TINAVIIKSET: TUNNETUT SYNTYTEORIAT JA EHKÄISYKEINOT

Tin Whiskers: Known Origin Theories and Prevention Methods

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2023

Lassi Jokinen

Tarkastaja: TkT Tommi Kärkkäinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Lassi Jokinen

Tinaviikset: Tunnetut Syntyteoriat ja Ehkäisykeinot

Kandidaatintyö

2023

23 sivua, 5 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Tommi Kärkkäinen

Avainsanat: Tinaviikset, ehkäisykeino, metalliviikset, syntyteoria

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää tämänhetkinen vallitseva käsitys tinaviiksi-ilmiöstä ja esittää keinoja ilmiön ehkäisyyn suunnittelun avulla. Työssä havaitaan myös lyijyn tehokkuus ehkäistä tinaviiksiä. Työ suoritetaan kirjallisuuskatsauksena tutkituimmista syntyteorioista ja niistä muodostuneista jatkotutkimuksista.

Tinaviikset ovat ongelma elektroniikassa, koska ne muodostavat johtavia siltoja juotoksen ja johteen välille aiheuttaen oikosulkuja. Tinaviikset kasvavat tinakerroksen pinnasta erilaisina muotoina ja pituuksina, joista ohuimmat ja lyhyimmät palavat poikki muodostaessaan virralle kulkureitin. Metalliviiksi-ilmiö havaittiin ensimmäisen kerran kadmiumviiksinä elektroniikkapiireissä toisessa maailmansodassa. Ensimmäiset ehkäisykeinot tinaviiksien kasvulle kehitettiin 1950-luvulla.

Tinaviiksi-ilmiön tutkimus jatkuu edelleen ja viiksien syntymistä ei osata selittää aukottomasti. Vallitsevana teoriana tinaviiksien syntymiselle on pidetty välimetallikerrosteoriaa. Välimetallikerros syntyy metalliperustan ja tinajuotoksen kanssa, aiheuttaen sisäisiä rasituksia. Rasitusten ansiosta tinakerrokseen muodostuu nystyröitä, joista tinaviikset alkavat kasvamaan. Tinaviiksien syntymistä voidaan ehkäistä tehokkaasti suunnittelun avulla käyttämällä eri hallintatasoja sovelluskohteen mukaan.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Lassi Jokinen

Tin Whiskers: Known Origin Theories and Prevention Methods

Bachelor's thesis

2023

23 pages, 5 figures and 2 tables

Examiner: PhD Tommi Kärkkäinen

Keywords: Tin whiskers, mitigation, metal whiskers, origin theory

The goal of this bachelor's thesis is to discover the current prevailing understanding of the tin whisker phenomenon and to present ways to prevent the phenomenon through design. The work also shows the effectiveness of lead in preventing tin whiskers. The work is carried out as a literature review of the most researched origin theories and the further studies formed from them.

Tin whiskers are a problem in electronics because they form conductive bridges between the solder and a conductive material, causing short circuits. Tin whiskers grow from the surface of the tin layer in different shapes and lengths, the thinnest and shortest of which burn as they form a path for the current. The metal whisker phenomenon was first observed as a cadmium whisker in electronic circuits during World War II. First preventive measures for the growth of tin whiskers were developed in the 1950s.

Research into the tin whisker phenomenon is still ongoing, and the origin of whiskers cannot be fully explained. The prevailing theory for the formation of tin whiskers has been the intermetallic layer theory. The intermetallic layer is created with the metal base and the tin solder causing internal stresses. Due to stresses the tin layer forms bumps, from which tin whiskers start to grow. The occurrence of tin whiskers can be effectively prevented through planning by using different control levels depending on the application.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

1 Johdanto 6
2 Aineisto ja menetelmät 8
3 Tulokset 9
3.1 Teorioita tinaviiksien kasvusta 10
3.1.1 Dislokaatioteoriat 10
3.1.2 Välimetallikerrosteoria 13
3.1.4 Uudelleenkiteytymisteoria 14
3.2 Tinaviiksien ehkäisy suunnittelun avulla 16
4 Johtopäätökset 21
Lähteet 23

1 Johdanto

Tinaa on yleisesti käytetty elektroniikassa juotosaineena. Sitä on käytetty yli 60 vuotta sen erinomaisen johtavuuden, juotettavuuden ja korroosion vastustuksen ansiosta, mutta seostamattomalla tinalla on mahdollisuus muodostaa tinaviiksiä. Tinaviikset ovat olleet ongelma elektroniikassa niin kauan, kun tina on ollut siellä käytössä (Galyon 2004).

Tinaviikset aiheuttavat oikosulkuja elektroniikkapiireissä muodostamalla johtavia siltoja juotoksen ja johteen välille. Tinaviiksien syntymisestä on kehitetty monia erilaisia teorioita vuosikymmenten aikana, mutta viiksien syntymistä ei ole vielä täysin aukottomasti ratkaistu. Tinaviikset kasvavat tinakerroksen pinnasta ja niillä on toisistaan poikkeavia muotoja, jotka eivät kasvaessaan heikennä tinakerrosta. Viikset voivat kuljettaa virtaa kymmeniä mikroampeereita, mutta viiksien koon vuoksi ohuimmat ja lyhimmät palavat poikki muutamassa sekunnissa tai välittömästi luotuaan virralle kulkureitin, mutta osa luo pysyvän reitin virralle kestäen virran aiheuttaman rasituksen. (McDowell 1993.) Tämä aiheuttaa komponentti ja jopa laite rikkoja, jotka voivat osoittautua kalliiksi sovelluksen mukaan.

Tinaviiksi-ilmiötä ehkäistiin kauan lisäämällä tinaan lyijyä, jolloin saatiin tina-lyijyseos, joka pienentää todennäköisyyttä viiksien syntymiselle. Lyijyä käytettiin tinassa myös siksi, koska se alensi seoksen sulamispistettä ja suojasi täten lämpöherkkiä komponentteja. Lyijy lisäsi myös korroosion kestävyyttä juotoksiin. (Ponikvar ja Goodwin 2013.) Vuonna 2006 Euroopan Unioni vahvisti vaarallisten aineiden (RoHS) vähentämiseen liittyvän direktiivin, joka vaati lyijyn käytön vähentämisen elektroniikassa (Direktiivi 2011/65/EU). Direktiivi rajaa lyijyn käyttöä 0,1 massaprosenttiin homogeenisessa materiaalissa, kuten juotoksessa. Tämä lisäsi tinaviiksistä johtuvia häiriöitä, koska viiksien syntymistä ei ollut ehkäisty yhtä tehokkaasti kuin ennen direktiiviä lyijyn kanssa. Esimerkiksi autovalmistaja Toyotan sähköisessä kaasusäätimessä havaittiin tinaviiksiä, kun juotteena oli käytetty uuden direktiivin mukaista tina-lyijyseosta (Sood ym. 2011). Vähennetty lyijyn käyttö nostaa todennäköisyyttä tinaviiksien syntymiselle ja kyseisessä tapauksessa tinaviiksien aiheuttama häiriö olisi voinut aiheuttaa auton hallitsemattoman kiihdytyksen. Lisääntyneet häiriöt kiihdyttivät tinaviiksi-ilmiön tutkimista ja niiden ehkäisyä.

