České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

K13-113 Katedra elektrotechnologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studium růstu whiskerů

Study of whisker growth

Jan Vávra

Vedoucí práce: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Technologické systémy
Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jan Vávra**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Studium růstu whiskeru**

Pokyny pro vypracování:

1)Zpracujte rešerši na téma whiskery u pájených spojů s důrazem na možné příčiny růstu whiskerů
2)Připravte si sadu vzorků, na kterých se pokusíte whiskery vypěstovat
3)Vzorky poté analyzujte a vyhodnoťte

Seznam odborné literatury:

[1] Subramanian K.: Lead-free Solders : Materials Reliability for Electronics, 2012, Wiley, ISBN:9780470971826
[2] Karl J. Puttlitz, Kathleen A. Stalter: Handbook of Lead-free Solder Technology, ISBN: 9780824748708
[3] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
[4] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Vedoucí: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

doc. Ing. Pavel Mach, CSc.
vedoucí katedry

L.S.

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 3. 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, SW, apod.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne …… …….

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za mnoho podnětů, odbornou a trpělivou pomoc při přípravě a vyhodnocování vzorků a také za celkový přístup k práci.

Anotace

V teoretické části tato práce pojednává nejdříve o teorii pájení. Zmíněné jsou typy pájek jak na bázi SnPb tak i pájky bezolovnaté. Dále je pozornost věnována deskám plošných spojů, jejich povrchovým úpravám a různým metodám pájení. Hlavní náplní této práce je problematika cínových whiskerů. Jsou zde popsány teorie vysvětlující vznik a vývoj whiskeru, faktory ovlivňující tvorbu whiskerů, nepříznivé účinky whiskerů a v neposlední řadě metody k omezení tvorby whiskerů.

Praktická část se věnuje zkoumání vlivu teploty, tlakového namáhání, různých typů pájek a povrchové úpravy na tvorbu cínových whiskerů. Je zde reprodukován celý proces od vytvoření vzorků až ke konečnému vyhodnocení pomocí mikroskopu.

Klíčová slova

Pájka, Povrchová úprava, DPS, Whisker, Tlakové napětí, Přetavení

Abstract

The theoretical part of the thesis firstly discusses the soldering theory. There are mentioned both types of solders based on SnPb and lead-free solders. Attention is also devoted to the printed circuit boards and their surface finishes and various methods of soldering. The main concern of this thesis is the issue of tin whiskers. There are described theories explaining the formation and evolution of whiskers, factors affecting the formation of whiskers, whiskers negative effects and methods to reduce the formation of whiskers.

The practical part of the thesis is devoted to investigate the influence of temperature, pressure stress, different types of solders and surface finishes on the formation of tin whiskers. There is reproduces the whole process from creating the sample to the final evaluation.

Key words

Solder, Surface finish, PCB, Whisker, Pressure stress, Remelting

Obsah

Úvod *10*

I. Teoretická část *12*

1 Pájení *13*

1.1 Pájky **13**
1.1.1 Příměsi pájek 15
1.1.2 Bezolovnaté pájky 16

2 Desky plošných spojů *18*

2.1 Povrchové úpravy desek plošných spojů **19**
2.1.1 HAL (Hot Air Leveling) 19
2.1.2 OSP (Organic Surface Protectives) 20
2.1.3 Chemický cín 21
2.1.4 Chemické zlato 21
2.1.5 Lakovaná měď 21
2.1.6 Ormecon 21
2.1.7 Galvanicky nanesené vrstvy kovů (Ag, Au, Ni, Sn ….) 22
2.1.8 Porovnání povrchových úprav 22

3 Metody pájení *23*

3.1 Ruční pájení **23**

3.2 Pájení přetavením **24**
3.2.1 Pastovité pájky a jejich nanášení 24
3.2.2 Pájení horkým vzduchem 25
3.2.3 Pájení infračerveným zářením 26
3.2.4 Pájení v parách 27

3.3 Pájení vlnou **28**

3.4 Selektivní pájení **29**
3.4.1 Pájení laserem 29
3.4.1.1 Laser YAG – pulsní (Neodym Glass) 29
3.4.1.2 Laser CO_2 - plynový 30

4 Cínové whiskery *31*

4.1 Charakteristika whiskeru **31**

4.2 Faktory ovlivňující růst whiskerů **33**
4.2.1 Vliv napětí v tlaku 33
4.2.2 Vliv teploty 34
4.2.3 Vliv tlaku 34
4.2.4 Vliv vlhkosti 34
4.2.5 Vliv elektrického pole 35
4.2.6 Vliv proudu 35
4.2.7 Vliv intermetalických slitin 35

4.2.8 Vliv tloušťky nanesené vrstvy ... 35
4.3 Nepříznivé účinky whiskeru ... 36
4.3.1 Trvalý elektrický zkrat. ... 37
4.3.2 Krátkodobý elektrický zkrat. ... 37
4.3.3 Vznik volně se pohybujících úlomků whiskerů. ... 37
4.3.4 Vznik elektrického oblouku odpařením whiskeru po zkratu. ... 38
4.4 Mechanismus růstu whiskerů ... 38
4.4.1 Teorie dislokací ... 39
4.4.2 Teorie rekrystalizace ... 41
4.4.3 Teorie prasklého oxidu ... 43
4.4.3.1 Tlakové napětí jako hybná síla: ... 43
4.4.4 Teorie The End Game ... 45
4.4.4.1 Počáteční podmínky ... 45
4.4.4.2 Rekrystalizace a úhel sklonu hranic zrn ... 46
4.4.4.3 Klíč k mechanismu růstu whiskerů ... 47
4.4.4.4 Shrnutí terorie The End Game ... 51
4.4.4.5 Intermetalické a oxidové účinky vzhledem k této teorii ... 52
4.5 Možnosti omezení růstu whiskerů ... 53
4.5.1 Povrchová úprava čistý cín ... 54
4.5.1.1 Povrchová úprava matný čistý cín ... 54
4.5.1.2 Povrchová úprava lesklý čistý cín ... 55
4.5.1.3 Povrchová úprava saténově lesklý čistý cín ... 55
4.5.1.4 Vlastnosti cínových povrchových úprav ... 56
4.5.2 Mezivrstva ... 56
4.5.3 Tloušťka povrchové vrstvy ... 56
4.5.4 Minimalizace tlakového namáhání povrchové vrstvy ... 56
4.5.5 Žíhání a přetavení povrchové vrstvy ... 57
4.5.6 Vakuové čištění ... 57
4.5.7 Použití alternativních pokovení ... 57
4.5.8 Doporučení Mezinárodního institutu výzkumu cínu k omezení whiskerů ... 58
II. Praktická část ... 59
5 Experimenty ... 60
5.1 Experiment první ... 61
5.1.1 Příprava vzorků ... 61
5.2 Experiment druhý ... 62
5.2.1 Příprava vzorků ... 62
5.3 Měřící pracoviště a použitá přístrojová vybavení ... 63
5.4 Vyhodnocení ... 65
5.4.1 Vyhodnocení prvního experimentu ... 65
5.4.2 Vyhodnocení druhého experimentu ... 66
6 Závěr ... 72
Literatura ... 74

Seznam použitých zkratek **77**
Seznam obrázků **77**
Seznam tabulek **78**
Přílohy **78**

Úvod

Pájení je v dnešní době nepostradatelným technologickým procesem v elektrotechnickém průmyslu, zejména s nástupem technologie povrchové montáže. Pájený spoj je jednou z nejdůležitějších součástí elektronických zařízení, jehož funkcí je mechanicky a vodivě připojit součástku k desce plošných spojů. Spolehlivost takovéhoto spoje je velmi důležitá, a proto je třeba se tímto tématem podrobně zabývat.

Pájení můžeme rozdělit na „tvrdé“ a „měkké“. Oba tyto druhy pájení jsou charakterizovány užitím pájek s teplotou tavení, která je závislá na složení pájky. Předmětem této práce je přiblížení pájení měkkého.

Pájený spoj může být realizován ruční nebo strojní metodou. Výraznou změnou oproti dřívější době je nástup právě strojního pájení, který umožňuje přesně reprodukovat celý proces. Strojní metoda pájení využívá několik technologií, které mají významný vliv na dobře proveditelný spoj.

Právě s užitím různých pájek a dobře proveditelného spoje úzce souvisejí whiskery. Cínové whiskery nejsou novým jevem. První publikované zprávy o cínových whiskerech se datují od roku 1940. Whiskery v překladu „vousy“ jsou elektricky vodivé a relativně mechanicky odolné krystaly samovolně vyrůstající na povrchu některých kovů. Jedná se především o kovy, jako jsou kadmium, zinek, antimon a hlavně cín, jemuž je věnována velká pozornost. Mnohem méně se whiskery vyskytují u stříbra, železa, niklu a platiny. Vzhledem k tomu, že v roce 2006 byla přijata směrnice RoHS, podle které se zakazuje používání olova, se přešlo ze standardně používané olovnaté pájky Sn63Pb37 na pájky typu SnAgCu. U těchto slitin je cín zastoupen z více jak 95 %, čímž vzrostla obava o spolehlivost elektronických zařízení, protože zejména u cínu byl růst whiskerů nejčastěji pozorován na rozdíl od pájek olovnatých, kde bylo olovo zastoupeno v takové míře, že omezilo vznik whiskerů.

Tato práce je rozdělena do dvou částí. Teoretická část je zaměřena především na problematiku cínových whiskerů.

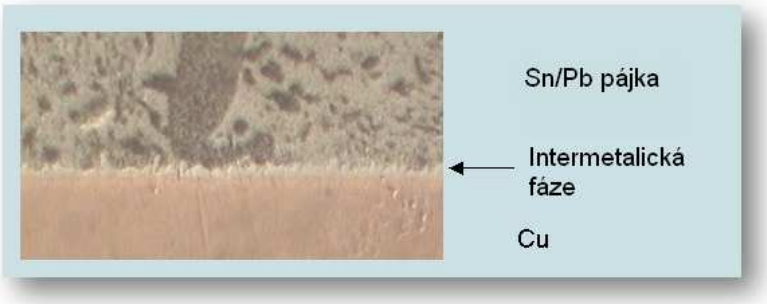
Praktická část zkoumá vznik a vývoj růstu whiskerů z povrchu pájek s ohledem na povrchovou úpravu desky plošného spoje, na kterou jsou tyto pájky naneseny a na způsobu mechanického namáhání a stárnutí, kterému jsou tyto DPS vystaveny. Zahrnuje postup vytvoření jednotlivých vzorků. Vzorky byly vytvořeny nanesením trojicí složením odlišných pájecích slitin ruční páječkou na desky plošného spoje s různou povrchovou úpravou. U takto vytvořených vzorků bylo vytvořeno pnutí ve vrstvě pájky dvěma způsoby. Dále pak polovina byla vystavena teplotě 50 °C a polovina pokojové teplotě. U těchto vzorků byl následně zjišťován růst whiskerů.

I. Teoretická část

1 Pájení

Pájení je definováno jako způsob metarulgického spojování dvou kovů třetím roztaveným kovem-pájkou. Povrchové atomy základního materiálu se dostanou do styku s atomy roztavené pájky v takové vzdálenosti, že se vytvoří podmínky pro účinek adhezních (přilnavostních) a kohézních (soudružnostních) sil. Současně dochází k rozpouštění a difúzi některých prvků spojovaných materiálů. Vzniká tak mezifázové rozhraní mezi pevným a tekutým kovem [1]. Pro pájení je charakteristické, že teplota tavení pájky je nižší než pájený materiál.

Na obr. 1.1 je zobrazena struktura pájeného spoje a intermetalická fáze. Mezi pájkou a měděným substrátem vznikají intermetalické slitiny Cu_3Sn a Cu_6Sn_5, které jsou nezbytné pro vznik optimálního spoje. Se zvětšováním jejich tloušťky může ovšem dojít ke vzniku vadného spoje.



Obr. 1.1 Obraz pájeného spoje v řezu s intermetalickou fází [13].

1.1 Pájky

Pájkou rozumíme přídavný materiál používaný při pájení, kdy tato pájka musí mít nižší teplotu tání než spojované kovy [4].

Jak již bylo naznačeno v úvodu, pájky můžeme rozdělit do dvou základních skupin:

- pájky měkké
- pájky tvrdé

Měkké pájky jsou charakterizovány teplotou tavení nepřesahující 500 °C a zároveň malou pevností. Pájky tvrdé jsou naopak charakterizovány teplotou tavení vetší než 500 °C a používají se pro spoje, které jsou vystaveny vyššímu mechanickému namáhání [1]. V elektrotechnickém průmyslu se používá především měkké pájení bezolovnatými pájkami pro připojování vývodů součástek a spojování vodičů. Jedná se především o bezolovnatou slitinu SAC (Sn/Ag/Cu). Této oblasti budeme věnovat větší pozornost. Tvrdé pájení je používáno především pro spojování mechanických konstrukčních částí (například chladičů, přístrojových skříní, masivních doteků na kontaktní pružiny apod.).

Hlavní složkou měkkých pájek jsou těžké kovy, které mají nízkou teplotu tavení. Jsou to především cín, měď, stříbro a zinek. Některé pájky obsahují i vizmut, antimon, indium, nikl a železo. Většinou se jedná o dvou nebo třísložkové slitiny. Nejvíce užívanými jsou pájky cínové, protože se spojují s většinou kovů. Pájecí bezolovnatá slitina SAC305, která obsahuje 96.5 % cínu, 3 % stříbra a 0.5 % mědi, je blízká náhradě za slitinu 63Sn/37Pb pro pájení vlnou a ruční pájení, a prokázala svoji velmi dobrou funkci v aplikacích SMT. SAC305 je nejlevnější slitina ze skupiny Sn-Ag-Cu. Z této skupiny vykazuje nejlepší smáčení, slučitelnost se všemi typy tavidel, vynikající spolehlivost pájeného spoje a taví se při teplotě 217°C [7].

Pájky se vyrábějí litím a tvářením. Vzhledem k tomu, zda se jedná o ruční nebo strojní pájení, používají se pájky ve formě drátu, trubiček a tyčí. Pro ruční pájení se používají trubičkové pájky, které mají jedno nebo několik jader s výplní tavidla. Kuličkové pájky používáme do pájecích past. Pro strojní pájení používáme tyčové pájky.

Do popředí se dostalo použití pájecích past. Pájecí pasta je tvořena kuličkami pájecí slitiny a tavidlem. Podle typu pájecí slitiny mají kuličky rozměry řádově desítky μm. Hlavní vlastností pájecí pasty je, že musí umožňovat dobré tisknutí pomocí šablony na desku plošného spoje, nesmí obsahovat vzduchové bubliny a musí být dostatečně lepivá. Po přetavení musí být spoj lesklý a hladký. Pájecí pasta se skladuje v chladničce při teplotě (2 ÷ 4°C) po dobu asi půl roku. Před použitím se musí asi 4 hodiny temperovat na pracovní teplotu.

1.1.1 Příměsi pájek

Jako příměsi označujeme jiné prvky, které jsou další složkou měkké pájky. Tyto příměsi ovlivňují vlastnosti pájky, jako jsou smáčitelnost a pájitelnost.

Zde jsou stručně uvedeny jejich vlastnosti [5]:

- měď – při větším obsahu než 0,1 % způsobuje horší roztékavost.
- kadmium a železo – při obsahu vyšším než 0,01 % způsobuje pískovou strukturu, což má za následek, že pájené spoje jsou křehké.
- hliník a zinek – při vyšším obsahu 0,05 % Al a 0,001 % Zn způsobují, že pájka má špatnou tekutost.
- zlato – pájka je zrnitá, křehká.
- arsen a nikl – vznikají útvary podobné puchýřům.
- vizmut – snižuje dovolenou pracovní teplotu.
- stříbro – povrch pájky je matný, ale snižuje schopnost rozpouštět jiné kovy, což je vlastnost, která se hodnotí kladně.

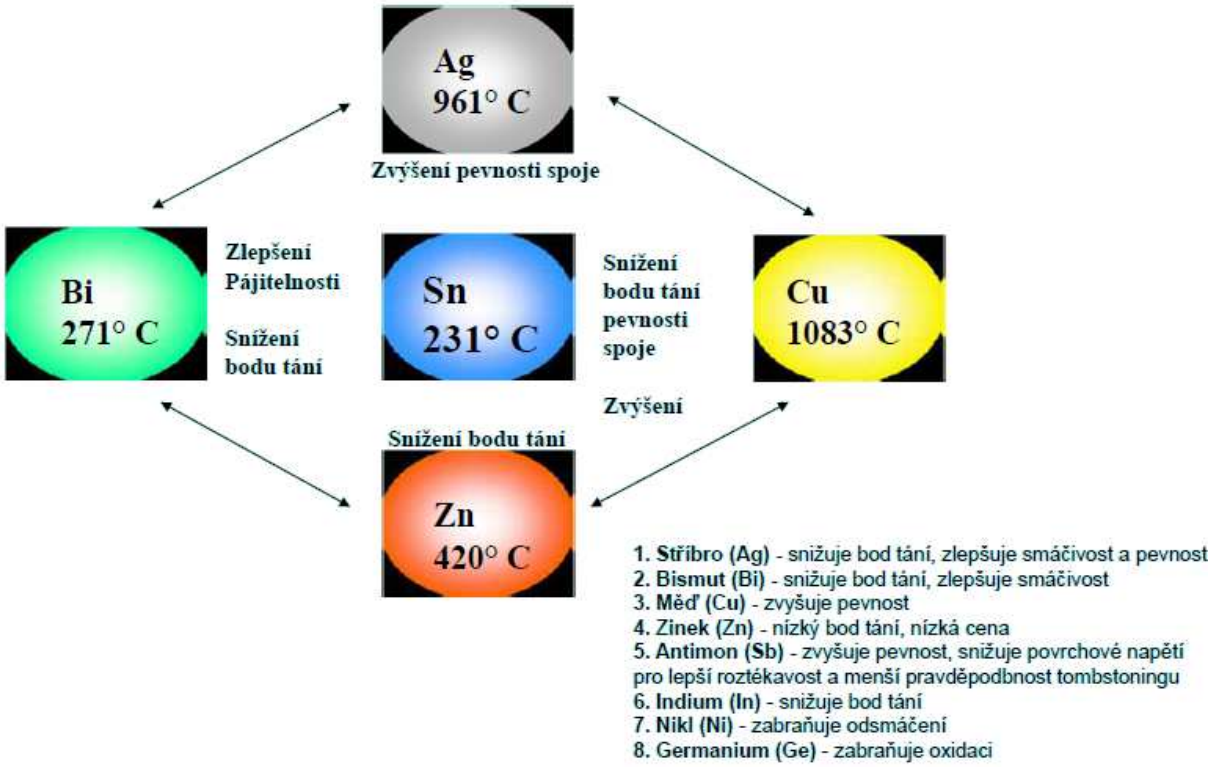
1.1.2 Bezolovnaté pájky

Problémem olovnatých pájek je, že olovo má velmi špatný vliv na životní prostředí, a proto používání pájek s olovem vede k nákladným hygienickým opatřením. Ty je pak nutné zavádět u všech pájecích zařízení. Tato opatření se v dnešní době týkají jen speciálních typů průmyslu, jako je např. letecký nebo kosmický. V současnosti se olovo již v pájecích slitinách v elektrotechnickém průmyslu nepoužívá a používají se bezolovnaté pájky, na které se přechází již od 1. 7. 2006 podle platných předpisů EU [2]. Základ tvoří cín Sn. Do slitiny se dávají další prvky Bi, In, Zn, Ag, Cu, Sb. V tab 1.1 jsou uvedeny některé používané slitiny s různým poměrem složek a teplotami tavení. Nahrazení olova jiným prvkem však nelze bez použití jiných tavidel, která musí být kompatibilní s nově vzniklými pájkami.

Tab 1.1 Bezolovnaté pájky [6].

