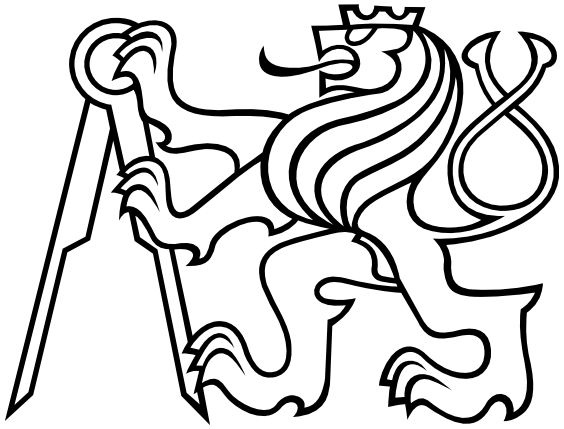
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



VLIV TAVIDLA NA TLOUŠŤKU INTERMETALICKÉ VRSTVY U PÁJENÝCH SPOJŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. ADAM PETRÁČ

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

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management, Magisterský

Studijní obor: Technologické systémy

2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petráč** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **420077**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv tavidla na tloušťku intermetalické vrstvy u pájených spojů

Název diplomové práce anglicky:

Influence of flux on intermetallic layer thickness in solder joints

Pokyny pro vypracování:

1) Seznamte se s technologií pájení přetavením, materiály, teplotním profilem a jeho vlivem na tloušťku intermetalických vrstev.
2) Připravte si vzorky, kde použijete pájecí pasty s různým typem tavidla. Vzorky analyzujte z pohledu tloušťky intermetalické vrstvy mezi pájecí ploškou a pájecí slitinou.
3) Výsledky experimentů vyhodnoťte s ohledem na použitý teplotní profil.

Seznam doporučené literatury:

[1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice, 2005, ISBN 80-903597-0-1
[2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
[3] URBÁNEK J., KLABAČKA E.: Technologie elektronických zařízení, ČVUT Praha, 1997
[4] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice, 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

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: **07.02.2018** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Pavel Ripka, CSc. 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

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

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 prací.

V Dolní Brusnici dne 8.5.2018

…….

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a trpělivost při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během mého studia.

Anotace

Diplomová práce se zabývá vlivem tavidla na vznik intermetalických sloučenin. Dále se také zaměřuje na vliv povrchových úprav pájecích plošek (ENIG, OSP a HASL), na vliv použité nepájivé masky a na vliv několikanásobného přetavení. V teoretické části práce je popsán základní přehled o pájení, metody pájení a chyby, které vznikají v pájených spojích. V následující části jsou popsány běžně užívané pájky a tavidla, povrchové úpravy desek plošných spojů a metody diagnostiky intermetalických vrstev. Praktická část se zabývá přípravou vzorků, měřením, analýzou a vyhodnocením intermetalických vrstev. Pro analýzu obrázku s intermetalickou vrstvou z elektronového mikroskopu jsem si připravil program v jazyce Python.

Annotation

The Diploma thesis deals with the influence of flux on the growth of intermetallic compounds. The influence of soldering pad surface finishes (ENIG, OSP and HASL), influence of non-soldering masks and multiple reflows are additionally studied in the work. Basic knowledge about soldering, soldering methods and solder joints defects is given in the theoretical part of the work. The following part describes commonly used solders and fluxes, printed circuit board surface finishes and methods of diagnostics of intermetallic layers. Experimental part deals with the preparation of samples, observation of intermetallic layers and analysis of results. I prepared a program in Python for analysis of images with intermetallic layers from electron microscope.

