

JUOTEMETALLIEN MATERIAALIMALLEISTA

Pekka Marjamäki

Rakenteiden Mekaniikka, Vol. 32
Nrot 1-2, 1999, s. 25-39

Tiivistelmä: Tässä artikkelissa esitetään materiaalimalleja, joita on sovellettu elektroniikkateollisuudessa yleisimmin käytetylle tinalyijyjuotteelle termomekaanisissa laskemissa. Metallien muodonmuutoksiin korkeassa lämpötilassa liittyviä ilmiöitä on myös selostettu.

JOHDANTO

Elektroniikkateollisuudessa on viimeisten vuosien aikana tehty yhä suurempi osa juoteliitoksista pintaliitostekniikalla. Pintaliitostekniikalla liitosten koko ja samalla komponentit saadaan pienemmiksi. Komponenttien ja piirilevyn suuren lämpölaajenemiseron vuoksi osa liitoksista kokee suuria rasituksia. Esimerkiksi flipchiptekniikalla piisiru ($\alpha_T = 2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) liitetään suoraan piirilevyyn ($\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$). Ohuissa liitoksissa nämä erot aiheuttavat reilun prosentin suuruisen leikkausmuodonmuutoksen sirun reuna-alueille parinkymmenen asteen lämpötilan muutoksessa. Toistuvat plastiset muodonmuutokset aiheuttavat usein liitoksen murtumisen riittävän usean toistokerran jälkeen. Palautumattomien muodonmuutosten perusteella pyritäänkin selvittämään liitosten murtumisajankohta.

Liitosten pienentyessä joudutaan suurten muodonmuutosten lisäksi tekemisiin materiaalien rakenteen kanssa. Metallit koostuvat rakeista, joiden koko on usein liitosten kokoluokkaa. Juotemetallit ovat lisäksi jatkuvasti lämpötila-alueella, jolla niiden mikrorakenne muuttuu kuormituksen aikana. Mikrorakenne vaikuttaa metallin viskoplastiseen käyttäytymiseen: pieni raekoko lisää myötölujuutta ja nopeuttaa virumista [13], [6].

MUODONMUUTOKSET METALLISSA

Metallien muodonmuutokset johtuvat sekä metallikiteissä olevien atomien että itse kiteiden välisistä liikkeistä. Atomien väliset etäisyydet voivat muuttua ja atomitasot hilassa voivat liukua toistensa suhteen. Samoin kiteet voivat liukua toistensa suhteen.

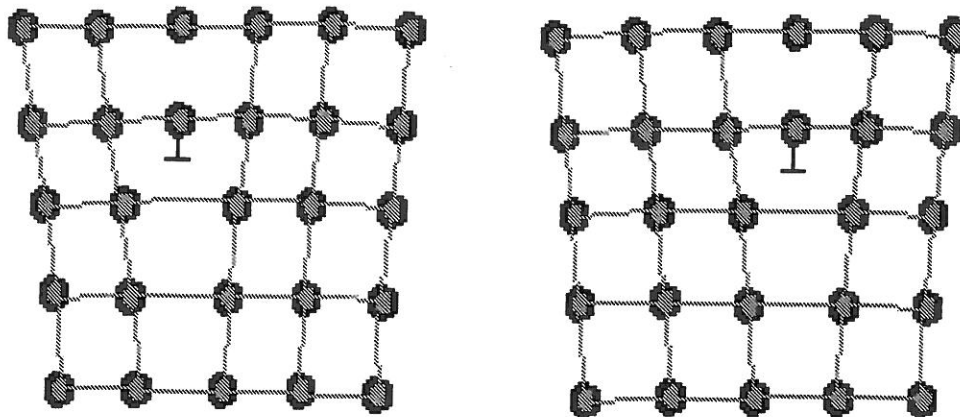
Kimmoiset muodonmuutokset johtuvat atomien etäisyyksien kasvusta. Etäännytyessään tasapainoasemastaan, eli hilapisteestään, alkaa atomiin vaikuttaa voimia, jotka pyrkivät palauttamaan atomin hilapisteeseen. Näiden hilavoimien ja ulkoisen kuormituksen välinen tasapaino saavutetaan atomien etäisyyksien muutoksella eli kiteiden venymisellä. Kuormituksen lakatessa vetävät hilavoimat atomin takaisin hilapisteeseen, jolloin kiteet palaavat alkuperäiseen muotoonsa.

Mikäli muodonmuutos tapahtuu leikkautumalla, eli atomitasojen liukumisena toisiansa pitkin, aiheuttaa hilapisteiden välisen etäisyyden suuruinen siirtymä atomin siirtymisen uuteen tasapainoasemaan. Tällöin kuormituksen poistumisen jälkeen atomit eivät palaudu alkuperäisiin asemiinsa, vaan lähimpiin tasapainoasemiin. Palautumaton muodonmuutos syntyy myös kiteiden siirtyessä toisiinsa nähden. Näistä edellä selitetty kiteen sisäinen muodonmuutos on yleisempi. Lämpötilan noustessa yli puoleen sulamispisteestä Kelvin-asteikolla, voi kiderajojen liukumisella olla vaikutusta kappaleen muodonmuutoksiin. Kimmoisissa muodonmuutoksissa kiteiden välisiä liikkeitä ei tapahdu.

Atomitasojen liukuminen toistensa suhteen tapahtuu dislokaatioiden liukumisena. Kuvassa 1 on kaksi 'poikkileikkausta' nauhamaisesta särmädislokaatiosta. Dislokaation siirtyä kuvan 1 mukaisesti dislokaation ympärillä olevien atomien tasapainoaseman vaihtuessa. Liukuessaan koko rakeen läpi, aiheuttaa särmädislokaatio yhden atomien välisen etäisyyden suuruisen plastisen muodonmuutoksen ja rakeen pinnalle porrasmaisen askelman. Plastinen muodonmuutos on ensisijaisesti dislokaatioiden liikettä; atomien liike on hyvin vähäistä dislokaatioiden liikkeeseen nähden.

