



## Lead-free solders and reliability

It is now evident that tin-lead solders will be substituted for lead-free alternatives worldwide. The shift to fully Pb-free production is going on in Japan, and Europe will follow not later than the 1st of July 2006.

The impact of the transition to lead-free electronics production is not that significant on materials and manufacturing processes as it will have on the reliability of solder interconnections. Instead of one "drop in" alternative several lead-free solder candidates, component and printed circuit board coatings and finishes have been developed, and the selection of a solder system depends ultimately on the reliability requirements of a product such as thermal and mechanical loading conditions of solder interconnections, products operational environment and designed life-time.

Hence, the consideration of the reliability aspects in design, manufacturing and testing of electronics assemblies will be a challenging task. It adds to the need for active cooperation between @Teksti:design, manufacturing and reliability engineers and demands significant investments in research and development, because even without the WEEE/ROHS directive new functions and higher performance of future products will set higher requirements for their reliability; the factor becoming more important in highly competitive world market.

The National Technology Agency of Finland and electronics industry (Nokia, Elcoteq Networks, Aspacomp Group and Micro Analog Systems) are supporting financially the IMR project. The laboratory of Electronics Production Technology is working in this project also with Atotech GmbH (Germany), Multicore Solders (U.K.) and Alpha Metals (Belgium). The contact person is Jorma Kivilahti (jorma.kivilahti@hut.fi).

# Lyijy poistuu liitoksista

*Tuskin mistään muusta sähkö- ja elektroniikkalaitteiden valmistukseen liittyvästä asiasta on kirjoitettu viime vuosina yhtä paljon kuin lyijypitoisten materiaalien terveys- ja ympäristövaikutuksista. Lyijyn käytöstä elektroniikkatuotteissa tullaankin asteittain luopumaan.*

Jorma Kivilahti ja Toni Mattila

**J**apanissa kuluttajien kiinnostus lyijyttömiin tuotteisiin havaittiin jo edellisellä vuosikymmenellä, ja paljolti siksi merkittävimmät japanilaiset yritykset ovat siirtymässä täysin lyijyttömään valmistukseen vuoden 2004 aikana. Lyijyttömien materiaalien ja prosessien käytön ei katsota parantavan vain tuotteiden ja yhtiön julkista kuvaa – vaan se tarjoaa kilpailuetua teknologisesti edistyneimmille elektroniikan valmistajille.

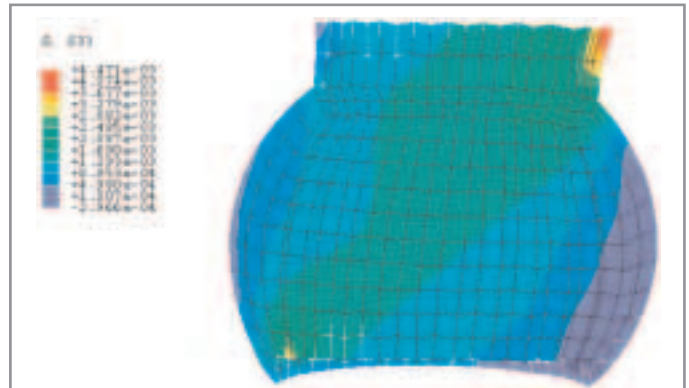
Euroopan unioni hyväksyi kuuluvana vuonna uudistetun WEEE/ROHS-direktiivin, joka edellyttää jätteen tuottamisen minimoimista sekä uusiokäytön ja lopukäsittelyn maksimoimista ja ennen muuta kieltää – tosin tietyin varauksin – vaarallisiksi luokiteltujen aineiden kuten lyijyn, kuuksiarvoisen kromin ja polybromibifenyylin käytön kulutuselektronikassa 1.7.2006 lähtien.

Kulutuselektronikka-tuotteissa ei saa esiintyä lyijyä koostumukseltaan 0,1–85 painoprosenttia. Epäpuhtautena lyijyä saa siis olla enintään 0,1 prosenttia, mutta korkealyijyiset juoteseokset sallitaan niin kauan, kunnes niitä korvaava materiaali on kehitetty.

**Yleisimmät lyijyttömät juotteet**

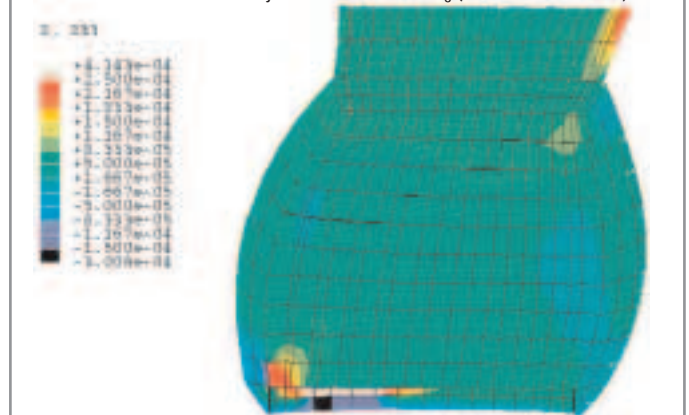
Valtaosa sähkö- ja elektroniikkalaitteista valmistetaan pinta- tai läpiliittämällä komponentit piirilevyihin tinan ja lyijyn juoteseoksilla. Juotteiden sekä komponentti- ja piirilevypinnoitteiden ominaisuuksiin perustuvat kokoonpanoprosessit mahdollistavat korkean saannon ja kustannustehokkuuden.

Tinalyijyoseosten käytöstä on



Nystyn jännitysjaakama nopeassa muodonmuutoksessa (venymänopeus 1000 %/s).

Stress distribution inside a solder joint under shock loading (strain rate 1000%/sec).

