



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

Příprava a návrh experimentu pro analýzu rozstřikování tavidla z pájecí pasty

**Preparing and design of experiment for the flux sputtering analysis from
solder paste**

Diplomová práce

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

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

Bc. Petr Veselý

Praha 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Veselý** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **406220**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Příprava a návrh experimentu pro analýzu rozstřikování tavidla z pájecí pasty

Název diplomové práce anglicky:

Preparing and design of experiment for the flux sputtering analysis from solder paste

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení přetavením, povrchovými úpravami desek plošných spojů, pájecími pastami a typy tavidel.
- 2) Seznamte se s možnými problémy, které mohou tavidla způsobovat.
- 3) Navrhněte experimentální postup pro analýzu rozstřikování tavidla z pájecí pasty a experiment provedte pro soubor vzorků s různými povrchovými úpravami desek plošných spojů.
- 4) Výsledky experimentální části 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 materiállov pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university 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: **13.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

Název práce: **Příprava a návrh experimentu pro analýzu rozstříkování tavidla z pájecí pasty**

Autor: Bc. Petr Veselý

Obor: Technologické systémy

Druh práce: Diplomová práce

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

Abstrakt:

Tato diplomová práce se věnuje tématu pájení a problémům, které se při pájení mohou vyskytnout z hlediska použití tavidel. V teoretické části jsou probrány základní aspekty tvorby pájeného spoje včetně fyzikální podstaty, materiálů pájek a tavidel, technologií připojování elektronických součástek, výroby a materiálů desek plošných spojů. Detailněji je pak tato část zaměřena na tavidla a možné problémy, které mohou tavidla způsobovat. V praktické části práce je navržen postup experimentu, který zkoumá efekt rozstříkování tavidla z pájecí pasty v závislosti na povrchové úpravě desky plošných spojů. Tento experiment je následně proveden a vyhodnocen.

Klíčová slova:

pájení přetavením, chyby při pájení, rozstříkování tavidla

Title: Preparing and design of experiment for the flux sputtering analysis from solder paste

Author: Bc. Petr Veselý

Branch: Technological Systems

Document type: Diploma thesis

Thesis advisor: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Abstract:

The subject of this thesis is soldering and problems in soldering caused by a solder flux. There is a description of the soldering technology in the first theoretical part – a physical background, materials of solder and flux, mounting technologies, manufacturing of printed circuit boards and their materials. The theoretical part focus more on the solder flux, its composition, application and problems connected with the flux. In the second part of this thesis, an experiment studying a flux sputtering effect is designed. Consequently, the analysis of the flux sputtering effect depending on surface finishes of printed circuit boards is accomplished.

Keywords:

reflow soldering, soldering defects, flux sputtering

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

Poděkování

Předně děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za pomoc, vedení, cenné rady při zpracovávání a přátelský přístup.

Také bych rád poděkoval rodině, nejbližším a zvláště mé dlouholeté přítelkyni Daniele Klodnerové za neutuchající podporu při celém mém vysokoškolském studiu.

OBSAH

ÚVOD	9
1 TECHNOLOGICKÝ PROCES PÁJENÍ	10
1.1 Fyzikální podstata pájení	10
1.1.1 Povrchové napětí	10
1.1.2 Intermetalická vrstva	11
1.2 Pájka	12
1.2.1 Kvalitativní parametry pájky	13
1.2.2 Materiálové složení pájky	13
1.3 Pájecí pasta	15
1.4 Tavidlo	15
1.5 Desky plošných spojů	17
1.5.1 Základní materiály a technologie	18
1.5.2 Povrchové ochrany mědi	19
1.5.3 Nepájivá maska	20
1.6 Technologie montáže součástek	21
1.7 Ruční pájení	22
1.8 Pájení vlnou	23
1.9 Pájení přetavením	23
1.9.1 Nanášení pájecí pasty	24
1.9.2 Pájení konvekci	24
1.9.3 Pájení infračerveným zářením	24
1.9.4 Pájení v parách	25
1.9.5 Pájení laserem	26
1.9.6 Další metody pájení přetavením	26
2 PROBLÉMY PŘI PÁJENÍ PŘETAVENÍM	27
2.1 Vybrané chyby u pájení přetavením	27
2.1.1 Můstek	27
2.1.2 Chybějící spoj	28
2.1.3 Tombstone efekt	28
2.1.4 Popcorn efekt	29
2.1.5 Whisker	29
2.1.6 Dendrit	30
2.1.7 Warpage efekt	30
2.1.8 Head in Pillow efekt	30
2.2 Chyby způsobené tavidly	31
2.2.1 Oxidace a koroze	31

2.2.2 Void	31
2.2.3 Rozstříkování tavidla z pájecí pasty	33
3 NÁVRH EXPERIMENTU	35
3.1 Návrh vzorků.....	35
3.2 Návrh postupu experimentu.....	36
3.2.1 Původní návrh postupu experimentu	37
3.2.2 Nový návrh postupu experimentu	38
3.3 Použité pomůcky a zařízení.....	39
3.4 Použité pájecí pasty.....	42
3.5 Zvolený teplotní profil	43
3.6 Statistické metody zpracování dat	45
4 OVĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU	47
4.1 Počet a typy vzorků.....	47
4.2 Vyhodnocení hmotnostního úbytku tavidla	47
4.3 Vyhodnocení optické analýzy	50
4.4 Vyhodnocení roztékání tavidla po povrchu vzorku	53
ZÁVĚR.....	57
POUŽITÁ LITERATURA	59
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	62
SEZNAM TABULEK	63

ÚVOD

Pájení, jakožto dominantní technologie v oblasti spojování materiálů v elektrotechnice, neustále připravuje nová témata v oblasti výzkumu. Ačkoli proces pájení známe již od starověku, v elektrotechnice pak bezmála sto let, nové podmínky pro výrobu elektrotechnických výrobků požadují také specifické vlastnosti pájených spojů. Do toho vstupuje dále legislativa a environmentální omezení, které dále specifikují nároky na materiály a jejich chování. Proto i dnes neustále probíhá výzkum jak v oblasti vlastností stávajících materiálů pájek, tak i v oblasti zcela nových slitin a dalších přidružených materiálů.

Zajímavou oblastí je zkoumání chyb a vad pájených spojů, které se vyskytují v elektrotechnické praxi, jejich analýza a návrh řešení. Přitom může jít o běžně používané slitiny a technologické postupy, u kterých dojde vlivem neočekávaných vnějších podmínek k problému.

V teoretické části této práce se budu věnovat technologii pájení obecně, popsány budou především náležitosti pro tvorbu kvalitního pájeného spoje, používané materiály a látky. Dále pak aktuální metody pájení, především pájení přetavením. Na konci uvedu také některé možné vady a problémy, které se při pájení přetavením mohou vyskytnout.

V této diplomové práci se budu zabývat zevrubněji výzkumem vlastností tavidel, tedy látek s redukčními vlastnostmi, které zajišťují jakost pájeného spoje. Bude uveden přehled běžně používaných tavidel, jejich vlastností a potenciální vady, které mohou tavidla, respektive jejich nesprávná aplikace, způsobovat.

V rámci práce bude navržen konkrétní experiment, který bude analyzovat chování tavidla, respektive míru jeho rozstříkávání, v závislosti na různých typech povrchových úprav substrátu (standardní deska plošných spojů) a nepájecí masce. Bude nutné navrhnout metodiku experimentu a zkoumané vzorky.

Výstupem práce bude návrh a výroba vzorků, návrh metodiky experimentu, jeho ověření a provedení. Dále analýza získaných dat včetně srovnání jednotlivých povrchových úprav a pájecích past z hlediska rozstříkávání tavidla.

1 TECHNOLOGICKÝ PROCES PÁJENÍ

Pájení patří mezi metalurgické procesy spojování, kdy spojovací materiál má nižší teplotu tavení, než spojované součásti. Nedochází tedy ke změnám struktury základního materiálu. Atomy roztaveného spojovacího kovu (pájky) difundují během procesu do spojovaných kovových součástí a vytváří tak pevné spojení.

Pájení dělíme podle teploty tavení pájky na měkké (do 450 °C) a tvrdé (nad 450 °C). Měkké se využívá v elektronice a v elektrotechnice pro tvorbu elektromechanických spojů, kdežto tvrdé pro mechanická spojení, které nahrazují v určitých oblastech sváření (například klempířství). Dále bude uvažováno pouze pájení měkké. [1]

1.1 Fyzikální podstata pájení

Pro vznik pájeného spoje je nutné, aby povrch spojovaných částí smáčel tekutou pájku. Při procesu pájení se netaví spojovaný materiál, ale díky smáčení se vytvoří podmínky pro vznik adhezních a kohezních sil a nastává vzájemné rozpouštění a difúze atomů pájky a spojovaného materiálu. [1], [2]

1.1.1 Povrchové napětí

Pro vlastnosti pájeného spoje a pájky z hlediska smáčení je důležitá hodnota *povrchového napětí*. To je jednou z vlastností kapaliny – na povrchu působí na částice (molekuly) nevyrovnané síly, které způsobí, že se kapka kapaliny (pájky) snaží zaujmout takový stav, při kterém bude mít při daném objemu nejmenší možný povrch – povrch koule.

Pokud bychom chtěli kapku kapaliny ve formě koule „natáhnout“ a zvětšit tak její povrch, musíme dodat molekulám, které bychom přemístili na povrch, dodat energii. Je to vlastně potenciální energie molekulárních sil. Tato energie se nazývá povrchová energie a vypočte se podle vztahu:

$$\Delta E = \sigma \cdot \Delta S \quad (1)$$

kde ΔE je dodaná energie (J), ΔS je změna povrchu (m^2) a konstanta úměrnosti σ je povrchové napětí (Nm^{-1}).

Povrchové napětí je také definováno jako síla vztažená na jednotku délky pomyslného řezu povrchem kapaliny:

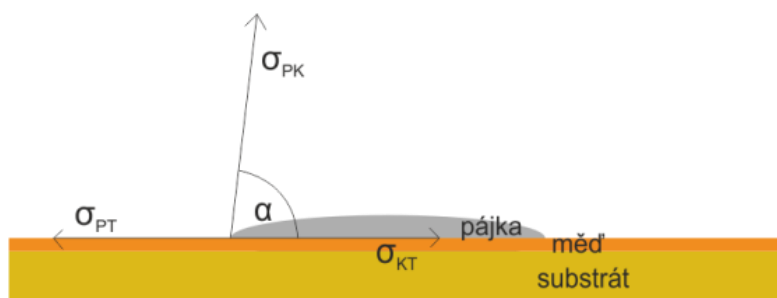
$$\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta l} \quad (2)$$

kde ΔF je povrchová síla (N), Δl je délka pomyslného řezu (m) a σ je povrchové napětí (Nm^{-1}). [3]

Povrchové napětí závisí kromě samotné kapaliny na okolní atmosféře a povrchu. Na rozhraních mezi kapalinou, povrchem a okolní atmosférou jsou definována povrchová napětí, jejichž vztah můžeme popsat Young-Dupreho rovnicí:

$$\sigma_{PT} = \sigma_{KT} + \sigma_{PK} \cos \alpha \quad (3)$$

kde σ_{PT} je povrchové napětí rozhraní pevné a plynné fáze (Nm^{-1}), σ_{KT} je povrchové napětí kapalně a plynné fáze (Nm^{-1}), σ_{PK} je povrchové napětí pevné a kapalně fáze (Nm^{-1}) a α ($^\circ$) je úhel smáčení (resp. stykový úhel, viz kapitola 1.2.1 Kvalitativní parametry pájky). [1], [4]



Obrázek 1: Povrchová napětí na rozhraních

Povrchové napětí je u pájky ovlivněno strukturou roztaveného kovu, typem tavidla, povrchem pájených částí a ochrannou atmosférou. Má vliv na kvalitativní parametry pájky – smáčivost, roztékavost, kapilaritu a vzlínavost v mezeře, které jsou zásadní pro vznik dobrého pájeného spoje. Čím menší je povrchové napětí, tím lépe pájka smáčí povrch spojovaných částí. Povrchové napětí je také závislé na teplotě – se stoupající teplotou povrchové napětí klesá (kromě čisté mědi, kde je tomu naopak). [2]

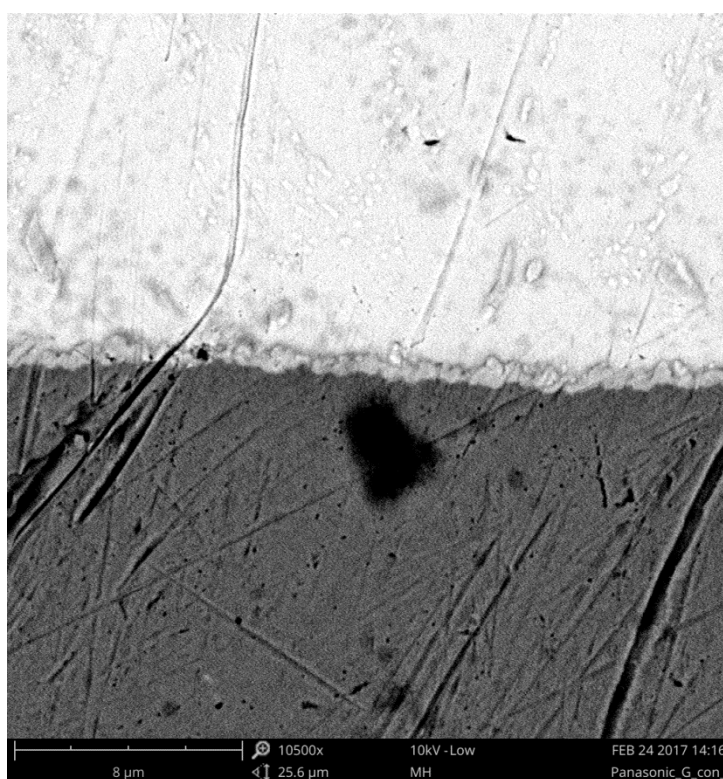
1.1.2 Intermetalická vrstva

Na rozhraní mezi mědí (nejčastěji užívaný kov ke tvorbě vodivých spojení v elektronice a elektrotechnice) a slitinou pájky vzniká vrstvička *intermetalické sloučeniny* (IMC), která je nezbytná pro vznik pevného spojení. Tvoří se i při pokojové teplotě po ukončení pájecího procesu.

Často to bývá sloučenina Cu_6Sn_5 , případně Cu_3Sn (v případě spojování měděného povrchu pájkou na bázi cínu). Tyto sloučeniny mohou však spoj ovlivnit i negativně, bude-li jejich vrstva

větší – málo smáčejí nebo dokonce vůbec nesmáčejí pájku, mají rozdílný koeficient teplotní roztažnosti než měď a izolační materiály desky plošných spojů; dále jsou křehké a náchylné na střídavé mechanické namáhání, náchylnější na oxidaci, kterou může způsobovat vlhkost uložená v galvanicky nanesených povrchích. Vrstva IMC roste ve spoji na úkor cínu (pájky), oslabuje elektrické a mechanické vlastnosti spoje a může docházet i k výskytu trhlin ve spoji. Silnější vrstva IMC může vzniknout buď přímo při pájecím procesu s nevhodně zvolenou příliš vysokou teplotou, nebo při zvýšeném tepelném namáhání zařízení.

Zvláště nepříznivý vliv na spoj má například intermetalická sloučenina, která vzniká mezi cínovou pájkou a zlatem, neboť se tvoří rychle a je velice křehká. [4], [5]



Obrázek 2: Struktura pájeného spoje

1.2 Pájka

Pájka je materiál, který realizuje pájený spoj. Musí splňovat řadu požadavků z hlediska funkce, náročnosti technologie, ekologie a v neposlední řadě i ceny. Pájka může být v několika formách:

- tuhá - navinutý drát (příp. trubička obsahující tavidlo),
- tekutá – cínové lázně,

- pasta.

Tuhá forma pájky se používá pro ruční pájení kontaktním pájedlem, tekutá při pájení ponorem či vlnou a pájka ve formě pasty pro pájení přetavením (viz kapitola 1.9 Pájení přetavením).

1.2.1 Kvalitativní parametry pájky

Jedním z kvalitativních parametrů pájky je *smáčivost*. Smáčivostí se rozumí schopnost tekuté pájky přilnout k základnímu materiálu. Na smáčivost má značný vliv povrchové napětí tekuté pájky. Smáčivost (a kvalita spojení) se hodnotí na základě stykového úhlu α , který musí být mezi 0° a 15° pro dokonalé smáčení, mezi 15° a 75° pro dobré smáčení. Mezi 75° a 90° je pájka ještě smáčivá. [2]

Roztékavost se rozumí schopnost tekuté pájky se roztéct po rovném povrchu při určité teplotě. Určuje se jako plocha v mm^2 . [2]

Kapilarita je schopnost pájky v tekutém stavu vyplnit úzkou mezeru díky působení kapilárních sil. Ty se počítají dle hydromechanických zákonů pro laminární proudění. Tento parametr je nutno brát v úvahu při volbě vhodné velikosti mezery – do příliš malé mezery není zaručeno zatečení pájky, u příliš velké mezery přestávají kapilární síly působit. Určuje se *vzlínavost pájky* – u svislého spoje výška, u vodorovného vzdálenost, kam pájka v tekutém stavu vyvzlíná. Vzlínavost pájky pro svislé spojení se dá vypočítat dle vzorce:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma_H \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot s} \quad (4)$$

kde σ_H je adhezní napětí (Nm^{-1}), α je stykový úhel ($^\circ$), ρ je hustota pájky (kgm^{-3}), g je tíhové zrychlení (ms^{-2}), s je velikost mezery (m) a h je kapilární vzlínavost (m). Pro vodorovné spojení se vzlínavost pájky dá vypočítat podle vzorce:

$$h = \frac{\sigma_H \cdot s \cdot \tau}{6 \cdot \eta} \quad (5)$$

kde σ_H je adhezní napětí (Nm^{-1}), s je velikost mezery (m), τ je čas, za který pájka vyvzlíná do vzdálenosti h (s), η je dynamická vzlínavost pájky ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) a h je kapilární vzlínavost (m). [2]

1.2.2 Materiálové složení pájky

Základ pájky tvoří slitina těžkých kovů s nízkou teplotou tavení – především cín, olovo, zinek, ale také nikl, stříbro, bismut, antimon, indium a další. Většinou se používá dvou- a tříložkových slitin. Nejrozšířenější jsou pájky cínové, neboť se spojují skoro se všemi kovy.