Slitina	Složení [%]	Teplota tavení [°C]
Sn - Bi	Sn 58, Bi 42	138
Sn - In	Sn 52, In 48	118
	Sn 50, In 50	118 — 125
Bi - In	Bi 33, In 67	109
Sn - Zn	Sn 9, Zn 91	199
Sn - Bi - Zn	Sn 8, Zn 3, Bi 89	189 — 199
Sn - Bi - In	Sn 20, Bi 10, In 70	143 — 193
Sn - Ag	Sn 3,5, Ag 96,5	221
	Sn 2, Ag 98	221 — 226
Sn - Cu	Sn 0,7, Cu 99,3	227
Sn - Ag - Bi	Sn 3,5, Ag 3, Bi 93,5	206 — 213
	Sn 7,5, Ag 90,5, Bi 2	207 — 212
Sn - Ag - Cu	Sn 3, Ag 0,7, Cu 96,3	217
Sn - Ag - Cu - Sb	Sn 2, Ag 0,8, Cu 0,5, Sb 96,7	216 — 222

Na obr. 1.2 jsou uvedeny možné alternativy pro bezolovnaté pájky.



Obr. 1.2 Alternativy pro bezolovnaté pájky [31].

2 Desky plošných spojů

Základním materiálem pro výrobu desek plošných spojů (DPS) je převážně laminát ze skelné tkaniny sycený epoxidovou pryskyřicí označený FR4 (Flame Resist). Z jedné nebo obou stran je nalepena měděná fólie vyrobená z elektrolytické mědi čistoty více než 95 %. Při výrobě se nejčastěji používá materiál o tloušťce 1,5 mm. Tloušťka měděné fólie se volí od 5, 9, 18, 35, 70 až do 105 μm. Plošné spoje mohou být jednostranné, dvoustranné anebo vícevrstvé.

Desky plošných spojů se vyrábějí z materiálů různého provedení. Nejde vždy o již zmíněnou skelnou tkaninu v epoxidu. Pro jednoduché výrobky se používají lamináty se základní vrstvou ze speciálního papíru. U vysokofrekvenčních obvodů se používá laminát na bázi teflonu, keramiky a pro výkonové aplikace volíme materiály s kovovým substrátem, který zajišťuje odvod tepla [1].

Základními parametry DPS jsou:

- samozhášivost
- schopnost přenést vysoké frekvence
- nízká tepelná roztažnost

V tab. 2.1 jsou shrnuty běžné typy laminátů pro desky plošných spojů.

Tab 2.1 Běžné typy laminátů pro DPS [1].

Pryskyřice	**Výztuž**		**Klasifikace dle NEMA**
fenolitická	papír	list	FR-2, X, XP, XX, XXP, XPC
amino	sklo	textílie	G-5, G-9
epoxy	papír	list	FR-3
	sklo	textilie	G-10, G-11, FR-4, FR-5
polyester	sklo	textílie	FR-6

FR-2 – nehořlavý, použití v levné spotřební elektronice.

FR-3 – obsahuje látky zpomalující hoření, dobré elektrické vlastnosti, dobrá mechanická pevnost, levnější než FR-4.

G-10 – dobré elektrické a mechanické vlastnosti, použitelný do 40 MHz.

FR-4 – nehořlavá varianta typu G-10, nejčastější použití.

G-11 – nejkvalitnější a nejdražší materiál, vynikající tepelná odolnost.

FR-5 – nehořlavá varianta G-11.

FR-6 – obtížné prokovení, relativně levný.

2.1 Povrchové úpravy desek plošných spojů

Účelem povrchové úpravy DPS je, aby měl výsledný povrch dobrou smáčitelnost a pájitelnost pájecích ploch pro součástky a aby byl odolný proti korozi. Tyto vlastnosti jsou zvlášť důležité u desek s prokovenými otvory. K zajištění dobré pájitelnosti a smáčitelnosti se používají různé metody. Nejčastěji se měděné plochy DPS pokrývají bezolovnatou cínovou pájkou. Existují následující procesy:

- Pokovení za tepla
- Elektrolytické pokovení
- Tisk pájecí pasty

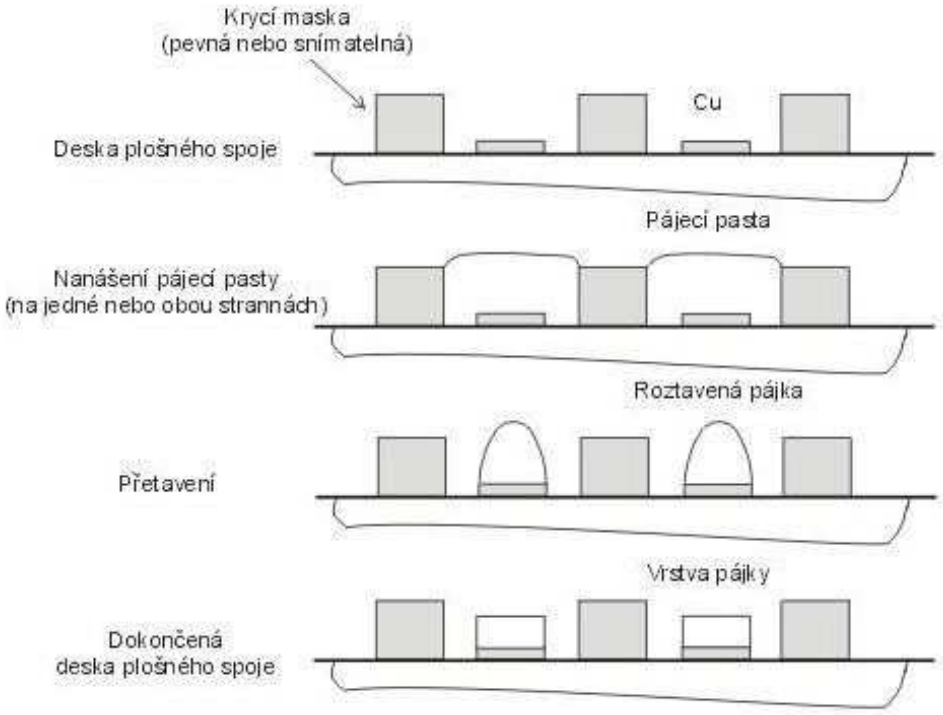
2.1.1 HAL (Hot Air Leveling)

HAL je nejčastěji používaný proces pokovení za tepla. Cín se nanáší procesem označovaným jako vyrovnávání pájky horkým vzduchem. Tato technika spočívá v tom, že se sestava svisle ponoří do roztavené slitiny, pomalu se vytáhne a pomocí nožů s horkým vzduchem se odfoukne přebytečná pájka. Problémem je, že vlivem zemské tíže a směru působení vzduchového nože může být ploška zvýšená nebo klenutá. Z tohoto důvodu byla vyvinuta metoda vodorovného vyrovnávání pájky

horkým vzduchem. Při této metodě se DPS vloží mezi dva síťové dopravníky a dopravuje se skrze roztavenou slitinu. Vzduchové nože zde také slouží k odstranění přebytečné slitiny, ale zemská tíže nyní přispívá k vyrovnávání povrchové úpravy [1]. Princip povrchové úpravy metodou SIPAD je znázorněn na obr. 2.1.

2.1.2 OSP (Organic Surface Protectives)

OSP jsou chemicky nanesené organické inhibitory oxidace mědi na měděný povrch tištěného spoje. Tento povrch se používá nejvíce pro jednostranné desky, kde je pájitelnost velice dobrá, přičemž cena je nižší než pro povrch HAL. Tato metoda zaručuje dokonale rovinný povrch. Největší nevýhodou tohoto povrchu je při vícenásobném teplotním cyklu výrazně zmenšená pájitelnost a také kratší doba skladovatelnosti [10].



Obr. 2.1 Povrchová úprava DPS metodou SIPAD [10].

2.1.3 Chemický cín

Přímo na měděný povrch se chemicky nanese vrstva cínu (může se také nanést vrstva stříbra nebo niklu). Výhoda spočívá v rovnosti povrchu a v eliminaci teplotního šoku při procesu HAL. Nevýhodou je horší pájitelnost, malá doba skladovatelnosti a také vyšší cena [10].

2.1.4 Chemické zlato

Nejdříve se chemicky nanese vrstva niklu a poté vrstva zlata (velice tenká vrstva, sloužící zejména k ochraně oxidace povrchu) přímo na měděný povrch desky. Je to výhodné zejména z hlediska rovnosti povrchu a pro zlacení přímých konektorů. Nevýhodou je vyšší cena a horší pájitelnost [10].

2.1.5 Lakovaná měď

Již málo používaný proces, kde se na celý povrch desky nanáší stříkáním pájitelný lak. Výhoda je zejména v nízké ceně. Nahrazuje se však povrchem OSP, který je cenově srovnatelný [10].

2.1.6 Ormecon

Jedná se o jednu z metod chemického cínu. Tento polyfenylamin polymerové soli vytváří selektivní metodu cínování měděných povrchů a odpovídá všem moderním požadavkům na plošné spoje. Jeho první složka je disperze organického kovu a nanáší se jako mezivrstva mezi měď a cín. To zajišťuje optimální přípravu pro následné chemické cínování. Tenká vrstva Ormeconu (pouze 0,08 μm) zabraňuje difúzi mědi do cínu a udržuje tak schopnost pájení cínového povrchu po dobu potřebnou v praxi. Druhá složka je chemická cínovací lázeň. Ta pokryje selektivně

měděný povrch tenkou, rovnoměrnou vrstvou cínu o síle 0,8 μm. Ormecon je první organický kov. Skutečně poprvé tato charakteristika byla zpozorována v materiálu, který nenáleží do tradiční skupiny kovů, ale spíše je skutečný vnitřní vodivý polymer [11].

2.1.7 Galvanicky nanesené vrstvy kovů (Ag, Au, Ni, Sn ….)

Tento proces spočívá ve vylučování kovu z roztoku solí na katodě při průchodu proudu. Vrstvy jsou homogenní, tloušťka vrstvy je dána dobou pokovení a hodnotou proudu. Použité kovy mohou s pájkou tvořit křehké intermetalické slitiny, které snižují spolehlivost spojů. Proto se často aplikuje mezivrstva. Např. před zlacením se povrch ještě nikluje [12].

2.1.8 Porovnání povrchových úprav

V závislosti na čase má nejlepší pájitelnost HAL a galvanicky nanášené povrchy. U OSP a chemicky (bezproudově) nanášených vrstev pájitelnost s časem výrazně klesá.

Tab 2.2 Maximální doba skladovatelnosti povrchový úprav DPS dle ČSN EN 617-2 [12].

Povrchová úprava	Maximální skladovatelnost [měsíce]
Sn HAL	12
Sn galvanicky a následné přetavení	12
Ochranné laky, OSP	3
Chemický cín	1

3 Metody pájení

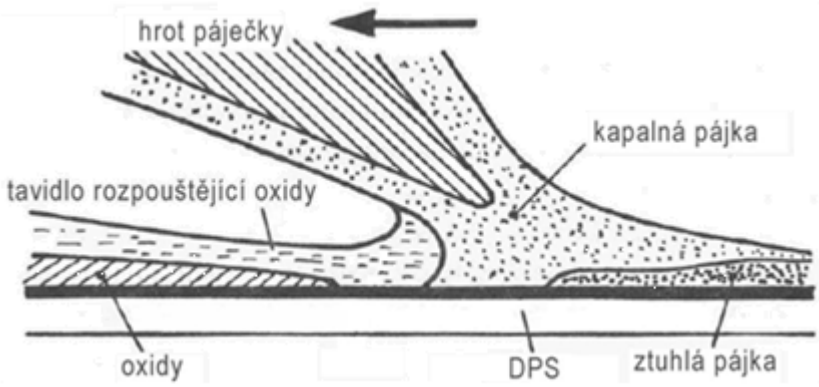
Základní dělení:

- ***Ruční***
    - Pájení vyhřívaným kontaktním nástrojem
    - Vysokofrekvenční pájení
    - Infračervené pájení
    - Pájení horkým vzduchem
- ***Strojní***
    - Přetavením
        - Infračervené pájení
        - Horký vzduch
        - Pájení v parách
    - Vlnou
        - Jednoduchá vlna
        - Dvojitá vlna
        - Dutá vlna
    - Selektivní
        - Indukcí
        - Laserem
        - Halogenovou lampou

3.1 Ruční pájení

Je to nejjednodušší a nejběžnější metoda pájení, kde zahřátý hrot pájedla zahřeje zpracovávaný díl za přítomnosti tavidla, pájka se roztaví a zformuje spoj. Tato metoda je ale poměrně nespolehlivá. Kvalita provedení závisí na pracovníkovi, který pájení provádí, protože nedokáže přesně opakovat postupy, které jsou pro

kvalitu spoje důležité. Jedná se např. o nejistou dobu pájení a množství pájky ve spoji. Když totiž teplota v pájeném spoji překročí 300 °C, dochází k oxidaci pájky a přepálení kalafunového tavidla. Pro tyto vlastnosti je ruční pájení vhodné pouze pro opravy špatně zapájených spojů po strojním pájení nebo pro dodatečné připojování součástek. Na obr 3.1 je detail pájecího hrotu v procesu ručního pájení.



Obr. 3.1 Detail pájecího hrotu během pájení [8].

3.2 Pájení přetavením

Tato metoda spočívá v nanesení pájecí pasty na pájecí plošky DPS, na kterých mají být vytvořené pájené spoje, ještě před samotným procesem pájení. Do pájecí pasty jsou osazeny součástky - využívá se zde lepivého účinku pasty. Poté následuje přetavení pájecí pasty dodáním potřebného množství tepla v peci s definovaným teplotním profilem. Důležitým faktorem pro kvalitu pájení je nejen volba správné metody a stroje, ale i vhodný výběr pájecího materiálu – pájecí pasty.

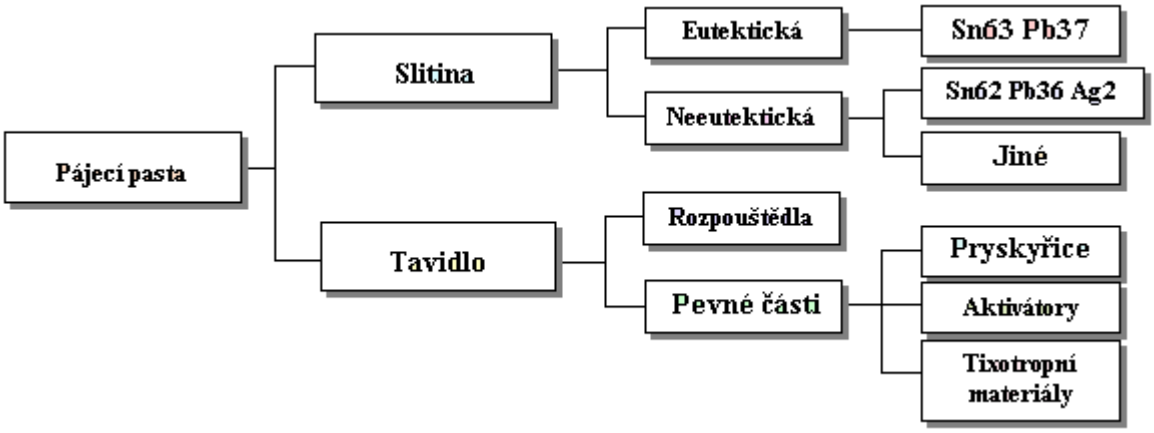
3.2.1 Pastovité pájky a jejich nanášení

Pastovitá pájka je homogenní směs pájky ve formě prášku, potřebného tavidla a dalších příměsí upravující viskozitu, roztékavost a lepivost [5]. Používá se nejčastěji

90 % pájecích zrn a 10 % tavidla. I zde má tavidlo za úkol odstranit oxidy při procesu pájení. Složení pájecí pasty znázorňuje obr 3.2.

Tato pájecí pasta se může nanášet třemi způsoby:

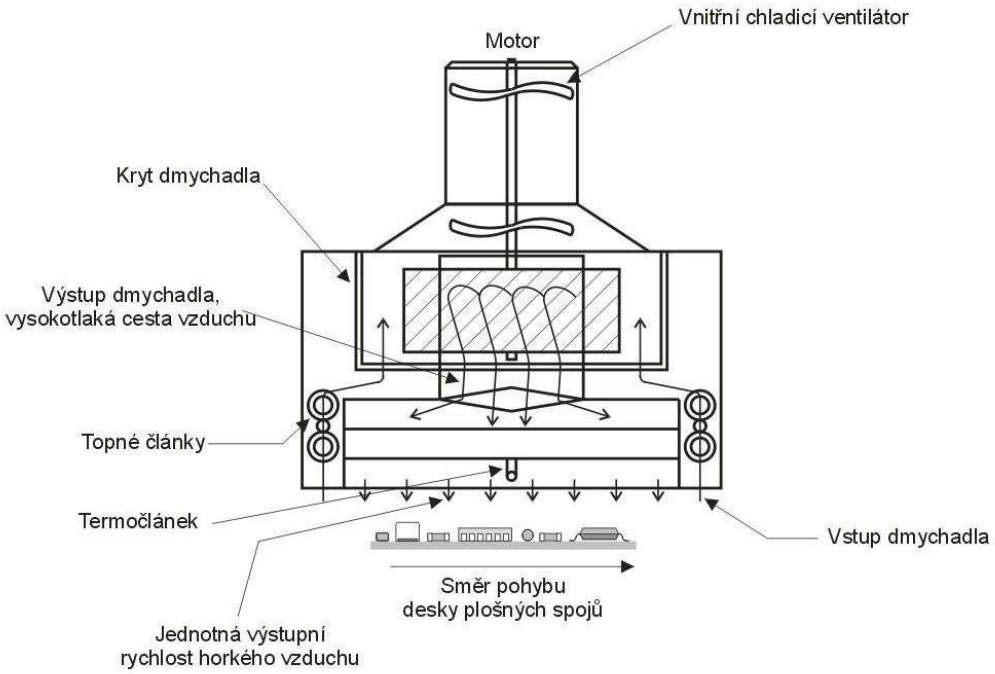
- Dávkováním – dispenzerem
- Tiskem přes síto – sítotiskem
- Tiskem přes šablonu



Obr. 3.2 Složení pájecí pasty [9].

3.2.2 Pájení horkým vzduchem

Při tomto pájení se potřebné teplo pro přetavení získává průchodem tlakového plynu, nejčastěji vzduchu. Pro omezení oxidace pájky se používá dusík. Proud plynu proudí na místo s pájecí pastou tak dlouho, dokud nedojde k přetavení pájecí pasty. Teplota na výstupu trysky je 350 – 400 °C. Výhodou je přímý kontakt zdroje tepla se součástkou. Tento proces přetavení trvá určitý čas podle toho, jestli byly součástky chladné nebo předehřáté. Tento způsob přetavení se používá např. při opravách DPS. Výhodami jsou přesné řízení teploty, vysoký výkon a nižší náklady. Naopak nevýhodou je, že ve srovnání s jinými metodami je zapotřebí delší doby pájení. Na obr 3.3 je naznačena metoda přetavení horkým vzduchem.



Obr. 3.3 Model přetavovací pece využívající proudění horkého vzduchu [7].

3.2.3 Pájení infračerveným zářením

Každá látka emituje elektromagnetické záření, pokud nemá teplotu absolutní nuly. Čím vyšší je teplota, tím větší je vyzářená energie. Jestliže se například umístí dvě tělesa tak, aby záření z jednoho tělesa bylo přijímáno tělesem druhým, pak těleso s nižší teplotou bude přijímat více energie než vyzáří a jeho vnitřní teplota bude stoupat. Nejčastěji k tomuto jevu dochází mezi pevnými plochami. Energie zářiče, jež je částí elektromagnetického spektra, nepotřebuje ke svému šíření žádné médium [1].