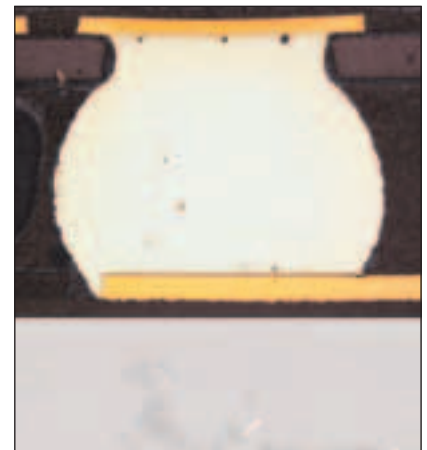


Hitaassa muodonmuutoksessa viruminen tasoittaa jännityksiä (venymänopeus 0.1 %/s).

Solder creep distributes stresses more evenly under fatigue loading (strain rate 0.1%/sec).

**Vauriotyyppi 3:** Ylempänä murtuma piirilevyn puolella (Cu,Ni)-kerroksen alla ja alempana osasuurennus murtumasta.

Crack in the printed wiring board side (Cu,Ni) intermetallic compound and the same crack with higher magnification.

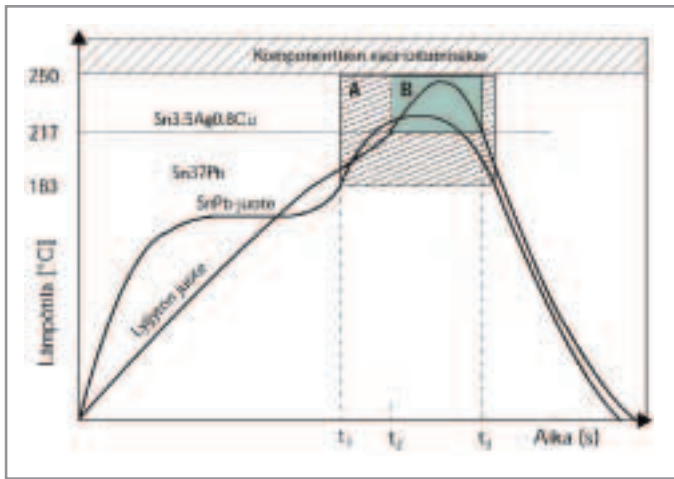


pitkäaikaista ja monipuolista kokemusta, mikä on osoittanut niillä valmistettujen tuotteiden luotettavuuden useimmissa käyttösovelluksissa. Siksi lyijyttömien juotteiden tutkimus- ja kehitystyön lähtökohdiana on ollut säilyttää eutektiseen tinalyijyjuotteeseen (63Sn37Pb) ja sen muunnelmiin (60Sn40Pb ja 62Sn36Pb2Ag) perustuva valmistusprosessi niin pitkälle kuin mahdollista.

Tavoitteeksi asetettiin niin sanotun drop-in-juotteen löytäminen metallurgisesti mahdollisten

seosten joukosta. Tässä tehtävässä ensimmäinen vaatimus on ollut juotteen sulamispisteen säätämisen mahdollisimman lähelle tinalyijyoseoksen sulamispistettä (183 °C). Muita vaatimuksia ovat hyvä juotettavuus ja luotettavuuden kannalta riittävät mekaaniset ominaisuudet. Tavoitteiden saa-

# Vaihtoehdot juotteet kehittyneet



Typyinen tinalyijyille säädetty reflow-profiili (A) ja lyijytön profiili (B).

Typical reflow profile for lead-bearing solder pastes (A) and lead-free solders (B).

vuttamiseksi on tutkittu satoja lyijyttömiä juoteseoksia, mutta näistä vain muutamat täyttävät kohtuullisesti edellä mainitut vaatimukset.

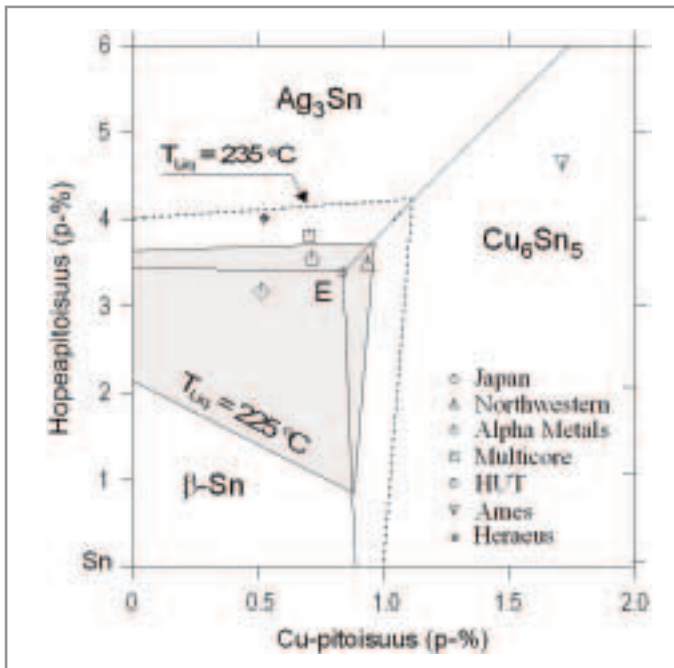
Sulamislämpötilojensa perusteella lyijyttömät juotteet voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: matalan lämpötilan, välialueen (200–227 °C) ja korkean lämpötilan juotteisiin, jotka alkavat sulaa vasta korkeimpien reflow-lämpötilojen (260 °C) yläpuolella.

Välialueen juotteita ovat muun muassa eutektiset kaksikomponenttiset seokset Sn3.5Ag (221 °C) ja Sn0.7Cu (227 °C) sekä kolmekomponenttiset SnAgCu-seokset (217 °C). Muita kaupallisia juotteita ovat SnAgBi-seokset ja SnAgCuSb-juote, joka on suosittu

Yhdysvalloissa. Edellä mainitut juotteet on suunniteltu korvaamaan eutektinen tinalyijyjuote, ja siinä tehtävässä ne toimivat varsin hyvin, kun fluksikemia ja juotosprosessi on säädetty niiden korkeampien sulamispisteiden mukaisesti.