Kromě těchto kovů tvořící základ pájky se v ní mohou vyskytovat příměsi, které ovlivňují tvorbu pájeného spoje. Například měď zhoršuje roztékavost, po zatuhnutí je pájka křehká. Bismut snižuje pracovní teplotu. Naproti tomu například přítomnost stříbra pomáhá při potlačení rozpustnosti jiných kovů v pájce, fosfor se svými redukčními účinky zlepšuje pájitelnost. [4]

Velmi oblíbenou pájkou byla eutektická slitina s 63% obsahem cínu a 37% obsahem olova ($\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$), jejíž výhodou je stejná teplota tání i tuhnutí (183 °C). Alternativou mohla být pájka $\text{Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$ s bodem tání 191 °C, která je o něco levnější.

Tato a další formy olovnatých pájek jsou však dnes ve velkém omezovány a nahrazovány bezolovnatými, zejména z důvodu směrnice Evropské unie RoHS (Restriction of Hazardous Substances), která použití olovnatých pájek omezuje z hlediska dopadu na životní prostředí v oblastech průmyslu a spotřební elektroniky kromě oblastí, kde je stále spolehlivost systému na prvním místě (vojenské a lékařské přístroje, letecké a kosmické systémy apod.). Kromě olova patří mezi zakázané látky také kadmium, rtuť, 6-mocný chrom, polybromované bifenyly a polybromované difenylethery.

Používání bezolovnatých slitin s sebou nese určitá specifika, se kterými je nutno počítat. Jejich teplota tání (a tedy i teplota pájecího procesu) je průměrně okolo 220 °C. Zvedají se tak nároky na součástky, které musí být schopny vydržet vyšší teplotu za delší čas, na technologická zařízení a také se zvedá množství spotřebované energie. Je proto diskutabilní, zda skutečně pomáháme chránit životní prostředí, nebo jen odsouváme problémy z jednoho elementu řetězce výroby do jiného.

Bezolovnaté slitiny také vykazují vyšší hodnotu povrchového napětí a tedy horší smáčivost a pájitelnost. Je nutné proto používat tavidla s agresivnějšími aktivátory.

Bezolovnaté slitiny neznáme tak dobře z hlediska jejich dlouhodobých vlastností, na rozdíl od pájek olovnatých. Již nyní se ukazuje, že mohou způsobovat určité problémy – například vyšší obsah cínu v pájce může způsobit vyšší výskyt tzv. whiskerů, což jsou tenké krystalické struktury vyrůstající z pájky, které mohou způsobit zkrat v obvodu (viz kapitola 2.1.5 Whisker).

Příkladem běžně používané slitiny bez obsahu olova je SnAgCu , souhrnně označované jako SAC. Pájka $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_{3,0}\text{Cu}_{0,5}$ označovaná jako SAC305 má teplotu tavení 220 °C, využívá se v telekomunikačním nebo automobilovém průmyslu, je vhodná pro pájení vlnou, přetavením i pro ruční pájení.

Dalším příkladem může být pájka $\text{Sn}_{99,3}\text{Cu}_{0,7}$, která je eutektická s teplotou tavení 227 °C a používá se pro ruční pájení. Levnou variantou je slitina $\text{Sn}_{91}\text{Zn}_9$ s teplotou tavení 199 °C. Zajímavé jsou slitiny SnBi , které mají nízkou teplotu tavení (okolo 138 °C). [5], [6], [7]

1.3 Pájecí pasta

Jednou z forem pájky je pájecí pasta. Ta se skládá z těchto složek:

- pájka ve formě prášku (zrna o průměru 5-160 μm),
- tavidlo,
- příměsi zajišťující lepivost, viskozitu, roztékavost.

Pasta musí splňovat kromě elektrických a mechanických vlastností po přetavení také funkci lepidla, které bude pájené součástky držet na desce až do chvíle přetavení. Trvanlivost tohoto dočasného připojení součástek je vyžadována nejméně 8 – 24 h, většinou však v praxi není tak dlouho potřeba.

Pastovité pájky potřebují zpravidla dodržování určitých skladovacích podmínek (snížená teplota okolo 8-15 $^{\circ}\text{C}$), jejich trvanlivost je pak nejméně 6 měsíců.

Pájecí slitina používaná ve formě zrn v pájecích pastách může být například $\text{Sn}_{62}\text{Pb}_{36}\text{Ag}_2$, která snižuje rozpouštění stříbra (které je použito při výrobě vývodů pouzder součástek SMD), jinak jsou ale slitiny dnes většinou bezolovnaté (viz výše). [4]

Důležitou složkou tavidla v pájecí pastě je solvent – rozpouštědlo, které slouží jako nosný materiál. Použití správného typu solventu ovlivňuje dále vlastnosti pasty. Použití solventu s nízkou teplotou varu může mít za následek rozstříkovaní pasty. [8]

1.4 Tavidlo

Pro tvorbu pájeného spoje je nezbytně nutné, aby pájené povrchy dobře smáčely. To znamená, že musí být zbaveny nečistot a oxidů, které se na povrchu mědi snadno vytváří. Tavidlo plní funkci redukčního činidla, zbavuje povrch oxidů, dále ovlivňuje viskozitu a povrchové napětí pájky tak, aby se snáze roztékala.

Tavidlo obsahuje 4 základní složky:

- tavidlový nosič,
- aktivátor,
- aditivum,
- rozpouštědlo.

Tavidlový nosič je základní nosnou látkou tavidla, aktivátory upravují jeho aktivitu z hlediska redukce oxidů a čistoty povrchu, aditiva dále upravují vlastnosti tavidla (například viskozitu). Jako rozpouštědlo se používá alkohol nebo deionizovaná voda. [9]

Tavidla dělíme podle normy ISO 9454-1 [1] z hlediska složení tavidlového nosiče na:

- pryskyřičná,
- organická,
- anorganická.

Mezi nejrozšířenější patří kalafunová, jejichž základem je *přírodní pryskyřice* (Rosin). Jsou však sama o sobě málo aktivní, proto je třeba přidat aktivátory. Těmi mohou být organické kyseliny jako kyselina jantarová, adipová apod., jsou však velmi náchylné ke korozi. Lepší se zdají být aktivátory ve formě organických aminhydrochloridů, které se aktivují až při zvýšené teplotě. [4]

Podle aktivity můžeme přírodní pryskyřičná tavidla dělit na:

- R – neaktivovaná kalafuna (Rosin),
- RMA – středně aktivovaná kalafuna (Rosin Middledly Activated),
- RA – silně aktivovaná kalafuna (Rosin Activated).

Podobně se dělí podle aktivity i *syntetická pryskyřice* (Resin).

Zajímavá jsou tavidla vodou rozpustná, která byla vyvinuta ve snaze zjednodušit proces čištění zapájených desek. Jsou to *organická* tavidla bez obsahu kalafuny. Dobře podporují proces pájení, ale při nedostatečném omytí způsobují problémy ve formě koroze. [4]

Podobně jsou na tom tavidla *anorganická*. Ta jsou tvořena solemi, s halogeny nebo bez halogenů. Jsou silně korozivní a jejich zbytky je nutné odstranit.

Existují také tavidla bezoplachová (NC – no clean). Většinou sestávají z pryskyřice, rozpouštědla a aktivátorů. Jsou velmi málo aktivní, vhodné pouze pro lehko pájitelné povrchy. Zbytek těchto tavidel po pájení je čistý, tvrdý, inertní, nekorozivní a nijak nesnižuje životnost DPS a pájených spojů. Výhodou je ušetření jednoho technologického kroku a tím i peněz, čehož se v praxi hojně využívá.

Vzhledem k náročnosti bezolovnatých pájek jsou také zvýšené nároky na tavidla - na rozdíl od těch, které se používají s olovnatými slitinami. Musí zlepšovat smáčivost těchto slitin, vydržet vyšší teploty při procesu pájení, ale nesmí se zároveň zvýšit množství vypařovaných složek. V tomto ohledu se zdají být nejlepší tavidla VOC-free (Volatile Organic Compounds-free – tavidla bez unikajících organických složek). [1]

Tavidla se vyskytují ve formě pevné, tekuté i plynné. Často jsou součástí pájky – například u trubičkové drátové pájky nebo u pájecí pasty.

V pájecích pastách se používají tavidla kalafunová, většinou mírně aktivovaná, s nebo bez příměsí halogenidů, ale také vodou-omyvatelná tavidla (organické látky a látky na bázi glykolu) a bezoplachová tavidla na bázi umělé pryskyřice. Dělení past dle typu použitého tavidla vymezuje standard J-STD-004 "Requirements for Soldering Fluxes". [10]

Tabulka 1: Systém rozdělení tavidel dle IPC-J-STD-004B

Typ tavidla	Aktivita tavidla	Obsah halidů	Označení
Pryskyřičné (přírodní)	Nízká	<0,05%	ROLO
		<0,5%	ROL1
	Střední	<0,05%	ROM0
		0,5-2,0%	ROM1
	Vysoká	<0,05%	ROHO
		>2,0%	ROH1
Pryskyřičné (syntetické)	Nízká	<0,05%	RELO
		<0,5%	REL1
	Střední	<0,05%	REMO
		0,5-2,0%	REM1
	Vysoká	<0,05%	REHO
		>2,0%	REH1
Organické	Nízká	<0,05%	ORLO
		<0,5%	ORL1
	Střední	<0,05%	ORM0
		0,5-2,0%	ORM1
	Vysoká	<0,05%	ORHO
		>2,0%	ORH1
Anorganické	Nízká	<0,05%	INLO
		<0,5%	INL1
	Střední	<0,05%	INMO
		0,5-2,0%	INM1
	Vysoká	<0,05%	INHO
		>2,0%	INH1

1.5 Desky plošných spojů

Nejčastější aplikaci pájení najdeme prakticky v každém elektronickém zařízení. Jednotlivé součástky, ze kterých se skládá funkční elektrický obvod, jsou připojeny pomocí pájených spojů na desku plošných spojů (DPS). Kromě nosné funkce součástky vzájemně propojuje ve funkční celek.

1.5.1 Základní materiály a technologie

Základní substrát je tvořen vhodným izolantem, který musí mít vysokou hodnotu povrchového odporu, malou permitivitu, musí být trvanlivý a zároveň vydržet vysoké tepelné namáhání během procesu pájení. Tím může být u levnějších variant DPS bavlněný či buničitý papír napuštěný fenolickou pryskyřicí (označení FR2), ve většině aplikací skelná tkanina (rouno nebo tkaná) napuštěná epoxidovou či fenolovou pryskyřicí. Tento materiál se nazývá FR4 nebo také cuprexit. Pro zvláštní, vysokoteplotní, aplikace se používá substrátů na bázi teflonu a keramiky, pro ohebné substráty na bázi polyimidu (kapton) nebo polyamidu. Pro aplikace s požadavkem na účinné chlazení komponent mohou být substráty kovové s izolační vrstvou. [4], [11]

Na základní substrát je nanášena měď. Ta může být ve formě plechu laminována přímo na substrát, nebo se používá akrylové lepidlo. Případně může být měď nanášena elektro-depozicí. Často se používá o tloušťce 35 μm , ale jsou možné jakékoli tloušťky dle potřeb zákazníka. Měď je naválcovaná z jedné strany (pak mluvíme o jednostranné DPS) a z obou stran (oboustranná DPS). Případně se dají skládat na sebe jednotlivé jednostranné a oboustranné DPS, a vytvořit tak vícevrstvé desky, což vede ke zmenšení rozměrů zařízení (většina případů moderní elektroniky). [11]

Technologie, kterými je možno vytvořit v mědi vodivý obrazec (vodivá propojení mezi komponenty), jsou:

- substraktivní,
- aditivní,
- semiaditivní.

Pro *substraktivní* technologii je vstupním materiálem základní substrát s naválcovanou mědí. Na tu se nanese vrstva fotorezistu – negativního nebo pozitivního. Následně se provede osvit přes šablonu (negativní nebo pozitivní) a podle typu fotorezistu se buď vytvrdí osvětlené části, nebo se naopak osvětlené části stanou rozpustné ve vyvolávací lázni (například vodní roztok hydroxidu draselného). Případně se místo fotorezistu může použít selektivní zlacení. Místa, která jsou zakryta fotorezistem nebo zlacením, jsou chráněna a tvoří vodivý obrazec, který chceme vyrobit. Deska se nyní ponoří do leptací lázně (například chlorid železitý) a odkrytá místa se odleptají. Následně se deska očistí od zbytků fotorezistu. Posledním krokem je pak vrtání otvorů. Tento postup je nejjednodušší a používá se u jednostranných a oboustranných desek. Dá se tento postup aplikovat i v domácích podmínkách. [11]

Aditivní technologie spočívá v nakovení základního substrátu přímo daným motivem (vodivým obrazcem).

Semiaditivní technologie je běžným postupem ve velkosériové výrobě vícevrstvých desek. Vstupním materiálem je základní substrát s naválcovanou mědí. Prvním krokem je vrtání otvorů, které jsou následně galvanicky prokoveny mědí. Poté je nanesen fotorezist a proběhne osvit přes šablonu jako u technologie substraktivní. Místa nechráněná fotorezistem se galvanicky zesílí další vrstvou mědi, na kterou je dále nanesen leptu-vzdorný cín. Je odstraněn fotorezist a deska je ponořena do leptací lázně. Ta může být jak kyselá, tak alkalická. Následně se odstraní leptu-vzdorný rezist a deska je připravena na další, konečné úpravy. [11]

1.5.2 Povrchové ochrany mědi

Dále mohou být DPS ošetřeny povrchovou úpravou, která má za úkol zabránit oxidaci mědi při skladování před pájecím procesem a ke zlepšení pájitelnosti povrchu. Mezi používané úpravy patří:

- HASL (Hot Air Solder Levelling - žárové cínování),
- OSP (Organic Solderability Preservative - ošetření organickým filmem),
- ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold - chemické niklování a zlacení),
- ENEPIG (Electroless Nickel, Electroless Palladium, Immersion Gold – chemické niklování, paladiování a zlacení),
- galvanické „tvrdé“ zlato,
- imerzní cín,
- imerzní stříbro.

HASL je povrchová úprava, kdy se na mědi vytváří vrstva pájky (v dnešní době především bezolovnaté). Deska je ponořena do roztavené lázně pájky, při vytažení je přebytečná pájka odfouknuta horkým vzduchem (pro oboustranné a vícevrstvé z obou stran). Je to základní ochrana, kterou nabízí standardně většina výrobců desek plošných spojů. Tloušťka se pohybuje od 2 do 30 μm . Výhoda tkví v jednoduchosti zhotovení a nízké ceně oproti jiným způsobům povrchových úprav. Hodí se pro THT montáž a jednodušší SMD montáž (viz kapitola 1.6 Technologie montáže součástek), díky velkým nerovnostem povrchu však není vhodná pro náročnější pouzdra integrovaných obvodů jako například BGA (Ball Grid Array – pouzdro s kuličkovými vývody). Další nevýhodou je zvýšení iontové znečištění a velký teplotní šok pro DPS, která je ponořena do horké lázně pájky. To může vést k ohýbání a kroucení DPS. Zároveň se vytváří intermetalická sloučenina mezi povrchovou vrstvou a mědí, která může také vést ke zhoršení pájitelnosti. [12], [13]

OSP je povrchová úprava ve formě organického filmu naneseného na měděné plošky. Složením a funkcí se blíží tavidlům. Jeho tloušťka se pohybuje od 0,1 do 0,6 μm . Výhoda těchto povrchů je rovný povrch, jednoduchost procesu, opravitelnost. Nevýhodou je krátká životnost a citlivost na mechanické poškození (na rozdíl od robustního HASL). [12], [14]

ENIG se stává stále populárnější povrchovou úpravou v průmyslových a dalších aplikacích. Reaguje na zvýšené požadavky ze strany moderních pouzder integrovaných obvodů, které vyžadují hladký a dokonale rovný povrch (BGA). Skládá se z vrstvy niklu, naneseného bezproudovou depozicí. Ta má tloušťku okolo 3-6 μm . Tato vrstva odděluje měď a tenkou vrstvu zlata, nanesenou chemickou depozicí. Tloušťka zlata je 50-100 nm. Zlato je ideální ochranou – zcela odolává oxidaci a tím je doba skladovatelnosti nezávislá na okolním prostředí. Povrch lze jednoduše kontrolovat pomocí vizuální inspekce a také jednoduše kontrolovat tloušťku. Povrch poskytuje výbornou smáčivost při pájení díky okamžitému rozpuštění zlata v pájce. Vrstva má také výborné elektrické vlastnosti. Je však o něco dražší variantou a může trpět tzv. BlackPad syndromem, což je koroze niklové vrstvy v důsledku vyššího obsahu fosforu. [12], [15], [13]

ENEPIG je podobnou povrchovou úpravou jako ENIG, mezi vrstvu niklu a zlata je však vložena další vrstva paladia. Ta má tloušťku přibližně 100-200 nm. Zlato má v tomto případě o něco menší tloušťku – okolo 25-50 nm. Přítomnost paladia snižuje růst nechtěných intermetalických vrstev a zlepšuje tak vlastnosti spoje. [15]

Galvanické “tvrdé” zlato je povrchová úprava podobná ENIG. Tloušťka zlata je však větší – 0,6-1 μm . Má dlouhou životnost, je tvrdé a odolné. Nevýhodou je vyšší cena a složitější technologie. [14]

Imerzní cín je chemickou cestou nanesená tenká vrstva čistého cínu s tloušťkou okolo 1 μm . Ta je velmi dobře smáčivá, zároveň i rovná a vhodná pro náročnější pouzdra typu BGA. Tato úprava má však nevýhody ve vytváření intermetalických vrstev mezi mědí a cínem, které rychle rostou a nepříznivě ovlivňují smáčení pájky, životnost takové vrstvy není dlouhá. Zvláště nevhodné jsou pak pro procesy, ve kterých dochází k více pájecím cyklům, kdy dochází k rychlejšímu růstu IMC. Vrstva imerzního cínu je také náchylnější k růstu cínových whiskerů. [12], [16]

Ormecon je jednou z variant chemického cínu. Mezi vrstvu cínu a mědi je vložena tenká vrstva organického kovu (okolo 0,08 μm), která brání růstu intermetalických sloučenin a zvyšuje tak životnost této ochrany z hlediska pájitelnosti. [17]

Imerzní stříbro je chemickou cestou nanesená tenká vrstva stříbra. Je dobrou a levnější alternativou vůči ochraně ENIG. Imerzní stříbro je stabilní a spolehlivá ochrana s vysokou životností. Bývá zároveň ošetřena organickým filmem (OSP), protože stříbro je náchylné ke znečištění. Může také docházet k výskytu stříbrných whiskerů. [12]

1.5.3 Nepájivá maska

Celá deska pak může být ošetřena tzv. *nepájivou maskou*, která zajišťuje nesmáčení pájky mimo samotné spoje (kontaktní plošky). Kromě toho chrání měděné spoje mimo kontaktní plošky a

brání pronikání vlhkosti. Také zlepšuje izolační pevnost. Může mít estetickou funkci, ale také speciální – například bílá, vysoce lesklá maska se využívá v LED svítidlech pro zvýšení vyzařování.

