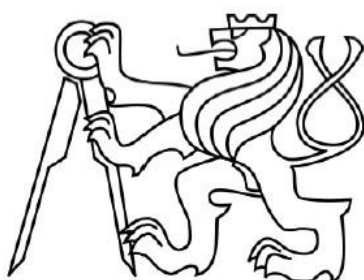


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studium růstu whiskeru z pájených spojů

Growth of whisker from solder joints

Autor práce:	Bc. Jan Hintermüller
Vedoucí práce:	doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
Studijní obor:	Elektrotechnika, energetika a management – technologické systémy
Akademický rok:	2019/2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hintermüller** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **456892**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Studium růstu whiskeru z pájených spojů

Název diplomové práce anglicky:

Study of whiskers growth from solder joints

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s pájenými spoji v elektrotechnice a s možnými chybami, které se zde mohou vyskytnout se zřetelem na whiskery.
- 2) Připravte si vzorky pájených spojů, které necháte stárnout v definovaných podmínkách.
- 3) Vzorky analyzujte z pohledu četnosti whiskerů a výsledky analýz vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Alena Pietriková, Juraj Ďurišin, and Pavel Mach, Diagnostika a optimalizácia pou žitia ekologických materiálů pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **11.02.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **22.05.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Jan Hintermüller

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho obětavost a vstřícnost při řešení problémů týkajících se mé diplomové práce. Dále děkuji za cenné rady a připomínky, které jsem od něho během psaní diplomové práce dostal.

Anotace:

Cílem této práce je seznámit čtenáře s problematikou pájení a desek plošných spojů se zaměřením na vady pájených spojů, a to převážně whiskerů. V teoretické části se čtenář může seznámit s používanými materiály a technologiemi, které jsou při měkkém pájení využívány. Dále se seznámí s chybami v oblasti pájení, které mohou vzniknout v samotném procesu tvoření pájeného spoje i po něm. Tato práce se zejména zaměří na problematiku whiskerů. V praktické části se budou věnovat vytvoření vzorků pro následné studium whiskerů na povrchu pájeného spoje.

Klíčová slova:

pájení, deska plošných spojů, pájka, chyby pájení, whisker

Abstract:

The Goal of this thesis is to introduce problematics of soldering technology on printed circuit boards. The teoretical part deals with soldering materials and technologies. Further in this part are described defects which may occur during and after soldering process. In particular, this work will focus on the problem of tin whiskers. In the practical part will be focused on creation of samples for future examination of wishers on surface of soldered joints.

Key words:

Soldering, printed circuit board, solder, soldering defects, whisker

Obsah

1	Úvod	12
2	Pájení a základní pojmy	13
2.1	Teorie pájení.....	14
2.1.1	Smáčivost povrchu	15
2.1.2	Vznik intermetalických vrstev.....	16
2.2	Pájecí slitiny	17
2.2.1	Forma pájky	18
2.2.2	Olovnaté pájecí slitiny	18
2.2.3	Bezolovnaté pájecí slitiny	19
2.3	Deska plošného spoje.....	21
2.3.1	Nepáživá maska.....	22
2.4	Povrchové úpravy	22
2.4.1	HASL (HAL).....	22
2.4.2	OSP	23
2.4.3	ENIG	23
2.4.4	Imerzní Cín (Sn).....	23
2.5	Tavidla	24
3	Metody pájení	26
3.1	Technologie montáže součástek	26
3.1.1	Technologie THT	26
3.1.2	Technologie SMT	26
3.2	Ruční pájení	27
3.3	Pájení vlnou	28
3.4	Pájení přetavením	29
3.4.1	Operace před přetavením	30
3.4.2	Metody pájení přetavením.....	31
3.4.3	Pájení horkým plynem – Konvekční	31

3.4.4	Pájení infračerveným zářením.....	33
3.4.5	Pájení v parách	33
3.5	Pájení ponorem	34
4	Spolehlivost pájeného spoje.....	35
4.1	Stárnutí spoje	35
4.2	Mechanické namáhání	36
4.3	Tepelné namáhání.....	36
4.4	Chyby a vady pájených spojů	36
4.4.1	Chyby vstupního materiálu.....	37
4.4.2	Můstek.....	37
4.4.3	Studený spoj	38
4.4.4	Tombstoning.....	38
4.4.5	Nesmáčivost	39
4.4.6	Voidy.....	39
4.4.7	Oxidace	40
4.4.8	Otevřený či chybějící spoj.....	41
4.4.9	Nesprávné umístění součástky.....	41
4.4.10	Popcorn efekt	41
4.4.11	Dendrity.....	42
5	Whiskery.....	43
5.1	Historie problematiky.....	44
5.2	Nepříznivé účinky whiskerů.....	45
5.2.1	Trvalý elektrický zkrat.....	45
5.2.2	Krátkodobé zkraty	46
5.2.3	Vznik elektrického oblouku po odpaření whiskeru	46
5.2.4	Nečistoty, kontaminace.....	46
5.3	Faktory ovlivňující růst	47
5.3.1	Vliv vnitřního napětí v tlaku.....	47

5.3.2	Vliv elektrického pole	47
5.3.3	Vliv tlaku	47
5.3.4	Vliv teploty.....	48
5.3.5	Vliv vlhkosti a následné oxidace	48
5.3.6	Vliv tloušťky vrstvy.....	48
5.4	Teorie popisující růst whiskerů	49
5.4.1	Teorie dislokací.....	49
5.4.2	Teorie dynamické rekystalizace	49
5.4.3	Teorie prasklého oxidu	50
5.4.4	Teorie The End Game	51
5.5	Možnosti omezení růstu whiskerů	54
5.5.1	Vhodná volba povrchové úpravy.....	54
5.5.2	Mezivrstva	54
5.5.3	Vhodná tloušťka povrchové úpravy	55
5.5.4	Žíhání	55
5.5.5	Omezení tlakového namáhání.....	56
5.5.6	Konformní povlaky	56
6	Praktická část.....	57
6.1	Popis použitých pomůcek a zařízení.....	57
6.2	Popis a příprava vzorků	59
6.3	Popis měření.....	60
6.4	Naměřené výsledky	61
6.5	Vyhodnocení naměřených výsledků.....	63
6.5.1	Vyhodnocení vlivu tepla na růst whiskerů	64
6.5.2	Vyhodnocení vlivu mechanického napětí na růst whiskerů	65
6.5.3	Vyhodnocení vlivu pájecí slitiny na růst whiskerů.....	66
7	Závěr	67
8	Zdroje.....	69

9	Seznam obrázků	74
10	Seznam rovnic	76
11	Seznam tabulek	76

Seznam použitých zkratk

DPS – deska plošného spoje

ENIG – Electroless Nickel Immersion Gold

EU – Evropská unie

IR – infrared, infračervené záření

IO – integrovaný obvod

ITRI - Industrial Technology Research Institute

HAL – Hot air Levelling

RoHS - Restriction of Hazardous Substances (Směrnice Evropské unie)

OSP - Organic Solder Protectives

SMT - Surface mount technology (technologie povrchové montáže)

SMD - Surface mount devices (součástky pro povrchovou montáž)

THT - Through-hole technology (technologie vsazované montáže)

THD - Through-hole devices (součástky pro vsazovanou montáž)

TEM - transmission electron microscope (Transmisní elektronový mikroskop)

SEM - scanning electron microscope (Rastrovací elektronový mikroskop)

ESA - the European Space Agency (Evropská kosmická agentura)

NASA - National Aeronautics and Space Administration (Národní úřad pro letectví a vesmír v USA)

MEMS – mikroelektromechanické systémy

PGA - pin grid array

BGA - ball grid array

1 Úvod

Dnešní elektronický průmysl se neustále rozšiřuje a zdokonaluje díky novým technologiím, automatizaci a rozrůstající se škále smart zařízení. Už i běžné domácí spotřebiče obsahují chytré řídicí komponenty a elektronické čipy. Většina podobné elektroniky se vytváří na deskách plošných spojů s vodivými cestami mezi součástkami, kde je využita povrchová montáž. Při montáži součástek na desku musíme zajistit jak pevné mechanické spojení, tak dobrou elektrickou vodivost mezi součástkou a cestou, přes kterou se součástka spojí se zbytkem obvodu. K tomu se nejčastěji využívá procesu pájení.

Spolehlivost takové desky plošných spojů nezávisí pouze na kvalitě substrátu a součástek, ale také na kvalitě pájeného spoje, proto je pájecí proces velice důležitou komponentou celého výrobního postupu. Musíme dbát na jeho kvalitu a spolehlivost.

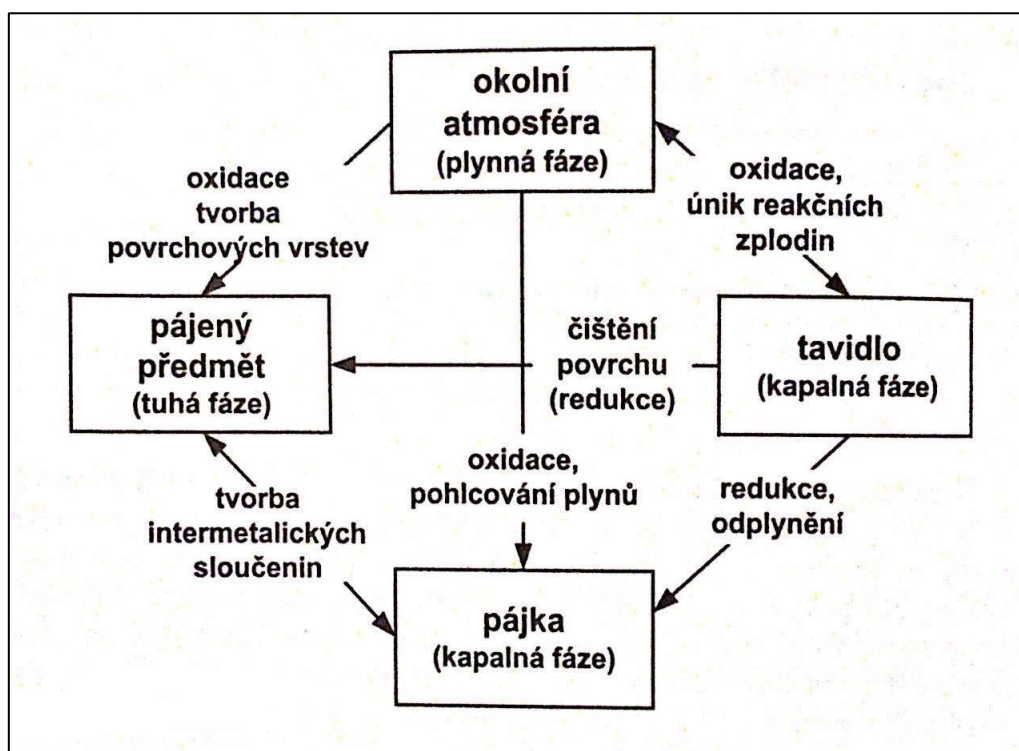
Pájení se dá rozdělit na „měkké“ a „tvrdé“. Tato práce se bude zabývat pájením měkkým, které se používá při spojování součástek na deskách plošného spoje. Pájet je možno mnoha způsoby od ručního pájení páječkou, které se dnes využívá převážně k opravám, až po plně automatizované linky, které jsou schopny složité a velké desky osadit součástkami, zapájet je a následně zkontrolovat pomocí optických kamerových systémů v řádu několika minut.

V každém kroku tohoto procesu mohou vzniknout chyby, které mohou způsobit okamžitou nefunkčnost obvodu nebo se mohou projevit až později jako změny ve struktuře pájeného spoje, a tím negativně ovlivnit jeho funkci. Detekci, diagnostice a případné nápravě chyb je potřeba věnovat dostatečnou pozornost. Jednou z chyb, která může u pájených spojů vzniknout, je tvorba whiskerů. Whiskery jsou krystaly některých kovů, např. cínu, které samovolně vyrůstají na povrchu pájeného spoje. Tyto z anglického překladu „vousy“ mohou způsobit zkrat na DPS, protože je tvoří elektricky vodivý materiál.

Právě na whiskery bude zaměřena praktická část této práce, kde se budu snažit vytvořit příznivé podmínky pro růst whiskerů na připravených vzorcích. Následně bude provedeno vyhodnocení tohoto experimentu. V teoretické části se budu věnovat nejen whiskerům, ale také samotným technologiím pájení, použitým materiálům a chybám, které mohou způsobit zhoršení vlastností, případně nefunkčnost celé desky plošných spojů.

2 Pájení a základní pojmy

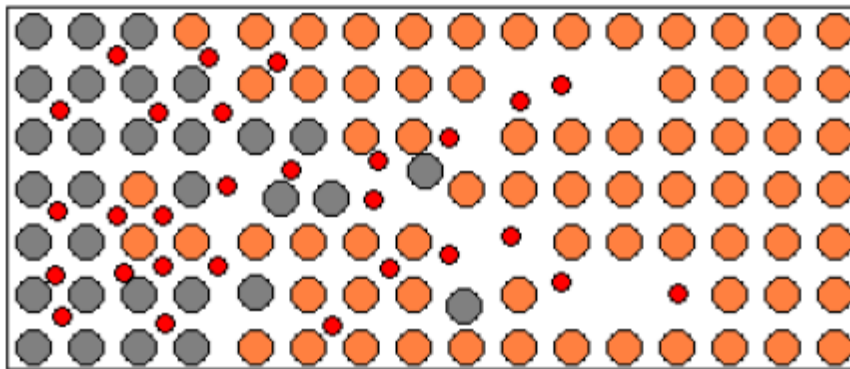
Při pájení se využívá metalurgického spojování kovových materiálů roztavenou pájkou. Na rozdíl od svařování u pájení nedochází k tavení spojovaných materiálů a nevzniká z nich nová slitina. K tavení dochází pouze u spojovacího materiálu – pájecí slitiny, většinou za přítomnosti tavidla. Teplota tání pájky je vždy nižší než teplota tání spojovaného materiálu. V případě pájení součástek a jejich vývodů k pájecím ploškám, např. na DPS se pohybujeme v oblasti tzv. měkkého pájení, pro kterou jsou typické pájecí teploty do 450 °C. U měkkého pájení v elektrotechnice se klade důraz na mechanickou pevnost spoje a zároveň na elektrické vlastnosti spojení. Cílem je vytvořit mechanicky pevný a dlouhodobě odolný a spolehlivý pájený spoj. Velkou roli zde hraje pájitelnost spojovaných povrchů i použitá pájecí teplota, okolní prostředí, tavidlo či doba pájení. Vzájemný vztah proměnných pájecího procesu je možné vidět na obrázku číslo 1. Tvrdé pájení, pro které je charakteristická teplota vyšší než 450 °C, se používá převážně na mechanické spojování částí. [1] [2]



Obrázek 1. Vzájemné vztahy složek pájecího procesu [1]

2.1 Teorie pájení

V první fázi pájecího procesu dochází k tavení pájky. Dodáním tepla dojde ke zvýšení kinetické energie atomů, což má za následek zborcení krystalické mřížky materiálu a změnu z pevného na kapalné skupenství, dochází k tavení pájky. Pájení je složitý chemicko-fyzikální proces, při kterém se povrchové atomy pájky a spojovaného materiálu dostávají do velice malých vzdáleností. Působí zde adhezní (přilnavost) a kohezní (soudržnost) síly. Dochází k vzniku vazeb mezi atomy pájky a pájené plochy. Dodáním tepla se zvýší pohyblivost atomů obou fází a dochází k vzájemné difuzi, což zesiluje vzájemné vazby. Atomy taveniny působí v krystalové mřížce tuhého kovu. Graficky znázorněný proces vzájemné difuze pájky a pájené plošky je na obrázku číslo 2. [1] [3]



Obrázek 2. Difuze roztavené pájky do pájeného materiálu [3]

Míru difuze (hloubka průniku) ovlivňuje velikost a pohyblivost atomů, teplota a také doba pájecího procesu. Velikost difuze v závislosti na teplotě lze vyjádřit pomocí difúzního koeficientu D . Popisuje kolik molů látky za vteřinu projde plochou o průřezu 1 m^2 při koncentračním gradientu 1 mol/m . Závislost difúzního koeficientu na teplotě:

$$D(J) = D_0 \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad (1)$$

Kde:

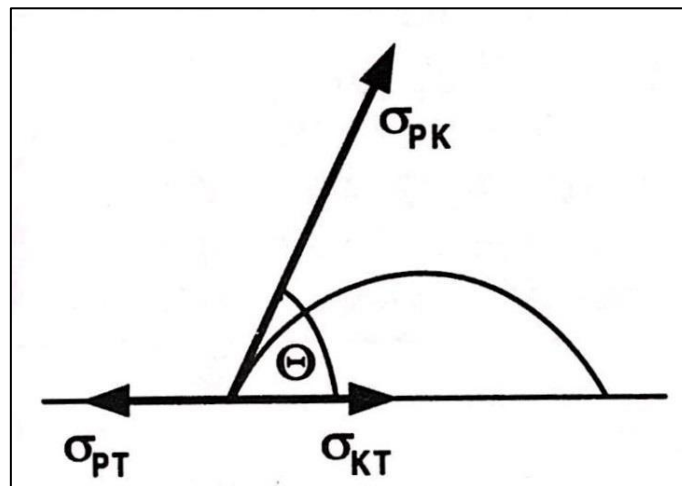
- $D(J)$ difúzní koeficient jako funkce teploty
- D_0 difúzní koeficient daného materiálu
- R univerzální plynová konstanta [J/mol.K]
- T termodynamická teplota [K]
- Q Aktivační energie daného materiálu [J/mol]

[3]

2.1.1 Smáčivost povrchu

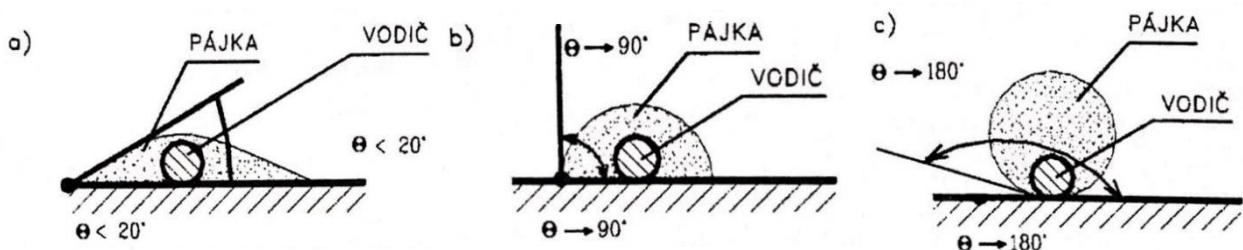
Dalším důležitým parametrem při pájení je smáčivost pájeného povrchu. Smáčivost vyjadřuje možnost plochy vytvořit na svém povrchu rovnoměrnou a souvislou vrstvu roztavené pájky. Smáčivost lze hodnotit ze dvou hledisek. První z nich je stupeň smáčivosti, který vyjadřuje, jak se pájka na povrchu rozteče. Druhým parametrem je rychlost smáčení, která udává rychlost roztékání pájky. [3]

Při smáčení povrchu pájkou jsou výsledné smáčecí charakteristiky výslednicí jednotlivých vektorových sil mezifázového povrchového napětí mezi tavidlem, okolním prostředím (např. vzduchem), povrchovou úpravou a pájkou. Vliv zde má i teplota a doba trvání procesu. Čím vyšší je smáčivost, tím vyšší je kvalita zapájeného spoje. Stupeň smáčení lze popsat pomocí součinitele smáčení $\cos \Theta$ nebo smáčecího úhlu Θ . [2]



Obrázek 3. Smáčení povrchu pájkou [1]

Pro dokonale smáčivý povrch je charakteristická rovnoměrně a hladce rozložená pájka o menší tloušťce, což můžeme vidět na obrázku 4a. Dokonale smáčivý povrch se vyznačuje smáčecím úhlem Θ do 20° , dostatečného smáčení však dosáhneme až do úhlu $\Theta \leq 55^\circ$. Nad tento úhel je povrch nedostatečně smáčen a pájka nedokonale pokrývá povrch, to lze vidět na obrázku 4b. Za nesmáčivý se povrch považuje v případě, že smáčecí úhel je mezi 90° až 180° , jak můžeme vidět na obrázku 4c, kde pájka smočila povrch, ale následně vytvořila na povrchu kapky pájky. [2] [4]



Obrázek 4. a) Dokonale smáčivý povrch b) Špatně smáčivý povrch c) Nesmáčivý povrch [2]

2.1.2 Vznik intermetalických vrstev

Průvodním jevem pájení je také vznik intermetalické sloučeniny mezi vrstvou pájky a pájenou plochou, bez této mezivrstvy by nedošlo k vytvoření pevného spoje. K růstu intermetalické vrstvy dochází právě v důsledku výše zmíněné difuze. Dochází k vzájemné interakci spojovaných materiálů, v důsledku čehož se vytvoří nová slitina s odlišnými vlastnostmi. Tloušťka intermetalických sloučenin se pohybuje řádově v desetinách μm . Intermetalické vrstvy jsou dynamického charakteru. Tloušťka vrstvy závisí na teplotě a časem narůstá. K jejímu růstu nedochází pouze při samotné tvorbě spoje, vrstva může nadále narůstat např. při zatížení v provozu, kdy je spoj zahříván prostředím, ve kterém se nachází, nebo je spoj zahříván průchodem proudu spojem. Malý nárůst můžeme pozorovat i při pokojové teplotě. Obrázek číslo 5 zobrazuje příklad závislosti tloušťky intermetalické vrstvy na teplotě a čase u pájky Sn-37Pb na měděném substrátu. [5]

Tloušťka intermetalických sloučenin Sn – Cu lze vyjádřit vztahem:

$$\delta = 10^3 * \exp \frac{-5 \cdot 10^3}{T} \sqrt{t} \quad (2)$$

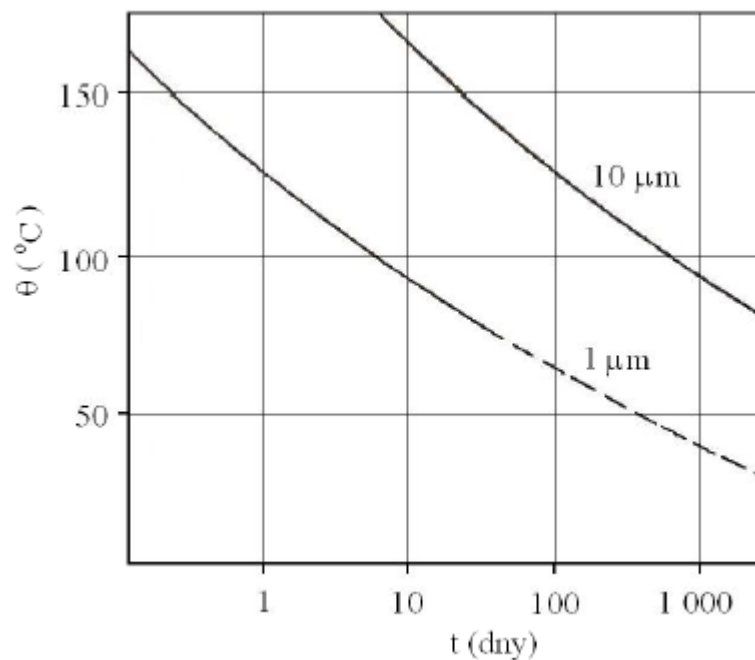
Kde:

δ tloušťka intermetalických sloučenin v $[\mu\text{m}]$

T teplota [K]

