placement accuracy. There is no need for pad area under the component. The pad width impacts the reliability. In fig 2. are different fillets shown. The width which gives a fillet B must be selected because the solder joint must take the thermal stress without damaging the component. [8]

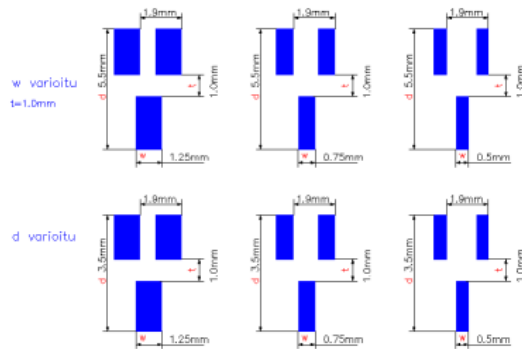


Figure 1 Sample pattern testing board (Technical Research Centre of Finland)

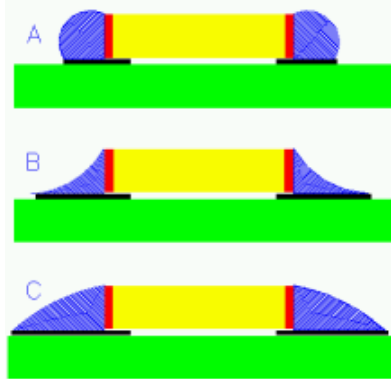


Figure 2 . The footprint impacts on reliability.

The component distance is dependent on the process. Usually a longer distance is better than a short. In fig 3 is shown a low density guideline. [9, 10]

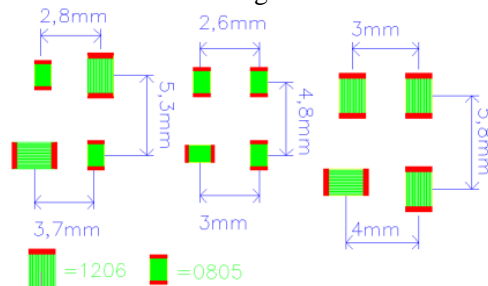


Figure 1. Example of component distance (Philips 1986).

2.1.2 Design based on the typical failures

The lead-free soldering brought many new requirements to the PCB layout because many new types of soldering failures occurred. The lead-free soldered board has typically excess solder, icicles, solder bridges, solder skips (missing), excess fillets, solder balling and poor hole-fill. In Finland has most companies installed a nitrogen retrofit to improve the lead-less soldering yield. The pattern must consider the different failure types for best performance. [11,12]

2.2.1 Design for SMD bridging

Bridging is the most typical fail. In fig 4 the components are situated so that soldering is not required where the solder wave cannot easily reach the surface. The components may be populated much closer than in fig 3.

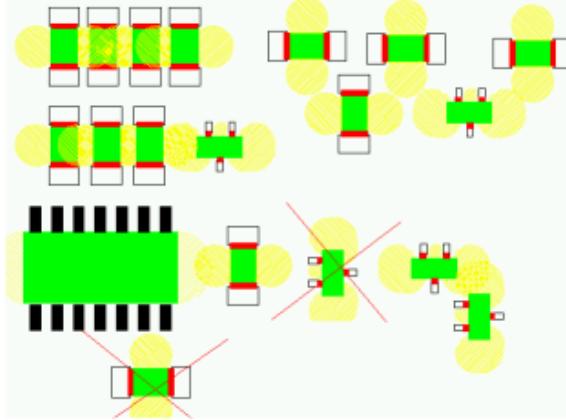


Figure 4. Reduced component distance achieved when shadowed areas are avoided

Bridging is also common at IC-circuits. Usually selecting the right orientation and the use of solder thieves help. Overall rule is to keep the footprints small. Shorts have become frequent also on the trough hole components (THC). Keep the pad sizes small.

2.2.2 Design for SMT solder skips

Missing joints are also frequent on lead-free soldering. They are often an impact on the process and materials, but increasing the toe length of the footprint gives a better yield. Many component types are basically designed for reflow soldering and the terminations on the components are not very high on the component sides. These types need long toes on the footprints.

2.2.3 Design for excess solder and icicles

Excess solder is very typical to lead-free. They are similar to shorts but there are often more than two pins or SMDs involved. Not only has the soldering machine impact on excess solder but also the artwork. Simply keep the pad size small and keep distance between the SMT and the THC.