Standard IPC-SM-840C rozděluje nepájivé masky na dvě třídy podle požadavků na spolehlivost:

- T (Telecommunication – běžná spolehlivost, telekomunikace),
- H (High Reliability/Military - vysoká spolehlivost, vojenské využití).

Třída T je určena pro výrobky typu počítače, telekomunikační zařízení, průmyslových zařízení a jiných důležitých, nikoli však kritických nebo vojenských aplikací.

Třída H je určena pro výrobky vojenské či lékařské techniky, u nichž je vyžadován nepřetržitý provoz a vysoká míra spolehlivost. Často se jedná o zařízení, na nichž závisí lidské životy.

Pro běžné výrobky spotřebního průmyslu nejsou zvláštní požadavky na nepájivou masku. [18]

Nepájivá maska může být ve dvou formách:

- fotocitlivá nepájivá maska,
- přímo nanášená nepájivá maska.

Fotocitlivá nepájivá maska se nanáší na substrát ve formě viskózní kapaliny pomocí síta (bez šablony), postříkem, clonováním, nebo se nanáší válcováním ve formě suchého filmu. Následně proběhne fotolitografický proces (podobný procesu vytváření vodivých cest v měděné vrstvě) a vytvoří se požadovaný obrazec.

Přímo nanášená nepájivá maska je nanesena ve formě viskózní kapaliny přes šablonu a obrazec se tak vytvoří přímo. Tato metoda je však v porovnání s předchozí méně přesná.

U obou metod zpravidla následuje po vytvoření obrazce termické vytvrzení nebo vytvrzení UV zářením. [19]

Výrobci nabízí nepájivé masky v různých barvách, nejčastěji se používá zelená, ale také modrá, červená, žlutá a další. Je možné vyrobit masku dle drsnosti povrchu ve formě lesklé, polo-matné a matné.

1.6 Technologie montáže součástek

Existují dva způsoby připojení součástek na desku plošného spoje. Historicky starší způsob se nazývá *THT* (through hole technology). Součástky mají drátové vývody, které vedou skrz substrát a jsou zapájené na opačné straně, než-li se nachází pouzdro. Tento typ připojení využívají v dnešní době

hlavně ty součástky, které nelze již dále zmenšovat (elektrolytické kondenzátory větších kapacit) a speciální součástky jako např. konektory.

Modernější způsob připojení součástek je *SMT* (surface mount technology). V tomto případě jsou součástky připojené pájenými spoji na stejné straně jako pouzdro, není potřeba vrtaných děr skrz substrát. To přináší úsporu místa a možnosti miniaturizace součástek. Obvody obsahující SMD (surface mount device) součástky mají také méně parazitních vlastností (indukčnosti a kapacity spojů). Velkou výhodou je tento způsob hlavně pro připojení integrovaných obvodů, ale i dalších součástek, jako jsou keramické kondenzátory, rezistory, diskrétní polovodičové součástky a další.

Proces připojování součástek pomocí metody THT nebo SMT může probíhat buď ručně, nebo zčásti či zcela automaticky. Podle toho dělíme technologie pájení na ruční pájení a strojní pájení. Strojní pájení má přitom dnes většinové zastoupení ve velkosériové výrobě v průmyslu. I proto se v praxi využívá především montáže typu SMT, která je pro strojní pájení vhodná.

1.7 Ruční pájení

Ruční pájení (tedy v celém rozsahu procesu prováděné člověkem) v dnešní době nachází uplatnění hlavně při servisních opravách a při pájení specializovaných dílů (např. konektory). Ruční pájení můžeme dělit na kontaktní pájení, ponorem a pájení přetavením.

Při kontaktním pájení se využívá k přenosu tepla, které je potřebné k roztavení pájky, pájedel transformátorových a hrotových. Používá pájek ve formě drátů či trubiček. Využívá se hlavně pro pájení součástek s drátovými vývody (THT).

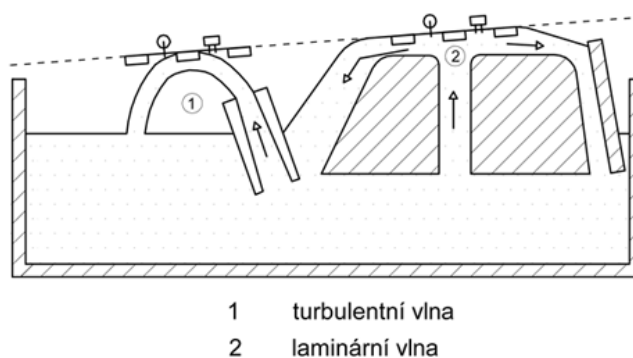
Speciální aplikací v rámci kontaktního ručního pájení i v rámci celého oboru pájení je technologie *pájení ultrazvukem*. Ta využívá upravená hrotová pájedla, která přenáší jak tepelnou energii, tak ultrazvukové vlny. Ty působí na povrchu substrátu deoxidačními účinky (proto není třeba žádných tavidel) a zároveň zajistí zatečení roztavené pájky do mikro-pórů substrátu. Využívá se efektu kavitace – mezi substrátem a pájkou vznikají díky ultrazvukovým vlnám kavity, malé vzduchové bublinky. Následkem atmosférického tlaku praskají a uvolní se tak energie potřebná k vytvoření spoje. Využití této technologie je především při použití pájek kovů, které jsou jinak obtížně pájitelné (například hliník) nebo při pájení na speciální substráty (například na sklo). [20]

Pájení ponorem využívá roztavenou lázeň pájecí slitiny, do které se ponoří jednotlivě každá součástka/vývod. Výhodou je zamezení přístupu vzduchu a možné oxidace. Metoda je to jednoduchá, poskytuje velmi rychlý ohřev a samotné zapájení. Tuto metodu je možné využít i jako podobu strojního pájení, je možné proces automatizovat a pájet více součástek najednou. Ve srovnání s ostatními metodami strojního pájení je však tato metoda pomalá a málo efektivní. [21]

Při ručním pájení přetavením se využívají horkovzdušné či infračervené pájecí stanice. Ty jsou vhodné pro pastovité pájky, naopak se nehodí pro pájky drátové apod. Díky této metodě je možné pájet i malé SMD součástky s mnoha vývody.

1.8 Pájení vlnou

Jde o nejrozšířenější a také historicky první podobu strojního pájení. Osazené desky plošného spoje (v případě THT montáže jsou součástky zajištěny proti vypadnutí předtvarováním vývodů, v případě SMD součástek je nutné tyto přilepit k desce plošného spoje) projíždějí na dopravníku postupně několika sekcemi – v první se nanese tavidlo, druhá slouží jako přehřívací. Poté je DPS dopravena do sekce, kde dojde k zapájení pomocí cínové vlny. Vlny mohou být turbulentní nebo laminární (viz Obrázek 3). Na dně nádrže s roztavenou pájkou je čerpadlo, které žene roztavený kov přes systém clon a štěrbin. Přes vrchol vlny projede dopravník s DPS a smočí vývody součástek. Prázdné otvory v desce se musí zakrýt, aby pájka nenatekla na stranu součástek. Poté už zapájená deska jede do mycí sekce a do zásobníku. [22]



Obrázek 3: Znázornění pájení vlnou (převzato z [22])

1.9 Pájení přetavením

Tato metoda obecně využívá pájek ve formě past. Proces spočívá v nanesení pájecí pasty, osazení součástek a zahřátí celé desky tak, aby došlo k přetavení pájecí pasty a vytvoření pájených spojů. Před přetavením dochází k procesu přehřevu, deska se zahřívá na 150-180 °C. Dochází k vypařování kapalných složek pájecí pasty, mění se viskozita a je zabráněno přístupu vlhkosti z okolí. Aktivují se tavidla – čistí povrch od oxidů a prachu a připravují tak podmínky pro vznik spoje. Využívá se především pro SMT montáž.

Při pájení přetavením se využívá *efektu vystředování* – díky povrchovému napětí pájky dochází k tomu, že i součástky umístěné mírně mimo své pájecí plošky jsou vystředěny na své místo. Je zde však nutný požadavek z hlediska návrhu DPS na stejnou velikost připojovacích plošek, jinak může docházet k tzv. Tombstone efektu (viz kapitola 2.1.3 Tombstone efekt). [1]

1.9.1 Nanášení pájecí pasty

Důležitým technologickým krokem ve výrobě pájených spojů v oblasti pájení přetavením je nanášení pájecí pasty na desku plošných spojů. Mezi kvalitativní parametry patří výška, plocha a objem nanášené pasty, které jsou ovlivněné zvolenou technologií. Využívá se:

- dávkového nanášení pasty pomocí dispenzeru (dávkovače),
- nanášení pasty pomocí šablonového tisku či sítotisku,
- ručního nanášení pasty pomocí jehly.

Dávkové nanášení může být formou ručního nanášení pájecí pasty nebo se jedná o zcela automatické jednotky. Jde se o zařízení, které přesně dávkuje množství nanášené pasty a v některých případech i tvar. Pasta může být nanášena tlakově s definovanou dobou, rotační pumpou, tryskáním kapek elektrickým polem nebo laserem. [1]

Nanášení pájecí pasty přes šablonu je v současnosti nejrozšířenější technologie. Princip spočívá ve fixaci desky, překrytí kovovou šablonou a rozetření pájecí pasty po ploše šablony pomocí stěrky. Tím dosáhneme protlačení pasty na DPS v místech otvorů v šabloně. Následně šablonu rovnoměrně zdvihne. Výhodou této metody je její opakovatelnost, trvanlivost šablony a kvalita tisku, pokud dodržíme správné podmínky tisku. Sleduje se především rychlost pohybu stěrky, tlak a úhel stěrky, správný návrh pájecích plošek (otvorů v šabloně), kvalita šablony a typ pasty. [1]

1.9.2 Pájení konvekcí

První zmiňovanou technologií pro pájení přetavením je pájení v proudu horkého plynu (vzduch, dusík). Využívá se pájecích horkovzdušných průběžných pecí. Osazená deska je dopravníkem posouvána skrz jednotlivé zóny pece (předehřívací, přetavovací, chladicí). Pro ruční pájení existují horkovzdušné stanice (případně horkovzdušné pistole). Výhodou této technologie je nízká cena a dostupnost, nevýhodou pak nerovnoměrný ohřev desky a všeobecně kvalita spojů, které závisí na geometrických a dalších parametrech pece. [23]

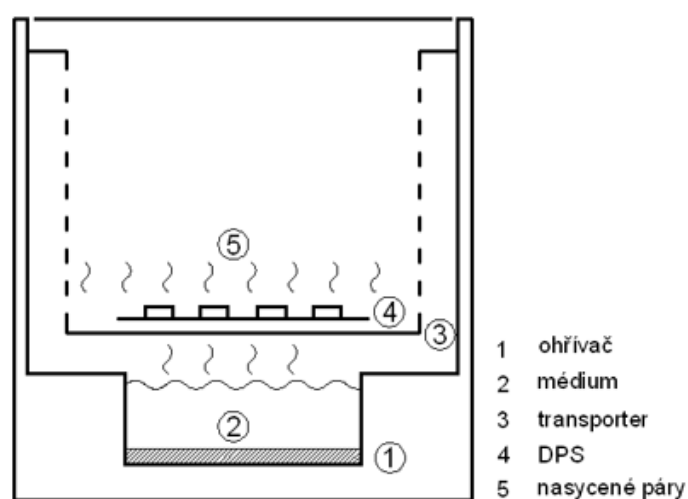
1.9.3 Pájení infračerveným zářením

Další technologií je přenos tepla pomocí radiace. Osazené desky plošných spojů jsou vystaveny proudu fotonů infračerveného spektra. Část záření se odrazí, část se absorbuje a část projde.

Kolik se v daném materiálu (v pájce) absorbuje energie, závisí na absorpčním koeficientu. Ten je určen vlastnostmi povrchu a vlnovou délkou (čím vyšší vlnová délka, tím nižší absorpce energie). Pájka v pájeném spoji je ohřívána nejen přímo absorbovaným zářením, ale také kondukcí tepla od dalších částí desky. To přináší určité problémy, protože více tmavá místa na DPS (například pouzdra integrovaných obvodů, která jsou standardně černá) se zahřívají více a jiná zase méně a dochází tak k nerovnoměrnému ohřevu a možnému zvětšenému teplenému namáhání součástek. Výhodou této metody je velká účinnost. Využívá se opět průběžných pecí, nebo statických IR zářičů. [23]

1.9.4 Pájení v parách

Tato technologie využívá přenosu tepla pomocí kondenzace par na povrchu DPS. Osazená deska se vloží do pracovního prostoru zařízení. Na dně je nádržka s pájecí kapalinou, jejíž teplota varu je přesně definovaná a nemůže se tak stát, že by se během procesu vyskytla v prostoru vyšší teplota. Příkladem pájecí kapaliny může být Galden s teplotou varu 230 °C. Kapalinu zahříváme a její páry stoupají vzhůru směrem k osazené desce, kde kondenzují. Kondenzačním teplem zahřívají pájecí pastu, dochází k přetavení. Díky parám pájecí kapaliny je zde také vytvořena inertní atmosféra zabráňující oxidaci během procesu. Výhodou tohoto procesu je rychlost, efektivnost a homogenní zahřívání osazené desky. Nelze také neúmyslně zničit součástky vyšší teplotou. Dosahuje se precizních výsledků. Nevýhodou je vyšší cena pájecí kapaliny na bázi fluórouhlíků a náchylnost této metody k efektu Tombstone (viz kapitola 2.1.3 Tombstone efekt) kvůli ovlivňování povrchového napětí kondenzovanou pájecí kapalinou. [23]



Obrázek 4: Znárodnění pájení v parách (převzato z [22])

1.9.5 Pájení laserem

Technologie využívající laserového paprsku spadá pod přenos tepla radiací. Pasta je velmi přesně a lokálně přetavena díky programově řízenému laseru. Ohřev bývá krátký, redukuje to tak možnost růstu nechtěných intermetalických vrstev. Povaha technologie jí předurčuje jako zástupce lokálního pájení, tedy pájení spoje po spoji. Zdrojem laserového paprsku mohou být diody, pevnolátkové a plynné lasery. Pájení laserem ukazuje velmi dobré výsledky, je možné dosáhnout vysokých teplot pasty bez ovlivnění zbytku součástky či desky. Využívá se však pouze ve speciálních případech, protože je tato metoda velmi pomalá (po každém zapájeném spoji je nutné laser vypnout a polohovat na jiné místo). [23]

1.9.6 Další metody pájení přetavením

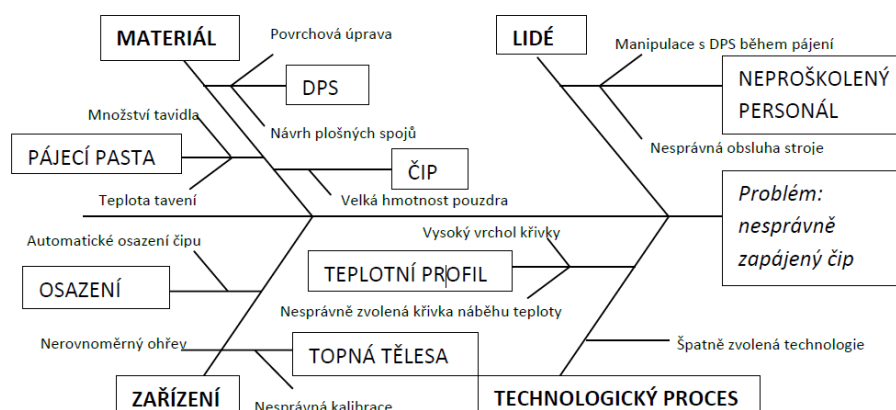
Impulsní odporové pájení využívá nástroj přesně přizpůsobený rozměru a tvaru součástky a je v přímém kontaktu s pájecí pastou. Ohřev probíhá elektrickými impulsy. Svými vlastnostmi se však tato technologie nehodí pro sériovou výrobu, ačkoli je levná a disponuje velmi přesnou regulací teploty.

