

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Problematika cínových whiskerů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav KŘIVAN**

Osobní číslo: **E15B0122P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Problematika cínových whiskerů**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou cínových whiskerů.
2. Zpracujte a popište jednotlivé teorie růstu cínových whiskerů.
3. Vypracujte přehled nežádoucích vlivů cínových whiskerů.
4. Popište možnosti zabránění růstu cínových whiskerů.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Anglicky psané vědecké publikace (z konferencí, impaktovaných časopisů, ...)
2. KLEIN WASSINK, R. J. Soldering in Electronics: Comprehensive Treatise on Soldering Technology for Surface Mounting and Through-hole Techniques, 1994

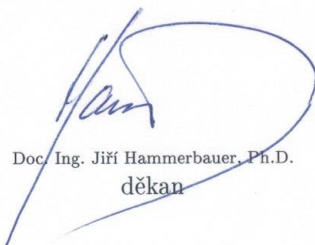
Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Martin Hirman, Ph.D.

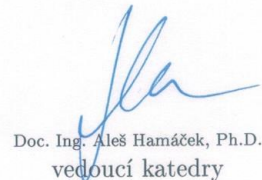
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018



Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku cínových whiskerů. V této práci jsou popsány jednotlivé teorie růstu cínových whiskerů, rizika cínových whiskerů a zmírňovací strategie růstu cínových whiskerů.

Klíčová slova

Whisker, cínový whisker, namáhání v tlaku, povrchová úprava, intermetalická sloučenina, hranice zrna.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the issues of tin whiskers. In this thesis are described individual theories of growth of tin whiskers, the risk of tin whiskers and the mitigation strategy of the growth of tin whiskers.

Key words

Whisker, tin whisker, compressive stress, surface finish, intermetallic compound, grain boundary.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2018

Václav Křivan

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY WHISKERŮ	11
1.1 BEZOLOVNNATÉ PÁJENÍ.....	14
1.1.1 Příčiny vzniku směrnice RoHS	15
1.1.2 Bezolovnnatá povrchová úprava	15
1.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ RŮST WHISKERŮ	17
1.2.1 Tlakové napětí	17
1.2.2 Účinky substrátu.....	18
1.2.3 Velikost a tvar zrna.....	18
1.2.4 Tloušťka pokovování.....	19
1.2.5 Teplota.....	19
1.2.6 Atmosférický tlak	19
1.2.7 Vlhkost.....	20
1.2.8 Teplotní cyklus.....	20
1.2.9 Oděrky a škrábance.....	20
1.2.10 Elektrické pole.....	20
1.3 ZRYCHLUJÍCÍ ZKOUŠKY PRO RŮST WHISKERŮ.....	20
2 TEORIE RŮSTU WHISKERŮ	23
2.1 TEORIE DISLOKACÍ	23
2.2 TEORIE REKRYSALIZACE	24
2.3 TEORIE PRASKLÉHO OXIDU.....	25
2.4 TEORIE THE END GAME	26
3 RIZIKA CÍNOVÝCH WHISKERŮ	29
3.1 DLOUHODOBÉ ZKRATY V OBVODECH S NÍZKÝM NAPĚTÍM A VYSOKOU IMPEDANCÍ..	29
3.2 KRÁTKODOBÉ ZKRATY	29
3.3 ELEKTRICKÉ OBLOUKY ZPŮSOBENÉ ODPAŘENÍM WHISKERU	30
3.4 NEČISTOTY, KONTAMINACE	30
3.5 HISTORICKÁ SELHÁNÍ ZPŮSOBENÉ WHISKERY	31
4 METODY ZABRAŇUJÍCÍ RŮSTU CÍNOVÝCH WHISKERŮ	33
4.1 MEZIVRSTVA.....	34
4.2 TLOUŠŤKA VRSTVY	35
4.3 PÁJENÍ PONOŘENÍM	36
4.4 MINIMALIZACE TLAKOVÉHO NAPĚTÍ	37
4.5 MATERIÁLY POVRCHOVÉ ÚPRAVY	37
4.6 VAKUOVÝ NÁSTROJ.....	39
4.7 KONFORMNÍ POVLAK	39
4.8 TEPelné ZPRACOVÁNÍ	40
4.8.1 Tavení	40
4.8.2 Žihání.....	41

ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43

Seznam symbolů a zkratek

RoHS omezování některých nebezpečných látek v elektronických zařízeních

AATC tepelný cyklus vzduch-vzduch

RH..... relativní vlhkost

IMC..... intermetalická sloučenina

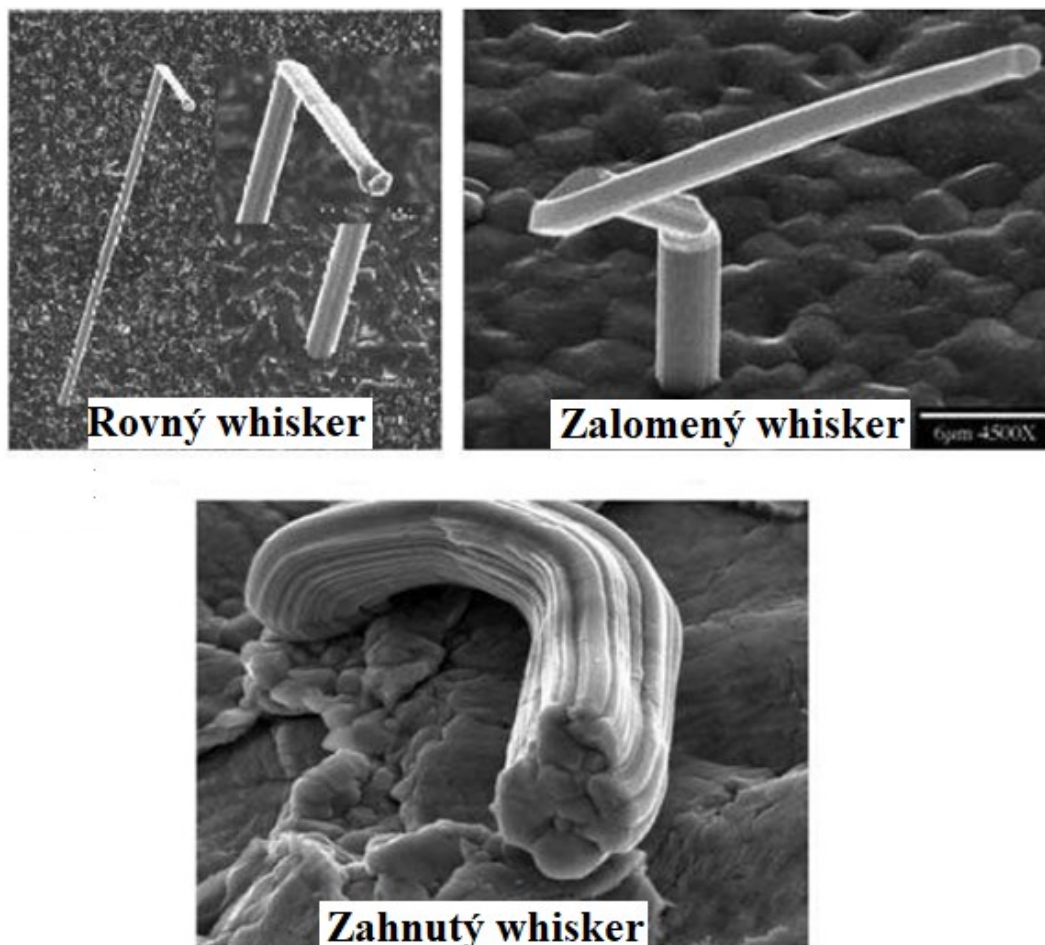
COT teorie prasklého oxidu

Úvod

Bakalářská práce je zaměřena na popis problematiky cínových whiskerů, která je rozdělena do čtyř kapitol. První kapitola bakalářské práce je věnována základním informacím o whiskerech, faktorům ovlivňující růst whiskerů a zrychlujícím zkouškám testující růst whiskerů. Dále se tato kapitola věnovala přechodu na bezolovnaté pájení. Druhá část je zaměřená na popis jednotlivých teorií růstu cínových whiskerů, které vysvětlují, proč a jak rostou cínové whiskery. Třetí kapitola se zabývá nežádoucími vlivy, které jsou způsobené cínovými whiskery. V poslední části bakalářské práce se nachází popsané zmírňující strategie na tvorbu a růst cínových whiskerů.

1 Úvod do problematiky whiskerů

Whisker je vodivé, mikroskopické, krystalické vlákno, které spontánně vyrůstá z kovového povrchu [1–5]. Tyto krystalická vlákna se mohou spojit a vytvořit jeden whisker [1]. Většina whiskerů má válcovitý tvar s průměrem jen několik jednotek μm , přičemž jejich délka může být větší než 10 mm [1, 2, 4, 6], ale častější jsou délky do 1 mm [4]. Poměr délka/ průměr je u whiskerů obvykle větší než 2 [7]. Typické průměry whiskerů se pohybují v rozmezí 1–5 μm a obvyklé délky jsou v rozmezí 1-500 μm [3]. Růsty whiskerů se za normálních okolních podmínek pohybují kolem 0,1 $\text{\AA}/\text{s}$ [3]. Whiskery mohou být rovné, zalomené nebo dokonce zahnuté [1]. Materiály tvořící whiskery jsou kadmium, zinek, indium, aluminium, zlato, olovo, stříbro a zejména cín [1, 2]. Cínové whiskery vyfocené na Obr. 1 technikou SEM, byly převzaty z normy JEDEC JESD 22A121 [7]. Pruhy na povrchu jsou charakteristickými rysy whiskerů [7].



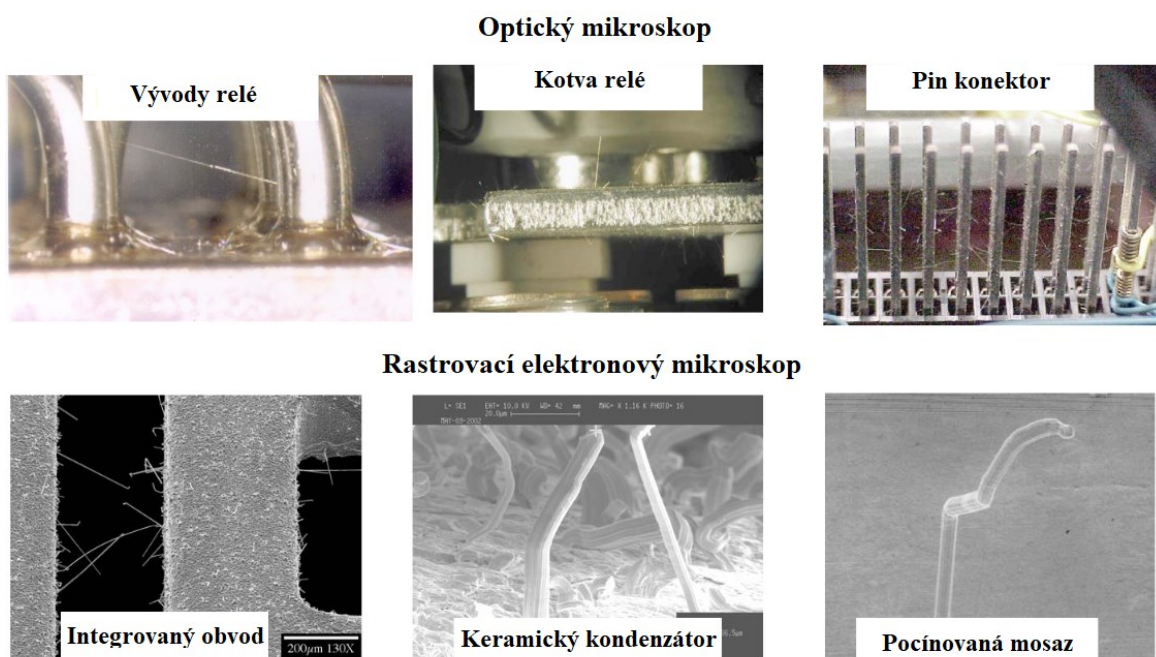
Obr. 1 Rovný, zalomený a zahnutý cínový whisker (převzato a upraveno z [7]).