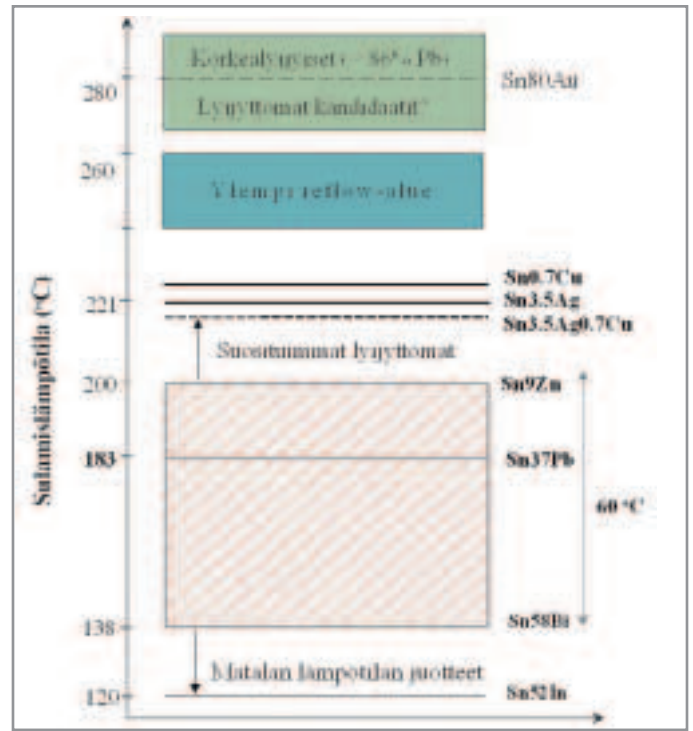
## Lyijyttömien liitosten luotettavuus

Uusien lyijyttömien juotteiden, komponenttien ja piirilevyjen metallointien välisiä reaktioita ja niiden synnyttämiä mikrorakenteita ei tunneta kovin hyvin, eikä myöskään juotelitosten käyttäytymistä moniaksaalisissa kuormitustiloissa. Samoin varsin vähän tiedetään lyijyttömissä liitoksissa käytön aikana tapahtuvista mikrorakenteellisista muutoksista



SnAgCu-juotteiden sulamislämpötilat koostumuksen funktiona. Ames-yhtion juote on täysin sula vasta 265 asteen yläpuolella.

Liquidus temperatures as a function of material composition. Ames alloys are not completely liquid until above 265 degrees centigrade.



Lyijyttömien juotteiden sulamispistealueet sekä yleisimpien seosaineiden vaikutukset.

Melting regions of different solder alloys and the impact of most common alloying elements.

ta ja niiden vaikutuksista kokonaisuuden luotettavuuteen.

Onkin odotettavissa, että elektroniikkatuotteissa käytetyt juotelitokset joutuvat tulevaisuudessa vastaanottamaan suhteellisesti yhä suurempia mekaanisia, termisiä ja sähköisiä kuormituksia, koska liitosten tilavuudet pienevät jatkuvasti, kuten viereisen sivun kuva osoittaa. Siksi on tärkeää, että erityisesti juotelitosten eikä vain juotemateriaalien ohjaavat mikrorakenteelliset muutokset tunnetaan mahdollisimman perusteellisesti. Ne määräävät viime kädessä komponenttien sähköisten liitosten luotettavuuden käytössä.

## Tinan veroisia

Suosituimmat lyijyttömät juotteet on esitetty oheisessa taulukossa, johon on lisätty myös muutamia niitä kuvaavia ominaisuuksia. Taulukkoa luettaessa on kuitenkin huomattava, että esimerkiksi eutektisestä koostumuksesta (Sn3.43Ag0.83Cu) poikkeavan seoksen sulaminen alkaa (ja jähmettyminen loppuu) aina lämpötilassa 217 °C, mutta seos on täysin sula vasta tämän lämpötilan yläpuolella. Tällä seikalla on merkitystä reflow-uunituksen ylälämpötilan määrittämisessä, sillä alemman ja ylemmän sulamispisteen välinen ero saattaa olla hyvinkin suuri koostumuspoikkeaman suunnasta ja suureudesta riippuen – kuten on asian laita esimerkiksi Ames-juotteen tapauksessa.

Pääsääntöisesti lyijyttömien juotteiden kyky kostuttaa kuparia ja yleisimmin käytettyjä piirilevyjen metallointeja ei ole aivan tinalyijyjuotteiden veroinen, mutta oikea juoksutteen valinta ja korkeampi sulamislämpötila parantavat niiden kostutuskykyä.

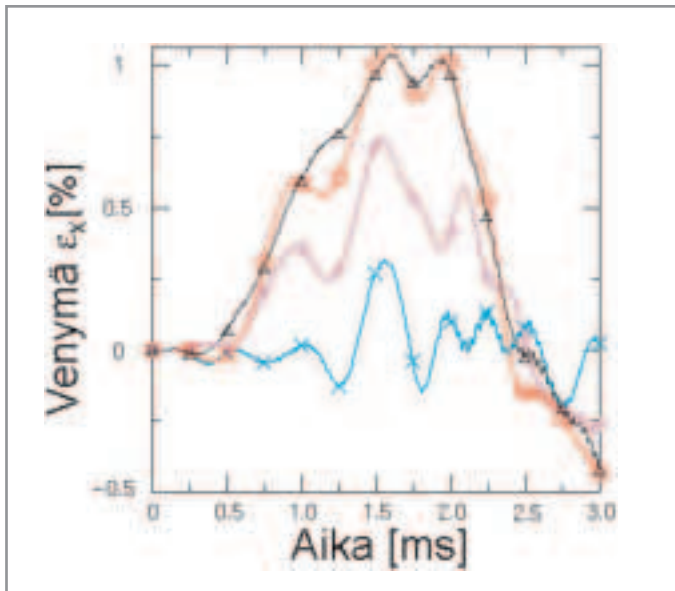
Lyijyttömien juotepastojen kehityksen alkuvaiheessa juotelitokset sisälsivät varsin paljon huokosia ja muita juotosvirheitä, mutta tänä päivänä parhaat pastat ovat tässä suhteessa tinalyijyjuotepastojen veroisia.