Metalliviiksi-ilmiö havaittiin toisen maailmansodan aikana elektroniikassa kadmiumviiksinä. Kadmium oli tuohon aikaan käytetyin aine galvanoimisessa ja vikoja alkoi esiintyä myös muissa elektroniikan osa-alueissa, kuten puhelinlinjoissa. 1950-luvulla kehitettiin ensimmäiset menetelmät tinaviiksien ehkäisemiseen, joista osaa käytetään vielä tänäkin päivänä. (Galyon 2004.)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää mikä on tämänhetkinen käsitys tinaviiksi-ilmiöstä ja esittää keinoja, joilla viiksien syntymistä voidaan ehkäistä. Lisäksi työssä tehdään havainto lyijyn tehokkuudesta ehkäistä tinaviiksiä, joka on havaittavissa monesta eri tutkimuksesta. Työn tutkimuskysymykset ovat, miksi ja miten tinaviikset syntyvät, sekä mitkä ovat suunnittelijan mahdollisuudet ehkäistä tinaviiksien syntymistä elektroniikassa? Työ suoritetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa perehdytään vanhoihin ja uudempiin teorioihin tinaviiksi-ilmiöstä, ja selvitetään vallitseva teoria tinaviiksi-ilmiöön liittyen. Työn aineistona käytetään tutkimusartikkeleita eri vuosikymmeniltä, NASA:n tutkimusta avaruusteknologian kanssa ja syntyteorioihin liittyviä kokoavia artikkeleita ja kirjoja. Työn menetelmät kerrotaan aineisto ja menetelmät -luvussa ja tulokset osiossa käsitellään dislokaatioteorioita, uudelleenkiteytymisteoria ja välimetallikerrosteoria. Tuloksissa otetaan myös kantaa suunnittelun mahdollisuuksiin ehkäistä tinaviiksien syntymistä, sekä esitetään keinoja, joilla voidaan toteuttaa tinaviiksien ehkäisyä.

2 Aineisto ja menetelmät

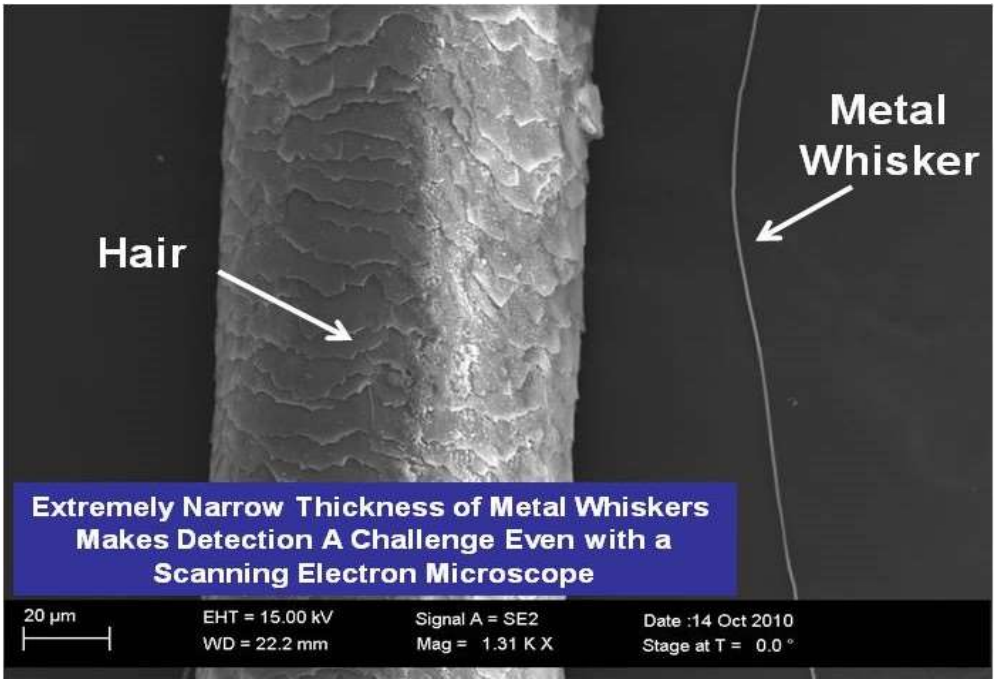
Tutkimus suoritetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa tutustutaan tinaviiksi-ilmiön syntyteorioihin, sekä ehkäisymenetelmiin elektroniikassa suunnittelun avulla. Aiheesta ei ole saatavilla tieteellistä materiaalia suomeksi, joten aineistoina käytetään englanninkielistä materiaalia. Aineistosta jätettiin pois tutkimukset, jotka eivät aiheuttaneet merkittävää jatkotutkimusta muodostetusta teoriasta tai ehkäisykeinosta. Tutkimusta rajattiin käsittelemään tinaviiksien syntyteorioita ja ehkäisykeinoja elektroniikassa, jolloin aineistoja saadaan rajattua koskemaan vain näitä osa-alueita. Teoriat sisältävät paljon materiaaliteknisiä yksityiskohtia, joita on rajattu pääkäsitteisiin, jotta tutkimuksen sisältö pysyy asetetuissa tavoitteissa. Käsitteiden tarkoitusten selvittämiseen käytetään termipankkeja ja käännöksissä pidetään asian merkityssisältö mahdollisimman muuttumattomana. Aineiston hakupalveluina käytettiin LUT Primoa ja Google Scholaria. Päähakusanoina käytetään *tinwhisker, tinwhisker lead* ja *tinwhisker mitigation*, joiden avulla tinaviiksi-ilmiön syntyteorioita selvitetään ja jonka jälkeen löydetään ehkäisykeinoja, joilla ilmiötä voidaan ehkäistä.

McDowellin (1993) ja Galyonin (2004) tutkimukset kertovat tinaviiksien rakenteesta ja niiden syntyteorioista, joiden avulla saa käsityksen tinaviiksen ilmenemisestä tinakerroksen pinnassa. Aineistoista huomataan, että moni 1950-luvulla tehty tutkimus perustuu dislokaatioteorioihin. Teoriat on kuitenkin kumottu uudelleenkiteytymisteorialla, varsinkin sen päivitetyllä dynaamisella uudelleenkiteytymisteorialla vuonna 2009.

Katon, Handwekerin ja Bathin (2016) teos kertoo tinaviiksien kasvuteorioista ja tinaviiksien ehkäisykeinoista. Teoksen sisältöä rajataan käsittelemään suunnittelussa käytettyihin ehkäisykeinoihin. Teoksesta selviää, että tinaviiksi-ilmiön ehkäisyyn on luotu standardi, jota käytetään korkeaa suojausta vaativien laitteiden suunnittelussa. Standardin sisältöä rajataan käsittelemään pelkästään suunnittelussa tinaviiksien ehkäisyyn käytettäviä hallintatasoja ja oikean tason valintaa sovelluskohtaisesti. Aineistoissa ilmeni toistuvasti tina-lyijyseoksen ominaisuus ehkäistä tinaviiksien syntymistä tehokkaasti. Työssä kerrotaan täten myös, miksi lyijy on niin hyvä ehkäisemään tinaviiksiä, kun sitä seostetaan tinan kanssa. Boettingerin tutkimus (2005) lyijyn lisäyksestä tinaseokseen kertoi miten ja miksi lyijy ehkäisee tinaviiksien syntymisen tehokkaasti muuttamalla metalliseoksen rakennetta.

