

## Obrazová analýza povrchu bezolovnaté povrchové úpravy zaměřená na indikaci cínových whiskerů

J. Podzemský<sup>1</sup>, J. Urbánek<sup>1</sup>, K. Dušek<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra elektrotechnologie, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze, Technická 2, Praha

E-mail : podzej1@fel.cvut.cz, urbanek@fel.cvut.cz, dusekk1@fel.cvut.cz

### Anotace:

Práce se zabývá sledováním vzniku a růstu cínových whiskerů z bezolovnatých povrchových úprav pájkami Sn-3,8Ag-0,7Cu, Sn-4Ag, Sn-1Cu a olovnaté povrchové úpravě pájkou Sn-37Pb. Měděné kupony o rozměru 4x2 cm byly ponořeny do roztavených pájek při teplotě 250 °C po dobu 4 s. Kupony byly následně ohnuté do úhlu 90°. Takto připravené vzorky byly vystaveny teplotě 60 °C po dobu 3000 h. Vzorky byly sledovány pod optickým a elektronovým mikroskopem a u útvarů, které by mohly být cínové whiskery byla provedena prvková analýza. Takto byly identifikovány cínové whiskery rostoucí z povrchových úprav Sn-3,8Ag-0,7Cu a Sn-1Cu. Měly délku desítky až stovky mikrometrů. V případě povrchové úpravy z pájek Sn-4Ag a Sn-37Pb nebyly žádné whiskery identifikovány.

### Annotation:

The article deals with observation of creation and growth of tin whiskers from surface finish made of lead-free solders Sn-3,8Ag-0,7Cu, Sn-4Ag, Sn-1Cu and lead solder Sn-37Pb. Copper coupons with dimensions 4x2 cm were immersed into the melted solders at temperature 250 °C for 4 s. Coupons with surface finish were subsequently bended into angle 90°. Such prepared samples were put into temperature 60 °C for 3000 h. Samples were observed with optical and electron microscopes. Whisker like formations were tested to element analysis. Tin whiskers were identified onto Sn-3,8Ag-0,7Cu and Sn-1Cu surface finishes. The length of the whiskers varied from tens to hundreds of microns. In case of surface finish made of solder Sn-4Ag and Sn-37Pb tin whiskers were not identified.

## ÚVOD

Whiskery jsou elektricky vodivé krystalické struktury, které spontánně vyrůstají z povrchu některých kovů. Jedná se zejména o kadmium, antimon, zinek a hlavně cín. V souvislosti s přechodem od roku 2006 na bezolovnaté pájení a bezolovnaté povrchové úpravy v elektronice v EU, kdy se jako náhrada za běžně používanou olovnatou pájku Sn37Pb začaly používat pájecí slitiny SnAgCu, SnCu, SnAg, které obsahují běžně 95 % až 99 % cínu, vzrostla obava o spolehlivost elektronických zařízení. Protože se stále zmenšují rozměry osazovaných součástek a rozteč jejich vývodů stejně jako vzdálenost mezi vodivými spoji na desce plošných spojů, mohou whiskery způsobit vodivé spojení mezi místy s rozdílným potenciálem a způsobit tak zkrat a následnou poruchu zařízení. Demonstrováno je to na Obr. 1.



Obr. 1: Whisker rostoucí z jednoho vývodu směřující k druhému vývodu [12].

## Historický přehled problematiky whiskerů

První whiskery byly objeveny v roce 1946 při opakovaných poruchách vojenského vybavení, docházelo ke zkratům vzduchových kondenzátorů, které byly vyvolané právě whiskery [1]. Počátkem roku 1948 byla odhalena porucha na kanálových filtrech telefonního zařízení a Bellovy laboratoře zahájily dlouhotrvající výzkum whiskerů.

Na základě svých výzkumů Koonce a Arnold konstatovali v roce 1954, že růst whiskeru je způsoben postupným přidáváním atomů metalické vrstvy do základny whiskeru [2].

V 50. letech byly předloženy tři teorie růstu. Teorie šroubové dislokace Peach 1952 [3], teorie kluzných rovin Eshelby 1953 [4], teorie třífázového růstu Fisher a kol. 1954 [5].