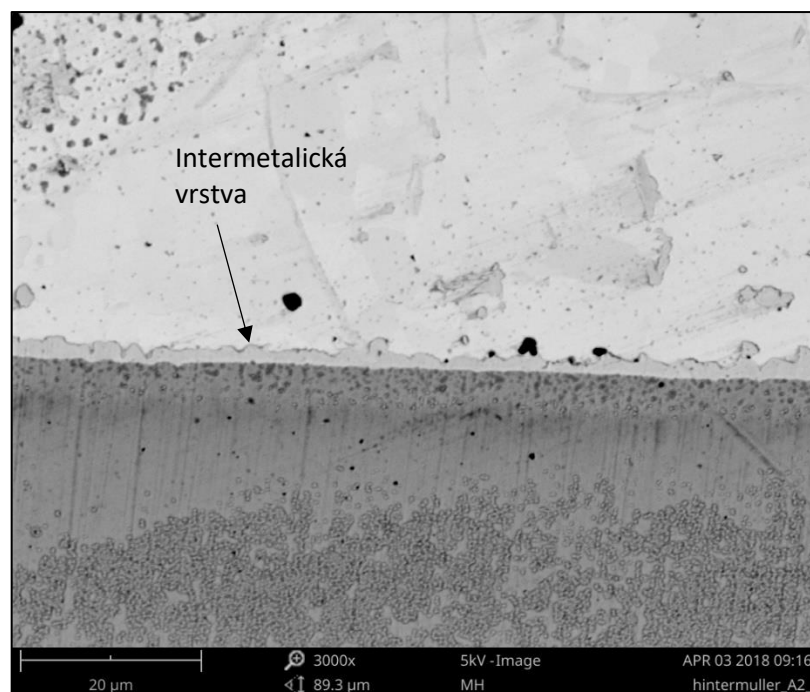
t čas [s]

[1]



Obrázek 5. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na čase a teplotě [5]

Intermetalická vrstva je pro pájený spoj potřebná, ale pouze do určité míry. V případě nadměrného nárůstu intermetalické vrstvy dochází k negativnímu ovlivnění vlastností spoje. Z mechanického hlediska se oproti pájce i substrátu liší intermetalická sloučenina svojí tvrdostí. Ta je přibližně o řád vyšší, a tím negativně ovlivňuje životnost spoje. Snížená životnost se projeví nejvíce u spojů, které jsou namáhány vibracemi nebo tepelným cyklováním, kde dochází ke vzniku prasklin. Intermetalické vrstvy se také liší svojí rezistivitou v porovnání s použitou pájkou (může být vyšší i nižší než u původní pájky). Při růstu intermetalické vrstvy dochází ke změnám elektrické vodivosti spoje. Rozdílná je zde i teplota tání, která je často mnohem vyšší než u použité pájky, např. intermetalická sloučenina Cu_3Sn má teplotu tání vyšší než $670\text{ }^\circ\text{C}$. To může být problémové při opravách na DPS. Na obrázku č. 6 lze vidět detailní záběr na intermetalickou vrstvu zachycený pomocí elektronového mikroskopu se zvětšením 3000x. [5]



Obrázek 6. Intermetalická vrstva se zvětšením 3000x [6]

2.2 Pájecí slitiny

Pájecí slitiny, nebo také zkráceně pájky, se v elektrotechnice používají k vodivému spojení součástek na DPS. Důležité jsou nejen elektrické parametry, životnost, ale také mechanické vlastnosti jako pevnost, teplotní součinitel roztažnosti atd. Jako pájky se používají těžké kovy nebo slitiny s nízkou teplotou tání, která se pohybuje okolo $230\text{ }^\circ\text{C}$. Základním prvkem většiny pájek je cín s teplotou tání $231,9\text{ }^\circ\text{C}$. Pájecí slitiny lze rozdělit na dvě základní skupiny, a to na základě toho, zda obsahují olovo či nikoliv. Většinou se jedná o dvou nebo tříložkovou slitinu kovů. Pájky z jednoho kovu nebo vícesložkové pájky se používají pro speciální aplikace. [7] [6]

2.2.1 Forma pájky

Vytvoření pájeného spoje je možné uskutečnit mnoha technologiemi, proto také existuje několik forem, ve kterých se pájecí slitiny produkují. První variantou je pájka ve formě dutého drátu, ve které se nachází tavidlo. Tato forma pájky se používá k ručnímu pájení. Pájka může být také ve formě ingotů, které se následně roztaví, např. při pájení vlnou či ponorem. V dnešní době je nejpoužívanější forma pájky pro sériovou výrobu DPS pájecí pasta, která obsahuje několik složek, jako je pojivo či tavidlo a další aditiva. Pájecí pasty se používají převážně u technologie SMT (Surface mount technology), kde se pasta nejčastěji nanese pomocí šablonového tisku. [7]

2.2.2 Olovnaté pájecí slitiny

Olovnaté pájecí slitiny byly dříve nejpoužívanější pájecí slitiny s nejlepšími vlastnostmi. V dnešní době jsou však nahrazeny pájkami bezolovnatými. V roce 2006 byla zavedena nová směrnice omezující užití některých nebezpečných látek v elektronických a elektrických zařízeních (RoHS). Tato směrnice nařizuje všem členským státům EU povinnost zajistit, aby nová zařízení uvedená na trh neobsahovala látky jako kadmium, rtuť, olovo atd. Výše zmíněné látky mají negativní vliv na živé organismy, životní prostředí a jsou neekologické. Tato směrnice se tedy také dotýká měkkého pájení v elektrotechnice. Existují však určité výjimky pro speciální obory jako je letectví, kosmonautika nebo také lékařství. Všechna tato odvětví jsou charakteristická vysokými nároky na kvalitu, životnost a spolehlivost výrobků, kde hraje svou roli i kvalita pájených spojů. [5] [6]

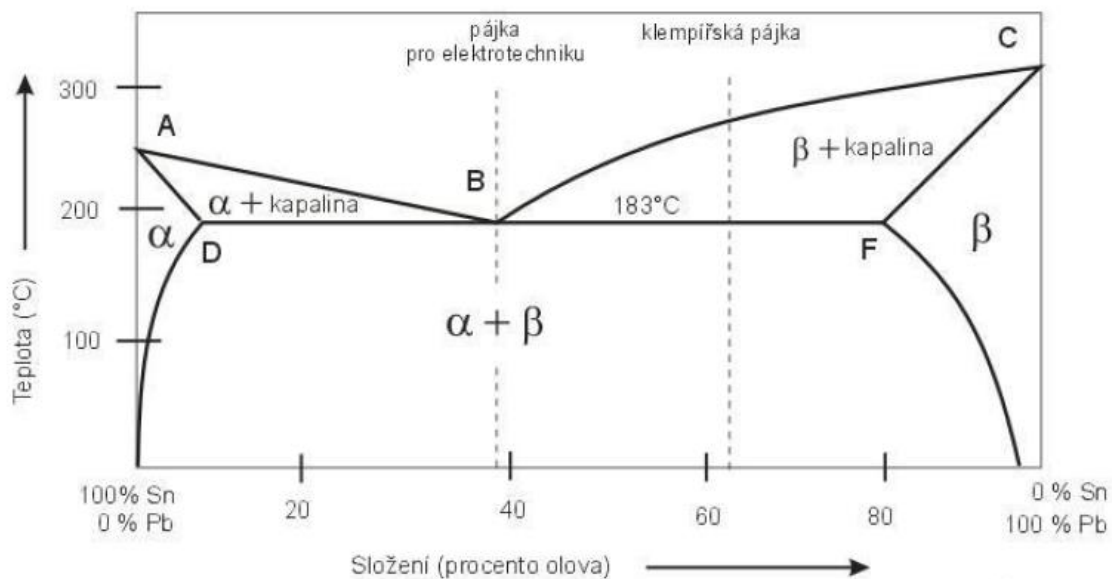
V nedávné minulosti jsme se mohli nejčastěji setkat s pájecími slitinami na bázi cín-olovo, a to z důvodu, že jsou schopny se pojit s většinou kovů. Nejpoužívanější olovnatou pájkou byla dvousložková slitina tvořená 63 % cínu a 37 % olova. Jedná se o eutektickou pájku s teplotou tání 183 °C. Tato pájka disponuje velice dobrými pájecími vlastnostmi, jako je smáčivost, tekutost. Výsledný spoj je hladký a lesklý s dobrou mechanickou odolností. [3]

Pájka často obsahuje další příměsi, které většinou negativně ovlivňují její vlastnosti. Může se jednat o:

- Měď při obsahu vyšším než desetina procenta, zhoršuje roztékavost, pájka je tvrdá a křehká, zvýší se i její hrubozrnnost.
- Kadmium nad 0,01 % v pájce způsobí porézní a křehký spoj.
- Železo při obsahu větším než 0,01 % zapříčiní „pískovou“ strukturu pájky.
- Zlato způsobuje zrnitost a křehkost.
- Stříbro snižuje lesk povrchu pájky (tmavší povrch), má schopnost rozpouštět jiné kovy.
- Bizmut snižuje pracovní teplotu vytváření spoje (snižuje teplotu tání, což se využívá u pájky Sn42Bi58)

Fosfor v množství 0,001 % až 0,004 % má redukční účinky, čímž snižuje oxidaci pájky, působí však až při vyšších pracovních teplotách nad 250 °C. [1]

Na následujícím obrázku můžeme vidět fázový diagram pájky cín-olovo, který popisuje skupenství použitých materiálů v závislosti na teplotě. Křivka má tvar širokého „V“ a nejnižší teploty tání slitiny cín-olovo je dosaženo v bodě B, kde slitina obsahuje 63 % cínu a 37 % olova, proto se slitina označuje za eutektickou, jak již bylo zmíněno výše. V oblasti nad křivkou „V“ se pájka nachází v kapalné fázi (liquidu), pod křivkou je pájka v tuhém skupenství (solidu). Teplotu tání čistých kovů Sn a Pb vyznačují body A a C. V ploše α jsou v krystalové mřížce cínu plně rozpuštěny atomy olova a v ploše β je tomu naopak. Plochy α +kapalina a β +kapalina vyznačují oblasti, kde je jeden kov kapalný, ale tvoří se v něm pevné krystalky kovu druhého, např. kapalná slitina cínu s krystalky olova. [7]



Obrázek 7. Fázový diagram cín-olovo [7]

2.2.3 Bezolovnaté pájecí slitiny

Používání bezolovnatých pájecích slitin se ve větší míře rozšířilo po roce 2006, kdy byla zavedena legislativa RoHS. Bezolovnaté pájky mají často horší vlastnosti než pájky obsahující olovo, proto je oblast bezolovnatého pájení stále předmětem výzkumu a inovací za účelem přiblížit se vlastnostem olovnatých pájek. Měly by splňovat následující vlastnosti a požadavky:

- Nízká teplota tání
- Blízká teplota pevné a kapalné fáze
- Příznivá cena (často použity vzácné kovy)
- Přijatelné elektrické a mechanické parametry
- Netoxické složení
- Přijatelná smáčivost povrchu
- Stálost při skladování
- Odolnost vůči korozi [5]

Olovnaté pájky jsou ve většině případů nahrazeny slitinami s majoritním zastoupením cínu, který tvoří ve většině případů 90 % až 99 % hmotnosti pájky. Další kovy se v pájce vyskytují v malém množství, ale zásadně ovlivňují její vlastnosti (viz tabulka č.1). Může se jednat o dvousložkové, tříložkové nebo i vícesložkové pájky. Pracovní teplota pájecího procesu u bezolovnatých pájek je typicky vyšší než u pájek s obsahem olova, proto teplota tání spolu se smáčivostí patří k nejdůležitějším parametrům pájky. Teplota tání se u většiny bezolovnatých pájecích slitin pohybuje mezi 215 °C až 220 °C. Pájecí proces však probíhá při teplotě vyšší, a to často až o 30 °C. V celkovém důsledku se teplota pájecího procesu blíží k limitní teplotě okolo 250 °C, kde se zvyšuje riziko degradace nebo úplného znehodnocení DPS v důsledku nadměrného tepelného namáhání substrátu, a také i již osazených součástek na desce. Z toho vyplývají vyšší nároky na parametry pájecího procesu jako jsou regulace teploty a použití ochranné atmosféry při pájení, protože s vyšší provozní teplotou dochází k vyšší oxidaci pájených povrchů v důsledku přítomnosti kyslíku ve vzduchu. [5]

Tabulka č. 1 – Vlastnosti prvků v bezolovnatých pájecích slitinách [4]

Prvek	Vlastnosti
Stříbro (Ag)	snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost
Bismut (Bi)	snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost
Měď (Cu)	zvyšuje pevnost
Zinek (Zn)	nízký bod tání, nízká cena
Antimon (Sb)	zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí
	pro lepší roztékavost a menší pravděpodobnost tombstoningu
Indium (In)	snižuje bod tání
Nikl (Ni)	zabraňuje odsmaččení

Pájky SnCu (SC)

Typicky se jedná o pájecí slitinu Sn-0,7Cu, kde obsah cínu je 99,3 % a mědi pouze 0,7 %. Tato slitina má eutektickou teplotu tání až 227 °C (teplota tání cínu je 232 °C). To je přibližně o 10 °C víc než u pájecích slitin typu SAC, o kterých je zmínka níže. Jejich nespornou výhodou oproti pájecím pastám SAC je mnohem nižší cena, protože neobsahují stříbro. Pro dosažení lepší smáčivosti se pájení provádí v ochranné atmosféře. V porovnání s olovnatou pájkou Sn37Pb mají SC pájky menší pevnost v tahu. Používají se při pájení čipů technologií flip-chip nebo pro povrchové úpravy vývodů součástek. Pomocí vhodných příměsí je možné vylepšit některé vlastnosti SC pájek jako smáčivost nebo snížení teploty tání. Nejčastější příměsí bývají nikl (0,01 – 0,05 %) nebo germanium (okolo 0,005 %). [10] [3]

Pájky SnAgCu (SAC)

Třísluškové pájky typu SAC jsou tvořeny vhodnou kombinací cínu, stříbra a mědi. V největším množství je vždy obsažen cín, a to až přes 95 %. Pájek SAC existuje několik typů, ty se odlišují zastoupením jednotlivých prvků. Obsah stříbra se většinou pohybuje mezi 3-4 % a obsah mědi kolem 0,5-2 %. Teplota tání pájek SAC se v závislosti na složení pohybuje mezi 217 °C až 219 °C.

Pájky typu SAC jsou nejpoužívanějšími bezolovnatými pájkami v průmyslu pro elektronickou montáž. Tato slitina bývá také doporučována organizacemi jako je ITRI (Industrial Technology Research Institute). Velkou výhodou této pájky je její mechanická pevnost, která je v porovnání s pájkou Sn37Pb až čtyřikrát vyšší. Vysokou pevnost způsobuje struktura spoje s rozptýlenými částicemi intermetalických sloučenin Ag_3Sn a Cu_6Sn_5 , které zabraňují pohybu dislokací. Nevýhodou je vyšší cena pájky z důvodu obsahu stříbra. [10]

Pájky SnAg (SA)

V tomto případě pájka obsahuje pouze cín a stříbro, nejčastěji v poměru 96,5 % cínu a 3,5 % stříbra. Tato slitina taje při teplotě 221 °C a nejčastěji se využívá v telekomunikační technice, automobilovém průmyslu a spotřební elektronice. Vysoký obsah stříbra však způsobuje značně vysokou cenu pájky. Při pájení v ochranné atmosféře N_2 dosahuje tato pájka shodné i lepší smáčivosti v porovnání s olovenou pájkou. [10]

Pájky SnBi (SB)

Tato slitina je tvořena cínem a bizmutem. Pájky s tímto složením mají velmi nízkou teplotu tání, která může být u pájky Sn-58Bi pouze 138 °C. To lze využít například k pájení součástek citlivých na vysoké teploty, u kterých by mohlo dojít k poškození vlivem nevhodného pájecího procesu s vysokou teplotou potřebnou pro přetavení pájky. Tato pájka se většinou používá ve spotřební elektronice. Další předností SB pájek je jejich cena, mají však horší mechanické vlastnosti než ostatní bezolovnaté slitiny. [4] [5]

2.3 Deska plošného spoje

Deska plošného spoje nebo také zkráceně DPS je plocha, na kterou se osazují součástky ještě před samotným zapájením. DPS plní nosnou (mechanickou) funkci pro osazené součástky, ale také zároveň plní funkci elektrickou, kde na DPS musí být zajištěno elektrické propojení součástek pomocí vodivých cest vytvořených na povrchu DPS. [11]

DPS existují v několika možných variantách od jednovrstvých, dvouvrstvých až po desky, které mají vrstev několik. Jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou propojeny tzv. prokovy. Při návrhu DPS se vychází z elektrického schématu, rozměrových možností, velikosti a umístění součástek. S ohledem na neustále se zvyšující nároky na miniaturizaci elektroniky a složitosti schémat, a tím i velkého počtu součástek na DPS, se dnes nejvíce používají desky vícevrstvé. [11]

DPS se skládá z několika částí. Jako základní nevodivý materiál (jádro), který plní nosnou funkci, se nejčastěji používá FR-4. FR-4 tvoří skelná vlákna napuštěná epoxidovou pryskyřicí. Důležitými parametry jádra jsou elektrická pevnost, mechanické parametry jako tvrdost, ohebnost nebo tepelná roztažnost. Na jádro se následně nanese vrstva mědi o tloušťce 18 až 70 μm . Měď se následně vyleptá, např. pomocí fotolitografie, tak aby vznikly požadované vodivé cesty a pájecí plošky. [11]

2.3.1 Nepájivá maska

Jedná se o krycí vrstvu, která chrání povrch DPS, a především odhalenou měď, která není určena k pájení, aby na ní nedocházelo k zachytávání pájky a nedocházelo např. k vzniku zkratů. Nepájivá maska plní další funkce jako je rozlišovací schopnost, ochrana proti mechanickému poškození, zvyšuje elektrickou pevnost atd. Maska může být snímatelná nebo permanentní. Typicky má nepájivá maska zelenou barvu, v praxi se však lze setkat i s maskami modrými a červenými. [19]

2.4 Povrchové úpravy

Úprava povrchu desek plošných spojů tvoří nedílnou část montážního procesu. Povrchová úprava hraje velkou roli nejen při samotném procesu pájení, ale je také velmi důležitá při skladování DPS a má vliv na výslednou kvalitu a spolehlivost pájeného spoje. Nejběžnější povrchové úpravy jsou popsány níže v podkapitolách. [4] [14]

Nejdůležitější funkce povrchových úprav jsou [14]:

- Zabraňují oxidaci případně jiné formě koroze měděného povrchu DPS
- Zajišťují dlouhodobou skladovatelnost DPS
- Zlepšují pájitelnost povrchu (zvýšení kvality spoje)

2.4.1 HASL (HAL)

Zkratka anglického „Hot air Solder Leveling“. Povrchová úprava se vytváří ponořením DPS do roztavené pájky. DPS musí být před ponořením do pájecí lázně předehřáta, aby nedošlo k tepelnému šoku. Po vytažení z lázně se přebytečná pájka odstraní pomocí trysek s horkým vzduchem tzv. „Air Knives“. Dříve se pro vytvoření HASL používala stejná pájecí olovnatá slitina jako pro samotné pájení, tedy nejčastěji slitina typu SnPb. V dnešní době musí být nahrazena bezolovnatou variantou, a to nejčastěji slitinou Sn-Cu-Ni (příměs niklu 0,06 %). Výhodou povrchové úpravy HASL je velice dlouhá skladovatelnost, relativně nízká cena a plné smáčení povrchu mědi. Problémy mohou nastat u SMT aplikací vzhledem k malé rovinnosti povrchu. Nevýhodou může být také další dodatečné tepelné namáhání DPS. Teplota procesu vytváření HASL se pohybuje okolo 260 °C. [15]

2.4.2 OSP

Pro Organic Solderability Protectives (OSP) se typicky používají deriváty benzotriazolu, imidazolu nebo benzimidazolu, které zajišťují ochranu proti oxidaci a poškrábání měděného povrchu na DPS. Jedná se o organickou konzervační látku, pomocí níž se na povrchu mědi chemicky vytvoří ochranný film o tloušťce 0,2 – 0,5 μm . Používání povrchové ochrany OSP vzrostlo se zvětšujícím se podílem povrchové montáže (SMT) v elektrotechnickém průmyslu. Výhodami OPS jsou dobrá rovinnost vytvořeného povrchu, nízká cena a jednoduchost procesu. Skladovatelnost je kratší než u povrchové úpravy HASL, a to okolo 6-12 měsíců při vhodných skladovacích podmínkách. Vzhledem k nedostatečnému barevnému kontrastu OSP se můžeme setkat s problémy v oblasti vizuální kontroly DPS. Pro pájení povrchů s ochrannou vrstvou OSP se doporučuje použít ochrannou atmosféru N_2 . [15]

2.4.3 ENIG

ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) - jak je z názvu patrné, tuto povrchovou úpravu tvoří dva kovy. První vrstva, která se nanáší na základní vrstvu mědi, je tvořena niklem o tloušťce přibližně 3 až 6 μm . Druhou svrchní vrstvou je chemicky nanesené zlato o velmi malé tloušťce 0,05 – 0,1 μm . Primárním úkolem zlaté vrstvy je chránit nikl před oxidací a pasivací povrchu před samotným pájením. Vrstva niklu zabraňuje styku cínové pájky s vrstvou mědi, a tím zabraňuje vzniku intermetalické vrstvy mezi Sn a Cu. ENIG dále disponuje dobrou rovinností povrchu a dlouhou dobou skladovatelnosti. Vzhledem k obsahu zlata je povrchová úprava značně nákladná. [15]

2.4.4 Imerzní Cín (Sn)

Tato povrchová úprava se na DPS s odhalenou mědí vytvoří ponořením do cínové lázně. Tloušťka cínu se pohybuje v rozmezí 1 – 1,3 μm . Jedná se o dobře zvládnutý a jednoduchý proces s nízkou cenou. Vrstva má dobrou rovinnost a je vysoce materiálově kompatibilní. Při vhodných skladovacích podmínkách je skladovatelnost delší než 12 měsíců. [3] [15]

Mezi cínem a mědí dochází k vzniku intermetalických sloučenin Cu_3Sn a Cu_6Sn_5 . Vlivem teploty postupně dochází k zvětšování intermetalické vrstvy, což může negativně ovlivnit dobu skladovatelnosti a později i pájitelnost povrchu. [15]

Povrchová úprava imerzním cínem je také náchylná na růst whiskerů, což jsou vodivé krystalky vyrůstající z kovového povrchu. Whiskery mohou vyvolat např. zkrat na DPS. Někteří výrobci se výskyt whiskerů snaží omezit přidáním různých kovových nebo organických aditiv při nanášení této povrchové úpravy. Celé problematice whiskerů se věnuje kapitola č.5. [15]

2.5 Tavidla

Tavidlo je nezbytnou a nenahraditelnou komponentou pájecího procesu. Funkcí tavidla je před pájením očistit povrch substrátu od nečistot a zbavit jej zoxidované vrstvy na pájených plochách. Během pájení zajišťuje ochranu tavící se pájky a substrátu před opětovnou oxidací a napomáhá lepší smáčivosti povrchu, roztékavosti pájky. Dále tavidlo napomáhá k lepšímu přenosu tepla v pájeném spoji. Použití tavidla má však i negativní efekt v podobě zbytků tavidla na povrchu DPS, které mohou později způsobovat korozi či mohou být vodivé. To vede k snížení životnosti a spolehlivosti DPS, proto je v některých případech (druh tavidla) nezbytné odstranění těchto zbytků, což prodlužuje a zdražuje celý výrobní proces. [16] [17]

Tavidlo se u strojního pájení vlnou (flow) nanáší ve formě pěny, nástřikem, případně vlnou. Snahou je pokrýt tavidlem všechny kovové části s použitím minimálního množství tavidla. V tomto případě je tavidlo v kapalném skupenství. Vyskytují se však také tavidla tuhá či ve formě gelu. V případě pájení přetavením (reflow) se používá pájecí pasta, která již tavidlo obsahuje a není tedy zapotřebí tavidlo nanášet zvlášť. Tavidlo v pájecí pastě také upravuje její viskozitu, aby se pasta před pájením nadměrně neroztékala po povrchu DPS, a zároveň šla snadno nanášet. [17] [18]

Tavidlo tvoří několik rozdílných komponent [17]:

- Rozpouštědlo – kapalný nosič pro ostatní složky tavidla, napomáhá k lepšímu nanášení tavidla.
- Pojidlo – tepelně stabilní materiál, který za vysokých teplot působí jako rozpouštědlo.
- Aktivátor – přísada podporující smáčivost povrchu odstraněním oxidů a jiných nečistot, nejčastěji se jedná o různé kyseliny, jako např. o kyselinu fosforečnou, chlorovodíkovou atd. K aktivaci dochází při zvýšených teplotách.
- Povrchově aktivní látky – složka snižující povrchové napětí mezi kovem a pájkou pro další zlepšení smáčivosti povrchu.
- Antioxidant-složka zabraňující opětovné oxidaci povrchu při pájení.