Cínové whiskery mohou růst mezi sousedními vodiči s různým potenciálem, což způsobuje přechodné nebo trvalé elektrické zkraty [4, 8]. Když whisker vyrůstá mezi dvěma vodiči, tak se obvykle vypaří, ale na krátký okamžik vytvoří zkrat [5]. V některých případech vytváří vodivou cestu, čímž tvoří falešné signály na nesprávném místě, což může způsobit nesprávný provoz dotyčného zařízení [5]. Schopnost whiskerů se ohýbat v důsledku elektrostatické přitažlivosti zvyšuje pravděpodobnost zkratu [4]. Také v prostředí s nízkým tlakem může dojít ke zkratu v podobě elektrického oblouku, což způsobuje značné škody [4, 5]. Tento problém byl prokázán ve vakuových testech a předpokládá se, že způsobil několik selhání družic v oběžné dráze [4]. Kromě toho se mohou whiskery uvolnit a způsobit mechanické poškození optických kabelů nebo mikroelektromechanických součástek (MEMS) [4, 5]. Pokračující tlak na minimalizaci velikosti elektroniky vede ke snížení vzdálenosti mezi elektrickými spoji součástek [4]. Při snížení vzdálenosti je pravděpodobné, že vodivý whisker přemostí mezeru mezi součástkami a vytvoří zkrat [4]. Při miniaturizaci došlo ke snížení napětí těchto součástek [4]. Při nižších napětích je méně pravděpodobné, že by byl vodivý whisker zničen, pokud úspěšně vytvoří zkrat [4]. V důsledku toho může dojít k trvalému selhání zařízení [4]. Whisker, který roste v terénních produktech, představuje potenciální časovanou bombu, která může zapříčinit zkrat [4]. V současné době neexistuje žádná známá metoda, která by zaručila, že povrchy čistých cínových úprav budou bez whiskerů [4].

Růst whiskerů způsoboval a nadále způsobuje problémy spolehlivosti elektronických systémů [9]. Nedostatečná znalost průmyslu o růstových faktorech cínových whiskerů a nedostatek znalostí u metod pro testování identifikace whiskerů, udělalo z čistě cínových úprav vysoké riziko pro systémy s vysokou spolehlivostí, jako jsou systémy používané v letectví, armádě, vesmíru a zdravotnictví [4]. V roce 1976 vydal B. D. Dunn soubor publikací, které důrazně doporučují, aby náchylné povrchy na růst whiskerů byly vyloučeny z konstrukce kosmických lodí [6].

Neexistuje žádný stanovený čas pro začátek růstu whiskerů, a proto je inkubační doba jednou z komplikací při studiu whiskerů [1, 4, 8]. Koncem inkubační doby započne růst whiskerů, který byl pozorován jak během několika dnů, tak v některých případech trvalo roky nebo dokonce i desetiletí, než začal růst whiskerů [1, 5, 8]. To znamená, že elektronická součástka může být jeden den bez whiskeru a další den se na ní může nacházet whisker [1]. Rychlost růstu whiskerů se značně liší podle jednotlivých faktorů,

kteří mají vliv na tento jev [9]. Tyto faktory mohou být např. složení vrstvy, chemie pokovování, proces pokovování, tloušťka vrstvy, prostředí atd. [9]. Whiskery se svojí nečinností a inkubační dobou odlišují od dendrydů a uzlin, které jsou svým vzhledem podobné whiskerům, ale projevují se okamžitě na povrchu po pokovování [1]. Tento atribut je velice nepříjemný z hlediska experimentů, protože může být pro vytvoření whiskerů časově náročný [1]. Důležité je brát inkubační dobu seriózně, protože i přes funkčnost elektrického zařízení po dobu několika let se zde může nacházet hrozba v podobě cínových whiskerů [1]. Příklady součástek na kterých se objevil whisker můžeme vidět na Obr. 2.



Obr. 2 Příklady elektronických součástek s cínovými whiskery (převzato a upraveno z [10]).

Tvorba kovových whiskerů se poprvé objevila ve 40. letech 20. století [1, 5]. V minulých letech jsme se mnoho dozvěděli o mechanismu růstu whiskerů z velkého počtu provedených studií na danou problematiku [9]. Pomocí těchto studií byli vyvinuty techniky, které vykazují velký přínos při zmírnění růstu whiskerů, ale nikoliv při její eliminaci [9]. Strategie pro zmírňování růstů whiskerů mohou být např. žihání, niklová mezivrstva, konformní povlak atd. [9].

V minulosti se přidávalo olovo k cínu, protože olovo bylo široce používanou strategií ke zmírnění růstu whiskerů [1, 3]. Nicméně 1. července 2006 Evropská unie prosadila snižování nebezpečných látek (RoHS), která vyžaduje odstranění olova z elektronických

sestav [1, 3, 5]. Převládající volba pro složku bez olova je čistý cín [9]. Náchylnost čistého cínu k tvorbě cínových whiskerů je známá už mnoho let, proto se používá matný cín, který nabízí optimální rovnováhu mezi spolehlivostí, pájitelností a náklady [9].

1.1 Bezolovnaté pájení

Jedno z nejlepších a nejspolehlivějších řešení pro zmírnění růstu cínových whiskerů bylo použití slitiny Sn-Pb [1]. Nicméně došlo k legislativním nátlakům, které přinutili elektronický průmysl k eliminaci olova z výrobních postupů a konečných produktů, a to má za následek hojnější tvorbu cínových whiskerů, čímž vzniká zvýšená obava ohledně spolehlivosti zařízení [1].

Právní předpisy Evropské unie RoHS (Omezení používání některých nebezpečných látek v elektronických zařízeních) vyžadovaly odstranění olova z elektronických zařízení [1]. Platnost směrnice RoHS nastala pro členské státy Evropské Unie 1. července 2006. Přestože USA zaostávalo za Japonskem a Evropou s legislativou RoHS, tak zavedli podobné legislativní omezení v roce 2007 [11]. Ačkoli směrnice o nebezpečných látkách pochází z Evropy, její směrnice nyní ovlivňuje prakticky každou součást elektroniky, která je dnes vyráběna nebo je plánována v blízké budoucnosti [12]. Ve směrnici se uvádějí tyto nebezpečné látky, které se nadále nesmí používat: kadmium (Cd), rtuť (Hg), olovo (Pb), šestimocný chrom (Cr), polybromované bifenyly (PBB) a polybromované difenylethery (PBDE) [13]. Pravidla bez Pb se v současné době týkají téměř všech elektronických výrobků (výjimka je udělena pro některé vysoce spolehlivé vojenské a lékařské zařízení) [1, 12]. Výrobky, které splňují směrnici RoHS, jsou označeny příslušnou značkou [14]. Příklady značení výrobků, které jsou v souladu se směrnicí, jsou na Obr. 3.



Obr. 3 Příklady značení výrobků, které splňují směrnici RoHS [14].

1.1.1 Příčiny vzniku směrnice RoHS

Za vznikem směrnice RoHS byly negativní účinky olova na lidské tělo [12, 14]. Vliv negativních účinků olova na lidské tělo je popsáno v Tab. Evropské bezpečnostní agentury zjistily, že je nutné zabránit tomu, aby olovo vstoupilo do skládek, protože to je toxická látka stejně jako jiné těžké kovy [12]. Děti jsou při styku s olovem zřetelně více ohroženy než dospělí [12]. Odstranění olova z elektroniky zlepšilo kvalitu životního prostředí a bylo obzvláště příznivé pro děti [12].

Tab. 1 Vliv olova na lidské tělo [14].

oblast	projev
centrální nervová soustava	ztráta paměti, zhoršená schopnost učit se
	odumírání mozkových buněk
	encefalopatie
	mozkový edém
srdeční oblast	vysoký krevní tlak
krev	zhoršená syntéza hemoglobinu
ledviny	poškození celkové funkce
	DNA
kostra	vývoj kostí a zubů
	zhoršená syntéza osteocalcinu a proteinů
reprodukce	spontánní potrat
	vliv na kvalitu a počet spermií

Dalším problémem je likvidace olověných zařízení na konci života [1]. Nyní jsou milióny obvodových desek obsahujících Pb uloženy na skládkách a čekají na likvidaci [1]. Olovo v zařízeních, které je zakopané v zemi, může migrovat do městských vodovodů [1]. Podle mezinárodní studijní skupiny pro výrobu olova a zinku se celosvětově využilo 9,595 milionů tun olova v roce 2009 a 8,966 milionů tun v roce 2010 [12]. Z těchto hodnot v roce 2010 bylo spotřebováno 80 % olova v olověných akumulátorech a pouhých 0,5 % bylo spotřebováno v pájkách [12]. Olověné akumulátory jsou osvobozeny od směrnice RoHS [12].

1.1.2 Bezolovnatá povrchová úprava

Přesun na výrobky bez olova znamenalo, že elektronický průmysl musel vyvinout bezolovnaté pájky a povrchové úpravy, které jsou kompatibilní s těmito pájkami [12]. Byly zkoušeny různé slitiny bez obsahu olova a také některé velmi sofistikované binární,

ternární a kvartérní slitiny [12]. Tyto slitiny byly drahé a těžko použitelné [12]. Dále bylo zkoumáno několik slitin cínu a stříbra, jako je například cín-stříbro-měď, cín-stříbro-bismut, cín-stříbro-měď-bismut a různé další kombinace [12]. Nejvíce kompatibilní a nejekonomičtější náhrada za Sn-Pb je čistý cín, který splňuje směrnici RoHS [13, 15, 16]. Navzdory všem výhodám čistého cínu existuje jeden hlavní problém s jeho celoplošným přijetím a to ten, že je náchylný na tvorbu whiskerů [11]. Dnes se většina povrchových bezolovnatých úprav provádí matným cínem ve srovnání s lesklým cínem [12]. Také nikl-palladium-zlato (Ni-Pd-Au) je populární materiál bez obsahu olova, který se používá stále častěji [12].

Lesklý cín

Lesklý cín má obecně lesklý vzhled, vysoký obsah uhlíku (0,2-1 %) a vysoké vnitřní napětí [7]. Lesklý cín je známý tím, že má vysokou tendenci k růstu whiskerů, které mohou dosahovat délek několika milimetrů (až 10 mm) [6]. Lesklý cín je v elektronickém průmyslu používán již mnoho let pro své příznivé vlastnosti, jako je estetický vzhled a tvrdost [7]. Při zkoušce JEDEC22A121 bylo uvedeno, že čistý cín může být udělán tak, aby byla omezena tvorba whiskerů [7]. A to za pomoci použití Ni mezivrstvy a opatrného řízení procesu pokovování [7]. I přes použití niklové mezivrstvy mohou vzniknout cínové whiskery, proto se doporučuje použít matný cín místo lesklého [7]. Matný cín má nižší vnitřní tlakové napětí a tím je méně náchylný na tvorbu whiskerů [7].