3 Tulokset

Tässä luvussa käsitellään tinaviiksi-ilmiön keskeisimpiä teorioita vuosikymmenten aikana ja suunnittelijan mahdollisuuksia ehkäistä viiksien syntymistä elektroniikassa. Kuvassa 1 on esitetty Nasan elektronimikroskoopilla ottama kuva tinaviiksestä ja ihmisen hiuksesta. Tinaviiksien paksuus voi vaihdella 0,5–50 µm välillä, jonka vuoksi niiden havaitseminen on erittäin hankalaa tarkoillakin mittausvälineillä (Galyon 2005). Esitetyssä kuvassa tinaviiksen paksuudeksi voidaan arvioida olevan noin 1 µm. Nämä viikset voivat aiheuttaa oikosulkuja elektroniikassa, jos ne pääsevät kontaktiin muiden johteiden kanssa. Tinaviiksien syntyminen ei kuitenkaan haurastuta tai vahingoita tinajuotteen pintaa, vaikka viikset ulkonevat sen pinnasta. Metalliviiksi-ilmiötä on myös havaittu muilla metalleilla kuten kadmiumilla, vismutilla ja sinkillä, jotka muodostavat viiksiä spontaanisti kuten tina. Kaikki mainitut alkuaineet muodostavat viiksiä nopeasti, koska ne luovat välimetallikerroksen metalliperustan kanssa, joka aiheuttaa sisäisiä rasituksia (Zhang ym. 2015). Suunnittelulla ja materiaalien valinnoilla voidaan kuitenkin vaikuttaa viiksien syntymiseen ja ehkäistä niiden muodostuminen tietyissä sovelluksissa kokonaan.



Kuva 1. Elektronimikroskoopilla otettu kuva ihmisen hiuksesta, sekä metalliviiksestä. Kuvasta nähdään, että metalliviiksi on vain mikrometrin kokoluokkaa ja sitä on vaikea saada näkyville edes tarkoilla mikroskoopeilla (NASA 2010).

Tinaviikset voivat olla rakenteeltaan säiemäisiä, nystyrämäisiä tai kumpumaisia. Viikset ovat ohuita ja niillä on sama kiderakenne kuin seostamattomalla tinalla. Viikset ovat vahvoja, sillä kasvu tapahtuu tinakerroksen alta niiden perustasta ja ne voivat ulottua, jopa 300–400 mikrometrin päähän tinakerroksen pinnasta. Pitkät viikset ovat yksikiteisiä rakenteita, joiden voidaan ajatella koostuvan samasta rakeesta niiden täydellisen atomitason järjestäytymisen takia. (Hashim ja Salleh 2018.) Viiksi täten kestää enemmän rasitusta oikosulun tapahtuessa, eikä pala poikki virran kulkiessa sen läpi kuten ohuitten ja lyhyiden viiksien tapauksessa.

3.1 Teorioita tinaviiksien kasvusta

Tinaviiksien kasvulle ei ole muodostettu perusteltua teoriaa, joka selittäisi niiden kasvun aukottomasti. Tinaviiksien syntymiselle on kuitenkin kehitelty erilaisia teorioita vuosien aikana kuten dislokaatioteorioita ja välimetallikerrosteoria, joista osa on ristiriidassa toistensa kanssa ja täten kumonnut toisensa. Osa teorioista kuten uudelleenkiteytymisteoria puolestaan pystyy kuvaamaan viiksien kasvua tietyissä olosuhteissa, mutta ei pysty perustelemaan viiksien spontaania kasvua huoneilmassa.

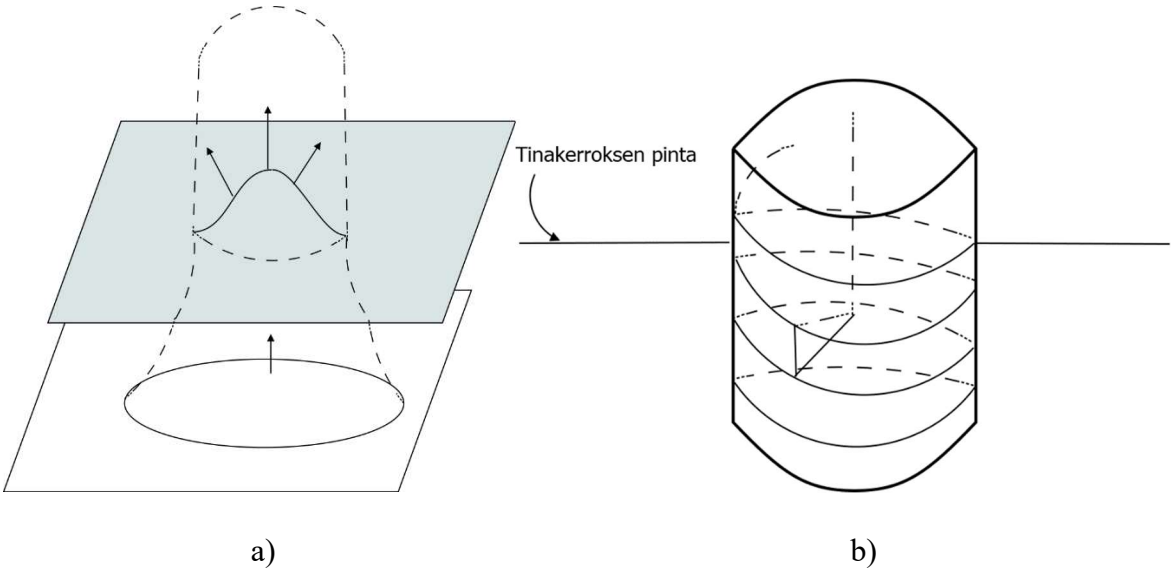
3.1.1 Dislokaatioteoriat

Ensimmäiset teoriat tinaviiksi-ilmiöstä muodostettiin 1950-luvulla J. D. Eshelbyn (1953) ja F. C. Frankin (1953) tutkimuksista. Molemmat teoriat perustelivat tinaviiksien kasvua tinassa esiintyvillä dislokaatioilla. Dislokaatiot aiheuttavat sisäistä rasitusta, joka johtaa viiksien ulkonemiseen tinakerroksen pinnasta.

Eshelbyn teoria kertoi, että viiksien alkupisteessä olisi Frank-Read lähde, joka raerakenteen muotoa muuttaessa säteilisi eri dislokaatioita ja liu'uttaisi tinakerroksen pintaan ylimääräisen puolitason verran tina-atomeja, joka johtaisi viiksien kasvuun (Galyon 2004). Frank-Read lähde on dislokaatioiden säteilijä, joka voi teoriassa toimia ikuisesti. Dislokaatio on kiinnittynyt kahteen pisteeseen aiheuttaen leikkausjännitystä hilarakenteeseen. Leikkausjännityksen ansiosta dislokaatio laajenee kuroutuen yhteen ja muodostamalla uusia

dislokaatioita. Dislokaatioiden lukumäärän kasvaessa pisteiden välillä jännitysenergia laskee, koska jännitys jakaantuu laajemmalle alueelle. (Kittel 2021.)