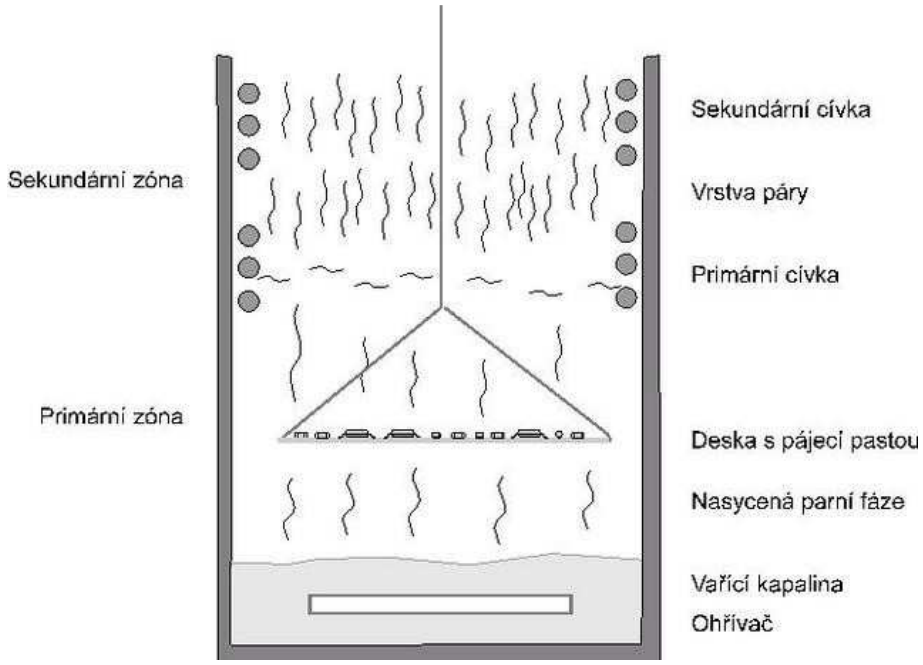
Tento způsob pájení je založen na vhodných zdrojích produkujících záření různých vlnových délek, které jsou absorbovány součástkou, pastovitou pájkou a DPS. Aby se emitovalo záření v blízkosti infračervené oblasti, používají se jako zdroje podžhavené fokusované nebo difusní wolframové žárovky s halogenovým cyklem. Výhodou je jednoduchá konstrukce, ale problémem však může být, že černé součástky mají jinou emisivitu než pájecí pasta a budou se tak rychleji zahřívat. Nezaleží však jen na barvě součástky, ale i na pouzdře jakým je opatřena (kovové,

plastové). Výsledkem je, že se citlivé součástky přehřejí a může tak dojít k nenávratnému poškození těchto součástek. Na obr 3.4 je jednoduchý model přetavovací pece využívající infračervené záření.

Obr. 3.4 Model přetavovací pece vyžívající infračervené záření [7].

3.2.4 Pájení v parách

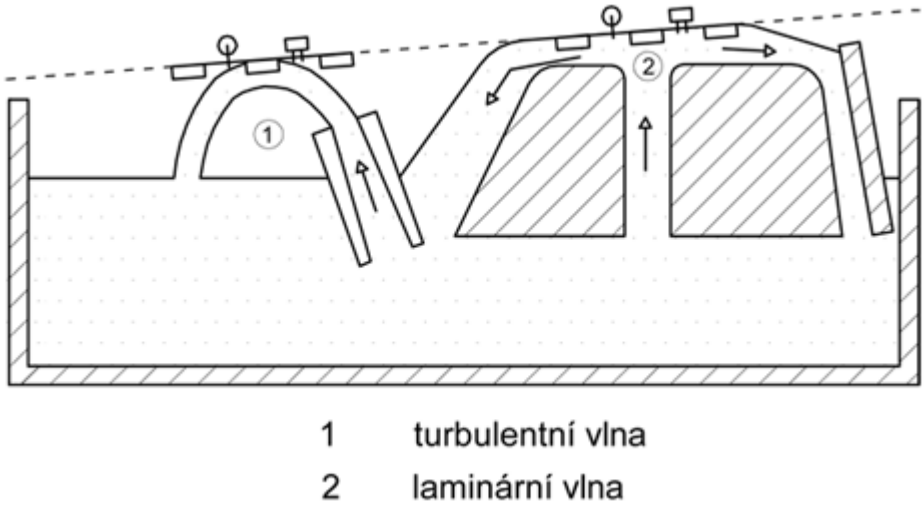
Je to způsob, kdy se předává teplo při kondenzaci nasycených par vhodné kapaliny na tuhý chladnější povrch. Jinak řečeno - kapalina se zahřeje na bod varu a postupně se odpaří. DPS jsou vloženy do zóny odpařování, tím na nich kondenzuje pára, která ohřívá pájecí pastu. Přenosem tepla pak dojde k přetavení pájecí pasty a vznikne tak pájený spoj. Pájecí teplota je dána bodem varu pájecí kapaliny a polohou DPS nad hladinou pájecí kapaliny, takže teplota pájení je konstantní a rozložení teploty je rovnoměrné v celém prostoru. To je jedna z výhod. Jako kapaliny se používají fluóruhlíky. Nasycená pára pak neobsahuje kyslík a nedochází k oxidaci pájky. Nevýhodou však je, že za použití těchto kapalin jsou k dispozici jen některé pájecí teploty a dochází ke ztrátám kapaliny, které jsou velmi drahé. Na obr. 3.5 je příklad zařízení pro pájení v parách.



Obr. 3.5 Princip zařízení pájení v parách [7].

3.3 Pájení vlnou

Jedná se o jiný způsob pájení, než tomu bylo u pájení přetavením. Při pájení vlnou je v zásobníku hladina roztavené pájky. Na hladině roztavené pájky je vytvořena jedna nebo více vln, které smáčí povrch DPS procházejících nad hladinou na dopravníku. Smáčena je část povrchu, na které mají být vytvořeny pájené spoje. Naopak část povrchu, na kterou nemá být aplikována pájka, je chráněna nepájivou maskou [8]. Nejběžněji se používají dvě po sobě jdoucí vlny. První turbulentní vlna zajistí dodání pájky do pájecích míst a druhá laminární vlna dokončí správné dávkování do spoje a vytvarování spoje. U této technologie je také důležité předehřátí DPS se součástkami, aby nedošlo k nežádoucímu tepelnému šoku při kontaktu desky a roztavené pájky. Na obr. 3.6 je znázorněn způsob pájení pomocí dvou vln.



Obr. 3.6 Princip pájení pomocí dvou vln [8].

3.4 Selektivní pájení

Selektivní pájení se používá především pro složité DPS (oboustranné SMD) a DPS s nízkou integrací vývodových součástek, kde nelze nebo není ekonomicky výhodné použít pájení vlnou. Při selektivním pájení se jako při jiných způsobech pájení předehřívá DPS. Tavidlo a vlastní pájka se nanáší pouze na daný spoj.

3.4.1 Pájení laserem

Pájení pomocí laseru se již v aplikacích SMT používá. Velkou výhodou je velmi přesné lokální přetavení. To jasně ukazuje jednu z předností pájení laserem - je vhodné k pájení materiálů citlivých k teplu. Ohřev bývá velmi krátký, asi 5 ms, čímž se vylučuje vznik intermetalických struktur na pájeném spoji. Úzce směrovaný paprsek předurčuje laser na lokální pájení. To znamená, že paprskem se pájí jedno pájené místo po druhém [7].

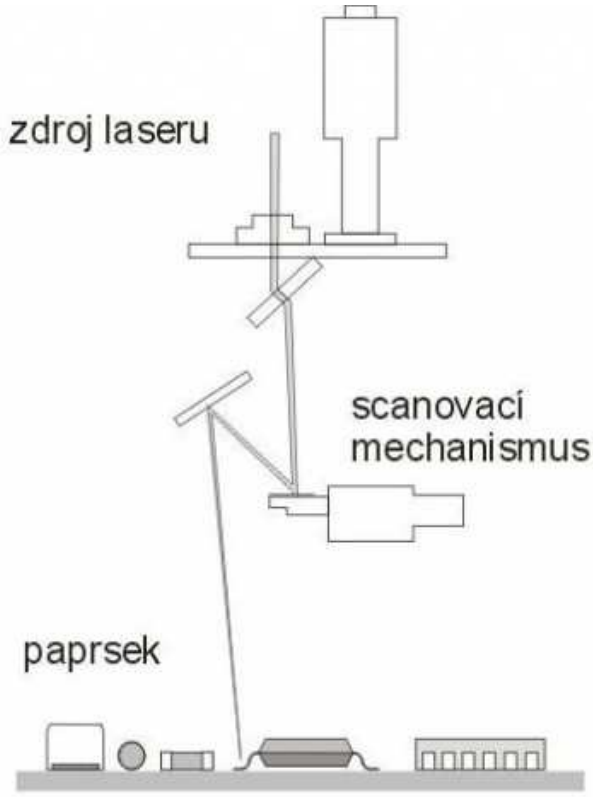
3.4.1.1 Laser YAG – pulsní (Neodym Glass)

Tímto typem laseru je generován impulsní laserový paprsek o vlnové délce

1,06 μm. Záření proniká sklem, plastickými hmotami a je přijatelně absorbováno kovy. Při pájení není nezbytné vypínat paprsek při přemísťování.

3.4.1.2 Laser CO_2 - plynový

Zcela odlišný je typ laseru CO_2, který generuje paprsek o vlnové délce asi 10 μm. Vlnová délka 10 μm je ochotně pohlcována plasty, méně ochotně kovy. V důsledku toho mohou být plastové části na desce zničeny paprskem laseru CO_2, pokud nejsou učiněna zvláštní opatření. Na druhé straně, jestliže se požaduje roztavení pájky, požadovaný účinek laseru CO_2 je podstatně větší než laseru YAG, protože pájka absorbuje záření tavidlem a organickými složkami pájecí pasty. Laser CO_2 má podstatně vyšší účinnost (až 15%) než Neodym Glass (1%). Plynový laser není vhodný používat na pájení bez tavidla a je třeba dávat pozor na silnou odrazivost [7].



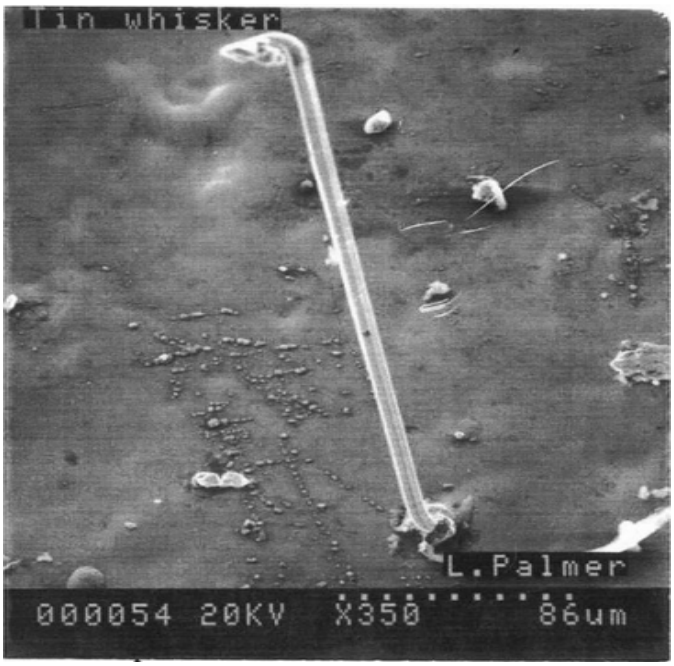
Obr. 3.7 Pájení laserem [7].

4 Cínové whiskery

4.1 Charakteristika whiskeru

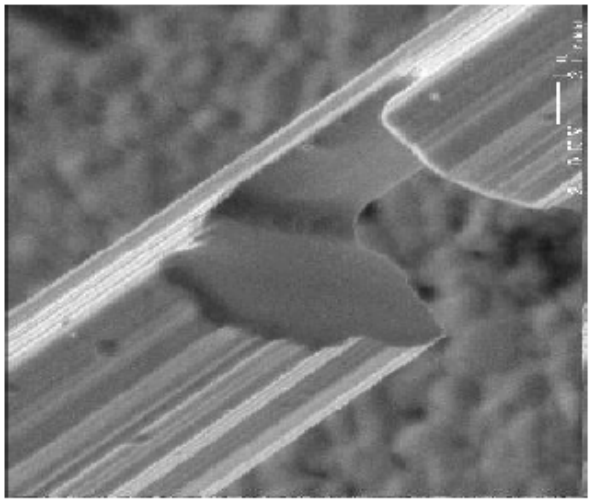
Jak už bylo řečeno v úvodu této práce, whiskery jsou elektricky vodivé a relativně mechanicky odolné krystaly samovolně vyrůstající na povrchu některých kovů. Nejčastěji se jedná o povrchy, kde je cín (zejména galvanický) použit jako finální povrchová úprava. Tato práce se zabývá cínovými whiskery, avšak růst whiskerů je dokumentován i u kovů jako jsou kadmium, zinek, antimon. Mnohem méně se whiskery vyskytují u stříbra, železa, niklu a platiny.

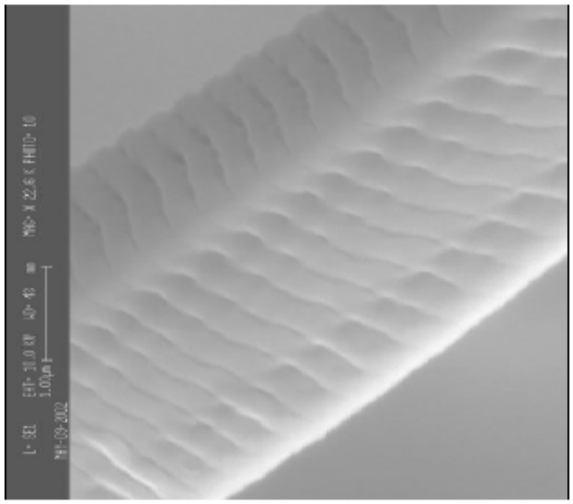
Whiskery mohou být rovné, zahnuté nebo zauzlené. Průměr whiskerů je vždy menší než jejich délka. Typicky dosahují 1 – 5 μm v průměru a 1 – 500 μm v délce. Jejich délka však může být dostatečná k tomu, že mohou způsobit elektricky vodivé spojení mezi místy s rozdílným potenciálem a způsobit tak elektrický zkrat. Touto problematikou se budeme zabývat až později. Z počátku jejich růstu jsou whiskery jehlicovité a v pokročilejší fázi růstu jsou spíše vláknité nepravidelné formy [14]. Názorná ukázka je na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Cínový whisker zachycený elektronovým mikroskopem[14].

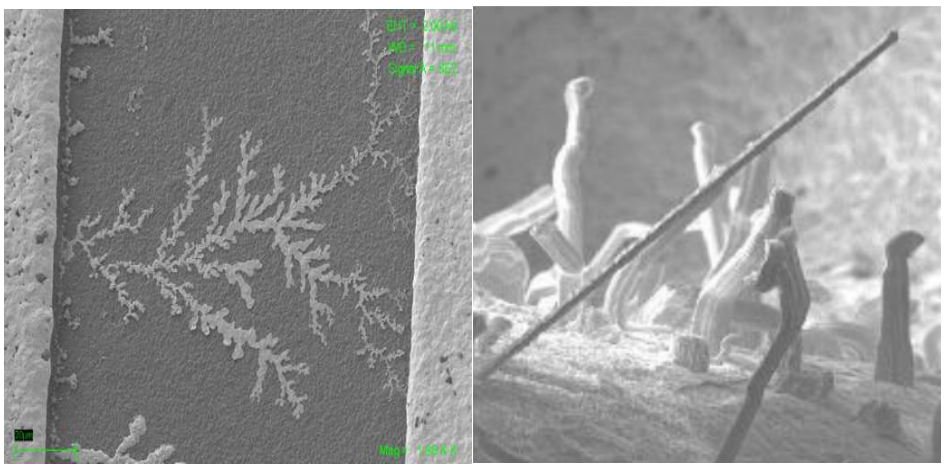
Další charakteristickou vlastností cínových whiskerů je, že jejich průřez je téměř konstantní a na povrchu jsou vidět podélné pruhy (viz obr. 4.2) či kruhy po obvodu (viz obr. 4.3).





Obr. 4.2 Podélné pruhy na povrchu Sn whiskeru [23]. Obr. 4.3 Kruhy po obvodu Sn whiskeru [23].

Často se whiskery zaměňují za dendrity, které jsou běžně tvořeny elektrochemickými migračními procesy. Z tohoto důvodu je třeba poznamenat, že whiskery a dendrity jsou dva odlišné jevy. Whiskery mají obecně tvar velmi tenkého jednotlivého vlákna nebo vousu v podobě výstupku, který vystupuje ve směru osy-z ven z povrchu. Dendrity se vyskytují ve formě „sněhové vločky“, což znamená, že se větví, na rozdíl od whiskerů. Dalším odlišným znakem od whiskerů je to, že dendrity rostou podél povrchu.

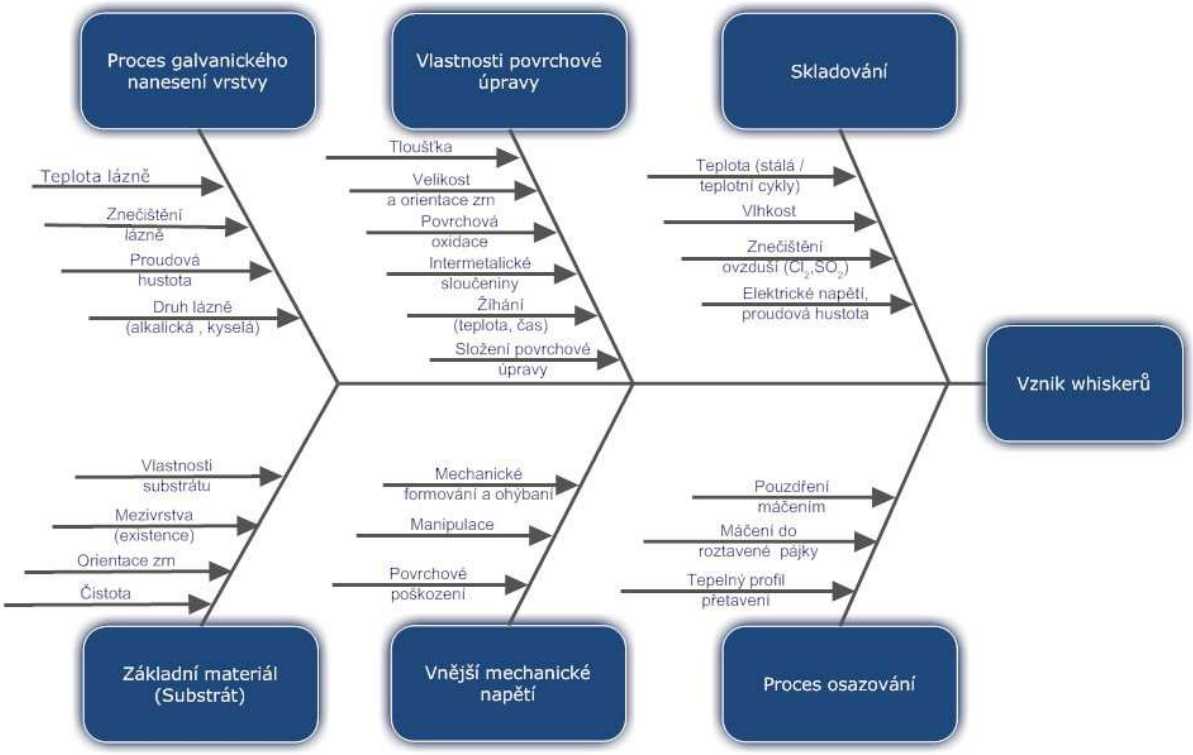


Obr. 4.4 Dendrity vs Whiskery [26].

4.2 Faktory ovlivňující růst whiskerů

Faktorů ovlivňujících tvorbu a růst whiskerů je celá řada. Souhrn jednotlivých faktorů je přehledně zpracován pomocí Ishikavova diagramu na obr. 4.5. Mezi základní faktory ovlivňující vznik whiskerů můžeme zařadit:

- napětí v tlaku v povrchových vrstvách materiálové struktury
- atomovou difúzi
- rekrystalizaci



Obr. 4.5 Ishikavův diagram faktorů ovlivňujících vznik whiskeru [15].

4.2.1 Vliv napětí v tlaku

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.

To může být způsobeno:

- vznikem intermetalických útvarů
- mechanickým namáháním, např. ohybem
- korozí cínu
- rozdílným součinitelem teplotní roztažnosti mezi cínovou žárově či galvanicky nanesenou vrstvou a podkladem
- škrábanci nebo vrypy v pokovení nebo na podkladovém materiálu

4.2.2 Vliv teploty

Podle [18] se zdá být neoptimálnější teplota pro růst whiskerů 60 °C. Jiné prameny [19] zase uvádějí teplotu 25 °C, což je teplota blízká rekrystalizační teplotě (30 °C) cínu. Naopak podle [20] přestávají whiskery růst při teplotě vyšší než 150 °C a teplotě nižší než -40 °C.

4.2.3 Vliv tlaku

Chang a Vook provedli experiment závislosti růstu whiskeru na tlaku. Ukázalo se, že za vysokého vakua nebyl pozorován růst whiskerů na rozdíl od přítomnosti atmosférického tlaku.