Matný cín

Ačkoliv všechny čisté cínové povrchové úpravy mají potenciál k růstu whiskerů, tak úpravy matným cínem jsou méně náchylné k růstu dlouhých whiskerů v porovnání s úpravami lesklým cínem [17]. Toto pozorování pochází z větší velikosti zrna a nižšího vnitřního napětí u úprav matným cínem [18]. Přísady používané u lesklého cínu pravděpodobně způsobují vyšší vnitřní napětí, které podporuje růst whiskerů [18]. Matný a čistý cín se vyznačují odlišnou velikostí zrna a obsahem uhlíku, jak je uvedeno v Tab. Nadměrné množství uloženého uhlíku obecně způsobuje: ztrátu pájitelnosti cínu při povrchové úpravě, nadměrnou intermetalickou tvorbu, nadměrnou oxidaci a povrchové nečistoty [18].

Tab. 2 Parametry matného a lesklého cínu [16].

typ cínu	velikost zrna (μm)	obsah uhlíku (%)
matný cín	1,0-5,0	0,005-0,05
lesklý cín	0,5-0,8	0,2-1,0

Účinnost matného cínu při snižování růstu whiskerů je silně ovlivněna procesem pokovování [18]. Při pečlivém výběru chemie pokovování a procesu pokovování můžeme snížit zbytkové napětí [18]. Tím docílíme udržení pevnosti v tahu cínového nánosu v průběhu času [18].

Slitiny Ni-Pd-Au / Ni-Pd

Slitiny Nikl-palladium-zlato (nebo nikl-palladium) by také měly být brány v úvahu při použití bezolovnatých úprav [7]. Tato slitina má více než 10 let historie terénního použití a uvádí se, že není náchylná na tvorbu whiskerů ve většině prostředích [7]. Při zrychlené zkoušce se na slitině Ni-Pd-Au ukázala koroze, ale ve skutečných pracovních podmínkách nebyla koroze na této slitině zatím zaznamenána [7].

1.2 Faktory ovlivňující růst whiskerů

V současné době neexistuje obecný souhlas o základních mechanismech tvorby whiskerů [1]. Pomocí nashromážděných dat během několika let, vznikla protichůdná zjištění ohledně toho, které faktory urychlují nebo zpomalují růst whiskerů [1]. Nicméně existuje několik společně dohodnutých proměnných, které ovlivňují tvorbu whiskerů [1].

1.2.1 Tlakové napětí

Většina vědců souhlasí s tím, že proces uvolnění napětí uvnitř vrstvy cínu řídí nukleaci a růst whiskerů [1, 11]. Přesněji řečeno, mnozí výzkumníci předpokládají, že tlakové napětí uvnitř vrstvy cínu poskytuje základní hnací sílu pro růst whiskerů [11]. Tlakové napětí může být způsobeno těmito mechanismy:

Intermetalická tvorba sloučenin

Tvorba intermetalických sloučenin (jako je Cu_6Sn_5) může změnit rozteč mřížek v cínovém pokovení, což má za následek tvorbu tlakového napětí v cínové vrstvě [11]. Tvorba IMC vzniká difúzí atomů substrátu do cínu [11].

Namáhání podkladu

Mechanické procesy používané při přípravě substrátu jako je válcování a lisování, může zanechat substrát ve vysoce namáhaném stavu před pokovováním [4, 11].

Povrchová oxidace

Tvorba povrchového oxidu cínu přispívá k tlakovému napětí v cínu vlivem specifických objemových změn na povrchu [11].

1.2.2 Účinky substrátu

Růst whiskerů byl pozorován na jakémkoliv možném substrátovém materiálu běžně používaném v elektronickém průmyslu [11]. Většina souhlasí s tím, že mosazné substráty jsou nejvíce náchylné k formování whiskerů [11]. Měď a slitiny na bázi mědi jsou považovány za další nejcitlivější k tvorbě whiskerů [11]. Tvorba whiskerů byla také pozorována na substrátech, které mají nízkou difuzivitu do cínu jako jsou oceli a slitina 42 (slitina železa a niklu) [11]. Navzdory difúzním bariérovým vlastnostem niklu, tak byly whiskery také pozorovány na pasivních součástkách používající niklovou bariérovou vrstvu [11]. Nicméně se u niklové bariéry pozorovali příznivé účinky, které měly vliv na zpomalení růstu whiskerů [11].

1.2.3 Velikost a tvar zrna

Sloupcová zrna umožňují intermetalickou tvorbu, která se tvoří mezi zrny [4]. Intermetalická tvorba tvoří buňky stlačeného napětí, které vedou k tvorbě whiskerů [4]. Menší zrna poskytují větší množství hranic zrn, která vedou k tvorbě whiskerů [4]. To vysvětluje, proč je lesklý cín (velikost zrna $< 0,5 \mu\text{m}$) náchylnější na tvorbu whiskerů než

matný cín (velikost zrna $> 1 \mu\text{m}$) [4]. Kakeshita uvedla, že velikost zrna a tvar hraje významnou roli k náchylnosti tvorbě whiskerů [11]. Uvedla, že zrna v rozmezí od $1 \mu\text{m}$ do $3 \mu\text{m}$ budou značně omezovat tvorbu whiskerů [11]. Menší zrna okolo pár desetin μm byla mnohem náchylnější k tvorbě whiskerů. [11].

1.2.4 Tloušťka pokovování

Většina vědců předpokládá, že formování whiskerů nemusí být podporováno nad a pod určitými prahovými tloušťkami pokovení [11]. Glazunov uvedl, že tloušťky pod $0,5 \mu\text{m}$ a nad $20 \mu\text{m}$ byly méně náchylné k tvorbě whiskerů, zatímco tloušťky mezi $2-10 \mu\text{m}$ vykazovaly maximální rychlost růstu cínových whiskerů na oceli a na mosazy [11]. Bohužel velmi tenké tloušťky pokovování mohou snížit účinnost jiných charakteristických vlastností pokovování, jako je například odolnost proti korozi [11]. Silnější pokovení není běžné z důvodu vysokých nákladů [11].

1.2.5 Teplota

Difúze a tvorba IMC přispívá k formování whiskerů a zvýšení teploty povzbuzuje tyto procesy, čímž tedy také zvýší tendenci k růstu whiskerů [11]. Nicméně zvýšené teploty mají tendenci také zmírnit zbytkové napětí uvnitř povlaku, a proto mohou v souhrnu odradit růst whiskerů [11]. Většina experimentátorů informuje o tom, že přibližná teplota okolo $50 \text{ }^\circ\text{C}$ je optimální pro formování whiskerů, ale jsou zde také experimenty, které pozorují u ekvivalentních vzorků udržovaných v místnosti o teplotě ($22-25 \text{ }^\circ\text{C}$), že rychlost růstu whiskerů vzrostla [11]. Údajně růst whiskerů končí při teplotách nad $150 \text{ }^\circ\text{C}$ [11]. Někteří výzkumníci pozorovali růst whiskerů, který nastal u teploty až $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ [11].

1.2.6 Atmosférický tlak

Whiskery rostou ve vakuu stejně jako v zemské atmosféře, ale atmosférický tlak nacházející se v zemské atmosféře je mnohem vyšší, a proto se ve vakuu netvoří whiskery tak snadno [11]. Hlavní faktor pro formování whiskerů ve vakuu je oxidace [11].

1.2.7 Vlhkost

Tvorba whiskerů je snazší při vysoké vlhkosti (85% až 95% RH) [11].

1.2.8 Teplotní cyklus

Někteří experimentátoři informují o tepelném cyklování, které může zvýšit rychlost růstu whiskerů [11]. Experimenty se běžně využívají v teplotním rozsahu od -40 °C do 90 °C [11].

1.2.9 Oděrky a škrábance

Některé experimenty poznamenaly, že v místech povrchové vady (drobné škrábance) na podkladu, které byly přítomny před procesem pokovování, se začali formovat whiskery [11].

1.2.10 Elektrické pole

Whiskery rostou spontánně bez potřeby přikládání elektrického pole, které by podporovalo růst whiskerů [11]. Nicméně NASA-GSFC objevila, že whiskery se mohou ohýbat kvůli silám elektrostatické přitažlivosti, čímž se zvyšuje pravděpodobnost zkratu způsobeného cínovým whiskerem [11].

1.3 Zrychlující zkoušky pro růst whiskerů

Při typických okolních podmínkách (jako je například pracovní prostředí) nevykazuje matný cín používaný v povrchových úpravách vysokou míru k růst whiskerů [9]. Nicméně pro výrobce elektronických systémů musí být posouzena a pochopena dlouhodobá spolehlivost pocínovaných součástí [9]. V posledních letech průmyslová konsorcia, korporace a výzkumné instituce zhodnotili účinnost z velkého výběru různorodých zkušebních metod pro testování růstu whiskerů [9]. Na základě výsledků těchto metod byla přijata řada standardních testovacích metod průmyslem [9]. Nejpoužívanější zkušební metodou pro zrychlené testování je standart JEDEC JESD201 [9]. Standart JEDEC

doporučuje tři typy zrychlených zkoušek [9]. Standart JEDEC má podobné podmínky zkoušek pro testování whiskerů jako testovací standarty JEITA a IEC [19, 20].

Tepelný cyklus vzduch-vzduch (AATC)

První zrychlená zkouška růstu whiskerů je zkouška AATC, která je stanovena k řešení tepelné zátěže [9]. Tato metoda je určena pro elektronické systémy, které jsou umístěny v prostředí s různými variacemi teplot, což vede k tepelnému namáhání v cínu [9]. Tím dochází k zvýšení rizika růstu whiskerů [9]. Ukázalo se že u cínových úprav se stejnou tloušťkou, byl v testu AATC růst whiskerů silně ovlivněn krystalografickou orientací cínových zrn [9]. Úroveň tepelného namáhání při zkušebních podmínkách (-55/-40 °C až 85 °C) je dostatečně velká, aby vyvolala praskání okrajů zrn, zejména u materiálu jako je slitina 42 [9]. Praskání okrajů zrn je poněkud problematické, protože se napětí částečně uvolní, což vede k nižší úrovni namáhání v cínu a může to ovlivnit pozdější části testů [9]. Pro stejnou sadu materiálů se stejným procesem pokovování a chemie může být hustota a rychlost růstu whiskerů touto metodou opakována [9]. Ve většině případů se uvádí, že menší rozsahy teplot skutečně snižují rychlost růstu whiskerů [9]. Data z mnoha zdrojů uvádí, že metoda AATC je z těchto tří metod nejspolehlivější a nejkonzistentnější [9].

Skladování při nízké teplotě a nízké vlhkosti

Druhá standardní zkouška je skladování při nízké teplotě (-30 °C) a nízké relativní vlhkosti (60 % RH) [9]. Tato zkouška není nezbytně považována za zrychlenou zkoušku, protože je nejvíce podobná běžnému pracovnímu prostředí [9]. Za těchto podmínek je dominantní hybnou silou pro růst whiskerů pravděpodobně intermetalický růst sloučenin na rozhraní cínové povrchové úpravy a substrátu [9]. Pro některé substrátové materiály, jako jsou slitiny mědi, je růst intermetalických sloučenin velmi rychlý a lze ho pozorovat na rozhraní v rámci několika hodin [21]. Přesná role IMC zrn je na růst whiskerů stále vyšetřována [9]. Je pravděpodobné, že růst IMC zrn vyvolává tlakové napětí v cínové povrchové úpravě [9]. Tyto IMC zrna se mohou navíc chovat jako připevněné body, které zabraňují jakémukoliv otáčení nebo posunutí zrna, což dále zvyšuje úroveň napětí, které se vyskytuje v cínových zrnech [9].