Pájení kondukcí nebo vedením tepla znamená, že osazená deska je položena na vyhřívanou podložku a postupně dochází nejprve k přehřevu a poté k samotnému přetavení. Tato metoda je vhodná pouze pro relativně malé a jednostranně osazené desky, tím se ale ztrácí výhody povrchové montáže. [1]

2 PROBLÉMY PŘI PÁJENÍ PŘETAVENÍM

Stejně jako každá technologická operace, i pájení má řadu problémů, které se v praxi vyskytují. Chyby, které vznikají, mohou mít kosmetický charakter a nijak ve funkci zařízení nebrání, vyskytuje se však celá řada těch, které buď správnou funkci zařízení zcela znemožní, nebo sníží životnost takového zařízení. Obecně lze chyby charakterizovat dvěma veličinami – výskytem a závažností. Jejich součin pak danou chybu kvalifikuje a lze tak chyby mezi sebou porovnávat.

Chyby, které vznikají při pájení přetavením, mohou vznikat z celé řady příčin. Od nesprávného návrhu desky plošných spojů, nanášení pasty, uskladňování součástek po špatně zvolený teplotní profil nebo technologii. Chyba může být na straně člověka (při manipulaci se součástkami, deskou, stroji) nebo na straně okolního prostředí (vlhkost, teplota, přítomnost nečistot apod.). Při hledání příčiny se využívají nejrůznější nástroje, například myšlenkové mapy nebo Ishikawovy diagramy. [23]



Obrázek 5: Příklad Ishikawova diagramu pro nesprávně zapájený čip (převzato z [23])

2.1 Vybrané chyby u pájení přetavením

V následujících kapitolách se pokusím podat přehled běžných a pro průmysl „zajímavých“ a kritických problémů, které se vyskytují u pájení přetavením. V praxi se může samozřejmě vyskytnout vad mnohem více a určitě by jen výčet a jejich charakteristika vydala na samostatnou práci.

2.1.1 Můstek

Jedním ze základních problémů, který se může vyskytnout nejen u pájení přetavením, je vznik vodivého spojení (zkrat) mezi pájecími ploškami, které jsou oddělené. Chyba tohoto charakteru je

kritická a zařízení pak neplní svoji funkci. Můstek se může vyskytnout mezi sousedními piny BGA (ball grid array – pouzdro s kuličkovými vývody) pouzder i jiných pouzder integrovaných čipů, mezi vývody sousedních součástek pasivních (rezistorů, kapacitorů) nebo dokonce mezi vývody jedné pasivní součástky. Může mít spoustu příčin – nesprávný návrh plošného spoje (součástky jsou umístěné blízko u sebe), nevhodná úprava substrátu, nesprávné nanesení pájecí pasty, velké množství nanesené pasty, nevhodná poloha součástky při pájení vlnou, znečištění pasty, nevhodný teplotní profil, pohyb součástky během procesu, nesmáčení vývodů součástky apod. Jak plyne z tohoto výčtu, nelze dát obecné doporučení pro odstranění tohoto problému, neboť je velmi komplexního charakteru. Je dobré však volit spíše větší rozestupy mezi součástkami a používat vhodné pájecí pasty s doporučeným teplotním profilem. [1], [21], [24]

2.1.2 Chybějící spoj

V podstatě jde o opak předchozí vady – mezi připojovací ploškou a vývodem součástky nedojde ke vzniku vodivého spojení a elektrický obvod je tak otevřený. Z hlediska elektrické funkce má však podobné účinky – často je zařízení nefunkční. Příčinou může být malé množství nanesené pasty, nadzvednutý či ohnutý vývod součástky, nedostatečná rovinnost povrchu substrátu. Pro eliminaci je vhodné a často dostačující zkontrolovat tiskovou šablonu, zda nemá ucpané otvory. [1], [21]

2.1.3 Tombstone efekt

Vada zvaná „efekt náhrobního kamene“ vzniká především u pasivních dvou vývodových součástek (rezistorů, kapacitorů apod.). Dochází k jevu, kdy se součástka na jedné straně zvedne (částečně, nebo úplně) do svislé polohy. Je tak připojena pouze jedním vývodem a opět vzniká přerušené, otevřené spojení, které může mít za následek nefunkční zařízení. Vada vzniká díky rozdílu teplot mezi ploškami nebo rozdílu povrchových napětí. To je způsobeno nevhodným návrhem plošek, které mají různou velikost, nerovnoměrným nanesením pájecí pasty, znečištěním vývodů či plošek. Na tento jev je také citlivá technologie pájení v parách, neboť páry kondenzované pájecí kapaliny mohou mít vliv na povrchové napětí pájky. [1], [21], [9]



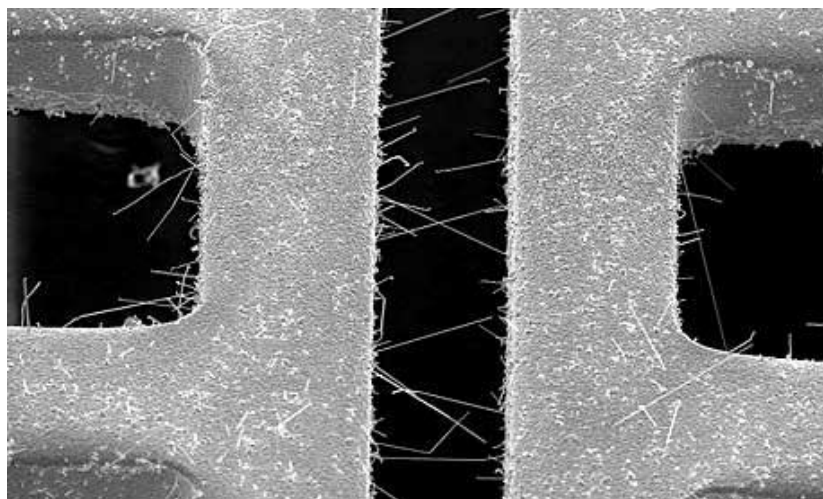
Obrázek 6: Ukázka efektu Tombstone

2.1.4 Popcorn efekt

Při nevhodném skladování součástek dochází u plastových pouzder, především integrovaných obvodů, k absorpci vlhkosti. Ta se během procesu pájení vypařuje a vytváří tak vnitřní pnutí, které může vést k praskání pouzdra. To poškodí součástku či pájený spoj a dochází k delaminaci vrstev uvnitř součástky. Do toho se zapojuje i rozdílný koeficient tepelné roztažnosti jednotlivých vrstev součástky. Tento efekt je možné analyzovat nedestruktivně pomocí metody C-SAM (c-mode scanning acoustic microscopy) nebo destruktivně pomocí metalurgických výbrusů. Je vhodné skladovat citlivé součástky v suchém prostředí, nebo před procesem pájení součástky vysušit. [23], [25]

2.1.5 Whisker

Vodivé, krystalické struktury ve formě tenkých „vlásků“, které vyrůstají z povrchu některých kovů – například kadmium, antimon, zinek a pro oblast pájení nezbytný cín, ale také stříbro či zlato – jsou problémem již od 40. let minulého století. Od té doby bylo předloženo mnoho teorií o jejich vzniku, dodnes však není zcela jasně objasněn princip růstu těchto struktur. Obecně lze říci, že velký vliv na růst whiskeru má mechanické napětí spoje a povrchová oxidová vrstva. Whiskery jsou problémem především z důvodu vzniku možných zkratů mezi vývody součástek. Typicky mají asi 1 μm v průměru a jejich délka bývá okolo 1 mm, byly však pozorovány i větší struktury. O růst whiskerů se odborná veřejnost začala více zajímat také s příchodem bezolovnatých pájek, kde je větší podíl cínu. Spolu s neustálou miniaturizací součástek a zmenšováním vzdáleností mezi vývody a spoji se stává whisker velice aktuálním tématem. [26]



Obrázek 7: Ukázka výskytu whiskerů (převzato z [27])

2.1.6 Dendrit

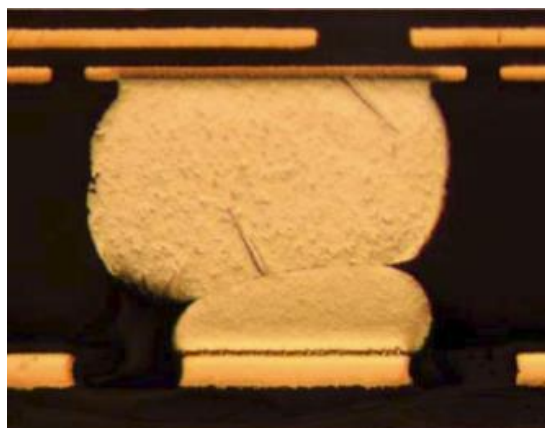
Podobné problémy, které způsobují cínové whiskery, se mohou vyskytnout u struktury, která narůstá po povrchu DPS. Může způsobit zkrat mezi vývody součástek či mezi vodivými spoji. Působí zde mechanismus elektrochemické migrace - díky přiloženému napětí se mohou sousední vývody chovat jako anoda a katoda. Mezi nimi je elektrolyt ve formě vody (kondenzovaná vlhkost) a proto dochází k přesunu iontů. Na povrchu tak vznikají vodivá vlákna ve formě stromečkové či jehličkové struktury. V momentě propojení dvou sousedních plošek dojde většinou k vyhoření dendritu a tak je obtížné poznat příčinu zkratu, který vznikl. Růst dendritů je ovlivněn teplotou, vlhkostí, velikostí přiloženého stejnosměrného napětí, vzdáleností mezi anodou a katodou, výskytem nečistot na povrchu. Je vhodné v případě podmínek pro vznik dendritů provádět kontrolu čistoty povrchu. [28]

2.1.7 Warpage efekt

Zvláště u pouzder s většími rozměry se může projevit rozdíl koeficientů tepelné roztažnosti pouzdra a DPS. Deska se vlivem tepla „natahuje“ více a proto dojde k situaci, kdy se vývody součástky ocitnou nad pájecí ploškou a nemají s ní kontakt. Nedojde tak k vytvoření spoje. U pouzder typu BGA může dojít k jevu Head in Pillow. [23]

2.1.8 Head in Pillow efekt

Jedná se o důsledek Warpage efektu, který se vyskytuje u pouzder BGA. Během procesu pájení nemá kulička pouzdra kontakt s pastou, která je nanášena na připojovací plošku. Pasta je během procesu přetavena, ale nedojde k propojení s kuličkou. Při chladnutí kulička dosedá na přetavenou pastu. Dochází k vytvoření spoje, který projde elektrickým testem, je však značně mechanicky oslaben. Stačí proto mírné tepelné či mechanické namáhání a může dojít k přerušování spoje. [23]



Obrázek 8: Ukázka efektu *Head in Pillow* (převzato z [23])

2.2 Chyby způsobené tavidly

Vzhledem k tématu práce jsem chyby, které vznikají především z důvodu působení tavidel, vyčlenil do samostatné kapitoly. Pokusím se také shrnout dosavadní znalosti, zkušenosti a závěry mých kolegů.

Tavidlo je jednou z nejdůležitějších složek pro vznik kvalitního pájeného spoje. Proto je i jeho použití často spojeno s výskytem opakujících se problémů, které mohou mít kritický charakter.

2.2.1 Oxidace a koroze

Použitím malého množství tavidla nebo tavidla nedostatečně aktivního na vyčištění pájeného povrchu dochází během procesu pájení k oxidaci, což způsobí nesmáčivost pájky a pájený spoj se buď vůbec nevytvoří, nebo nemá požadované kvalitativní parametry. Je nutné proto s ohledem na pájený povrch volit dostatečně aktivní tavidla, která budou plnit svou funkci v procesu pájení.

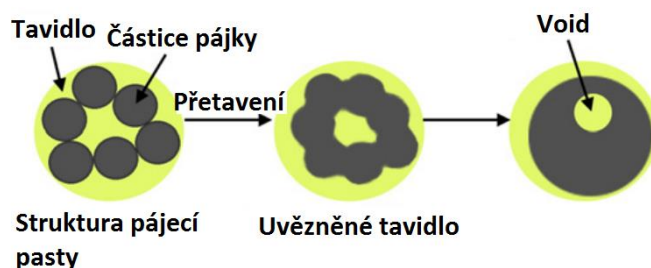
V případě použití tavidel omyvatelných je nutné zapájené desky omýt a odstranit zbytky tavidel. Ty mají totiž korozivní účinky a mohou vytvořené pájené spoje významně oslabit.

2.2.2 Void

Dutinka (void) je nechtěně vzniklý prázdný prostor uvnitř pájeného spoje. Podle velikosti a tvaru rozeznáváme makrovoidy, mikrovoidy, Shrinkage voidy, Micro-Via voidy, Kirkendallové voidy a Pinhole voidy. Makrovoidy a mikrovoidy jsou tvořeny během pájecího procesu díky aktivitě a vypařování tavidel, přičemž hraniční rozměr mezi makro- a mikrovoidy je přibližně 100 μm . [29]

Mechanismus vzniku makro- a mikrovoidů je následující. Během pájecího procesu se některé složky tavidla (rozpouštědlo) uvolňují dříve, než dojde k natavení pájecí pasty, protože jejich teplota

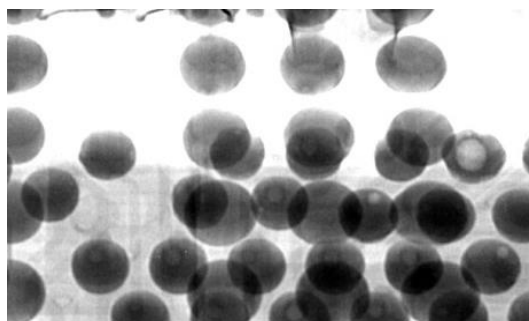
varu je nižší než teplota tavení pájky. Tím vytvářejí uvnitř pasty plynové bublinky. Přírodní kyseliny obsažené v tavidle navíc reagují se zoxidovaným povrchem a vytváří se voda, která dále přispívá k růstu bublinek. Protože se na okrajích pájeného spoje vytváří tenká vrstva oxidů, nedochází k uvolňování těchto bublinek pryč a po zatuhnutí pájky zůstávají ve spoji. Mechanismus je naznačen na následujícím obrázku. [30]



Obrázek 9: Mechanismus vzniku voidu (převzato z [29])

Pájený spoj, u kterého se vyskytnou tyto dutinky, je pak mechanicky oslaben a je větší nebezpečí deformace spoje při zvýšeném namáhání. Je však diskutabilní, od jaké procentuální velikosti dutinek (vzhledem k velikosti spoje) lze považovat tuto vadu za kritickou a ohrožující funkci zařízení.

Dutinky je také obtížné detekovat, používá se kontrola pomocí rentgenu (nedestruktivní metoda testování), případně metoda výbrusu (destruktivní metoda testování). Dutinky vznikají často u pouzder BGA. U těchto pouzder je to o to kritičtější, protože často tvoří páteřní komponentu zařízení (procesor, paměť apod.) a lze je obtížněji opravit, resp. přepájet. Příklad dutinek je na následujícím obrázku, který byl pořízen v rámci mé předchozí bakalářské práce.

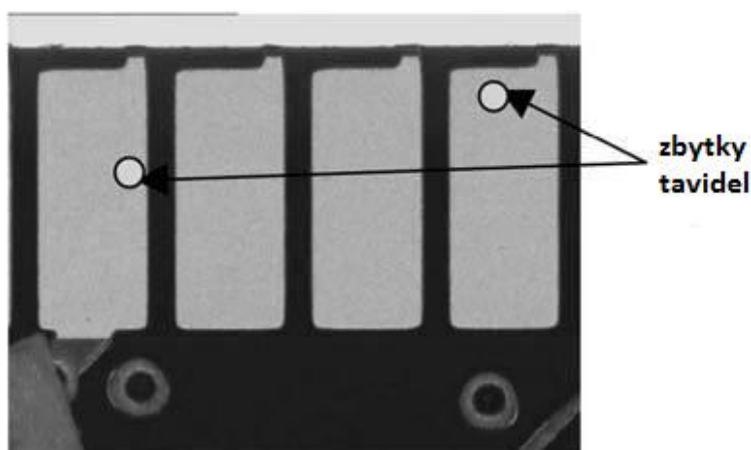


Obrázek 10: Ukázka vzniku voidů u pouzdra BGA (převzato z [23])

Vznik dutinek se dá v praxi omezit vhodnou volbou povrchové úpravy substrátu nebo paradoxně zvýšením obsahu těkavých složek, které vytvoří dostatečný tlak k opuštění spoje. [30]

2.2.3 Rozstříkávání tavidla z pájecí pasty

Jeden z problémů, který se vyskytl v praxi, je nadměrné rozstříkávání tavidla a jeho složek při pájecím procesu po substrátu. Tím může dojít k nechtěným efektům – zbytky tavidel mohou zakrýt testovací kontakty a při elektrickém testování je zapájená deska vyhodnocena negativně, přestože může být zcela funkční. Tavidlo se také například může dostat na připojovací zlaté konektory, kde působí jako izolant a způsobí nedokonalost či nefunkčnost připojení. Dále mohou způsobovat vyšší náchylnost výrobku na vlhkost a korozi. Negativní efekty spojené s rozstříkem tavidla se vyskytují zejména v procesech, které využívají bezoplachových tavidel nebo v procesech s nedokonalým oplachem zapájené desky s použitím tavidel oplachových. [31]



Obrázek 11: Kapky tavidla na zlatých kontaktech (převzato z [31])

Vznik tohoto problému je způsoben hlavně použitím bezolovnatých past, které obsahují velmi aktivní tavidla. [31] Existuje několik názorů na mechanismus tohoto děje – buď jde o přítomnost solventu, který se masivně vyloučí během přetavení (The Solvent-Expulsion Theory), nebo hraje roli i povrchové napětí, které vytváří tlak na uzavřený plyn (tavidlo) uprostřed spoje (The Coalescence Theory). [32]

Kromě chemického složení tavidla a pájecí pasty má vliv na efekt rozstříkávání také okolní vlhkost, která je absorbována pastou před procesem pájení, okolní atmosféra při procesu pájení nebo úprava substrátu, která ovlivňuje povrchové napětí. [33]

Na základě experimentální studie vlivu použití různé pájecí pasty a různého teplotního profilu [31] je doporučováno použití sedlového teplotního profilu s oblastí přetavení o délce 60 – 90 s. Z experimentu, který zkoumal vliv povrchové úpravy [33] zase vyplývá, že minimalizace výskytu tohoto

jevu dosáhneme použitím povrchové úpravy HASL. Co se týče nepájivé masky, je prokázán rozdíl mezi použitím lesklé a matné masky. Ukazuje se, že použití matné masky namísto lesklé výskyt efektu rozstříku tavidla snižuje. [34]

3 NÁVRH EXPERIMENTU

V této diplomové práci se věnuji výše zmíněnému problému s rozstříkovaním tavidla během přetavení pájecí pasty. Pro kvalitativní uchopení problému je nutné navrhnout takový postup, který prověří nejrůznější vlivy a okolnosti vzniku problému. Proto jsou zkoumány různé varianty povrchové úpravy, nepájivé masky a různé pájecí pasty s různým složením tavidla. Výsledkem je studie objasňující vliv těchto úprav substrátu na rozstříkovaní tavidla různých pájecích past.