Klíčová slova

Pájení, Povrchové úpravy, HASL, OSP, ENIG, Sn-Bi, Sn-Cu, Intermetalické sloučeniny, Intermetalická vrstva, vliv tavidla, vliv přetavení, vliv nepájivé masky

Key words

Soldering, Printed circuit board finishes, HASL, OSP, ENIG, Sn-Bi, Sn-Cu, Intermetallic alloy, Intermetallic layer, effect of flux, effect of multiple reflow, effect of non-soldering mask

Obsah

1. Úvod 1

2. Pájení 2

2.1. Pájecí metody 2

2.1.1 Pájení páječkou 3

2.1.2 Pájení přetavením 3

2.1.3 Pájení vlnou 4

2.1.4 Pájení ultrazvukem 4

2.2. Chyby vzniklé při pájení 4

2.2.1 Intermetalické sloučeniny 5

2.2.2 Whiskery 8

2.2.3 Můstky 8

2.2.4 Voidy 9

2.2.5 Tombstone efekt 10

2.2.6 Rozstřik tavidla 10

2.2.7 Popcorn efekt 11

3. Pájky 12

3.1. Tvrdé pájky 12

3.2. Měkké pájky 12

3.2.1 Pájka Sn/Pb 13

3.2.2 Pájka Sn/Ag 13

3.2.3 Pájka Sn/Ag/Cu 13

3.2.4 Pájka Sn/Cu 14

3.2.5 Pájka Sn/Ag/Bi 14

3.2.6 Pájka Sn/Bi 14

3.2.7 Pájka Sn/Sb 14

3.2.8 Pájka Sn/Ag/Sb 14

3.2.9 Pájka In/Sn 14

3.2.10 Pájka Sn/Zn 15
3.2.11 Pájka Au/Sn 15
3.3. Pájecí pasty 15
3.4. Tavidla 16
3.4.1 Oplachová 16
3.4.2 Bezoplachová 17
3.4.3 Anorganická 17
3.4.4 Organická tavidla 17
3.4.5 Živicová 17
3.4.6 NC (No-Clean) 18
3.4.7 WS (Water Soluable) 18
3.4.8 Podle technologie pájení 18
3.4.9 Tavidla pro bezolovnaté pájení 18
4. Povrchové úpravy 20
4.1. Povrchové úpravy DPS 20
4.1.1 HASL 21
4.1.2 ENIG 22
4.1.3 OSP 23
4.1.4 Imersní stříbro 24
4.1.5 Imersní cín 25
4.2. Povrchové úpravy součástek 26
4.2.1 Povrchová úprava Sn 26
4.2.2 Povrchová úprava Sn/Ag a Sn/Ag/Cu 26
4.2.3 Povrchová úprava Sn/Cu 26
4.2.4 Povrchová úprava Ni/Au a Pd/Au 26
4.2.5 Povrchová úprava HASL 26
4.2.6 Povrchová úprava Sn/Bi 27
5. Metody pro vyhodnocení intermetalických sloučenin 27
5.1. Metoda výbrusu 27

5.2. Elektronová mikroskopie 28
5.3. Měření tloušťky intermetalické vrstvy 31
6. Výroba vzorků 34
7. Měření a vyhodnocení výsledků 37
7.1. Vliv různých povrchových úprav 37
7.2. Vliv použitého tavidla 41
7.3. Vliv několikanásobného přetavení 42
7.4. Vliv použité nepájivé masky 44
8. Závěr 46
9. Použitá literatura 48
10. Přílohy 51

Seznam použitých zkratek

1 TAV - deska po prvním přetavení

2 TAV - deska po druhém přetavení

Ag - stříbro

Au - zlato

B - bílá nepájivá maska

Bi - bizmut

Cd - kadmium

Cu - měď

Č - černá nepájivá maska

DPS - deska plošného spoje

ENIG - electroless nickel immersion gold (bezproudé nanášení Ni a ponor do Ag)

HASL - hot air solder leveling (zarovnání pájky horkým vzduchem)

In - indium

MSL - Moisture sensitivity level (úroveň vlhkosti, která může působit na součástku během skladování)

Ni - nikl

OSP - organic solder preservatives (organický ochranný film)

Pb - olovo

Pd - palladium

RoHS - Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment (název směrnice, která slouží k omezení používání nebezpečných látek v elektrotechnické výrobě)

ROL0 - tavidlo ROL0

ROL1 - tavidlo ROL1

RTG - rentgen

SAC - 96,5Sn3Ag0,5Cu

Sb - antimon

SMD - surface mount technology (součástka pro povrchovou montáž)

Sn - cín

THT - Through-hole technology (osazování součástek s drátovými vývody)