Skladování při vysoké teplotě a vysoké vlhkosti

Poslední test je skladování při teplotě 55 °C a relativní vlhkosti 85 % RH [9]. Tento test vytvořil velkou diskusi ohledně mechanismu růstu whiskerů a jeho růstovém chování [9]. Ve většině studií se uvádí, že výskyt whiskerů je předcházen korozí cínového povrchu a na povrchu koroze jsou vytlačovány cínové whiskery [9]. Korozní účinek cínů je urychlen v prostředí s vysokou teplotou a vlhkostí [9]. Důležité je však to, že růst whiskerů je nejvýznamnější na okraji korodované oblasti [9].

Zatímco tyto zkušební metody nejsou v žádném případě perfektní v každém prostředí, tak poskytují efektivní obecnou platformu pro výrobce elektronických systémů a komponentů, aby zhodnotili růst cínových whiskerů [9].

2 Teorie růstu whiskerů

Doposud nejsou plně pochopeny mechanismy růstu whiskerů, přestože se začali zkoumat již od poloviny 20. století. Nyní existují čtyři hlavní teorie, které vysvětlují vznik a vývoj whiskerů. Jsou to teorie dislokací, teorie rekrystalizace, teorie prasklého oxidu a teorie The End Game. Právě poslední zmíněná teorie se nejvíce přiblížila k popisu vzniku a vývoje whiskerů.

První tři teorie jsou popsány autory Puttlitz a Stalter podle [23]:

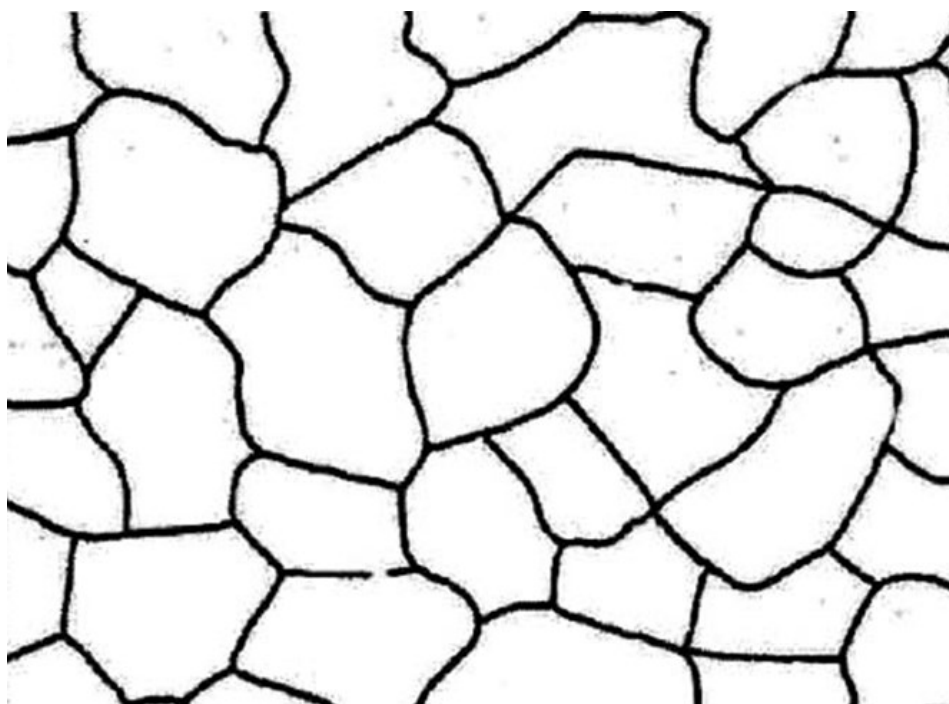
2.1 Teorie dislokací

Dislokace jsou liniové defekty v pevných trojrozměrných krystalických látkách, které se skládají z přidaných uspořádaných atomů v řadě v jinak ideální struktuře krystalické mřížky. Tyto řadové defekty jsou prostředky, kterými jsou všechny kovy plasticky deformovány a tyto defekty hrají také roli v difúzi a elektrickém odporu. Dislokace byly základem pro navržení první teorie růstu cínových whiskerů. První publikace o této teorii vyšla v roce 1952. Peach navrhl teorii šroubovitě dislokace na základě objevu, u kterého pozoroval atomy cínu, které se od středu whiskeru šroubovitě pohybovaly po špičku whiskeru, kde se následně uložili. Nicméně tato konkrétní teorie byla rychle anulována následnými experimentálními daty. Koonce a Arnold v roce 1953 objevili, že whiskery rostou nepřetržitým přidáváním atomů cínu do základny whiskeru, nikoliv přidáváním atomů cínu na špičku whiskeru. Toto zjištění vyvrátilo teorii, kterou navrhnul Peach. Na základě tohoto zjištění teoretici dislokace rychle začali vytvářet nové teorie, které byly v souladu s koncepcí Koonceho a Arnoldova pozorování. Dislokační teorie byla vyvrácena v průběhu let několika testy, kde se ukázalo, že whiskery nepotřebují žádné vady (dislokace), aby mohly růst.

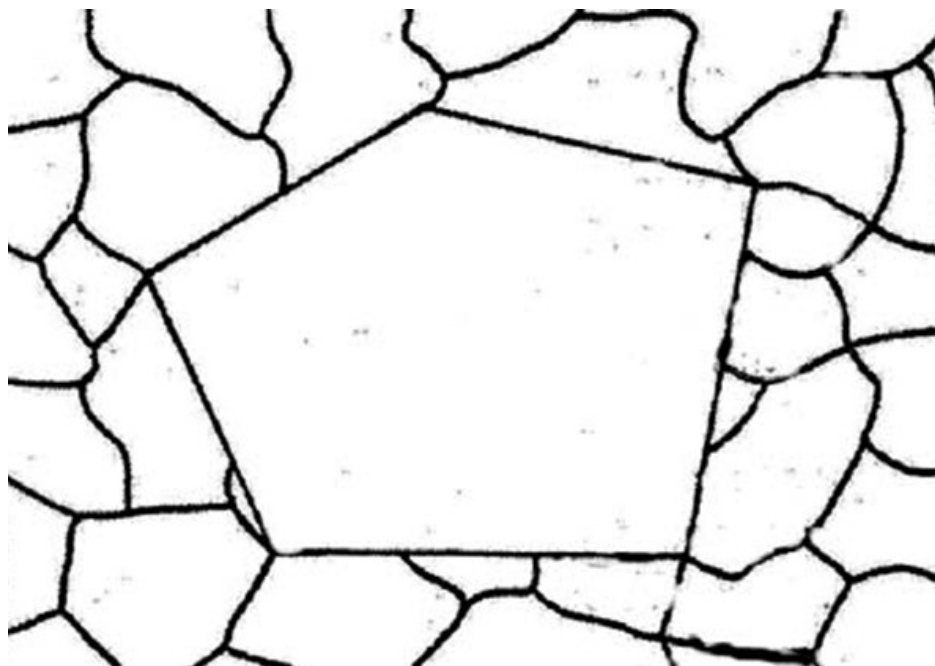
2.2 Teorie rekrytalizace

Vědci zabývající se materiály uznávají rekrytalizaci jako jev, kdy krystalická pevná látka transformuje svou vnitřní strukturu s vysokým vnitřním napětím a relativně malými zrny na strukturu s nízkým vnitřním napětím a relativně velkými zrny. Rekrytalizační transformace snižuje celkovou plochu zrn a hustotu defektů na jednotku objemu. Normální rekrytalizace neobnáší hromadný transport atomů z jedné oblasti do druhé. Existuje několik studií, které vyvozovaly možnost rekrytalizace na základě experimentálních dat, ale žádný z nich neměl přímý metalografický důkaz o rekrytalizaci.

Kakeshita a kolektiv předpokládá, že whiskery rostou rekrytalizováním zrn a ukázali schéma rekrytalizujících zrn formujících se v oblasti menších, vysoce namáhaných zrn na Obr. 4 a 5. Nicméně, Kakeshita také neměl žádný experimentální důkaz na prokázání existence rekrytalovaných zrn. Bylo také spekulováno, že zrna whiskerů byla odlišná, protože rekrytalizovala z mateřské krystalické matrice, čímž se zvětšila struktura whiskerů.



Obr. 4 Schéma struktury rekrytalizace zrna ukazující zrna, které mají stejné velikosti a identické tvary (převzato z [23]).



Obr. 5 Schéma struktury rekrystalizace zrna, ve které jedno zrno roste na úkor svých nejbližších sousedů (převzato z [23]).

Jakákoliv teorie tvorby whiskerů musí racionalizovat pozorované údaje o whiskerech, zejména kinetiku růstu whiskeru a ukončení (náhlého zastavení) růstu. Teoretická hypotéza musí být v souladu s přímými a vizuálně zřejmými pozorováními poskytovanými mikrostrukturální analýzou. To znamená, že každá hypotéza o rekrystalizaci whiskeru musí prokázat, že mikrostruktury whiskerů jsou shodné s očekávanou morfologií struktur rekrystalovaných zrn.

2.3 Teorie prasklého oxidu

Tato teorie se zabývá vlivem hybné síly, kinetické síly a specifických atomových mechanismů na růst whiskerů. V této teorii musí být splněny tři nezbytné podmínky pro spontánní růst Sn whiskerů. První podmínkou je vhodná kinetická energie hromadného transportu při pokojové teplotě. Při použití cínu je tato podmínka snadno splněna, protože cín má poměrně nízkou teplotu tání. Díky tomu je difúze hranic zrn ve vrstvě Sn při pokojové teplotě přiměřená k udržení růstu whiskerů. Druhou podmínkou je hybná síla. Teorie COT definuje tyto síly jako kombinaci chemických afinit a mechanických napětí, která se kombinují tak, že způsobují tlakové napětí. Třetí podmínkou v teorii COT je povrchová oxidová vrstva, která je lokálně slabá nebo nějakým způsobem vadná.

Tlakové napětí může být původem mechanické, tepelné, chemické nebo jakékoliv kombinace těchto zmíněných původů. Chemické síly jsou výsledkem reakce mezi Sn a Cu při pokojové teplotě za vzniku intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 . Difúze Cu ze substrátu do Sn vrstvy vytváří vzájemné tlakové napětí mezi cínem a mědí. Tlakové napětí v Sn může být při pokojových teplotách uvolněno pomocí difúze na hranicích zrn. Cínové atomy difundují podél hranic zrn do základny whiskeru, čímž se whisker zvětšuje. Růst whiskeru je tedy způsoben tlakovým napětím. Vzhledem k tomu, že reakce Sn a Cu se může objevit při pokojové teplotě, reakce pokračuje tak dlouho, dokud jsou k dispozici volné Sn a Cu atomy. Pokračující růst intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 zachovává tlakové napětí, které udržuje růst whiskerů. Rovnováha mezi uvolněným napětím a vytvořeným napětím postupnou tvorbou intermetalické sloučenin Cu_6Sn_5 , udržuje téměř lineární rychlost růstu whiskerů.

V teorii prasklého oxidu je tlakové napětí podmínkou nezbytnou, ale pro růst whiskerů je nedostatečným předpokladem. Je také nezbytná přítomnost oxidu na povrchu cínu. Byla provedena analogie s experimenty na hliníku, aby se zdůvodnil kritický aspekt povrchového oxidu na tvorbu whiskerů. Ve vakuu na povrchu Al nebyly nalezeny žádné whiskery. Whiskery rostly na Al pouze tehdy, když byl povrch oxidován.