V roce 1966 navrhl Rozen pro omezení růstu cínových whiskerů nanášet pro povrchové úpravy větší tloušťku cínu (více než 5 μm) s následným žiháním (191 °C až 218 °C) [6].

V roce 1973 Tu uvedl, že růst whiskeru může být způsoben vnitřním mechanickým napětím, které vzniká z důvodu vytváření intermetalické slitiny Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> na rozhraní měděného substrátu a cínové vrstvy [7]. O 21 let později tentýž autor předložil teorii prasklého oxidu, podle které se vnitřní napětí cínové vrstvy uvolňuje ve slabých místech oxidové vrstvy v podobě rostoucího cínového whiskeru [8].

V roce 2002 Xu zjistil, že whiskery rostou pouze vně cínové vrstvy, nikoli uvnitř. Dále zjistil, že růst whiskerů byl ve větší míře pozorován na ohnutých vzorcích na tlakově namáhaných místech [9].

V roce 2007 Smetana publikoval práci s názvem „The End Game“, ve které detailně popisuje mechanismus a důvod růstu cínového whiskeru [10].

### **Základní charakteristika cínových whiskerů**

Tvar bývá převážně rovný, ale byly pozorovány whiskery zahnuté, ale i zauzlené. Délka je ve většině případů menší než 1 mm, byly však také pozorovány vzácné případy, kdy délka whiskeru překročila 10 mm. Obecně platí, že poměr délka/průměr whiskerů bývá větší než 2 [11]. Průměr bývá většinou konstantní bez větších změn a pohybuje se typicky 1  $\mu\text{m}$ . Ojedinele byly pozorovány whiskery o průměrech přesahujících 100  $\mu\text{m}$ , ale také menších než 0,1  $\mu\text{m}$ . Rychlost růstu byla experimentálně zjištěna v rozmezí od 0,03 do 9 mm/rok [12].

### **Faktory ovlivňující růst whiskerů**

I když je mechanismus růstu whiskerů studován bezmála 60 let, je kolem jeho mechanismu stále plno otazníků. Na základě výsledků experimentů existují domněnky, které faktory mají na jejich růst zásadní vliv. Závěry provedených experimentů byly však často protichůdné. Všeobecně se za iniciátor růstu whiskerů považuje přítomnost tlakového napětí uvnitř metalické vrstvy, které se uvnitř této vrstvy hromadí a po překročení určité kritické hodnoty je uvolněno ve formě rostoucího whiskeru.

Teplota – jako nevhodnější pro růst uvádí Choi teplotu 60  $^{\circ}\text{C}$  [13], jiné experimenty uvádějí 25  $^{\circ}\text{C}$ , protože ta je blízko rekrystalizační teplotě cínu (30  $^{\circ}\text{C}$ ) [12]. Whisker údajně přestává růst při teplotách vyšších než 150  $^{\circ}\text{C}$  a nižších než -40  $^{\circ}\text{C}$  [14].

Tlak – Chang a Vook provedli srovnání růstu za ultravysokého vakua ( $10^{-7}$  až  $10^{-12}$  mbar) a za normálního atmosférického tlaku. Výsledek jejich experimentu byl, že na vzorcích ve vakuu oproti vzorkům na atmosférickém tlaku nebyl pozorovaný růst whiskerů [14].

Vlhkost a povrchový oxid - růst whiskerů je údajně akcelerován při relativních vlhkostech větších než 85 %. S vysokou vlhkostí je spojen vznik koroze a povrchového oxidu. Především povrchový oxid je často považován za jeden z hlavních faktorů, způsobující růst whiskerů. Tvrzení by podporoval fakt, že whiskery velmi špatně rostou na površích ušlechtilých kovů jako je stříbro nebo zlato. Byl však proveden experiment, ve kterém byl stříbrný povrch vystaven prostředí sirovodíku (v němž oxiduje) a

následně byl pozorován růst whiskerů v oxidované oblasti [1].