Tavidla se dělí na tři základní typy, a to tavidla pryskyřičná, organická nebo anorganická. Toto rozdělení popisuje norma ČSN EN 29454 a můžeme ho vidět v tabulce níže. Alternativně se dají tavidla dělit na rozpustná ve vodě nebo rozpustná v rozpouštědlech. [18]

Tabulka č. 2 – Rozdělení tavidel podle ČSN EN 29454 [18]

Klasifikace tavidla			Kód	
Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivace tavidla		
1. Pryskyřičná	1. Kalafuna	1. Bez aktivátoru	1.1.1	
	2. Nekalafunová pryskyřice	2. Halogeny	1.2.1	
		3. Nehalogenové aktivátory		1.1.2
				1.2.2
				1.1.3
		1.2.3		
2. Organická	1. Vodou ředitelná	1. Bez aktivátoru	2.1.2	
	2. Vodou neředitelná	2. Halogeny	2.1.3	
		3. Nehalogenové aktivátory		2.2.2
				2.2.3
3. Anorganická	1. Soli	1. S chloridem amonným	3.1.1	
		2. Bez chloridu amonného	3.1.2	
	2. Kyseliny	1. Kyselina fosforečná	3.2.1	
		2. Jiná kyselina	3.2.2	
	3. Alkálie	1. Aminy nebo amoniak	3.3.1	

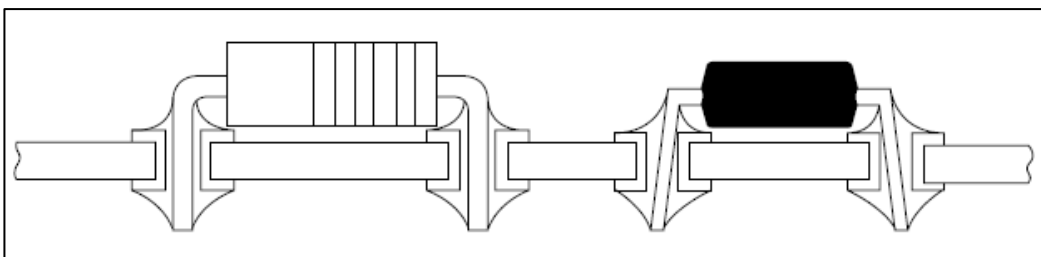
3 Metody pájení

V následující kapitole budou popsány nepoužívanější technologie a metody měkkého pájení, které slouží k mechanickému a elektrickému spojování součástek na DPS. V základu se dá měkké pájení rozdělit na pájení ruční a pájení strojové. Dnes nejvyžívanější strojové pájení se pak dále dělá na další metody, které budou popsány níže.

3.1 Technologie montáže součástek

3.1.1 Technologie THT

Takzvaná „vsazovaná montáž“ se používala převážně do začátku osmdesátých let, kdy byla nahrazena technologií SMT v důsledku snahy o zmenšování rozměrů DPS, úspory času a použitého pájecího materiálu. U této technologie se drátové vývody součástek pájí na opačné straně, než se nachází pouzdro součástky, tedy na opačné straně DPS. Pro zapájení je potřebné předem vyvrtat vhodné otvory, do kterých se zasouvají vývody součástek. Výhodou je, že součástky pájené touto technologií poskytují větší mechanickou pevnost spoje, a proto se dnes technologie THT používá převážně pro větší součástky na DPS, jako jsou např. kondenzátory. Další využití této technologie stále nachází v armádním a leteckém odvětví, případně se využívá pro kusovou výrobu prototypů. K vytvoření pájeného spoje se u THT technologie využívá pájení vlnou, selektivní pájení, případně pájení ruční. Na obrázku č. 8 můžete vidět příklad „vsazované montáže“. [13]

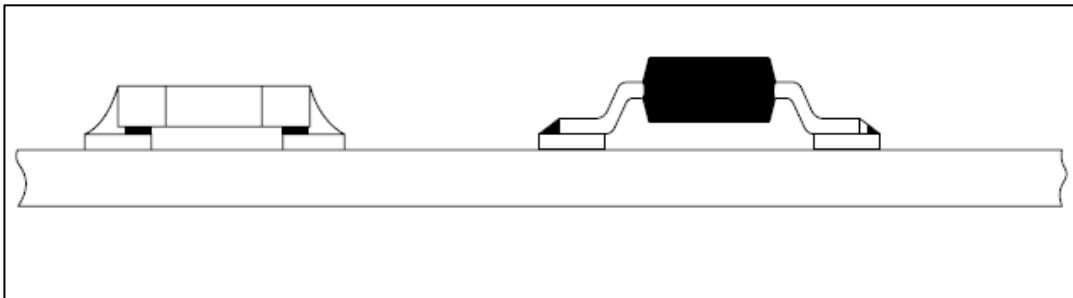


Obrázek 8. Příklad Technologie THT [12]

3.1.2 Technologie SMT

Zkratka z anglického „Surface mount technology“ se dá do češtiny přeložit jako povrchová montáž. Tento druh montáže se objevil na začátku šedesátých let, revoluci v oblasti osazování DPS však způsobil až v letech osmdesátých díky tomu, že bylo možné osazovat desky součástkami z obou stran. Při použití technologie SMT jsou totiž součástky pájeny na stejné straně jako se nachází samotné pouzdro součástky. To přináší mnoho výhod, jako je např. zmenšení pájecích plošek a tím i samotných součástek, dále odpadá nutnost vyvrtávání děr pro vývody součástek jako je tomu u technologie THT. Dochází k zrychlení výroby vlivem lepší automatizace a k značné úspoře použité pájky. Pro pájení

součástek SMD se nejčastěji využívá pájení přetavením, které bude podrobněji popsáno níže. Příklad povrchové montáže můžete vidět na obrázku č. 9. [12]

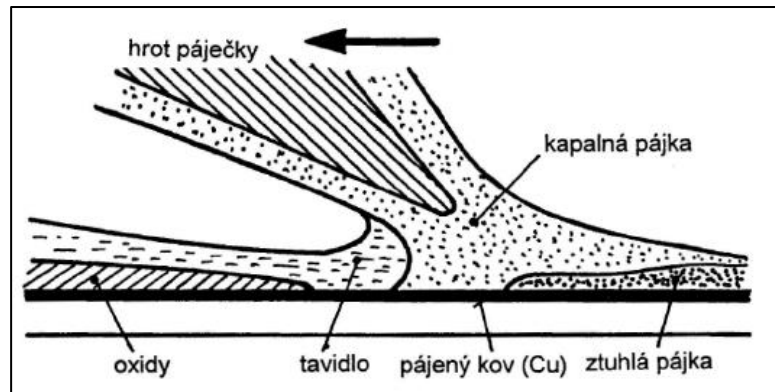


Obrázek 9. Příklad technologie SMT [12]

3.2 Ruční pájení

Ruční pájení vzniklo již ve starověku, přibližně 2000 let před naším letopočtem, kde sloužilo k mechanickému spojování. Samozřejmě že ruční pájení bylo také první metodou spojování součástek s DPS ještě před vznikem strojových technologií pájení, které postupem času ruční pájení v průmyslové výrobě nahradily. V současnosti se s ručními páječkami setkáváme především v malovýrobě, při tvorbě prototypů, při opravě poškozených součástek, či v ojedinělých případech, kdy některé speciální součástky není možné strojově pájet a je třeba ruční montáž. Ruční pájení je oproti strojnímu časově náročnější, dosahujeme při něm nižší kvality spoje vlivem lidského faktoru, který ovlivňuje např. množství naneseného tavidla, čas pájení, množství pájky atd. [6] [14] [20]

Pájka se u ručního pájení nejčastěji vyskytuje ve formě drátu, případně se u SMD součástek jedná o pájecí pastu. Prvním krokem montáže je osazení součástkami a nanesení tavidla, dle použité technologie THT nebo SMT. Pak následuje přehřátí pájeného místa a rychlé přiložení pájky do míst spojovaných částí. Dochází k tavení pájky a následnému smáčení povrchu. Proces by měl trvat přibližně 2 až 5 s v závislosti na pájecí teplotě a typu páječky. V případě nedostatečného přehřevu by mohlo dojít vlivem nedostatečného smáčení povrchu ke vzniku tzv. studeného spoje. Snažíme se vytvořit spoj s hladkým a lesklým povrchem. Příklad tvorby pájeného spoje hrotovou páječkou můžete vidět na následujícím obrázku. [20]



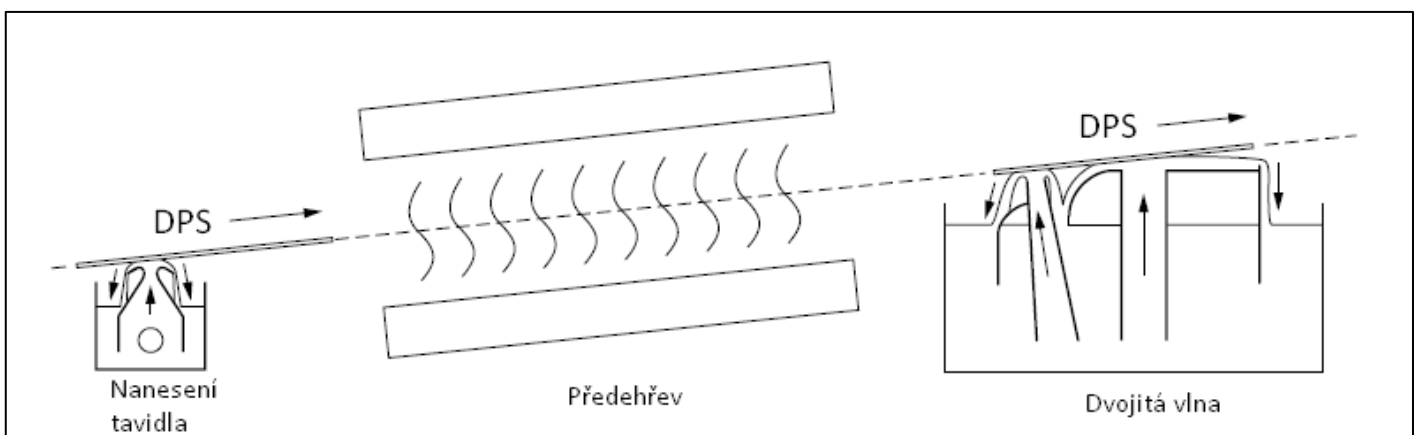
Obrázek 10. Pájený spoj vytvářený hrotovou pájkou [20]

Ruční pájení se provádí nejčastěji hrotovou pájkou s nastavitelnou teplotou hrotu, kde hrot kontaktně ohřívá pájecí plošky. Dále může být k ohřevu použit proud horkého vzduchu, který se využívá převážně k opravám SMD součástek u chipů. V některých případech se využívá vysokofrekvenčního pájení. [14]

3.3 Pájení vlnou

Pájení vlnou, často také nazývané jako „Flow soldering“, bylo jednou z prvních technologií strojového pájení, která se využívala pro pájení součástek technologií THT. Dá se však využít i pro dnes používanější technologii povrchové montáže. Obě technologie se dokonce dají zkombinovat, kdy na spodní straně DPS jsou vyvedeny vývody THD součástek a zároveň jsou na stejné straně součástky SMD přilepené speciálním lepidlem, aby na desce držely před zapájením. [12] [21]

Pájka se nachází roztavená v kontejneru s čerpadlem a tryskami, které vytlačují pájku a vlnou „omývají“ pájený povrch DPS. Na ploškách, které nejsou určeny k pájení, je nanášena nepájivá maska. Schématický příklad procesu pájení vlnou je na následujícím obrázku. K vytvoření pájecí lázně je zapotřebí velké množství roztavené pájky. Jedná se o energeticky velmi náročný proces.



Obrázek 11. Proces pájení vlnou [12]

Ve většině případů se jedná o tzv. „in-line“ výrobu, která se skládá s několika operací [12] [21]:

- Osazení součástek – Tuto operaci provádí osazovací automat. SMD součástky musí být přilepeny nevodivým a chemicky nereaktivním lepidlem.
- Nanesení tavidla – Tavidlo se dá nanášet několika způsoby. Může se jednat o nanesení vlnou, nástřikem, případně tavidlem ve formě pěny. Tavidlo se nanese na celou spodní plochu DPS, což vede k jeho velké spotřebě.
- Předehřev – Po nanesení tavidla dochází k předehřátí DPS. Předehřev je nezbytný pro aktivaci tavidla a ochraně DPS před teplem šokem. Teplota desky by měla stoupat maximálně o 2 °C/sek.
- Průchod vlnou – Deska prochází vlnou roztavené pájky. Teplota u bezolovnatých pájek se pohybuje okolo 260–265 °C. V některých případech pájení probíhá v inertní atmosféře zajišťující ochranu před oxidací povrchu a lepší smáčivost povrchu.

V praxi existuje několik druhů vln. Pro DPS se součástkami THD se typicky používá vlna jednoduchá. Taková vlna však nedostačuje pro pájení SMD součástek. Součástky SMD na spodní straně DPS zasahují do působení laminární vlny a často tak dochází k tzv. „shadowing efektu“, kdy součástka zastíní pájecí plošku, která se nachází za ní, a nedojde tak k vytvoření kvalitního spoje. Pro odstranění shadowing efektu je zapotřebí použití vlny dvojité, která se skládá z vlny turbulentní a laminární. Turbulentní vlna zajišťuje dobré smáčení pájeného povrchu a laminární vlna má za úkol odstranit přebytečné množství pájky, aby nedocházelo k vzniku můstků mezi vodiči. Dochází k značnému tepelnému namáhání součástek, a to zvláště u bezolovnatých pájek. [12] [21]

3.4 Pájení přetavením

Ve snaze eliminovat chyby a zrychlit proces pájení SMD součástek se začala používat metoda pájení přetavením. Tento pojem, v angličtině označovaný jako reflow soldering, v sobě skrývá celou řadu odlišných pájecích metod. Jejich společným znakem je použití pájky ve formě pasty, která se skládá z miniaturních kuliček pájecí slitiny (prášek), tavidla a dalších aditiv upravujících vlastnosti pájecí pasty, jako je např. roztékavost. [19]

Použití pájecí pasty poskytuje několik zásadních výhod oproti pájení vlnou. První z nich může být ta, že samotná pájecí pasta neslouží pouze jako pájecí materiál, ale také jako „lepidlo“, které zajišťuje dostatečnou adhezi součástek k DPS před zapájením. To v porovnání s pájením vlnou urychluje výrobní proces. Výhodná je možnost nanesení definovaného množství pájecí pasty, což eliminuje vznik shadowing efektu jako u pájení vlnou, a také vede k značné úspoře pájecího materiálu. Při pájení máme také lepší kontrolu nad teplotním profilem procesu a součástky jsou tak lépe chráněny před teplotním namáháním a šokem. Charakteristickou vlastností pro pájecí pastu a součástky SMD je

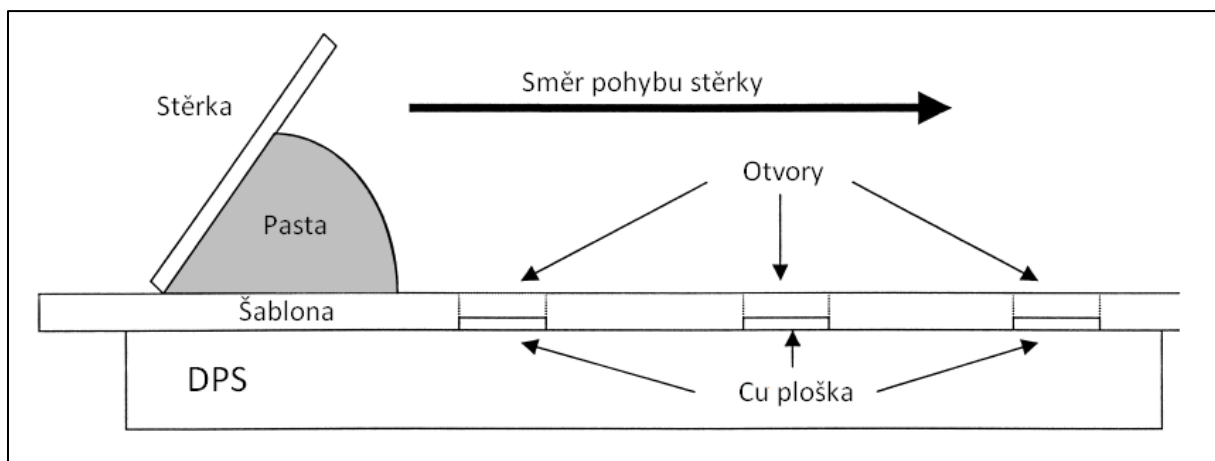
schopnost vycentrovat se během procesu přetavení vlivem povrchového napětí. Špatně osazená součástka se tak může dostat při přetavení do správné polohy. Vliv nevhodného povrchového napětí však může vyvolat i jev opačný, kdy správně osazené součástka může být zapájena špatně. [12] [19]

3.4.1 Operace před přetavením

Nanesení pasty

Celý proces se opět skládá z několika oddělených operací. Prvním krokem je nanesení pájecí pasty. Snažíme se o nanesení vždy stejného rovnoměrného množství pájecí pasty. To se dá provádět několika způsoby. První možností je využití dávkovače, který nanáší malé množství pasty pomocí speciální jehly. Při nanášení dávkovačem není zapotřebí výroba šablony pro tisk pasty, což se hodí především u nízkoobjemové produkce nebo při opravách. Pro velkokapacitní průmyslovou výrobu není dávkovač vhodný vzhledem k časové náročnosti nanášení a nižší přesnosti. [12] [22]

Druhou, v sériové výrobě používanější, možností aplikace pájecí pasty je využití šablonového tisku. Pasta se na DPS nanáší pomocí stěrky, která pastu protlačí skrz otvory v šabloně. Šablona bývá nejčastěji zhotovena z kovu a vždy se navrhuje pro unikátní tvar DPS. Mělo by se zde uplatňovat pravidlo pěti zrn, které říká, že do nejmenšího otvoru šablony by se mělo vejít minimálně pět zrn pájky. Důležitou roli při nanášení pasty hraje rychlost, tlak a úhel natočení stěrky. Důraz musíme klást i na čistotu a rychlost oddělování šablony od DPS. Pro ověření procesu nanášení se provádí automatická optická inspekce, která rozpozná pozici, tvar a množství nanesené pájecí pasty. [22]



Obrázek 12. Šablonový tisk [12]

Osazení součástek

Po nanesení pasty a její kontrole následuje osazení DPS součástkami. Jde o nejpomalejší část výrobního procesu elektroniky na DPS. Nejčastěji se používají osazovací automaty pick and place. Tyto automaty součástku podtlakem uchopí a umístí ji na požadované místo na desce. Rychlost osazovacích automatů se pohybuje až 10000 součástek/hod. [21]

3.4.2 Metody pájení přetavením

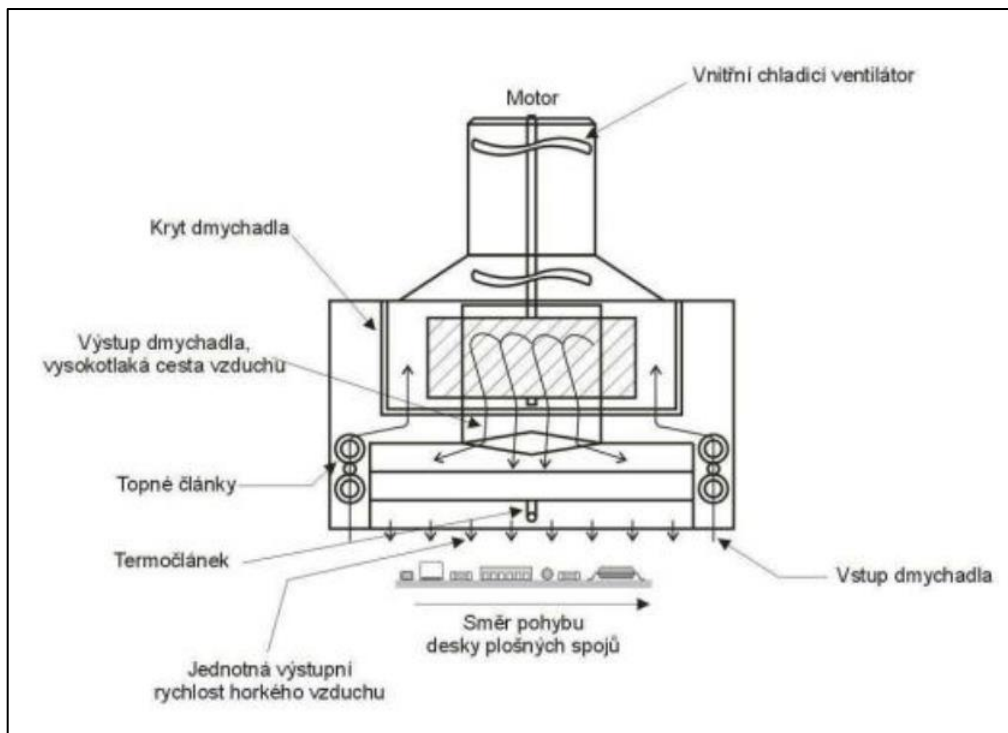
Jak již bylo zmíněno, existuje mnoho způsobu přetavení pájecí pasty. Podrobněji budou popsány pouze nejběžnější z nich. Metody přetavení [23]:

- Pájení horkým plynem (konvekční ohřev)
- Pájení infračerveným zářením (radiační)
- Pájení v parách (kondenzační)
- Pájení laserem
- Pájení vyhřívaným nástrojem (impulzní)
- Pájení na horké desce či pásu

3.4.3 Pájení horkým plynem – Konvekční

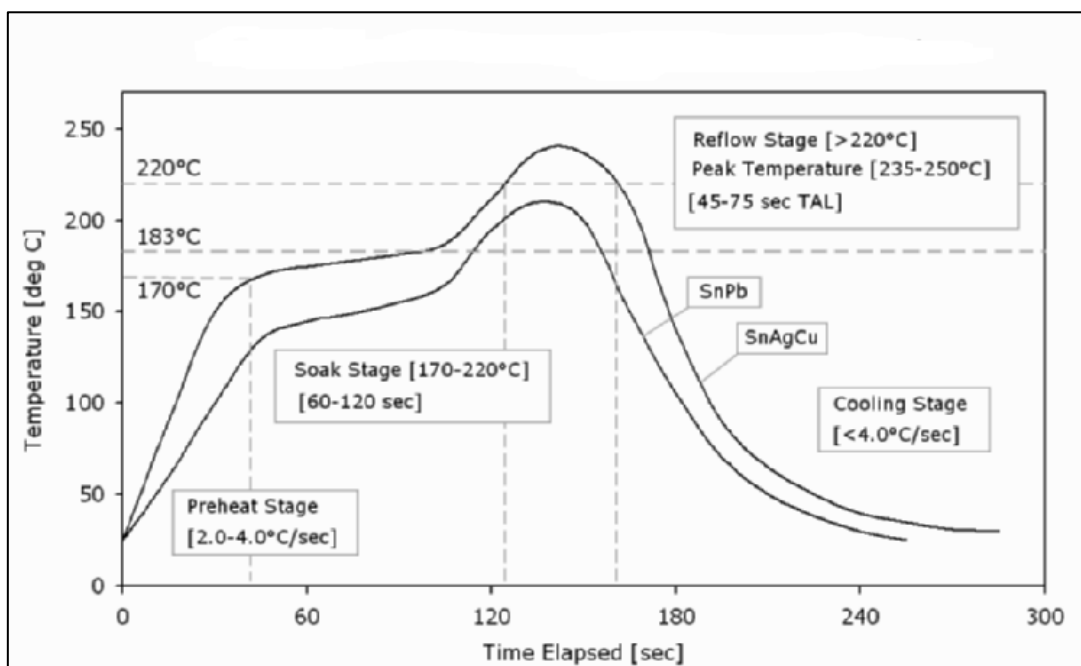
Nejpoužívanějším způsobem přetavení pájecí pasty je využití nucené konvekce, a to především u bezolovnatého pájení. Princip spočívá v průchodu DPS umístěné na dopravníku skrz pájecí pec, ve které cirkuluje horký plyn. Oběh plynu zajišťují zabudované ventilátory, plyn je ohříván topnými tělesy. Jako plynné médium se používá dusíku, který chrání DPS před oxidací povrchu. V levnějších variantách pájecích pecí může jako médium sloužit i vzduch. Nevýhodou konvekčního pájení je velká energetická náročnost. [24]