2.4 Teorie The End Game

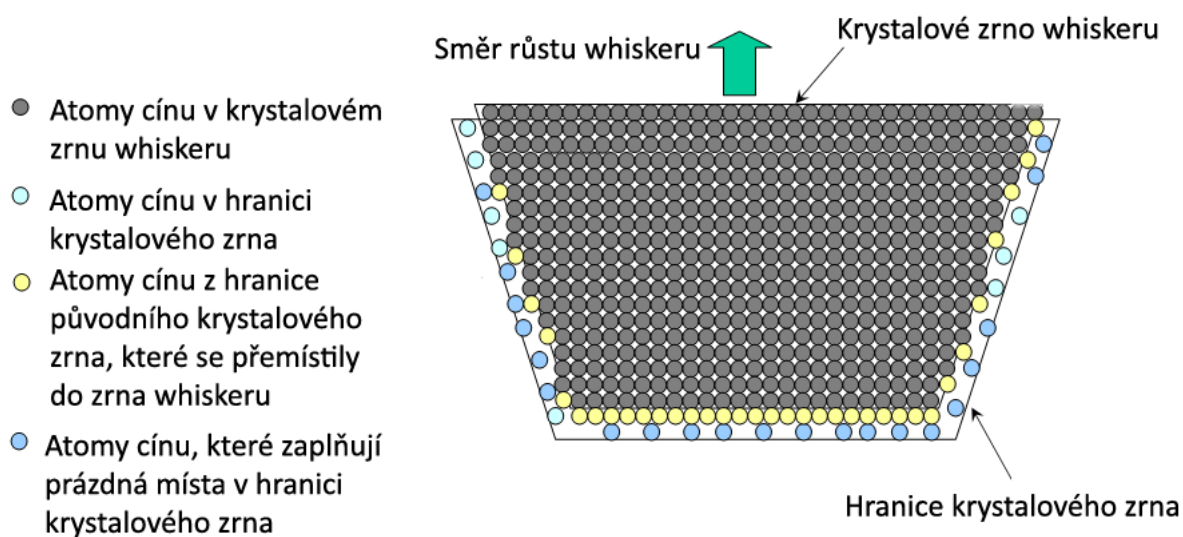
Tato teorie je popsána podle [14].

U této teorie musí být splněny dva předpoklady:

1. Atomy nacházející se v základně hranice zrna, ze kterého vyrůstá whisker, mají v průměru nižší energetickou úroveň (tlakového napětí) než atomy v okolních oblastech.
2. Musí existovat volné místo na hranici zrna, aby se tam mohl pohybovat atom cínu.

Pro tuto teorii také platí, že hnací silou je tlakové napětí. Mechanismus růstu whiskerů podle teorie The End Game je popsán následujícím způsobem. Tlaková síla, jež působí na

vrstvu Sn, způsobuje klouzání krystalových zrn podél jejich hranic. Tím se v krystalové mřížce vytvoří volná místa, která jsou částečně zaplněna atomy cínu z hranic předchozího zrna. Hranice krystalového zrna je následně zaplňována atomy cínu z okolních oblastí, protože se jedná o šikmou hranici krystalového zrna. Tento popis by vysvětloval zahnutý tvar vyrůstajícího whiskeru. Pokud by měl být whisker rovný, tak by jeho růst musel probíhat kolmo vzhůru. Aby došlo ke kolmému růstu cínového whiskeru, musí nejdříve dojít ke klouzání hranic z obou stran krystalového zrna. Následně se atomy cínu z okolních oblastí začnou střídavě přidávat do obou stran hranic šikmého krystalového zrna a díky tomu vzniká kolmý růst whiskeru. Na Obr. 6 je zobrazen kolmý růst whiskeru.

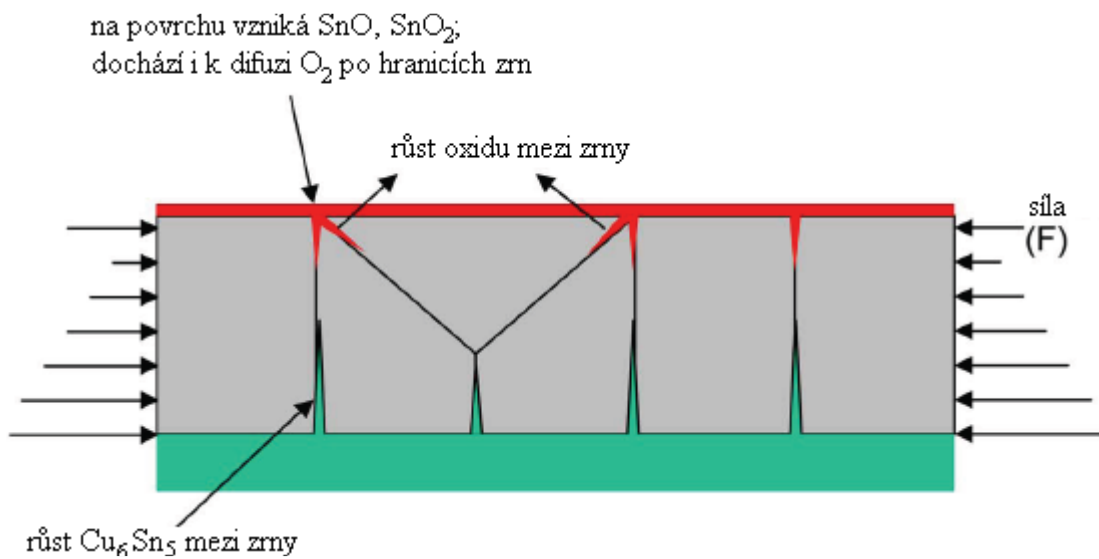


Obr. 6 Klouzání hranic krystalového zrna o jednu vzdálenost atomů na obou stranách (převzato z [14]).

Proces přidávání atomů cínu z okolních oblastí do základny se opakuje, čímž dochází k růstu whiskeru. Jeden tento proces přidá novou vrstvu atomů cínu do zrna. Tento proces pokračuje do doby, dokud není tlakové napětí relaxované, nebo dokud se nespojí vzájemně hranice zrn.

Tento proces se opakuje a atomy cínu se tak dostávají do základny whiskeru, čímž dochází k jeho růstu. Každý takto zopakovaný krok přidává vrstvu atomů cínu do zrna, ze kterého whisker vyrůstá. Proces pokračuje až do té doby, dokud není relaxované tlakové napětí, nebo dokud se hranice zrn vzájemně nespojí.

Vznik tlakového napětí je převážně způsobeno růstem intermetalické vrstvy, která vzniká na rozhraní cínu a mědi, přičemž IMC rychleji roste na hranicích zrn. Růst IMC se na různých místech liší a tím dochází k nerovnoměrnému rozložení tlakové síly. Potom také energetický stav vertikální hranice zrn je nižší blízko povrchu cínové vrstvy než u její základny. Pokud by atomy cínu měli prostor k pohybu, tak by se pohybovaly směrem k povrchu cínové vrstvy. Nicméně na povrchu se obvykle vytváří oxidová vrstva (SnO nebo SnO_2), která vyřazuje potenciální volná povrchová místa, ve kterých by se mohli pohybovat atomy. Oxidová vrstva také způsobuje tlakové namáhání, ale nemá takový význam jako IMC.



Obr. 7: Vliv intermetalické vrstvy a povrchového oxidu v teorii The End Game (převzato z [14]).

3 Rizika cínových whiskerů

Vodivé cínové whiskery představují v elektronických sestavách riziko nespolehlivosti, protože je může vyvinout jakýkoliv povrch pokrytý čistým cínem [8]. Bylo zaznamenáno několik případů, kdy cínové whiskery způsobily selhání systému v aplikacích jak na zemi, tak i ve vesmíru [8]. Například, Boeing hlásil selhání řídicího procesoru družice kvůli cínovým whiskerům, což vedlo k úplné ztrátě komunikační družice v hodnotě 200 milionů dolarů [18].

Cínové whiskery vyvolávají značné obavy kvůli nedostatku přijatých metod vyhodnocujících náchylnosti k jejich růstu, zejména pak u vysoko spolehlivostních zařízení [18]. Mezi nejčastěji hlášené režimy selhání spojené s cínovými whiskery patří zkraty, znečištění a elektrické oblouky způsobené odpařením whiskeru za nízkého tlaku [18]. Potenciál selhání se zvyšuje s miniaturizací systému [18].

3.1 Dlouhodobé zkraty v obvodech s nízkým napětím a vysokou impedancí

V takových obvodech může protékat whiskerem nedostatečný proud k roztavení daného whiskeru, který spojuje dva vodiče a tím vzniká stabilní zkrat [8, 22]. V závislosti na různých faktorech, včetně průměru a délky vláken, tak protéká proud obvykle menší než 30 mA (může být i vyšší), než dojde k roztavení whiskerů [22]. Případ whiskeru, který způsobuje zkrat je znázorněn na Obr. 7.



Obr. 7 Rostoucí whisker způsobil zkrat mezi dvěma vývody (převzato z [8]).

3.2 Krátkodobé zkraty

Vznikají v atmosférickém tlaku, při kterém je obvod vystaven přechodné závadě v podobě zkratu [5, 8]. Tato závada je způsobená whiskerem, kterým protéká proud tak

velký, že způsobí přetavení whiskeru nebo jeho úplné vypaření, přičemž může whiskerem protékat proud větší než 75 mA. Obvykle je tento proud mezi 30 mA až 50 mA [22].

3.3 Elektrické oblouky způsobené odpařením whiskeru

Typ tohoto selhání se nachází ve specifických obvodech se sníženým atmosférickým tlakem [8]. Jsou to obvykle obvody nacházející se ve vakuu, u kterého může nastat zkrat, který je mnohem destruktivnější, protože se zde nachází menší atmosférický tlak [8]. Pokud jsou k dispozici proudy nad několik ampér a napájecí napětí je přibližně nad 18 V, může se stát, že se whiskery odpaří a vytvoří plazmu cínových iontů, které mohou vést až 200 A [12]. Oblouk může být udržován přiměřeným zásobováním cínu z okolního pokoveného povrchu, dokud není dostupný cín plně spotřebován nebo dokud není proud přerušen jističem či ochranou pojistkou [8]. Příklad selhání způsobené elektrickým obloukem je zobrazeno na Obr. 8.



Obr. 8 Selhání relé způsobené vypařením cínových whiskerů (převzato z [8]).

3.4 Nečistoty, kontaminace

Mechanický šok, vibrace nebo manipulace mohou způsobit uvolnění whiskerů nebo části whiskerů z pokrytých povrchů [12]. Jakmile se mohou whiskery volně pohybovat, mohou tyto vodivé částice zasahovat do pohybu mikroelektromechanických systémů (MEMS) nebo citlivých optických systémů, kde mohou přenášený paprsek narušit nebo zeslabit [8, 12].

3.5 Historická selhání způsobené whiskery

Bylo zveřejněno několik publikací, kde cínové whiskery způsobily selhání systému jak na zemi, tak i ve vesmíru [11]. Selhání byla způsobena v telekomunikačním, zdravotnickém a vojenském průmyslu, ale problémy nastaly také u elektráren [11]. Několik takových incidentů, které byly způsobeny růstem cínových whiskerů, je znázorněno v Tab. 3.