4.2.4 Vliv vlhkosti

Zvýšená vlhkost (>85 %), zvláště pak kondenzace vody na cínovém povrchu vede k jeho korozi a tvorbě povrchového oxidu. Tyto dva faktory, především tvorba povrchové oxidu, mohou být další příčinou vzniku napětí uvnitř cínové vrstvy.

4.2.5 Vliv elektrického pole

Nebyl prokázán akcelerační vliv na růst whiskeru za přítomnosti elektrického pole. Whiskery se však vlivem elektrostatických sil ohýbají a zvyšují tak pravděpodobnost zkratu [15].

4.2.6 Vliv proudu

Podle [21] byl zkoumán efekt proudu a žíhání na lesklém a matném cínu po osmiměsíčním stárnutí. Průchodem elektrického proudu u lesklého cínu, ať už s žíháním nebo bez žíhání, se whisker prodloužil přibližně na dvojnásobek. Naopak u matného cínu proud působil proti růstu, ale řádově o jednotky procent. Z předchozího experimentu plyne, že nelze jednoznačně usoudit, zda má proud pozitivní či negativní dopad v obecném měřítku [22].

4.2.7 Vliv intermetalických slitin

Tento děj vede k tvorbě intermetalické sloučeniny $\mathbf{Cu_6Sn_5}$ a projevuje se zejména u měděného podkladu pokoveného cínovou vrstvou, kde atomy mědi difundují mezi hranice zrn (krystalitů) cínu. Růst intermetalické sloučeniny je typický fyzikální děj založený na difuzi a je úměrný teplotě s mocninou $e^{-\frac{Q}{RT}}$, kde Q je aktivační energie, R je Boltzmanova konstanta a T je teplota [24].

4.2.8 Vliv tloušťky nanesené vrstvy

U tohoto vlivu záleží především na jaký substrát je vrstva cínu nanesena. Obecně platí, že čím tenčí vrstva, tím větší výskyt whiskerů. Např. podle [24] byl největší výskyt whiskerů prokázán při tloušťce mezi 2 až 5 μm a to na Cu substrátu.

4.3 Nepříznivé účinky whiskeru

Výskyt whiskerů představuje velmi závažné nebezpečí pro správnou funkci a spolehlivost elektronických zařízení. Problém spolehlivosti cínových whiskerů byl poprvé zmíněn u pokadmiovaných (Cd) filtrech během druhé světové války. V roce 1948 se Bellův telefonický systém potýkal s whiskery na pokadmiovaných filtrech a zahájil program výzkumu růstu kovových whiskerů, jenž byl poprvé zveřejněn v technické literatuře roku 1951.

V roce 1975 Evropská vesmírná agentura zaznamenala problémy s cínovými whiskery a naléhavě doporučila, že povrchy, které mohou podporovat růst whiskerů, jimiž jsou cín, kadmium a zinek, musí být vyloučeny z výroby vesmírných lodí. Agentura také zmínila, že alternativní úpravou, která nepodporuje růst whiskerů, je 60%Sn40%Pb. Tato doporučení byla pravděpodobně prvními veřejnými prohlášeními o tom, že kovy, které podporují tvorbu whiskerů (Sn, Cd, Zn) musí být vyloučeny z výroby životně důležitých zařízení, jako jsou zařízení pro kosmické lodě [14].

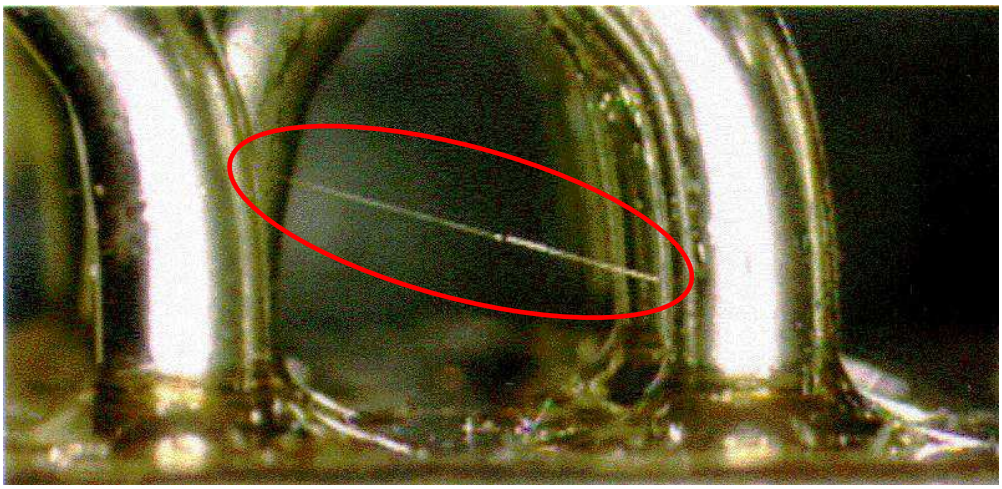
Růst whiskerů byl pozorován zejména u vývodů elektronických součástek, na kovových krytech a stínících prvků, na povrchu galvanicky upravených desek plošných spojů a zejména pak mezi kontaktními špičkami konektorů. Stupeň rizika destrukčních vlivů whiskerů na funkci zařízení významně roste se stupněm miniaturizace součástek i zařízení [23].

Mezi základní formy poruch můžeme zařadit:

- trvalý elektrický zkrat
- krátkodobý elektrický zkrat
- volně se pohybující úlomky whiskeru
- vznik elektrického oblouku

4.3.1 Trvalý elektrický zkrat

Elektricky vodivý whisker může vytvořit elektrický zkrat spojením dvou vodičů se vzájemně různými potenciály. Tento jev nastává zejména v elektrických obvodech s velkou impedancí a relativně malým napětím. Experimentálně bylo zjištěno, že whiskerem může protékat trvale proud o velikosti přibližně 10 mA [23].



Obr. 4.6 Whisker rostoucí z jednoho vývodu směřující k druhému vývodu el.mag relé [26].

4.3.2 Krátkodobý elektrický zkrat

Jde o přechodný jev, kdy po určitý čas jsou spojeny dva vodiče se vzájemně různými potenciály. Často pak dojde k přetavení nebo odpaření whiskeru. Při krátkodobém zkratu může whiskerem téct proud větší než 50 mA.

4.3.3 Vznik volně se pohybujících úlomků whiskerů

Úlomky whiskeru mohou vznikat v zařízeních, kde se vyskytují mechanické vibrace nebo šoky. Tyto úlomky pak mohou poškodit optické soustavy, mikromechanické struktury MEMS nebo mohou opakovaně způsobit trvalé nebo krátkodobé elektrické zkraty mezi vývody elektronických součástek, špiček konektorů či vodičů v horším případě i s nevratnými důsledky pro funkci zařízení.

4.3.4 Vznik elektrického oblouku odpařením whiskeru po zkratu

Při specifických obvodových podmínkách zejména za sníženého atmosférického tlaku může dojít při zkratu k vypaření materiálu whiskeru a vzniku velmi destruktivního jevu, tedy vzniku elektrického oblouku. Vzniklým výbojem může protékat proud až o velikosti několika set ampér, dokud nedojde k zhasnutí oblouku. Vzhledem k tomu, že za sníženého atmosferického tlaku je pro zapálení oblouku potřebná energie menší, je toto nebezpečí mimořádně vysoké v případě elektronických zařízení u vesmírné, letecké nebo raketové elektronické výstroje.

Obr. 4.7 Destrukce relé vyvolána vznikem elektrického oblouku.

4.4 Mechanismus růstu whiskerů

Experimentální výsledky jsou nepředvídatelné a neopakovatelné. Whiskery se mohou objevit během několika dnů po nanesení cínu nebo se nemusí objevit po několik let. I přes to, že mechanismus růstu whiskerů se zkoumá několik desetiletí (téměř 60 let), doposud není znám přesný popis mechanismu růstu whiskerů.

Existují však čtyři teorie vysvětlující jejich vznik a vývoj:

- teorie dislokací
- teorie rekrystalizace
- teorie prasklého oxidu
- teorie The End Game

Teorie The End Game, kterou popsal v publikaci s názvem Theory of Tin Whisker Growth "The End Game" Joe SmetanaTato se zdá být nejkomplexnější.

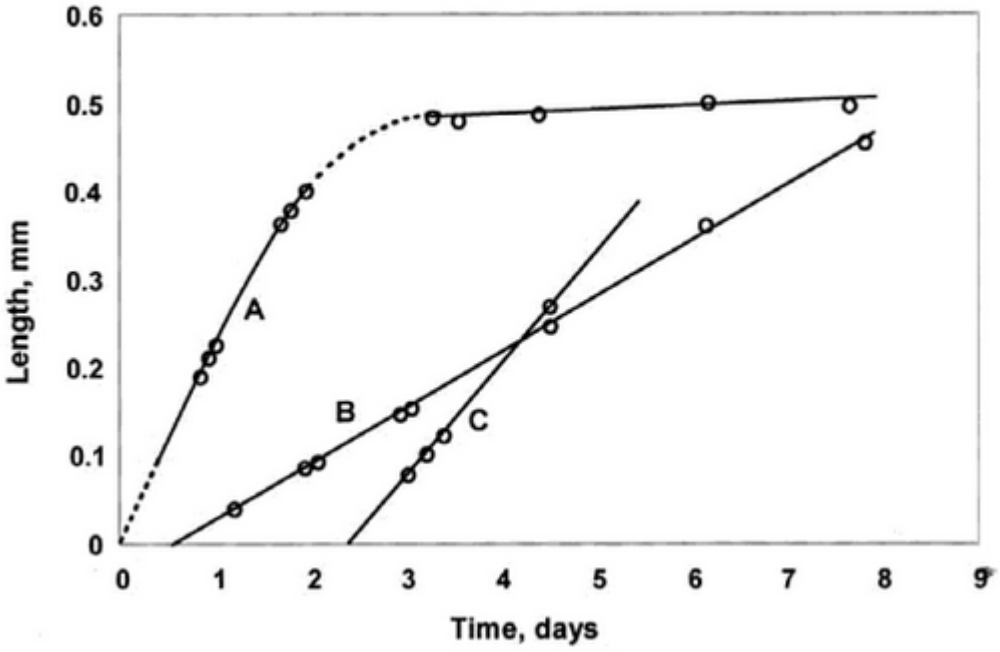
4.4.1 Teorie dislokací

Dislokace jsou defekty trojrozměrných krystalických pevných látek sestávajících z dalších atomů uspořádaných v řadě v jinak ideální krystalické struktuře mřížky. Tyto defekty hrají roli u mnoha jevů, jako jsou difuze a elektrický odpor. Dislokace byly základem první teorie navržené pro mechanismus růstu cínových whiskerů. První teorie dislokací byla publikována v roce 1952. Peach navrhl teorii šroubovité dislokace, kde se atomy cínu šroubovitě pohybovaly od středu po špičku whiskeru na níž se uložili. Tato teorie však byla rychle vyvrácená pozdějšími experimentálními daty.

Další teorii navrhly v roce 1953 Koonce a Arnold, kteří z experimentálních dat zjistili, že whiskery vyrostly kontinuálním hromaděním atomů cínu na základně whiskeru a ne na špičce, jak tvrdil Peach. Tato teorie se stala základem pro vytváření dislokací. Frank a Eshelby nezávisle navrhli difusní omezení dislokačního mechanismu, kde hnací silou pro vytváření dislokací a jejich pohyb bylo napěťové pole vytvořené oxidací povrchu. Pro pohyb dislokací bylo nutné mít napěťové pole vytvořené buď externě nebo interně. Eshelbyho model předpokládal vnitřní zdroje jednoduchých prismatických dislokací, které rozšířily hranice pro vytváření

whiskerů ze zrn, které po sobě klouzaly. Frankův model se zase týkal rotujících hran dislokací. Oba nakonec prohlásili, že jejich modely byly shodné s modelem Koonce a Arnolda.

Dalším významným přínosem byla studie provedena Fisherem a kol., kde zpozorovali, že na pocínovaném ocelovém vzorku drženém v metarulgické svorce vyrostlo během několika dnů hojný počet whiskerů (obr. 4.8). V jednom experimentu vypěstovali první whisker vyrostlý při aplikaci externě aplikovaných napětí. Při namáhání 8000 Mpa některé whiskery rostly rychlostí 10000 A/s. Samovolně rostoucí whiskery (bez vnějšího napětí) rostly rychlostí ve zlomcích 1 A/s. Tato data demonstrovala, že růst whiskerů je spojen s tlakovým namáháním.



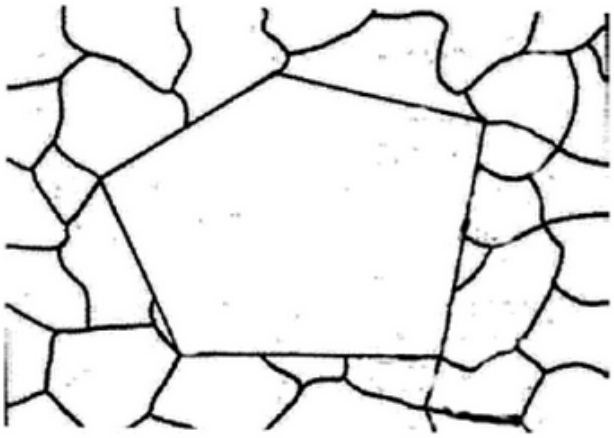
Obr. 4.8 Průběh růstu třech rozdílných whiskerů (A, B, C) vyrostlých na pocínované oceli a upínacím tlaku 8000 Mpa [14].

V roce 2003 Lebret a Norton však uvedli z jejich pozorování, že whiskery a jejich základová zrna byly bezdislokační a neobsahovaly žádné vady. Tímto prohlásili, že dislokační mechanismy nejsou potřebné pro růst whiskeru a tato teorie je tak nepoužitelná.

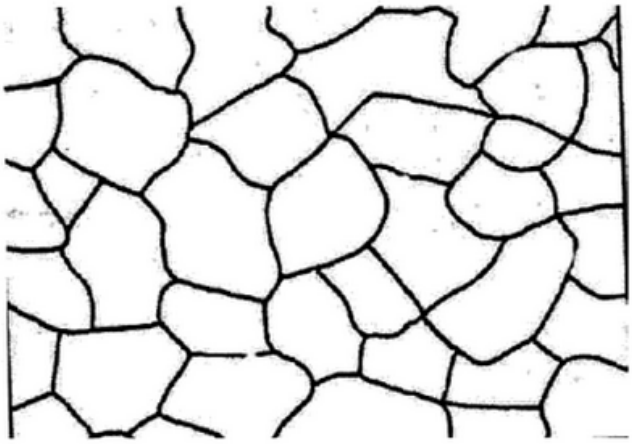
4.4.2 Teorie rekrystalizace

Rekrystalizace je jev, kde krystalická pevná látka transformuje svou vnitřní strukturu ze struktury s vysokým vnitřním napětím a relativně malých zrn na strukturu s malým vnitřním napětím a relativně velkých zrn. Rekrystalizační transformace redukuje celkové plochy zrn a hustotu defektů na jednotku objemu. Normální rekrystalizace však nevyžaduje hromadný transport atomů z jedné oblasti na jinou [14].

Existovalo několik studií, které odvodily možnosti rekrystalizace na základě experimentálních dat, ale žádná neměla přímý metalografický důkaz rekrystalizace. V roce 1963 Glazunova a Kudryavtsev uvedli, že cínové vousy jsou zřetelná forma rekrystalizace. V roce 1982 se Kakeshita a kol. domnívali, že whiskery rostou rekrystalizováním zrn a ukázali schéma rekrystalizujících zrn formujících se v oblasti menších, vysoce namáhaných zrn (obr. 4.9 a obr. 4.10). Kakeshita však neměl žádný experimentální důkaz pro demonstraci existence rekrystalizovaných zrn.



Obr. 4.9 Schéma struktury sekundární rekrystalizace zrna, ve kterém jedno zrno roste na úkor jeho sousedů [14].



Obr. 4.10 Schéma struktury rekrystalizovaného zrna ukazující rekrystalizace zrna, které mají stejnou velikost a jednotný tvar [14].

Dalším nepřímým důkazem rekrystalizace bylo to, že orientace whiskerových zrn byla rozdílná od převažující orientace zrn, jak bylo určeno práškovou rentgenovou difrakční metodou. V roce 2004 Boguslavsky a Bush diskutovali o rekrystalizačním principu a jak by se dal využít při růstu whiskerů [14].

Teorie vzniku whiskerů musela pozorovat zejména kinetiku a zánik růstu whiskerů. Teoretická hypotéza musí být konzistentní s přímým a vizuálním pozorováním prováděním mikrostrukturální analýzou. To znamená, že každá hypotéza musí demonstrovat, že mikrostruktury whiskerových struktur jsou v souladu s očekávanou morfologií.

Tempo růstu samovolně rostoucích whiskerů je nízká, a proto se pro experimenty měří při nějakém upínacím tlaku. V tab 4.1 jsou shromážděna data indikující rychlost růstu whiskerů od 0,01 do 1,5 A/sec. Tempo růstu whiskerů je relativně pomalá metalurgická reakce. Např. tempo růstu whiskeru v první fázi růstu bylo hlášeno 10000 – 100000 A/sec. Tempo hranic zrn migrujících během rekrystalizace mohlo být vyšší než 10^5 A/sec a u monokrystalů materiálu jako je germanium $2x10^4$ A/sec. Množství modelů založených na různých konceptech má vytvořit snadno pozorované tempo růstu whiskerů na základě difuze hranic zrn na Sn.

Tab 4.1 Tempo růstu samovolně rostoucích whiskerů na různých materiálových substrátech [14].

Plating Type	Whisker Growth Rates (Å/sec)	Reference
Sn on brass	0.100–1.500	Glazunova and Kudryavtsev [10]
Sn on copper	0.080–0.840	Glazunova and Kudryavtsev [10]
Sn on zinc	0.240	Glazunova and Kudryavtsev [10]
Sn on copper-clad steel	0.008–0.012	Zakraysek
Sn on quartz	0.010–0.340	Ellis et al. [37]
Sn on steel	0.032–0.075	Ellis et al. [37]
Sn on Fe on brass	0.002–0.008	Ellis et al. [37]

4.4.3 Teorie prasklého oxidu

Teorie prasklého oxidu (COT) vykládá otázky o hybné síle, kinetice a specifických atomových mechanismech spojených s růstem whiskerů odlišněji, než rekrystalizační koncept. Existují tři nezbytné podmínky pro spontánní růst cínových whiskerů. První podmínkou je adekvátní kinetika hromadného transportu za pokojové teploty. Toto je snadno splněno v případě cínu, protože cín má nízký bod tání a tudíž difuze hranic zrn v Sn za pokojové teploty je adekvátní k udržení pozorovatelné míry růstu whiskerů (typicky 0,01-0,10 μm/sek). Druhou podmínkou je hybná síla. COT teorie definuje hybnou sílu jako kombinaci chemických afinit a mechanických namáhání, které v této kombinaci způsobí tlakové namáhání. Třetí podmínkou COT teorie je lokálně slabá nebo nějakým způsobem narušená vrstva povrchového oxidu.

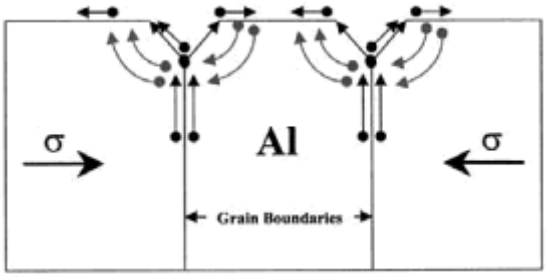
4.4.3.1 Tlakové napětí jako hybná síla:

Původ tlakových napětí může být mechanický, teplotní, chemický nebo některou kombinací předchozích. Chemické síly jsou výsledkem reakce mezi Sn a Cu při pokojové teplotě za vzniku intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5. Difuze Cu ze substrátu do Sn vrstvy vytváří tlakové napětí uvnitř Sn. Tlakové napětí uvnitř Sn vrstvy může být při pokojové teplotě uvolněno atomovým přeskupením pomocí difuze na hranicích zrn. Atomy Sn difundují podél hranic zrn ke kořeni whiskeru, čímž posunují whiskerové zrno vzhůru. Z tohoto důvodu je růst whiskeru poháněn

tlakovým napětím. Protože reakce mezi Sn a Cu může nastat při pokojové teplotě, pokračuje tato reakce tak dlouho, dokud jsou dostupné volné atomy Sn a Cu. Pokračující růst intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 udržuje tlakové napětí, a to pak udržuje růst whiskeru [14].