Pájecí pec obsahuje několik zón s rozdílnou teplotou média. U moderních pájecích linek se můžeme setkat s pecí rozdělenou až na deset zón. Čím více zón pec má, tím se zvyšuje možnost regulace teploty celého procesu. Nastavením teplot v jednotlivých zónách lze zabránit tepelnému šoku, a také zajistíme správnou aktivaci tavidla a dostatečné prohřátí spoje. Na obrázku č. 13 můžeme vidět detailní pohled na topnou jednotku pece. [24] [21]



Obrázek 13. Topná jednotka reflow pece [24]

Důležitou roli zde hraje tzv. teplotní profil, což je závislost teploty na povrchu DPS v čase. Tato závislost popisuje přehřev, maximální dosahovanou teplotu, ale i chlazení desky po pájení. Vhodný teplotní profil se nastavuje podle dat poskytovaných od výrobce použité pájecí pasty. Lze ho ovlivnit regulací teploty v jednotlivých zónách pece nebo rychlostí posuvu dopravníku. Porovnání teplotního profilu olovnaté a bezolovnaté pájky vidíme na následujícím obrázku.[6]



Obrázek 14. Teplotní profil [15]

3.4.4 Pájení infračerveným zářením

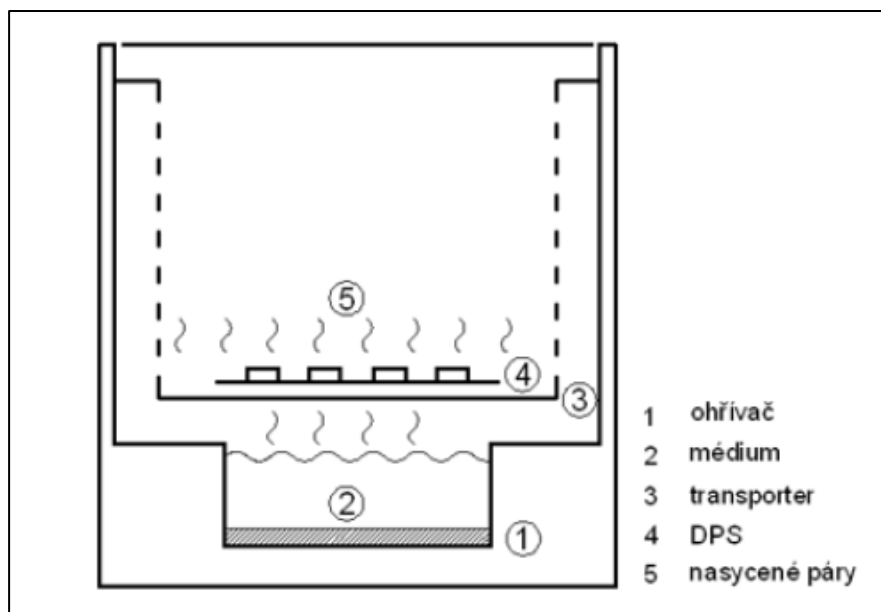
IR pece, využívající se k pájení přetavením, obsahují několik lamp emitujících infračervené záření na povrch DPS. Pece jsou opět rozděleny do několika oddělitelně nastavitelných pájecích zón. IR záření působí kolmo na DPS, která nejčastěji projíždí pecí po pásovém dopravníku, existují však i varianty vsázkové pece pro kusovou produkci. [21] [19]

Záření dopadající na povrch je částečně absorbováno, čím přijme energii, která vede k zvýšení teploty pájeného spoje a k následnému přetavení pasty. Poměr absorbovaného, případně odraženého záření závisí na složení materiálu, vlnové délce záření, reflektivitě povrchu, barvě a tvaru součástek. Dochází k nerovnoměrnému zahřátí pájených míst a součástek na DPS, což vyvolává chyby a defekty. Může se zde objevit shadow efekt, který způsobí nedostatečné přetavení pájecí pasty, a vznikne tak studený spoj. Ten bývá způsoben zastíněním pájecích ploch pouzdry větších součástek osazených na DPS. Pro odstranění těchto nežádoucích jevů se často IR ohřev kombinuje s ohřevem konvekčním. Výhodou pájení pomocí infračerveného záření je velká účinnost procesu. [21] [24]

3.4.5 Pájení v parách

Pájení v parách, často nazývané jako kondenzační pájení (anglicky vapor phase soldering), využívá k přetavení teplo par speciálního pájecího média a také energii předanou při kondenzaci těchto par. K pájení v parách se využívají speciální komory, kde se ve spodní části nachází topná tělesa, která zahřívají médium (galden) až do bodu varu, čímž dojde k následnému odpaření. Stoupající páry média ohřívají DPS a kondenzují na chladnějších plochách DPS a předávají tak teplo, čímž dojde k přetavení pájecí pasty. Zkondenzovaná kapalina zkapává zpět do vroucí lázně, kde je opět odpařena. Pájecí teplota odpovídá bodu varu galdenu, nemůže tak dojít k nadměrnému zvýšení teploty. [20] [25]

Dříve bylo pájení v parách preferovanou technologií přetavení u SMT především pro skvělý přestup tepla a inertní atmosféru uvnitř komory. Kondenzační pájení má také značnou řadu nevýhod jako vysokou cenu média a obtížné řízení teplotního profilu, proto se později začalo používat spíše ve speciálních aplikacích (např. armáda, letectví). V současnosti se však objevují nové typy kondenzačních komor, které zajišťují lepší říditelnost teplotního profilu, a tím eliminují teplotní šok způsobený rychlým nárůstem teploty. [25]

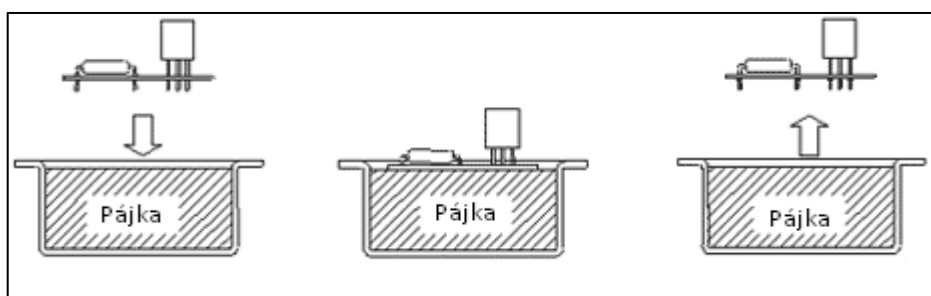


Obrázek 15. Pec pro pájení v parách [20]

3.5 Pájení ponorem

Pájení ponorem funguje na podobném principu jako pájení vlnou, liší se však mírou automatizace pájecího procesu. Pájení vlnou je plně automatizovaný proces vhodný pro průmyslové provozy, probíhá nejčastěji na in-line pájecí lince. Pájení ponorem se používá při pájení ručním a je tedy vhodné spíše k nízkokapacitní produkci. [3]

Pájená deska s již osazenými součástkami se vloží do vany s roztavenou pájecí slitinou. Doba ponoření desky se pohybuje mezi 2 až 12 sekundami. Dojde tak k zapájení ploch nepokrytých nepájkivou maskou. Držák pájeného předmětu bývá mírně nakloněn, což zajistí dobrý odtok přebytečné pájky vedoucí k hladšímu povrchu spoje. [3]



Obrázek 16. Schéma pájení ponorem [25]

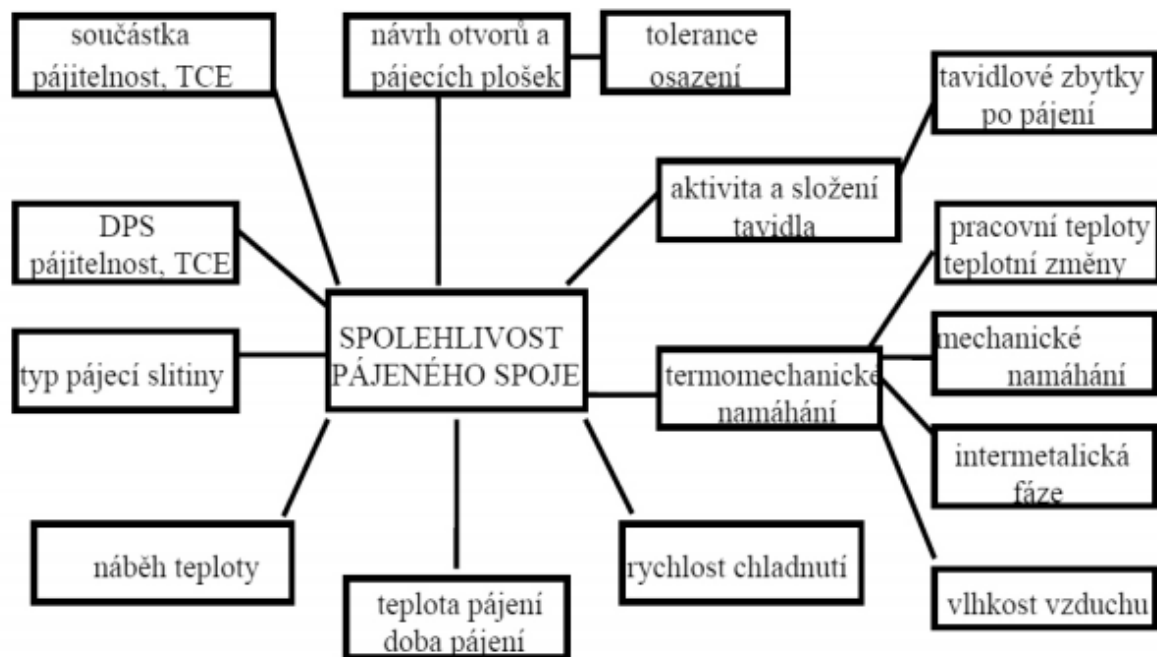
4 Spolehlivost pájeného spoje

Spolehlivost je definována jako vlastnost objektu plnit požadovanou funkci za určených podmínek po danou dobu. U pájeného spoje je tím myšlena funkce vodivostní a mechanická. Spolehlivost pájeného spoje závisí asi ze 75 % na pájce, dále na kontaktní ploše na DPS (20 %) a zbytek tvoří spolehlivost vývodů součástek, proto je nezbytné klást důraz na kontrolu kvality všech částí spoje.

Faktorů ovlivňujících spolehlivost pájeného spoje je mnoho, což schematicky ukazuje obrázek č. 17. Mezi nejzákladnější faktory patří:

- Stárnutí materiálu
- Mechanické namáhání
- Teplotní namáhání

Životnost pájených spojů se pohybuje obvykle v řádu let, proto je pro testování pájených spojů nezbytné použití zrychlených laboratorních zkoušek. Zrychlené zkoušky spočívají v tom, že zkoumané objekty (spoje) jsou namáhány a testovány při zvýšených teplotách, často při zvýšené relativní vlhkosti. Takové podmínky zajistí rychlejší stárnutí a degradaci materiálů a často simulují náročné pracovní podmínky. Mechanické zkoušky se nejčastěji provádějí pomocí vibrací. [36] [37]



Obrázek 17. Faktory ovlivňující spolehlivost spoje [37]

4.1 Stárnutí spoje

Stárnutí materiálu je ovlivněno mírou difuze, tedy tvorbou intermetalické vrstvy mezi pájkou a pájenou ploškou. Tato difuze je nezbytná pro vytvoření kvalitního pájeného spoje a vzniká již při procesu pájení. Difúzní vrstva ale postupem času narůstá a v nadměrné tloušťce není žádoucí.

Negativně totiž ovlivňuje mechanické a elektrické vlastnosti, jako např. křehkost a elektrickou vodivost, což postupem času může vést k nefunkčnosti spoje. Míra difuze závisí převážně na provozní teplotě spoje, kdy s vyšší teplotou difúzní (intermetalická) vrstva roste rychleji. [36] [37]

4.2 Mechanické namáhání

Při mechanickém namáhání dochází k únavě materiálu pájeného spoje. To postupem času způsobuje zhoršení mechanických vlastností spoje a vede k následné mechanické poruše. Velikost namáhání je ovlivněna několika faktory, např. typem vývodu. Součástky s drátovým vývodem nejsou tak mechanicky namáhány, protože vývod toto namáhání napomáhá redukovat. Značnou roli na mechanické namáhání má i délková teplotní roztažnost DPS, pájky a komponent, která může způsobovat vnitřní pnutí.[36]

Namáhání můžeme rozdělit na externí a interní. Externí namáhání vzniká vnější působící silou, což mohou být např. vibrace, nebo tlak na součástku. Interní namáhání vzniká změnou ve struktuře materiálu. [36]

4.3 Tepelné namáhání

Tepelné namáhání může být vyvoláno okolím, kdy je spoj provozován v blízkosti zařízení vyzařujícím teplo, nebo ho může vyvolat sám obvod vlivem průchodu proudu a jeho ztrátového výkonu. V důsledku tepelného namáhání dochází k vratným a nevratným změnám v materiálu. K nevratným změnám patří již zmíněný růst intermetalických sloučenin a za vratné změny se považují např. mechanické změny rozměrů a průhyby materiálu závislé na koeficientech teplotní roztažnosti. [36]

4.4 Chyby a vady pájených spojů

Výroba pájených spojů v elektrotechnice je složitý proces se značnou řadou operací. Snažíme se zajistit co možná nejvyšší kvalitu a spolehlivost pájeného spoje, proto musí být celý proces neustále kontrolován, analyzován a řízen, aby bylo zamezeno vzniku chyb, které se mohou objevit již při výrově substrátů DPS, osazování součástek, při pájení nebo i po zapájení v náročných provozních podmínkách. Pro zamezení chybovosti je nezbytná optimalizace procesu vhodnou volbou komponent, druhu pájecí slitiny, složení tavidla a zvolením vhodné technologie pájení. Již zhotovený spoj pak musí být provozován ve vhodných provozních podmínkách. Následující podkapitoly popisují nejběžnější chyby vyskytující se při tvorbě pájených spojů v elektrotechnice.

4.4.1 Chyby vstupního materiálu

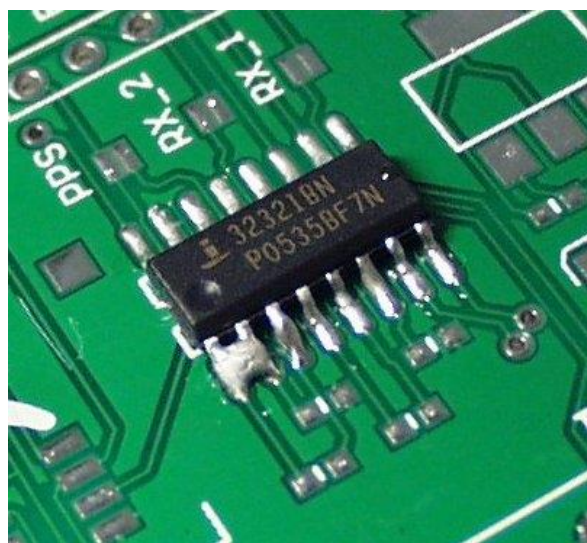
Chyby vstupního materiálu nevznikají během osazení nebo pájení DPS, ale jejich zdrojem jsou chyby na osazovaných součástkách nebo DPS. Takové chyby jsou způsobeny nevhodnou výrobou nebo neopatrnou přepravou a manipulací dopravcem materiálu. Chyby mohou vyvolat i nevhodné skladovací podmínky. [27]

Jednou z těchto vad může být prohnutí DPS do tzv. luku nebo může být DPS ohnutá pouze na jedné straně. Můžeme se také setkat s delaminací jednotlivých vrstev DPS, k čemuž nejčastěji dochází při nadměrném tepelném namáhání desky. Další problémem, který je vyvolaný nejčastěji špatnou manipulací s komponentami, je jejich znečištění. Nečistoty mohou totiž později způsobit problémy se smáčivostí povrchu. [27]

4.4.2 Můstek

Můstek (bridging) je jednou z nejčastějších chyb v oblasti pájení. Při vzniku můstku dochází k vytvoření vodivého spojení (zkratu) mezi sousedními pájenými spoji vlivem nadměrného množství pájky. Tento problém se objevuje stále častěji vzhledem k neustálé miniaturizaci součástek a pájecích ploch. Neustále tak narůstají požadavky na přesnost nanášení pájky. [12]

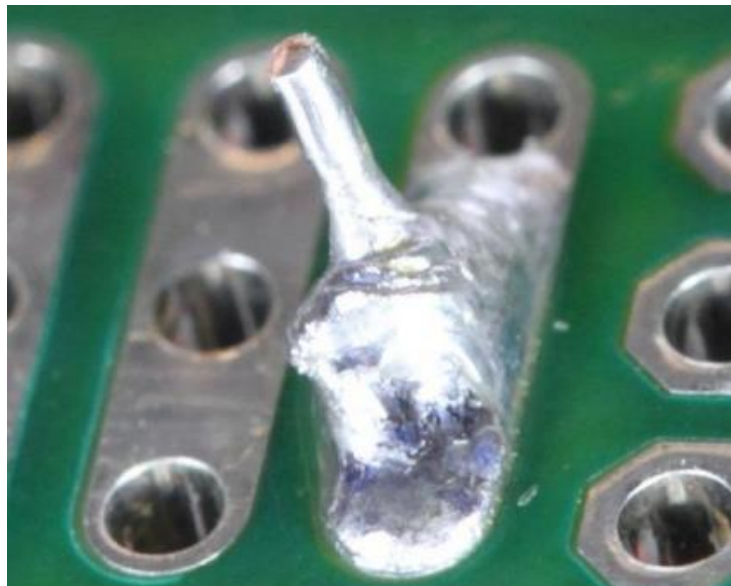
Můstky se často vyskytují u pájení přetavením, kde chyba vznikne již při nanášení pasty přes šablonu. To způsobuje špatný návrh šablony nevhodný, tlak stěrky nebo nedostatečné čištění šablony. Míra výskytu můstků se ještě zvětšuje s vyšší teplotou přetavení. Pro odhalení můstků ještě před přetavením pasty se používá optická kontrola SPI. Pro eliminaci vzniků můstků se např. doporučuje snížit množství pájecí pasty použitím tenčí šablony, snížit tlak při osazování součástek nebo volit chladnější teplotní profil s mírnějším růstem teploty. Příklad můstku u povrchové montáže můžete vidět na následujícím obrázku. [12] [20]



Obrázek 18. Můstek u výbodů IO [31]

4.4.3 Studený spoj

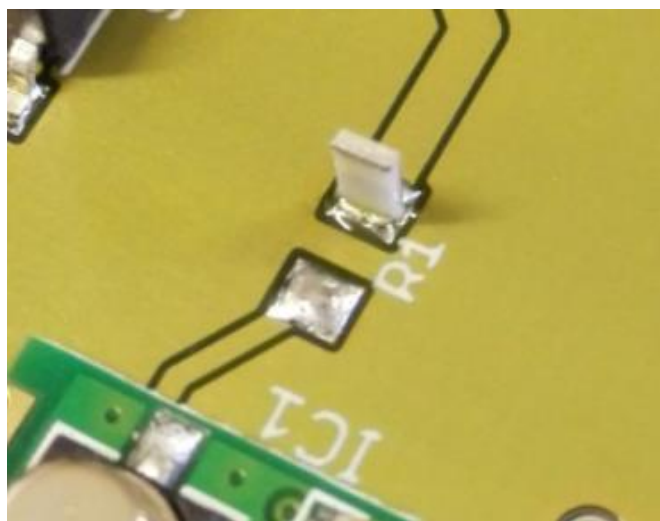
Povrch studeného spoje je typicky matný a hrudkovitý. K vzniku studeného spoje dojde při nedostatečném prohřátí pájeného spoje a nedojde tak k úplnému roztavení pájky, což může mít nejrůznější příčiny. Patří k nim příliš nízká teplota pájení, nedostatečný čas pájení nebo špatný návrh pájené plošky. Studený spoj musíme důkladně prohřát a tím ho odstranit. V opačném případě se na takovém spoji začnou tvořit praskliny a může tak dojít k selhání spoje. [28]



Obrázek 19. Studený spoj [32]

4.4.4 Tombstoning

Tombstone efekt, do češtiny doslovně přeložený jako efekt náhrobního kamene, je v podstatě nadzvednutí součástky na jednom konci během přetavení pájecí pasty. V některých případech dochází až k vertikálnímu natočení součástky, jak ukazuje obrázek č. 20. Dojde tak k přerušení obvodu a nefunkčnosti zařízení. [30]



Obrázek 20. Tombstone effect [33]

K nadzvednutí součástky dochází při průchodu DPS pájecí pecí, kdy je jeden spoj součástky prohřátý dříve než ten druhý. To může v některých případech způsobit rychlejší roztavení pájecí pasty na jedné straně součástky. Dochází tak ke změně povrchového napětí. Síly působící na součástku jsou v nerovnováze. Na součástku začnou působit smáčecí síly, které jsou větší než adheze pájecí pasty, dojde tak k nadzvednutí součástky. K vzniku tombstone efektu přispívá nerovnoměrné nanesení pájecí pasty, špatně navržené pájecí plošky. Tombstone efekt se častěji vyskytuje u bezolovnatých slitin, protože se u nich vyskytuje větší povrchové napětí [27] [34]

4.4.5 Nesmáčivost

Nesmáčivost povrchu se projevuje neúplným pokrytím pájené plochy pájkou. Typicky se zde objevuje velký smáčecí úhel α mezi kontaktní ploškou a pájkou. Pájka se často zformuje do tvaru kapky nebo kuličky. Nesmáčení povrchu má mnoho příčin, jako jsou např.: [12] [34]

- Nízká kvalita pájecí slitiny
- Nedostatečná aktivace tavidla
- Nevhodný teplotní profil, případně nevhodná pájecí atmosféra
- Oxidace pájeného povrchu



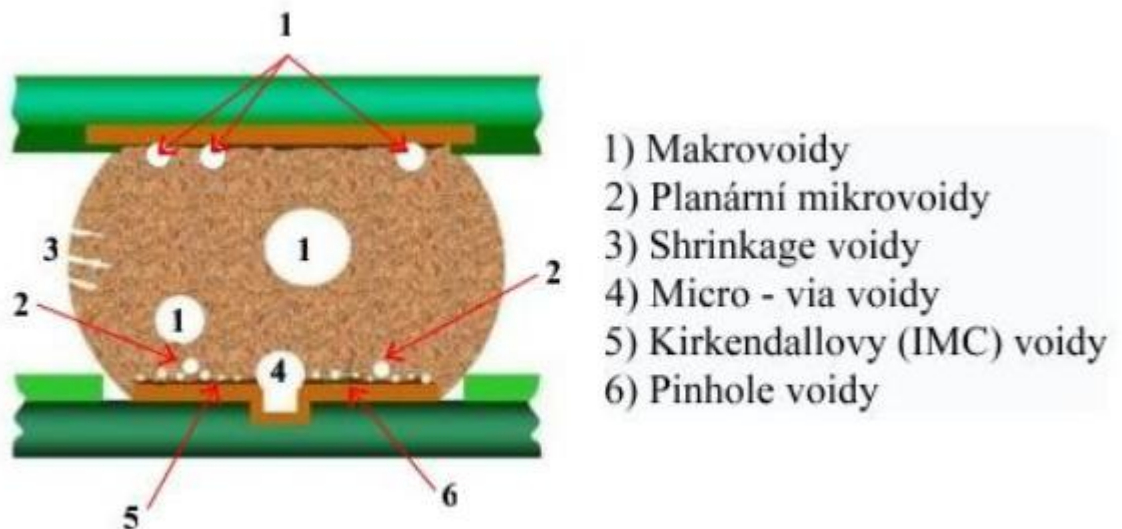
Obrázek 21. Nesmáčivý spoj [34]