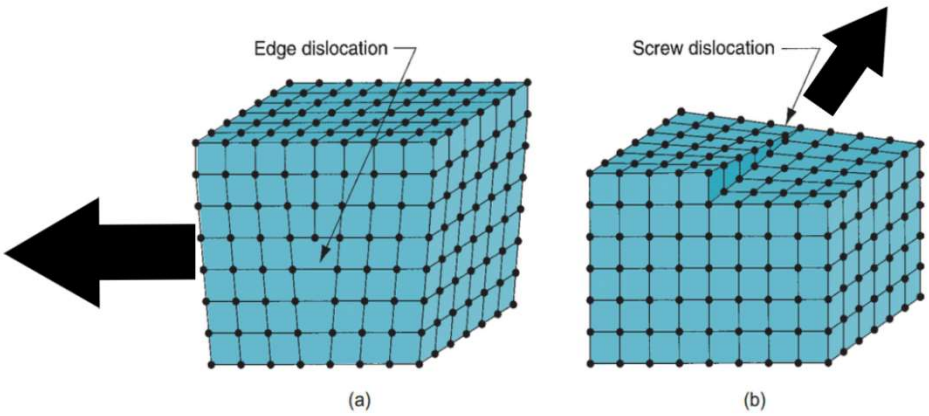
Frankin teoria perustui kahteen dislokaatioon, jossa pyörivä särmädislokaatio olisi kiinnittynyt ruuvidislokaatioon, joka on kohtisuorassa pintaa vasten (Smetana 2007). Särmädislokaatio pysyisi samassa paikassa muuttumattomana kierroksien aikana, ja joka kierros lisäisi tina-atomeja viiksien perustaan. Viiksien kasvu tapahtuisi tinakerroksen alta ja siirtyisi lopulta tinakerroksen päälle, josta se alkaisi ulkonemaan. Kuvassa 2 on esitetty Eshelbyn ja Frankin teorioiden kasvumalli tinaviiksille kuvitettuna.



Kuva 2. a) Kuvassa on esitetty Eshelbyn malli tinaviiksien kasvulle. Tinakerroksen pohjalla on Frank-Read lähde, joka säteilee eri dislokaatioita ja nostattaa tinakerroksia pintaan. Harmaa alue kuvaa tinakerroksen pintaa. b) Kuvassa esitetään Frankin mallia tinaviiksien kasvulle, jossa pyörivä särmädislokaatio on kiinnittynyt ruuvidislokaatioon. Jokaisella kierroksella särmädislokaatio tuo uuden puolitason verran tina-atomeja pintaan, josta viikset kasvavat.

Kuvassa 3 on esitetty kaksi perustyypin dislokaatiota, särmä- ja ruuvidislokaatio. Dislokaation kulkusuunta hilarakenteessa on kuvattu mustalla nuolella. Särmädislokaatiossa hilarakenne vääristyy, kun rakenteen väliin liikkuu puolitason verran atomeja rasituksen takia.

Vääristymän voi nähdä kuvassa 3a ylimääräisenä tasona rakenteessa, joka tekee siitä epäsymmetrisen. Dislokaatio etenee hilarakenteen läpi samansuuntaisesti taso kerrallaan, kunnes ylimääräinen taso on poistunut rakenteesta, joka johtaa myös rasitusten häviämiseen rakenteessa. Ruuvidislokaatiossa hilarakenne on vääntynyt itseensä nähden ja atomit liikkuvat spiraalimaisesti hilarakenteen seuraavalle tasolle. Kuvassa 3b vääristymisen voi nähdä korkeuseroina hilarakenteessa. Osa atomeista löytävät oikean paikan rakenteessa ja osa vääristyvät, kunnes dislokaatio jatkuu seuraavalle tasolle. Dislokaatio liikkuu kohtisuorasti rasitusta vastaan. Materiaaleissa esiintyvät dislokaatiot eivät ole täydellisiä vaan ovat särmä- ja ruuvidislokaatioiden välimuotoja. (Leake ym. 2023.)



Kuva 3. a) Kuvassa on esitetty särmädislokaatio ja miten se muuntaa kiderakennetta lisäämällä puolitason verran atomeja rakenteen väliin vääristäen sen. b) Kuvassa on esitetty ruuvidislokaatio, joka vääntää kiderakennetta itseään vasten vääristäen samalla itseään. Kuviin on merkitty mustalla nuolella dislokaation kulkusuunta. (Molla 2018.)

Noin 20 vuotta myöhemmin Lindborg loi tutkimuksessaan (1976) sinkkiviiksien kanssa kaksitasoisen dislokaatiomallin. Malli perustui dislokaatioiden kasvuun ja hila-aukon diffuusioon, joka johti tinakerroksen siirtymiseen kohti viiksien pintaa. Tutkimus osoitti, että viiksien kasvu ei ollut riippuvainen mikrotason rasituksista ja sillä on vieläkin painoarvoa keskusteluissa mikro- ja makrotason rasituksista tinaviiksien synnyssä, sillä se kumoaisi mikrotason rasitusten riippuvuuden tinaviiksien syntyyn (Galyon 2004).

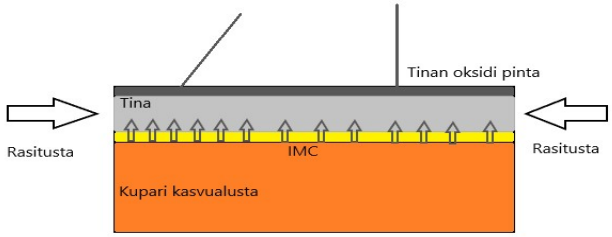
Kuitenkin dislokaatioteoriat on todistettu useasti vääriksi ja ettei dislokaatioita tapahdu tinaviiksien kasvussa. Viiksien kasvu tiedettiin tapahtuvan perustasta eikä tinakerroksen pinnasta ja Baker (1957) todisti tutkimuksessaan viiksien kulmataivutusjakaumasta, että viiksien syntyminen dislokaatiomekanismien kanssa ei ole mahdollinen (Smetana 2007). Viikset kasvoivat eri suuntiin ja erilaisissa muodoissa, jotka eivät olleet mahdollisia dislokaatio mekanismin mukaisella kasvulla (Galyon 2004).

3.1.2 Välimetallikerrosteoria

Nykyinen teoria, jota pidetään tinaviiksien syntymiselle eniten hyväksyttävänä, on tina-atomin sisäisten puristavien rasitusten syntyminen. Makrotason rasitukset eivät siis itsessään synnytä tinaviiksiä, vaan ne aiheuttavat mikrotason rasituksia kerroksen sisällä. Tinakerroksen ja metalliperustan kanssa syntyy välimetallikerros, joka ajan kuluessa aiheuttaa puristavia mikrorasituksia. (McDowell 1993.) Reaktioyhtälö välimetallikerroksen syntymiseen on (Lee ja Lee 1998)

$$6\mathrm{Cu} + 5\mathrm{Sn} \rightarrow \mathrm{Cu_6Sn_5}. \qquad (1)$$

Kerroksen aiheuttamat rasitukset synnyttävät nystyröitä, joista tinaviikset alkavat kasvaa. Nystyröiden kasvunopeus riippuu keskenään reagoivista metalleista. Esimerkiksi tinan ja teräksen reagointi keskenään on paljon hitaampaa, kuin tinalla ja messingillä. Kuvassa 4 on esitetty välimetallikerroksen aiheuttama sisäinen puristava rasitus, joka aiheuttaa tinaviiksien kasvua.