Tab. 3 Historická selhání způsobená whiskery (převzato z [18]).

Rok	Zařízení	Příčina poruchy
Zdravotnictví		
1986	Kardiostimulátor	Cínové whiskery, které vyrostly z čistého pocínovaného pláště, způsobily zkrat a tím došlo k úplné ztrátě funkčnosti kardiostimulátoru.
Armáda		
1986	Radar bojového letadla F-15	Zkrat způsobený cínovým whiskerem, který vyrůstal z čistě pocínovaných hybridních mikroobvodů.
1992	US raketový program	Cínový whisker vyrost z čistě pocínovaných relé a způsobil zkrat.
1988	US raketový program	Cínový whisker, který vyrostl z čistého pocínovaného TO-3 tranzistoru, způsobil zkrat mezi kolektorem a pouzdrem.
1989	Raketa vzduch-vzduch Phoenix	Zkrat způsobený cínovými whiskery, které vznikl uvnitř pouzdra hybridního mikroobvodu.
2000	Raketa patriot II	Cínové whiskery zapříčinili ztrátu funkčnosti rakety.
Vesmír		
1998	GALAXY IV	Úplná ztráta družicových operací. Cínové whiskery se ve vakuu odpařili z čistě pocínovaných relé a způsobil elektrický oblouk.
2000	GALAXY VII	Úplná ztráta družicových operací. Cínové whiskery se ve vakuu odpařili z čistě pocínovaných relé a způsobil elektrický oblouk.
2000	SOLIDARIDAD I	Úplná ztráta družicových operací. Cínové whiskery se ve vakuu odpařili z čistě pocínovaných relé a způsobil elektrický oblouk.
2000-2006	Další družice	Tři další družice stejné konstrukce ztratily jeden ze dvou řídicích procesorů pro satelitní ovládání kvůli zkratu, jenž byl způsoben cínovým whiskerem.
Elektrárny		
1987	Jaderná elektrárna Dresden	Růst cínových whiskerů na čistě pocínovaných relé.

Dále se problematice cínových whiskerů velice detailně zabývala skupina QSS Group v agentuře NASA, která shromáždila příklady poruch způsobené whiskery v přehledné tabulce nacházející se v [10].

4 Metody zabraňující růstu cínových whiskerů

Zmírňující strategie tvorby cínových whiskerů byly poprvé projednávány Arnoldem v roce 1956 [18]. Od té doby byly zkoumány různé strategie zmírňování, které by omezily a eliminovaly rizika whiskerů [18]. Rozsáhlý seznam doporučení vydal Mezinárodní Výzkumný Institut, který se zabývá zkoumáním cínu. Tato doporučení jsou uvedena níže podle [23]:

První z nich je opatření mezivrstvou. Cín nanesený na mosaz by měl mít niklovou mezivrstvu. Ovšem cín nanesený na ocel může být lepší bez mezivrstvy.

Dále se podle mezinárodního výzkumného institutu nedoporučuje nanášet lesklý cín přímo na mosaz. Všechny povrchové úpravy lesklým cínem by měli být vždy doprovázeny určitým zabezpečením, které by omezilo jakékoliv poškození whiskerem.

Další možností je tepelné ošetření cínového povrchu. To by se mělo provádět po pokovení při teplotě 180-200 °C po dobu jedné hodiny. Tato metoda by se měla provádět především u pokovení lesklým cínem. Jestli tepelné zpracování zasahuje do následného pájení, tak by měla být zvážena ochranná dusíková atmosféra. Může použít i měděný nátěr, který pomáhá k získání lepších výsledků tepelným ošetřením. Tepelná ošetření může vést k nežádoucímu roztavení cíno-olověného nánosu, pokud není dobře řízeno. Za účinný obsah olova bylo prohlášeno 1 %, ale je lepší použít větší obsah.

Cínovo olověné nánosy, kde cín je lesklý nebo matný, by měli mít tloušťku nejméně 8 μm, protože jsou pak bezpečnější a vhodnější pro většinu aplikací, kde je růst whiskerů potenciálním nebezpečím.

Slitina cínu a niklu poskytuje snížení růstu whiskerů, ale na druhou stranu zhoršuje pájitelnost a kujnost, proto se běžně nepoužívá. Běžně se používají organické nátěry pro ochranu, i tak se ale nelze spoléhat na to, že zabrání vzniku whiskerů. Proto je nejefektivnější použít silné vrstvy pryskyřice nebo zavést pevné izolační bariéry mezi nebezpečná místa.

Pokud i přes veškerá opatření nastane růst whiskerů, může dojít k rehabilitaci zařízení fyzickým odstraněním whiskeru. Užitečným prostředkem k odstranění je malá hlava připojená k vakuovému systému.

4.1 Mezivrstva

Niklová mezivrstva je v praxi nejpoužívanější zmírňující praktikou pro růst whiskerů a měla by být považována za hlavní zmírňující metodu [23]. Tenká mezivrstva snižuje tlakové namáhání způsobené intermetalickou tvorbou mezi cínovou vrstvou a základní vrstvou [18, 24]. U velké většiny teoretických modelů pro formování whiskerů se předpokládá, že tlakové napětí ve vrstvě Sn je nezbytným předpokladem pro tvorbu whiskerů a jejich následný růst [23]. Vzhledem k tomu, že rychlost růstu intermetalické sloučeniny Ni-Sn (především Ni_3Sn_4 a NiSn_3) je nižší než rychlost růstu intermetalické sloučeniny Cu-Sn, tak tlak způsobený intermetalickou formací sloučenin může být uvnitř pokovených nánosů při použití mezivrstvy významně snížen [18]. Dále se uvádí, že při použití mezivrstvy se v průběhu času vyvine tahové napětí ve vrstvě Sn, které snižuje růst whiskerů [25]. Tahové napětí v Sn je nejpravděpodobněji tvořeno z důvodu rozhraní difúze mezi Sn a Ni [26]. Rychlejší difúze Sn atomů do Ni vytváří nedostatek materiálu ve vrstvě Sn, což vede k nárůstu tahového napětí v Sn vrstvě. Běžné používané materiály v mezivrstvě jsou nikl a stříbro [7].

Ni mezivrstva

Podkladová vrstva Ni o tloušťce 0,2 μm byla prokázána jako účinná v potlačení tvorby whiskerů po dobu 350 dnů [27].

Ag mezivrstva

Přidání Ag mezivrstvy mezi vrstvu Cu a pokovením Sn je navržená metoda ke zmírnění tvorby whiskerů stejně jako Ni mezivrstva [7]. Studie ukázaly, že Ag mezivrstva s tloušťkou 2 μm na substrátech na bázi mědi by mohla zcela potlačit růst whiskerů po dobu 350 dnů [10].

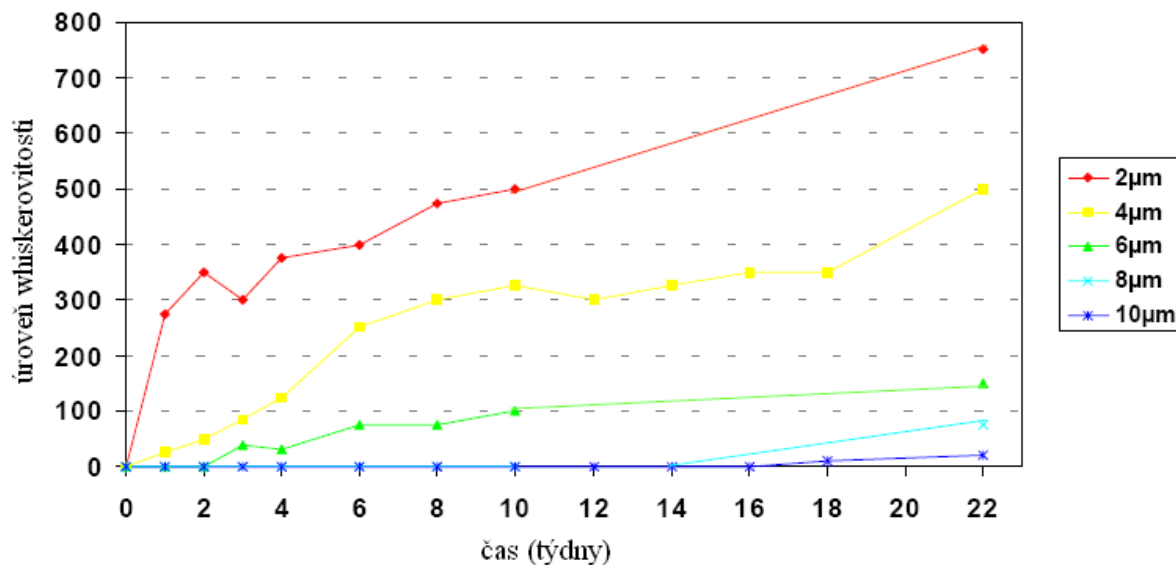
Zhang uvedl, že 1,5 μm niklové mezivrstvy nad měděnou vrstvou významně sníží formování whiskerů kvůli nízkému napětí v cínové povrchové úpravě [35]. Avšak cínové

whiskery mohou stále růst na částech s Ni mezivrstvou [11]. Účinnost mezivrstvy závisí jak na základním materiálu, tloušťce a jednotnosti Ni vrstvy, tak i na parametrech procesu pokovování [18]. Hada předložil, že nebyl viděn žádný růst whiskerů na 8 μm tlusté cínové vrstvě pod kterou byla vrstva Ni o tloušťce 2 μm a tato tloušťka byla přijata NEMI jako minimální požadavek v roce 2004. I přes to, že se vyskytují whiskery na Ni mezivrstvě, tak mnoho výrobců současně používá Ni bariéru k zmírnění whiskeringu [1]. Takže zatímco se použití Ni mezivrstvy ukázalo slibnou zmírňující metodou, není zaručení, že zcela zabrání whiskerům [1].

4.2 Tloušťka vrstvy

Bylo navrženo, že použití tlustých cínových vrstev může být potenciální zmírňující strategií pro růst whiskerů [18]. NEMI navrhla, že by tloušťka cínového pokovení pro součástky bez Ni nebo Ag mezivrstvy měla být alespoň 10 μm [18]. Při použití mezivrstvy by měla být tloušťka cínové vrstvy alespoň 2 μm , přičemž tloušťka Ni mezivrstvy by měla být alespoň 0,5 μm [14]. Tenké pokovování může potenciálně zvýšit intermetalický růst sloučenin a také může snížit odolnost proti korozi z důvodu porézности v pokovovaném nánosu [18]. Dále se také u tenké pokoveného nánosu může degradovat spárování se substrátem kvůli intermetalické sloučenině [18].

Glazunov zjistil, že růst whiskerů na měděném povrchu je maximální u tloušťky 2-5 μm a u povrchu mosazi byl maximální růst při tloušťce 20 μm [24]. Následně Hada zjistil, že nános 2 μm cínu na mědi měl mnohem delší whiskery než tomu bylo u nánosu s tloušťkou 10 μm [24]. Na Obr. je autorem Whitlaw znázorněn konkrétní test vlivu tloušťky na růst whiskerů, kde se nanášela vrstva čistého cínu v rozmezí 2 μm až 10 μm na substrát olin 194 [14]. Úroveň whiskerovitosti není autorem blíže popsána, ale vzhledem k poměru jednotlivých tlouštěk je význam obrázku viditelný [14].