Elektrické pole - nebylo prokázáno, že by mělo působení elektrického pole nějaký akcelerační vliv na růst whiskerů. Elektrické pole však může zvýšit pravděpodobnost vzniku elektrického zkratu způsobeného rostoucím whiskerem, protože cínový whisker se vlivem elektrostatických sil ohýbá.

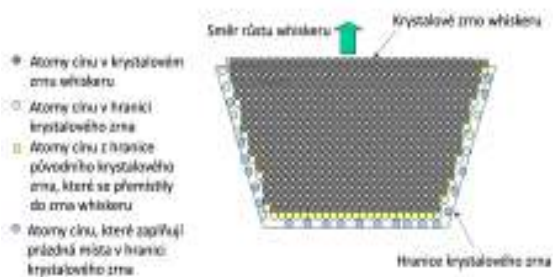
Vnější tlakové namáhání - tlakového napětí uvnitř cínové vrstvy může být vytvořeno také vnějším tlakovým působením. K tomuto působení dochází například ohybem materiálu s nanesenou cínovou vrstvou. Příkladem může být úprava tvaru vývodů elektronických součástek pro umístění do desky plošných spojů. Růst whiskerů byl pozorován nejenom na vnitřních ohybech vývodů namáhaných tlakově, ale v menší míře i na vnějších ohybech vzorků namáhaných tahově [13].

Drsnost povrchu substrátu - Gaylon [15] provedl experiment zkoumající vliv drsnosti povrchu substrátu na růst whiskerů. Závěrem tohoto experimentu bylo, že drsnější povrchy substrátů vedou k růstu drsnější struktury IMC, která způsobuje uvnitř cínové vrstvy větší tlakové napětí a následně větší růst whiskerů. Takeuchi a kolektiv [16] však zjistili, že na drsnějším povrchu mědi, vytvořeném leptáním, dochází po nanesení cínové vrstvy k menší hustotě růstu whiskerů, než na vzorcích s hladkým měděným povrchem. Experiment vlivu drsnosti substrátů mosazi, mědi, zinku, niklu a hliníku na růst whiskerů se stejným výsledkem jako Takeuchi provedl Rodekohl a kolektiv [17].

### **Teorie popisující růst whiskerů**

Mechanismus růstu whiskerů doposud není znám, existují čtyři hlavní teorie, které vysvětlují vznik a vývoj whiskerů. Jedná se o teorii intermetalických slitin, teorii dislokací, teorii dynamické rekrystalizace a teorii The End Game. Právě poslední z nich The End Game se jeví jako nejkompexnější.

Platnost teorie The End Game má dva následující předpoklady: 1. Atomy, které se nacházejí v hranici základny krystalového zrna whiskeru, jsou v průměru na nižších energetických úrovních, než atomy z okolních oblastí. 2. V hranici základny krystalového zrna whiskeru musí být volná místa, do kterých se mohou atomy z okolních oblastí pohybovat.



Obr. 2: Klouzání hranic krytalového zrna o jednu atomovou vzdálenost na obou stranách [10].

Celý mechanismus růstu whiskerů založený na této teorii by se tedy dal ve zkratce popsat následovně. Důsledkem tlakové síly, působící na cínovou vrstvu, je způsobeno klouzání krytalových zrn podél jejich hranic, což vytvoří v krytalové mřížce zrna whiskeru volná místa, která jsou zaplněna atomy cínu z hranic předchozího krytalového zrna. Protože se jedná o šikmou hranici krytalového zrna, dochází následně (díky napěťovému gradientu) k pohybu atomů cínu z okolních oblastí do této hranice krytalového zrna. Tento popis růstu whiskerů by vysvětloval zahnutý tvar cínového whiskeru. Pokud hranice krytalového zrna nejsou nikde ukotveny, může klouzání hranic probíhat na obou stranách krytalového zrna a atomy cínu se tak mohou střídavě přidávat do krytalového zrna whiskeru po obou stranách jak je zobrazeno na Obr. 2. Růst whiskeru tak může probíhat kolmo vzhůru. Předchozí popis by vysvětloval rovný tvar cínového whiskeru [10].

## NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTU

Cílem experimentu bylo identifikovat růst cínových whiskerů z povrchu nejčastěji používaných bezolovnatých pájek. Podmínky byly zvoleny podle standardu JESD22A121, který používají mnozí výrobci elektroniky pro ověření, zda je testovaný vzorek náchylný ke vzniku whiskerů [18]. Podle tohoto standardu jsou vzorky exponované teplotě 60 °C a relativní vlhkosti 87 %, minimální doba expozice 3000 h. Pájka byla nanášena žárově ponořením do roztavené pájky po dobu 4 s. Vzorky byly po nanášení ohnuty o 90° a vystaveny výše zmíněným podmínkám. První sledování bylo provedeno po 2000 h, závěrečné po 3000 h.

### Základní materiál zkoušených vzorků

Cínové whiskery největších délek byly pozorovány na cínových vrstvách, nanášených na základní měděné, nebo mosazné materiály. U experimentů, ve kterých byla jako základní materiál použita měď, nebývá přesně specifikováno, o jaký druh mědi se jedná. Zvolili jsme tedy druh mědi takový, která se svým chemickým složením nejvíce blíží mědi

používané pro vývody elektronických součástek, konkrétně pro integrované obvody. Běžně používané měděné materiály pro vývody integrovaných obvodů nesou označení C19400 a C18040. Použili jsme měď s označením CW024A, protože se jím svým chemickým složením velmi blíží.

Tab. 1: Chemické složení měděných materiálů

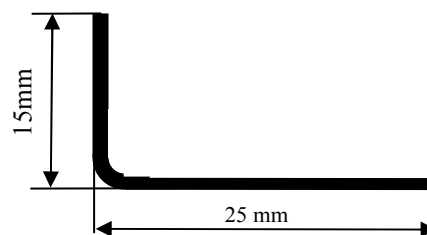
označení	chemické složení (%)					
	Cu	P	Fe	Zn	Sn	Cr
C19400	97,5	0,03	2,4	0,13	-	-
C18040	≥ 99,35	-	-	-	0,2	0,2
CW024A	≥ 99,85	0,015 -0,04	-	-	-	-

### Materiál povrchové úpravy

Cílem práce bylo otestovat růst whiskerů z povrchu rozšířených bezolovnatých pájek. Byly zvoleny pájky Sn-3,8Ag-0,7Cu, Sn-4Ag, Sn-1Cu. Pro srovnání byla do výběru začleněna i dříve používaná olovnatá pájka Sn-37Pb.

### Způsob nanášení povrchové úpravy

Z měděného plechu CW024A o tloušťce 1 mm byly postupně nastříhány jednotlivé kupony o rozměrech 40x20 mm. Každý byl očištěn od případných nečistot isopropylalkoholem. Po osušení bylo nanášeno tavidlo Epsilon 5 a kupony byly bezprostředně po nanášení tavidla ponořeny do roztavené pájky po dobu 4 s a následně z lázně vyjmuty. Teplota lázně byla (245±1) °C. Následným měřením bylo zjištěno, že tloušťka takto nanášené vrstvy se pohybuje v rozmezí 9 μm až 15 μm. Kupony byly posléze ohnuty do finálního tvaru podle Obr. 3.



Obr. 3: Finální tvar vzorku po ohnutí.

### Měřicí pracoviště a použitá přístrojová vybavení

K realizaci experimentu byla použita následující měřicí pracoviště a přístrojová vybavení Katedry elektrotechnologie Elektrotechnické fakulty ČVUT. K vytvoření zvolených klimatických podmínek byla k dispozici klimatická komora. Pro optické zkoumání vzorků bylo k dispozici pracoviště, vybavené optickým mikroskopem Olympus SZX8 se dvěma objektivy DF PLAPO 1x se zvětšením 0,8 až 5,6x a