Kuva 4. Tinan ja kuparin reagointi, jonka seurauksena syntyy välimetallikerros, joka johtaa tinaviiksien syntymiseen. Välimetallikerros aiheuttaa sisäistä rasitusta, joka kasaa materiaalia yhteen, josta viikset alkavat kasvamaan. (Hashim ja Salleh 2018.)

Kuparin ja tinan reagoidessa muodostuva Cu6Sn5 molekyyli aiheuttaa puristavaa rasitusta tinakerroksen alta päin, joka johtuu joko mekaanisista rasituksista, lämmöstä tai kemiallisista reaktioista (Hashim ja Salleh 2018). Mekaaninen- ja lämmöstä johtuva rasitus ovat rajallisia ja ne eivät kiihdytä tinaviiksien kasvua kovin kauan. Kemiallinen voima on taas välttämätön spontaanille tinaviiksien kasvulle, joka syntyy tina- ja kupariatomien reagoidessa huoneenlämmössä.

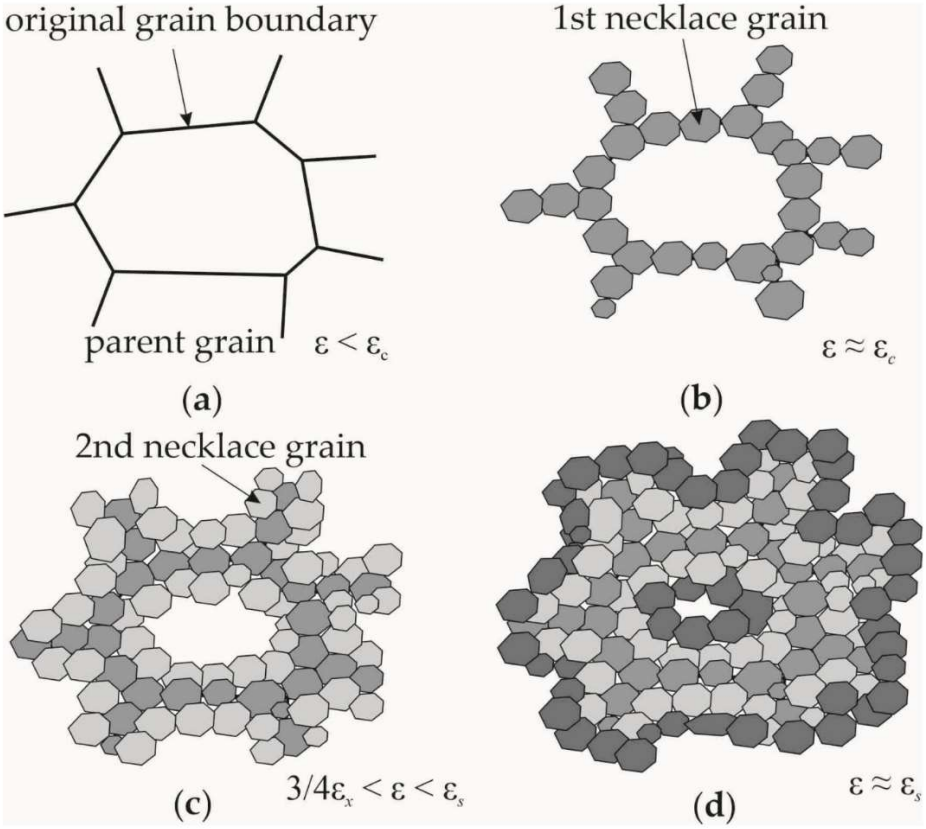
Tinaviiksien kasvamisen selittämiseksi on ymmärrettävä miksi tinaviikset kasvavat aina tietyissä kohdissa tinakerroksen pintaa. Eräänä ajatuksena on pidetty sitä, että viikset syntyvät paikkaan, jossa oksidikerros on heikko, koska oksidi estää rasitusten vapautumisen ja tinaviiksien kasvun vapautumispisteestä. Tämä testattiin Katon ym. tutkimuksessa (2016), mutta se osoitti, että oksidikerroksen poistaminen ei vaikuta tinaviiksien syntymiseen, sillä poistetussa kohdassa ja sen ympäristössä ei tapahtunut muutosta viiden päivän jälkeen. Sama tutkimus havaitsi, että viiksien perustan ympäristö ei muutu tai muovaannu, kun viikset alkavat muodostua, joka todistaa sen, että viiksiin kerääntyy materiaalia laajemmalta alueelta.

3.1.4 Uudelleenkiteytymisteoria

Ellis ym. (1958) kehittivät teorian metalliviiksien syntymisestä uudelleenkiteytymisen kautta. Teoria tarjoaa teoreettisen selityksen viiksen kasvuun mistä tahansa metallirakenteesta. Teorian mukaan metalliviiksien kasvun aiheuttaa uusi rae, joka syntyy, kun raetta ympäröivä materiaali aiheuttaa tarpeeksi jännitysenergiaa synnyttääkseen dislokaatioita ja materiaalin liikkumista hiukkasen pääakselia pitkin. (Jovičević-Klug ym. 2021) Teoria selittää spontaanin rakeiden muodostumisen ja nopean kasvun, joita ei voida selittää diffuusiopohjaisilla teorioilla ja tämä teoria oli yksi niistä tutkimuksista, jotka kumosivat Frankin ja Eshelbyn dislokaatio teoriat. Tämän teorian pääongelma on, että sen kuvaamalla mekanismilla ei ole kokeellista näyttöä, vaan teorialla on näyttöä ainoastaan epäsuorasti.

Vianco ja Rejent (2009) päivittivät uudelleenkiteytymisteoriaa dynaamisella uudelleenkiteytymisteorialla (eng. Dynamic recrystallization, DRX). Kuvassa 5 on esitetty uudelleenkiteytyminen vaiheittain. DRX mekanismi alkaa, kun rasitukset raerakenteessa aiheuttavat muodonmuutoksia, jotka kasaannuttavat dislokaatioita. Nämä kasaantumat tapahtuvat yleensä olemassa olevien rakeiden rajapinnoissa (kuva 5, a). Lisääntyvä jännitysenergia tuottaa voiman, joka aloittaa DRX:n tapahtumisen aiemmin tai pienemmässä lämpötilassa, kuin

normaali staattinen uudelleenkiteytyminen. Energian ylittäessä rajan, jossa nukleoituminen tapahtuu, syntyy uusia rakeita, jotka ovat pienempiä kuin alkuperäiset rakeet (kuva 5, b). Nukleoituminen tapahtuu ensimmäisen kerran alkuperäisen rakeen rajapinnassa, koska siellä on pienempi aktivointienergia kasaantuneiden dislokaatioiden tuottaman energian vuoksi (Mikó 2015). Kasaantumat siirtyvät uusien kiteytyneiden rakeiden rajapintoihin, josta taas uudet rakeet muodostuvat. Rakeet kasvavat dislokaatioiden tuhoutuessa ja niiden vapauttaessa jännitysenergiaa. Rakeiden kasvaessa niiden rajapintoihin muodostuu myös uusia dislokaatioita, synnyttäen uusia rakeita, jotka kasvavat dislokaatioiden tuhoutuessa ja tämä sykli jatkuu niin kauan, kunnes rasitukset on poistettu materiaalista (kuva 5, c ja d). Tämä teoria ei kuitenkaan toimi jokaisella metallirakenteella, vaan sillä on kokeellista näyttöä vain lämpökäsitellyillä materiaaleilla (Vianco ym. 2015).