Kolmannen vaatimuksen osalta voidaan todeta, että erityisesti lähes-eutektisten SnAgCu-juotteiden ja vähän vismuttia sisältävien SnAgBi-juotteiden mekaaniset ominaisuudet ovat ainakin tinalyijyjuotepastojen luokkaa. Ne määräävät viime kädessä komponenttien sähköisten liitosten luotettavuuden käytössä.

## Lyijyttömät komponentti- ja piirilevyynnoitteet

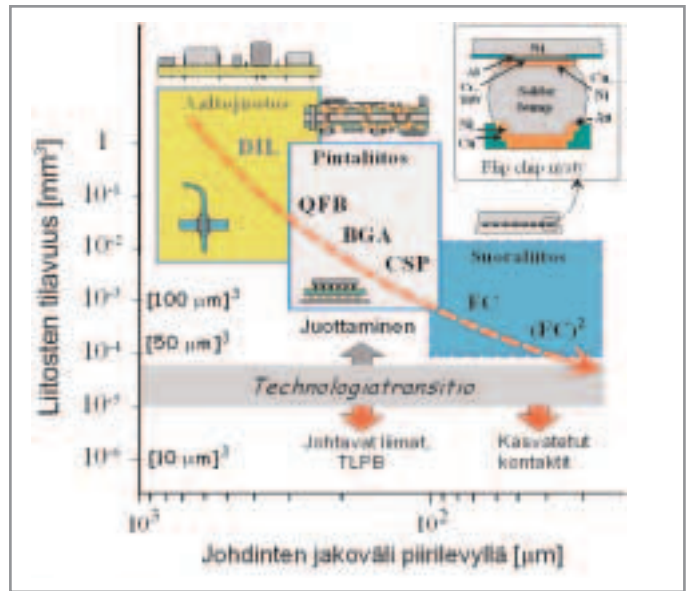
Täysin lyijyttömien tuotteiden valmistaminen edellyttää, että yleisimmin käytetty tinalyijyynnoite (HASL) korvataan lyijyttömällä vaihtoehdolla. Yleisimpiä lyijyttömiä pinnoitteita ovat kemiallinen Ni(P)/Au, matta (tai kirkas) tina, hopea ja orgaaninen pinnoite (OSP).

Viime vuosina on erityisesti kannettavan elektroniikan val-



Elementtimenetelmällä lasketut venymät ajan ja paikan funktiona.

Stress and strains calculated by the finite element method (FEM) as a function of time and location.



Liitostilavuuksien pieneminen sähköisten kontaktien tiheyden ja lukumäärän kasvaessa.

Impact of miniaturization on inter connection and packaging technology.

mistuksessa käytetty varsin halpoja orgaanisia suojapinnoitteita. OSP-pinnoitteet hajoavat juottamisen aikana lähes jäänteitä jättämättä ja paljastavat altaan puhtaana, hapettumattoman kuparipinnan. Toisaalta orgaaniset pinnoitteet kestävät heikohkosti korkeita lämpötiloja, kosteutta ja mekaanista rasitusta. Ne ovat myös eristeitä, eivätkä siten sovellu liittimien pinnoitteiksi. Mutta uuden tyyppisiä OSP-pinnoitteita kehitetään jatkuvasti ja siten on oletettavaa, että useimmat niiden puutteista korjautuvat lähitulevaisuudessa.

Puhdas tina toimii erinomaisesti kuparin suojapinnoitteena, sillä se liukenee täysin sulaan juotteeseen ja paljastaa juotteelle oksidoitumattoman kuparipinnan. Sen heikkoutena pidetään taipumusta viskerien muodostukseen, mikä voi aiheuttaa oikosulkuja piirilevyn johtimien välillä. Viskerien esiintymiseen voidaan kuitenkin vaikuttaa monella tavalla, ja uusimpien kaupallisten pehmeiden tinapinnoitteiden väitetään olevan viskerittömiä. Periaatteessa puhdas tina on altis myös tinarutolle, mutta sen muodostuminen edellyttää tuotteita poikkeuksellisia käyttöoloja.

Ni(P)/Au on kova pinnoite, joka sopii korkeisiin juottamislämpötiloihin ja säilyttää erinomaisen juotettavuutensa myös kaksipuolisessa pintaliitoskokooppaanossa. Kemiallinen nikkeli kasvaa kuparin päälle hyvin tasaisesti ja tarjoaa siten hyvän juottamisalustan etenkin tiheille kokoonpanoille. Nikkelin päällä oleva immersioikulta on erittäin ohut (50–250 nm), ja se liukenee juottamisen aikana täysin sulaan

juotteeseen. Ni(P)/Au-pinnoite on kalliimpi kuin OSP-pinnoite. Sen merkittävin ongelma on nikkelin kasvatuksen aikana kylvystä pinnoitteeseen sitoutuva fosfori, joka viimeaikaisten tutkimusten mukaan on tärkein "black pad"-luotettavuusongelman syy.

Juottamisen reaktiotuotteet Lyijyä korvaamaan käytetään useita erilaisia juotteita sekä komponenttien ja piirilevyjen pinnoitteita, joista OSP-pinnoitteita lukuun ottamatta kaikki liukenevat sulaan juotokseen ja muodostavat tinan kanssa monikomponenttisia liitoksia. Koska kaikki lyijyttömät juoteseokset sekä komponenttien ja piirilev-

jen pinnoitemetallit eivät ole metallurgisesti yhteensopivia, suunnittelijan, valmistajan ja testaajan olisi tunnettava epätoivottujen materiaaliyhdistelmien yhteisvaikutukset kokoonpanojen luotettavuuteen.