Kuormittamalla kappaletta kauan havaitaan siihen syntyvän heti muodonmuutos, joka kasvaa hitaasti. Tätä aikaa vaativaa muodonmuutosta kutsutaan virumaksi. Viruminen tapahtuu osin samojen mekanismien mukaisesti kuin ajasta riippumaton plastinen muodonmuutos. Virumisessa muodonmuutokset tapahtuvat vain hitaammin, atomien liikkeessä kiteessä hitaammilla tavoilla.

Dislokaation liukuessa liukutasoa pitkin, sen liikkeen voi pysäyttää erilaiset esteet: toiset dislokaatiot, rakeessa olevat vieraat aineet tai raeraja. Yksi tapa ohittaa



Kuva 1: Särmädislokaation (\perp) eteneminen hilassa.

esteet on kiipeäminen. Kiiwettyään esteen yli, dislokaatio voi jatkaa liukumista uutta liukutasoa pitkin. Kuvan 1 dislokaation kiiwetessä dislokaation yläpuolelta siirtyy atomeja pois. Pääasiassa tämä aiheutuu vakanssien liikkeestä. Vakanssi on hilavirhe, joka syntyy, kun hilapisteestä puuttuu atomi. Kun vakanssi kulkeutuu dislokaation yläpuolelle, kumoavat ylimääräinen atomi ja atomivaje toisensa. Kun vakanssit ovat poistaneet ylimääräisen atomirivin dislokaation yläpuolelta, kiipeää dislokaatio ylöspäin. Kiipeäminen on yksi virumismekanismi.

Viruminen aiheutuu atomien lämpövarähtelystä ja on voimakkaasti lämpötilasta riippuvaa. Matalissa lämpötiloissa viruminen on hidasta, mutta korkeissa lämpötiloissa sen vaikutus on havaittavissa esimerkiksi vetokokeissa. Korkealla lämpötilalla tarkoitetaan tässä lämpötilaa, joka on lähellä metallin sulamislämpötilaa T_m . Merkittävää virumista tapahtuu yleensä lämpötilan ollessa yli kolmasosan sulamislämpötilasta.

Korkeissa lämpötiloissa on havaittu osan virumisesta tapahtuvan raerajaliukumisena. Näissä muutoksissa rakeet liikkuvat toistensa suhteen. Artikkeleissa [16] ja [7] on raerajaliukumisen todettu olevan määräävä muodonmuutosmekanismi tinalyijyseokselle jo huoneenlämmössä ($0.6 T_m$). Raerajaliukumisen ääriesimerkkinä voidaan pitää ns. superplastisuutta. Artikkelin [14] mukaan tinalyijyjuotetta voidaan sopivissa olosuhteissa venyttää jopa 2 000 % aineen murtumatta.

Mikäli dislokaation esteenä liukutasolla on pieniä esteitä, kuten vieras atomi tai atomiryhmä tai liukutasoon nähden poikittainen dislokaatio, pyrkii dislokaatio taipumaan sen ympäri. Kirjassa [13] on laskettu energian lisäys, jolla särmädislokaatio

pääsee dislokaatiometsän eli poikittaisten dislokaatioiden muodostaman esteen läpi. Vaadittava lisäenergia

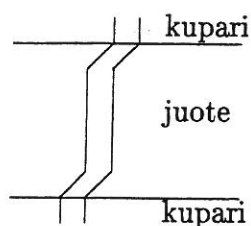
$$U(\tau) = e - \tau lb^2,$$

missä e on dislokaation taipuessa siihen liittyvä kimmoenergia, l on poikittaisten dislokaatioiden välinen etäisyys ja b on atomien välinen etäisyys. Lisäenergia on siis sitä pienempi, mitä suurempi jännitys on.

Korkeissa lämpötiloissa metalleissa tapahtuu myös elpymistä. Plastisen muodonmuutoksen aikana rakeisiin syntyy dislokaatioita. Dislokaatiot luovat ympärilleen jännityskentän, mikä lisää rakeeseen varastoitunutta energiaa. Elpymisen aikana tämä energia pyrkii vapautumaan. Vapautuminen tapahtuu toipumalla tai rekristallisoitumalla. Toipumisen aikana rakeissa olevat dislokaatiot pyrkivät liikkumaan asemiin, joissa niiden jännityskenttien energiat minimoituvat. Vastakkaiset dislokaatiot puolestaan kumoavat toisiaan. Rekristalisaatiossa metalliin ydintyy uusia rakeita, jotka kasvavat voimakkaita muodonmuutoksia kokeneiden rakeiden kustannuksella. Toipumisen aikana rakeiden hilarakenne palautuu lähemmäs kuormittamattoman metallin hilarakennetta, jolloin myös metallin ominaisuudet lähestyvät kuormittamatonta rakennetta. Rekristalisaatiossa raekoko muuttuu, millä on suuri vaikutus viskoplastisiin ominaisuuksiin.