Zn - zinek

Seznam obrázků

Obr. 1 Porovnání β-Sn struktury a Cu_6Sn_5 struktury [6] 5
Obr. 2 Vizualizace intermetalické vrstvy v pájeném spoji 6
Obr. 3 Whisker na hraně vzorku [7] 8
Obr. 4 Můstky (zkraty)mezi dvěma vývody [25] 8
Obr. 5 Typy voidů v pájeném spoji 9
Obr. 6 Tombstone efekt [26] 10
Obr. 7 Rozstřik pájky [27] 11
Obr. 8 Popcorn efekt [28] 11
Obr. 9 Povrchová úprava DPS 20
Obr. 10 HASL 21
Obr. 11 ENIG 22
Obr. 12 OSP 23
Obr. 13 Imersní stříbro 24
Obr. 14 Imersní cín 25
Obr. 15 Výbrus – DPS zalitá do epoxidové pryskyřice 28
Obr. 16 Porovnání elektronových mikroskopů [29] 30
Obr. 17 Snímek z elektronového mikroskopu 31
Obr. 18 Výstupní soubor z programu NIS-Elements 32
Obr. 19 Program BitmapCounter 33
Obr. 20 Vzor použité DPS 34
Obr. 21 Roztékání tavidla 34
Obr. 22 Teplotní profil od výrobce [24] 36
Obr. 23 Průběh přetavení 36

Seznam tabulek

Tab. 1 Metody pájení a jejich kritéria vhodnosti použití [4] 2
Tab. 2 Aktivační energie intermetalických sloučenin [6] 7
Tab. 3 Rozdělení tavidel dle ISO 9454-1 18
Tab. 4 Výhody a nevýhody HASL [5] 21
Tab. 5 Výhody a nevýhody ENIG [5] 22
Tab. 6 Výhody a nevýhody OSP [5] 23
Tab. 7 Výhody a nevýhody imersního stříbra [5] 24
Tab. 8 Výhody a nevýhody imersního cínu [5] 25

Seznam Grafů

Graf 1 Průměrná tloušťka intermetalické vrstvy 38
Graf 2 Průměré hodnoty tlouštěk pro dané povrchové úpravy 38
Graf 3 Směrodatná odchylka popisující reliéf intermetalické sloučeniny 39
Graf 4 Průměrné směrodatné odchylky pro jednotlivé povrchové úpravy 40
Graf 5 Porovnání použitého tavidla pro jednotlivé případy 41
Graf 6 Porovnání několikanásobného přetavení 42
Graf 7 Porovnání členitosti povrchů vlivem několikanásobného přetavení na základě směrodatné odchylky 43
Graf 8 Porovnání bílé a černé masky pro OSP 44
Graf 9 Porovnání bílé a černé masky pro HASL 44
Graf 10 Porovnání bílé a černé masky pro ENIG 44

1. Úvod

V mé diplomové práci se budu zabývat intermetalickými sloučeninami. Fenoménem dnešní doby je neustálé zmenšování součástek, a tudíž jejich vývodů, kde má intermetalikum nezanedbatelný vliv, protože ovlivňuje pájitelnost daného spoje. Vznikají zde například sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn, kde tloušťka jejich vrstvy se pohybuje okolo 1–5 μm. Dále také intermetalická vrstva ovlivňuje pevnost a křehkost pájeného spoje, a tedy jeho spolehlivost. Úkolem této práce je ověření vlivu několika vnějších činitelů na vznik a tloušťku intermetalické sloučeniny.

Nejprve se budu zabývat vlivem tří povrchových úprav a to ENIG, OSP a HASL. Tímto tématem jsem se zabýval již ve své bakalářské práci. Zde bych své výsledky rád ověřil a potvrdil za použití přesnější metody měření.

Dále se budu zabývat vlivem použitého tavidla, protože se na trhu vyskytuje mnoho pájecích past s různými tavidly, které mají různou úroveň aktivity. Pro další zkoumání jsem si vybral pájecí pastu s tavidlem ROL0 a ROL1, kde první jmenované má nižší agresivitu než to druhé. Sice zde rozdíl v aktivitě není příliš velký, ale přesto si myslím že výsledky budou porovnatelné.