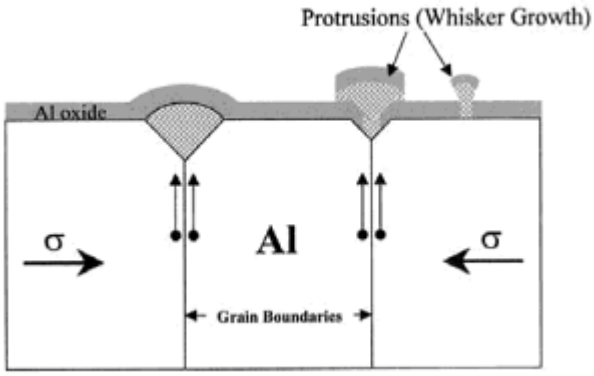
V teorii prasklého oxidu je tlakové napětí nutnou, ale nedostatečnou podmínkou pro růst whiskerů. Přítomnost oxidu na Sn povrchu je rovněž nutná. Byly provedeny experimenty na hliníku (Al) za účelem zdůvodnění vlivu povrchového oxidu na tvorbu whiskerů. V ultra vysokém vakuu se na pod tlakem Al površích nenašly žádné uzlíky. Uzlíky rostly pouze na Al, jestliže byl povrch zoxidován. Na základě Nabarro-Herrinogva modelu nezoxidovaný povrch umožňuje uvolnění napětí, čímž nevznikly žádné uzlíky. V Nabarro-Herrinogva modelu dochází k uvolnění napětí v každém jednotlivém zrnu. Tím je uvolnění napětí rovnoměrné po celém povrchu a nedochází tak k růst whiskerů. Z tohoto důvodu je tvorba whiskerů nebo uzlíků známá jen u některých kovů (jako např. Al a Sn) které oxidují [14].

Ušlechtilé kovy jako zlato (Au) neoxidují a proto podle této teorie u nich není znám růst uzlíků nebo whiskerů.



Obr. 4.11 Schematický diagram zobrazující pohyb atomů polykrystalické tenké vrstvy pod tlakem [14].

Na obr. 4.11 Šipky indikují směr atomů ke zmírnění napětí při nezoxidovaném povrchu.



Obr. 4.12 Schematický diagram zobrazující uvolnění lokálního napětí díky prolomení oxidu [14].

Zde (obr. 4.12) je vidět vytvoření podmínek pro růst whiskeru při zoxidované vrstvě.

4.4.4 Teorie The End Game

Ze všech předchozích tvrzení je zřejmé, že teorie dislokací není teorií správnou a že rekrystalizace hraje určitou roli v růstu whiskeru. Doposud však nebyl předložen konkrétní vysvětlující model.

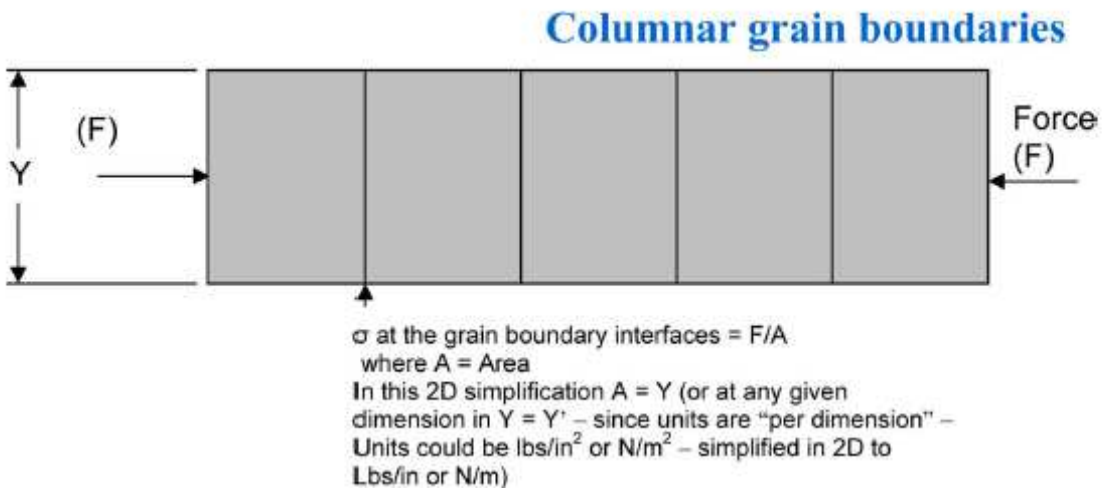
Vznikla tedy teorie The End Game, která má dva nezbytné předpoklady pro růst Sn whiskeru

i. Atomy, které se nacházejí v hranici základny krystalového zrna whiskeru jsou v průměru na nižších energetických úrovních, než atomy z okolních oblastí.
ii. V hranici základny krystalového zrna whiskeru musí být volná místa, do kterých se mohou atomy z okolních oblastí pohybovat.

4.4.4.1 Počáteční podmínky

Na obr. 4.13, který je zjednodušený, můžeme vidět typický pocínovaný deposit, kde hlavním rysem jsou sloupcovité hranice zrn. Tlakové namáhání σ na hranicích zrn je výsledkem působící síly F. Toto tlakové namáhání může být způsobeno mnoha zdroji. Např. mechanickými silami, silami vytvořenými změnami

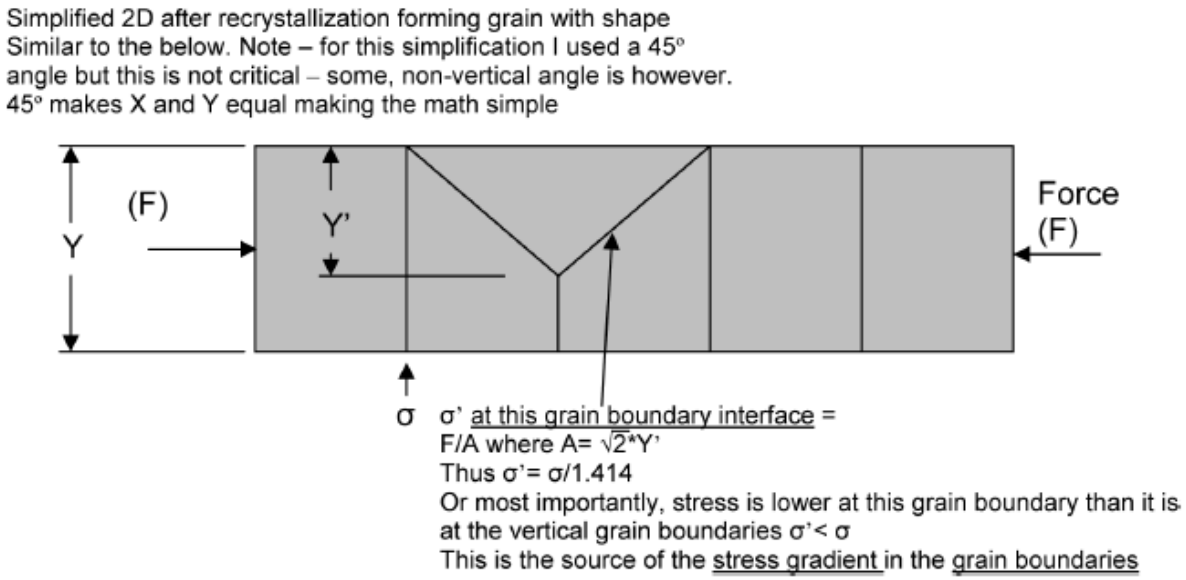
teplot a rozdíly teplotních koeficientů roztažnosti.



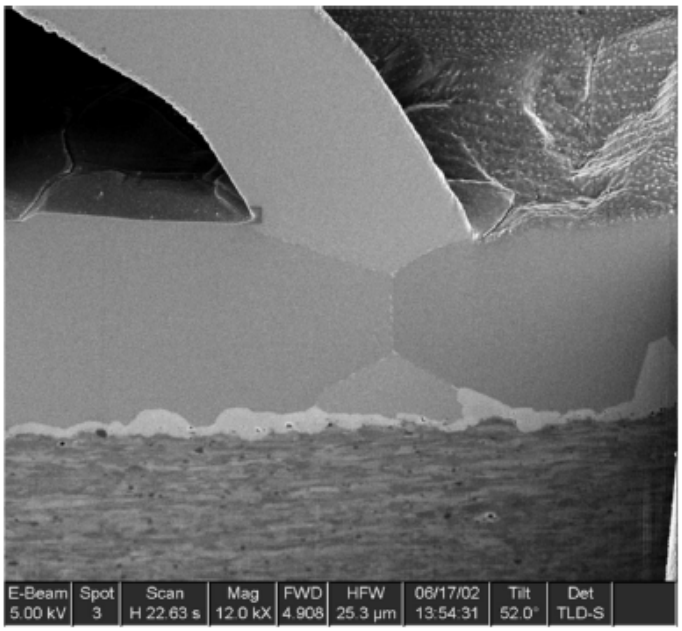
Obr. 4.13 Zjednodušená 2D reprezentace pocínovaného depositu [17].

4.4.4.2 Rekrystalizace a úhel sklonu hranic zrn

Obr. 4.14 ukazuje příklad toho, jak vypadají hranice cínových zrn po rekrystalizaci. Rekrystalizace může vést k tvorbě šikmých hranic zrn, jak je znázorněno na tomto obrázku. Tento úhel sklonu hranic zrn má za následek nižší napětí v oblastech hranic zrn ve srovnání s napětím atomů ve vertikálních hranicích zrn. Příčné řezy zaostřené svazkem iontů (FIB) mají stále identifikovány úhel sklonu na základně whiskerových zrn. Příklad FIB řezu je na obr. 4.15, kde jsou vidět typické šikmé hranice whiskerových zrn.



Obr. 4.14 Cín po rekrystalizaci [17].

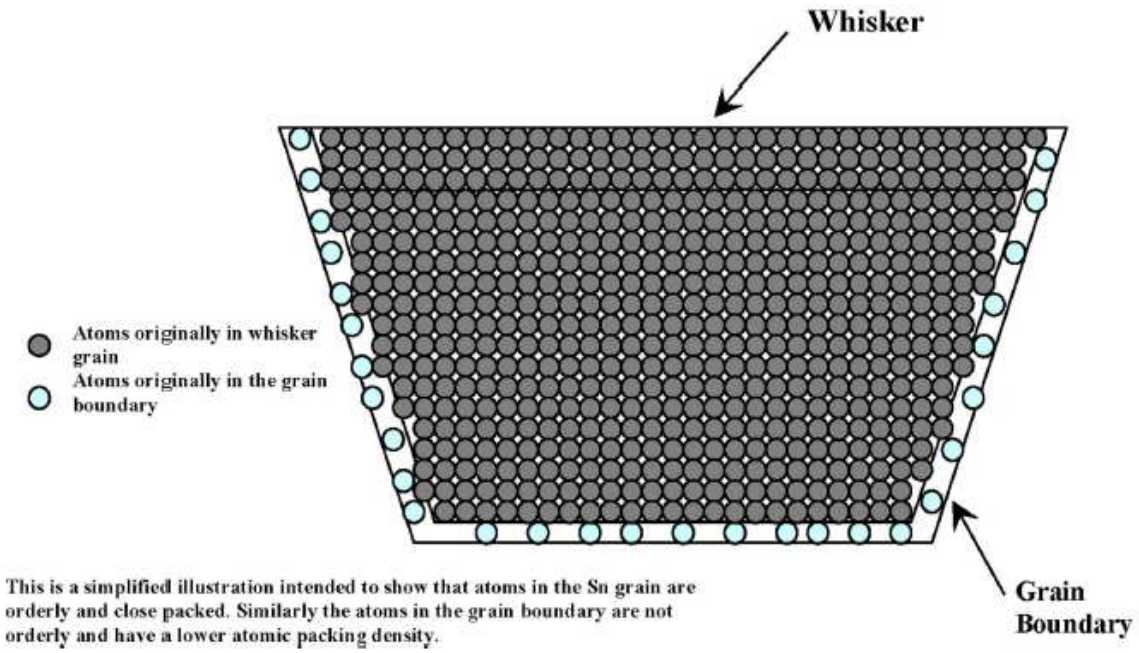


Obr. 4.15 Typické hranice zrn Sn whisker [17].

4.4.4.3 Klíč k mechanismu růstu whiskerů

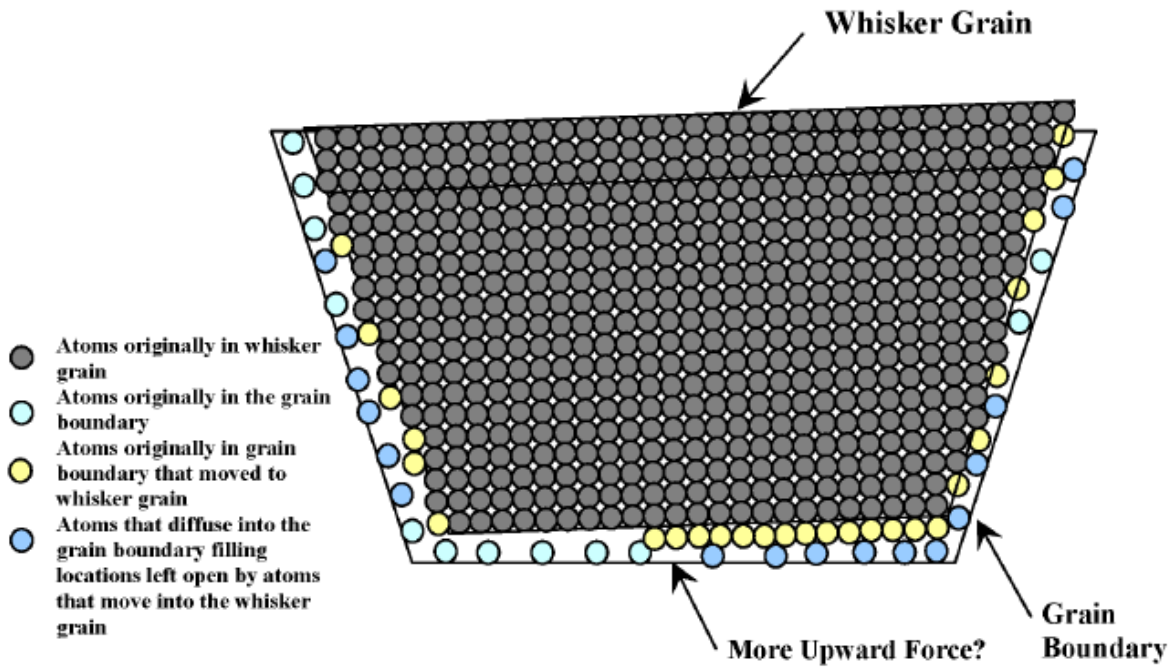
Klíčem k mechanismu růstu Sn whiskeru je posouvání hranic zrn. Zjednodušený 2D obr. 4.16 znázorňuje jedno cínové zrno, které se v konečném důsledku stane zrnem whiskeru poté, co proces rekrystalizace vytvoří požadované šikmé hranice zrn. V tomto reprezentativním náčrtku jsou atomy zrn whiskeru

uspořádány blízko u sebe, zatímco atomy v hranicích zrn nejsou uspořádané a mají nižší atomovou hustotu.



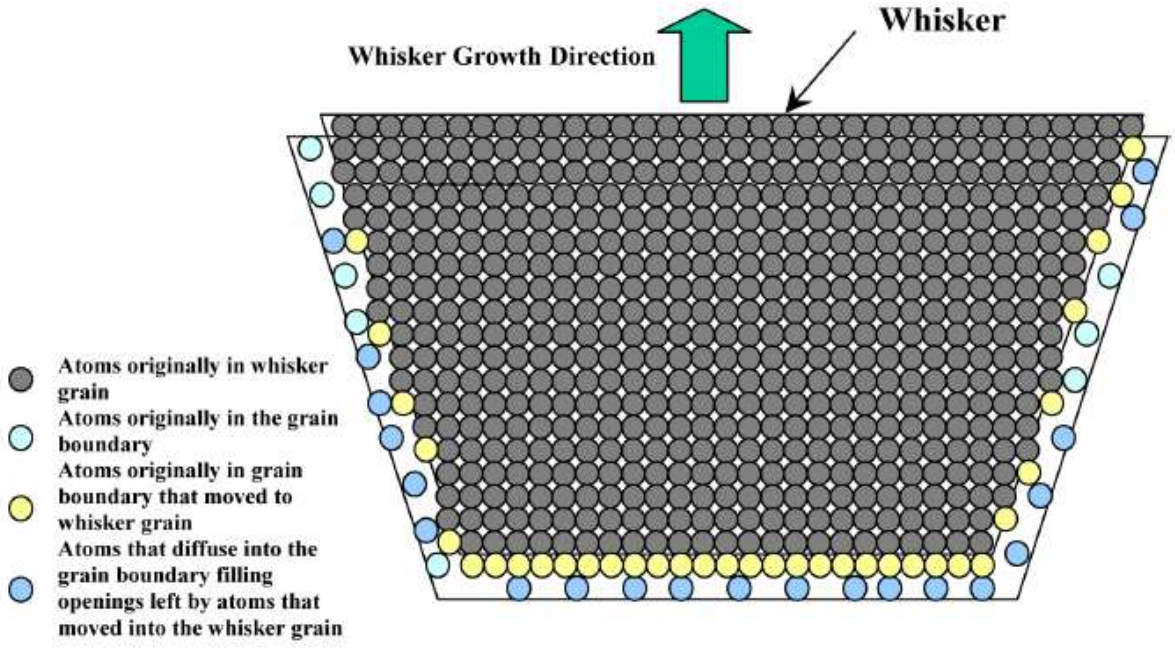
Obr. 4.16 Atomární úroveň reprezentující zrno whisker [17].

Obr. 4.17 ukazuje, co se stane, když se začne posouvat hranice zrn. Původní atomy v zrně whiskeru(šedé) jsou uvedeny do pohybu na straně, kde dochází k posunutí hranice. Atom uvolní místo (světle modrá) v krystalické mřížce zrna whiskeru a toto místo je zaplněno atomem cínu (žluté) z hranic předchozího krystalového zrna.



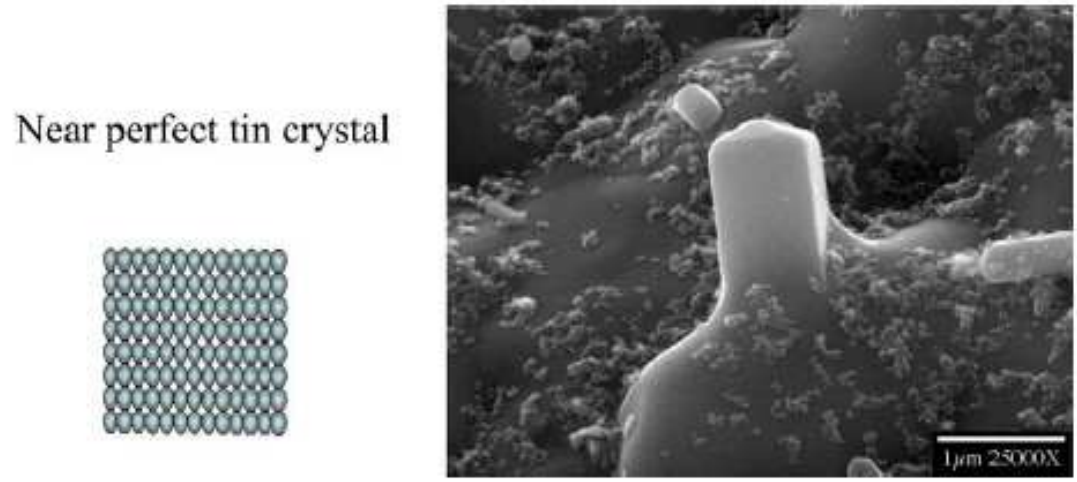
Obr. 4.17 Posunutí pravé hranice zrn [17].

Na obr. 4.18 je pokračování, kdy se začne posouvat hranice na druhé straně a opakuje se děj jako na obr 4.16 a obr 4.17. Výsledkem je vertikální směr růstu whiskeru.