Hyvin ohuissa rakenteissa ongelmaksi tulee myös aineen heterogeenisuus. Rae-rajojen ja rakeiden erilaiset lujuusominaisuudet mutkistavat mekaanista analyysiä. Juoteliitosten paksuus pintaliitoksissa voi olla lähellä 50 mikrometriä. Tällöin liitos koostuu muutamasta tai vain yhdestä kiteestä. Artikkeleissa [16] ja [7] raerajaliukumisen on todettu hallitsevan muodonmuutoksia juotteen normaaleissa käyttölämpötiloissa (juotteena lähes eutektinen tinalyijyjuote, eli noin 63 % Sn ja 37 % Pb). Artikkelissa [21] rakeiden liukumista ei havaittu (juotteena tina, johon lisätty 0.5 - 6 % Bi). Parin kiteen kokoisissa liitoksissa raerajojen liukuminen estyy helposti, joten liitos käyttäytyy eri tavalla kuin suurilla, satoja rakeita sisältävillä koekappaleilla tehdyt kokeet antavat olettaa. Toisaalta liitoksessa tapahtuu rekristalisaatiota, jolloin liitokseen muodostuu raerajoja. Liitoksen muodonmuutoksen epähomogeenisuutta kuvaa hyvin kuva 2. Yksi selitys hyvin epähomogeenisen muodonmuutostilaan on juuri rekristalisaatio juotteen ja kuparilevyjen rajapinnan lähellä.

Seosmetalleissa on havaittavissa seuraava merkittävä ilmiö. Tinalyijyjuotteessa (63 % Sn, 37 % Pb) tina muodostaa yhtenäisen rakenteen, jonka sisällä lyijy on erottuneena saarekkeiksi. Muodonmuutosten vaikutuksesta nämä saarekkeet kasvavat ja



Kuva 2: Kaaviokuva muodonmuutoksesta liitoksessa. Kuparitankoja vetämällä juoteseen (63 Sn 37 Pb) aiheutettiin tasainen leikkausjännitystila. Pystyviivat olivat kuormituksen alussa pystysuoria, mutta kuormituksen aikana viivat muuttivat muotoaan kuvan muotoiseksi. Kuva piirretty artikkelin [7] valokuvan perusteella.

niiden määrä vähenee. Seoksen sanotaan karkeutuvan. Karkeutuneen seoksen on todettu olevan muuta seosta pehmeämpää [15],[4]. Liitoksien on havaittu murtuvan tätä karkeutunutta aluetta pitkin. Voimakkaasti karkeutuessaan tina- ja lyijyfaasit muodostanevat uusia rakeita, jolloin karkeutuminen johtaa rekristalisaatioon. Kuvan 2 voimakkaan muodonmuutoksen alueella lienee käynyt näin.

Juotteiden mekaniikkaan liittyvät oleellisesti kemialliset reaktiot, jotka tapahtuvat juotteissa. Esimerkkinä tarkastellaan tinalyijyjuotetta (63Sn37Pb). Juote on kahden mekaanisilta ominaisuuksiltaan melko erilaisen metallin seos. Puhtaan lyijyn kimmokerroin huoneenlämpötilassa on noin puolet seoksen kimmokertoimesta, lyijyn virumisnopeus 30 °C:ssä ja jännityksen ollessa 5 MPa on 50-kertainen verrattuna seoksen virumisnopeuteen [19]. Juoteliiitoksen käyttöaikana osa tinasta reagoi sähköjohtimissa olevan kuparin kanssa. Sopivissa olosuhteissa käy niin, että liitokseen muodostuu kerros puhdasta lyijyä tinalyijyseoksen ja kuparin väliin tai kaikki juotteen tina voi reagoida kuparin kanssa, jolloin jäljelle jää puhdas lyijykerros. Artikkelissa [17] on tutkittu tinan ja kuparin reagoiessa syntyvän kuparinkerroksen paksuutta.

Laskettaessa korkeassa lämpötilassa tapahtuvia muodonmuutoksia, on syytä ottaa huomioon metallien mikrorakenne. On selvitettävä, miten metallin elpyminen tapahtuu ja miten liitoksessa tapahtuvat kemialliset reaktiot vaikuttavat mekaniisiin ominaisuuksiin. Sekä elpymisen, että kemialliset reaktiot vaativat aikaa. Voimakkaassa muokkauksessa elpymisen vaikutukset voivat näkyä heti, mutta toistuvissa pienissä muodonmuutoksissa edellytykset elpymiseen syntyvät vasta useiden kuormitustoistojen jälkeen.

MATERIAALIMALLEJA

Materiaalimallit jaetaan ajasta riippuviin ja riippumattomiin malleihin. Ajasta riippuvia malleja ovat viskoosit mallit: viskoelastinen ja viskoplastinen malli. Riippumattomia ovat elastiset ja plastiset mallit. Ajasta riippumattomuus tarkoittaa sitä, etteivät kuormituksen nopeus ja kesto vaikuta lopulliseen muodonmuutokseen.

Ajasta riippumattomat mallit soveltuvat hyvin matalissa lämpötiloissa tapahtuviin metallien kuormituksiin, kuten rakenneterästen käyttäytymisen mallintamiseen normaaliolosuhteissa. Ajasta riippuvuus tulee tärkeäksi metalleilla absoluuttisen lämpötilan, siis lämpötilan Kelvin-asteissa, noustessa yli kolmannekseen sulamispisteestä. Juotteilla käyttölämpötilat ovat yleensä yli puolet sulamislämpötilasta, joten viruminen hallitsee muodonmuutoksia. Muodonmuutosten lisäksi juotteiden mikrorakenne ja samalla mekaaniset ominaisuudet ovat ajasta riippuvia. Kirjallisuudessa nimitystä 'plastinen muodonmuutos' käytetään usein kattamaan sekä ajasta riippumaton että ajasta riippuva palautumaton muodonmuutos.

Jännitysten ja venymien välinen riippuvuus oletetaan kaavan 1 mukaiseksi.

$$\dot{\sigma}_{kl} = E_{klij} \dot{\epsilon}_{ij}^e = E_{klij} (\dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}^p - \dot{\epsilon}_{ij}^c - \dot{\epsilon}_{ij}^{th}) \quad (1)$$

missä $\dot{\epsilon}_{ij}$ on kokonaisvenymän nopeus, $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ on plastisen venymisen, $\dot{\epsilon}_{ij}^c$ virumisen, $\dot{\epsilon}_{ij}^{th}$ lämpölaajenemisen ja $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ kimmoisen venymisen nopeus.