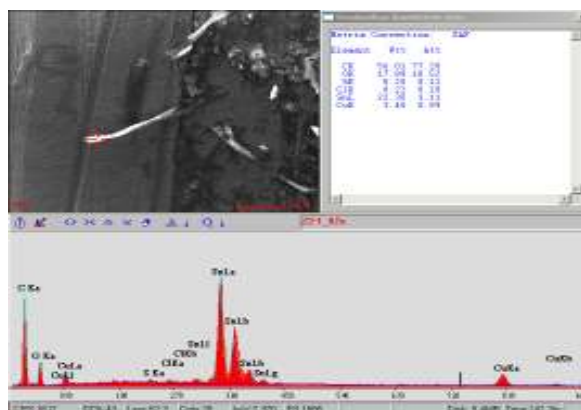
DF PL 2x se zvětšením 1,6 až 11,2x. Osvětlení zkoumaných vzorků bylo zajištěno zdrojem studeného světla Olympus KL1500LCD a prstencovým osvětlením VisiLED s bílými LED, které bylo možno nasunout a upevnit na objektiv.

Jako záznamové obrazové zařízení byl k dispozici fotografický přístroj Olympus E-330 s rozlišením 7,5 milionů pixelů a Live MOS senzorem, který byl propojený se stolním počítačem. Toto přístrojové vybavení bylo pro pozorování růstu whiskerů dostatečné.

Dalším přístrojem pro podrobnější zkoumání růstu whiskerů byl rastrovací elektronový mikroskop XL30 ESEM od firmy Philips ve vlastnictví kooperujícího pracoviště Katedry mechaniky Stavební fakulty ČVUT. Největší výhodou tohoto přístroje byla možnost provedení EDX analýzy – analýzy, která určí spektrum chemických prvků, které pozorovaný objekt obsahuje. Umožnila jednoznačně určit, zda-li je pozorovaný objekt opravdu cínový whisker nebo pouze nečistota.

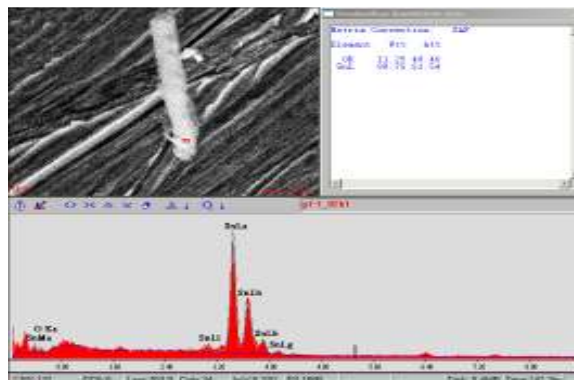
## VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Při vyhodnocení optickým mikroskopem byly objeveny struktury, které vypadaly jako cínový whisker. Tyto objevené struktury byly podrobeny prvkové analýze na elektronovém mikroskopu. Ta pomohla rozlišit opravdové whiskery a nečistoty, které mohly pocházet z okolí nebo z pájecího procesu, popřípadě z tavidla.



Obr. 4: Snímek z elektronového mikroskopu a EDX analýza struktury identifikované na povrchu (nejedná se o whisker).

Jedním z případů struktury, která by v prvním přiblížení mohla být považovaná za whiskery, je na Obr. 4. Z prvkové analýzy plyne, že struktura obsahuje vysoký obsah uhlíku. S největší pravděpodobností se jedná o organickou nečistotu pocházející z tavidla.



Obr. 5: Snímek z elektronového mikroskopu a EDX analýza struktury identifikované na povrchu (jedná se o whisker rostoucí z povrchu Sn-3,8Ag-0,7Cu).

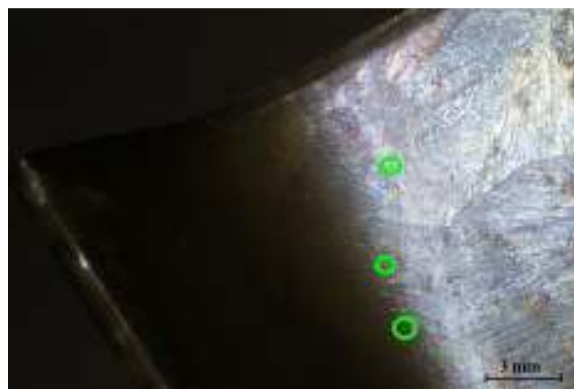
Experimentem se povedlo vypěstovat a odhalit whiskery, dokumentuje to Obr. 5, na kterém je snímek z elektronového mikroskopu spolu s EDX analýzou pro whisker rostoucí z povrchu pájky Sn-3,8Ag-0,7Cu. Její výsledek potvrzuje, že se opravdu jedná o cínový whisker.