Kuva 5. Uudelleenkiteytymisen kuvaus vaiheittain. Kuvassa *ε* kuvaa muodonmuutosta, jossa alaindeksit *e* kuvaa muodonmuutoksen rajaa, jossa uudelleenkiteytymistä ei tapahdu, *x* kuvaa muodonmuutosta, joka vastaa yhtä uudelleenkiteytymissykliä ja *s* kuvaa materiaalissa tapahtuvaa melkein täydellistä uudelleenkiteytymistä. (Trusov ym. 2022.)

Rakeet muodostuvat aina edellisen rakeen rajapinnoille jännitysenergian kasvaessa (kuva 5). Uudet rakeet mukailevat edellisten rakeiden asettautumista rakenteeseen ja asettuvat samansuuntaisesti rajapintaan. Kuvasta nähdään, että kohdassa d alkuperäinen rae on ikään kuin peittynyt uusien kiteytyneiden rakeiden alle. Muodostuvien rakeiden koko pienenee jokaisella syklillä ja rakeiden lisäys aiheuttaa materiaaliin turpoamista, jota voidaan kuvata muodonmuutoksena (Trusov ym. 2022). Muodonmuutosta kuvataan ε:lla. Raerakenteen kasvaessa jännitysenergia kasvaa ja se synnyttää voiman, joka aiheuttaa tinaviiksien kasvua.

DRX tapahtuu yleensä materiaaleissa, joissa on alhainen kasaantumishäiriöenergia, kuten tinalla. Kasaantumishäiriöenergiaa vapautuu, kun normaalissa atomitasojen kasaantumisissa raerakenteessa tapahtuu häiriö. (Vianco ja Rejent 2009.)

3.2 Tinaviiksien ehkäisy suunnittelun avulla

Tinaviikset aiheuttavat elektroniikassa ei toivottuja ominaisuuksia, kuten oikosulkuja ja valokaaria. Tinaviiksiä voidaan kuitenkin ehkäistä suunnittelun avulla ja käytetyillä metalleilla on väliä, sillä ne vaikuttavat itämisjakson pituuteen, sekä miten pitkiksi viikset kasvavat.

Yksi mahdollisuus on käyttää nikkelikerrosta tinakerroksen alla, jonka avulla saadaan lopetettua tinaviiksien kasvu kokonaan. Fadil ym. tutkimus (2021) kertoo, että nikkelikerros tinapinnan alla luo reaktion, jossa tina-atomit reagoivat nikkeliatomien kanssa eivätkä kupariatomien kanssa, jotka ovat enemmän reaktiivisempia. Reaktio hidastuu niin paljon, että 12 viikon jälkeen tinaviiksiä ei ollut syntynyt ollenkaan. Nikkeli on kuitenkin kallis materiaali ja sen käyttö arkipäivän elektroniikassa ei ole kannattavaa, sekä tina-nikkeliseos on vaikea juotettava. Juotteeseen voidaan lisätä muita aineita tai poistaa toisia kokonaan. Korkeaa luotettavuutta vaativissa laitteissa, kuten avaruusteknologiassa tina korvataan kokonaan toisella metallilla. Tämänkaltaisissa sovelluskohteissa tinan korvaaminen kullalla, hopealla tai tinalyijy seoksella on hyvä vaihtoehto. (Dunn 1987.)

Tina-lyijyseoksen käyttö olisi edullisin vaihtoehto, joka estäisi tinaviiksien syntymisen tehokkaasti. Boettingerin tutkimuksessa (2005) havaittiin, että lyijyn lisäys tinaan muodostaa tasa-akselisen raerakenteen, jossa dimensiot ovat joka suuntaan yhtä pitkät. Rakenne mahdollistaa, että siihen ei muodostu suuria rasituksia pienelle alueelle, joka aiheuttaisi voiman

tinaviiksien kasvulle. Voiman ollessa pieni viiksien kasvu jää lyhyeksi ja niiden tiheys tinakerroksessa harvenee (Zhou ym. 2014).

Taulukossa 1 on esitetty tinaviiksien syntymisen ehkäisykeinoja, sekä niiden mahdollisuus ehkäistä viiksien syntymistä. Taulukosta voidaan päätellä mitkä suunnittelun keinot ovat hyödyllisimpiä tinaviiksien ehkäisyssä.

Taulukko 1. Tinaviiksien syntymisen ehkäisykeinoja ja mahdollisuudet ehkäistä viiksien syntymistä.

Ehkäisykeino	Merkittävyys	Huomioita
Kasvualustan metallin valinta	Merkittävä	Vaikuttaa välimetallikerroksen kasvuun ja sisäisiin rasituksiin.
Tinan lämpökäsittely	Ehkäisevä	Vapauttaa sisäisiä rasituksia juotoksessa.
Tinan seosaineet	Ehkäisevä	Seokset parantavat viiksien ehkäisyä, mutta saattavat aiheuttaa muuta haittaa.
Tinakerroksen kastaminen metalliseoksella	Ehkäisevä	Saattaa aiheuttaa rasituksia, jotka voivat vahingoittaa komponentteja.
Tinakerroksen paksuus	Ehkäisevä	Kasvu suurinta 2–5 µm kohdalla.
Ulkoiset rasitukset	Kiistanalainen	Suuret rasitukset lisäävät kasvua.
Lämpötila	Kiistanalainen, voi kiihdyttää kasvua	Yli 150°C lämpötilat estävät viiksien muodostumisen. Suotuisinta viiksille 52°C.
Paine	Ei vaikuta	Kasvua tapahtuu korkeissa paineissa, sekä tyhjiössä.
Pinnoitteen tekoprosessi	Ei vaikuta	Kiiltävissä- ja mattapintaisissa pinnoitteissa tapahtuu yhtä paljon viiksi-ilmiötä.

Ylemmästä taulukosta nähdään, että tinaviiksien syntymiseen vaikuttaa vahvasti kasvualustana toimiva metalli, joka reagoi tina-atomien kanssa. Perustana toimivan metallin vaihdolla saadaan metallien välinen reaktio estettyä tai hidastettua, jolloin viiksien syntymistä ehkäistään merkittävästi. Kasvualustan metallin vaihto elektroniikassa on kuitenkin vaikeaa, sillä johdinmateriaali on yleensä kupari.

Dunnin (1987) tutkimuksen mukaan tinaviiksiä voidaan ehkäistä tehokkaasti syntymästä tinaa lämpökäsittelemällä riippumatta kasvualustasta. Lämpökäsittely pienentää todennäköisyyttä, jolla pinnoitteen sisälle muodostuu sisäisiä rasituksia, jotka aiheuttavat viiksien syntymistä. Tinakerros voidaan kastaa tina-lyijyseoksella, joka ehkäisee tinaviiksien syntymistä merkittävästi (Kato ym. 2016). RoHS-direktiivi määrää, että lyijyn osuus juotoksessa ei saa ylittää 0,1 massaprosenttia. Lyijy ehkäisee viiksien syntymistä, mutta prosessissa komponentit voivat kärsiä, sillä lyijyseoksen täytyy peittää koko tinakerros aivan juotoksen juureen asti, mikä lisää juotoksessa esiintyviä rasituksia. Automatisoituja linjoja on rakennettu, jotka tekevät kastamista ja ehkäisevät komponenttien vikaantumista.