Lämpölaajeneminen

Lämpö on atomien värähtelyä. Värähtelyn lisääntyminen, eli lämpötilan nousu, laajentaa ainetta. Lämpötilan muutoksen aiheuttaman muodonmuutoksen on havaittu olevan

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{th} = \begin{cases} \alpha_{ij} \dot{T}, & \text{kun } i = j; \\ 0, & \text{kun } i \neq j \end{cases}, \quad (2)$$

missä \dot{T} on lämpötilan muutosnopeus ja α_{ij} lämpölaajenemiskerroin. Toisin sanoen lämpötilan muutos laajentaa kappaletta joka suuntaan, mutta ei aiheuta leikkausmuodonmuutoksia. Lämpölaajenemiskerroin voidaan pienillä lämpötila-alueilla olettaa vakioksi [12, s. 143]. Tinalyijyjuotteen lämpölaajenemiskertoimen arvona käytetään yleensä lukuja välillä $21 - 26 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$. Artikkelissa [18] kerroin muuttuu lämpötilan vaikutuksesta ollen $24.2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 27°C :ssa ja $26 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ 127°C :ssa.

Elastinen muodonmuutos

Kimmokerroin kuvaa atomeja hilapisteissään pitävien voimien suuruutta. Mitä voimakkaampia nämä voimat ovat, sitä vaikeammin atomit etääntyvät hilapisteistään. Kimmokertoimen on todettu pienenevän lämpötilan kasvaessa, mikä johtunee lisääntyvästä atomien värähtelystä hilapisteidensä ympärillä. Tätä muutosta voidaan usein kuvata lineaarisena. Korkeissa lämpötiloissa kimmokertoimen määrittäminen on hankalaa aineen viskoosien ominaisuuksien voimistuessa ja vain kimmoisia siirtymiä aiheuttavan jännitysalueen pienentyessä. Esimerkiksi tinalyijyseokselle määritetyt kimmokertoimet vaihtelevat huoneenlämmössä ($0.6 T_m$) 10 - 40 GPa:n välillä [9]. Nämä erot mittaustuloksissa johtuvat seoksen voimakkaasta virumisesta.

Artikkelin [18] mukaan kimmokerroin on 27 °C:ssa 30.2 GPa ja 107 °C:ssa 23.2 GPa. Artikkelissa [3] kimmokerroin on lämpötilassa 0 °C 34.5 GPa ja lämpötilassa 107 °C 18.7 GPa.

Plastisessa muodonmuutoksessa ja virumisessa atomin leikkaussiirtymä kasvaa niin suureksi, että atomi siirtyy toiseen hilapisteeseen. Tällöin atomiin vaikuttava voima on riippuvainen atomin etäisyydestä senhetkisestä hilapisteestään. Tästä johtuen jännitystilän oletetaan olevan materiaalissa täysin kimmoisista siirtymistä riippuva, $d\sigma_{kl} = E_{kl ij} d\epsilon_{ij}^e$.

Plastinen muodonmuutos

Yleisesti juotteille käytetään von Misesin myötöehtoa

$$f = \sigma_e - \sigma_Y = 0, \quad (3)$$

missä σ_Y on myötöjännitys ja σ_e on ekvivalenttijännitys, joka saadaan yhtälöstä

$$\sigma_e^2 = \frac{3}{2}(\sigma'_{kl}\sigma'_{kl}) = \frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2] + 3(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2).$$

Juotteiden plastisia ominaisuuksia tutkittaessa käytetään yleensä Ramberg-Osgoodin lujenemismallia ja melko usein plastinen käyttäytyminen jätetään huomiotta. Artikkelissa [3] plastinen muodonmuutos määritetään yhtälöllä

$$\epsilon^p = C \left(\frac{\sigma}{G} \right)^p, \quad (4)$$

missä C ja p ovat materiaaliparametreja ja G liukukerroin. Plastisen muodonmuutoksen lämpötilariippuvuus välittyy tässä mallissa liukukertoimen kautta. Juotteiden lujenemistyyppiä (kinemaattinen, isotrooppinen) ei tässä artikkelissa eikä yleensä muissakaan artikkeleissa ole määritelty.

Viruminen on yleensä hallitsevaa, esimerkiksi liitosten lämpökuormituskestävyyden standardikokeissa on plastisten muodonmuutosten suuruus artikkelissa [3] määriteltyjen yhtälöiden perusteella vain noin kymmenesosa virumasta.

Viruminen

Virumisen vaikutusta mallinnetaan yleensä kahdella eri tavalla: joko käyttämällä kimmoplastisen mallin lisänä virumismallia tai yhdistämällä plastinen muodonmuutos ja viruminen samaan malliin.

Virumisen oletetaan suuntautuvan virumisen potentiaalifunktion normaalin suuntaan, vastaavalla tavalla kuin plastisen muodonmuutoksen. Yleensä potentiaalifunktioiden oletetaan lisäksi olevan samoja, joten

$$\dot{\epsilon}_{ij}^c = \dot{\epsilon}^c \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (5)$$

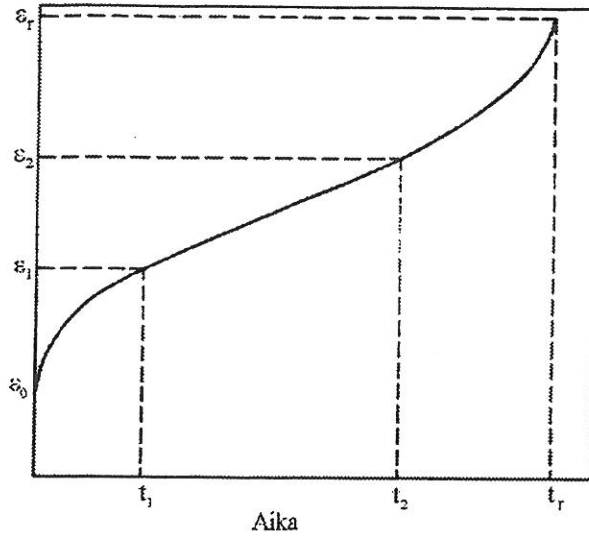
missä $\dot{\epsilon}^c$ ilmoittaa virumisen nopeuden, f on plastinen potentiaali, von Misesin myötöehdolla $f = \sigma_e$, ja σ_{ij} on jännitystila. Yleisesti $\dot{\epsilon}^c$ riippuu kuormituksesta ja materiaalin tilasta, eli jännityksestä, lämpötilasta ja kuormitushistoriasta.