4.4.6 Voidy

Voidy jsou dutinky vznikající uvnitř objemu pájeného spoje. Voidy jsou typické zejména pro pájení přetavením. Tyto dutinky mohou obsahovat vakuum, plyny či zbytky nekovových materiálů, tavidel a jiných přírodních látek. Vznik voidů představuje rizika pro kvalitu a spolehlivost pájených spojů. Voidy způsobují pokles mechanické odolnosti spoje, kdy je spoj např. náchylnější na vibrační namáhání. Voidy ovlivňují tepelné a elektrické parametry pájeného spoje. Void zmenšuje objem vodivé cesty, což má za následek zvýšení odporu spoje. U součástek, které jsou značně proudově namáhány, dochází k nadměrnému vzniku tepla. Pájený spoj, jehož objem tvoří dutina (void) z více jak z 25 %, se považuje za vadný. [3] [34]

Větší výskyt voidů byl pozorován při přechodu na bezolovnaté pájení. Vznik voidů má několik příčin. Je to například průběh teplotního profilu v pájecí peci, složení pájecí pasty, vyšší povrchové napětí. Vliv také může mít povrchová úprava DPS a geometrie pájecích ploch. [3] [14]

Voidy se dají rozdělit do několika základních skupin. Nejběžnější jsou tzv. makrovoidy, které se mohou nacházet kdekoliv v objemu spoje a dosahují velikosti 100 - 300 μ m. Vznikají z důvodu odpařování složek pájecí pasty při přetavení. Dále se lze setkat s mikrovoidy, shrinkage voidy nebo třeba s mikro-via voidy. Jednotlivé druhy voidů jsou znázorněny na následujícím obrázku. [14]



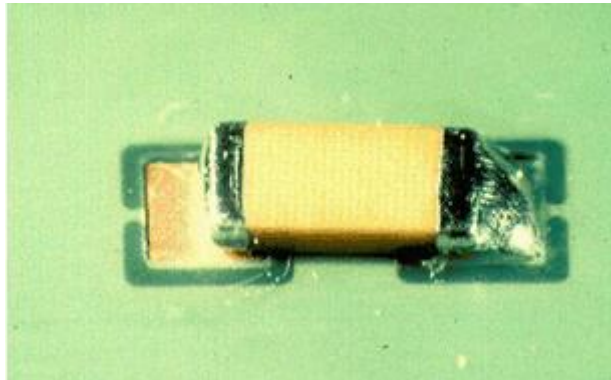
Obrázek 22. Voidy v pájeném spoji [14]

4.4.7 Oxidace

Vysoké procento chyb a defektů u pájení je spojeno s oxidací pájeného povrchu. Se zoxidovanou vrstvou na povrchu pájených ploch se můžeme setkat velmi často a ve většině případů se odstraní pomocí vhodného tavidla. V některých situacích, kdy je vrstva oxidu příliš tlustá nebo nedojde k správné aktivaci tavidla, nemusí být vrstva oxidu zcela odstraněna. Pájka může také oxidovat během pájení vlivem okolního prostředí, atmosféry. Vrstva oxidu pak působí negativně na kvalitu spoje, a může vést ke vzniku dalších vad jako např. ke špatné smáčivosti povrchu. [30]

4.4.8 Otevřený či chybějící spoj

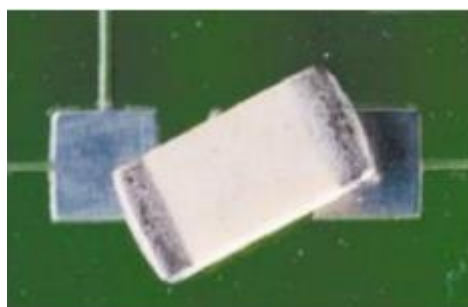
Další závažnou chybou, která způsobí až nefunkčnost obvodu, je nekvalitně spojený, otevřený až chybějící spoj, viz příklad na následujícím obrázku. Součástka je nekvalitně spojena s DPS a toto spojení má velký přechodový odpor. V některých případech dochází až k rozpojení obvodu. Častou příčinou chybějícího spoje je nedostatečné množství pájecí pasty. To většinou způsobuje špatný návrh šablony nebo ucpaná šablona pro nanášení. U pájení vlnou se může jednat o důsledek špatného přehřevu nebo nevhodně nastavenou výšku pájecí vlny. [28] [30]



Obrázek 23. Chybějící spoj [28]

4.4.9 Nesprávné umístění součástky

Tato chyba vznikne nepřesným osazením součástky. Nejčastěji se s tím můžeme setkat při ručním pájení součástek s malým pouzdem. Pokud se jedná pouze o mírné pootočení nebo posunutí součástky, k nápravě chyby dojde samovolně vlivem povrchového napětí pájky při přetavení pájecí pasty. V případě, že je pootočení větší než polovina pájecí plošky, k nápravě nemusí dojít a je vyžadován zásah v podobě přesnějšího osazení součástky. [30]



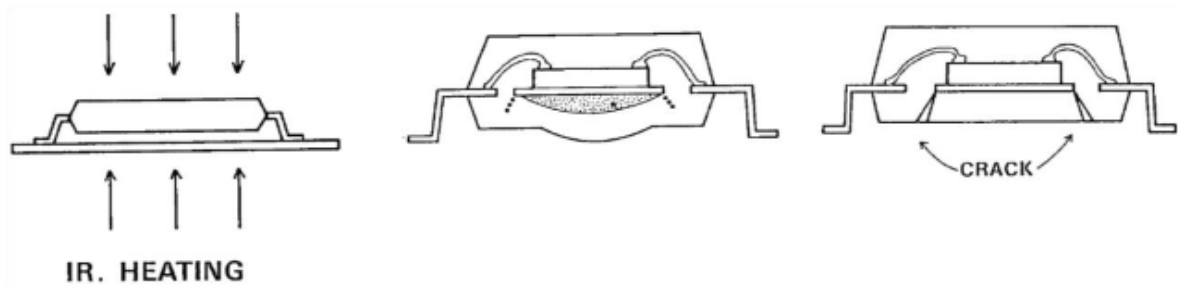
Obrázek 24. Chybně umístěná součástka [30]

4.4.10 Popcorn efekt

Vada nazvaná jako popcorn efekt vzniká nejčastěji při pájení přetavením na plastových pouzdech integrovaných obvodů, dále IO. Popcorn efekt je způsoben vlhkostí uvnitř pouzdra integrovaného obvodu, která se do pouzdra dostane nejčastěji při výrobě IO. Při pájení přetavením, kdy teploty dosahují až 260 °C, dochází k zahřívání vlhkosti uvnitř IO. To vede k její přeměně na páru,

kteřá se začne rychle rozpínat, což vyvolá značné namáhání pouzdra součástky. V některých případech dochází k nafouknutí spodní části pouzdra, což může později vyvolat jeho popraskání. [35]

S tímto problémem se opět častěji setkáváme u bezolovnatého pájení, a to z důvodu nutnosti použití vyšších pájecích teplot při přetavení než je tomu u pájek olovnatých. Problémová je i detekce této vady, protože k praskání pouzdra dochází ve spodní části součástky. Následující obrázek popisuje mechanismus vzniku popcorn efektu. [34] [35]

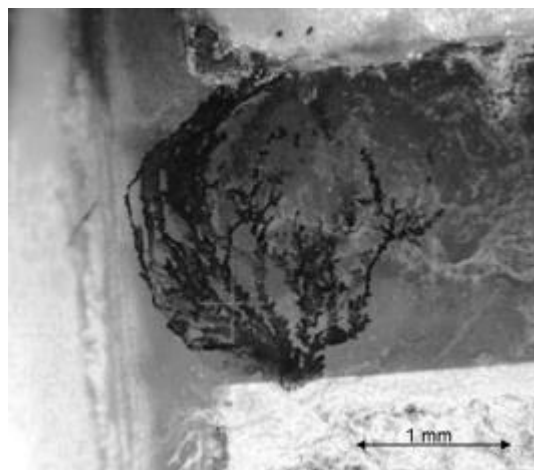


Obrázek 25. Popcorn efekt [34]

4.4.11 Dendrity

Slovo dendrit pochází z řeckého výrazu dendron, což znamená strom. Jedná se o vodivé cestičky rozvětveného stromovitého charakteru, které za určitých podmínek vznikají mezi dvěma místy s rozdílným elektrickým potenciálem na desce plošných spojů. Při růstu dendritů může dojít k úbytkům napětí nebo až ke zkratu, a tedy k nesprávné funkci celé DPS.

Růst dendritů je vyvolán elektrochemickou migrací, což je proces, při kterém jeden kov (kontakt) předá ionty kovu druhému (kontaktu). Mezi těmito kontakty se nachází izolant (povrch DPS) a působí zde elektrické pole. Příčinou elektrochemické migrace je snížení povrchového odporu, které je vyvoláno kondenzací vody na povrchu DPS, která následně reaguje se zbytky tavidla. [29]



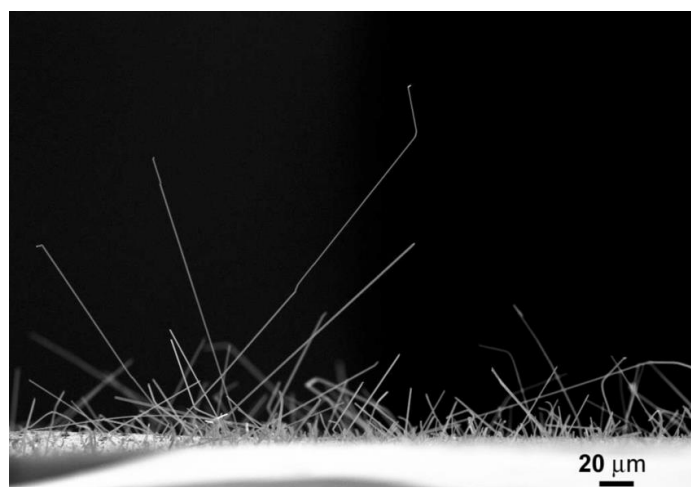
Obrázek 26. Dendrity na DPS [29]

5 Whiskery

Další z chyb vyskytující se v oblasti elektrotechniky jsou whiskery. Whiskery, v překladu z angličtiny „vousy“, vyrůstají na kovovém povrchu pájených spojů, případně vývodů součástek a povrchových úprav. Whiskery mohou představovat závažné problémy z hlediska spolehlivosti, avšak jejich problematika není příliš zmapována, a neexistuje jednotná teorie popisující růst whiskerů. Představeny byly zatím čtyři možné teorie tvorby whiskerů popsané níže. [9]

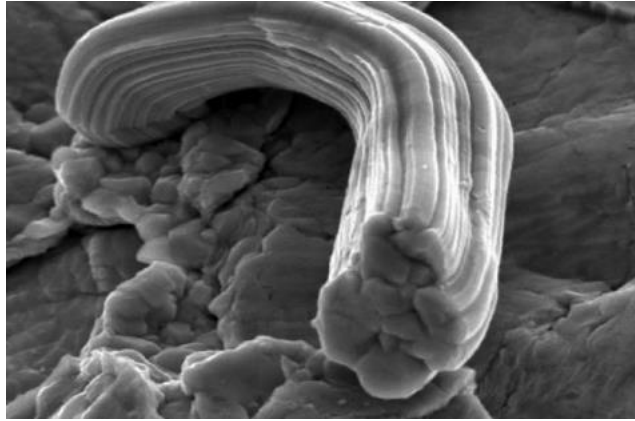
Jedná se o poměrně mechanicky odolné vodivé krystaly různých tvarů samovolně vyrůstající na povrchu některých kovů, a to i při pokojových teplotách. Nejčastěji byl výskyt whiskerů pozorován u cínu, zinku nebo kadmia a antimonu. V mnohem menší míře se můžou vyskytovat u kovů jako stříbro, železo, nikl, zlato či platina a u některých dalších. Tato práce se zaměřuje především na whiskery cínové, vyskytující se v elektrotechnice nejčastěji. [9]

Whiskery mohou vznikat a následně růst do různých tvarů. Mohou být rovné, což je nejčastější případ, dále zahnuté či dokonce zauzlené. Whisker má většinou válcovitý tvar s průměrem pohybujícím se mezi 1–5 μm . Délka whiskerů je nejčastěji 1 – 500 μm . Pozorovány byly ale také případy, kdy whisker dosáhnul délky překračující 10 mm. Příklad whiskerů zachycených pomocí techniky SEM je možné vidět na obrázku č. 27. [9] [21] [38]



Obrázek 27. Sn Whiskery na Cu substrátu [8]

Další charakteristickým znakem whiskerů jsou podélné pruhy či kruhy po obvodu whiskeru, viz následující detailní snímek zahnutého whiskeru. Průměr whiskeru je po celé jeho délce téměř konstantní. [39]



Obrázek 28. Detail zahnutého whiskeru [41]

5.1 Historie problematiky

Za druhé světové války se ve vojenských zařízeních obsahujících elektroniku často využívalo kadmium (Cd). U těchto zařízení docházelo k opakovaným poruchám, často způsobených zkratem vyvolaným kadmiovým whiskerem, což popsal H. L. Cobb již v roce 1946. Další podobný problém se objevil o dva roky později v roce 1948 u telekomunikační společnosti Bell, kde docházelo k růstu whiskerů na kadmiových kanálových filtrech telefonních linek, proto bylo přistoupeno k náhradě kadmia cínem. Později se však ukázalo, že whiskery se objevují i u cínových povrchových úprav. V důsledku toho byly zahájeny první dlouhodobé výzkumy whiskerů společnostmi jako ITRI (the International Tin Research Institute), ESA (the European Space Agency) a dalšími. [40]

Během 50. až 70. let minulého století došlo k podrobnějšímu zmapování whiskerů a vznikla řada studií a nových pohledů na tuto problematiku. Značně k tomu přispěly objevy diagnostických metod TEM (transmission electron microscope) a SEM (scanning electron microscope). Například v roce 1954 Koonce a Arnold publikovali, že růst whiskerů způsobuje postupné přidávání atomů kovů do základny whiskeru. Ve stejném roce Arnold objevil, že růstu whiskerů se dá zamezit přidáním malého množství olova do cínu. V tomto období byly také publikovány tři teorie růstu whiskerů, a to teorie šroubové dislokace, teorie kluzkých rovin a teorie třífázového růstu. [5] [38] [40]

V roce 1966 Rozen přišel s opatřeními na omezení whiskerů, a to s nanášením tlustší cínové vrstvy (větší než 5 μm) a s následným žiháním. V roce 1973 výzkumník Tu uvedl, že růst whiskerů by mohl být vyvolán mechanickým napětím, které vyvolává intermetalická vrstva mezi cínem a mědí. Tento autor také představil teorii prasklého oxidu. [38]

Další zajímavé zjištění v oblasti whiskerů prezentoval Xu v roce 2002, kdy napsal, že whiskery rostou pouze vně cínové vrstvy a že růst whiskerů byl pozorován u ohnutých vzorků na tlakově namáhaných místech. [38]

Asi poslední rozsáhlou teorii popisující důvody vzniku a mechanismy růstu whiskerů představil v roce 2007 J. Smetana. Tato teorie nese název „The End Game“. [38]

5.2 Nepříznivé účinky whiskerů

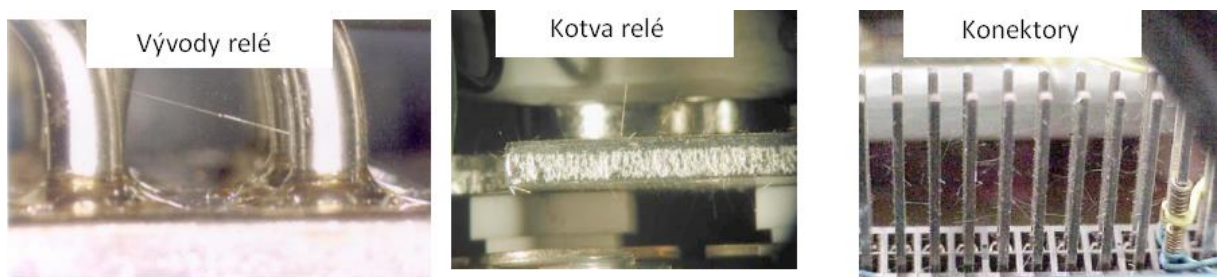
Výskyt whiskerů s sebou může přinést řadu negativních vlivů, které ohrožují správnou funkčnost a bezporuchovost elektrických zařízení. Vliv whiskerů narostl vlivem legislativního zásahu do elektrotechnického průmyslu v roce 2006, kdy byla vydána vyhláška ROHS omezující použití olova v pájených spojích a v elektrotechnické montáži. V průmyslové výrobě se začaly používat pájky bezolovnaté s majoritním zastoupením cínu (95 – 99 %). Dalším faktorem zvyšujícím rizikovost whiskerů je neustálá snaha o miniaturizaci komponent. Dochází k zmenšování vývodů, pájecích plošek a mezer mezi nimi. Vzhledem k malým vzdálenostem může whisker snadně způsobit selhání obvodu.

Jak již bylo zmíněno, selhání elektrických zařízení vyvolané whiskery se objevilo již během druhé světové války. Od té doby je zaznamenáno mnoho dalších selhání způsobených whiskery. Problémy se objevují v celé řadě oborů od telekomunikací, armády až po letecký průmysl. Růst whiskerů analyzují i vesmírné agentury, jako je např. NASA, která shromažďuje data o výskytu whiskerů. Podle NASA způsobily whiskery ve vesmíru úplné selhání několika satelitů a družic. [42]

Nejčastěji byl růst whiskerů pozorován u vývodů elektronických součástek, na kovových pouzdrech, dále pak na galvanicky upravených površích DPS a velice často u kontaktních špiček konektorů. Nejčastěji byly detekovány tyto druhy poruch [9]:

5.2.1 Trvalý elektrický zkrat

Whisker tvoří čistý kov, je tedy elekticky vodivý. Whisker může propojit vodiče s rozdílným potenciálem, a tak způsobit zkrat. Často se tak stává u obvodů s vysokou impedancí a malým napětím, kde není dostatečný proud pro roztavení whiskeru. Trvalý proud protékající whiskerem může být až 10 mA. Příklady zkratů vytvořených whiskerem jsou na následujícím obrázku. [9]



Obrázek 29. Trvalé zkraty způsobené whiskery

5.2.2 Krátkodobé zkraty

Krátkodobý zkrat vzniká v situaci, kdy whisker propojí dvě místa s rozdílným potenciálem, kde začne protékat zkratový proud. Tento proud je ale příliš velký k tomu, aby mohl protékat trvale. Velikost proudu dosahuje hodnot vyšších než 50 mA. Dojde tak k nadměrnému ohřevu whiskeru a k jeho roztavení nebo až k jeho odpaření. To souvisí i s následující poruchou vyvolanou whiskerem. [9]

5.2.3 Vznik elektrického oblouku po odpaření whiskeru

K zvýšenému výskytu tohoto jevu dochází u speciálních obvodů nacházejících se v prostředí se sníženým atmosférickým tlakem. To se může týkat např. aviatiky a kosmonautiky. V případě zkratu a následném odpaření whiskeru může dojít k vzniku elektrického oblouku, což může mít fatální následky. Aby oblouk vznikl, proud musí odpařit whisker a napětí musí být dostatečně velké, aby došlo k ionizaci kovového plynu. Špičkový proud se může pohybovat až v řádech stovek ampér, dokud nedojde k zhašení oblouku např. reakcí elektrických ochran. Důsledek vzniku elektrického oblouku u relé je vyobrazen na obrázku č.30. [9] [43]



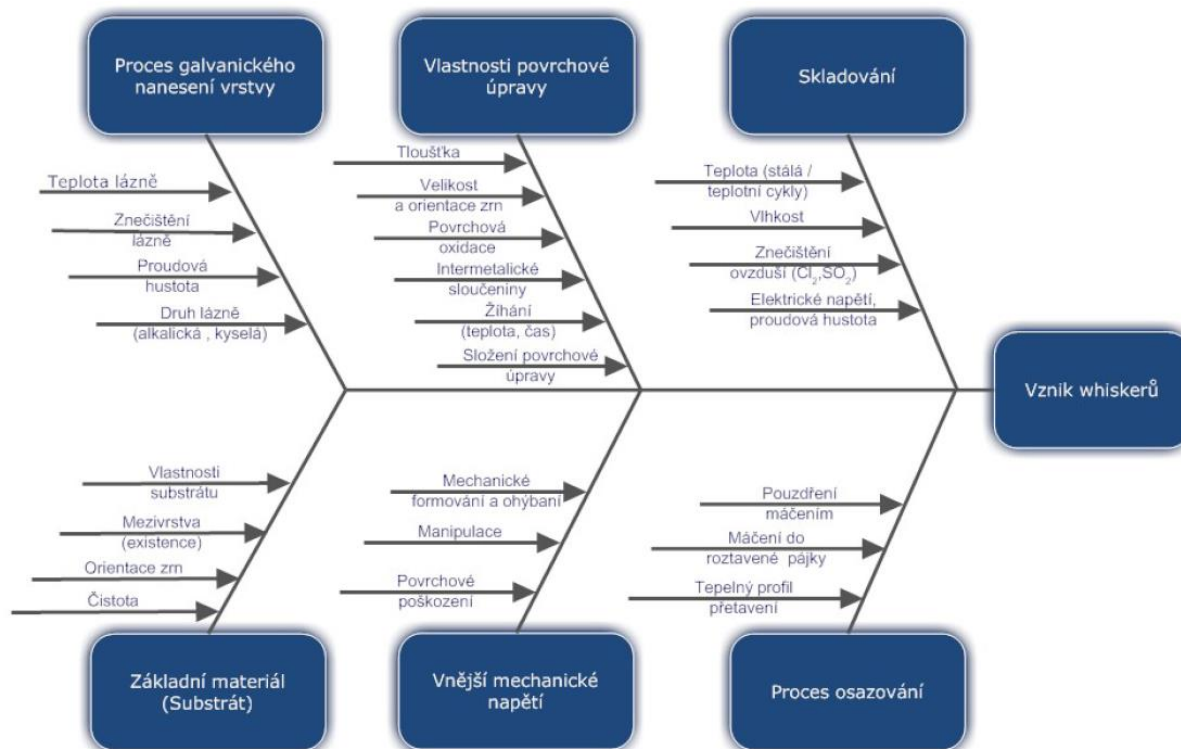
Obrázek 30. Důsledky oblouku vyvolané whiskerem [43]

5.2.4 Nečistoty, kontaminace

V některých případech může dojít k uvolnění whiskerů vlivem mechanického šoku nebo vibrací. Dochází tak k volnému pohybu ulomeného whiskeru v zařízení, což může ovlivnit funkci optických snímačů a mikroelektromechanických systémů (MEMS), případně může dojít opět k vzniku nahodilého zkratu např. mezi vývody součástek. [43]

5.3 Faktory ovlivňující růst

Příčina vzniku whiskerů není stále zcela objasněna. Doposud nevznikla univerzální teorie, která by popisovala mechanismus vzniku whiskerů. Známé jsou faktory, které na vznik a růst whiskerů mají vliv. Ishikavův diagram shrnující faktory podporující vznik whiskerů, je vidět na následujícím obrázku. Některé z faktorů budou popsány blíže.