Dále se budu zabývat vlivem několikanásobného přetavení, protože v některých pájecích procesech k němu může docházet a ve výsledky by to mohlo ovlivnit kvalitu pájeného spoje.

Nakonec se budu zabývat ovlivňováním použité nepájivé masky. Dosud tento vliv nebyl přímo měřen, ale jeho efekt může být výrazný. Pro zkoumání tohoto vlivu jsem si vybral dvě masky, a to bílou která je více hladká Ra = (0,474 ± 0,059) μm a černou která méně hladká Ra = (0,903 ± 0,068) μm. Parametr Ra je střední aritmetickou odchylkou drsnosti povrchu se svou tolerancí. Drsnost povrchu byla měřena na Talystepu. Vzhledem k tomu, že je nepájivá maska na desce plošného spoje jako ochrana, aby nedocházelo k rozlévání pájky do míst, kde není třeba, tak by se mohlo zdát, že nebude nijak ovlivňovat přímo pájený spoj, nicméně toto se pokusím ve své práci vyvrátit.

Všechny výše uvedené vlivy jsou běžně se vyskytující při pájení, a proto je třeba znát, jak nám ovlivňují kvalitu a spolehlivost pájeného spoje. Poté jsme díky tomu schopní vybrat tu pravou kombinaci vstupních parametrů, abychom minimalizovali riziko vadných výrobků.

2. Pájení

Pájení je proces, při němž dochází ke spojování kovových částí pomocí přidaného kovu, který má nižší teplotu tavení než pájený kov. Dělíme ho na pájení měkké a tvrdé. Měkké znamená, že použité pájky nepotřebují ke svému roztavení tak vysokou teplotu a je ho tedy vhodné použít tam, kde by mohla vysoká teplota poškodit pájené části. Z toho vyplývá použití v elektrotechnice. Aby pájení bylo úspěšné je důležité, aby povrchy byly čisté jak mechanicky, tak chemicky. Dále se přidává tavidlo, které slouží k odstranění oxidů a podporuje smáčení povrchů. Poté přichází samotné pájení přiložením páječky a prohřátí pájecích ploch. Tímto dojde k roztavení pájky. Po vychladnutí je třeba pájený spoj očistit od zbytků tavidla, které mají korozivní účinky. [1] [2]

První, kdo zřejmě využívali pájení, byli staří egyptští zlatníci, kteří potřebovali spojovat šperky. Nejstarší nalezená věc, která byla spájená je stará 5 000 let. Dále pájení využívali staří Římané například ke spojování olověných trubek. [3]

2.1. Pájecí metody

K pájení využíváme různé metody, a to v závislosti na tom, o jaký druh pájeného spoje se jedná, kolik bude pájených spojů, jak moc velká teplota se může použít nebo jestli používáme tvrdou nebo měkkou pájku. Nemalou roli hraje také finanční stránka, protože kdybychom u velkosériové produkce zvolili drahou metodu pájení, tak by se zdražil celkový produkt. Následující tabulka popisuje některé metody pájení na základě různých kritérií. [4]

Způsob pájení	Rychlost ohřevu	Čas ohřevu			Ohřev součásti			Druh pájky		Vhodnost použití				Pájený předmět				Pájecí zařízení						Ochrana součástí		
														velikost		tvar		příprava pro pájení			energie					
	Poměrná	dlouhý	střední	krátký	celé součásti	oblasti spoje	spoj	měkká	tvrdá	kusová výroba	malé série	střední série	velké série	malá	velká	jednoduchý	složitý	pomalá	střední	rychlá	elektřina	plyn	tekutý plyn	ochranný plyn	vakuum	není možná
v peci	1	x			x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	
v solné lázni	50	x	x		x				x		x	x			x	x	x	x			x					x
páječkou	100		x			x		x		x	x	x		x		x			x	x	x	x	x			x
plamenem	200		x			x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x		x				x
v lázni pájky	400		x			x		x				x	x	x		x		x			x	x				x
odporem	800			x			x	x	x			x	x	x		x				x	x			x		
indukcí	1000			x			x	x	x		x	x	x	x	x	x	x			x	x			x	x	

Tab. 1 Metody pájení a jejich kritéria vhodnosti použití [4]

Průběh pájení dělíme na několik dílčích procesů. Na jejich průběhu je závislá kvalita spoje, včetně tloušťky intermetalické vrstvy. Vybrané chyby, které souvisejí s pájecím procesem, budu popisovat dále. Z důvodu eliminace těchto chyb je třeba znát přesně procesy, které při daném způsobu pájení probíhají a hlídat jejich průběh.