Lyijyttömässä juottamisessa syntyvät reaktiotuotteet voivat poiketa merkittävästi tinalyijyjuotosten rakenteista. Tarkastellaan lyhyesti kahta esimerkkiä.

Kun nikkelimetalloituja johtimia juotetaan perinteisillä tinalyijyjuotteilla johtimien ja juotteen väliin muodostuu ohuet kerrokset metallienvälistä yhdistettä Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>. Jos juotteena käytetään lyijyttömää SnAgCu-seosta (jossa kuparia voi olla vain 0,5 p-), reaktiotuotteeksi ei muodostu-

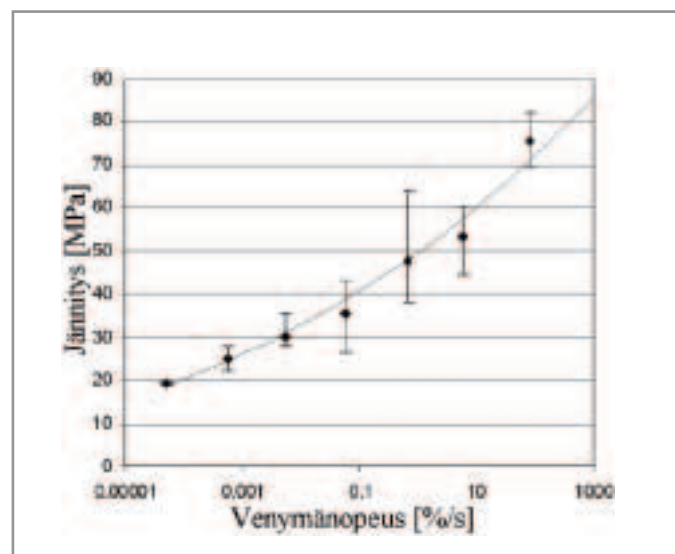
kaan Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>, vaan (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, joka liuottaa itsensä hieman nikkeliä. Tämä mikrorakenteellinen muutos johtuu kuparin nikkeliä suuremmasta kemiallisesta aktiivisuudesta juoteseoksessa.

Juotettaessa kuparijohtimia yhteen Sn37Pb-juotteella metallien väliseksi yhdistekerrokseksi muodostuu Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> (ja hyvin ohut kerros yhdistettä Cu<sub>3</sub>Sn). Jos juottaminen suoritetaan lyijyttömällä tinapohjaisella juotteella, jossa on seosaineena hieman sinkkiä (yli 0,5 p-), Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>-kerrosten muodostuminen estyy täysin ja tilalle tulee messinkikerrokset (joko γ- tai ε-messinki sinkin pitoisuudesta riippuen). Koska jälkimmäiset reaktiokerrokset sitovat kuparijohtimet toisiinsa heikohkosti, niiden muodostuminen tulisi estää.

Tällaisten muutosten ymmärtäminen ja hallinta on mahdollista, jos käytettävissä on liitossysteemien termodynaamiset kuvaukset. Siksi Elektronikan valmistustekniikan laboratoriossa on viimeisten 15 vuoden aikana rakennettu elektronikan kokoonpanossa käytettävien materiaalien tietopankkia (Interconnection and Packaging Materials Databank, IPMA).

Mikä lyijyttömyydessä maksaa?

Elektronikkayritykset ovat tutkineet pastanvalmistajien kanssa lyijyttömän juottamisen osuutta elektronikkatuotteiden kokonaiskustannuksista. Tuotteen pintaliitoskokooppaanossa käytettiin Sn3.9Ag0.78Cu-juotetta ja sille optimoituja prosessiparametreja. Hieman yllättäen havaittiin, etteivät materiaali- ja energiakus-



Lyijyttömän liitosmateriaalin (Sn2.5Ag 0.5Cu) lujuuden riippuvuus kuormitusnopeudesta.

Strain rate dependency of the strength of lead-free solder alloy (Sn2.5Ag 0.5Cu).

tannukset kasvaneet olennaisesti tinalyijykokoonpanoon verrattuna, ja että materiaalikustannukset – olivat ne sitten lyijyllisiä tai lyijyttömiä – olivat vain 0,1–0,2 prosenttia tuotteen kokonaiskustannuksista.

Huomattavimmat lyijyttömään valmistukseen liittyvät kustannuksen lisäykset tulevat suunnittelu-, valmistus- ja testausprosessin kehittämisestä sekä käyttöönotosta ja jonkin verran pidentyneestä kokoonpanoajasta ja todennäköisesti alkuvaiheesta pidentyneestä saannosta.

Erityisesti sellaisten lyijyttömien kokoonpanojen saannon pieneminen, joissa vikojen korjaus ei ole mahdollista, lisää luonnollisesti kustannuksia. Myös suunnittelukustannukset voivat joidenkin tuotteiden osalta olla hyvinkin merkittäviä. On kuitenkin todennäköistä, että siirtymävaiheen jälkeen lyijyttömän elektronikan yksikkökustannuksissa päästään varsin lähelle lyijyllisen kokoonpanon kustannuksia.

Lyijytön kokoonpanoprosessi Vaikka aaltojuottaminen on kaupallisesti merkittävä elektronikan valmistuksen osaprosessi, tarkastelu keskitetään tässä kapaleessa lyijyttömään pintaliitoskokoonpanoon, sillä lyijyttömyys vaikuttaa siihen enemmän.

Lyijyttömyydellä ei ole olennaista vaikutusta pastanpainoon. Juoksuasteen vaihtuminen on muuttanut pastojen reologisia ominaisuuksia kuten viskositeet-

tia ja tiksotrooppisuutta, mutta ne voidaan ottaa huomioon prosessiparametrien säätämällä. Komponenttien ladontavaiheessa on oleellista, että pasta säilyttää painon jälkeisen muotonsa ja tahmeutensa, jotta myös pienimpien komponenttien ladonta onnistuu.