Obr. 9 Vliv tloušťky čistého cínu v rozmezí 2 µm až 10 µm naneseného na olin 194 (převzato z [14])

4.3 Pájení ponořením

Pitt a Henning zjistili, že proces pájení ponořením výrazně sníží na substrátech Cu počet whiskerů [28]. Jejich výsledky naznačují, že pájení ponořením je účinnou zmírňující praktikou k potlačení růstu cínových whiskerů, ačkoli není garantovaná kompletní eliminace whiskerů [28]. Pájení ponořením je obvykle považováno za příznivou metodu pro zmírnění růstu whiskerů z těchto důvodů:

Pomáhá zmírnit vnitřní napětí, a proto si vrstva cínu zachovává malé vnitřní napětí [28].

Při procesu pájení ponořením se zrno cínu zvětší (0,5-5 µm) [17]. Hranice zrna způsobují difúzi odpovědnou za intermetalický růst Cu_6Sn_5 [29]. V přirozeném skladování za normálních provozních podmínek je intermetalický růst po procesu pájení ponořením potlačen a vytvořené tlakové napětí, které je odpovědné za růst whiskerů, je udržováno na téměř stejné hodnotě v průběhu času [29].

Pokud je na substrát na bázi mědi použito pájení ponořením, tak je během procesu vytvořena rovnoměrná vrstva intermetalické směsi Sn-Cu prostřednictvím hromadné difúze [7]. Tato rovnoměrná vrstva nejenže zajistí, aby se povlak cínu velmi dobře držel

základního kovu, ale také slouží jako difúzní bariéra proti dalšímu růstu nepravidelného Cu_6Sn_5 při nižších teplotách [7].

Hlavní znepokojení této metody jsou ta, že roztavená pájka musí pokrýt celou plochu pájené součásti [24]. To může v komponentu během ponoření vyvolat namáhání, která jsou větší než ta, jenž se vyskytují u pájení klasickým způsobem, což vyvolává obavy, že součástky mohou být poškozeny [24]. Z tohoto důvodu bylo vyvinuto robotické řízení procesu pájení ponořením za tepla společností Corfin industry [24].

4.4 Minimalizace tlakového napětí

Mnoho výzkumníků uvádí, že tlakové napětí je jednou z hlavních příčin tvorby whiskerů, a proto je nutné toto napětí minimalizovat [18]. Vyšší počet delších whiskerů byl pozorován na plochách, kde dochází k většímu namáhání v tlaku [30]. Tlakové napětí může být způsobeno růstem intermetalických sloučenin, oxidací nebo tepelným cyklováním. [18] Tlakové namáhání může být dále způsobeno operacemi ohybu, nicméně to jsou operace, které se běžně provádí při konstrukci a výrobě součástek [30]. Dále je třeba dbát na minimalizaci jakéhokoliv mechanického poškození cínových povrchových úprav [30].

4.5 Materiály povrchové úpravy

Další možností, jak zmírnit růst whiskerů, je použití vhodného materiálu pájky a vhodného materiálu pro povrchovou úpravu [7]. Dříve se převážně používaly materiály s obsahem olova, ale v roce 2006 bylo olovo zakázáno směrnicí RoHS, ale stále existují výjimky, kde se může olovo používat [7]. Jsou to především zařízení s vysokou spolehlivostí, které se nacházející ve zdravotnictví a armádě [7]. Olovo je možné používat u externích zdravotnických prostředků do roku 2014 a u vnitřních zdravotnických prostředků do roku 2021 [7]. V roce 2006 společnost iNEMI provedla rozsáhlý seznam doporučených materiálů, které se mohou využívat u povrchových úprav viz Tab. 4.

Tab. 4 Nejběžnější materiály povrchových úprav s přiřazenými kategoriemi (převzato z [7]).

materiál povrchové úpravy	základní materiál		
	Cu (7025, 194, atd.) (vyjma mosazi)	materiál s nízkou roztažností (slitina 42, kovar)	keramika (pro rezistory a kondenzátory)
	kategorie		
NiPdAu	1	1	1
NiPd	1	1	1
NiAu	1	1	1
SnAgCu žárově nanesený	1	1	1
Sn matný s Ni mezivrstvou	2	NA	1 nebo 2
Sn přetavený	2	2	2
Sn matný s Ag mezivrstvou	2	2	2
SnAg žárově nanesený	2	2	2
Sn žárově nanesený	2	2	2
SnAg (1,5 % až 4 % Ag)	2	2	2
Sn matný žihání 150 °C	2	2	2
SnBi (2 % až 4 % Bi)	2	2	2
SnCu žárově nanesený	2 nebo 3	2	2
SnCu matný žihání 150 °C (2 % Cu)	3	3	3
Sn lesklý s Ni mezivrstvou	3	3	3
Sn matný	3	2	3
Sn polomatný	3	3	3
SnCu	3	3	3
Sn lesklý	3	3	3
Ag s Ni mezivrstvou	1	1	1
AgPd s Ni mezivrstvou	1	1	1
Ag	1	NA	1
popis kategorií:			
kategorie 1: přijato výrobcí bez provedení testu na whiskery			
kategorie 2: musí být provedeno testování na cínové whiskery			
kategorie 3: nepřijatelná povrchová úprava			
význam barevného značení:			
preferované úpravy			
úpravy s preferovanými technologickými zásahy proti růstu whiskerů			
úpravy s méně preferovanými technologickými zásahy proti růstu whiskerů			
úpravy s nepřijatelnými (zákazníky) technologickými zásahy proti růstu whiskerů			
úpravy, kterým je lepší se vyhnout			

Tab. 4 uvádí seznam všech bezolovnatých materiálů, které jsou nabízené jako náhrada za olovo pro povrchové úpravy elektronických součástek [7]. Do kategorie 1 spadají materiály s povrchovou úpravou, které jsou přijaty uživatelskou skupinou bez jakéhokoliv testování na růst cínových whiskerů [7]. V Kategorii 2 se nachází materiály, které budou

přijaty uživateli, pokud se podrobí zkouškám JESD201 a následně v nich uspějí [7]. Do kategorie 3 patří materiály povrchových uprav, které nejsou přijaty odběrateli, kvůli vysokému riziku růstu whiskerů [7].

4.6 Vakuový nástroj

Společnost Northern Electric vyvinula vakuový nástroj k odstranění whiskerů ve filtračních sestavách, zatímco jsou tyto sestavy stále v provozu [23]. Zjistili, že v místech odstraněného whiskeru vakuovým nástrojem, nevznikly další whiskery [23].

4.7 Konformní povlak

Pokud nemůže být vyloučeno použití čistého cínu nebo vysoce kvalitní slitiny cínu, tak se uplatňuje konformní povlak, protože může zmírnit rizika způsobená cínovými whiskery [24]. Použití konformního povlaku má tyto cíle: zvýšení inkubační doby whiskerů, potlačení rychlosti růstu whiskerů, snížení hustoty whiskerů a nakonec zamezení elektrického zkratu pomocí vousků, které zachycují ulomené whiskery [18, 24]. Většina whiskerů tvořených mezi konformním povlakem a pokovením se bude spíše ohýbat než pronikat skrz povlak [1]. Bylo také prokázáno, že ohnutý whisker nemůže proniknout pokovenou vrstvou [7].

Pokud dielektrická pevnost a tloušťka pokoveného materiálu jsou rozumně zvoleny, tak konformní povlak může snížit riziko whiskerů vytvářející zkrat mezi přilehlými vodiči. Materiál by měl být vybrán po zvážení různých vlastností jako je koeficient teplotní roztažnosti, přilnavost, odolnost materiálu a obnovitelnost [18]. Použití tenké vrstvy povlaku je výhodné z důvodu zabránění případného praskání části těla nebo poškození obalu integrovaného obvodu, a také z důvodu životního zatížení součástí, zejména u křehkých součástí jako jsou skleněné diody [18]. Obecně se vylučuje parylén, jelikož parylénové povlaky elektrických montáží jsou extrémně obtížné na přepracování [18]. Kromě toho jsou nezbytná i jiná technická uvážení, jako je správná aplikace nanesení konformního povlaku na konkrétní místo [7]. U některých aplikací postříkem je vysoká viskozita, což může způsobit velmi tenké pokrytí na okrajích povrchu a tlusté pokrytí v blízkosti středu povrchu [24]. Když je povrch zcela pokryt konformním povlakem, tak je schopnost cínového whiskeru spojit se s krytým povrchem dramaticky snížena.

Rizika a přínosy konformního povlaku pro Sn byli studovány skupinou NASA Goddard pomocí povlaku Uralane 5750 [31, 32]. Jejich výsledky ukázaly, že se několik whiskerů dostalo skrz Uralane 5750 s tloušťkou 0,25 μm po 2,5 letech ve skladovací místnosti při pokojové teplotě, zatímco se po 3 letech nedostal žádný whisker skrz vrstvu Uralane 5750 o tloušťce 0,75 μm [31, 32]. Studie naznačují, že mnoho konformních povlaků není předvídatelně spolehlivou metodou pro zmírňování whiskerů v dlouhodobých systémech, pokud není aplikovaná extrémně silná vrstva povlaku [1].

Stručně řečeno, konformní povlak je potenciálně účinnou zmírňující strategií pro růst whiskerů, nicméně by se mělo jednat o sekundární strategii k ostatním metodám [7].

4.8 Tepelné zpracování

První studie účinků tepelného zpracování při teplotě 100-180 $^{\circ}\text{C}$ pochází z konce 80. let 20. století, která zaznamenala, že všechny kombinace tepelného zpracování mají významný zmírňující účinek na tvorbu whiskerů [9]. Míra růstu whiskerů se po tepelném zpracování obvykle sníží, zvláště pokud je tloušťka cínu malá (např. $<5 \mu\text{m}$), tak je výhoda tepelného zpracování po pokovování ještě významnější [9]. Tepelné zpracování může být žíhání nebo tavení [7]. Tavení se provádí při teplotách nad bodem tání cínu, aby se tavenina roztavila a následně zpevnila za podmínek relativně pomalého chlazení [1, 7]. Zatímco žíhání se provádí pro pokovené části při teplotách, které jsou nižší než teplota tání [7]. Žíhání se primárně používá pro změnu intermetalické struktury a sekundárně pro podporu rekrytalizace a růstu zrn [7]. Je třeba poznamenat, že výhody tepelného zpracování jsou vůči růstu intermetalických sloučenin omezené, a proto je neúčinnější umístit zařízení do prostředí s nízkou teplotou a nízkým tlakem [9].

4.8.1 Tavení

Pokud je teplota varu vyšší než teplota tání (např. teplota tání SnAgCu - 232 $^{\circ}\text{C}$), tak dojde k tavení původního cínového povrchu a dojde k míchání s pastou [9]. Po ztuhnutí se vytvoří úplně nová mikrostruktura [9]. Tavení se obvykle provádí (během jednoho týdne po pokovování) ponořením pokovených povrchů do horké olejové lázně [1, 7]. Z důvodu tavení a opětovného tuhnutí se napětí ve vrstvě cínu sníží [7]. Tento proces má v historii whiskeringu pozitivní zmírňující účinky na tvorbu whiskerů [7]. Je však třeba poznamenat, že toto tvrzení je založeno na tavení cínu s obsahem olova [7].