Tinan seostamisella voidaan vaikuttaa merkittävästi tinaviiksien syntymiseen, mutta tinaseoksilla on myös haittapuolia, jotka saattavat vaikuttaa juotettavuuteen tai sähkönjohtavuuteen. Tinakerroksen paksuudelle on muodostettu selvät rajat, joiden on tutkittu ehkäisevän tinaviiksien syntymistä. Esimerkiksi sotateollisuudessa on määräyksenä, että tinakerroksen paksuus ei saa olla pienempi kuin viisi mikrometriä (McDowell 1993). Tästä voitaisiin päätellä, että tinakerroksen ollessa ohut sen sisäiset rasitukset eivät tasoitu tarpeeksi koko kerrokselle vaan ne aiheuttavat lokaaleja jännityksiä, jotka luovat puristavaa rasitusta sisältä päin.

Ulkoisten rasitusten ja lämpötilan vaikutukset ovat kiistanalaisia tinaviiksien syntymiselle ja niiden vaikutuksista on kiistelty vaikuttavatko ne ollenkaan viiksien syntymiseen. Voidaan kuitenkin sanoa, että suuret jatkuvat ulkoiset rasitukset lisäävät todennäköisyyttä tinaviiksien syntymiselle. Tutkijat eivät ole varmoja lämpötilan vaikutuksesta, sillä tinaviiksien kasvu hidastuu 121°C lämpötilassa ja loppuu kokonaan yli 150°C lämpötilassa. Kuitenkin toinen tutkimus on havainnut, että 25–50°C lämpötilat kiihdyttävät tinaviiksien syntymistä, sekä lämpötilanvaihtelut voivat aiheuttaa rasituksia, jotka johtavat viiksien kasvuun. (McDowell 1993.) Paineella ei ole vaikutusta tinaviiksien syntymiseen, sillä ne kasvavat korkeassa paineessa, tyhjiössä ja ilmanpaineessa. Pinnoitteen tekoprosessilla ei ole myöskään vaikutusta tinaviiksien syntymiseen, sillä kiiltävillä ja tummilla pinnoitteilla on havaittu tinaviiksien syntymistä.

Tinaviiksien ehkäisyyn ilmailuteollisuuteen on luotu standardi GEIA-STD-0005-2, jonka tarkoituksena on ehkäistä tinaviiksien syntymistä korkeaa suojausta vaativissa sovelluskohteissa, kuten lentotekniikassa. Taulukossa 2 on esitetty viisi hallintatasoa tinaviiksien ehkäisyyn sovelluskohteissa.

Taulukko 2. Standardoidut tinaviiksien hallinta tasot (Kato ym. 2016, [GEIA-STD-0005-2]).

Hallinta taso	Kuvaus	Käyttö
1	Ei rajoituksia.	Ei korkeaa suojausta vaativat laitteet.
2A	Tinan käyttöä ei ole rajoitettu. Rajoitusten puuttuminen pitää perustella analyyseillä.	Korkeaa suojausta vaativat laitteet, joissa on paljon päällekkäisyyksiä tai eikriittiset testauslaitteet ja prototyypit.
2B	Tinan käyttö pitää olla perusteltua jokaisessa sovelluksessa.	Käyttö laajasti suojausta vaativissa laitteissa.
2C	Tinan käyttö jokaisessa sovelluksessa pitää olla erikseen arvosteltu ja hyväksytty.	Käyttö erittäin kriittisissä korkean suojauksen vaativissa laitteissa.
3	Tinan käyttö on kielletty kaikilla osa-alueilla.	Rajoitettu käyttö, yleensä avaruusteknologia.

Tasoa 1 ei käytetä korkeaa suojausta vaativissa sovelluksissa, koska tinaviiksien aiheuttamat ongelmat voisivat olla vaarallisia ihmiselle tai laitteistoille. Tasoa 2A varten ei tarvitse tehdä arvioita riskeistä, jos tinaa joutuisi järjestelmään ja käytön turvallisuus tinaviiksien muodostumisen osalta varmistetaan yleensä toimittajalta. Tasoa 2B ja 2C varten standardissa on määritelty erilaiset suunnitteluohjeet, joilla määritetään kumpaa hallintatasoa käytetään. 2B tasolla on enemmän vaihtoehtoja, joilla viiksien ehkäisyä voitaisiin toteuttaa. Ehkäisykeinoja ovat esimerkiksi fyysiset esteet, kapselointi, piirianalyysi, joka näyttää viiksien aiheuttaman oikosulun mitättömyyden ja erilaiset pinnoitteet. Toinen tapa määrittää hallintataso on algoritmit, jotka arvioivat tinaviiksistä johtuvan ongelman todennäköisyyttä jokaisessa sovelluksen pisteessä. Algoritmi käyttää apunaan entisiä vikoja, jotka ovat johtuneet tinaviiksistä. Taso 3 on harvinainen, koska tinan käyttö juotosaineena on yleistä. Tasoa käytetäänkin yleensä vain avaruus- ja sotateollisuudessa. Tinan käyttö pitää varmistaa toimittajalta, ettei sitä ole käytetty missään sovelluksen osa-alueessa. (Kato ym. 2016.)

Viiksien ehkäisy on vaikeaa ja ennalta-arvaamatonta, sillä niiden syntypaikkoja ei voida aavistaa ennalta. Suunnittelussa on myös otettava huomioon sovelluskohde, minkä kanssa ollaan tekemisissä. Kalliimpi ja enemmän suojausta vaativa laite on suunniteltava tinaviiksien ehkäisyn osalta luotujen standardien mukaan, jotta viiksien aiheuttamien ongelmien todennäköisyys saadaan hallittua. Tinaviiksien ehkäisy suunnittelun avulla täytyy toteuttaa kuitenkin niin, että komponenteissa esiintyvät muut luotettavuusongelmat ovat priorisoitu yhtä paljon kuin viiksien ehkäisy.

4 Johtopäätökset

Tutkimuksessa selvisi, että tinaviiksi-ilmiötä ei vieläkään tunneta perusteellisesti ja sen kuvaamiseen on olemassa monta eri teoriaa, jotka lähestyvät asiaa hieman eri tavalla. Parhaana selityksenä tinaviiksien syntymiselle pidetään edelleen tinan ja kuparin diffuusioteoriaa, joka selittää tinaviiksi-ilmiön rasitusten kautta, jossa tinaviikset syntyvät puristavien mikrorasitusten ansiosta tinakerroksen alta. Tinaviikset ovat siis pakonomaisesti työnnetty ulos tinan pinnasta. Tinaviiksien syntyminen ei vahingoita tinakerrosta tai tee siitä haurasta, joka kertoo, että tinaviiksien materiaali tulee kaukaa kasvukohdasta. Osa viiksistä ovat kuitenkin ohuita ja lyhyitä, jolloin niiden olemassaoloaika jää lyhyeksi, kun ne antavat virralle kulkureitin ja palavat nopeasti pois.

Lyijyn lisäys tinaseokseen vähensi tinakerroksessa esiintyviä rasituksia luomalla tasa-akselisen raerakenteen, joka näkyi lyhyempinä tinaviiksinä ja harvempana viiksitiheytenä. Tinaviiksiä voidaan ehkäistä muillakin seoksilla, mutta tina-lyijyseos olisi edullisin vaihtoehto, jolla on myös korroosion eston kannalta hyviä vaikutuksia.