Samat periaatteet pätevät myös lyijyttömässä kokoonpanossa, ja ne on siten otettava huomioon. Tänä päivänä kaikkia lyijyttömiä juotepastoja on saatavana samoissa partikkelikokolu-

Toisaalta on huomattava, ettei mikään tällä hetkellä markkinoilla olevista SnAgCu-juotteista ole koostumukseltaan eutektinen, ja siksi ne ovat täysin sulana vasta 217°C:n yläpuolella; sitä korkeammalla mitä enemmän koostumus poikkeaa eutektisestä pisteestä.

Käytännössä kokoonpanon lämpötila täytyy nostaa lähelle 250°C tai jopa sen yli, jotta varmistetaan riittävän hyvä juottuminen laimeilla juoksuasteilla. Nykyisten uunien lämmönsiirtoteho on optimoitu tinalyijyprosessille. Siksi usein päädytään vain hidastamaan kuljettimen nopeutta, jos muita menetelmiä, kuten infrapunakuumentimia ei ole käytössä. Tällöin tuotteen läpimenoaika voi kasvaa jopa 20–30 sekuntia.

Prosessi säädettävä

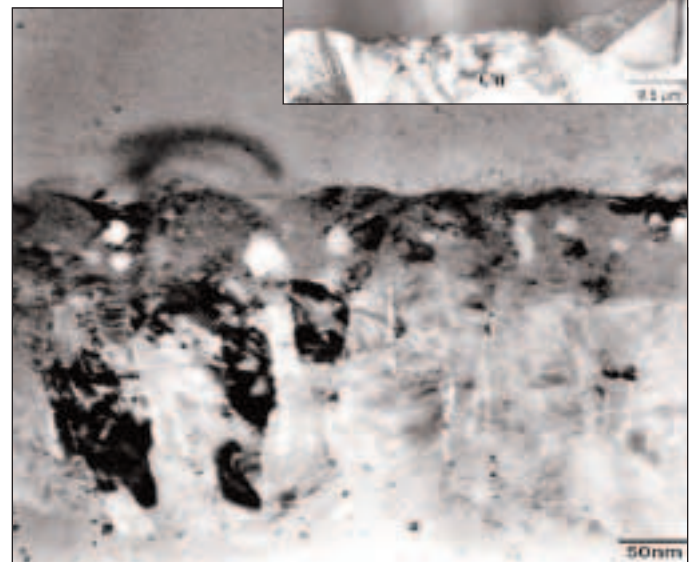
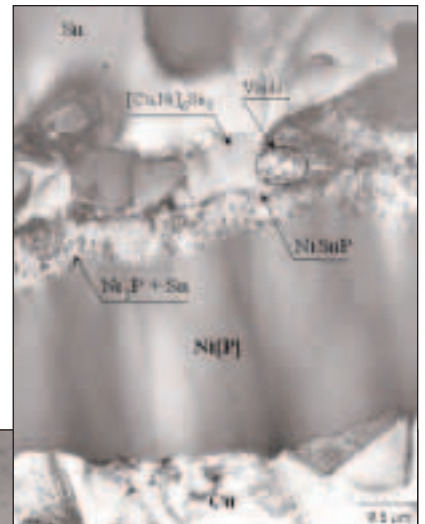
Pastan metallipartikkelien koostumus määrää juottamisprosessin huippulämpötilan, mutta se, miten nopeasti sinne voi nousta,

TEM-kuva Ni(P)/Au-pinnoitteen ja lyijyttömän juotteen välisistä reaktiokerroksista.

Transmission electron micrograph from a lead-free solder joint on the Ni(P)/Au metallization.

Osasuurennus yllä olevan kuvan huokoisesta reaktiokerroksesta NiSnP.

Magnified image of the sponge like NiSnP layer in between the (Cu,Ni) intermetallic layer and the Ni(P)/Au metallization.



riippuu pitkälti juoksuasteen ja juotosuunin ominaisuuksista sekä komponenttikokoonpanosta. On merkillepantavaa, että lyijyttömässä juottamisessa juoksuasteen aktivointi suoritetaan korkeammassa lämpötilassa kuin lyijyllisessä juottamisessa (SnPb-juotteella n. 160°C).

Koska juottamisprosessin aikana tapahtuu kuitenkin jatkuvaa uudelleenhapettumista etenkin korkeammassa lämpötilassa – hapettumisnopeuden riippuessa eksponentiaalisesti lämpötilasta – lyijyttömässä juotepastassa tulee olla riittävästi kostutusta ylläpitäviä pelkistäviä kemikaaleja.

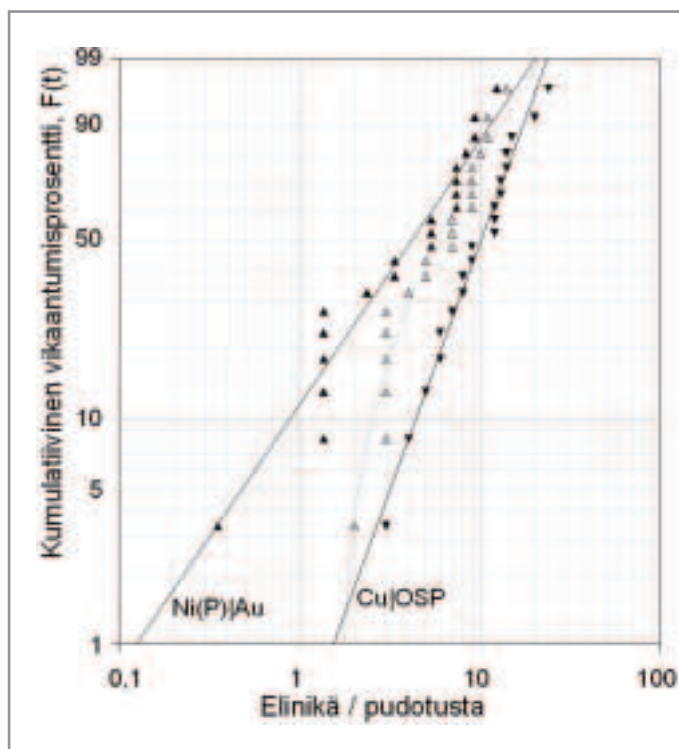
Koska suosituimpien lyijyttömien juotteiden sulamispisteet ovat korkeampia ja kuparijohtimien kostutuskyky jonkin verran huonompi (kostutus aika pidempi) kuin tinalyijyjuotteiden, lyijyttömän juottamisen prosessi-ikkuna on pienempi. Osaltaan sitä pienentää myös se, että kor-

keammasta juottamislämpötilasta ja suuremmasta tinapitoisuudesta johtuen komponenttien ja piirilevyjen suoja-pinnoitteiden ja niiden alla olevien johdinten liukeneminen on nopeampaa kuin tinalyijyjuottamisessa.