Obrázek 31. -Ishikavův diagram faktorů vzniku Whiskerů [9]

5.3.1 Vliv vnitřního napětí v tlaku

Často se za příčinu vzniku whiskerů považuje vnitřní tlakové napětí uvnitř kovové vrstvy. Napětí se ve vrstvě hromadí a po překročení kritické hranice dojde k jeho uvolnění v podobě růstu whiskeru. Vnitřní napětí může způsobit např. růst intermetalické sloučeniny, mechanické namáhání v podobě ohybu, koroze nebo rozdílný teplotní koeficient substrátu a cínové vrstvy. [39]

5.3.2 Vliv elektrického pole

Elektrické pole nemá vliv na urychlení růstu whiskerů. Elektrické pole však může přispět k zvýšení rizika elektrického zkratu, který je vyvolán whiskerem, protože vlivem elektrostatických sil dochází k ohybu whiskeru. [38]

5.3.3 Vliv tlaku

Výzkum vědců Changa a Vooka říká, že u vzorků umístěných do vysokého vakua (10^{-7} až 10^{-12} mbar) nebyl pozorován výskyt whiskerů na rozdíl od běžného atmosférického tlaku. [38]

5.3.4 Vliv teploty

Zvyšující se teplota urychluje růst intermetalických vrstev, které podle některých zdrojů napomáhají k růstu whiskerů. Nicméně zvýšená teplota má také vliv na uvolňování napětí uvnitř vrstvy, a proto mohou příliš vysoké teploty zabránit růstu whiskerů. Velká řada experimentů určuje za ideální teplotou pro růst whiskerů 50 °C, ale na druhou stranu jsou zde i experimenty, které říkají, že u ekvivalentních vzorků došlo k rychlejšímu růstu whiskerů při pokojové teplotě. Whiskery údajně přestávají růst při teplotách nižších než -40 °C a vyšších než 150 °C. [44] [38]

5.3.5 Vliv vlhkosti a následné oxidace

K zrychlení růstu whiskerů dochází údajně při relativní vlhkosti vyšší než 85 %. S vysokou relativní vlhkostí je spjat výskyt koroze a oxidace povrchu. Povrchové oxidy jsou často považovány za jednu z příčin tvorby whiskerů. Toto tvrzení by prokazovalo i to, že whiskery špatně rostou na ušlechtilých kovech jako zlato a stříbro.[38]

5.3.6 Vliv tloušťky vrstvy

Mnoho badatelů v oblasti whiskerů říká, že existuje určitá mez nad nebo pod kterou nedochází k růstu whiskerů. Tloušťka metalické vrstvy pod 0,5 μm a nad 20 μm se považuje za méně náchylné na růst whiskerů. Naopak vrstvy s tloušťkou v rozmezí 2 μm – 10 μm vykazují maximální potenciál pro růst whiskerů. Zang a Schetty uvedli ve své studii, že tloušťka vrstvy nad 8 μm je bezpečnější s ohledem na růst whiskerů. [44]

Bohužel u velmi tenkých vrstev dochází ke snížení jejich charakteristických vlastností, jako je např. odolnost proti korozi. Použití tlustých vrstev také není zcela běžné vzhledem ke značné spotřebě materiálu při výrobě a tím i vysoké ceně. [44]

5.4 Teorie popisující růst whiskerů

I přesto, že jsou whiskery zkoumány už přes 60 let, neexistuje zatím unifikovaná teorie, která by popisovala mechanismus tvorby a růstu whiskerů. Experimenty v oblasti whiskerů jsou často neopakovatelné a jejich výsledky si často protiřečí. Doposud vznikly čtyři teorie vysvětlující tvorbu whiskerů. Jedná se o teorii dislokací, dynamické rekrytalizace, prasklého oxidu a teorii The End Game. Jednotlivé teorie budou popsány z následujících zdrojů: [5] [21] [39]

5.4.1 Teorie dislokací

Dislokace jsou defekty objevující se v krystalové mřížce kovů. Dislokace je porucha čárová, kdy dojde k porušení krystalové struktury podél určité čáry. Dislokace se dále dělí na hranové a šroubové. Tyto čárové defekty hrají roli u jevů jako difuze nebo elektrický odpor. První dislokační teorie, kterou publikoval Peach, se objevila již v roce 1952. Ten tvrdil, že whiskery rostou vlivem šroubové dislokace, kde se atomy cínu šroubovitě pohybují od středu na špičku whiskeru, kde se uloží. Peachova teorie však byla brzo vyvrácena.

Koonce a Arnold o rok později (1953) zjistili, že whiskery rostly přidáváním atomů do základny whiskeru, nikoli do jeho špičky. Další výzkumníci přišli s obdobnými teoriemi v souladu s teorií Koonce a Arnolda. Tyto teorie byly založeny na vzniku dislokací a jejich následném pohybu. Frank a Eshelby nezávisle navrhli difúzní dislokační mechanismus, kde byla dislokace a následný pohyb vyvolán napětím, které bylo vytvořeno povrchovými oxidy.

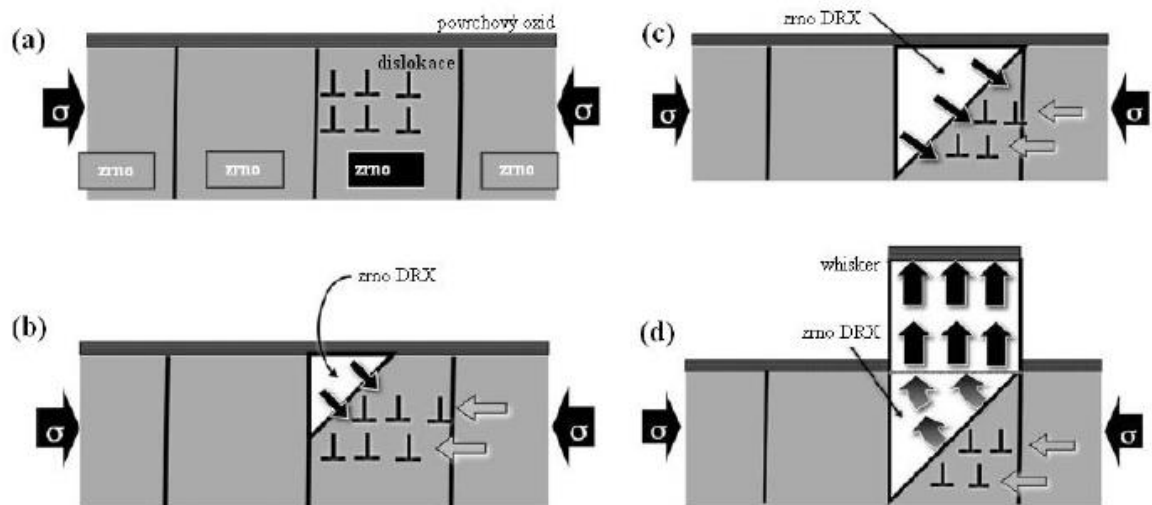
Teorie dislokací jako možná příčina vzniku whiskerů však byla později několikrát vyvrácena. Například Lebrecht a Norton na základě svého výzkumu uvedli, že dislokace nejsou potřebné k vzniku whiskerů. Většina současné odborné veřejnosti zabývající se problematikou whiskerů teorii dislokací nepodporuje.

5.4.2 Teorie dynamické rekrytalizace

Při statické rekrytalizaci dochází u krystalických pevných látek ke změně vnitřní struktury. Původní struktura s vysokým vnitřním napětím a malými zrny se mění na strukturu s malým vnitřním napětím a relativně velkými zrny. U dynamické rekrytalizace se současným snížením deformační energie dochází i k působení přídavné deformace. Při deformaci roste deformační energie, a naopak při rekrytalizaci deformační energie klesá. Proces dynamické rekrytalizace je ovlivněn rychlostí tlakové deformace a teplotou.

Teorie dynamické rekrytalizace popisuje vznik whiskeru ve čtyřech fázích. Nezbytnou podmínkou této teorie je deformační mechanismus vyvolávající dynamickou rekrytalizaci a mechanismus transportní, který způsobuje růst whiskeru.

Prvním krokem je vznik dislokace na hranicích existujících zrn, která je vyvolána tlakovým napětím. V dalším kroku dochází k růstu energie přes určitou mez, která způsobí zahájení růstu nových zrn. Orientace nového zrna (a následného whiskeru) nemusí souhlasit s orientací zrn okolních. Proces pokračuje růstem nově vzniklého zrna do deformovaného materiálu. Jeho velikost omezuje velikost původního zrna. Při určité velikosti nového zrna již nedochází k růstu směrem do materiálu. V posledním kroku deformace způsobená tlakovým napětím pokračuje a s ní i procesy spjaté se snížením deformační energie. Zrno již neroste na úkor původního, ale roste směrem ven z povrchu. Dochází tak ke vzniku whiskeru. Tento princip popisuje následující obrázek.



Obrázek 32. Růst whiskerů vlivem dynamické rekrytalizace [5]

Teorie dynamické rekrytalizace potvrzuje tvrzení, že tlustší vrstvy cínu nejsou tak náchylné na vznik whiskerů. V tlustších vrstvách se totiž nachází více zrn, která absorbují vznikající napětí. Dochází tak k snížení akceleračního faktoru dynamické rekrytalizace. Vznik whiskerů na základě této teorie není závislý na existenci vrstvy oxidu na povrchu cínu.

5.4.3 Teorie prasklého oxidu

Aby mohlo dojít k růstu whiskerů, musí být podle teorie prasklého oxidu splněny tři podmínky. První podmínkou je vhodná kinetika hromadného transportu při pokojové teplotě, což je u cínu dosaženo vzhledem k jeho nízké teplotě tání, a tedy difuze hranic zrn v Sn, za pokojové teploty. Tato teplota je dostatečná k růstu whiskerů. Druhou podmínkou je přítomnost hybné síly. V teorii prasklého oxidu je hybná síla definována jako kombinace mechanického napětí a chemických afinit, která dohromady vytvářejí tlakové namáhání. Poslední podmínkou je přítomnost zoxidované vrstvy na povrchu, které je nějakým způsobem oslabena nebo narušena.

Růst whiskeru uvolní tlakové namáhání matrice, na které whisker roste. K růstu whiskeru dochází od spodu, což je zdůvodněno tím, že tvar špičky whiskeru se během jeho růstu nemění. Růst whiskerů je způsoben tlakovým napětím, které tlačí namáhanou oblast směrem nahoru.

Tlakové napětí může být vyvoláno mechanicky, tepelně, chemicky nebo kombinací těchto vlivů. Chemické síly vznikají reakcí mezi cínem a mědí při vzniku intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 . Difuze vytváří vzájemné tlakové napětí uvnitř cínu. Tlakové napětí v cínu může být uvolněno pomocí difuze na hranicích zrn. Atomy cínu difundují podél hranic zrn do kořene whiskeru, čímž dochází k růstu whiskerů. Tato reakce může probíhat i při pokojové teplotě, dochází k ní tak dlouho, dokud jsou dostupné volné atomy cínu a mědi. Tvorba intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 tak neustále udržuje potřebné tlakové napětí pro růst whiskeru. Rovnováha mezi uvolňováním a vytvářením tlakového napětí růstem intermetalické vrstvy vede k téměř lineárnímu růstu whiskerů.

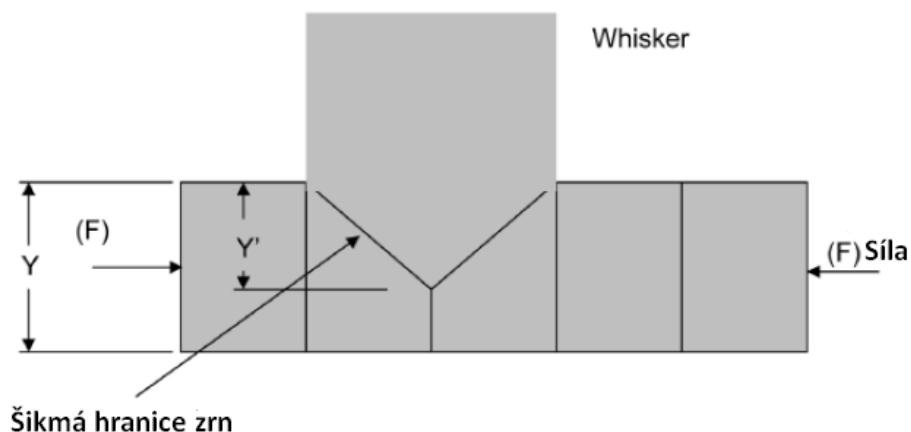
Nezbytně nutnou podmínkou vzniku whiskerů podle této teorie je přítomnost tlakového napětí a povrchového oxidu, což bylo dokázáno na analogických experimentech na hliníku. U hliníku umístěného ve vakuu, na který působilo tlakové napětí, se nenašly stopy whiskerů. Whiskery se objevily pouze na zoxidovaném povrchu hliníku. To by potvrdilo tvrzení, že k růstu whiskerů dochází v mnohem menší míře na površích ušlechtilých kovů, jako je např. zlato, kde se netvoří oxidační vrstva.

5.4.4 Teorie The End Game

Teorie The End Game opět počítá s tím, že iniciátorem růstu whiskerů je tlakové napětí v cínové vrstvě. Teorie The End Game má dva základní předpoklady:

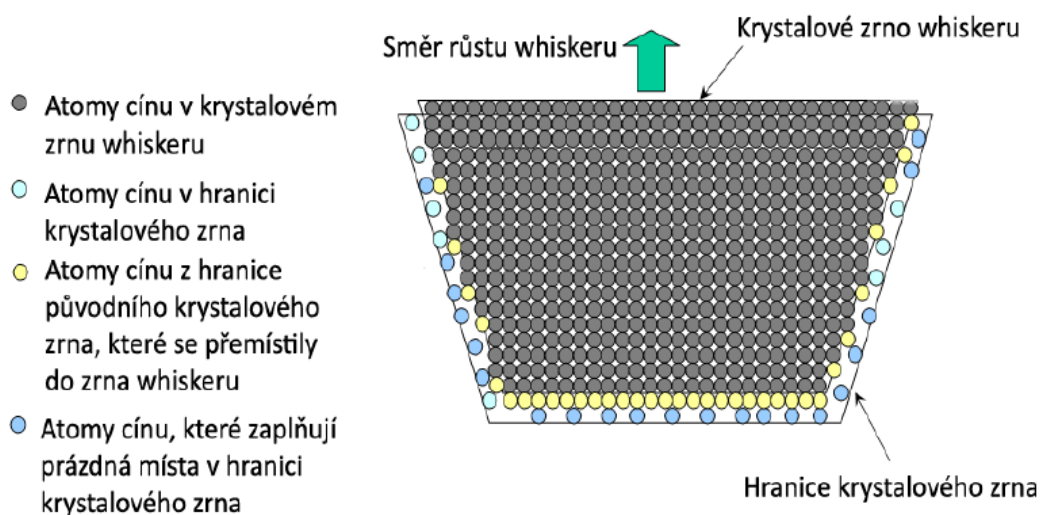
- Atomy na hranici zrna, ze kterých vyrůstá whisker, jsou na nižší energetické hladině než atomy v okolí.
- Na hranici základny krystalového zrna musí existovat volná místa, do kterých se mohou pohybovat atomy cínu.

Pro pocínovaný povrch je typická sloupcovitá hranice zrn. Síla F působící na hranice zrn vyvolává tlakové napětí (namáhání). Napětí může mít mnoho příčin, jako např. mechanické síly nebo rozdílné teplotní koeficienty roztažnosti. Vlivem rekrystalizace může dojít k vytvoření šikmých hranic zrna, jak je vidět na následujícím obrázku. Síla F působící na šikmé hranice zrn vyvolává vertikální i horizontální složku namáhání. Vlivem namáhání dochází ke klouzání zrn po jejich hranici, což má za následek přesouvání atomů cínu z hranic zrn do zrna whiskeru. K růstu dochází pouze ve vertikálním směru, což vyvolá růst whiskeru. Tento děj je blíže vyobrazen na obrázku č. 34. Při pohybu atomů z hranic zrn do krystalové mřížky zrna, dojde k vzniku vyprázdněné oblasti na hranici zrn. Vyprázdněná oblast může přijmout další cínové atomy. Dochází tak k další difuzi atomů cínu do vyprázdněné oblasti s nižším mechanickým napětím.



Obrázek 33. Mechanismus vzniku whiskeru podle teorie The End Game [5]

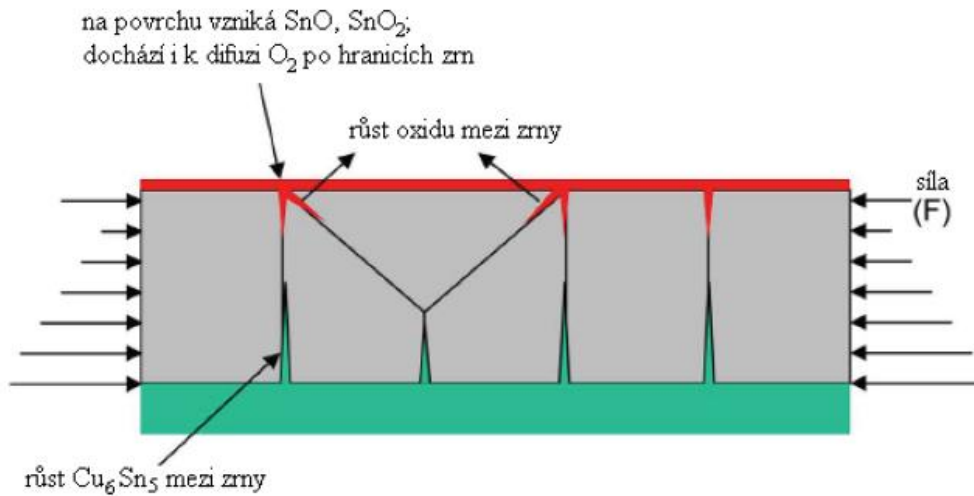
Tento proces se neustále opakuje a cínové atomy se dostávají do zrna, které tvoří základnu whiskeru. Při každém takovém procesu tedy dojde k přidání vrstvy atomů cínu do tohoto zrna. Dochází tak k postupnému růstu whiskeru. Proces je zastaven v případě uvolnění tlakového napětí, nebo v případě, že dojde k spojení hranic zrn.



Obrázek 34. Klouzání hranice krystalového zrna [5]

Do teorie The End Game ale ještě zasahuje vliv intermetalické vrstvy a oxidace cínového povrchu. Jak již bylo popsáno v předešlých kapitolách, vlivem difuze mezi cínem a mědí dochází k tvorbě intermetalické sloučeniny, a to zejména Cu_6Sn_5 . K největšímu růstu intermetalické vrstvy dochází na hranicích zrn, protože na hranicích dochází k rychlejší difuzi mědi. Intermetalická vrstva pak vyvolává tlakové napětí, které je v různých výškách vrstvy cínu odlišné. Úroveň tlakového napětí (tedy i energie) je nižší u povrchu cínové vrstvy než u její základny. V případě, že by měly cínové atomy prostor k pohybu, pohybovaly by se směrem k povrchu vrstvy. Na povrchu však vzniká oxid (SnO , SnO_2), který zabraňuje povrchové vakanci. Oxidová vrstva vznikne difuzí O_2 do Sn. Oxidová vrstva

způsobuje další tlakové napětí cínové vrstvy. Napětí vyvolané oxidem se považuje za menší v porovnání s intermetalickou vrstvou. Vliv intermetalické vrstvy a oxidu ukazuje obrázek č. 35.



Obrázek 35. Vliv oxidu a intermetalické vrstvy v Teorii The End Game [5]

Zárodek pro růst whiskeru je vytvořen šikmými hranicemi zrn. Kombinace difuze oxidu do šikmých hranic zrn a posouvání hranic vyvolá popraskání oxidu. Prasklý oxid tedy není příčinou, ale spíše následkem tvorby whiskeru. K tvorbě zoxidované vrstvy SnO₂ dochází ve větší míře při zvýšené vlhkosti. Vrstva oxidu zvětšuje tlakové napětí cínové vrstvy, což může urychlit růst whiskerů. To by potvrdzovalo experimentální výsledky, při kterých byl pozorován větší výskyt whiskerů při zvětšené relativní vlhkosti.

V případě, že se teorie The End Game prohlásí za platnou, můžeme z ní určit, jak dosáhnout zamezení tvorby cínových whiskerů. Toho by šlo docílit především snížením mechanického napětí, a to např. použitím mezivrstvy niklu nebo žiháním.

5.5 Možnosti omezení růstu whiskerů

Whiskery mohou způsobit zásadní selhání elektrického obvodu, proto se výrobci vzniku whiskerů snaží předejít různými opatřeními a modifikacemi výrobního procesu. První takové opatření bylo navrženo již v roce 1954, kdy bylo doporučeno přidání olova do cínu. Takové opatření ale dnes není možné vzhledem k zákazu používání olova (legislativa ROHS). V dnešní době se jako ochrana používá i například žíhání nebo speciální povlaky na povrchových úpravách. Mezi opatření pro omezení vzniku cínových whiskerů patří [39]:

- Vyhnout se použití povrchových úprav z čistého cínu (využít cín s příměsemi)
- V případě použití cínu využít alespoň variantu matného cínu
- Vytvářet povrchové úpravy o větších tloušťkách
- Využít mezivrstvy z jiného kovu k vytvoření bariéry pod cínovou vrstvou
- Zajistit minimální tlakové namáhání cínové vrstvy
- Vyhnout se provozním teplotám mezi 27 – 75 °C
- Použít žíhání a přetavení k uvolnění mechanického napětí v cínu

5.5.1 Vhodná volba povrchové úpravy

Základním opatřením pro omezení růstu whiskerů je volba vhodné povrchové úpravy nebo pájky. Samozřejmě jako nejlepší strategie pro omezení výskytu whiskerů je nepoužívat pro povrchovou úpravu čistý cín, a to především jeho lesklou variantu. Použití cínu může být nahrazeno slitinami typu NiPdAu, NiPd, NiAu. U těchto slitin je však problémem jejich vysoká cena. Některé studie ukázaly, že vytvoření slitiny cínu a jiného kovu (např. olova) s obsahem minimálně 3 % může vést k omezení tvorby whiskerů. [45] [39]

Povrchová úprava matným cínem vykazuje lepších výsledků při snaze o omezení vzniku whiskerů než je tomu u cínu lesklého. Matný cín se odlišuje větší velikostí zrn a menším obsahem uhlíku. Matný cín má tak menší vnitřní napětí, které má podle mnoha zdrojů vliv na růst whiskerů. [39]

5.5.2 Mezivrstva

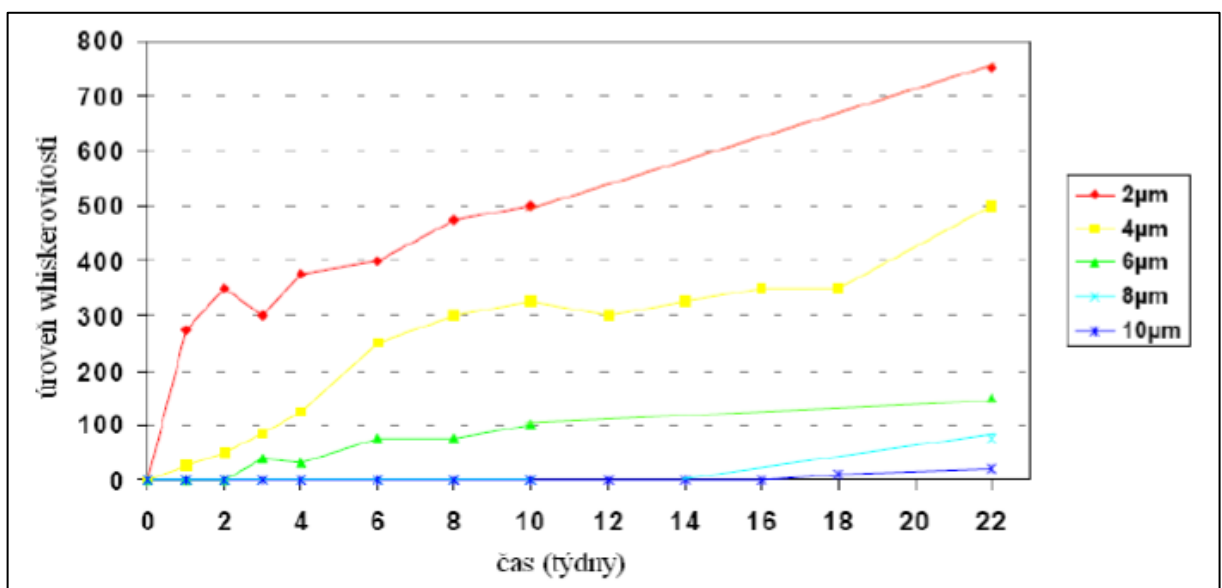
Růst intermetalické vrstvy mezi cínem a základním materiálem se považuje za příčinu vzniku mechanického namáhání uvnitř materiálu, které podporuje vznik cínových whiskerů. Vzhledem k vzájemné vazbě mezi intermetalickou vrstvou a whiskery se snažíme růst této vrstvy omezit. K zamezení tvorby intermetalické vrstvy mezi základním materiálem a cínem se využívá vložení mezivrstvy mezi tyto dva kovy. Jako mezivrstva se nejčastěji používá nikl. Tato mezivrstva je účinná již od tloušťky 0,5 μm . Důležité je zabránit mechanickému poškození mezivrstvy, zejména při ohybu, aby nedošlo k jejímu narušení a nefunkčnosti. [5] [45]