3.1 Návrh vzorků

Pro účely experimentu jsem navrhl design vzorků, na které se nanese pájecí pasta a dojde k přetavení. První vzorek o rozměrech 8,4 mm x 10,8 mm (viz Obrázek 12) sestává z pájecích plošek pro součástku velikosti 1812. Druhý vzorek o rozměrech 8,4 x 8,4 mm (viz Obrázek 13) sestává pouze z jedné pájecí plošky kulatého tvaru.

Z těchto vzorků byly objednány a vyrobeny následující varianty povrchové úpravy mědi:

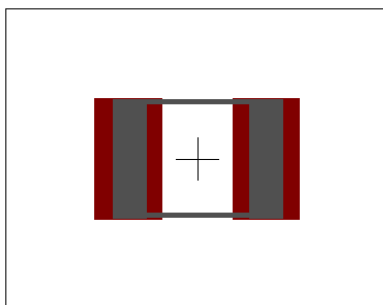
- bez povrchové úpravy mědi
- ošetření pomocí OSP
- povrchová úprava HASL
- povrchová úprava ENIG

A varianty nepájivé masky:

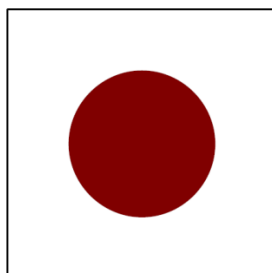
- bez nepájivé masky
- s lesklou nepájivou maskou
- s polo-matnou nepájivou maskou

Protože se nepodařilo objednat všechny výše uvedené varianty od jediného výrobce (hlavně kvůli různým požadavkům na nepájivou masku), byly vzorky objednány od dvou českých předních výrobců DPS.

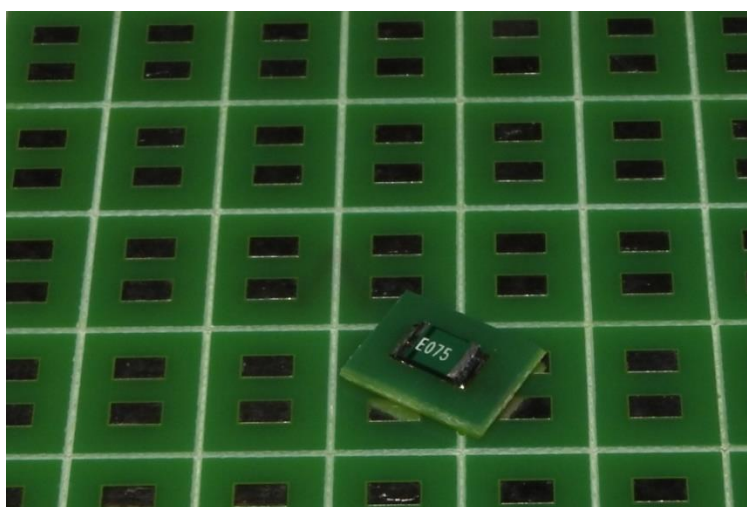
První výrobce dodal varianty s lesklou nepájivou maskou a bez ní, povrchové úpravy všechny. Druhý bohužel nebyl schopen ochrany OSP, proto vzorky s polo-matnou maskou nebudou testovány s touto ochranou.



Obrázek 12: Návrh vzorku 1



Obrázek 13: Návrh vzorku 2



Obrázek 14: Hotové vzorky 1 (úprava HAL)

3.2 Návrh postupu experimentu

Vyrobené vzorky je nutné definovaným způsobem zapájet. Na každý vzorek bude nanášena pájecí pasta pomocí šablony. Množství nanášené pasty bude změřeno pomocí mikrovah. Po zapájení vzorku bude přeměřena hmotnost pasty a určen hmotnostní úbytek pasty, respektive tavidla. V případě většího výskytu efektu rozstříku tavidla by hmotnostní úbytek mohl být ukazatelem tohoto efektu.

Důležitou částí bude optická analýza vzorku – vzorek bude společně s okolím vyfocen pomocí fotoaparátu přizpůsobeným pro focení makrosnímků a pomocí počítače proběhne subjektivní analýza počtu kapek mimo vzorek.

Kromě této analýzy bude určena také velikost oblasti, do které se tavidlo na vzorku rozteklo – to nám může dát informaci o vlastnostech povrchu, o povrchovém napětí a jeho vlivu na prskání tavidla.

3.2.1 Původní návrh postupu experimentu

Původní myšlenka byla využít stávající přípravek z minulých let od kolegů, kteří rozstřík tavidla testovali.

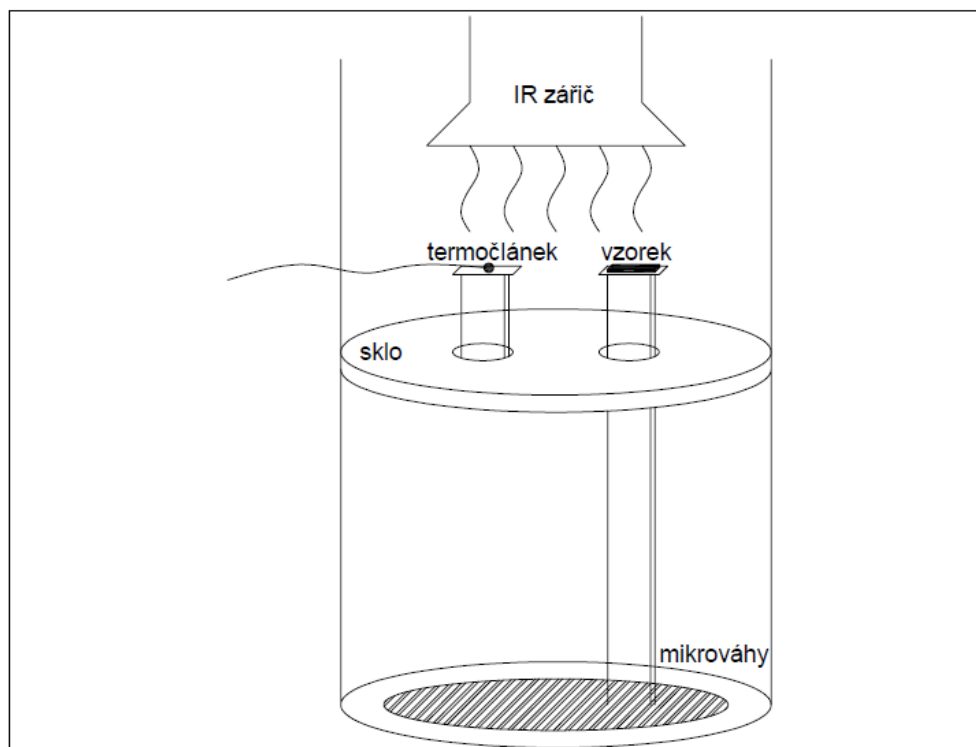
Celý proces přetavení proběhne přímo v přípravku s mikrováhami a bude možné sledovat hmotnostní úbytek v reálném čase. Mikrováhy budou měřit pouze hmotnost vzorku, zbytek přípravku bude spojen s kovovým šasi ve formě válce. Vedle vzorku bude druhý s připájeným termočlánkem, který bude sloužit ke kontrole teploty během procesu a k optimalizaci teplotního profilu.

Pro účely subjektivní optické analýzy bude vzorek umístěn nad skleněnou podložkou (se dvěma otvory – pro vzorek a termočlánek), která bude kapky tavidla zachytávat.

K přetavení použijeme infračervený zářič od firmy TORNADO. Ten umožňuje pouze kontrolu výkonu zářiče, jeho spuštění a vypnutí je nutné ručně.

Návrh experimentu v krocích:

- nanesení pájecí pasty na vzorek pomocí šablony,
- umístění vzorku na mikrováhy,
- spuštění záznamu hmotnosti,
- spuštění záznamu teploty,
- spuštění infračerveného zářiče,
- podle typu použité pasty včasné vypnutí infračerveného zářiče (sledujeme průběh teploty na obrazovce),
- po dokončení procesu pájení odečtení hmotnostního úbytku, subjektivní optická analýza rozstříku tavidla na skleněné podložce a měření plochy roztečení tavidla na vzorku.



Obrázek 15: Schéma původního přípravku

Bohužel při ověřování tohoto postupu experimentu jsem zjistil, že není možné v reálném čase sledovat hmotnostní úbytek vzorku díky vlastnostem použitých mikrováh. Ty mají zabudované teplotní čidlo pro kompenzaci měření hmotnosti a nepodařilo se jej vyřadit z činnosti.

Dalším nedostatkem tohoto postupu je nedodržení stejných podmínek pokusu pro všechny vzorky díky ručnímu ovládání infračerveného zářiče. Proto byl umístěn vedle vzorku termočlánek, ale i s ním by byla interpretace výsledků s různými teplotními profily velice obtížná.

Dále jsem zjistil, že množství nanesené pasty na jediný vzorek nestačí ve většině případů k pozorovatelným výsledkům, které by se daly interpretovat pomocí subjektivní optické analýzy. Zvláště u vzorku 1, který se sice má blížit nejvíce k podmínkám v běžné elektrotechnické praxi, použitá šablona je však tenká a nanesené množství tak malé, že rozstřík tavidla nebyl pozorován.

3.2.2 Nový návrh postupu experimentu

Díky výše uvedeným skutečnostem jsem zvolil jiný, nový postup experimentu.

Vyřadil jsem vzorky s označením 1 s připojovacími ploškami pro SMD součástku velikosti 1812. Vzorky s označením 2 (kruhové plošky o velikosti $14,9 \text{ mm}^2$) jsem sdužil po čtyřech (vzorky byly od výrobce oddělené pouze drážkováním, bylo tedy možné vzorky „nalámat“ i po více kusech).

Také nebylo nutné provádět experiment v kovovém přípravku s váhami. Rozhodl jsem se proto experiment provádět v průběžné peci. To zajistí stálé podmínky (především teplotní profil) pro všechny vzorky. Tím pádem není nutné společně s každým vzorkem nechávat projít teplotním cyklem termočlánku, ale stačí teplotní profil nastavit na průběžné peci a jeho skutečný průběh poté zkontrolovat pomocí profilometru.

Vzorky (nyní v podobě 4 původních vzorků) jsem se rozhodl umístit ve skleněné misce z laboratorního skla, které by mělo vydržet teploty vyskytující se v průběžné peci.

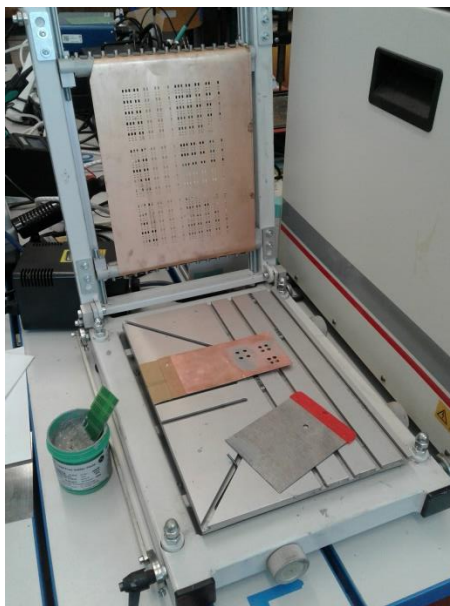
Návrh nového experimentu v krocích:

- zvážit samotný vzorek,
- pomocí šablony nanést pájecí pastu,
- zvážit vzorek s nanesenou pájecí pastou,
- umístit vzorek do středu skleněné misky a nechat ho přetavit v průběžné peci,
- umístit skleněnou podložku na bílý podklad a pořídit snímek pro účely subjektivní optické analýzy,
- zvážit vzorek po přetavení,
- pomocí mikroskopu pořídit snímek vzorku vhodný pro určení plochy roztečení tavidla,
- řádně vyčistit skleněnou misku pro další experiment.

3.3 Použité pomůcky a zařízení

Pro nanášení pasty na vzorek bylo nutné šablonu vyrobit svépomocí za použití kusu měděného, asi 0,6 mm tlustého plechu a frézky o průměru 4 mm. Byly vyrobeny otvory s různou roztečí kvůli rozdílnému drážkování mezi vzorky od jednotlivých výrobců.

Pro uchycení vzorků bylo využito zařízení pro šablonový tisk SAB 06 od firmy ELPRO. Vrchní část, kde se upíná šablona, byla odklopena, na pracovní plochu byla z jedné strany nalepena vyrobená šablona. Vzorek byl vždy zafixován pomocí upínáčků, které bylo možné polohovat v drážkách. Nevýhodou této metody nanášení pasty byla určitá nerovnoměrnost nanášení na jednotlivé vzorky, které bylo způsobeno nevhodným zvedáním šablony (odklopením). Zařízení SAB 06 má systém zvednutí šablony rovnoměrně od desky, to zde však nešlo využít, protože jsme šablonu neměli upevněnou ve vrchní části.



Obrázek 16: Pracoviště pro nanášení pasty

Pro přesné vážení jsem využil vah řady AG od firmy METTLER TOLEDO, konkrétně typ AG245. Vyznačují se kompaktní konstrukcí s krytem proti průvanu ve vážicí komoře a automatickou kalibrací interním závažím. Váhy je možné je připojit k PC a sledovat online průběh měření. Odčitelnost těchto vah je 0,1 mg, opakovatelnost měření 0,1 mg, linearita měření $\pm 0,2$ mg (pro hrubší rozsah, který jsem použil). [35]



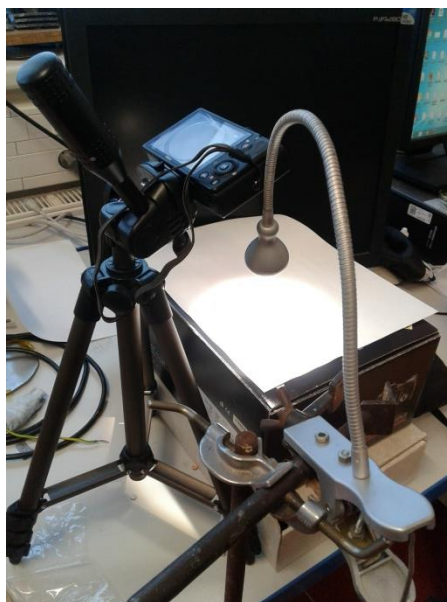
Obrázek 17: Měřicí váhy METTLER TOLEDO AG245

Pro proces přetavení jsem využil průběžnou horkovzdušnou pec Mistral 260. Ta disponuje dvěma předehřívacími zónami a zónou pro přetavení, kde lze dosáhnout teploty až 300 °C. Jmenovitý příkon je 3,65 kW, rychlost dopravníku 15-60 cm/min při délce pece 1540 mm. Je vybavena dotykovým displejem pro ovládání teplot jednotlivých zón a rychlosti dopravníku. [36]



Obrázek 18: Průběžná pájecí pec Mistral 260

Pro subjektivní optickou analýzu počtu kapek na skleněné misce jsem využil digitální kompaktní fotoaparát Nikon Coolpix P330, který z dostupných zařízení vyhověl nejlépe z hlediska pořizování makro-snímků. K fotoaparátu bylo nutné využít stativ a podložka pod vzorek tak, aby byl od objektivu fotoaparátu vzdálen na cca 10 cm. Jako světlo jsem použil malou LED lampičku.



Obrázek 19: Pracoviště pro optickou analýzu

Pro pořízení snímků jednotlivých vzorků pro účely analýzy roztékavosti tavidla jsem využil mikroskop Olympus SZX7. Ten umožňuje optické zvětšení 8-krát až 56-krát při použití objektivu

Olympus DF PLAPO 1X. K němu byl připojen fotoaparát Olympus E-330, pomocí USB kabelu pak komunikoval mikroskop s PC a bylo tak možné přímo pořizovat snímky. [37]



Obrázek 20: Mikroskop Olympus SZX7

Pro subjektivní optickou analýzu počtu kapek jsem využil softwarový nástroj firmy COREL, konkrétně Corel PhotoPaint X6, který je součástí balíku CorelDraw Graphics Suite X6. Tento program je určen pro detailní úpravu fotografií, pro potřeby experimentu bylo důležité jednoduché vkládání objektů do fotografie.

Pro analýzu roztekání tavidla jsem využil softwarový nástroj NIS Elements od firmy NIKON, který je určen pro vědecké účely pro nejrůznější měření snímků pořízených mikroskopem. Na něm jsem ocenil opět jednoduchost měření plochy na importovaném obrázku.