Virumisen vaiheet

Viruminen jaetaan kolmeen eri vaiheeseen: primaarinen, sekundaarinen ja tertiääriäinen viruminen. Näistä kahta ensimmäistä vaihetta mallintamaan on kehitetty useita virumismalleja. Primaarinen viruminen tapahtuu virumisen alkuvaiheessa. Se on aluksi nopeaa ja hidastuu melko pian. Sekundaarisessa vaiheessa virumisnopeus on lähes vakio. Tertiäärin viruman aikana viruminen jälleen nopeutuu johtuen materiaaliin syntyvistä halkeamista.

Primaarinen vaihe jätetään juotteiden mallinnuksessa yleensä huomiotta. Juotteiden kuormitusnopeudet ovat sekundaariseen virumisnopeuteen verrattuna hitaita ja kuormitus on yleensä pitkäaikaista, joten primaarisen vaiheen mallintamisen ei uskota vaikuttavan tuloksiin merkittävästi.

Viruman kolmannessa vaiheessa virumisnopeus kasvaa jatkuvasti, kunnes materiaali murtuu. Virumanopeuden kasvu johtuu aineen tehollisen pinta-alan vähenemisestä aineeseen syntyvien säröjen vuoksi. Tästä johtuen kolmannen vaiheen virumisessa ongelmaksi tulee vaurioiden kehittymisen ennustaminen.



Kuva 3: Virumisen vaiheet [6, kuva 1.1]

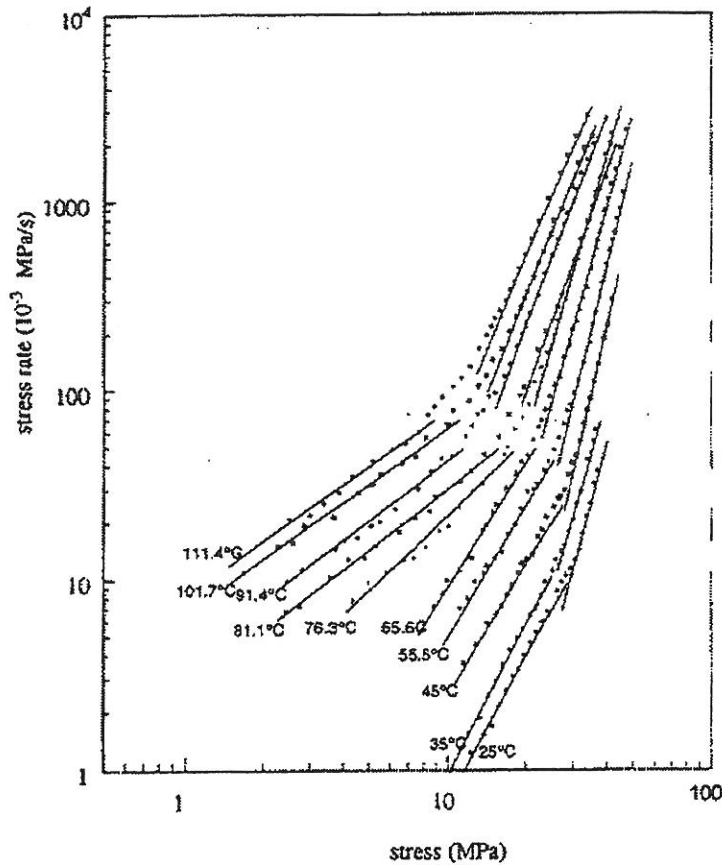
Sekundaarinen vaihe

Toisen vaiheen virumista kuvaavissa malleissa virumista kuvataan yleensä lämpötilasta ja jännityksestä riippuvilla osilla. Kuvassa 4 on tyypillinen relaksaatiokokeen tulos. Tulosten perusteella on saatu virumisen yhtälöksi $D(\sigma/E)^n$, missä n on materiaalivakio, jonka arvo on koetuloksiin sovitettujen suorien kulmakerroin. Jännityksen kasvaessa n arvo pysyy vakiona, kunnes muuttuu hyppäyksellisesti uuteen vakioarvoon. Sekä jännitysriippuvuudella $D[\sinh(\sigma/E)]^n$ että $D_1(\sigma/E)^{n_1} + D_2(\sigma/E)^{n_2}$ voidaan virumisnopeutta mallintaa $n:n$ arvoa muuttamatta. Yhtälöissä E on kimmoerotin ja $D:n$ avulla kuvataan virumisen lämpötilariippuvuutta.

Lämpötilariippuvuus voidaan ilmaista muodossa $e^{-Q/RT}$, jota kutsutaan Arrhenius-termiksi. Virumisen aiheuttavat atomien lämpöliikkeestä johtuvat ilmiöt, joiden esiintymistiheyttä termi $e^{-Q/RT}$ kuvaa. Kaavassa Q on virumisen aiheuttavan mekanismin aktivaatioenergia ja R yleinen kaasuvakio. Mekanismit, jotka aiheuttavat virumisen, riippuu jännitys- ja lämpötilasta ja metallin rakenteesta. Laajoilla jännitys- ja lämpötila-alueilla on tämän vuoksi otettava aktivaatioenergian muutos huomioon.