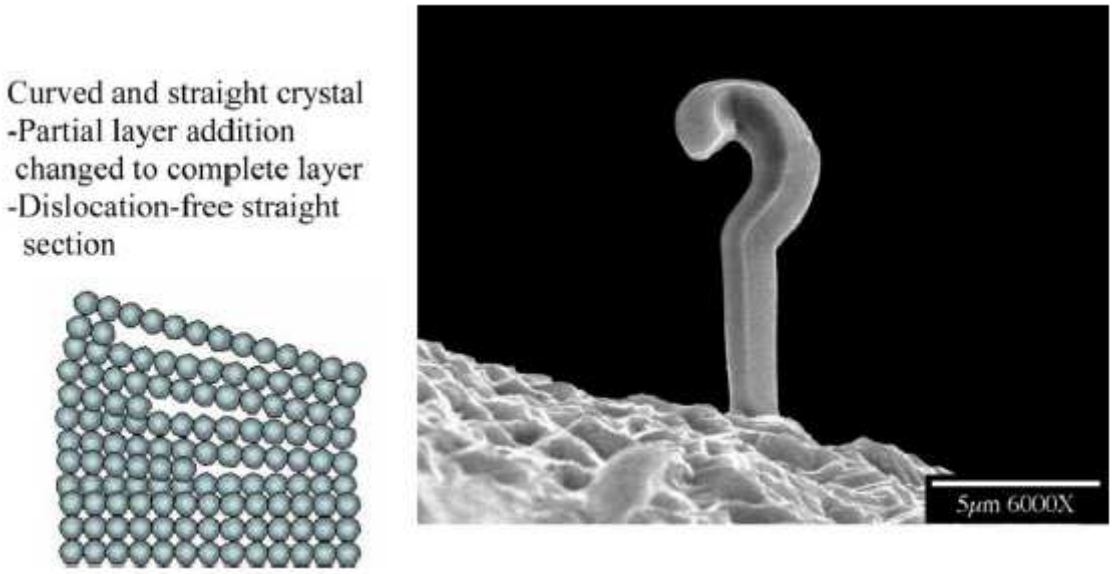


Obr. 4.18 Posunutí levé hranice zrn [17].

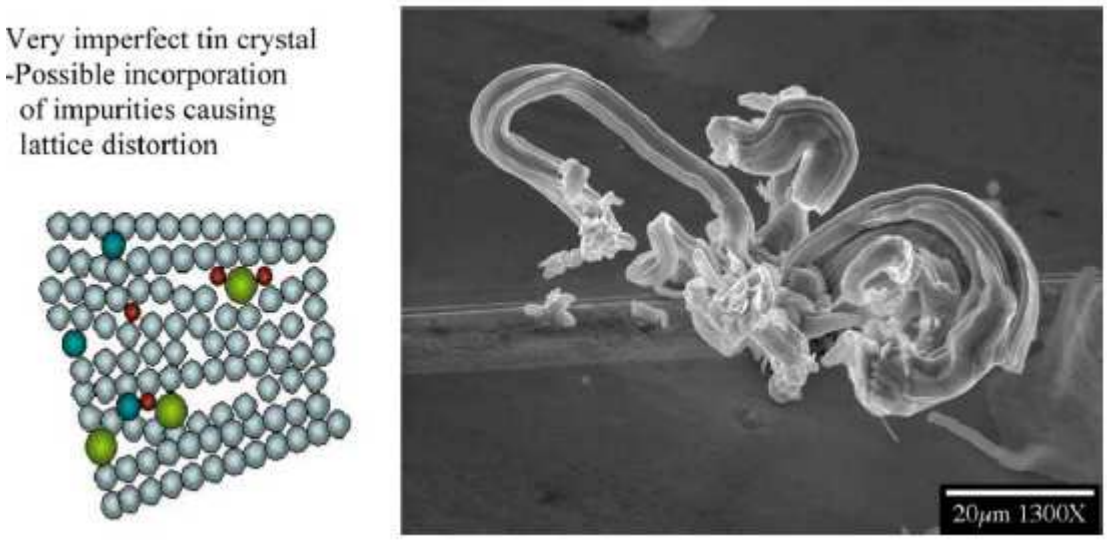
Rovnoměrné posouvání hranic znázorňuje obr 4.19, nerovnoměrné obr 4.20 a obr 4.21 znázorňuje, co by se mohlo stát, kdyby se do cínové mřížky přidali nečistoty.



Obr. 4.19 Rovnoměrné posouvání hranic [17].



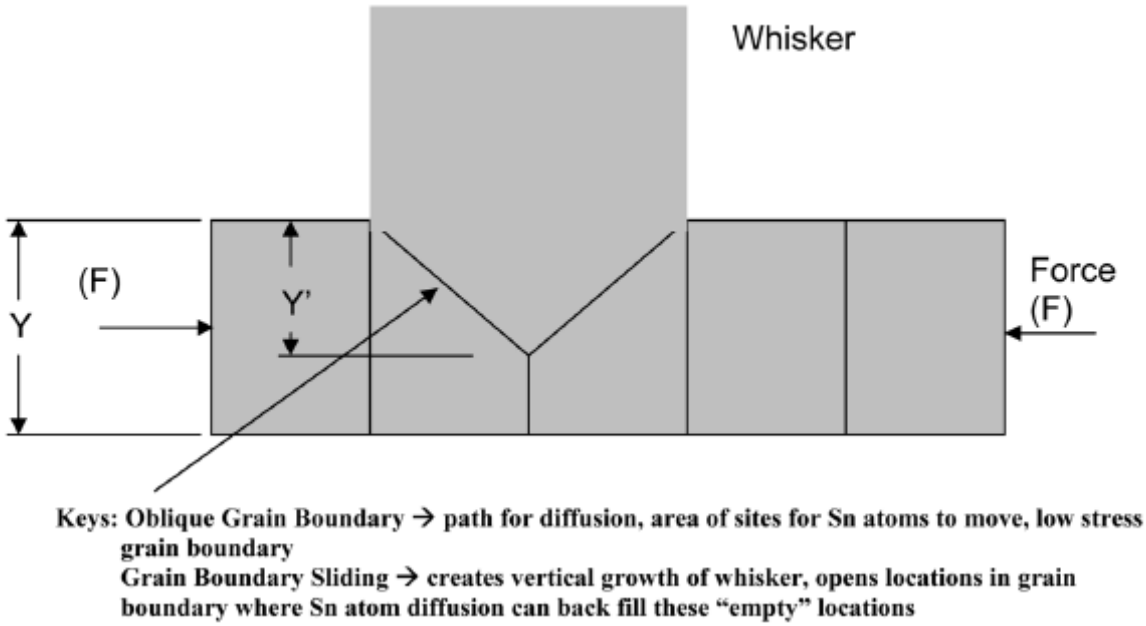
Obr. 4.20 Nerovnoměrné posouvání hranic [17].



Obr. 4.21 Přidání nečistot [17].

4.4.4.4 Shrnutí terorie The End Game

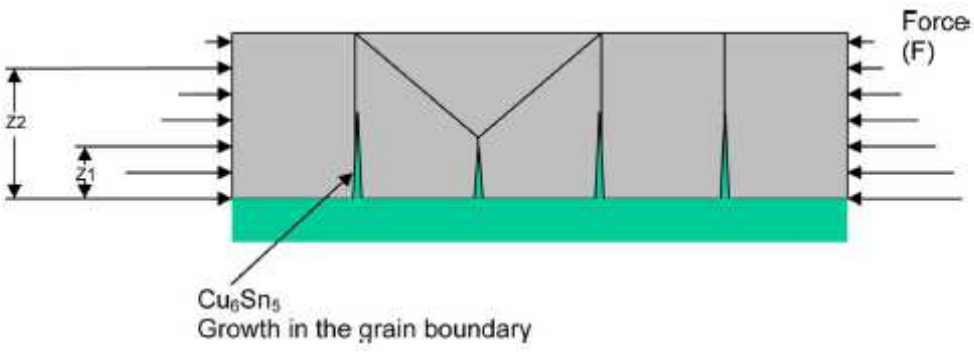
Mechanismus růstu cínových whiskerů je sumarizován na obr 4.22. Síla *F* na rozhraní šikmých hranic zrn vysvětluje vertikální i horizontální složku namáhání vzhledem k úhlu pod, kterým síla působí na rozhraní. Tím nastane posouvání hranic zrn, které má za následek přesouvání atomů z hranic zrn do zrna whiskeru. Toto přesouvání zrn je unikátní v tom, že má za následek růst zrn ve vertikálním směru, která vytvoří whisker. Tento pohyb Sn atomů z hranic zrn do Sn krystalové mřížky zrna whiskeru vytvoří volná místa v hranicích zrn, která mohou přijímat Sn atomy. Dochází k difuzi Sn atomů do méně namáhaných hranic zrn. Opakování tohoto procesu vede k přesouvání Sn atomů do základny cínového krystalu a tím k vytvoření whiskeru. Každá následující iterace tohoto procesu přidává atomy do zrna whiskeru. Proces bude pokračovat, dokud nevymizí tlakové napětí nebo se hranice zrn nespojí [17].



Obr. 4.22 Souhrn mechanismu růstu whiskeru [17].

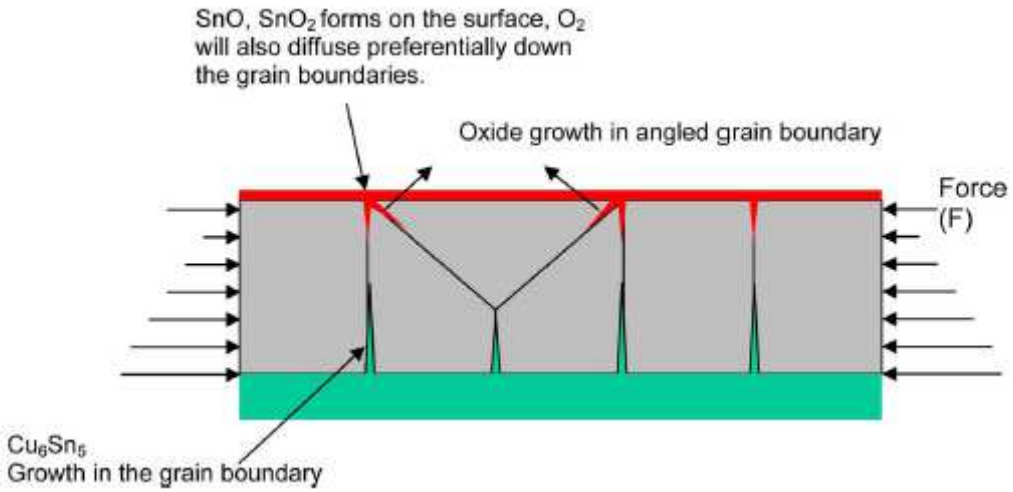
4.4.4.5 Intermetalické a oxidové účinky vzhledem k této teorii

Obr. 4.23 ukazuje pocínovaný měděný substrát. V tomto případě se na rozhraní mezi cínem a mědí tvoří intermetalické sloučeniny SnCu (hlavně Cu_6Sn_5). Cu difunduje do Sn, čímž je výsledný molární objem intermetalické sloučeniny SnCu větší než objem Sn. To má za následek, že cínová vrstva je namáhána tlakem [28]. Protože difuze Cu je výrazně rychlejší v hranicích zrn Sn než v celém jeho objemu, je růst intermetalický sloučenin větší v hranicích zrn Sn. Výsledkem je, že síla a napětí se liší v použitém substrátu, na který je nanesen cín.



Obr. 4.23 Znázornění síly vytvořené růstem intermetalické slitiny SnCu [17].

Na obr 4.24 je znázorněná oxidová vrstva na povrchu cínu difundující do hranic zrn. Tato vrstva oxidu do značné míry eliminuje vakance. Oxid bude přednostně difundovat do hranic zrn, kde vytvoří Sn0 nebo $Sn0_2$[29]. Oxid se tak stává dalším zdrojem napětí ve vrstvě cínu. Napětí generované oxidem se obecně očekává menší než napětí generované intermetalickou slitinou SnCu, což je znázorněno délkami silových vektorů na obr. 4.24.



Obr. 4.24 Znázornění oxidu difundujícího do hranic zrn [17].

Podle [30] šikmé hranice zrn vytvoří zárodečné místo pro růst whiskeru a kombinace posouvání hranic zrn a difuze oxidu do šikmých hranic zrn způsobí popraskání oxidu. To znamená, že prasklý oxid je spíše výsledkem než příčinou růstu whiskeru. Vzhledem k tomu, že molární hmotnost hydratovaného $Sn0_2$ je výrazně vyšší než suchého, tak vysoká vlhkost urychluje růst whiskeru. Nárůst $Sn0_2$ spojený s vysokou vlhkostí vzduchu zvyšuje tlakové napětí Sn vrstvy a může tak urychlit difuzi do hranic zrn [17].

4.5 Možnosti omezení růstu whiskerů

Stejně jako u teorií mechanismu růstu whiskerů není znám přesný popis pro tvorbu whiskerů, tak i v případě možných omezení tvorby whiskerů nejsou známa

univerzálně použitelná opatření k tvorbě whiskerů.

Mezi základní technologická opatření, kterými by se předešlo nebo omezilo výskytu cínových whiskerů lze zařadit:

- nepoužívat povrchové úpravy z čistého cínu (použit cín s příměsemi)
- je-li nutné použít cín, tak použít povrchové úpravy z matného cínu
- použít mezivrstvu z dalšího kovu k vytvoření ochranné bariéry pod cínovou vrstvou
- nanášet povrchové vrstvy cínu ve větších tloušťkách
- minimalizovat tlakové namáhání cínové vrstvy
- použít technologii žíhání a přetavení k uvolnění mechanických napětí v cínových vrstvách
- nevystavovat cínové vrstvy teplotám 25 – 75 °C
- použití vakuového čištění cínové vrstvy

4.5.1 Povrchová úprava čistý cín

Jedna z nejúčinnějších metod, jak zabránit tvorbě cínových whiskerů, je nepoužívat povrchové úpravy z čistého cínu. Použitím příměsí lze značně zamezit tvorbě whiskerů. U olovnatých pájek SnPb s přídavkem alespoň 3 % olova se whiskery samovolně nevyskytují, což je způsobeno rozdílnými velikostmi zrn cínu a olova. Se schválením směrnice RoHS však toto provedení není dnes možné. Lze použít i bezolovnaté slitiny Ni – Pd nebo Ni – Au. Tyto slitiny jsou ovšem velmi drahé.

4.5.1.1 Povrchová úprava matný čistý cín

Tato povrchová úprava je k tvorbě whiskerů méně náchylná než povrchová úprava lesklým cínem. Matný cín se od lesklého cínu liší velikostí zrn a obsahem

uhlíku. Matný cín má větší velikost zrn s menším vnitřním napětím a obsahuje méně uhlíku oproti lesklému cínu. Tvorba whiskeru je pravděpodobnější u cínu s menšími zrny a větším obsahem uhlíku, tedy u cínu lesklého [23].

Matné cínování se uplatňuje především při pokovování elektronických součástí a jeho hlavní úlohou je vytvoření dobře elektricky vodivé a pájitelné vrstvy na povrchu vodiče bez zbytečných organických přísad. Nedoporučuje se u výrobků s nároky na vysokou spolehlivost.

4.5.1.2 Povrchová úprava lesklý čistý cín

Tato povrchová úprava je nejvíce náchylná k tvorbě whiskerů s největší pravděpodobností kvůli přídavku lesotvorných přísad. Whiskery mohou dosahovat délky 100 – 300 μm. Její používání se nedoporučuje v aplikacích, které jsou choulostivé na růst whiskerů. Při použití této úpravy je doporučené použít niklovou mezivrstvu.

Lesklé cínování nachází uplatnění především v potravinářském průmyslu, kde se využívá nulové toxicity a nezávadnosti kovového cínu. Nanáší se tak na všechny kovové komponenty, které jsou v občasném nebo trvalém kontaktu s potravinami.

4.5.1.3 Povrchová úprava saténově lesklý čistý cín

Tento typ cínu je vzhledem k tvorbě whiskerů mezi matným a lesklým cínem. Je rizikovější než matný, ale bezpečnější než lesklý cín.

4.5.1.4 Vlastnosti cínových povrchových úprav

- zvyšují elektrickou vodivost pokovených součástí
- zvyšují (umožňují) pájitelnost i u dobrých elektrických vodičů, které lze jinak pájet jen s obtížemi
- potravinová nezávadnost
- základní korozní odolnost
- dekorativní vzhled

4.5.2 Mezivrstva

Jednou z prvotních metod pro omezení tvorby whiskerů je aplikování niklové mezivrstvy mezi měděný substrát (nebo Cu slitin) a cínové vrstvy, tedy Sn/Ni/Cu. Tato mezivrstva vytvoří ochranou bariéru a její doporučená tloušťka by měla být minimálně 2 μm [14].

4.5.3 Tloušťka povrchové vrstvy

Pro omezení tvorby whiskeru je potřebná dostatečné silná vrstva cínu, neboť čím tenčí vrstva, tím menší odolnost proti korozi a tím větší pravděpodobnost výskytu whiskeru. Obecně se uvádí 8 – 10 μm u lesklého cínu bez mezivrstvy a 2 μm s mezivrstvou.

4.5.4 Minimalizace tlakového namáhání povrchové vrstvy

Tlakovému namáhání je třeba předcházet už při konstrukci a výrobě zařízení. Optimální by bylo, kdyby pokovení cínem bylo provedeno až v momentě, kdy by byla součástka mechanicky dotvarovaná. To však nelze u většiny částí elektronických součástek splnit.

4.5.5 Žíhání a přetavení povrchové vrstvy

Žíháním lze docílit uvolnění vnitřního napětí a zvětšení velikosti zrn, což přispívá k omezení tvorby whiskerů.

Žíhání je proces, kdy se nanesená vrstva cínu zahřeje pod teplotu tavení a poté se rychle ochladí. Žíhání je podle [27] účinnější u tlustších (10 μm) než u tenčích vrstev (2 μm). Tento proces je však možný jen u matného cínu, neboť u cínu lesklého se tvoří puchýřky.

Proces přetavení je naopak proces, kdy se vrstva cínu ohřeje nad teplotu tání a poté se pozvolna ochladí. Během přetavení se uvolní vnitřní napětí ve vrstvě.

4.5.6 Vakuové čištění

Northern Electric vytvořilo vakuový nástroj k odstranění whiskerů z pocínovaných ocelových rámů za běžného provozu a zjistilo, že whiskery nemají tendenci se znovu objevovat na takto ošetřených částech [14].

4.5.7 Použití alternativních pokovení

Jedná se o pokovení niklem, palladiem a zlatem. Tato pokovení mají však nevýhodu v tom, že neprojdou některými korozivními testy, které jsou nezbytné pro některé aplikace. Tato pokovení mají spíše místo u aplikací, které nemusí splňovat přísné korozivní testy [14].

4.5.8 Doporučení Mezinárodního institutu výzkumu cínu k omezení whiskerů

Mezinárodní institut výzkumu cínu pro zmírnění tvorby cínových whiskerů doporučuje [14]:

- Cín nanesený na mosaz by měl mít niklovou podložku, ale cín na oceli může být lepší bez podložky
- Nepoužívat lesklý cín nanesený přímo na mosaz, protože všechny povrchové úpravy lesklým cínem jsou doprovázeny extrémním růstem whiskerů.
- Tloušťka galvanicky naneseného cínu by měla být alespoň 8 μm.
- Ošetření cínové vrstvy po pokovení teplem při teplotě 180 – 200 °C po dobu jedné hodiny. Toto ošetření je potřebné především u lesklého cínu.
- Skladovací podmínky a servisní prostředí by mělo být takové, aby se zabránilo korozi základního kovu. Koroze může způsobit škodlivé namáhání cínové vrstvy.
- Žárové pokovení vykazuje mnohem menší riziko výskytu whiskerů oproti galvanickému pokovení.
- Cínově (matný nebo lesklý) olovnaté deposity o tloušťce alespoň 8 μm jsou bezpečnější a vhodné pro aplikace, kde potenciální růst whiskerů představuje velké riziko. Obsah olova je doporučen alespoň 1 %. Dalším vhodným opatřením je použití niklového nebo měděného podkladu na mosazi.
- Růstu whiskerů lze snížit použitím cínově niklových slitin, čímž se však zhorší pájitelnost.
- Použití silných vrstev pryskyřice nebo zavedení pevné izolační bariery mezi nebezpečná místa.
- Když i přes veškeré opatření whiskery vyrostou, tak je pro jejich odstranění vhodný vakuový systém.