Tutkimuksessa ilmeni, että tinaviiksien syntymistä on tutkittu etenkin sota- ja avaruusteknologian takia. Näissä molemmissa sovelluskohteissa vaaditaan tarkkoja toleransseja, sekä ennen kaikkea tarkkuutta. Tinaviiksien syntyminen voisi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa toiminnan lakkaamisen sovelluksessa, joka olisi voitu ehkäistä suunnittelun avulla. Tinaviiksien ehkäisemiseen on löydetty monta eri tapaa, ja etenkin suurta suojausta omaavissa laitteissa tina on korvattu tinalyijy seoksella, muulla metallilla tai muita metalleja on seostettu mukaan estämään välimetallireaktio.

Ilmailu- ja avaruustekniikkaa varten on luotu omat standardit, jotka ottavat tinaviiksien syntymisen huomioon tarkemmin ja ehkäisevät niitä monilla eri tavoin. Etenkin avaruusteknologian kanssa tinaa ei saateta käyttää ollenkaan juotosaineena tai se on vähintäänkin oltava seostettu. Suunnittelun avulla voidaan miettiä tinaviiksien haitallisuutta ja materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa miten nopeasti tinaviikset syntyvät sovelluskohteen mukaan. Suunnittelija voi myös suunnitella esimerkiksi piirilevyn niin, että tinaviikset eivät syntyessäänkään voi aiheuttaa oikosulkuja.

Tehdyn työn perusteella voidaan sanoa, että tinaviiksi-ilmiötä osataan ehkäistä tehokkaasti, mutta aukottoman syntyteorian muodostaminen vaatii edelleen jatkotutkimusta. Seuraava askel tutkimuksessa voisi olla laaja-alaisempi mittaus viiksen syntymisestä pidemmällä ajanjaksolla. Tämä voisi auttaa tunnistamaan kasvukohtien samankaltaisuuksia, joista voitaisiin luoda teoria miksi tinaviikset kasvavat tietyissä pisteissä ja mikä ajaa kasvumateriaalin näihin kohtiin.

Lähteet

Aimi Noorliyana Hashimja Mohd Arif Anuar Mohd Salleh (2018) Spontaneous Tin (Sn) Whisker Growth from Electroplated Tin and Lead-Free Tin Alloys Coatings: A Short Review. *Solid State Phenomena* 280: 151-156.

Baker GS (1957) Angular bends in whiskers. *Acta Metallurgica* 5(7): 353-357.

Boettinger WJ, Johnson CE, Bendersky LA, Moon K-, Williams ME ja Stafford GR (2005) Whisker and Hillock formation on Sn, Sn–Cu and Sn–Pb electrodeposits. *Acta Materialia* 53(19): 5033-5050.

Direktiivi 2011/65/EU: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa. Viitattu [10.1.2023] Saatavilla: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32011L0065.

Dunn BD, Centre européen de recherches et de technologie spatiales (Noordwijk aan Zee, Pays-Bas). ja Agence spatiale européenne, (1987) *A Laboratory Study of Tin Whisker Growth.* : ESA Publications Division.

Ellis WC, Gibbons DF, Treuting RG, Doremus RH, Roberts BW ja Turnbull D (1958) Growth and perfection of crystals. *Ed.Doremus RH Et Al, John Wiley, New York*: 102.

Eshelby JD (1953) A Tentative Theory of Metallic Whisker Growth. *Phys.Rev.* 91(3): 755-756.

Fadil NA, Yusof SZ, Abu Bakar TA, Ghazali H, Mat Yajid MA, Osman SA ja Ourdjini A (2021) Tin Whiskers' Behavior under Stress Load and the Mitigation Method for Immersion Tin Surface Finish. *Materials* 14(22).

Frank FC (1953) XC. On tin whiskers. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 44(355): 854-860.

Galyon GT (2005) Annotated tin whisker bibliography and anthology. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* 28(1): 94-122.

Galyon GT *A History of Tin Whisker Theory: 1946 to 2004.* (2004) SMTAI International conference. 26-30.

Jovičević-Klug M, Jovičević-Klug P, Sever T, Feizpour D ja Podgornik B (2021) Extraordinary Nanocrystalline Pb Whisker Growth from Bi-Mg-Pb Pools in Aluminum Alloy 6026 Moderated through Oriented Attachment. *Nanomaterials* 11(7).

Kato T, Handwerker CA ja Bath J, (2016) *Mitigating Tin Whisker Risks: Theory and Practice.* Somerset: John Wiley & Sons, Incorporated.

Kittel C (2021) Introduction to solid state physics Eighth edition. 611-612

Leake J, Holmes D, Bridges A, Barber B, Best C , Hudson D, (2023) *Dislocations in 3D:* University of Cambridge Viitattu [17.2.2023] Saatavilla: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/dislocations_in_3D.php.

Lee B-ja Lee DN (1998) Spontaneous growth mechanism of tin whiskers. *Acta Materialia* 46(10): 3701-3714.

Lindborg U (1976) A model for the spontaneous growth of zinc, cadmium and tin whiskers. *Acta Metallurgica* 24(2): 181-186.

McDowell ME *Tin Whiskers: A Case Study.* (1993) 1993 IEEE Aerospace Applications Conference Digest.: IEEE 207-215.

Mikó T (2015) Necklace Formation during Dynamic Recrystallization of 5182 Aluminium Alloy under Isothermal Compression. *Materials Science Forum* 812: 167-172.

Molla RS (2018) *A Study on Manufacturing of Deformed Bar (G 60-400W) at Elite Iron and Steel Industries.*

NASA (2010) *NASA Tin Whisker (and Other Metal Whisker) Homepage.* Viitattu [23.1.2023] Saatavilla: https://nepp.nasa.gov/whisker/.

Ponikvar ALja Goodwin FE (2013) Lead processing. *Encyclopedia Britannica*.

Smetana (2007) *Theory of Tin Whisker Growth: "The End Game". IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* 30(1):11-22

Sood B, Osterman M ja Pecht M (2011) Tin whisker analysis of Toyota's electronic throttle controls. Circuit world. [Online] 37 (3), 4–9.

Trusov P, Kondratev N ja Podsedertsev A (2022) Description of Dynamic Recrystallization by Means of An Advanced Statistical Multilevel Model: Grain Structure Evolution Analysis. *Crystals (Basel)* 12(5): 653.

Vianco PTja Rejent JA (2009) Dynamic Recrystallization (DRX) as the Mechanism for Sn Whisker Development. Part II: Experimental Study. *Journal of Electronic Materials* 38(9): 1826-1837.

Vianco PT, Neilsen MK, Rejent JA ja Grant RP (2015) Validation of the Dynamic Recrystallization (DRX) Mechanism for Whisker and Hillock Growth on Sn Thin Films. *Journal of Electronic Materials* 44(10): 4012-4034.

Zhang P, Zhang Y ja Sun Z (2015) Spontaneous Growth of Metal Whiskers on Surfaces of Solids : A Review. *Journal of Materials Science & Technology; Journal of Materials Science & Technology* 31(7): 675-698.

Zhou W, Zhang H ja Wu P (2014) Whisker growth in Sn and SnPb thin films under electromigration. *Vacuum* 107: 103-107.