Artikkelissa [3] on esitetty toisen vaiheen virumisnopeudelle kaava

$$\dot{\epsilon}^c = CG/T[\sinh(\zeta\sigma/G)]^n e^{-Q/RT}, \quad (6)$$



Kuva 4: Jännityksen vaikutus relaksaationopeuteen. [20]

missä G on liukukerroin ja T lämpötila, C , ζ ja n ovat materiaalivakioita. Tällainen hyperbolisen sinifunktion määrittelemä riippuvuus jännityksestä kuvaa virumisnopeutta hyvin laajalla jännitysalueella, minkä vuoksi sitä käytetään melko runsaasti.

Juotteille on joissakin tutkimuksissa, esim. [16], virumisyhtälössä erotettu raerajaliukuminen ja rakeen viruminen (matrix creep):

$$\dot{\epsilon}^c = \dot{\epsilon}_{\text{raja}}^c + \dot{\epsilon}_{\text{rae}}^c = C_1 \sigma^{n_1} e^{-Q_1/RT} + C_2 \sigma^{n_2} e^{-Q_2/RT}, \quad (7)$$

missä Q_1 ja Q_2 ovat virumistapojen aktivaatioenergiat ja C_1 , C_2 , n_1 ja n_2 materiaalivakioita. Tästä jaosta voi olla hyötyä etenkin murtumisen ennustamisessa, sillä rakeen virumisen on joissakin tutkimuksissa, esim. [16], todettu olevan huomattavasti vaurioittavampaa kuin raerajaliukumisen. Pitkäaikaisissa, korkeissa lämpötiloissa tehdyissä kuormituksissa raekoon on todettu muuttuvan rekristallisaation johdosta [7]. Raekoko puolestaan vaikuttaa raevirumisen ja raerajaliukumisen määrälliseen osuuteen - mitä enemmän raerajoja, sitä helpommin raerajaliukumista voi esiintyä.

Myös tästä syystä jaottelu on perusteltua.

Artikkelissa [2] on tinalyijyjuotteen aktivaatioenergian riippuvuutta jännityksestä kuvattu kaavalla

$$\Delta Q = Q_0 \left[1 - \left(\frac{\sigma_e G_0}{\sigma_0 G} \right)^p \right]^q, \quad (8)$$

ja virumisnopeutta kaavalla

$$\dot{\epsilon}^c = \dot{\epsilon}_0 \exp \left\{ Q_0 \left[1 - \left(\frac{\sigma_e G_0}{\sigma_0 G} \right)^p \right]^q \right\}. \quad (9)$$

Kaavoissa $\dot{\epsilon}_0$, q ja p ovat materiaalivakioita ja σ_0 , Q_0 ja G_0 ovat myötöjännitys, aktivaatioenergia ja liukukerroin lämpötilassa 0 K. Näiden yhtälöiden pitäisi artikkelin mukaan soveltua tapauksiin, joissa virumista vastustavat pienet esteet, kuten pienet hilassa olevat vieraiden atomien erkaumat.

Viskoplastisia malleja

Viskoplastiset mallit kuvaavat yleensä koko materiaalin käyttäytymisen, eli muodonmuutosnopeudesta riippuvaa käyttäytymistä ei voida erottaa nopeudesta riippumattomasta. Tämä lähtökohta vastaa paremmin todellisuutta, sillä plastiset muodonmuutokset ja viruminen tapahtuvat osin samoilla mekanismeilla, eli molempiin vaikuttavat dislokaatioiden liikkeet. Dislokaatioiden liikkeiden erottaminen kuormitusnopeudesta riippuviksi ja riippumattomiksi on hieman harhaanjohtavaa, sillä dislokaatioiden liikkuminen vaatii aina aikaa. Kaavan 1 merkinnöillä viskoplastinen muodonmuutosnopeus $\dot{\epsilon}^{vp} = \dot{\epsilon}^c + \dot{\epsilon}^p$.

Artikkelissa [1] on esitetty viskoplastinen malli

$$\dot{\epsilon}^{vp} = C_1 \left[\sinh \left(C_2 \frac{\sigma_e}{s} \right) \right]^{\frac{1}{m}} e^{-Q/RT}, \quad (10)$$

missä σ_e on ekvivalentti jännitys, C_1 , C_2 ja m ovat materiaalivakioita ja s -funktio kuvaa aineen vastustusta viskoplastisia muodonmuutoksia kohtaan. Muodonmuutossuunta määritetään kaavalla 5, missä $\dot{\epsilon}^c$ korvataan $\dot{\epsilon}^{vp}$:llä. Artikkelin mukaan s riippuu jännityksestä, lämpötilasta, viskoplastisesta venymänopeudesta ja itsestään.

Syklisiin kuormituksiin soveltuva viskoplastinen malli on esitetty artikkelissa [11]. Viskoplastinen muodonmuutos on määritelty yhtälöllä

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} = \left\langle \frac{\bar{\sigma} - R}{D} \right\rangle^n \frac{3}{2\bar{\sigma}} C_{ijkl} (\sigma_{kl} - \alpha_{kl}), \quad (11)$$

missä $\bar{\sigma} = [\frac{3}{2}C_{ijkl}(\sigma_{ij} - \alpha_{ij})(\sigma_{kl} - \alpha_{kl})]^{1/2}$, D on kuormitushistoriasta riippuva materiaalivakio, α_{ij} kuvaa kinemaattista ja R isotrooppista lujenemista. Merkintä $\langle x \rangle$ tarkoittaa $\langle x \rangle = 0$, kun $x \leq 0$ ja $\langle x \rangle = x$, kun $x > 0$. Artikkelissa on tutkittu muutamien kuormitustoistojen vaikutusta syklisiin ominaisuuksiin, joten mallin soveltuvuudesta satojen toistojen kuormituksiin ei ole tietoa.