Prosessi-ikkunan pienentymisen takia lämpötilaprofiili pitää määrittää tapauskohtaisesti kullekin kokoonpanolle, jo siksi että erikokoiset komponentit juottuisivat samanaikaisesti. Sen vuoksi lämpötilagradientteja, jotka pyrkivät kasvamaan lineaarisen juottamisprofiilin takia, on pyrittävä pienentämään jo suunnitteluvaiheessa kiinnittämällä erityinen huomio komponenttien keskinäiseen sijoitteluun.

Lyijyttömien liitosten iskunkesto

Komponenttien luotettavuutta iskumaisessa kuormituksessa voidaan tutkia instrumentoidulla pudotustestilaitteistolla, jossa stan-



Eri testilevytyyppien Weibull-kuvaajat.

Weibull plots of different test board variations.

## Pinnoitteita ja lyijyttömiä juotteita

Piirilevypinnoite	Komponenttipinnoite	Lyijytön juote
Ni/Au	Tina (puhdas, matta)	Sn0.7Cu
Ni/Pd/Au	Ag/Pd	Sn3.5Ag
OSP	Ni/Au	Sn58Bi
Tina (puhdas, matta)	Ag	Sn52In, Sn10Zn
Ag	Bi	Sn3.8Ag0.7Cu
Bi		Sn3.5Ag3Bi

## Lyijyttömien juotteiden ominaisuuksia

Lämpötila-alue	Sulamispiste	Koostumus	Ominaisuuksista
Korkean lämpötilan juotteet	227°C	Sn0,7Cu	Halpa, melko korkea sulamispiste, alltojuottaminen
	221°C	Sn3,5Ag	Riittävä kostutus, hyvä väsymisensietokyky
	217°C	Sn3,43Ag0,83Cu	Hyvät termomekaaniset ominaisuudet
Välialue	213-219°C	Sn(2-2,5)Ag0,8Cu(0,5-0,6)Sb	Sb lujittaa liitosta, muutoin vastaa SnAgCu:a
	200-216°C	Sn3,5Ag3,0Bi	Bi lujittaa liitosta, luotettavuusriski Pb:n kanssa
Matalan lämpötilan juotteet	199°C	Sn10Zn	Zn:n oksidoituminen, korrosio, huono kostutus
	138°C	Sn58Bi	Luotettavuusriski Pb:n läsnäollessa, luja materiaali
	120°C	Sn52In	Rajalliset In-resurssit, herkkä korroosiolle

dardi testilevy pudotetaan tietyssä asennossa määrättyä korkeudelta kovalle alustalle. JEDEC-testilevy sisältää 15 nystytettyä CSP- tai BGA-komponenttia ja levyn tulee olla testiä varten siten suunniteltu, että se mahdollistaa komponenttiliitosten resistiivisyyden jatkuvan mittauksen testin aikana.

Törmäyksen vaikutuksesta testilevy värähtelee suurella taajuudella, jolloin myös levyn eri kohtien kokema jännitystila muuttuu nopeasti. Komponentit ja ennen kaikkea niiden liitokset kokevat eri kohdissa testilevyä nopeasti muuttuvia erisuuruksia muodonmuutoksia.

Mittauskäyrien aaltoilevuudesta voidaan päätellä, että testilevyn taipuma koostuu päävärähtelystä ja vähäisemmistä sekundaarivärähtelystä, joiden jaksojen pituudet ovat noin 0,5 millisekuntia. Siksi myös komponenttien juotenestyksen pudotuksessa kokemat pysyvät muodonmuutokset ovat erittäin nopeita. Tästä johtuen juotelitosten lujuus kasvaa voimakkaasti, kuten on myös kokeellisesti osoitettu.

Muodonmuutosnopeuden pienentyessä jännitys jakautuu tasaisemmin koko nystyn alueelle ja huippujännitykset putoavat. Tällöin juotelitoksessa ehtii tapahtua virumisdeformaatiota, mikä tasoittaa jännityshuippuja. Sitä vastoin nopeassa muodonmuutoksessa viruminen estyy ja suurimmat rasitukset syntyvät liitoksen ylä- ja alanurkkiin. Merkilepantavaa on, että tarkastelta-

vassa tapauksessa suurimmat jännitykset sijaitsevat liitoksen ylänurkassa.

Liitoksen hauraat kerrokset Vika-analyysi paljastaa kaikkiaan neljä erilaista vauriotyyppiä: 1) murtuma komponentin puoleisessa (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>-yhdistekerroksessa, 2) murtuma piirilevyn puoleisessa Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>-kerroksessa, 3) murtuma piirilevyn puolella (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>-kerroksen alla ja 4) murtuma piirilevyssä juotosalustan alapuolella.

Vauriotyyppi 3 esiintyy juotelitosten metallienvälisen yhdistekerroksen alla olevassa vyöhykkeessä. Kuten kuva osoittaa, murtuma etenee tarkasti ottaen metallienvälisen yhdistekerroksen (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> ja Ni(P)/Au-alusmetalloinnin välisessä rajapinta-alueessa. Murtumisen syy on rajapinnalle juottamisen aikana muodostunut hauras mikrorakenne.