Nanášíme-li na mezivrstvu niklu tenkou vrstvu cínu do 3 μm , je v cínové vrstvě vytvářeno takové napětí vlivem intermetalické sloučeniny. Toto tahové napětí může působit proti tlakovému napětí, které vzniká např. tepelným cyklováním, a částečně ho tak kompenzovat. [5]

5.5.3 Vhodná tloušťka povrchové úpravy

Tenká cínová vrstva do tloušťky 1 μm nebo naopak tlustá vrstva nad 20 μm může snížit výskyt cínových whiskerů. Příliš tenká vrstva však ztrácí své požadované vlastnosti. Tlustá vrstva cínu může snížit vnitřní napětí na desce a zvýšit odolnost proti mechanickému poškození. Problém u tlustých vrstev může nastat u součástek s velice malou roztečí vývodů, kdy může dojít k jejich propojení. [45]

Na následujícím grafu můžete vidět vliv tloušťky cínu na whiskerovitost povrchu na substrátu olin 194. Autor studie Whitlaw úroveň whiskernatosti blíže nespecifikoval. [5]



Obrázek 36. Vliv tloušťky povrchové úpravy na tvorbu whiskerů [5]

5.5.4 Žihání

Další strategií pro omezení růstu whiskerů je použití žihání. Žihání spočívá v zahřátí materiálu na vysokou teplotu (teplota pod bodem tání cínu) a pak v následném zchlazení. Typicky se žihací teplota pohybuje okolo 150 $^{\circ}\text{C}$. Žihání se doporučuje provádět po dobu jedné hodiny, a to do 24 h od nanesení cínu na měděný substrát. Při žihání dochází k zvětšování zrna cínu a k uvolnění vnitřního napětí. K uvolnění napětí dochází vlivem rovnoměrnější tvorby intermetalické vrstvy mezi cínem a substrátem. Žihání není vhodné pro lesklý cín, u kterého dochází při žihání k vzniku puchýrků na povrchu cínu. [21] [45] [46]

5.5.5 Omezení tlakového namáhání

Tlakové namáhání je považováno za jednu z hlavních příčin vzniku cínových whiskerů, proto je nezbytné toto napětí minimalizovat. Tlakové napětí v povrchové úpravě vzniká především vlivem mechanického ohýbání předmětu. Zabránit by se také mělo jakémukoliv vzniku škrábanců a rýh na cínovém povrchu. [45]

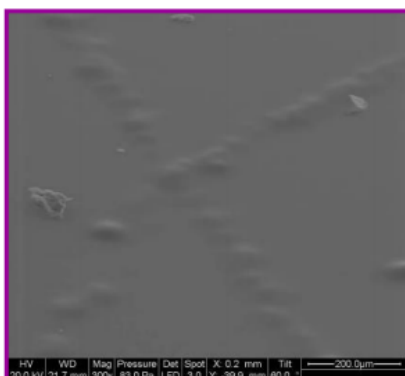
5.5.6 Konformní povlaky

V případech, kdy není možné použít jinou povrchovou úpravu než cín nebo není možné provést jiná opatření omezující výskyt whiskerů, se využívá konformního povlaku, který omezuje a zpomaluje projevy cínových whiskerů. Konformní vrstva se nanáší na odhalené kovové povrchy a součástky na DPS za účelem omezení vad vyvolaných whiskery. Konformní vrstva chrání DPS dvěma způsoby. V prvním případě zamezuje kontaktu cizího vodivého předmětu (whiskeru) s kovovým povrchem a chrání ho tak před vznikem zkratu. V druhém případě konformní povlak zabraňuje působení whiskeru, který pod tímto povlakem roste. [46]

Konformní povlaky jsou často na bázi silikonu, polyuretanu, akrylu nebo třeba parylenu. Jejich aplikace se nejčastěji provádí nástřikem. Konformní povlaky se však nedají použít u všech typů pouzder a povrchů, jako jsou konektory, PGA (pin grid arrays) nebo BGA (ball grid arrays), kde nedojde k dokonalému pokrytí povrchu ochranným povlakem. Aby konformní povlak plnil svoji funkci při ochraně proti whiskerům, musí být zajištěna jeho dostatečná adheze k povrchu, houževnatost a dostatečná tloušťka. Jak můžeme vidět na následujících snímcích konformního povlaku Uralane 5750, při nedostatečné tloušťce povlaku whisker proroste skrz konformní povlak (snímek vpravo), a dojde tak k selhání funkce povlaku. [45]

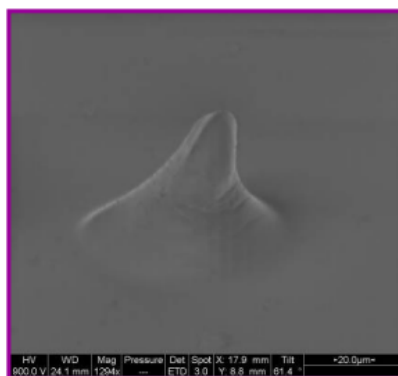
Tloušťka 2 mm

Whisker je kompletně zachycený pod povlakem



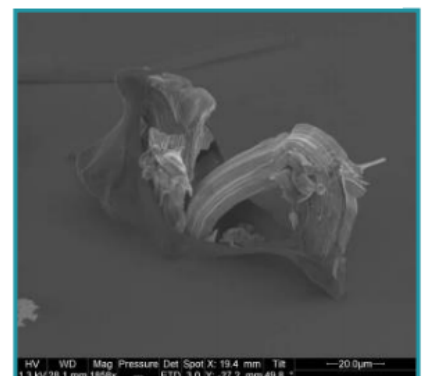
Tloušťka 0,5 mm

Whisker nadvedl povlak, ale nedošlo k jeho proražení



Tloušťka 0,1 mm

Whisker prorazil skrz tenkou vrstvu povlaku



Obrázek 37. Porovnání různých tlouštěk konformního povlaku [47]

6 Praktická část

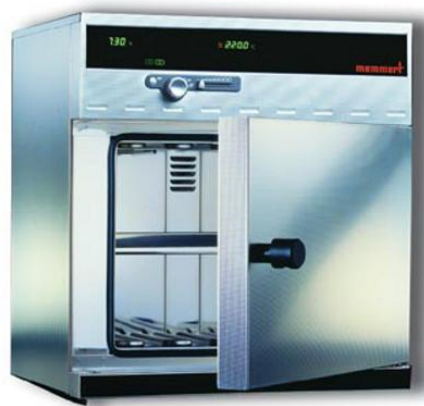
Praktická část diplomové práce se zaměřuje na experiment týkající se whiskerů. Konkrétně na vytvoření vhodných vzorků a podmínek pro jejich růst. Po zatížení vzorků v klimatických komorách byla provedena analýza růstu whiskerů se zaměřením na jejich četnost při různých materiálových, teplotních a napěťových podmínkách (mechanické napětí v materiálu). V experimentu byly použity tři bezolovnaté pájecí slitiny. Vzorky byly také vystaveny třem různým teplotám v klimatických komorách.

6.1 Popis použitých pomůcek a zařízení

V následující podkapitole budou popsány pomůcky a vybavení použité při vytváření a analýze vzorků. Všechna tato zařízení jsou vybavením katedry elektrotechnologie na Elektrotechnické fakultě ČVUT v Praze.

Sušárna MEMMERT

V průběhu experimentu byla využita sušárna/klimatická komora od německého výrobce MEMMERT. Jedná se o zařízení konstruované na nepřetržitý provoz s občasnou odstávkou. Sušárna obsahuje regulátor umožňující přesné nastavení teploty. Možný rozsah teplot se pohybuje mezi 30 °C až 220 °C. Aktuální teplota v komoře je zobrazována na displeji. [48] K experimentu byly využity dvě komory, které byly nastaveny na teploty 50 °C a 80 °C. Vzorky byly v komorách pro dobu 36 dnů, což je 864 hodin.



Obrázek 38. Laboratorní sušárna MEMMERT [48]

Konfokální mikroskop Keyence VK-X1000

K měření a analýze byl využit konfokální mikroskop, konkrétně mikroskop od firmy Keyence s označením VK-X1000 s objektivy NIKON se zvětšením 2,5x a 10x. Celý mikroskop je ovládán pomocí speciálního programu přes počítač. Mikroskop je schopen opticky naskenovat nastavený rozsah rovin a ploch, tyto roviny pak poskládá do jednoho snímku. Po nastavení hloubky a rozsahu je měření plně automatizováno. Mikroskop může provádět bezkontaktní měření profilu nebo třeba drsnosti povrchu. Jako zdroj světla mikroskop využívá laser nebo klasické bílé světlo. [49]



Obrázek 39. Konfokální mikroskop Keyence VK-X1000 [49]

Světelný zdroj Olympus KL1500 LCD

Jedná se o externí nastavitelný zdroj studeného světla Olympus KL1500 LCD se dvěma světelnými hlavicemi. Tento zdroj studeného světla byl využit k lepšímu nasvícení pozorovaných vzorků.



Obrázek 40. Světelný zdroj Olympus KL 1500 LCD

Ostatní pomůcky

Další nezbytnou pomůckou pro vytvoření vzorků bylo zařízení pro vytvoření pájecí lázně, do které byly vzorky po definované době ponořeny, a tak zapájeny. Při vyhodnocení bylo také využito upínacího přípravku, pomocí kterého se dala vhodně nastavit poloha vzorku pod objektivem mikroskopu.

6.2 Popis a příprava vzorků

Jako výchozí materiál vzorku byl použit rovný drát o průměru $\varnothing 2$ mm, který byl nastříhán na kusy dlouhé přibližně 5 cm. Jedna polovina vzorků byla ohnuta vždy podle stejného průhybu ještě před nanesením pájky. Ohnutí lze vidět na obrázku již hotového vzorku. Po ohnutí poloviny vzorků následovalo pokrytí vzorků pájkou. To se provedlo ponořením vzorků do lázně s roztavenou pájkou po dobu 4 s. Byly použity tři druhy bezolovnatých pájek, jak ukazuje následující tabulka. Po pájení byly všechny vzorky očištěny izopropylalkoholem od zbytků tavidla.

Tabulka č. 3 – Použité pájecí slitiny

Označení pájky	Sn	SnCu1	SnCu3
Teplota tání	232 °C	227 °C	230 °C
Složení	100 % Sn	99 % Sn, 1 % Cu	97 % Sn, 3 % Cu

Po zapájení byla ohnuta i druhá polovina vzorků. Ve vzorcích ohnutých až po nanesení pájky došlo vlivem ohybu k vytvoření vnitřního mechanického napětí v pájené vrstvě. Vnitřní mechanické napětí se často považuje za jednu z hlavních příčin růstu whiskerů a jeho vliv byl zkoumán i v tomto experimentu.



Obrázek 41. Vzorek zachycený pomocí konfokálního mikroskopu

Takto vytvořené vzorky byly vloženy do klimatických komor. První třetina vzorků byla vložena do klimatické komory, v níž byla teplota 80 °C. Druhá třetina byla vystavena teplotě 50 °C, opět v klimatické komoře MEMMERT. Třetí skupina vzorků byla ponechána v laboratoři při pokojové teplotě, která se pohybovala okolo 22-25 °C. Vzorky byly vystaveny zmíněným teplotám po dobu 36 dní, což odpovídá 864 hodinám.

Celkem bylo vytvořeno 54 vzorků. Z nich bylo vytvořeno 18 různých kombinací (pájka, teplota, napětí v materiálu). Pro každou kombinaci byly vytvořeny 3 vzorky.

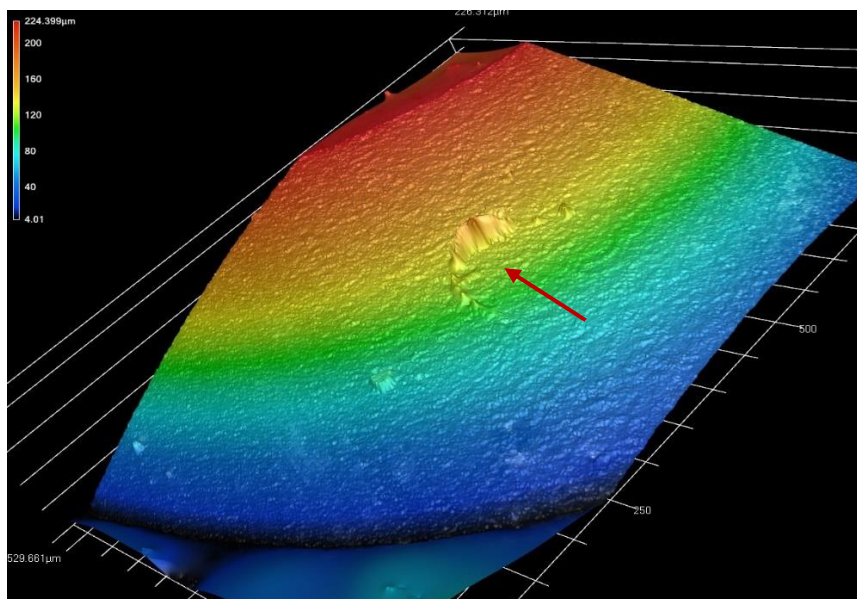
6.3 Popis měření

Po vyjmutí vzorků z klimatických komor následovala analýza četnosti whiskerů pomocí konfokálního mikroskopu Keyence. Nejdříve se vzorek vložil do upínacího přípravku, aby byl v rovině s vodorovnou osou objektivu mikroskopu. Dále se pomocí zdroje světla Olympus vzorek vhodně nasvítí. Snímek měřicího pracoviště můžete vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 42. Měřicí pracoviště

V následující kroku již bylo využito konfokálního mikroskopu k naskenování a analýze sledovaných vzorků. V některých případech bylo dosti obtížné určit, zda se jedná o whisker nebo například o nečistotu nebo škrábanec na povrchu. Pro vyloučení škrábance bylo nejčastěji použito vhodné nasvícení, případně funkce konfokálního mikroskopu skenovat rovinnost povrchu a následně vytvořit jeho model, kde je vidět patrný výstupek z roviny (viz následující obrázek). U nečistot bývá většinou rozdílný tvar nebo není lesklá jako cínový whisker. Nečistota se také dá často odstranit odfouknutím na rozdíl od whiskeru, který je spojen s pájeným povrchem. Nicméně tuto záměnu nelze zcela vyloučit, čímž je do měření vnesena jistá nejistota, která by se dala odstranit materiálovou analýzou na elektronovém mikroskopu. Vzhledem k aktuální situaci (epidemie „covid-19“), k tomu nemohlo z časových důvodů dojít.



Obrázek 43. 3D model povrchu vzorku s whiskerem vytvořený pomocí mikroskopu Keyence

6.4 Naměřené výsledky

Následující tabulka přehledně ukazuje výskyt - četnost whiskerů na jednotlivých vzorcích. Index X u poloviny vzorků označuje, že byly ohnuty již před pájením, a proto není cínová vrstva vystavena mechanickému napětí v materiálu.

Tabulka č. 4 – Tabulka četností whiskerů pro jednotlivé vzorky

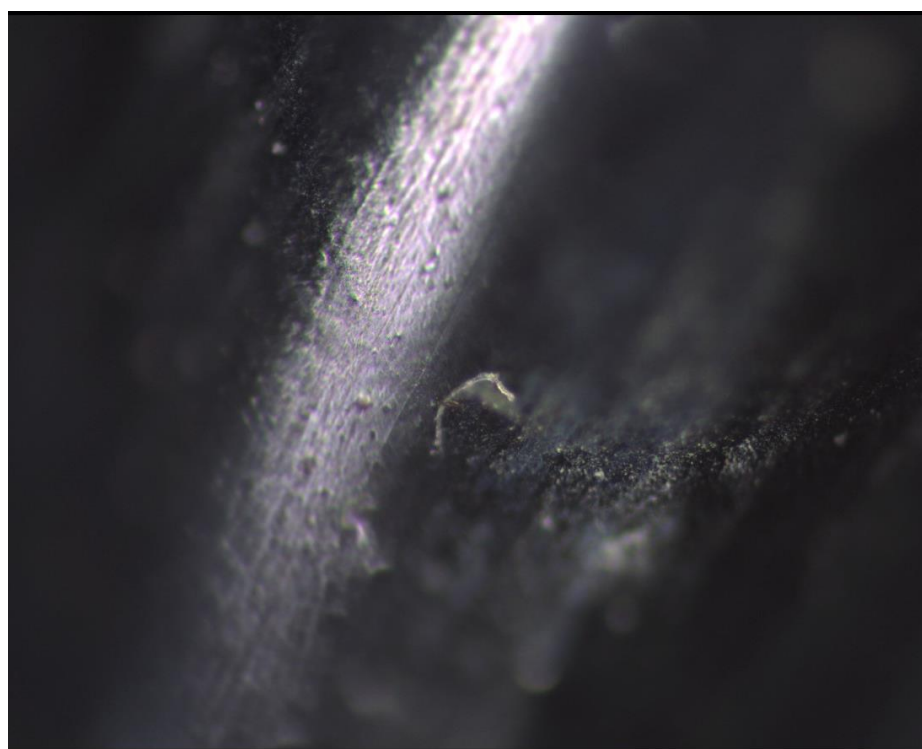
Materiál	Teplota	Číslo vzorku*					
		1	2	3	1X	2X	3X
Sn	okolí	1	0	1	1	0	1
	50 °C	4	2	2	0	3	1
	80 °C	2	2	3	2	1	0
SnCu1	okolí	2	0	1	1	0	0
	50 °C	7	5	4	2	0	0
	80 °C	2	1	2	0	0	0
SnCu3	okolí	1	1	0	1	0	0
	50 °C	6	3	3	1	1	1
	80 °C	3	1	4	1	1	3

*index X u čísla vzorku označuje vzorky ohnuté před pájením povrchu

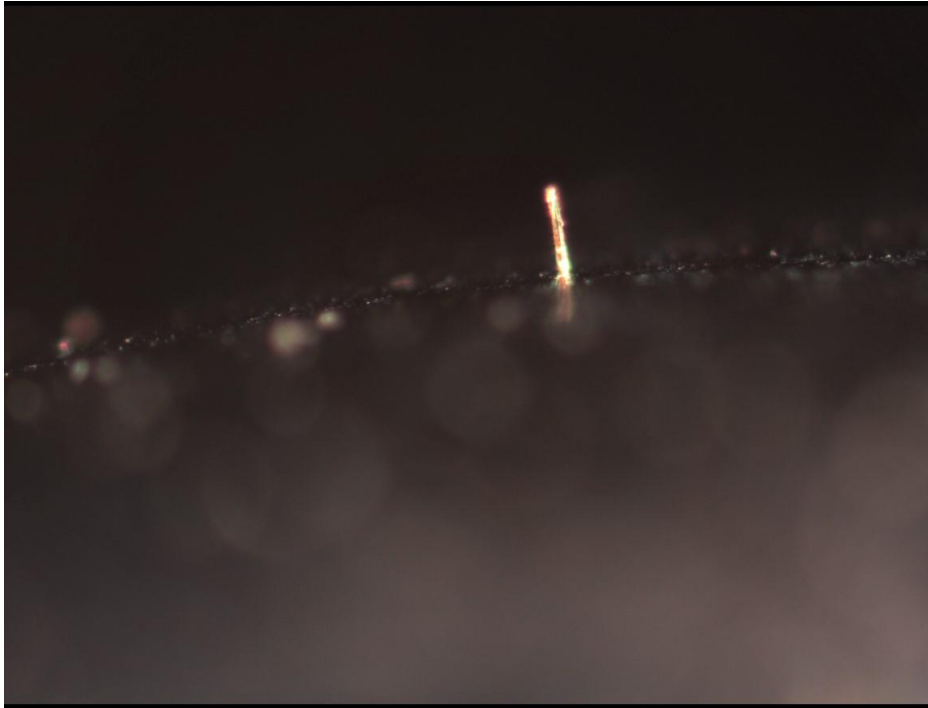
Jak je z tabulky patrné, na vzorcích byl zaznamenán růst cínových whiskerů. Místa s podezřením na přítomnost whiskeru byla podrobena detailnějšímu zkoumání za účelem potvrzení výskytu whiskeru. Na následujících obrázcích je možné vidět zdokumentovaný výskyt whiskerů na povrchu vzorků.



Obrázek 44. Whisker na vzorku SnCu1 - 50 °C - vzorek 3



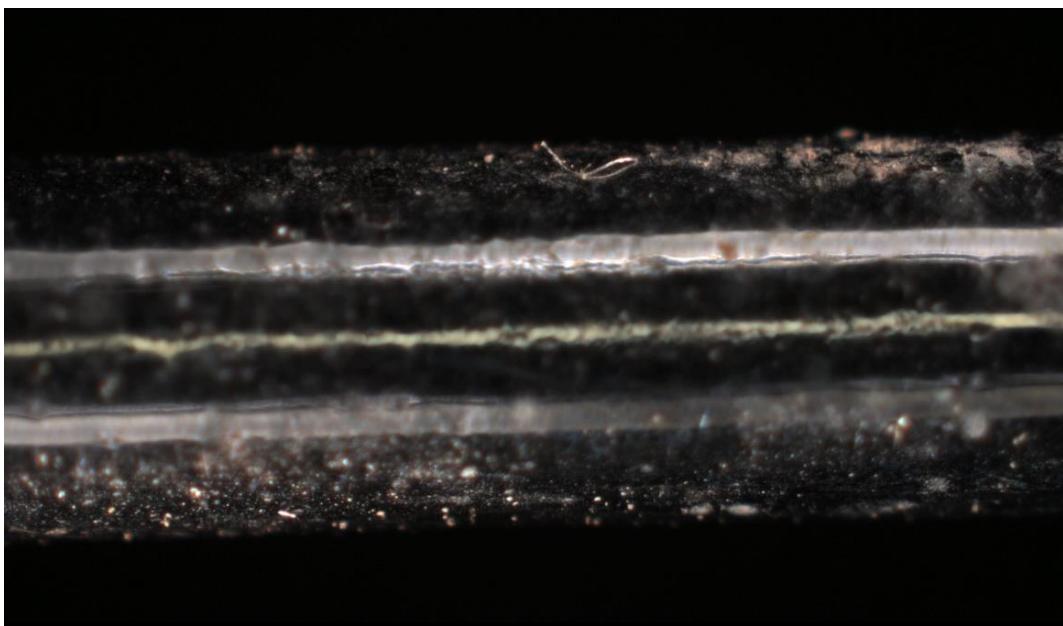
Obrázek 45. Whisker na vzorku SnCu1 - 50 °C vzorek 1



Obrázek 46. Whisker na vzorku Sn - 80 °C - vzorek 3

6.5 Vyhodnocení naměřených výsledků

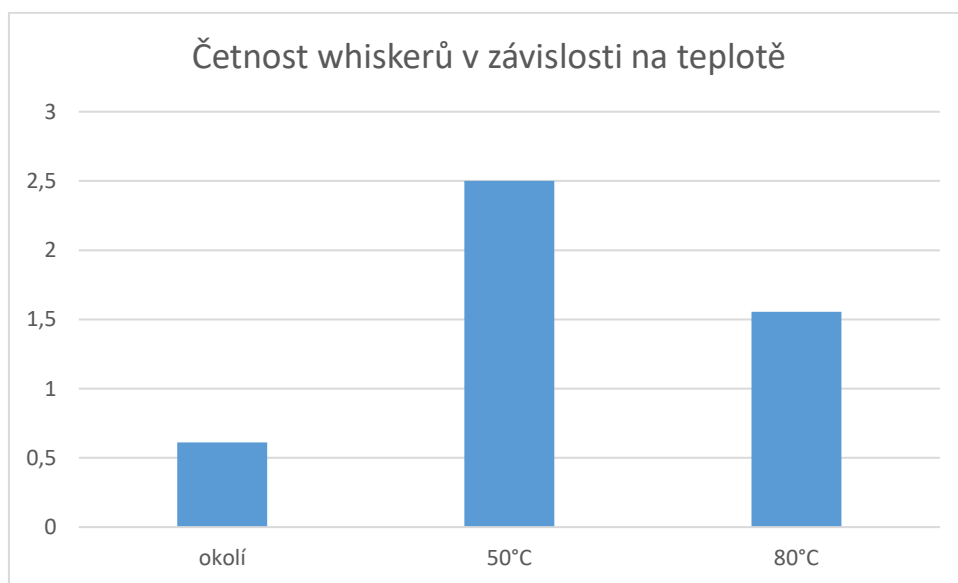
Z naměřených výsledků vyplývá, že i za krátkou dobu tepelného a vnitřního mechanického namáhání došlo u vzorků k růstu cínových whiskerů. Dále je možné konstatovat, že jednotlivé proměnné jako teplota, či ohyb (mechanické napětí) mají vliv na četnost whiskerů. Největší výskyt whiskerů byl zaznamenán u vzorku SnCu1 č. 1 při teplotě 50 °C, kde bylo přítomno pnutí v cínové vrstvě vlivem ohybu (vzorek byl ohnut ihned po pájení). Vyhodnocení jednotlivých proměnných shrnují jednotlivé podkapitoly.