Artikkelissa [5] on esitetty viskoplastinen malli

$$\dot{\epsilon}^{vp} = f \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^p \sinh^m \left(\frac{\tau}{\xi(c + \hat{c})} \right) e^{-Q/RT}, \quad (12)$$

missä λ on keskimääräinen raekoko, λ_0 alkuperäinen raekoko, c funktio muodonmuutoksista, \hat{c} funktio raekoosta, p , f , ξ , m ovat materiaalivakioita, $\tau = [3/2(\sigma'_{kl} - \alpha_{kl})(\sigma'_{kl} - \alpha_{kl})]^{1/2}$ on ekvivalentti jännitys kinemaattisesti lujenevalle aineelle, α_{kl} on myötöpinnan keskipiste ja muodonmuutoksen suunta määritetään kaavalla 5. Tässä artikkelissa raekoolla tarkoitetaan lyijy- ja tinafaasien kokoa. Artikkelissa on määritetty yhtälöt muodonmuutosten vaikutuksesta faasien kokoon.

LOPUKSI

Toistaiseksi juotteiden käyttäytymisestä kuumissa olosuhteissa tiedetään melko vähän. Yleensä virumismalleissa oletetaan materiaalin ominaisuuksien säilyvän kuormituksen aikana, mikä on havaittu virheelliseksi. Yleensä laskelmissa käytetään yhtälöiden 6 ja 7 mukaisia virumisyhtälöitä. Nämä yhtälöt olettavat materiaalin virumisnopeuden olevan kuormitushistoriasta riippumaton. Todellisuudessa juotteen mikrorakenne ei ole vakaa, vaan muuttuu. Pitkäaikaisissa kuormituksissa mikrorakenteen muutos aiheuttaa huomattavia muutoksia juotteen virumiskäyttäytymiseen. Mikrorakenteen vaikutus on selvästi havaittavissa artikkelin [7] leikkauskoekappaleen muodonmuutosjakaumassa (ks. kuva 2). Jännitystila on koekappaleessa lähes vakio, eikä pienten kokeessa syntyvien leikkaus- ja normaalijännityserojen vaikutuksella kyetä selittämään muodonmuutoksen epäjatkuvuutta.

Yhtälöissä 6, 9 ja 12 eri tyyppisiä virumismuotoja ei erotella. Artikkeleiden [16], [10] ja [8] mukaan rakeen sisäinen viruminen on huomattavasti vahingollisempaa kuin raerajaliukuminen. Tämän perusteella eri virumistyyppit olisi syytä erotella laskentavaiheessa. Virumistyyppien vaikutus mikrorakenteen muutoksiin lienee myös erilainen. Raerajaliukuminen tapahtuu raerajoja pitkin, jolloin sen vaikutus rakeiden sisälle on varsin erilainen kuin rakeen sisäisen virumisen vaikutus.

Juoteliitoksen mekaanista käyttäytymistä mallinnettaessa on otettava huomioon muodonmuutosten aiheuttaman mikrorakenteen muutosten lisäksi myös liitoksessa tapahtuvat kemialliset reaktiot. Kuparin ja tinan reagoidessa keskenään, saattaa reaktion vaikutuksesta syntyä juotteeseen ohut kerros, jossa tinaa ei ole. Tällaisen kerroksen mekaaniset ominaisuudet voivat poiketa huomattavasti juotteen ominaisuuksista, kuten edellä mainitut erot lyijyn ja tinalyijyjuotteen ominaisuuksissa.

Juotteiden muodonmuutoksia laskettaessa pyritään yleensä selvittämään juoteliitoksen murtumishetki: kestääkö liitos viiden vuoden käytön? Näin pitkällä ajankaksella juotteiden mikrorakenteessa tapahtuu muutoksia sekä mekaanisista että kemiallisista syistä johtuen. Nykyään pääosa murtumisajankohdan laskelmista, eli elinikäennusteista, ja laitteiden koestuksista perustuu kiihdytettyyn lämpökuormitukseen. Laitteita kuormitetaan toistuvilla kuormilla ja niiden halutaan kestävän tietty toistomäärä. Kuormituksena käytetään yleensä lämpötilan vaihtelua tietyllä vaihteluvälillä, esimerkiksi $-40\text{ °C} - +125\text{ °C}$ yhden toiston kestäessä esimerkiksi tunnin. Kokeiden kestäessä satoja toistoja, muuttuu juotteen mikrorakenne. Elinikäennuste tehdään kuitenkin laskelmista, joilla tutkitaan ensimmäisten syklien aikana syntyviä muodonmuutoksia. Nykyisillä menetelmillä murtumisajankohdan ennusteen virhe on usein välillä $-50\% - +100\%$ toteutuneesta murtumisesta.

Nykyisten laskentamenetelmien parantamiseksi TKK:n Elektroniikan valmistustekniikan laboratoriossa on alkanut projekti, jonka yhtenä tavoitteena on kehittää materiaalmalleja mikrorakenteen huomioon ottamiseksi. Projektissa tutkitaan joidenkin lyijyttömien juotteiden mekaanisia ominaisuuksia ja kuormituskestoa. Projektissa tehdään yhteistyötä Rakenteiden mekaniikan laboratorion kanssa materiaalmallien parissa.