II. Praktická část

5 Experimenty

V této části práce byly provedeny dva experimenty. Cílem obou experimentů bylo zaznamenat růst cínových whiskerů z povrchů třech typů pájek, které byly naneseny na dva druhy povrchových úprav. Dále pak byl pozorován růst whisker na povrchové úpravě HAL, na němž žádná z předchozích pájek nebyla nanesena. Vrstvy pájek byly tlakově (pnutí) a tepelně namáhány. Toto statické namáhání bylo zvoleno, protože vzorek namáhaný statickým tlakem a tepelnou zátěží simuluje běžné pracovní podmínky. Dále pak k potvrzení či vyvrácení již popsaných teorií v předchozí teoretické části.

Byly použity jak pájky bezolovnaté, tak i pájka olovnatá, aby bylo možné provést porovnání. Jejich složení a vlastnosti jsou v následující tab. 5.1. Z povrchových úprav bylo použito zlato, měď a HAL. Právě tyto materiály se v elektrotechnice velmi často používají jako povrchové úpravy desek plošných spojů, různé druhy konektorů nebo vývody součástek.

Tab 5.1 Použité pájky.

Složení pájky	Sn63%Pb37%	Sn99%Cu1%	Sn97%Cu3%
Teplota tání [°C]	183	227	240
Výrobce	Kovohutě Příbram	Kovohutě Příbram	Kovohutě Příbram

Z tabulky je vidět, že byly použity dvě bezolovnaté pájky s velkým obsahem cínu a jedna klasická olovnatá pájka. Všechny zmíněné pájky, kromě olovnaté pájky (zákaz použití), se používají pro měkké pájení a jsou určeny jak pro ruční, tak pro strojní nanášení. Pro dobrou pájitelnost bylo použito tavidlo AG Termoplast TS-81.

5.1 Experiment první

Tento experiment spočíval v tlakovém namáhání povrchu pájky hlavou šroubu a matky, která byla utažena definovaným momentem.

5.1.1 Příprava vzorků

K dispozici bylo 36 DPS typu FR4 o rozměrech 50 x 50 mm se třemi povrchovými úpravami. Na takovéto DPS (kromě HALu) byly pomocí ruční páječky naneseny postupně tři typy pájek za přítomnosti tavidla, které bylo nezbytné pro vytvoření souvislé vrstvy. Tloušťka vrstvy nebyla nijak řízena. Dále se rovnoměrně do každé DPS vyvrtaly čtyři díry, do kterých se následně vložily šrouby a matice byly utaženy dvěma definovanými momenty. Tím byla vrstva pájky mechanicky narušena a tlakově namáhána. Vytvořený vzorek je zobrazen na obr 5.1.

Obr. 5.1 Vytvořený vzorek.

Moment se určil jako součin délky ramena klíče a vyvolané síly při utahování. Byly zvoleny momenty 0,93 Nm a 3,7 Nm.

Polovina takto vytvořených vzorků byla vystavena pokojové teplotě (20-25 °C)

po dobu cca 6500 hodin a polovina teplotě 50 °C v teplotní komoře (obr 5.3) po stejnou dobu.

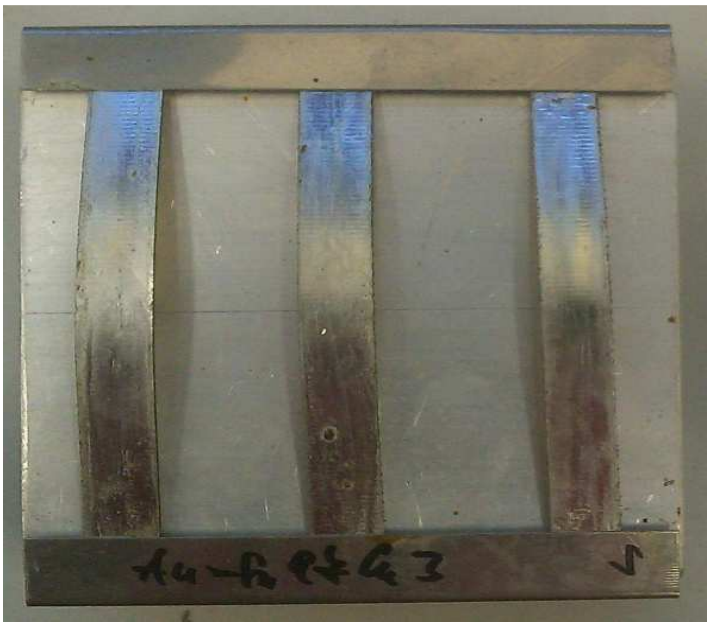
5.2 Experiment druhý

Tento experiment spočíval v tlakovém namáhání vrstvy pájky způsobeným prohnutím DPS.

5.2.1 Příprava vzorků

K dispozici bylo 36 DPS typu FR4 o rozměrech 10 x 100 mm se třemi stejnými povrchovými úpravami jako v prvním experimentu. Každá DPS (kromě HALu) byla postupně pokryta třemi typy pájek pomocí ruční páječky jako v předchozím případě. Poté se destičky upevnily do přípravků (obr 5.2), ve kterých byly ve středu prohnuty, čímž se vytvořilo pnutí ve vrstvě pájky.

Takto připravené vzorky (obr 5.2) byly rozděleny opět na polovinu. První polovina byla vystavena pokojové teplotě po dobu 9 měsíců, což odpovídá asi 6500 hodin. Druhá polovina byla vložena do teplotní komory (obr. 5.3) s teplotou 50 °C po dobu 2200 hodin a poté byla vystavena pokojové teplotě po dobu 4300 hodin.



Obr. 5.2 Přípravek k prohnutí DPS se vzorky.

5.3 Měřící pracoviště a použitá přístrojová vybavení

K realizaci experimentů byla použita následující měřici pracoviště a přístrojová vybaveni Katedry elektrotechnologie Elektrotechnické fakulty ČVUT.

K nanesení jednotlivých pájek byla použita ruční páječka. K vytvoření zvolených klimatických podmínek byla k dispozici teplotní komora (obr 5.3).

Obr. 5.3 Teplotní komora.

Pro optické zkoumání vzorků bylo k dispozici pracoviště (obr 5.4) vybavené optickým mikroskopem Olympus SZX8 s objektivem DF PLAPO se zvětšením 0,8 až 5,6x a softwarem QuickPHOTO Industria. Tento mikroskop má nevýhodu v malé hloubce ostrosti. To znamená, že čím vyšší zvětšení, tím je mikroskop schopen zaostřit menší plochu vzorku. 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 s Live MOS senzorem, který byl propojeny se stolním počítačem.

Obr. 5.4 Pracoviště pro optické vyhodnocení.

Toto přístrojové vybavení bylo pro pozorování růstu whiskerů dostatečné. Avšak vhodnější by byl elektronový mikroskop, jehož výhodou je možnost provedeni EDX analýzy. EDX analýza určí spektrum chemických prvků, které pozorovaný objekt obsahuje a tím umožní jednoznačně určit, zdali je pozorovaný objekt opravdu cínový whisker nebo pouze nečistota. Bohužel tento mikroskop katedra elektrotechnologie nevlastní.

5.4 Vyhodnocení

Při vyhodnocení optickým mikroskopem není snadné určit, zda se jedná o whisker nebo o nečistotu, která může být při realizaci vzorků zapájena do vrstvy pájky. Nečistotu lze rozeznat od whiskeru tvarem nebo „odfouknutím“. Tvar nečistoty bývá obvykle velmi nápadný, neboť whiskery mají svůj charakteristický tvar popsaný v teoretické části. Pokud je nečistota na povrchu nezapájena, lze ji „odfouknout“, na rozdíl od whiskerů, který je pevně zakotven v povrchu pájky. Hledání whiskerů je rovněž pracné z hlediska vhodného úhlu nasvícení. Bude-li whisker růst kolmo vzhůru a optika bude kolmo k povrchu vzorku, nemusí být whisker vůbec rozpoznán. Z tohoto důvodu je vhodné vzorky pozorovat pod různými úhly. Dále je možné whisker zaměnit s rýhou na povrchu. Toto je však možně eliminovat právě vhodným nasvícením, neboť jen vystouplý tvar vrhá stín.

Z hlediska těchto nejistot určení, zdali se jedná o whisker, či ne, by bylo vhodné použít elektronový mikroskop s EDX analýzou zmíněný výše.

5.4.1 Vyhodnocení prvního experimentu

Bohužel u tohoto experimentu se nepotvrdila žádná popsaná teorie. Whiskery nevyrostly z žádného povrchu použitých pájek, ať už pájky byly naneseny na různé povrchové úpravy DPS nebo byly vystaveny teplotě 50 °C.

Lze to vysvětlit dvěma způsoby:

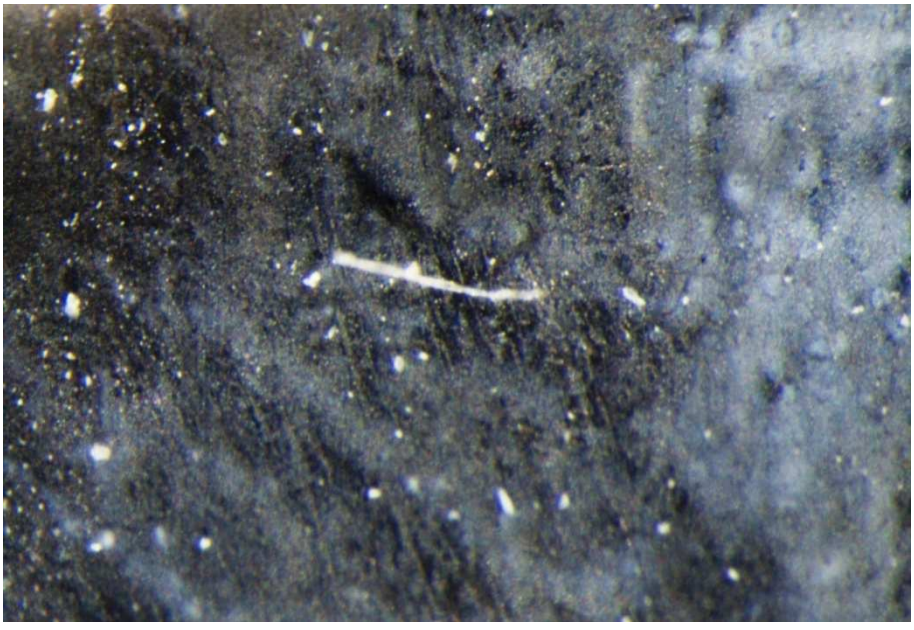
- nanesená vrstva pájky byla nejspíše příliš tlustá, což by v našem případě mohlo být nejpravděpodobnější, neboť whiskery přestávají růst u vrstev tlustých alespoň 10 μm
- tlak vyvozený utahováním matice nebyl dostatečný pro tvorbu whiskerů

5.4.2 Vyhodnocení druhého experimentu

Zde už je situace zajímavější, neboť u tohoto experimentu se whiskery vyskytly.

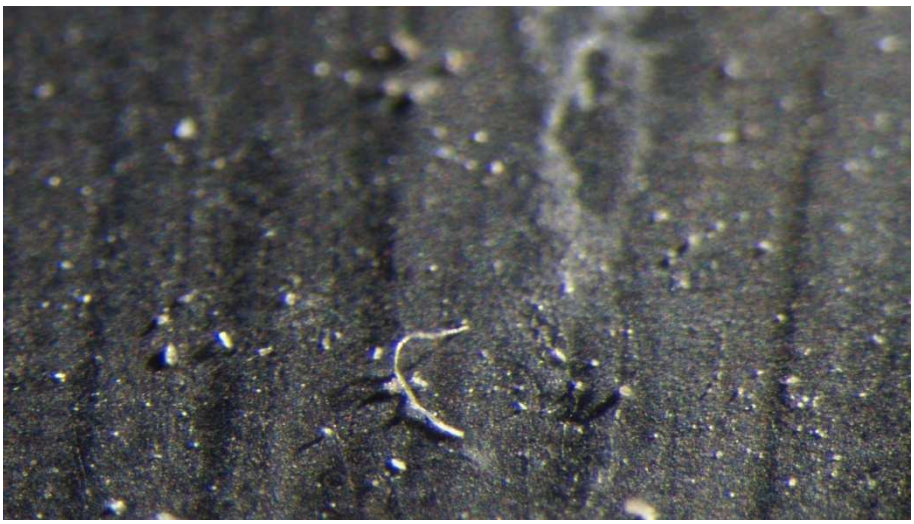
5.4.2.1 Vliv pájecích slitin na tvorbu whiskerů

Jednoznačně lze říci, že na olovnaté pájecí slitině se vyskytovalo nejméně, až zanedbatelné množství novotvarů. To je způsobeno zastoupením olova v takové míře, že dokáže eliminovat tvorbu whiskeru. Nejvíce whiskerů bylo nalezeno při pokrytí DPS pájkou Sn99Cu1 a to u všech povrchových úprav a nezávisle na působící teplotě. Je to dáno tím, že v této slitině je cín zastoupen z 99 % na rozdíl od předchozí pájecí slitiny. Dalším typem pájky, kde se whiskery vyskytly, byla pájka Sn97Cu3. Zde byl však růst whiskerů méně četnější než u pájky Sn99Cu1. Je tak vidět, že při zastoupení mědi ve větší části se počet whiskerů snížil.



Obr. 5.5 Pájecí slitina Sn99Cu1 nanesená na Cu.

Obr. 5.6 Pájecí slitina Sn97Cu3 nanesená na Cu.

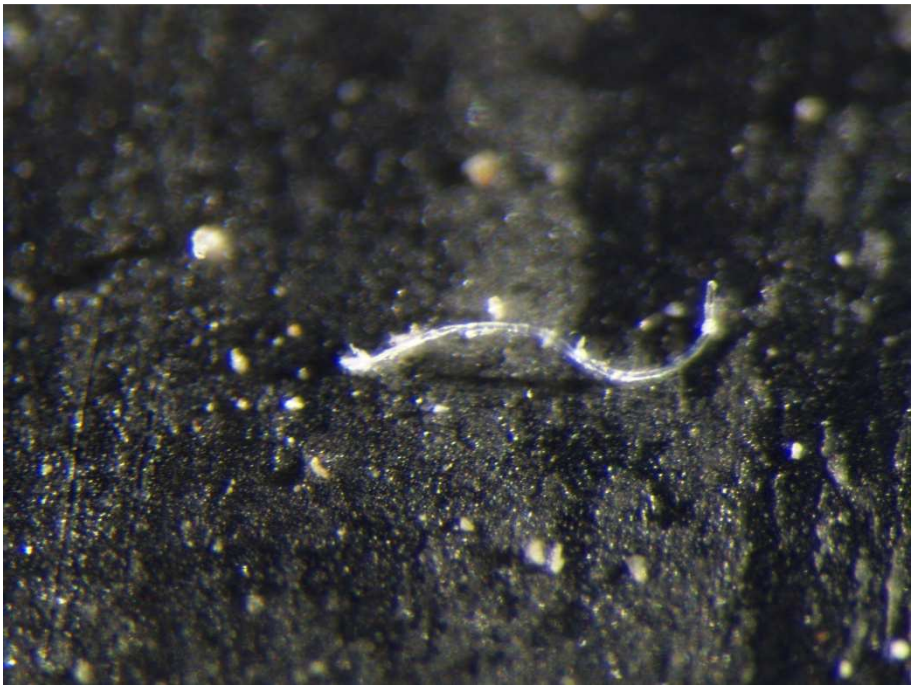


Obr. 5.7 Pájecí slitina Sn63Pb37 nanesená na Cu.

5.4.2.2 Vliv povrchové úpravy na tvorbu whiskerů

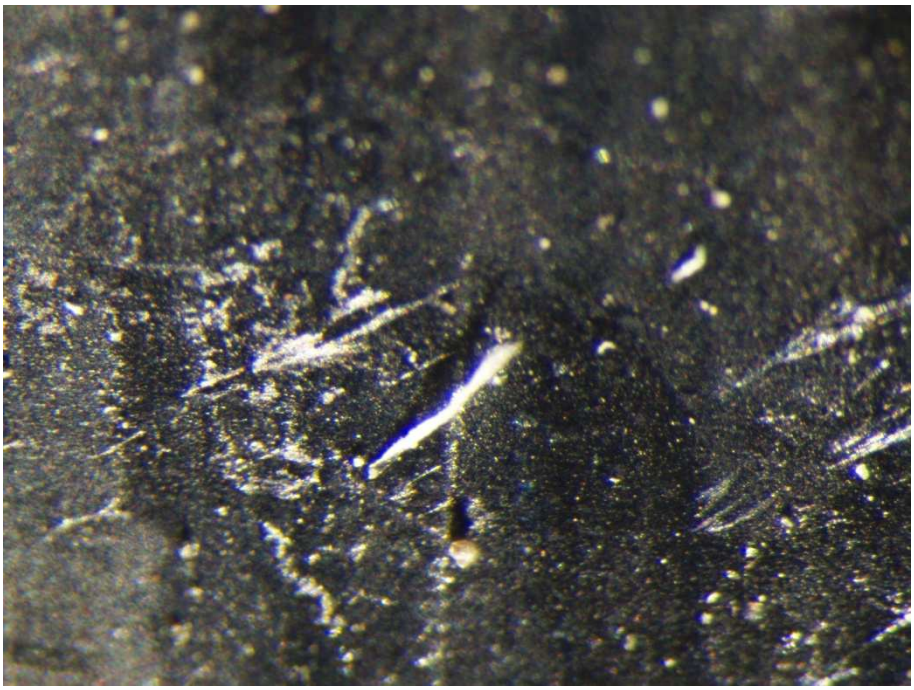
Nejčetnější výskyt whiskerů byl zpozorován u DPS s povrchovou úpravou Cu a to nezávisle na teplotních podmínkách. Lze tak potvrdit teorii intermetalických slitin mezi cínem a mědí, kdy Cu difunduje do Sn a vytváří tak intermetalickou slitinu Cu_6Sn_5, čímž je vrstva cínu tlakově namáhána. U povrchové úpravy Au byl výskyt whiskerů podstatně nižší.

Dále byla pozorována povrchová úprava HAL. Jelikož je HAL povrchová úprava cínem, nebyla na tento povrch nanesena žádná pájecí slitina. Na tomto povrchu byl růst whiskerů pozorován v podobně stejném množství jako u pájecí slitiny Sn97Cu3.

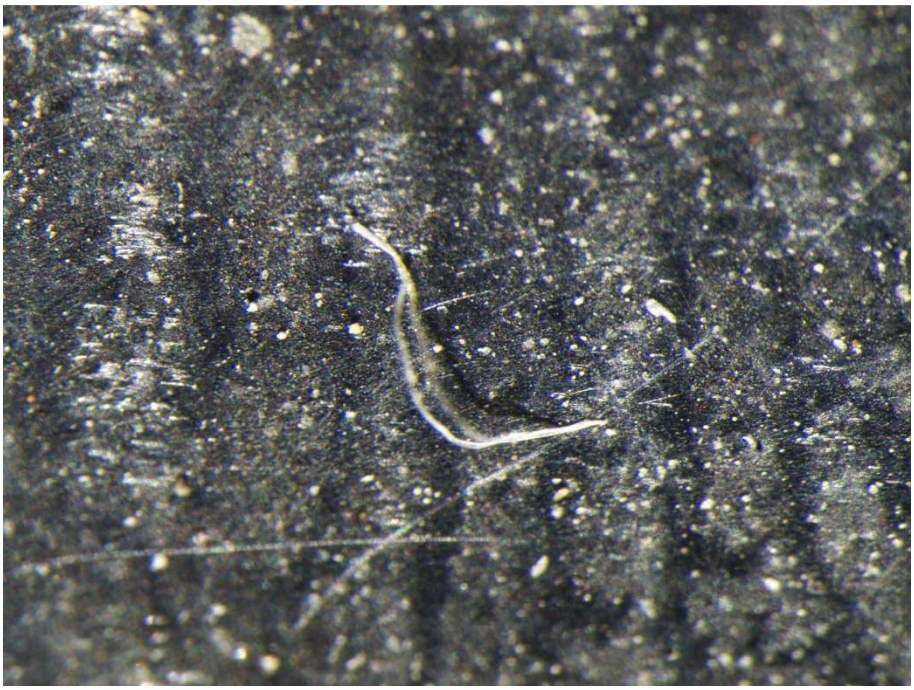


Obr. 5.8 Pájecí slitina Sn97Cu3 nanesená na Cu.