## Vyhodnocení povrchové úpravy Sn-3,8Ag-0,7Cu

Nejvíce whiskerů bylo nalezeno na povrchu pájky Sn-3,8Ag-0,7Cu, jednalo se celkem o tři. Jejich délka byla různá, od 70  $\mu\text{m}$  do 449  $\mu\text{m}$  po expozici 2000 h. Po další expozici celkem 3000 h se jejich délka zvýšila. První whisker se již po druhém zkoumání nepodařilo objevit na místě, kde byl v předešlém pozorování. Druhý whisker byl delší o 26  $\mu\text{m}$ , třetí o 59  $\mu\text{m}$ . Celé shrnuje Tab. 2.

Tab. 2: Délka whiskerů rostoucích z povrchu pájky Sn-3,8Ag-0,7Cu.

čas expozice (h)	délka whiskeru ( $\mu\text{m}$ )		
	whisker 1	whisker 2	whisker 3
2000	449	70	334
3000	-	96	393



Obr. 6: Pozice identifikovaných whiskerů rostoucích z povrchu Sn-3,8Ag-0,7Cu.

Všechny tři nalezené whiskery byly na vnitřní straně, a to přímo v oblasti ohybu, viz. Obr. 6. Toto by

potvrzovalo teorii, že faktor, který má vliv na růst whiskerů, je tlakové napětí.

### Vyhodnocení povrchové úpravy Sn-1Cu

Whiskery byly identifikované i v případě povrchové úpravy Sn-1Cu. Byly nalezeny celkem dva whiskery (Tab. 3). Whisker č. 1 byl nalezen až při druhém pozorování, zpětná analýza fotografií z prvního sledování (po 2000 hodinách) ale potvrdila, že tento whisker byl již na povrchu při prvním sledování. Poloha obou whiskerů je na vnější straně přímo u ohybu, kde je tahové napětí. Toto je přímá odlišnost od zjištění v případě pájky Sn-3,8Ag-0,7Cu.

Tab. 3: Délka whiskerů rostoucích z povrchu pájky Sn-1Cu.

čas expozice (h)	délka whiskeru ( $\mu\text{m}$ )	
	whisker 1	whisker 2
2000	-	205
3000	511	231



Obr. 7: Snímek z optického mikroskopu, cínový whisker délky 511  $\mu\text{m}$  z povrchu Sn-1Cu.



Obr. 8: Snímek z optického mikroskopu, cínový whisker délky 231  $\mu\text{m}$  z povrchu Sn-0,7Cu.

### Vyhodnocení povrchové úpravy Sn-4Ag a Sn-37Pb

V případě olovnaté povrchové úpravy Sn-4Ag ani Sn-37Pb nebyl nalezen žádný whisker.

## SHRNUTÍ

Experimentem se podařilo vypěstovat cínové whiskery na bezolovnatých povrchových úpravách Sn-3,8Ag-0,7Cu, Sn-4Ag a Sn-1Cu a provedlo se jejich vzájemné porovnání a porovnání s dřívě používanou olovnatou Sn-37Pb.

Plocha, na které byly whiskery sledované, byla 16 cm<sup>2</sup> pro každou povrchovou úpravu. Nejvíce whiskerů, celkem tři, byly identifikované na povrchové úpravě Sn-3,8Ag-0,7Cu, dva whiskery na povrchové úpravě Sn-1Cu. Jejich délka byla desítky až stovky mikrometrů. Poloha, odkud whiskery rostly, byla v obou případech rozdílná. V případě pájky Sn-3,8Ag-0,7Cu rostly whiskery přímo v ohybu, a to na vnitřní straně. V případě pájky Sn-1Cu rostly také v ohybu, ale na vnější straně. Odlišnost je způsobena spíše než typem pájky tím, že růst whiskeru není ovlivněn tahovým nebo tlakovým namáháním způsobeným ohybem, ale důležité je, že namáhání bylo přítomné.