Viitteet

- [1] S. Brown, K. Kim, L. Anand: "An Internal Variable Constitutive Model for Hot Working of Metals"; International Journal of Plasticity, vol. 5, ss. 95-130, 1989
- [2] E. Busso, M. Kitano, T. Kumazawa: "Modeling Complex Inelastic Deformation Processes in IC Packages' Solder Joints"; Journal of Electronic Packaging, vol. 116, March 1994

- [3] R. Darveaux, K. Banerji: "Constitutive Relations for Tin-Based Solder Joints"; IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, vol. 15, n. 6, December 1992
- [4] D. Frear, D. Grivas, J. Morris: "A Microstructural Study of the Thermal Fatigue Failures of 60Sn40Pb Solder Joints"; Journal of Electronic Materials, vol. 17, n. 2, 1988
- [5] D. Frear, S. Burchett, M. Neilsen, J. Stephens: "Microstructurally Based Finite Element Simulation of Solder Join Behaviour"; Soldering & Surface Mount Technology, n. 25, February 1997
- [6] F. Garofalo: "Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals"; Macmillan Series in Materials Science, 1965
- [7] G. Grossmann, L. Weber: "Metallurgical Considerations fo Accelerated Testing of Soft Solder Joints"; IEEE TCPMT-C, vol. 20, July 1997
- [8] P. Hacke, A. Sprecher, H. Conrad: "Computer Simulation of Thermomechanical Fatigue of Solder Joints Including Microstructure Coarsening"; Journal of Electronic Packaging, vol. 115, June 1993
- [9] E. Hare, R. Stang: "Stress Relaxation Behavior of Eutectic Tin-Lead Solder"; Journal of Electronic Materials, vol. 24, n. 10, 1995
- [10] R. Iannuzzelli, J. Pitarresi, V. Prakash: "Solder Joint Reliability Prediction by the Integrated Matrix Creep Method"; Journal of Electronic Packaging, vol. 118, June 1996
- [11] H. Ishikawa, K. Sasaki, K. Ohguchi: "Prediction of Fatigue Failure of 60Sn-40Pb Solder Using Constitutive Model for Cyclic Viscoplasticity"; Journal of Electronic Packaging, vol. 118, September 1996
- [12] J. Lemaitre, J.-L. Chaboche: "Mechanics of solid materials", Cambridge University Press, 1990
- [13] H. Miettinen-Oja: "Metallioppi"; Otava, 1972
- [14] Z. Mei, J. Morris, M. Shine: "Superplastic Creep of Eutectic Tin-Lead Solder Joints"; Journal of Electronic Packaging, vol. 113, June 1991

- [15] J. Morris, D. Tribula, T. Summers, D. Grivas: "The Role of Microstructure in Thermal Fatigue of Pb-Sn Solder Joints"; Solder Joint Reliability - Theory and Applications, ed. by John Lau; Van Nostrand Reinhold, 1991
- [16] A. Syed: "Creep Crack Growth Prediction of Solder Joints During Temperature Cycling - An Engineering Approach"; Journal of Electronic Packaging, vol. 117, June 1995
- [17] P. Vianco, P. Hopkins, K. Erickson, D. Frear, R. Davidson: "Modeling Non-Isothermal Intermetallic Layer Growth in the 63Sn-37Pb/Cu System"; Design and Reliability of Solders and Solder Interconnections The Minerals, Metals & Materials Society, 1997
- [18] J. Wang, Z. Qian, D. Zou, S. Liu: "Creep Behavior of a Flip-Chip Package by Both FEM Modeling and Real Time Moire Interferometry"; Journal of Electronic Packaging, vol. 120, June 1998
- [19] P. Winter, E. Wallach: "Microstructural Modelling and Electronic Interconnect Reliability"; Soldering & Surface Mount Technology, n. 26, July 1997
- [20] F. Yang, J. Li: "Impression test of 63Sn-37Pb eutectic alloy"; Materials Science and Engineering A, vol. 201, ss. 40-49, 1995
- [21] T. Reinikainen, J. Kivilahti: "Deformation Behavior of Dilute SnBi(0.5 to 6 At. Pct) Solid Solutions"; Metallurgical and Materials Transactions A, vol. 30, January 1999

Pekka Marjamäki, DI, tutkija
 Teknillinen korkeakoulu, Elektroniikan valmistustekniikan laboratorio
 PL 3000, 02015 TKK
 sposti: pekka.marjamaki@hut.fi

ENGLISH SUMMARY

CONSTITUTIVE EQUATIONS FOR SOLDER METALS

Pekka Marjamäki

Journal of Structural Mechanics, Vol. 32
Nos. 1-2, 1999, pp. 25-39

In electronic industry the use of leadless surface mounted components has increased. During operation the temperature of components and circuit board (PWB) changes. This will cause thermal stresses into the joints between components and PWB because the coefficient of thermal expansion of the components and the circuit board are different. In these small solder joints the importance of the fatigue properties of the solder material has increased.

The fatigue life of a solder joint, i.e. when the electrical connection is broken, depends on its deformation history. In electronic devices the operation temperature is normally more than half of the melting point of the solder metals. In this temperature region the dominant deformation mechanism is creep.

In this article few creepmodels and some microstructural phenomenons are introduced. Creep deformation and microstructure have an influence on each other. Changes in the microstructure (e.g. grain size) changes the creep properties and vice versa. Nevertheless in most creep models the microstructure has no influence. The changes of the microstructure may have a great influence on the behavior of a solder joint during long time loadings. So in reliable lifetime and other calculations the microstructure and its evolution should be taken into account.

Nowadays quite little is known about the influence of the deformation history to the microstructure and vice versa. When does the solder recrystallize? What influence the chemical processes have on mechanical properties and why the deformation increases grain growth rate? All of these phenomenons changes the microstructure and the mechanical properties of solders. In articles [1] and [5] the development of some microstructural parameters and their evolution is included in the model. These models are not good enough so the laboratory of Electronics Production in HUT has started a project to get better understanding on the phenomenons that affect the fatigue and the mechanical properties of solders.