Obrázek 47. Whisker na vzorku SnCu1 - 80 °C - vzorek 2

6.5.1 Vyhodnocení vlivu tepla na růst whiskerů

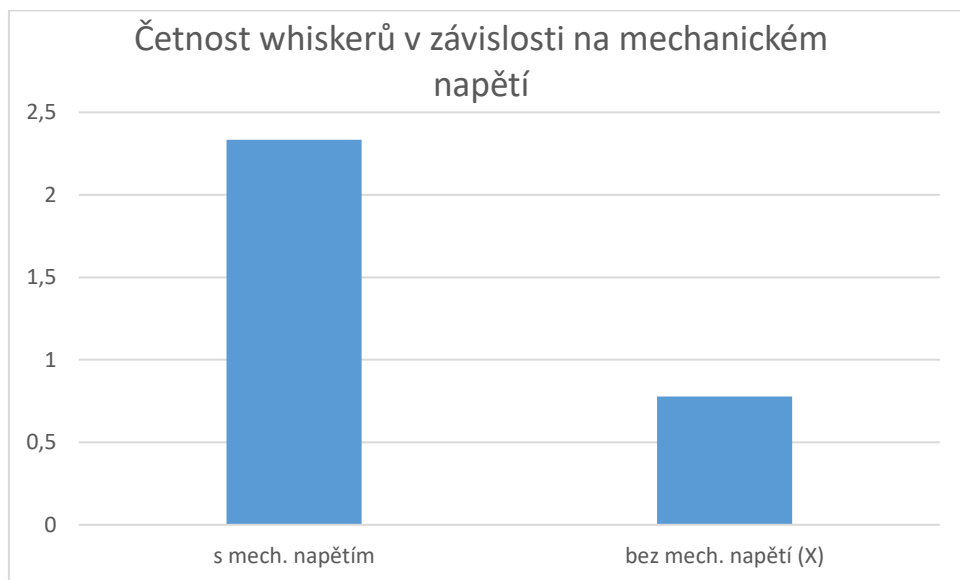
Jak ukazuje následující graf, teplota prostředí, ve kterém se vzorky nacházely, má značný vliv na tvorbu cínových whiskerů, a to bez ohledu na použitou pájecí slitinu nebo mechanické napětí přítomné v materiálu pájené vrstvy. Největší výskyt whiskerů byl zaznamenán při teplotě 50 °C, kde byl průměrný výskyt 2,5 whiskeru/vzorek. Právě tuto teplotu stanovily některé studie, o nichž je zmínka v teoretické části diplomové práce, za optimální pro růst whiskerů. Naopak k nejmenší výskytu whiskerů došlo u vzorků ponechaných v laboratoři při teplotě okolí, která se pohybovala mezi 22 – 25 °C. To by mohlo mít souvislost s tvorbou intermetalické sloučeniny, která roste při pokojové teplotě velice pomalu. Růst intermetalické sloučeniny totiž zvětšuje tlakové namáhání pájené vrstvy, což podle teorie přispívá k tvorbě whiskerů.



Obrázek 48. Četnost whiskerů v závislosti na teplotě

6.5.2 Vyhodnocení vlivu mechanického napětí na růst whiskerů

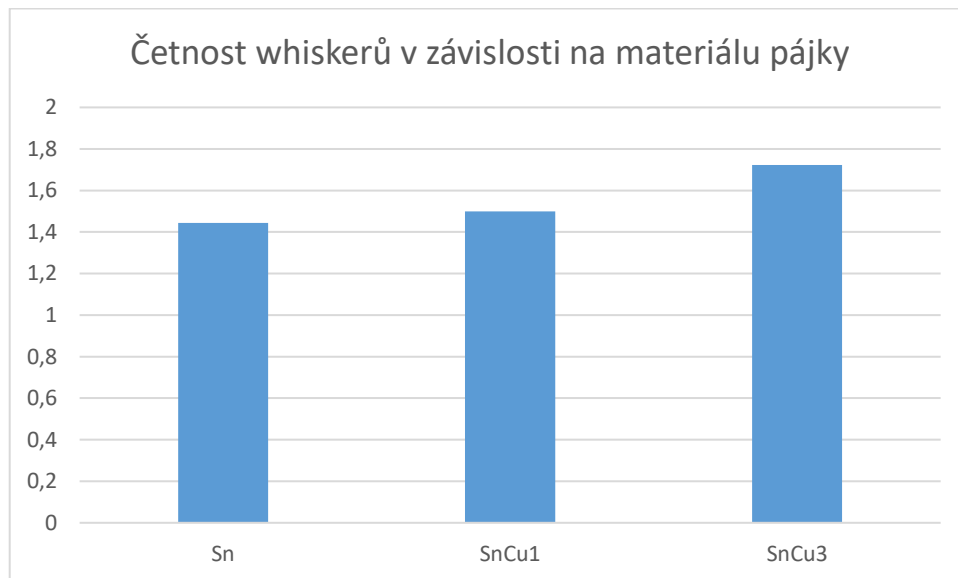
Z výsledků je patrné, že mechanické napětí v pájené vrstvě vyvolané ohybem vzorku po pájení má značný vliv na tvorbu cínových whiskerů. U vzorků namáhaných mechanickým napětím byl průměrný výskyt whiskerů přibližně 3x vyšší než u vzorků, které nebyly takto namáhány (byly ohnuté před pájením). U namáhaných vzorků byl průměrný výskyt přibližně 2,3 whiskeru/vzorek. Tento výsledek opět potvrzuje předpoklady z teoretické části práce.



Obrázek 49. Četnost whiskerů v závislosti na mechanickém napětí

6.5.3 Vyhodnocení vlivu pájecí slitiny na růst whiskerů

Vliv pájecí slitiny se v tomto případě projevil jako nejméně zásadní proměnnou u testovaných vzorků. V případě různých pájecích slitin došlo jen k velmi malému rozptylu u výskytu whiskerů na povrchu vzorků. To může být způsobeno podobným složením pájek. U všech pájek byl totiž použit jako hlavní komponent cín, a to s obsahem 100 %, 99 % a 97 %. V případě použití jiných pájek s menším obsahem cínu by byl výsledek nejspíše znatelnější.



Obrázek 50. Četnost whiskerů v závislosti na materiálu pájky

7 Závěr

V diplomové práci jsem se zabýval problematikou měkkého pájení v elektrotechnice. Zaměřil jsem se převážně na chyby, které při něm mohou vzniknout. Největší pozornost jsem věnoval whiskerům, což jsou vodivé krystaly různých tvarů z čistého kovu, např. cínu, vyrůstající z některých kovových povrchů. Na problematiku whiskerů se zaměřuji i v praktické části diplomové práce.

V teoretické části jsem nejdříve zpracoval kapitolu o pájení, v níž jsem popsal jeho princip. Dále v této kapitole podávám informace o základních materiálech používaných v oblasti pájení, jako je pájka, tavidlo a další. Následující kapitola shrnuje technologie a možné způsoby pájení v elektrotechnice. Na tuto kapitolu navazuje kapitola o spolehlivosti pájených spojů, kde popisují nejčastější chyby během procesu pájení i po něm. Poslední kapitola teoretické části se týká whiskerů. Zde popisují charakteristiku whiskerů a možné negativní důsledky jejich vzniku. Dále stručně shrnují jejich historie a představují faktory ovlivňující růst whiskerů, teorie jejich vzniku a metody omezující výskyt whiskerů.

V praktické části jsem se zaměřil na přípravu a následnou analýzu vzorků s ohledem na četnost cínových whiskerů na pájeném povrchu vzorků. Prvním krokem bylo vytvoření vzorků celkem v 18 různých variacích, kde se měnil druh použité pájky (Sn, SnCu1, SnCu3), následná zatěžovací teplota (teplota okolí, 50 °C, 80 °C) nebo přítomnost mechanického napětí v pájené vrstvě (vzorky byly ohnuté před pájením nebo po pájení). Vzorky byly potom tepelně namáhány v klimatických komorách po dobu 36 dní. V posledním kroku byla provedena analýza pomocí konfokálního mikroskopu, který byl využit k pořízení detailních snímků některých whiskerů.

Za první úspěch tohoto experimentu bych považoval již samotné vypěstování cínových whiskerů na vzorcích v takto krátkém čase. Tento fakt však na druhou stranu poukazuje na možná bezpečnostní rizika spjatá s výskytem whiskerů (zkratky, nečistoty), protože k jejich růstu došlo za podmínek, s kterými se můžeme setkat v běžné praxi.

K nárůstu bezpečnostních rizik spojených s whiskery došlo hlavně při omezení použití olovnatých pájecích slitin, protože byly nahrazeny pájkami bezolovnatými s vysokým obsahem cínu v rozmezí od 90 % až 100 %. Pro zajištění spolehlivosti pájených spojů je nezbytné při jejich výrobě zajistit opatření k omezení či úplné eliminaci růstu whiskerů. Mezi metody omezující růst whiskerů patří například žíhání nebo použití niklové mezivrstvy.

Z naměřených hodnot vyplývá, že ze zkoumaných teplot je pro růst whiskerů nevhodnější, a tedy i nejrizikovější, teplota 50 °C. Při této teplotě došlo k nejvyšší tvorbě whiskerů bez ohledu na použití pájecí slitiny nebo přítomnost mechanického napětí v materiálu. Nejvíce whiskerů bylo nalezeno u pájky SnCu1 – vzorek č. 1 zatížený mechanickým napětím (deformován po ponoru vzorku do pájky) právě při 50 °C. Naopak nejmenší četnost whiskerů byla pozorována u vzorků při pokojové teplotě.

Druhou důležitou proměnnou při tvorbě whiskerů bylo vnitřní mechanické napětí v povrchové vrstvě. Mechanické napětí v pájené vrstvě bylo vytvořeno u poloviny vzorků, a to jejich ohnutím po zapájení vzorku. U takto zatížených vzorků došlo k mnohem většímu nárůstu whiskerů, než tomu bylo u vzorků bez vnitřního mechanického napětí, tedy u vzorků, které byly ohnuté před procesem pájení. Tento výsledek potvrdil teoretické předpoklady, které označovaly mechanické napětí za jednu z hlavních příčin vzniku whiskerů.

Posledním zkoumaným vlivem byla použitá pájecí slitina. Z důvodu velkého zastoupení cínu ve všech testovaných pájkách (100 %, 99 %, 97 %) nebyl pozorován markantní rozdíl v četnosti cínových whiskerů.

Závěrem bych chtěl říci, že celý experiment jsem původně zamýšlel provést ve větším rozsahu s použitím většího množství variant vzorků, a to především s širším portfoliem pájecích slitin. Tyto vzorky byly dokonce vyhotoveny a vloženy do klimatických komor, ale vzhledem k současné situaci epidemie Covid-19 a časové náročnosti detekce a analýzy whiskerů, musel být celý experiment částečně omezen.

Na úplný závěr bych chtěl ještě jednou poděkovat vedoucímu práce docentu Karlu Duškovi za jeho vstřícnost a flexibilitu, bez které by dokončení této práce nebylo možné.

8 Zdroje

- [1] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] ŠANDERA, Josef. *Mikroelektronické praktikum II*. Brno: Vysoké učení technické, 2003. ISBN 80-214-2325-0.
- [3] KULHAVÝ, Jan. *Dutiny v pájených spojích*. Praha, 2019. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.
- [4] PÍCHA, Jan. *Studium spolehlivosti bezolovnatého pájených spojů*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [5] PODZEMSKÝ, Jiří. *Degradace spojů pájených pájkami bez olova*. Praha, 2015. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Školitel Jan Urbánek.
- [6] HINTERMÜLLER, Jan. *Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev*. Praha, 2018. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd. Vedoucí Karel Dušek.
- [7] ZAHRADNÍK, Vít. *Sledování chování pájecích slitin prostřednictvím měření latentního tepla*. Praha, 2017. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.
- [8] Snímek whiskeru zachycený pomocí SEM [online]. [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/SEM-image-of-Sn-whiskers-that-grew-from-electroplated-Sn-on-a-Cu-substrate-Note-the_fig4_239865535
- [9] Žák, Pavel. *Tvorba whiskerů při měkkém pájení v elektrotechnice*. Praha. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/zak.pdf>
- [10] NOVÁK, Tomáš. *Intermetalické sloučeniny v bezolovnatém pájeném spoji*. Plzeň, 2012. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Školitel František Steiner.
- [11] ŠEVČÍK, Jan. *Spolehlivost prokovů u desek plošných spojů*. Praha, 2018. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.
- [12] LEE, Ning-Cheng. *Reflow Soldering Processes: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies* [online]. Burlington: Elsevier Science & Technology, 2002;2001;. ISBN 0750672188;9780750672184;.
- [13] *Through-Hole vs. Surface Mount*. [online]. [cit. 20-05-04]. Dostupné z: <http://blog.optimumdesign.com/through-hole-vs-surface-mount>

- [14] KOZÁK, Martin. *Vliv povrchové úpravy na vznik voidů v pájených spojích*. Praha, 2016. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.
- [15] BATH, Jasbir. *Lead-free soldering*. New York: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-32466-1.
- [16] SHEN, J. a Y. C. CHAN. *Effect of metal/ceramic nanoparticle-doped fluxes on the wettability between Sn–Ag–Cu solder and a Cu layer*. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, vol. 477, no. 1, s. 909-914. ISSN 0925-8388.
- [17] LAU, John H. *Solder joint reliability: theory and applications*. New York: Van Nostrand Reinhold, c1991. ISBN isbn0-442-00260-2.
- [18] HARMAN, Dominik. *Testování aktivity tavidel pomocí testu rotékavosti*. Plzeň 2014. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí Karel Rendl.
- [19] ŠIMON, Vojtěch. *Spolehlivost pájených spojů LED panelů*. Brno 2017. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí Jiří Starý.
- [20] NOVÁK, Ondřej. *Pájené spoje, růst dendritů*. Praha, 2016. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.
- [21] PUTTLITZ, Karl J. a Kathleen A. STALTER. *Handbook of lead-free solder technology for microelectronic assemblies*. New York: Marcel Dekker, c2004. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 170. ISBN isbn:0-8247-4870-0.
- [22] *Solder Paste Printing Process* [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <http://www.surfacemountprocess.com/solder-paste-printing-process.html>
- [23] FILÁKOVÁ, Denisa. *Technologie pájení přetavením*. Zlín, 2010. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav elektroniky a měření. Vedoucí práce Petr Neumann.
- [24] FRANKO, Jaroslav. *Technologie pájení a vodivého lepení v elektronice*. Plzeň 2016. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí Martin Hirman.
- [25] LEICHT, Helmut. *Today's Vapor Phase Soldering* [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <http://www.torenko.com/pdf/Todays-Vapor-Phase-Soldering-Tech-Paper.pdf>
- [26] *Flow and Reflow*. HAKKU [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.hakko.com/english/hikaru/pages/story9.html>

- [27] SLAVATA, Michal. *Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži*. Praha, 2014. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.
- [28] 13 Common PCB Soldering Problems to Avoid. [online]. [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/08/07/13-common-pcb-soldering-problems-to-avoid/>
- [29] D. Bušek, K. Dušek and J. Kulhavý, "Dendritic Growth and its Dependence on Various Conditions," *2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, Zlatibor, 2018, pp. 1-5.
- [30] NETRH, Ladislav. *Diagnostika propojovacích struktur*. Plzeň, 2012. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí Václav Wirth.
- [31] What is a solder bridge-snímek můstku [online]. [cit. 2020-04-16] Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-a-solder-bridge>
- [32] Vady pájených spojů [online]. [cit. 2020-04-17] Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/68265/mod_resource/content/1/Vady%20p%C3%A1jen%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf
- [33] Tombstone effect [online]. [cit. 2020-04-17] Dostupné z: <http://mikropure.com/tombstone-effect/>
- [34] RŮŽIČKA, Daniel. *Studium vlivu množství tavidla na výskyt voidů v pájeném spoji*. Praha, 2014. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.
- [35] X. Hong and P. Lai, "The popcorn effect of lead and lead-free mixed assembly process in high density plastic packages," *2011 International Symposium on Advanced Packaging Materials (APM)*, Xiamen, 2011, pp. 176-179.
- [36] JANSÁ, Vojtěch. *Pevnost pájených spojů na keramických substrátech*. Brno, 2013. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí Martin Adámek.
- [37] LIPAŤSKÝ, Lubomír. *Porovnání vlastností pájených spojů na keramických substrátech pomocí zkoušky stříhem*. Brno, 2012. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí Martin Adámek.

- [38] Podzemský, Urbánek, Dušek. *Obrazová analýza povrchu bezolovnaté povrchové úpravy zaměřená na indikaci cínových whiskerů*. [online]. [cit. 2020-04-19] Dostupné z: <https://docplayer.cz/14271417-Obrazova-analyza-povrchu-bezolovnate-povrchove-upravy-zamerena-na-indikaci-cinovy-ch-whiskeru-j-podzemsky-1-j-urbanek-1-k.html>
- [39] VÁVRA, Jan. *Studium růstu whiskerů*. Praha, 2014. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.
- [40] GALYON, George. A History of Tin Whisker Theory: 1946 to 2004 [online].[cit. 2020-04-19]. Dostupné z: http://thor.inemi.org/webdownload/newsroom/Presentations/SMTAI-04_tin_whiskers.pdf
- [41] 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.
- [42] *Tin Whiskers: A History of Documented Electrical System Failures* [online].[cit. 2020-04-19]. Dostupné z: https://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2006-Leidecker-Tin-Whisker-Failures.pdf
- [43] PANASHCHENKO, Lyudmyla, NASA Goddard Space Flight Center. *The Art of Metal Whisker Appreciation: A Practical Guide for Electronics Professionals* [online].[cit. 2020-04-19]. Dostupné z: https://nepp.nasa.gov/whisker/reference/tech_papers/2012-Panashchenko-IPC-Art-of-Metal-Whisker-Appreciation.pdf
- [44] BRUSSE, Jax a Garry EWELL. *TIN WHISKERS: ATTRIBUTES AND MITIGATION*. QSS Group, Incorporated [online] [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.659.4540&rep=rep1&type=pdf>
- [45] M. OSTERMAN, *Mitigation Strategies for Tin Whiskers* [online][cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://web.calce.umd.edu/tin-whiskers/TINWHISKERMITIGATION.pdf>
- [46] KATO, T., HANDWERKER, C., BATH, J. *Mitigating Tin Whisker Risks: Theory and Practice*. 2011. ISBN 9780470907238
- [47] BRUSSE, J., LEIDECKER, H., PANASHCHENKO, L. *Metal Whiskers: Failure Modes and Mitigation Strategies* [online][cit. 2020-04-20]. Dostupné z: https://nepp.nasa.gov/WHISKER/reference/tech_papers/2007-brusse-metal-whiskers.pdf
- [48] Laboratorní sušárna MEMMERT [online] Dostupné z: <https://www.labicom.cz/produkty/laboratorni-vybaveni/mechanicke-tepelne-operace/susarny/laboratorni-susarny-memmert/s-nucenou-ventilaci>

[49] Mikroskop Keyence [online] Dostupné z: https://www.keyence.eu/cscz/landing/lpc/1807-vk-konfokalnimikroskop.jsp?aw=gagooglekbczcznonbrmicvk054&gclid=CjwKCAjwwMn1BRAUEiwAZ_jnEoCj1ovOfiybD5XijcO76H5hlhix28zgSFMMadAAk1ElcjJDD_4AvhoCxSsQAvD_BwE

9 Seznam obrázků

Obrázek 1. Vzájemné vztahy složek pájecího procesu [1].....	13
Obrázek 2. Difuze roztavené pájky do pájeného materiálu [3].....	14
Obrázek 3. Smáčení povrchu pájkou [1].....	15
Obrázek 4. a) Dokonale smáčivý povrch b) Špatně smáčivý povrch c) Nesmáčivý povrch [2].....	15
Obrázek 5. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na čase a teplotě [5]	16
Obrázek 6. Intermetalická vrstva se zvětšením 3000x [6].....	17
Obrázek 7. Fázový diagram cín-olovo [7]	19
Obrázek 8. Příklad Technologie THT [12]	26
Obrázek 9. Příklad technologie SMT [12]	27
Obrázek 10. Pájený spoj vytvářený hrotovou pájkou [20]	28
Obrázek 11. Proces pájení vlnou [12].....	28
Obrázek 12. Šablonový tisk [12]	30
Obrázek 13. Topná jednotka reflow pece [24]	32
Obrázek 14. Teplotní profil [15]	32
Obrázek 15. Pec pro pájení v parách [20]	34
Obrázek 16. Schéma pájení ponorem [25].....	34
Obrázek 17. Faktory ovlivňující spolehlivost spoje [37]	35
Obrázek 18. Můstek u výbodů IO [31].....	37
Obrázek 19. Studený spoj [32]	38
Obrázek 20. Tombstone effect [33].....	38
Obrázek 21. Nesmáčivý spoj [34]	39
Obrázek 22. Voidy v pájeném spoji [14].....	40
Obrázek 23. Chybějící spoj [28]	41
Obrázek 24. Chybně umístěná součástka [30]	41
Obrázek 25. Popcorn efekt [34]	42
Obrázek 26. Dendrity na DPS [29]	42
Obrázek 27. Sn Whiskery na Cu substrátu [8]	43
Obrázek 28. Detail zahnutého whiskeru [41]	44
Obrázek 29. Trvalé zkraty způsobené whiskery	45
Obrázek 30. Důsledky oblouku vyvolané whiskerem [43]	46
Obrázek 31. -Ishikavův diagram faktorů vzniku Whiskerů [9].....	47
Obrázek 32. Růst whiskerů vlivem dynamické rekrystalizace [5].....	50
Obrázek 33. Mechanismus vzniku whiskeru podle teorie The End Game [5].....	52

Obrázek 34. Klouzání hranice krystalového zrna [5]	52
Obrázek 35. Vliv oxidu a intermetalické vrstvy v Teorii The End Game [5]	53
Obrázek 36. Vliv tloušťky povrchové úpravy na tvorbu whiskerů [5]	55
Obrázek 37. Porovnání různých tlouštěk konformního povlaku [47]	56
Obrázek 38. Laboratorní sušárna MEMMERT [48].....	57
Obrázek 39. Konfokální mikroskop Keyence VK-X1000 [49]	58
Obrázek 40. Světelný zdroj Olympus KL 1500 LCD	58
Obrázek 41. Vzorek zachycený pomocí konfokálního mikroskopu	59
Obrázek 42. Měřicí pracoviště.....	60
Obrázek 43. 3D model povrchu vzorku s whiskerem vytvořený pomocí mikroskopu Keyence.....	61
Obrázek 44. Whisker na vzorku SnCu1 - 50 °C - vzorek 3.....	62
Obrázek 45. Whisker na vzorku SnCu1 - 50 °C vzorek 1.....	62
Obrázek 46. Whisker na vzorku Sn - 80 °C - vzorek 3	63
Obrázek 47. Whisker na vzorku SnCu1 - 80 °C - vzorek 2.....	63
Obrázek 48. Četnost whiskerů v závislosti na teplotě.....	64
Obrázek 49. Četnost whiskerů v závislosti na mechanickém napětí.....	65
Obrázek 50. Četnost whiskerů v závislosti na materiálu pájky	66

10 Seznam rovnic

Rovnice č. 1 – Závislost difúzního koeficientu na teplotě

Rovnice č. 2 – Tloušťka intermetalických sloučenin Sn – Cu

11 Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – Vlastnosti prvků v bezolovnatých pájecích slitinách [4]

Tabulka č. 2 – Rozdělení tavidel podle ČSN EN 29454 [18]

Tabulka č.3 – Použité pájecí slitiny

Tabulka č. 4 – Tabulka četností whiskerů pro jednotlivé vzorky