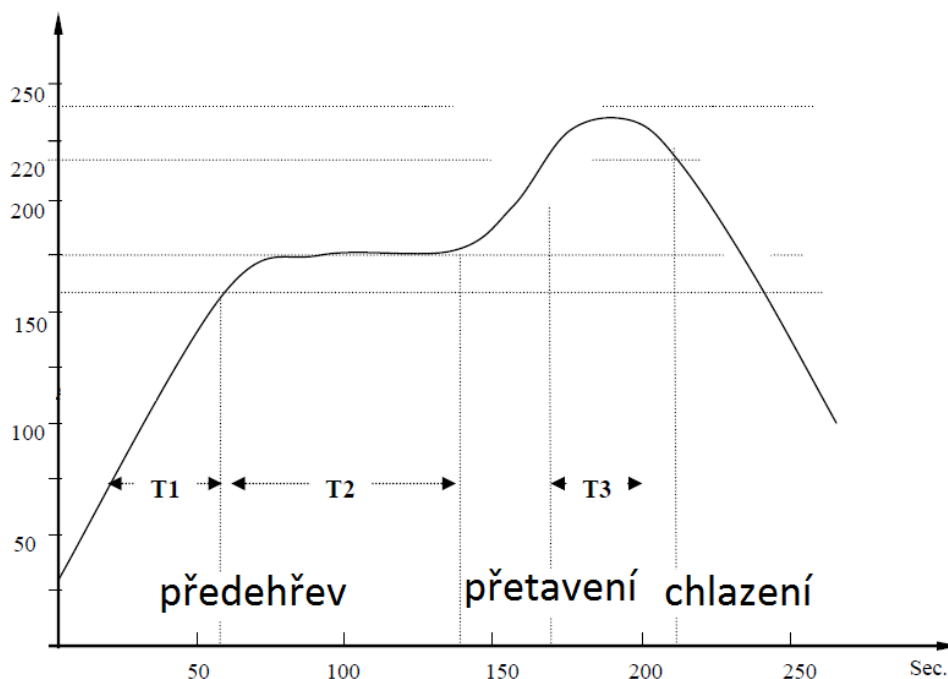
3.4 Použité pájecí pasty

Před samotným experimentem bylo nutné rozhodnout, s jakým typem pasty bude experiment proveden. Bylo vhodné, aby vybraná pasta byla bezolovnatá, běžně používaná v elektrotechnické praxi, zároveň však aby vykazovala relativně vysokou míru rozstříku tavidla. Na základě několika pokusných experimentů jsem se rozhodl pro pastu PF606-P a PF606-P30 od firmy Schenmao.

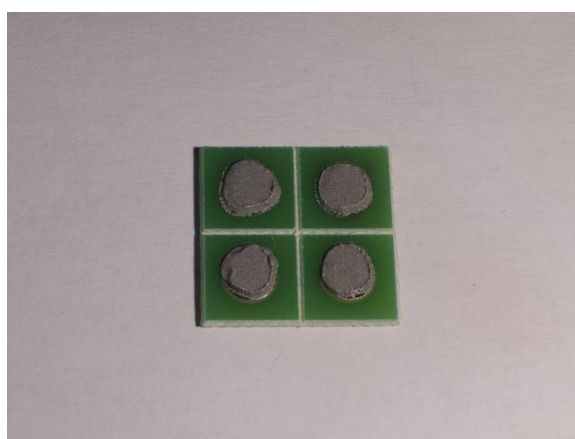
Obě pasty mají identické složení, co se týče použité pájecí slitiny. Jedná se o pájku typu SAC305, tedy obsah cínu 96,5 %, obsah stříbra 3 % a obsah mědi 0,55 %. Pájky se od sebe liší použitým tavidlem – PF606-P má 11,5 % tavidla typu ROL1, PF606-P30 má 11,5 % tavidla typu ROL0. To jsou dle standardu J-STD-004 mírně aktivovaná tavidla z přírodní pryskyřice, ROL0 pak prakticky bez přítomnosti halogenů, ROL1 s mírným podílem halogenů.

Vzhledem k typu použitých past lze tak sledovat rozdíl mezi použitými tavidly a vlivu typu tavidla na rozstřík, roztékání a hmotnostní úbytek.

Teplotní profil těchto past je sedlový s maximální teplotou mezi 230 a 250 °C. [38]



Obrázek 21: Teplotní profil pájecí pasty PF606-P (převzato z [38])



Obrázek 22: Nanesená pasta na vzorek 2

3.5 Zvolený teplotní profil

Na základě konzultace s vedoucím práce byl zvolen teplotní profil průběžné pece tak, aby co nejpravděpodobněji došlo k efektu rozstříku tavidla z pájecí pasty. Nastavil jsem tedy pec s vysokým

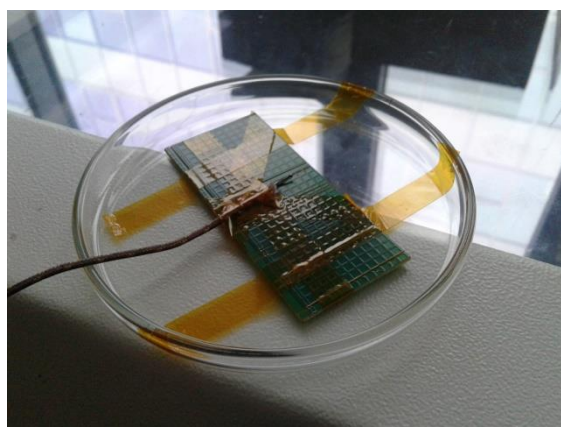
teplotním gradientem mezi zónou předehřevu (2. zóna) a zónou přetavení (3. zóna). Celkové nastavení pece bylo:

- Preheat 1: 50 °C (skutečná hodnota cca 116 °C),
- Preheat 2: 180 °C (skutečná hodnota cca 188 °C),
- Reflow: 290 °C (skutečná hodnota cca 291 °C).

Takto vysoko nastavená teplota v poslední zóně byla nezbytná, neboť se jedná o pec se spodním ohřevem a vzorek, který je posílán dopravníkem skrz pec, je krytý skleněnou miskou, ve které je umístěn. Na samotném vzorku je proto teplota v bodě přetavení až o 50 °C nižší, jak nám ukazuje naměřený teplotní profil.



Obrázek 23: Graf naměřeného teplotního profilu v průběžné pájecí peci Mistral



Obrázek 24: Termočlánek pro měření teplotního profilu uchycený na skleněné podložce

3.6 Statistické metody zpracování dat

V tomto experimentu budou zaznamenána a zpracována následující data o vzorcích:

- hmotnostní úbytek tavidla,
- počet „vyprsknutých“ kapek tavidla,
- plocha roztečení tavidla.

Protože se jedná o měření fyzikálních veličin, je nutné provést měření několik pro každý typ vzorku a následně zpracovat tato data do vypovídající podoby.

Základním statistickým nástrojem bude aritmetický průměr hodnot. Ten se vypočte podle vzorce:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k \quad (6)$$

kde \bar{x} je aritmetický průměr, n je počet měření, x_k je hodnota k -tého měření. Protože tento aritmetický průměr děláme pouze z náhodně uskutečněných experimentů, bude jeho hodnota pro každý měřený soubor jiná. Průměr je tedy počítán z jakéhosi výběru možných hodnot, proto mu říkáme *výběrový průměr*. [39]

Výběrový průměr nám dá sice informaci o nejpravděpodobnějším výsledku měření, neříká nám však nic o přesnosti měření. Takovou informaci nám může dát *výběrová směrodatná odchylka jednoho měření*:

$$s = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{k=1}^n (\bar{x} - x_k)^2} \quad (7)$$

kde s je výběrová směrodatná odchylka, n je počet měření, \bar{x} je aritmetický průměr, x_k je hodnota k -tého měření. Případně *výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru*:

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

kde s je výběrová směrodatná odchylka, n je počet měření a $s_{\bar{x}}$ je výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru. [39]

Pro porovnání jednotlivých souborů vzorků je vhodné převést směrodatnou odchylku na *variační koeficient*, který je vyjádřen procentuálním podílem směrodatné odchylky na aritmetickém průměru. Obecně platí, že soubor měření s variačním koeficientem větším než 50 % nemá statisticky vypovídající výsledek. [40]

Dále pro vypovídající výsledky je vhodné, aby počet měření byl minimálně $n > 5$, naopak příliš mnoho měření je z hlediska statistiky málo efektivní. [39]

Z hlediska náhodných chyb jsem se dále rozhodl zpřesnit měření vyřazením extrémních hodnot ze souboru měření (největší a nejmenší hodnota).

4 OVĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V rámci diplomové práce jsem navržený experiment též provedl s dostupným souborem vzorků. Následuje zhodnocení naměřených výsledků experimentu a zhodnocení vlivu povrchové úpravy, nepájivé masky a typu tavidla na efekt rozstříkování tavidla z pájecí pasty.

4.1 Počet a typy vzorků

Na základě rozhodnutí „lámat“ jednotlivé vzorky po 4 kusech kvůli výraznějšímu efektu rozstříku došlo však také k tomu, že výsledný počet všech vzorků je 4 -krát nižší. Pro pastu PF606-P, kterou jsem odhadem vyhodnotil jako agresivnější, co se týče použitého tavidla, jsem z celkových 6 vzorků pro každou variantu vybral 4, pro pastu PF606-P30 pak zbývající 2 vzorky. Více vzorků se bohužel v termínu dokončení této diplomové práce nepodařilo objednat.

Vzhledem k tomu, že varianta ochrany pomocí OSP byla dostupná pouze u jediné varianty nepájivé masky, vyloučil jsem tuto úpravu z detailnějšího rozboru výsledků a není uvedena v žádném z grafů.

4.2 Vyhodnocení hmotnostního úbytku tavidla

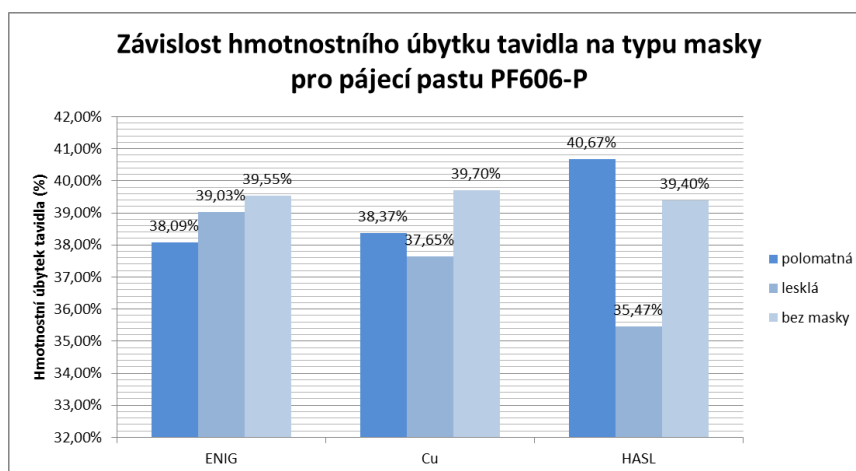
V části experimentu, kde jsem zkoumal hmotnostní úbytek tavidla při procesu přetavení, jsem měl k dispozici 4 hodnoty pro každou variantu vzorku z hlediska povrchové úpravy a nepájivé masky pro pastu PF606-P a 2 hodnoty pro pastu PF606-P30. Z tohoto souboru hodnot jsem nevyřazoval extrémní hodnoty. Vypočetl jsem aritmetický průměr pro každou variantu a variační koeficient pro analýzu věrohodnosti měření.

Tabulka 2: Výsledky analýzy hmotnostního úbytku

MĚŘENÍ HMOTNOSTNÍHO ÚBYTKU															
Vzorek					Naměřené hodnoty										
Povrchová úprava	Nepájivá maska	Pasta	Složení pasty	Typ tavidla	m_v (g)	m_{vp} (g)	m_p (g)	m_T (g)	m_{p2} (g)	$m_{\Delta p}$ (g)	$m_{\Delta p\%}$ (%)	$m_{\Delta T}$ (g)	$m_{\Delta T\%}$ (%)	σ_T (g)	v_T (%)
ENIG	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,977	1,177	0,200	0,023	1,169	0,009	4,38%	0,009	38,09%	0,0003	3,53%
Cu	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,979	1,163	0,184	0,021	1,155	0,008	4,41%	0,008	38,37%	0,0007	9,02%
HASL	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,977	1,180	0,204	0,023	1,171	0,010	4,68%	0,010	40,67%	0,0004	4,32%
ENIG	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,812	1,006	0,195	0,022	0,998	0,009	4,49%	0,009	39,03%	0,0011	12,68%
Cu	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,785	0,969	0,183	0,021	0,961	0,008	4,33%	0,008	37,65%	0,0006	7,80%
OSP	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,786	0,982	0,195	0,022	0,973	0,009	4,40%	0,009	38,23%	0,0005	6,20%
HASL	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,793	0,975	0,182	0,021	0,968	0,008	4,08%	0,008	35,47%	0,0022	29,77%
ENIG	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,776	1,000	0,224	0,026	0,989	0,010	4,55%	0,010	39,55%	0,0007	6,94%
Cu	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,773	0,979	0,206	0,024	0,970	0,009	4,57%	0,009	39,70%	0,0006	6,62%
HASL	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	0,784	1,005	0,220	0,025	0,995	0,010	4,53%	0,010	39,40%	0,0002	1,74%
Cu	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,784	0,971	0,188	0,022	0,959	0,012	6,43%	0,012	55,90%	0,0002	1,76%
ENIG	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,976	1,171	0,195	0,022	1,158	0,013	6,68%	0,013	58,11%	0,0006	4,88%
Cu	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,981	1,166	0,185	0,021	1,154	0,012	6,48%	0,012	56,37%	0,0003	2,36%
HASL	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,976	1,161	0,185	0,021	1,149	0,012	6,51%	0,012	56,63%	0,0006	5,28%
ENIG	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,820	1,001	0,181	0,021	0,989	0,012	6,46%	0,012	56,18%	0,0003	2,42%
OSP	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,784	0,970	0,186	0,021	0,958	0,012	6,40%	0,012	55,65%	0,0000	0,00%
HASL	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,797	0,985	0,188	0,022	0,974	0,011	6,03%	0,011	52,46%	0,0009	8,10%
ENIG	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,776	0,955	0,179	0,021	0,945	0,011	5,86%	0,011	50,98%	0,0001	1,35%
Cu	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,769	0,956	0,187	0,022	0,945	0,011	5,82%	0,011	50,64%	0,0007	6,49%
HASL	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROL0	0,781	0,970	0,189	0,022	0,958	0,012	6,41%	0,012	55,75%	0,0004	3,51%

m_v - hmotnost vzorku bez pasty; m_{vp} - hmotnost vzorku s nanesenou pastou; m_p - hmotnost pasty; m_T - hmotnost tavidla; m_{p2} - hmotnost pasty po přetavení; $m_{\Delta p}$ - rozdíl hmotnosti pasty; $m_{\Delta T}$ - rozdíl hmotnosti tavidla; $m_{\Delta T\%}$ - procentuální úbytek tavidla; σ_T - výběrová směrodatná odchylka úbytku tavidla; v_T - variační koeficient úbytku tavidla

Jak můžeme z uvedené tabulky vyčíst, hmotnostní úbytek tavidla (jehož podíl na celkové hmotnosti pasty je 11,5 %) je pro pastu PF606-P jasně nižší (cca 39 % v průměru pro všechny varianty) než pro pastu PF606-P30 (cca 54 % v průměru pro všechny varianty). Bez přítomnosti halogenů v pastě se tak zřejmě odpařuje či se rozstříkne během procesu více tavidla, než u tavidel s přítomností halogenů. Agresivnější tavidla s halogeny jako aktivátory odstraňují lépe povrchové nečistoty a oxidy, efektivněji zmenšují povrchové napětí a tak se pájka a také tavidlo snadněji rozteče a neuvolní se v podobě výparů tolik, jako tavidlo bez halogenů. Napovídalo by to tedy tomu, že tento druh tavidla bude příznivější i z hlediska rozstříku tavidla.



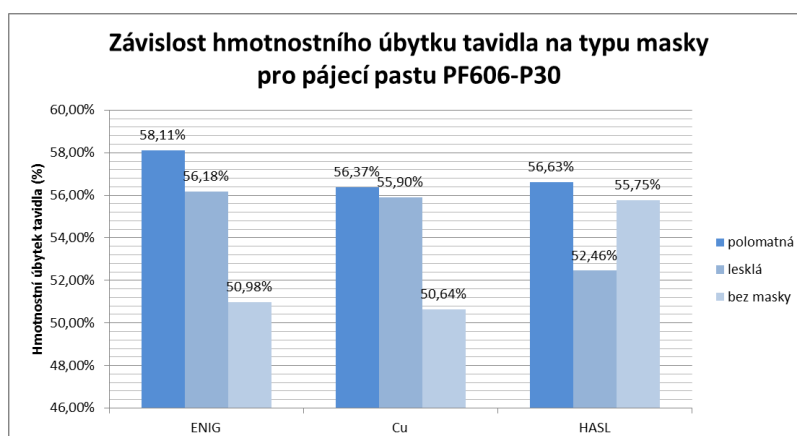
Obrázek 25: Graf výsledků analýzy hmotnostního úbytku pro pastu PF606-P

Z grafu pro závislost hmotnostního úbytku tavidla na typu masky a povrchové úpravě pro pastu PF606-P můžeme vidět, že záleží na každé kombinaci jak povrchové úpravy, tak nepájivé masky.

Například pro polo-matnou masku můžeme vidět, že nejmenší hmotnostní úbytek nastal u úpravy ENIG, nejvyšší pak u úpravy HASL. Přesně naopak tomu je u lesklé nepájivé masky, u které nastal největší hmotnostní úbytek pro úpravu ENIG a nejmenší u úpravy HASL. Pro vzorky bez nepájivé masky vycházely hodnoty prakticky stejné a tedy nezávisle na povrchové úpravě.

Zaměříme-li se na jednotlivé povrchové úpravy, tak vidíme, že úpravy Cu a HASL vykazují podobnou závislost na typu nepájivé masky, tedy v případě lesklé masky nastal menší hmotnostní úbytek. Naopak je tomu u úpravy ENIG.

Největší úbytek nastal pro úpravu HASL a polo-matnou masku (cca 41 %), naopak „nejlepší“ výsledek byl pozorován u kombinace HASL a lesklá maska (cca 35 %).