Na povrchové úpravě Sn-4Ag a Sn-37Pb nebyl nalezen žádný whisker.

## PODĚKOVÁNÍ

Tato práce vznikla za podpory grantu MSM6840770021 – Diagnostika materiálů a grantovou agenturou Českého vysokého učení technického v Praze, grant č. SGS10/062/OHK3/1T/13.

## LITERATURA

- [1] H. L. Coob, "Cadmium Whiskers", Monthly Review of American Electroplaters Society, Vol.33, No. 28, pp. 28-30, Jan. 1946.
- [2] S. E. Koonce and S. M. Arnold, "Growth of Metal Whiskers", J. Appl. Phys. (letters to the editor), pp. 365- 366, 1954.
- [3] M. O. Peach, "Mechanism of growth of whiskers on cadmium", J. Appl. Phys., vol.23, no.12, pp.1401–1403, 1952.
- [4] J. D. Eshelby, "A tentative theory of metallic whisker growth", Phys. Rev., vol.91, pp.755–756, 1953.
- [5] R. Fisher, L. Darken, K. Carroll, "Accelerated Growth of Tin Whiskers", Acta Met. 2, pp.368, 1954.
- [6] M. Rozen, "Practical Whisker Growth Control Methods", Plating, Vol 55, No. 11, pp.1155–1168, Nov. 1968.
- [7] K. N. Tu, "Interdiffusion and Reaction in Bimetallic Cu-Sn Thin Films" Acta

Metallurgica, Vol. 21, No. 4, pp. 347-354, Apr. 1973.

- [8] K. N. Tu, "Irreversible Process of Spontaneous Whisker Growth in Bimetallic Cu-Sn Thin Film Reactions", *Physics Review B (Condensed Matter)*, Vol. 49, No. 3, pp. 2030-2034, Jan. 1994.
- [9] C. Xu, Y. Zhang, C. Fan et al. "Understanding Whisker Phenomenon, Driving Force for the Whisker Formation", *Proceedings of IPC SMEMA Council APEX 2002*, pp. S06-2-1 – S06-2-6, Jan. 2002.
- [10] J. Smetana, "Theory of Tin Whisker Growth: "The End Game"," *Electronics Packaging Manufacturing, IEEE Transactions on* , vol.30, no.1, pp.11-22, Jan. 2007.
- [11] M. Sampson and H. Leidecker, "Basic Information Regarding Tin Whiskers", USA: NASA, 2009 [cit. 2010-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://nepp.nasa.gov/>>.
- [12] R. Gedney, J. Smetana, G. Galyon, "NEMI Tin Whisker Projects", USA: NEMI, 2004 [cit. 2010-04-04]. Dostupné z WWW: <<http://thor.inemi.org/>>.
- [13] W. J. Choi, T. Y. Lee, K. N. Tu et al., "Structure and kinetics of Sn whisker growth on Pb-free solder finish," *52nd Electronic Components and Technology Conference*, vol., no., pp. 628- 633, 2002.
- [14] S. Ganesan and M. Pecht, M.: *Lead-free Electronics*. New Jersey: John Wiley & Sons, ISBN 0-470-78617-9, 2006.
- [15] G. T. Galyon and L. Palmer, "An Integrated Theory of Whisker Formation: The Physical Metallurgy of Whisker Formation and the Role of Internal Stresses", *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* (17-29), 2005.
- [16] M. Takeuchi, K. Kamiyama, K. Suganuma, "Suppression of Tin Whisker Formation on Fine Pitch Connectors by Surface Roughening", *Journal of Electronics Materials*, Vol. 35, No. 11, pp. 1918-1925, 2006.
- [17] C. L. Rodekohr, G. T. Flowers, J. C. Suhling, "Influence of Substrate Surface Roughness on Tin Whisker Growth," *Electrical Contacts*, 2008. *Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on* , pp.245-248, Oct. 2008.
- [18] Jecdec Standard JESD22A121 "Measuring Whisker Growth on Tin and Tin Alloy Surface Finishes", May 2005.