.



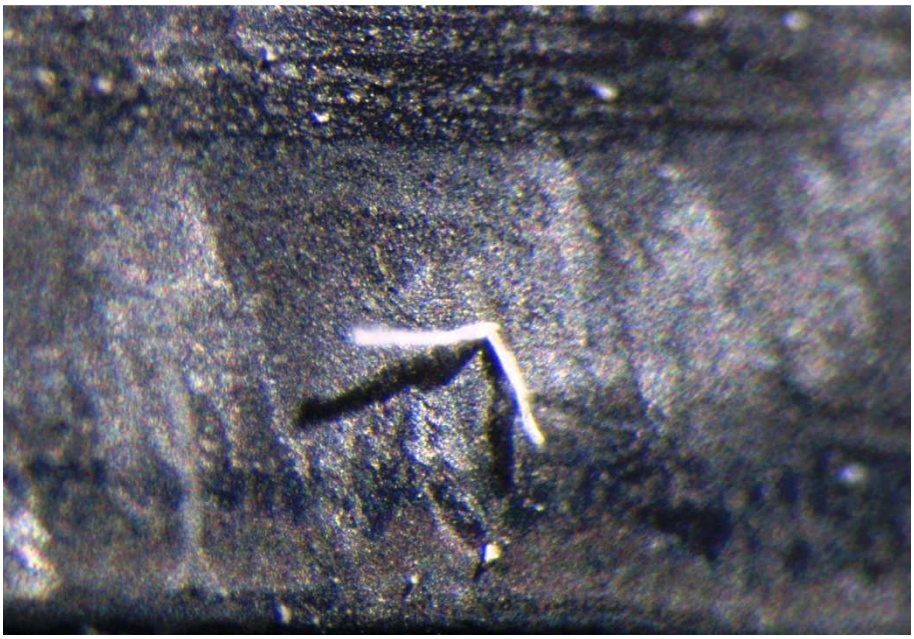
Obr. 5.9 Pájecí slitina Sn97Cu3 nanesená na Au.



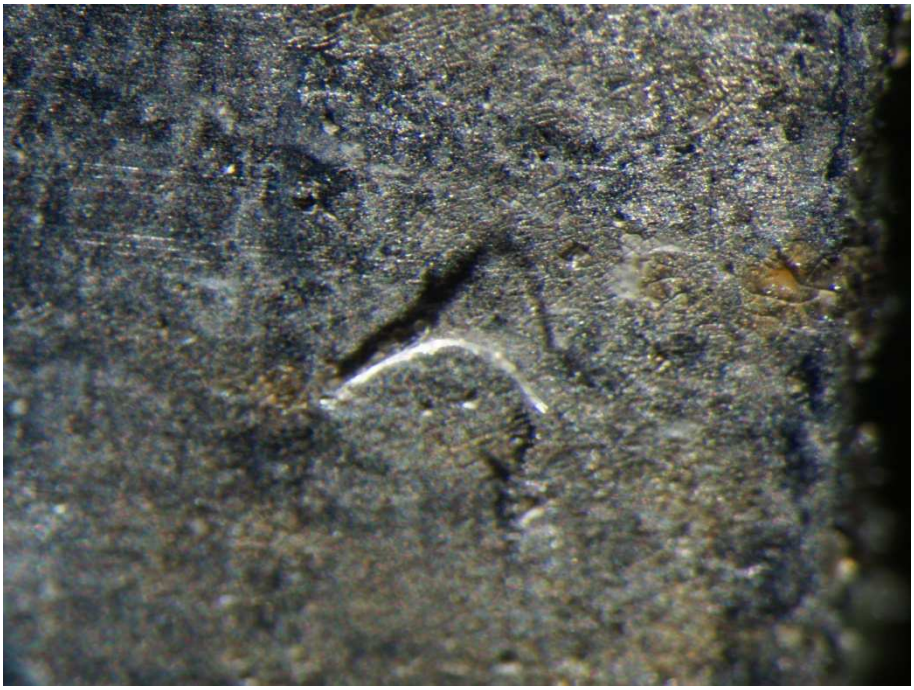
Obr. 5.10 Povrchová úprava HAL.

5.4.2.3 Vliv teploty na tvorbu whiskerů

U vzorků, které byly vystaveny teplotě 50 °C bylo zjištěno, že výskyt whiskerů byl jednoznačně vyšší než u vzorků vystavených pokojové teplotě a to bez ohledu na použitou povrchovou úpravu a typ pájecí slitiny. To potvrzuje teorii, která říká, že růst whiskerů je nejčetnější při teplotě blízké rekrystalizační teplotě cínu.



Obr. 5.11 Pájecí slitina Sn99Cu1 nanesená na Cu (PEC).



Obr. 5.12 Pájecí slitina Sn99Cu1 nanesená na Au (PEC).

Obr. 5.13 Pájecí slitina Sn97Cu3 nanesená na Au (PEC).

5.4.2.4 Vliv pnutí ve vrstvě pájky na tvorbu whiskerů

Zde lze porovnat první a druhý experiment. V prvním experimentu bylo pnutí ve vrstvě vyvozeno utaženou maticí a v experimentu druhém prohnutím DPS. Jelikož utahovací moment 3,7 Nm není nijak velký, lze předpokládat, že prohnutím DPS bylo vyvozeno pnutí ve vrstvě podstatně větší. V prvním experimentu na rozdíl od druhého nebyl nalezen žádný whisker. Lze tedy říci, že pnutí ve vrstvě má vliv na tvorbu whiskerů.

6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zkoumat vliv povrchové úpravy DPS, pájecí slitiny, pnutí ve vrstvě pájky a teploty na tvorbu cínových whiskerů. Kvalitativní podklady pro toto zkoumání tvoří teoretická část, jejíž hlavní náplní jsou teorie vysvětlující vznik a vývoj whiskerů, faktory ovlivňující tvorbu whiskerů, nepříznivé účinky whiskerů a v neposlední řadě metody k omezení tvorby whiskerů. Dále je zde popsán proces pájení a pájky používající se při měkkém pájení, desky plošných spojů, jejich povrchové úpravy a metody pájení.

V praktické části je popsána výroba vzorků a vyhodnocení jednotlivých vlivů na tvorbu whiskerů. Při výrobě vzorků byly použity tři povrchové úpravy (Cu, Au, HAL) a tři typy pájecích slitin (Sn67Pb37, Sn99Cu1, Sn97Cu3). Vzorky byly vystaveny pokojové teplotě a teplotě 50 °C. Pnutí ve vrstvě bylo vytvořeno maticemi se šrouby a přípravkem k prohnutí DPS. Nechybí zde ani fotografie vypěstovaných whiskerů.

Se zákazem používání olova v elektrotechnickém průmyslu přišel fenomén whiskerů, kterému dříve nebyla věnována taková pozornost jako nyní, neboť u olovnatých pájek se whiskery nevyskytovaly. Je tak nutné se vypořádat s úpravami vedoucími k omezení, či úplnému zamezení tvorby whiskerů. Lze konstatovat, že dopad zákazu používání olova v elektrotechnickém průmyslu přinesl mnohé problémy, které s sebou nesou zvýšené náklady na výzkum a testování bezolovnatých variant elektrického spojování vodivých částí.

S pozorovaných experimentů vyplývá, že whiskery se nejvíce objevily u DPS s povrchovou úpravou Cu a to bez ohledu na použité bezolovnaté pájce a působící teplotě. To potvrzuje teorii intermetalických slitin mezi mědí a cínem. Vytvoření této slitiny přispívá k vytvoření pnutí ve vrstvě. U povrchové úpravy Au a HAL byl výskyt podstatně menší.

Dále mělo vliv na tvorbu whiskerů složení pájecí slitiny, neboť nejvíce whiskerů bylo nalezeno na vrstvě slitiny Sn99Cu1 a to bez ohledu na povrchové úpravě DPS. Toto potvrzuje fakt, že výskyt cínových whiskerů je nejpravděpodobnější u slitin s velmi vysokým obsahem cínu. U olovnaté pájky nebyl nalezen téměř žádný whisker, neboť přítomnost olova zamezuje jejich výskytu.

Na tvorbu whiskerů má vliv i jednoznačně teplota. Při působení teploty 50 °C byl výskyt u bezolovnatých slitin četnější než pří působení pokojové teploty.

Co se týká vlivu tlakového napětí ve vrstvě, které je všeobecně považováno za hlavní iniciátor tvorby whiskerů lze říci, že v prvním experimentu nebylo toto tlakové napětí dostatečné a tak se whiskery nevyskytly, na rozdíl od druhého experimentu, kde bylo vyvozené pnutí ve vrstvě podstatně větší a whiskery se vyskytly.

Druhým experimentem se tedy podařilo vypěstovat whiskery na bezolovnatých pájkách Sn99Cu1 a Sn97Cu3 a to jak na zlatu tak mědi. Nejvíce cínových whiskerů bylo nalezeno při kombinaci:

- Slitina Sn99Cu1 – Povrchová úprava Cu – Teplota 50 °C

Nejméně při kombinaci:

- Slitina Sn97Cu3 – Povrchová úprava Au – Pokojová teplota

Téměř žádné při kombinaci:

- Slitina Sn63Pb37 – Povrchová úprava Au i Cu – Pokojová teplota i teplota 50 °C

Lze tedy konstatovat, že na tvorbu a růst cínových whiskerů má vliv jak tlakové namáhání, povrchová úprava DPS, složení pájecí slitiny, tak i okolní teplota. U olovnaté pájky však tyto faktory tvorbě whiskerů nepřispěly.

Závěrem bych chtěl říci, že vypěstování whiskerů a následné vyhodnocení za použití přístrojů, které byly k dispozici, není jednoduché. Je zde možnost, že při vyhodnocování mohl být whisker zaměněn s nečistotou a naopak.

Literatura

[1] ABEL, Martin. *SMT: Technologie povrchové montáže*. 1. vyd. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000, 246 s. ISBN 80-902-7331-9.

[2] ABEL, Martin; CIMBUREK Vladimír. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. 1. vyd. Pardubice: ABE. TEC, 2005, 179 s. ISBN 80-903597-0-1.

[3] MACH, Pavel; SKOČIL Vlastimil; URBÁNEK Jan. *Montáž v elektrotechnice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2001, 440 s. ISBN 80-010-2392-3.

[4] RUŢA, Viliam. *Pájení*. 2. Vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988. 456 s.

[5] URBÁNEK, Jan; KLABAČKA Edvard. *Technologie elektronických zařízení*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997, 159 s. ISBN 80-010-1551-3.

[6] *Pájecí slitiny, pájky, tavidla*. [online]. Dostupné z: http://zozei.sossoubrno.cz/plosne-spoje-pajeni-a-technologie

[7] *Pájení v parách, přetavení infračerveným zářením, nucené proudění, laserové pájení, Povrchové DPS.* [online]. Dostupné z http://www.smtcentrum.cz

[8] *Pájení v elektrotechnice*. [online]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice

[9] *Složení pájecích past*. [online]. Dostupné z: http://www.koki.org/Czech/pajeni_02.htm

[10] *Povrchové úpravy DPS*. [online]. Dostupné z: http://www.lamirel.cz/povrchoveupravy.aspx

[11] *Technologie povrchových úprav plošných spojů.* [online]. Dostupné z: http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/technologie-povrchovych-uprav-plosnych-spoju.html-0

[12] ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž.* 1. České vydání. Praha: Nakladatelství BEN, 2006, 272 s. ISBN 80-7300-181-0.

[13] *Příčiny poruch v pájených spojích.* [online]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/bdts/index.php/typy-poruch-a-mechanismy-jejich-vzniku/priciny-poruch/pajene-spoje

[14] PUTTLITZ, J. Karl; STALTER, A. Kathleen. *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. Taylor & Francis e-library, 2005, 915 s. ISBN 0-8247-4870-0

[15] ŽÁK, Pavel. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektronice*. [online]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/zak.pdf

[16] PODZEMSKÝ, J.; URBÁNEK, J.; DUŠEK, K. *Obrazová analýza povrchu bezolovnaté povrchové úpravy zaměřená na indikaci cínových whiskerů.* [online]. Dostupné z: http://ek702p10-ket.fel.zcu.cz/images/PDF/Rocnik2011/Cislo1_2011/r5c1c1.pdf

[17] SMETANA, Joe. *Theory of Tin Whisker Growth: "The End Game"*. [online]. Dostupné z: http://80.ieeexplore.ieee.org.dialog.cvut.cz/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4118365

[18] CHOI, W. J.; LEE, T. Y.; TU, K. N. at 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.

[19] GEDNEY, R.; SMETANA, J.; GALYON, G. *NEMI Tin Whisker Projects*. USA: NEMI, 2004.

[20] GANESAN, S.; PECHT, M. *Lead-free Electronics*. New Jersey: John Wiley & Sons, ISBN 0-470-78617-9, 2006.

[21] LEE, CHANG-BING; YAO, Y-L; CHIANG, F-Y; ZHENG, P. J.; LIAO, C. C.; CHOU, Y. S. *Characerization Study of Lead-free Sn-Cu Plated Packages.* Proceedings of IEEE Electronic Components and Technology Conference, pp. 123891245, 2002

[22] MARCINKA, O. *Růst cínových whiskerů na površích spojů pájených bezolovnatými pájkami.* ČVUT, 2013. Diplomová práce. ČVUT FEL

[23] ŽÁK, P. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektronice*. ČVUT, 2008. Diplomová práce. ČVUT FEL

[24] SALAM, B.; EKERE, N. N.; RAJKUMAR, D. *Study of the Interface Microstructure of Sn-Ag-Cu Lead-free Solders and the Effect of Solder Volume on Intermetallic Layer Formation*. Proceedings of the 51st Electronic Components and Technology Conference, pp 471-477, May 29 - June, 2001.

[25] GLAZUNOVA, V. K.; KUDRYAVTSEV, N. T. *An Investigation of the Conditions of Spontaneus Growth of Filiform Crystals on Electrodeposit Coatings*. Přeloženo z Zhurnal Prikladnoi, Vol. 36, No. 3, pp. 543-550, 1963.

[26] http://nepp.nasa.gov/Whisker/background/index.htm

[27] HADA, Z.; MORIKAWA, O.; TOGAMI, H. *Study of Tin Whiskers Electromagnetic Relay Parts*. Proceedings of the 26th Annual Relay Conference, Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma, pp. 9-15, April 25-26, 1978.

[28] GALYON, G. T.; PALMER L. *An integrated theory of whisker formation: The physical metallurgy of whisker formation and the role of internal stresse*s. IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf., vol. 28, no. 1, pp. 17–30, Jan. 2005.

[29] BARSOUM, M. W.; HOFFMAN, E. N.; DOHERTY, R. D.; GUPTA, S.; ZAVALIANGOS, A. *Driving force and mechanism for spontaneous metal whisker formativ*. Phys. Rev. Lett., vol. 93, no. 20, pp. 206104-1–206104-4, Nov. 12, 2004.

[30] TU, K. N. *Irreversible processes of spontaneous whisker growth in bimetallic Cu–Sn thin reactions*. Phys. Rev. B, vol. 49, no. 3, pp. 2030–2034, Jan. 1994.

[31] *Propojování v elektronice – elektrické spoje a jejich realizace*. [online]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/04Spoje%20v%20elektronice%20-%20p%C3%A1jen%C3%AD%20a%20lepen%C3%AD.pdf

[32] VÁVRA, J. *Studium roztékavosti pájek.* ČVUT, 2012. Bakalářská práce. ČVUT FEL

Seznam použitých zkratek

DPS	Deska plošného spoje
SMT	Technologie povrchové montáže
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances (zákaz a omezení v používání některých nebezpečných látek)
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems (kombinace mikroelektroniky a mikromechaniky, která je vyráběna metodou leptání z křemíkového základu)
SAC	Bezolovnatá pájka na bázi kovů Sn/Ag/Cu s různě modifikovaným poměrem jednotlivých kovů

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Obraz pájeného spoje v řezu s intermetalickou bází [13]. 13
Obr. 1.2 Alternativy pro bezolovnaté pájky [31]. 17
Obr. 2.1 Povrchová úprava DPS metodou SIPAD [10]. 20
Obr. 4.1 Cínový whisker zachycený elektronovým mikroskopem[14]. 31
Obr. 4.2 Podélné pruhy na povrchu Sn whiskeru [23]. Obr. 4.3 Kruhy po obvodu Sn whiskeru [23]. 32
Obr. 4.4 Dendrity vs Whiskery [26]. 32
Obr. 4.5 Ishikavův diagram faktorů ovlivňujících vznik whiskeru [15]. 33
Obr. 4.6 Whisker rostoucí z jednoho vývodu směřující k druhému vývodu el.mag relé [26]. 37
Obr. 4.7 Destrukce relé vyvolána vznikem elektrického oblouku. 38
Obr. 4.8 Průběh růstu třech rozdílných whiskerů 40
Obr. 4.9 Schéma struktury rekrystalizovaného zrna ukazující rekrystalizace zrn [14] 41
Obr. 4.10 Schéma struktury sekundární rekrystalizace zrna[14] 42
Obr. 4.11 Schematický diagram zobrazující pohyb atomů polykrystalické tenké vrstvy [14]. 44
Obr. 4.12 Schematickým diagram zobrazující uvolnění lokálního napětí díky prolomení oxidu [14]. 45
Obr. 4.13 Zjednodušená 2D reprezentace pocínovaného depositu [17]. 46
Obr. 4.14 Cín po rekrystalizaci [17]. 47
Obr. 4.15 Typické hranice zrn Sn whisker [17]. 47
Obr. 4.16 Atomární úroveň reprezentující zrno whisker [17]. 48
Obr. 4.17 Posunutí pravé hranice zrn [17]. 49
Obr. 4.18 Posunutí levé hranice zrn [17]. 49
Obr. 4.19 Rovnoměrné posouvání hranic [17]. 50
Obr. 4.20 Nerovnoměrné posouvání hranic [17]. 50
Obr. 4.21 Přidání nečistot [17]. 51
Obr. 4.22 Souhrn mechanismu růstu whiskeru [17]. 52
Obr. 4.23 Znázornění síly vytvořené růstem intermetalické slitiny SnCu [17]. 52
Obr. 4.24 Znázornění oxidu difundujícího do hranic zrn [17]. 53
Obr. 5.1 Vytvořený vzorek. 61
Obr. 5.2 Přípravek k prohnutí DPS se vzorky. 63
Obr. 5.3 Teplotní komora. 63
Obr. 5.4 Pracoviště pro optické vyhodnocení. 64
Obr. 5.5 Pájecí slitina Sn99Cu1 nanesená na Cu. 66

Obr. 5.6 Pájecí slitina Sn97Cu3 nanesená na Cu. 67
Obr. 5.7 Pájecí slitina Sn63Pb37 nanesená na Cu. 67
Obr. 5.8 Pájecí slitina Sn97Cu3 nanesená na Cu. 68
Obr. 5.9 Pájecí slitina Sn97Cu3 nanesená na Au. 68
Obr. 5.10 Povrchová úprava HAL. 69
Obr. 5.11 Pájecí slitina Sn99Cu1 nanesená na Cu (PEC). 70
Obr. 5.12 Pájecí slitina Sn99Cu1 nanesená na Au (PEC). 70
Obr. 5.13 Pájecí slitina Sn97Cu3 nanesená na Au (PEC). 71

Seznam tabulek

Tab 1.1 Bezolovnaté pájky [6]. 16
Tab 2.1 Běžné typy laminátů pro DPS [1]. 18
Tab 2.2 Maximální doba skladovatelnosti povrchový úprav DPS dle ČSN EN 617-2 [12]. 22
Tab 4.1 Tempo růstu samovolně roztoucích whiskerů na různých materiálových substrátech [14]. 43
Tab 5.1 Použité pájky. 60

Přílohy

Příloha 1 – CD s podklady k této diplomové práci

Obsah CD: - elektronická forma této diplomové práce ve formátu PDF

- soubory s vybranými snímky vzorků v PDF