Nikkelin kemiallisessa pinnoituksessa pelkistimenä käytettävästä hypofosfaatista saostuu nikkelin joukkoon vaihteleva määrän fosforia. Reaktiokerroksia on varsinaisesti kolme: kiteinen (Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, amorfina NiSnP ja kiteinen kahden faasin kerros (Ni<sub>3</sub>P + Sn), joista keskimäinen kerros on vaurion varsinainen syy.

Juottamisen aikana syntyneet mikrorakenteet eivät ole stabiileja, vaan ne tulevat muuttumaan laitteen käytön aikana, varsinkin kun komponenttien lämpötilat nousevat merkittävästi huoneen-

lämpötilan yläpuolelle. Tällöin metallienväliset yhdistekerrokset jatkavat paksuuskasvuun ja niihin voi liueta juoteseoksesta muita seosaineita ja epäpuhtauksia, jotka pyrkivät heikentämään niiden kykyä kestää mekaanisia tai termomekaanisia kuormituksia, joita tuotteen pudottaminen ja sen tehokomponenttien toistuva paikallinen kuumentuminen saa aikaan.

Lyijyttömiä ratkaisuja erikoissovelluksiin

Juotteiden rinnalla on ryhdytty käyttämään enenevässä määrin myös sähköjohtavia liimoja. Ne ovat lyijyttömiä ja juokutteettomia materiaaleja, joissa sähköä johtavana täyteaineena voi olla esimerkiksi hopeahileitä tai metalloituja polymeeripartikkeleita. Sähköä johtavat liimat voidaan painaa pastojen tapaan, dispensoida tai asettaa filminä kontaktialueiden päälle, minkä jälkeen ne lämpökovetetaan.

Liimojen mahdollistama matalampi liittämislämpötila, pienemmät jäännösjännitykset ja yhteensopivuus eri materiaalien kanssa tekevät niistä kiinnostavan vaihtoehdon erikoissovelluksiin.

On kehitetty myös toisenlaisia lyijyttömiä ja juokutteettomia ratkaisuja, jotka eivät perustu metallienvälisen reaktiokerroksen muodostumiseen kuten tavallinen juottaminen, vaan metallurgisesti yhteensopivien pinnoitemateriaalien yhteensulautumiseen.

Uudet ratkaisut tarjoavat monia teknisiä etuja, mutteivät korvaa juottamista elektroniikan tärkeimpänä liittämismenetelmänä.

Juote tarkoituksen mukaan Juotteen valintaan vaikuttaa ennen muuta tuotteen luotettavuudelle asetetut vaatimukset: millaisia lämpö- ja mekaanisia kuormituksia sekä ympäristövaikutuksia komponenttiliitosten tulee kestää. Mikä on suunniteltu käyttöikä ja miten tuotteet tullaan poistamaan käytöstä.

Käyttöön tulee – standardointiponnisteluista huolimatta – useita erilaisia juotteiden kanssa reagoivia lyijyttömiä komponentti- ja piirilevymetalloitteja ja -suoja-

pinnoitteita. Lyijyttömien juotteiden on oltava niiden kanssa metallurgisesti yhteensopivia. Siksi lyijyttömien kokoonpanojen luotettavuusnäkökohtien huomioiminen elektroniikkatuotteen suunnittelussa, valmistuksessa ja testauksessa on entistäkin haastavampi tehtävä. Se edellyttää huomattavaa tutkimus- ja kehityspanostusta, joka kohdentuu yhä pienemmiksi tulevien juotelitosten luotettavuuteen vaikuttavien tekijöiden hallintaan niin systeemi- kuin komponenttitasollakin.

Tutkimustyön välttämättömyyttä korostaa myös se, että ilman lyijyttömyysvaatimustakin elektroniikan luotettavuudesta tulee laitteiden uusien toimintojen ja lisääntyvän suorituskyvyn takia yhä merkittävämpi tekijä voimakkaasti kilpailluilla kulutuselektronikkamarkkinoilla. ■

Aiheesta enemmän

**ELFNET:** [www.lead-free.org](http://www.lead-free.org)  
IPC Reports on Lead-free materials: [www.ipc.org](http://www.ipc.org)

V.Puligandla, S.Dunford and J.K. Kivilahti, Reliability Aspects of Lead-Free Solders in Electronic Assemblies, Handbook of Lead (Pb)-Free Technology for Microelectronics Assemblies, Ed. Karl Püttli, Marcel Dekker Inc., New York, (in print).

J.K. Kivilahti, Ympäristömyötäinen tuotesuunnittelu: Lyijytön elektroniikka, Sähkö- ja elektroniikkateollisuusyhdistys (SET), elokuu 2001 (ISBN 951-96362-8-5), sivut 65–87.

J.K. Kivilahti, Modelling New Materials for Microelectronics Packaging, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology - Part B, vol. 18, No.2, May 1995, pp. 326–333.

## Taustat

**Kirjoittajat:** professori Jorma Kivilahti on TKK:n Elektroniikan valmistustekniikan EVT-laboratorion ja Elektroniikan valmistuksen tutkijakoulun johtaja Sähkö- ja tietoliikenneosastolla. DI Toni Mattila toimii Elektroniikanvalmistustekniikan laboratoriossa IMR-hankkeen projektipäällikkönä.

**Yhteyshenkilö:** [jorma.kivilahti@hut.fi](mailto:jorma.kivilahti@hut.fi)

**Tutkimus:** Miniatyrisoinnin vaikutus lyijyttömän elektroniikan valmistukseen ja luotettavuuteen.

**Yhteistyössä:** TKK EVT-laboratorio, Nokia, Ecoteq Networks, Aspacomp Group, Micro Analog systems, Atotech, Multicore Solders ja Alpha Metals.

**Teknologiaohjelma:** ELMO



Piirilevyn kiinnitys Nokian kehittämään pudotustestilaitteeseen.

Test board attachment mechanism on the drop test equipment (designed by Nokia).