1.2.4 Design for hole-fill

There are several reasons to poor hole-fill. New soldering machines use spray fluxing method. The problem is that relatively big amount of flux must be injected into the component hole to cover the surface of both the hole and the top side pad. A test board (fig 5) was developed to find the optimal pad-to-hole ratio with hole diameters from 0,5 to 1,5 mm and pad 0,9 to 4 mm in 0,1 mm steps. Unfortunately general purpose ratio cannot be published because it is process-

dependent. In our case the best choice was a hole diameter of 0,6 – 0,7 mm and the pad diameter 0,6 mm more for PTHs and small components. As a hint for manufacturers, for instance a set of various pads can be placed on an unused part of the PWB to be able to follow the soldering ability of the process. One simple rule; keep the pads relatively small on the top side. [13]

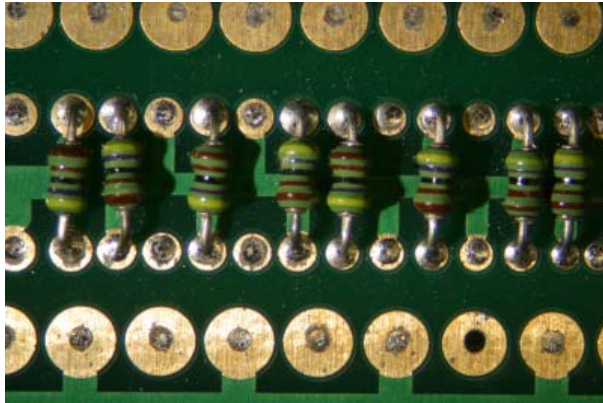


Figure 8. A section of the test board used for hole-fill testing.

3 Post-design guidelines

After the first production series of boards is completed, the artwork must be tuned. Typically there are missing joints, excess solder or icicles, bridges and other malformed joints which occur more than once at the same place.

3.1 Re-design for SMT bridges

The bridges occur typically where the components are close to each other. The higher component is the higher risk is. Often the behavior is quite unpredictable, but the bridges often occur in the neighborhood of some more massive components or THCs with high wire diameter. In this case the distance between the components involved has to be changed or one component must be rotated to make more distance between them. Also consider reducing the component size down to 0603 to save space and height. A temporary solution may be to add a few glue dots where the bridge occurs. The ICs must have solder thieves to avoid bridges as in fig 5.



Figure 5. Solder bridge between the last 2 legs of an IC.

2.2 Re-design for SMT solder skips

The skips occur typically when an adjacent component is oriented with its non-metallic side towards the solder joint. See the X- crossed examples in figure 3. Sometimes the reason to the skip is not predictable. It may also depend on some thermally heavy component in the neighborhood. The flux might produce gas bubbles during the soldering process. Is there a path for the bubble to escape? (When testing the wave adjustments using a glass board, a lot of bubbles is seen because of its high thermal mass.)

The problem may also be reduced by modifying the shape of the footprint. Maybe the terminal of the component is not optimal for wave soldering:

- rotate the ICs correctly, also chips and SOs solder better when terminals are 90 degree to the moving direction [14]
- open the solder mask on the track near the foot-print or make it T-shaped. It is obvious that the area of the footprint is not too large, see fig 2. [14]
- is there a barricade of adjacent components not letting gas bubbles pass?

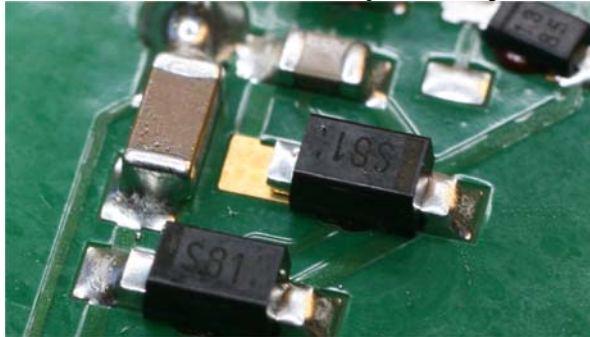


Figure 6. Solder skip shadowed by adjacent component and having too small pads for good solder ability.

2.3 Re-design for excess solder and icicles (THC)

The artwork has to be considered as a world in 3D. The height of components is of greatest importance in lead-less soldering. If there are long legs which are either too thick (the flux does not dry correctly) or too thin (the flux gets worn out), there is a risk for icicles or bridging. When more than two legs or SMD components are involved it is more than just a bridge, it is excessive solder.

There are some guidelines which helps to cure the excessive solder:

- reduce leg length
- increase distance between the legs if possible
- decrease pad size
- add glue dots between pads
- disturb the symmetry by modifying the pad shape for instance by giving every second pad a short tail [14]
- if SMT involved in the excessive solder, move the SMD some mm.