Obrázek 26: Graf výsledků analýzy hmotnostního úbytku pro pastu PF606-P30

Z grafu pro pastu PF606-P30 můžeme pozorovat mnohem jasněji než v předchozím případě závislost hmotnostního úbytku na typu nepájivé masky – ve všech případech povrchových ochrann dopadla „nejlépe“ lesklá maska, hůře polo-matná. Bez nepájivé masky byl hmotnostní úbytek jasně nižší u variant ENIG a Cu než u lesklé masky, naopak u úpravy HASL o něco vyšší než u lesklé masky.

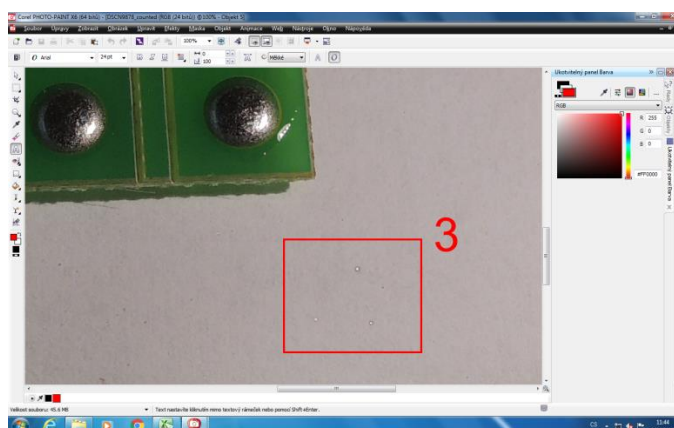
Pokud by se potvrdil původní předpoklad, tedy souvislost většího hmotnostního úbytku s vyšším výskytem efektu rozstříkování tavidla, mohu předběžně prohlásit, že „nejhůře“ dopadá varianta s pastou PF606-P30 (s tavidlem bez obsahu halogenů), dále varianta s polo-matnou maskou nebo varianta s povrchovou úpravou ENIG.

Variační koeficient se u obou past pohyboval řádu jednotek procent, považují tedy měření za vypovídající (u pasty PF606-P byl variační koeficient cca 8 % v průměru pro všechny varianty, u PF606-P30 dokonce ještě méně, cca 3 %, navzdory menšímu počtu zkoumaných vzorků). Přesto vzhledem k počtu vzorků, který byl $n < 5$ pro všechny varianty, by bylo vhodné vzhledem ke statistické věrohodnosti a eliminaci náhodných chyb provést experiment s větším počtem vzorků.

4.3 Vyhodnocení optické analýzy

V stěžejní části experimentu, kde jsem přímo studoval výskyt efektu rozstříkávání tavidla z pájecí pasty, jsem měl k dispozici opět jen 4 hodnoty pro varianty s pastou PF606-P a 2 hodnoty pro varianty s pastou PF606-P30. Proto jsem nevyřazoval extrémní hodnoty ze souboru. Vypočetl jsem aritmetický průměr a variační koeficient pro každou variantu.

Počty kapek jsem určoval z celé plochy skleněné podložky. V rámci přehlednosti jsem v programu Corel PhotoPAINT X6 u každého vzorku označoval tři a více kapek u sebe červeným obdélníčkem s číslem při větším přiblížení. Následně jsem při náhledu celého obrázku sečetl jednotlivé dílčí výpočty u obdélníčků.



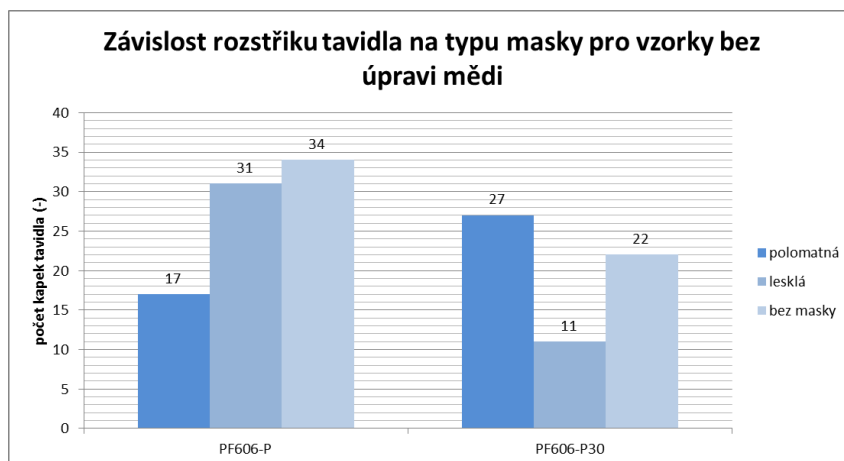
Obrázek 27: Práce se softwarem Corel

Tabulka 3: Výsledky optické analýzy

OPTICKÁ ANALÝZA							
Vzorek					Naměřené hodnoty		
Povrchová úprava	Nepájivá maska	Pasta	Složení pasty	Typ tavidla	N_{kap} (-)	σ_{kap} (-)	v_{kap} (%)
ENIG	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	14	7,8	55,71%
Cu	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	17	7,8	45,88%
HASL	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	34	8,2	24,12%
ENIG	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	13	4,1	31,54%
Cu	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	31	3,7	11,94%
OSP	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	32	29,3	91,56%
HASL	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	18	9,2	51,11%
ENIG	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	22	14,6	66,36%
Cu	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	34	13,1	38,53%
HASL	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	38	16,1	42,37%
Cu	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	11	0,5	4,55%
ENIG	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	34	1,5	4,41%
Cu	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	27	5,0	18,52%
HASL	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	27	4,5	16,67%
ENIG	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	25	1,5	6,00%
OSP	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	5	2,5	50,00%
HASL	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	9	0,5	5,56%
ENIG	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	11	0,0	0,00%
Cu	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	22	3,5	15,91%
HASL	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	21	5,0	23,81%

N_{kap} - počet kapek na skleněné podložce; σ_{kap} - výběrová směrodatná odchylka počtu kapek; v_{kap} - variační koeficient počtu kapek

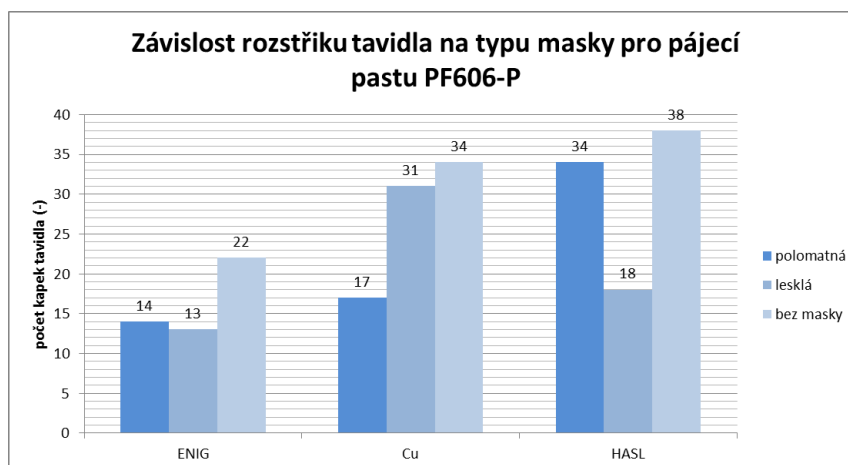
Z tabulky můžeme rovnou vidět, že hodnota variačního koeficientu je mnohem vyšší než v případě měření hmotnostního úbytku. To může vypovídat o značné nahodilosti tohoto děje. Zvlášť je to patrné u pasty PF606-P (s tavidlem obsahující halogeny), kde je to v průměru pro všechny varianty vzorků cca 46 %. U pasty PF606-P30 je to cca 15 %, ačkoli vzorků s touto pastou bylo dvakrát méně.



Obrázek 28: Graf výsledků optické analýzy pro vzorky bez povrchové úpravy

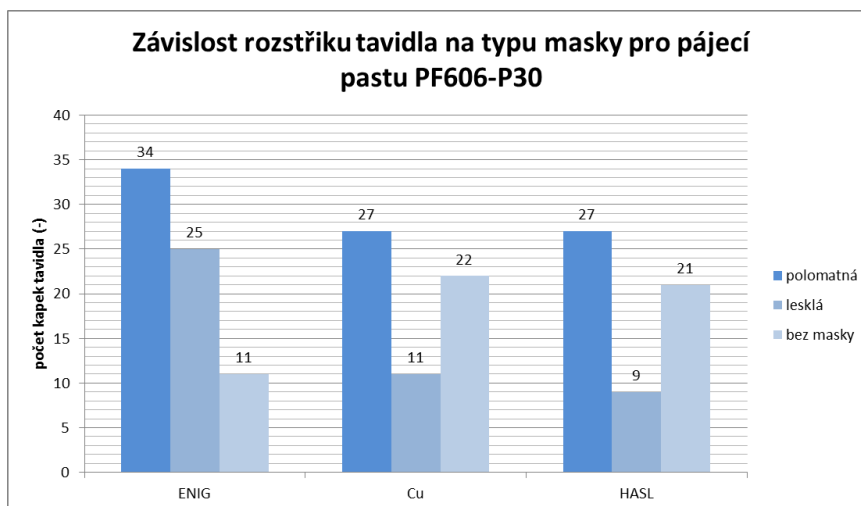
Graf ukazuje detailnější rozdíly mezi pastami z hlediska nepájivé masky, konkrétně v případě vzorků bez povrchové úpravy mědi, protože u té vycházel variační koeficient nejmenší pro všechny druhy masek a past.

V případě pasty PF606-P jsem zaznamenal nejméně kapek tavidla v případě polo-matné masky, nejvíce u vzorku bez nepájivé masky. U pasty PF606-P30 pozoruji závislost opačnou – více kapek jsem zaznamenal u polo-matné masky než u lesklé.



Obrázek 29: Graf výsledků optické analýzy pro pastu PF606-P

Z grafu pro pastu PF606-P pro jednotlivé úpravy a nepájivé masky můžeme opět pozorovat, že záleží na konkrétní kombinaci těchto faktorů. Lze vyčíst, že v průměru dopadla nejhůře povrchová úprava HASL, nejlépe naopak ENIG. Z hlediska nepájivé masky je lepší maska lesklá pro povrchové úpravy ENIG a HASL, pro vzorky bez úpravy mědi naopak polo-matná maska.



Obrázek 30: Graf výsledků optické analýzy pro pastu PF606-P30

V grafu pro pájecí pastu PF606-P30 můžeme pozorovat o něco zřejmější závislost efektu rozstříku na typu nepájivé masky. Ve všech případech použité povrchové úpravy odchází ke snížení efektu rozstříku tavidla, pokud použijeme místo polo-matné nepájivé masky lesklou. Z povrchových úprav je pak na tom nejhůře ENIG v případě obou variant nepájivých masek, v případě vzorku bez nepájivé masky se tato úprava zdá naopak lepší než úprava HASL a vzorky bez povrchové úpravy.

Z těchto výsledků lze vyzorovat, že obecně lepší variantou z hlediska nepájivé masky je použití polo-matné (případně tedy zcela matné) namísto lesklé. Z hlediska povrchové úpravy nelze obecný závěr vyvodit, neboť každá zkoumaná pasta se chovala jinak. Pokud bychom vyloučili z hodnocení z důvodu vysokého variačního koeficientu pastu PF606-P, lze říci, že největší problémy s rozstříkáváním tavidla může mít úprava ENIG, naopak nejlépe se chová úprava HASL.

Díky malému souboru zkoumaných vzorků ($n < 5$) nelze považovat závěry uvedené v předchozích odstavcích za statisticky věrohodné. Bylo by vhodné, aby byl experiment proveden opakovaně s vyšším počtem zkoumaných vzorků.

Také vzhledem k subjektivitě tohoto měření je nutno přistupovat k výsledkům analýzy opatrněji, neboť mohou být zatíženy systematickými (až hrubými) chybami měření. Pro další pokračování v těchto analýzách by bylo vhodné vyvinout softwarový nástroj, který bude analyzovat vzniklé kapky na skleněné podložce automaticky za neustále stejných podmínek. V tomto případě to však převyšuje rámec této diplomové práce.

4.4 Vyhodnocení roztékání tavidla po povrchu vzorku

Pro vyhodnocení poslední analýzy vzorků jsem měl k dispozici 16 hodnot pro každou variantu s pastou PF606-P, 8 hodnot pak pro varianty s pastou PF606-P30. Bylo tedy možné provést eliminaci

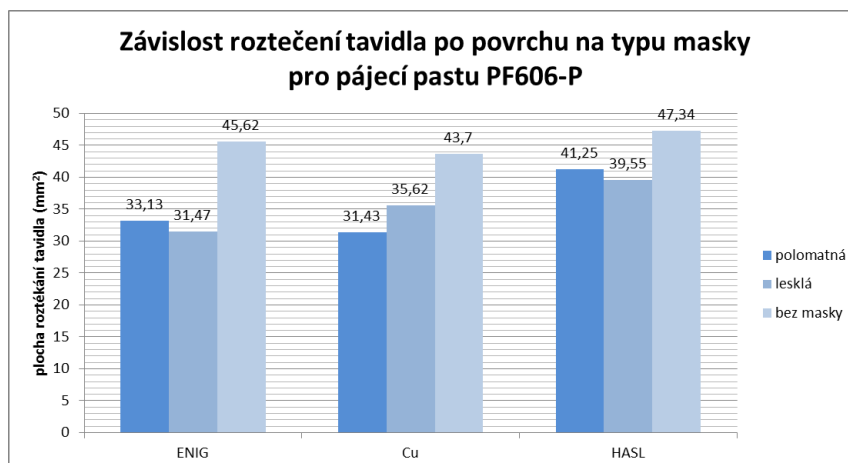
náhodných chyb vyloučením extrémních hodnot ze souboru. Opět jsem vypočetl pro každou variantu aritmetický průměr a variační koeficient.

Tabulka 4: Výsledky analýzy roztečení tavidla

ANALÝZA ROZTÉKÁNÍ TAVIDLA							
Vzorek					Naměřené hodnoty		
Povrchová úprava	Nepájivá maska	Pasta	Složení pasty	Typ tavidla	S_{TAV} (mm ²)	σ_{STAV} (mm ²)	v_{STAV} (%)
ENIG	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	33,13	1,240	3,74%
Cu	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	31,43	1,663	5,29%
HASL	polomatná	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	41,25	1,441	3,49%
ENIG	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	31,47	1,185	3,77%
Cu	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	35,62	1,589	4,46%
OSP	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	33,92	1,771	5,22%
HASL	lesklá	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	39,55	2,686	6,79%
ENIG	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	45,62	2,234	4,90%
Cu	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	43,7	1,580	3,62%
HASL	bez masky	PF606-P	SnAg3.0Cu0.5	ROL1	47,34	1,994	4,21%
Cu	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	38,99	1,562	4,01%
ENIG	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	36,65	0,885	2,41%
Cu	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	33,06	1,051	3,18%
HASL	polomatná	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	41,35	0,799	1,93%
ENIG	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	32,25	0,513	1,59%
OSP	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	35,95	1,017	2,83%
HASL	lesklá	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	42,83	1,696	3,96%
ENIG	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	43,8	0,959	2,19%
Cu	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	42,87	2,157	5,03%
HASL	bez masky	PF606-P30	SnAg3.0Cu0.5	ROLO	52,12	2,748	5,27%

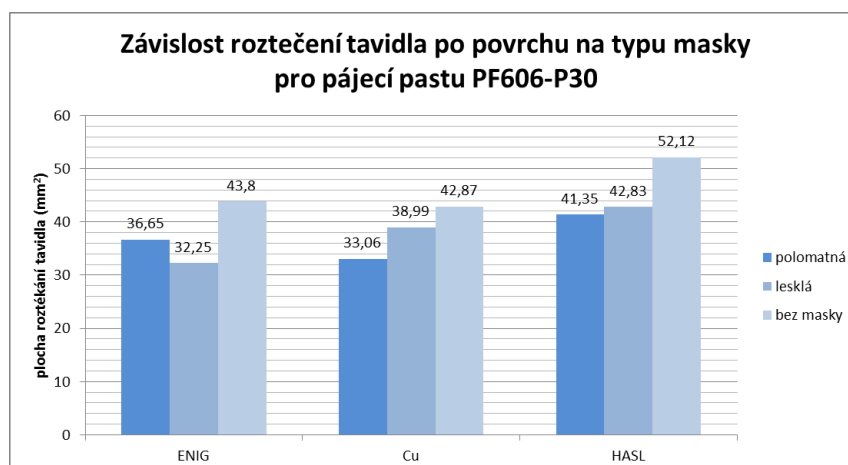
S_{TAV} - plocha roztečení tavidla; σ_{STAV} - výběrová směrodatná odchylka plochy roztečení tavidla; v_{STAV} - variační koeficient plochy roztečení tavidla

Z tabulky můžeme rovnou vyčíst, že variační koeficient je v případě tohoto měření pro všechny vzorky relativně malý, řádově jednotky procent. To je dáno větším počtem vzorků a eliminací extrémních hodnot ze souboru. Toto měření tak považuji za statisticky věrohodné.



Obrázek 31: Graf výsledků analýzy roztečení tavidla pro pastu PF606-P

Z grafu pro pájecí pastu PF606-P můžeme vidět, že největší roztékavost měla úprava bez nepájivé masky, jejíž sloupečky jasně ční nad ostatními u všech tří povrchových úprav. To znamená, že povrch lépe smáčí tekuté tavidlo a povrch těchto vzorků tak měl nejmenší povrchové napětí. Co se týče lesklé a polo-matné nepájivé masky, nelze jednoznačně označit tu, která povrchové napětí snižuje či zvyšuje. Opět tedy může záviset na kombinaci nepájivé masky a povrchové úpravy. Případně lze i polemizovat nad tím, nakolik je lesklá úprava „lesklá“ a zda není svými vlastnostmi podobná úpravě polo-matné.