4.8.2 Žihání

Když se cín nanese přímo na měď, začne růst intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5 [1]. Výsledkem nepravidelné intermetalické vrstvy je tlakové napětí ve vrstvě Sn, které podporuje růst cínových whiskerů [7]. Jeden způsob, jak potlačit nepravidelný růst intermetalické vrstvy, je provést žihání při teplotě 150 °C po dobu jedné hodiny během 24 hodin od pokovování [1, 7, 9]. Při takto vysoké teplotě probíhá intermetalická formace především objemovou difúzí a výsledkem je rovnoměrnější a více spojitější intermetalická vrstva, čímž se redukuje tlakové napětí z nepravidelného intermetalického formování [1, 7, 27]. Dále druhá intermetalická sloučenina, Cu_3Sn , roste mezi vrstvami Cu_6Sn_5 a Cu [7]. Tato sloučenina $\text{Cu}_6\text{Sn}_5\text{-Cu}_3\text{Sn}$ slouží jako difúzní bariéra, která redukuje další difúzi Cu na Sn [7]. Kromě úpravy intermetalického růstu může proces žihání poskytnout další výhody, které jsou: zvětšení velikosti zrna, snížení hranice zrn, uvolnění napětí v pokovování a vyloučení nedokonalostí v mřížce Sn [7]. Žihání, které bylo aplikováno krátce po pokovení cínu nad mědí, má dlouhou historii pozitivních zpráv, které prokazují účinnost této metody na zmírňování whiskerů [7]. V mnoha případech se uvádí, že toto tepelné zpracování prodlužuje výrazně dobu inkubace, ale zcela neodstraní tvorbu a růst whiskerů [7]. Nicméně dostupné historické údaje často naznačují, že maximální délka whiskerů se snižuje použitím žiháním [7].

Závěr

Cílem této bakalářské práce byla obsáhlá rešerše na popis problematiky cínových whiskerů. Bylo zjištěno, že whiskery jsou krystalická vlákna, která jsou velmi dobře vodivá. Právě jejich vodivost způsobila, i nadále způsobuje, v elektrotechnickém průmyslu řadu poruch. Nejčastější selhání, které whiskery vytvářejí, jsou zkraty. Zkraty způsobily nejzávažnější poruchy ve vesmírných družicích a vojenských zařízeních. V minulosti nebyly cínové whiskery tak významným problémem, protože bylo možné využívat olovo v pájkách a povrchových úpravách. Nicméně problematika cínových whiskerů se dostala opět do popředí v roce 2006 s příchodem směrnice RoHS. Směrnice RoHS zakázala použití některých nebezpečných látek (olovo) v elektrických zařízeních, což mělo pozitivní dopad na kvalitu životního prostředí. Tato směrnice vznikla z důvodu negativních účinků olova na lidské zdraví, kde byly ohroženy zejména děti. Po zavedení směrnice se musel najít materiál, který by nahradil olovo. Jako první v bezolovnatých povrchových úpravách se začal používat čistý cín, který byl ekonomickou a kompatibilní náhradou za olovo. Ukázalo se, že čistý cín je velice náchylný na tvorbu whiskerů. Proto se našla alternativa v podobě matného cínu. Nicméně i na matném cínu se tvoří whiskery, a proto bylo potřeba zavést zmírňující strategie na tvorbu whiskerů. Nejpoužívanější zmírňující strategií je mezivrstva niklu. Tato strategie by měla být považována za primární, protože je ze všech metod nejúčinnější. Dále diskutované zmírňovací postupy a techniky by neměly být brány jako prevence před tvorbou whiskerů, ale spíše jako efektivní metody pro snižování rizik whiskerů.

Stále neexistuje teorie, která by dokázala plně popsat vznik a vývoj cínových whiskerů, ale nachází se zde slibná teorie s názvem The End Game. Teorie The End Game je kousek od pochopení vzniku a vývoje cínových whiskerů. Pro zavedení technologie k úplné eliminaci růstu whiskerů je nejprve nutné tento nepříznivý jev plně pochopit.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CRANDALL, Erika. *Factors Governing Tin Whisker Growth* [online]. 2012 [vid. 2018-06-03]. Dostupné z: <http://ldfcoatings.com/articles/ErikaCrandall.pdf>
- [2] GALYON, G.T. Annotated tin whisker bibliography and anthology. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* [online]. 2005, **28**(1), 94–122 [vid. 2018-06-03]. ISSN 1521-334X. Dostupné z: doi:10.1109/TEPM.2005.847440
- [3] GALYON, George. *A History of Tin Whisker Theory: 1946 to 2004* [online]. [vid. 2018-06-03]. Dostupné z: http://thor.inemi.org/webdownload/newsroom/Presentations/SMTAI-04_tin_whiskers.pdf
- [4] *RISKS OF CONDUCTIVE WHISKERS IN HIGH-RELIABILITY ELECTRONICS AND ASSOCIATED HARDWARE FROM PURE TIN COATINGS* [online]. 2002 [vid. 2018-06-03]. Dostupné z: <https://web.calce.umd.edu/tin-whiskers/TINWHISKERRISKS.pdf>
- [5] BOYLE, John. Tin Whiskers Are Real and Complex. *EE Times* [online]. 2011 [vid. 2018-06-02]. Dostupné z: https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1279227&page_number=3
- [6] B, Dunn. Whisker Formation on Electronic Materials. *Circuit World* [online]. 1976. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1108/eb043543>
- [7] BRADLEY, Edwin, Carol HANDWERKER a Jasbir BATH. *Lead-Free Electronics: iNEMI Projects Lead to Successful Manufacturing*. 1 st Editi. B.m.: Wiley-IEEE Press, 2007. ISBN 978-0471448877.
- [8] Tin Whiskers. *NASA GSFC Tin Whisker Investigation Team* [online]. 2009 [vid. 2018-06-02]. Dostupné z: <https://nepp.nasa.gov/whisker/background/index.htm>
- [9] HENSHALL, Gregory. *Lead-Free Solder Process Development*. B.m.: IEEE press, 2011. ISBN 978-0-470-41074-5.
- [10] Tin Whiskers: A History of Documented Electrical System Failures. *NASA GSFC Tin Whisker Investigation Team* [online]. 2006 [vid. 2018-06-02]. Dostupné z: https://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf
- [11] BRUSSE, Jax a Garry EWELL. TIN WHISKERS: ATTRIBUTES AND MITIGATION. *QSS Group, Incorporated* [online]. 2002 [vid. 2018-06-02]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.659.4540&rep=rep1&type=pdf>
- [12] *Tin Whiskers Are Real and Complex* [online]. [vid. 2018-06-03]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5250>
- [13] ŽÁKA, Pavel. *SPOLEHLIVOSTNÍ RIZIKA BEZOLOVNATÝCH DRUHŮ MONTÁŽE*. Praha, 2013. b.n.
- [14] PODZEMSKÝ, Jiří. *DEGRADACE SPOJŮ PÁJENÝCH PÁJKAMI BEZ OLOVA*. Praha, 2015. b.n.
- [15] HOUSE, Kelsey, Wood Lane END, Hemel HEMPSTEAD a Herts HP. IMPLEMENTING LEAD FREE SOLDERING – EUROPEAN CONSORTIUM RESEARCH Dr . M . Warwick. 1996, (April).
- [16] XU, Chen, Yun ZHANG, C FAN, J ABYS, L HOPKINS a F STEVIE. Understanding whisker phenomenon: The driving force for whisker formation. *CircuiTree(USA)* [online]. 2002 [vid. 2018-06-03]. Dostupné

- z: <http://thor.inemi.org/webdownload/projects/ese/ChenXuAPEX02-paper.pdf>
- [17] BRITTON, S C. Spontaneous Growth of Whiskers on Tin Coatings: 20 Years of Observation. *Transactions of the IMF* [online]. 1974, **52**(1), 95–102. ISSN 0020-2967. Dostupné z: doi:10.1080/00202967.1974.11870313
- [18] GANESAN, Sanka a Michael PECHT. *Lead-free Electronics*. B.m.: IEEE press, 2006. ISBN 978-0-471-78617-7.
- [19] SAKAMOTO, Ichizo. Whisker Test Methods of JEITA [online]. 2004, 1–7 [vid. 2018-06-04]. Dostupné z: https://home.jeita.or.jp/tss/jisso_eas/english/medi/data/whisker200311en.pdf
- [20] MEMBER, Dear. *Whisker Test Methods for Electronic and Electric Components* [online]. 2017 [vid. 2018-06-04]. Dostupné z: http://www.instct.org/images/stories/BSI_Standards/2017_01/EPL_501_17_0007_91_1422_CD_.pdf
- [21] ZHANG, Wan, Andre EGLI, Felix SCHWAGER a Neil BROWN. Investigation of Sn-Cu intermetallic compounds by AFM: New aspects of the role of intermetallic compounds in whisker formation. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* [online]. 2005, **28**(1), 85–93. ISSN 1521334X. Dostupné z: doi:10.1109/TEPM.2005.847441
- [22] DUNN, BD, WR BURKE a B BATTRICK. A laboratory study of tin whisker growth. *Unknown* [online]. 1987, (August 1987), 1–53 [vid. 2018-06-02]. Dostupné z: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987lstw.rept.....D>
- [23] PUTTLITZ, Karl a Kathleen STALTER. *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. B.m.: CRC Press, 2004. ISBN 9780824748708.
- [24] KATO, Takahito, Carol HANDWERKER a Jasbir BATH. *Mitigating Tin Whisker Risks: Theory and Practice*. B.m.: Wiley-IEEE Press, 2016. ISBN 978-1-119-01195-8.
- [25] HSU, S. C., S. J. WANG a C. Y. LIU. Effect of Cu content on interfacial reactions between Sn(Cu) alloys and Ni/Ti thin-film metallization. *Journal of Electronic Materials* [online]. 2003, **32**(11), 1214–1221. ISSN 03615235. Dostupné z: doi:10.1007/s11664-003-0014-5
- [26] BRUSSE, Jay. Tin Whisker Observations on Pure Tin-Plated Ceramic Chip Capacitors. *Proceedings of the American Electroplaters and Surface Finishers (AESF) SUR/FIN Conference* [online]. 2002, 45–61 [vid. 2018-06-03]. Dostupné z: https://nepp.nasa.gov/Whisker/reference/tech_papers/brusse2002-paper-tin-whiskers-observed-on-ceramic-capacitor.pdf
- [27] DITTES, M., P. OBEMDORFF a L. PETIT. Tin Whisker formation - results, test methods and countermeasures. In: *53rd Electronic Components and Technology Conference, 2003. Proceedings*. [online]. B.m.: IEEE, nedatováno, s. 822–826 [vid. 2018-06-04]. ISBN 0-7803-7791-5. Dostupné z: doi:10.1109/ECTC.2003.1216384
- [28] H. PITT, Charles a Robert G. HENNING. *Pressure-Induced Growth of Metal Whiskers* [online]. 1964. Dostupné z: doi:10.1063/1.1713337
- [29] HAIMOVICH, J. Hot air leveled tin: solderability and some related properties. In: *Proceedings., 39th Electronic Components Conference* [online]. 1989, s. 107–112. Dostupné z: doi:10.1109/ECC.1989.77735
- [30] XU, Chen, Yun ZHANG, C FAN, J ABYS, L HOPKINS a F STEVIE. *Understanding whisker phenomenon: The driving force for whisker formation* [online]. 2002 [vid. 2018-06-03]. Dostupné z: <http://thor.inemi.org/webdownload/projects/ese/ChenXuAPEX02-paper.pdf>

- [31] LEIDECKER, H a J S KADESCH. Effects of Uralane Conformal Coating on Tin Whisker Growth. *Proc. The 37th IMAPS Nordic Annual Conf.* 2000, **6**(1), 108–116.
- [32] BRUSSE, Jay. The Continuing Dangers of Tin Whiskers and Attempts to Control Them with Conformal Coating. 1998, 1–7.