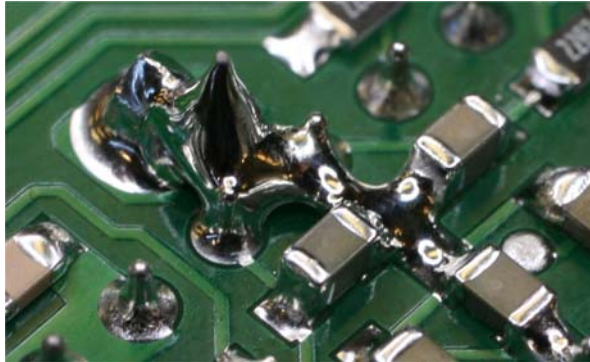


Figure 7. Example of excessive solder with icicle where SMT is involved.

2.3 Re-design for hole-fill

As the hole-fill is much dependent on the PWB metal surface and the soldering machine, there is not much to be done. The NiAu finish is not the best for PTHs and hole-fill. As the appropriate hole to pad ratio is process dependent, a test board is suggested or simply pick the best examples from other products in the same process. A wide hole is not always better than a narrow one. [15, 16]

2.4 Re-design for SMT reliability

The joints must take the stress caused by thermal cycling during the life-time of the product. Solder joint must have a fillet like fig 3B. It is therefore important to keep the foot-prints small. Suggested requirements for SMD pads: [17]

- maximum 2 tracks may connect to the pad
- track diameter at most 2/3 of pad width
- track covered with solder mask at least 0,4 mm
- pad on copper area must be thermally separated and connected using maximum 2 tracks
- no PTHs on the pad.

3. Conclusions

This is a condensed guideline for wave solder artwork designers. Each type of problems is worth a separate dedicated research. Especially experience with several re-design cycles would give valuable information for all electronics manufacturers. I declare the separate subjects open for any interested researcher to work and co-operate on this field.

The highest value of this paper is to add understanding of the process helping the workshop personnel to help themselves.

Wave soldering if even after 50 years of use not yet well enough known, still giving opportunities to researchers to find challenge.

References

- [1] Wikström Y., Eloranta E.,2005," *Managing flow solder production at RoHS compatible processes.*," in *New Exploratory Technologies*
- [2] Hämeenoja O.,Wikström Y., and Talvitie O,2007,"*Tilastomatemaattinen keskuspistevertailu ja CCD-suunnitelma aaltjuotoskoneen optimoinnissa,*" ,Turku University, in *New Exploratory Technologies*
- [3] Wikström Y., Hämeenoja O., Tuominen A, Helppi O., Tapio J, Viljanen T.,2007,"*Optimization of Lead-less Wave Soldering Processes*", Turku University of Applied Sciences, in *New Exploratory Technologies*
- [4] Diepstraten G.,2000,"*Analyzing Lead-Free Soldering Defects in Wave Soldering Using Taguchi Methods*",Vitronics Soltec Oosterhout, NL,
- [5] Andonova, A., Dinkova, N.,Marinov,I.,2006,"*Wave Soldering Quality Improvement by Design of Experiment Approach*", Technical University of Sofia,Electronics
- [6] Wikström Y., Tuominen A.,2008,"*The Impact of Probability in Yield Optimization on Wave Soldering Processes*" ", Turku University of Applied Sciences, in *New Exploratory Technologies*
- [7] Coombs C.,*Printed Circuits Handbook*",5:th ed., McGRAW-Hill, NY(2001)
- [8] Ohring, M.,1998,"*Reliability and Failure of Materials and Devices*",Stevens Institute of Technology, NJ
- [9] Biocca P.,2005,"*Lead-free Wave Soldering; Some Insight on How to Develop a Process that Works*", kester.com
- [10] Ganeasn S., Pwcht M.,2009,"*Lead-Free Electronics*",IEEE Press (2006)
- [11] Willis B.,"The Defect Troubleshooter", Global SMT Packaging 2009 , http://www.globalsmt.net/troubleshooter/wave_soldering.htm, visited Aug 23 2009
- [12] Strauss,R.,1998,"*SMT Soldering Handbook 2nd ed*",Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Oxford
- [13] Olshin M.,2008,"*Printed Circuit Board layout design impact to hole-fill in wave soldering*",unpublished Thesis, Turku University of Applied Sciences.
- [14] 2009,"*Online Postgraduate Courses for the Electronics Industry*", University of Bolton, <http://www.ami.ac.uk/courses/topics/> visited Aug 23 2009
- [15] Uganuma,K.,2004,"*Lead-Free Soldering in Electronics Science, Technology, and Environmental Impact*",Osaka University,NY
- [16] Judd, M., Brindley,1999,"*Soldering in Electronics Assembly*", Newnes,Oxford
- [17] Kivikunnas,J.,(1995),"*Piirilevyn suunnitteluhje*",Cadmic Oy, educational materials.