Obrázek 32: Graf výsledků analýzy roztečení tavidla pro pastu PF606-P30

Na rozdíl od předchozích měření, zde můžeme pozorovat prakticky stejnou závislost roztečení tavidla na kombinaci povrchových úprav jako u pasty PF606-P. Nejmenší povrchové napětí je tedy u varianty bez nepájivé masky.

Obecně lze prohlásit, že největší plochu roztečení tavidla (a nejmenší hodnotu povrchového napětí) měla varianta bez nepájivé masky, z hlediska povrchové úpravy mědi pak varianta HASL. Tyto výsledky příliš nekorespondují s předchozími dvěma analýzami, což přisuzuji hlavně nedostatečně velkému souboru vzorků pro kvalitativní posouzení korelace mezi povrchovým napětím povrchu (resp. míry roztečení tavidla po ploše substrátu) a rozstříkem tavidla z pájecí pasty. Pro toto posouzení by bylo vhodné experiment opakovat s větším souborem vzorků, jak jsem již zmiňoval v předchozích dvou kapitolách.

Pro další provedení experimentu by bylo také vhodné zjistit drsnost povrchů jednotlivých nepájivých masek, abych byl schopen říci, že je skutečně mezi jednotlivými maskami rozdíl. Nyní dle analýzy roztékavosti usuzuji, že oba dva oslovení výrobci používají podobnou nepájivou masku, jak jsem výše naznačil. Vizualně mezi nimi také není patrnější rozdíl.

ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem věnoval pozornost technologii pájení, která je nyní pro moderní svět značně důležitou. S pájenými spoji přicházíme do styku každý den, vyskytují se v každém elektronickém zařízení, bez nichž si život už ani neumíme představit. Proto je nesmírně důležité nezapomínat na problematické aspekty, které tvorbu pájených spojů doprovází a ovlivňují tak kvalitu, spolehlivost a životnost elektronických zařízení.

Zavedením nové legislativy o zákazu používání některých nebezpečných látek v průmyslu včetně olova, které bylo dlouhou dobu hojně používáno v pájecích slitinách pro jeho výhodné vlastnosti, je nutné tuto pozornost zvýšit. Bezolovnaté slitiny mají odlišné vlastnosti a také jejich chování v dlouhodobém měřítku zatím není podrobně prozkoumáno.

Konkrétním zadáním mé práce byl jeden z problematických aspektů, který se v praxi vyskytl – rozstříkovaní tavidla z pájecí pasty během procesu po ploše substrátu. Ten může způsobovat řadu problémů, například nesprávnou identifikaci vadného výrobku či nefunkčnost připojovacích kontaktů.

V teoretické části práce jsem se seznámil s technologií pájení z hlediska jeho fyzikální podstaty, použitých materiálů, různých metod tvorby pájených spojů a problematiky vzniku defektů u pájených spojů. Popsána byla také výroba a materiály desek plošných spojů včetně povrchových úprav.

Poněkud obsírněji jsem se snažil zaměřit na tavidla, která se používají společně s bezolovnatými slitinami a jejich vlastnosti. Zvláštní kapitola byla věnována problematikým aspektům ve výrobě spojených s tavidly, především efektu rozstříkovaní.

V praktické části práce jsem navrhl experiment, který zkoumal závislost mezi povrchovým napětím a výskytem efektu rozstříkovaní tavidla. Bylo nutné původní návrh postupu, který použili mí kolegové, změnit a přizpůsobit konkrétním dostupným prostředkům.

Různou hodnotu povrchového napětí u každého vzorku jsem dosáhl použitím různých úprav základního substrátu – povrchové úpravy mědi HASL, ENIG a OSP a dále lesklé a polo-matné nepájivé masky. V experimentu jsem použil dvě pájecí pasty se shodnou slitinou typu SAC, avšak s rozdílným typem tavidla – ROL0 a ROL1.

Výstupem provedeného experimentu jsou tři analýzy, které hodnotí vlastnosti použitých tavidel z hlediska rozstříkovaní a povrchového napětí.

Analýza hmotnostního úbytku tavidla ukazuje, že je rozdíl mezi použitými tavidly. Tavidlo typu ROL0 vykazuje vyšší hmotnostní úbytek, což by mohlo indikovat také vyšší výskyt efektu

rozstříkování. Co se týče různých úprav substrátu, z této analýzy vyplývá, že záleží na každé použité kombinaci.

Optická analýza rozstříku podává informace přímo o výskytu efektu rozstříkování. Zjistil jsem, že jsou rozdíly jak mezi jednotlivými kombinacemi povrchové úpravy a nepájivé masky, tak mezi tavidly. Pro každé použité tavidlo vyšla závislost na úpravě povrchu jinak. To si vysvětlují hlavně nedostatečným počtem zkoumaných vzorků a tedy statisticky nevěrohodným souborem dat. Pokud bychom brali v potaz pouze tavidlo typu ROL0, u kterého vyšel mnohem menší variační koeficient, je vidět, že nejhůře dopadla povrchová úprava ENIG, naopak nejlépe HASL, což koresponduje s výsledky mých kolegů. Z hlediska nepájivé masky dopadla lépe lesklá než polo-matná.

Výsledky analýzy roztékání tavidla po ploše vzorku byly z hlediska statistiky nejméně spolehlivé, neboť bylo k dispozici nejvíce dat. Vyplývá z nich, že nejmenší hodnota povrchového napětí byla u vzorku bez nepájivé masky a u povrchové úpravy HASL.

Předpoklad vlivu povrchového napětí substrátu, které je různé pro různé typy povrchových úprav základního substrátu, se tedy potvrdilo. Tento experiment ukazuje, že záleží na každé kombinaci povrchové úpravy mědi a nepájivé masky.

Vzhledem ke statisticky nevěrohodným výsledkům některých částí experimentu nelze však prohlašovat obecné závěry k jednotlivým úpravám a nepájivým maskám. Také bohužel konstatuji fakt, že nepájivé masky od výrobců, které jsem oslovil, jsou dle analýzy roztékavosti tavidla podobné až totožné. Z těchto důvodů nelze zatím mezi analýzou roztékavosti tavidla (hodnotou povrchového napětí) a výskytem rozstříku najít jednoznačnou korelaci.

Protože plánuji pokračování ve studiu v rámci doktorského studijního programu, bude experiment opakován s větším počtem zkoumaných vzorků. Bude též provedena analýza povrchu nepájivých masek k jednoznačnému určení lesklých a matných masek vzorků. Věřím, že pak budu moci lépe posoudit vliv povrchových úprav a nepájivých desek plošných spojů na efekt rozstříkování tavidla z pájecí pasty.

POUŽITÁ LITERATURA

1. **PIETRIKOVÁ, Alena, ĎURIŠIN, Juraj a MACH, Pavel.** *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. 1. vyd. Košice : Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010. ISBN 978-80-553-0447-2.
2. **BARTÁK, Jiří.** *Fyzikální podstata pájení*. [Online] [Citace: 21. 02 2017.] https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyda4qSAP2hZNnz_st-3-A4fw.
3. **TYC, Tomáš.** *Zajímavá fyzika. Povrchové napětí*. [Online] 2013. [Citace: 06. 05 2017.] http://www.physics.muni.cz/~tomtyc/zajfyz/povrch_nap-text.pdf.
4. **MACH, Pavel, SKOČIL, Vlastimil a URBÁNEK, Jan.** *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
5. **SZENDIUCH, Ivan.** *Pájení a bezolovnaté pájky*. [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>.
6. **PODZEMSKÝ, Jiří.** *Degradace spojů pájených pájkami bez olova*. [Dizertační práce (Ph.D.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie, 2015.
7. **ZAHRADNÍK, Vít.** *Studium vlivu latentního tepla u pájení přetavením*. [Bakalářská práce (Bc.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie, 2015.
8. **BAUER, Brian.** *An Introduction to Solder Material*. [Online] [Citace: 26. 01 2017.] <http://www.smtnet.com/library/files/upload/Introduction-Solder-Materials>.
9. **SLAVATA, Michal.** *Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži*. [Bakalářská práce (Bc.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, 2014.
10. *Solder Paste*. [Online] [Citace: 26. 01 2017.] http://en.wikipedia.org/wiki/Solder_paste.
11. **ŠIMEK, Oldřich.** *Výroba desek plošných spojů*. [Výuková prezentace] 2017.
12. *PCB Surface Finishes Comparison: HASL, OSP, & ENIG*. [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://blog.optimumdesign.com/pcb-surface-finishes-comparison-hasl-osp-enig>.
13. **Gatema.** *Povrchové úpravy*. [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://pcb.gatema.cz/povrchove-upravy-0/>.
14. **EPEC.** *Surface Finishes - Technical Webinar*. [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://www.epectec.com/downloads/surface-finishes.pdf>.
15. *PCB Finishes: ENIG, ENEPIG, EPIG, Electroless Gold, Immersion Silver, Electrolytic Palladium*. [Online] [Citace: 06. 05 2017.] http://www.uyemura.com/pcb-finishes_ENIG.htm.
16. *Study of immersion silver and tin printed-circuit-board surface finishes in lead-free solder applications*. **ARRA, Minna, a další, a další.** 9, 09 2004, Journal of Electronic Materials, stránky 977-990. ISSN 0361-5235. Dostupné z doi: 10.1007/s11664-004-0025-x.

17. **VÁVRA, Jan.** *Studium růstu whiskeru.* [Diplomová práce (Ing.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie, 2014.
18. **Epec.** *SOLDER MASK DESIGN BASICS.* [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://www.epectec.com/pcb/soldermask-design-basics.html>.
19. *Nepájivá maska.* [Online] [Citace: 06. 05 2017.] https://cs.wikipedia.org/wiki/Nep%C3%A1jiv%C3%A1_maska.
20. **ČEPEK, Martin.** *Mechanické vlastnosti spojů pájených ultrazvukem.* [Diplomová práce (Ing.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie, 2016.
21. **KOZÁK, Martin.** *Vliv povrchové úpravy na vznik voidů v pájených spojích.* [Bakalářská práce (Bc.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie, 2016.
22. **UMEL FEKT VUT v Brně.** Multimediální výukový systém. *Pájení v elektrotechnice.* [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/multimedialni-ucebnice/pajeni-v-elektrotechnice/>.
23. **VESELÝ, Petr.** *Risk analýza pájení čipů.* [Bakalářská práce (Bc.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd, 2015.
24. **TechnoLab.** *Solder Bridges.* [Online] [Citace: 06. 05 2017.] http://www.technolab.de/_en/solderdict/smdhmd/solderbridges.php.
25. *The “Popcorn Effect” of Plastic Encapsulated Microelectronic Devices and the Typical Cases Study.* **CHEN, Yuan a LI, Ping.** Xi'an : IEEE, 2011. International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. ISBN: 978-1-4577-1232-6. Dostupné z doi: 10.1109/ICQR2MSE.2011.5976658.
26. *Obrazová analýza povrchu bezolovnaté povrchové úpravy.* **PODZEMSKÝ, Jiří, URBÁNEK, Jan a DUŠEK, Karel.** I, 2011, Electroscopie. ISSN 1802-4564.
27. *Tin Whiskers.* [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://www.corfin.com/resources/tin-whiskers/>.
28. **NOVÁK, Ondřej.** *Pájené spoje, růst dendritů.* [Diplomová práce (Ing.)]. Praha : ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie, 2016.
29. *Flux effect on void quantity and size in soldered joints.* **DUŠEK, Karel, a další, a další.** 60, Květen 2016, Microelectronics Reliability, stránky 135-140. ISSN: 0026-2714.
30. **NORIYOSHI, Uchida.** *Void generation method yields low-void solder paste.* [Online] [Citace: 26. 01 2017.] http://www.ko-ki.co.jp/en/memo/memo_09.html.
31. *Minimizing flux spatter during lead-free reflow assembly.* **DEEPAK, Manjunath, a další, a další.** 18, 2006, Soldering & Surface Mount Technology, stránky 19-23. doi: 10.1108/09540910610685402.
32. **BERNTSON, Ross, SBIROLI, David a ANWEILER, Jeffery.** *Minimizing Solder Spatter Impact.* [Online] [Citace: 26. 01 2017.] <http://smt.icconnect007.com/index.php/article/51866/minimizing-solder-spatter-impact/51869/?skin=smt>.

33. *Surface finish influence on PCB contamination by flux spattering effect.* **DUŠEK, Karel, a další, a další.** Eger : IEEE, 2015. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISBN: 978-1-4799-8860-0. Dostupné z doi: 10.1109/ISSE.2015.7247998.
34. *Problem with no-clean flux spattering on in-circuit testing pads.* **DUŠEK, Karel a BUŠEK, David.** 56, 2016, Microelectronics Reliability, stránky 162-169. ISSN 0026-2714.
35. **METTLER TOLEDO. AG245.** [Návod].
36. **Memtech. Mistral 260.** [Online] [Citace: 06. 05 2017.] http://www.memtech.co.il/files/attach/Mistral_260.pdf.
37. **Olympus. Stereomicroscope system SZX7.** [Online] [Citace: 06. 05 2017.] http://www.olympusamerica.com/files/seg_bio/szx7_brochure.pdf.
38. **Shenmao Solder.** Product data sheet. *FORMOSA No Clean Solder Paste Model PF606-P.* [Online] [Citace: 16. 05 2017.] [http://avipre.com/products/printers/Shenmao%20Solder,%20Solder%20Paste,%20Solder%20Sphere,%20Solder%20Wire%20and%20Bar//Product%20Data%20Sheets/Lead-Free%20Solder%20Paste%20P%20Series/PF606-P\(TDS\).pdf](http://avipre.com/products/printers/Shenmao%20Solder,%20Solder%20Paste,%20Solder%20Sphere,%20Solder%20Wire%20and%20Bar//Product%20Data%20Sheets/Lead-Free%20Solder%20Paste%20P%20Series/PF606-P(TDS).pdf).
39. **VYBÍRAL, Bohumil. ZPRACOVÁNÍ DAT FYZIKÁLNÍCH MĚŘENÍ.** [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/mereni.pdf>.
40. **SVOBODA, Zdeněk. Základy statistického zpracování dat.** [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://www.umat.feec.vutbr.cz/~svobodaz/JMA2/Statistika.pdf>.
41. *PRINTED CIRCUIT BOARD SURFACE FINISHES – ADVANTAGES AND DISADVANTAGES.* [Online] [Citace: 06. 05 2017.] <http://www.epectec.com/articles/pcb-surface-finish-advantages-and-disadvantages.html>.
42. **ABE.TEC, s.r.o.** SMT centrum. *Srovnání pájecích slitin SAC a Sn100.* [Online] 31. 12 2009. [Citace: 06. 05 2017.] <http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajecich-slitin/srovnani-pajecich-slitin-sac-a-sn100/>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Povrchová napětí na rozhraních</i>	11
<i>Obrázek 2: Struktura pájeného spoje</i>	12
<i>Obrázek 3: Znázornění pájení vlnou (převzato z [22])</i>	23
<i>Obrázek 4: Znázornění pájení v parách (převzato z [22])</i>	25
<i>Obrázek 5: Příklad Ishikawova diagramu pro nesprávně zapájený čip (převzato z [23])</i>	27
<i>Obrázek 6: Ukázka efektu Tombstone</i>	29
<i>Obrázek 7: Ukázka výskytu whiskerů (převzato z [27])</i>	30
<i>Obrázek 8: Ukázka efektu Head in Pillow (převzato z [23])</i>	31
<i>Obrázek 9: Mechanismus vzniku voidu (převzato z [29])</i>	32
<i>Obrázek 10: Ukázka vzniku voidů u pouzdra BGA (převzato z [23])</i>	32
<i>Obrázek 11: Kapky tavidla na zlatých kontaktech (převzato z [31])</i>	33
<i>Obrázek 12: Návrh vzorku 1</i>	36
<i>Obrázek 13: Návrh vzorku 2</i>	36
<i>Obrázek 14: Hotové vzorky 1 (úprava HAL)</i>	36
<i>Obrázek 15: Schéma původního přípravku</i>	38
<i>Obrázek 16: Pracoviště pro nanášení pasty</i>	40
<i>Obrázek 17: Měřicí váhy METTLER TOLEDO AG245</i>	40
<i>Obrázek 18: Průběžná pájecí pec Mistral 260</i>	41
<i>Obrázek 19: Pracoviště pro optickou analýzu</i>	41
<i>Obrázek 20: Mikroskop Olympus SZX7</i>	42
<i>Obrázek 21: Teplotní profil pájecí pasty PF606-P (převzato z [38])</i>	43
<i>Obrázek 22: Nanesená pasta na vzorek 2</i>	43
<i>Obrázek 23: Graf naměřeného teplotního profilu v průběžné pájecí peci Mistral</i>	44
<i>Obrázek 24: Termočlánek pro měření teplotního profilu uchycený na skleněné podložce</i>	44
<i>Obrázek 25: Graf výsledků analýzy hmotnostního úbytku pro pastu PF606-P</i>	48
<i>Obrázek 26: Graf výsledků analýzy hmotnostního úbytku pro pastu PF606-P30</i>	49
<i>Obrázek 27: Práce se softwarem Corel</i>	50
<i>Obrázek 28: Graf výsledků optické analýzy pro vzorky bez povrchové úpravy</i>	52
<i>Obrázek 29: Graf výsledků optické analýzy pro pastu PF606-P</i>	52
<i>Obrázek 30: Graf výsledků optické analýzy pro pastu PF606-P30</i>	53
<i>Obrázek 31: Graf výsledků analýzy roztečení tavidla pro pastu PF606-P</i>	55
<i>Obrázek 32: Graf výsledků analýzy roztečení tavidla pro pastu PF606-P30</i>	55

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Systém rozdělení tavidel dle IPC-J-STD-004B</i>	17
<i>Tabulka 2: Výsledky analýzy hmotnostního úbytku</i>	48
<i>Tabulka 3: Výsledky optické analýzy</i>	51
<i>Tabulka 4: Výsledky analýzy roztečení tavidla</i>	54