Nanesení pájecí pasty na spoj, který má být spojen je jeden z nejzákladnějších požadavků. Pájka sice nemusí být přesně v daném bodě, kde má vzniknout pájený spoj, ale musí se nacházet v jeho těsném okolí. Poté dojde vlivem povrchového napětí a smáčení k roztečení pájky do požadovaného místa.

Optimální prohřívání desky a součástek, které mají být zapájeny je důležité z následujících důvodů:

- Prudký nárust teploty by způsobil teplotní šok součástkám (riziko delaminace).
- Vlivem rychlého nárůstu teploty může dojít k rozstřiku pájky.
- Dostatečné odstranění oxidů z místa pájení. Příliš pomalé ohřívání může vést k opětovné oxidaci.

Odstranění oxidů z pájeného místa je velice důležité pro vytvoření kvalitního pájeného spoje. K odstranění oxidů nám slouží tavidlo, ale je také zapotřebí mít správně nastavený teplotní profil.

Během roztavení pájky dochází k vytváření metalurgického spoje mezi základními materiály. Dochází ke smáčení, rozpouštění a vytváření slitin. Vlivem povrchového napětí dochází k natažení pájky do kapilár a jejímu rozprostření po smáčivém povrchu.

Intermetalické sloučeniny jsou nedílnou součástí pájeného spoje. Jedná se o vytváření sloučeniny v celém objemu pájky a na jejím rozhraní s pájecí ploškou. Intermetalická vrstva se mění vlivem různých vnějších činitelů jako je použitý teplotní profil, nebo povrchová úprava pájecí plošky.

Posledním krokem je chladnutí, kde dochází k tuhnutí roztavené pájky a vzniku pevného spoje. Tento krok je neméně důležitý pro výslednou kvalitu spoje, protože i zde dochází ještě k formaci intermetalických sloučenin. [5]

2.1.1 Pájení páječkou

Jedná se o nejstarší a nejjednodušší metodu pájení. V dnešní době se používá převážně pouze v domácím použití nebo při opravárenských pracích, protože je tato metoda pomalá. Výhodou je prohřátí pouze daného místa a díky tomu nehrozí riziko poškození okolních součástí. Velikost ohřívané plochy závisí na velikosti hrotu páječky. Ten je ohříván topným tělesem. To je napájeno buď ze síťového napětí nebo z transformátoru. [4]

2.1.2 Pájení přetavením

Jedná se o metodu nejčastěji používanou v hromadném pájení. Princip je takový, že musíme nejprve nanést pájecí pastu, poté osadit součástky, a nakonec celou desku vložíme do pece a prohřejeme. Díky tomu se všechny součástky zapájí najednou a není nutné je pájet jednotlivě. To velice urychluje práci, a proto je tato metoda v současnosti nejčastěji využívanou v hromadném pájení. [4]

Pájení v horkovzdušné peci je poměrně jednoduchou a přesnou metodou. Pec se skládá z několika zón, v nichž si můžeme nastavit různou teplotu, a tak si pro danou pájecí pastu zvolit teplotní profil tak, aby došlo k vytvoření kvalitního spoje. Nejprve dojde k postupnému prohřátí v několika zónách, poté v další k přetavení s následným chladnutím. Osazená deska se zde umisťuje na průběžný pás, který projíždí skrz celou pec. Můžeme zde použít ochrannou atmosféru, která zamezuje oxidaci, zlepšuje kvalitu pájení a redukuje možnosti vzniku chyb.

Pájení infraohřevem se v dnešní době příliš nepoužívá kvůli nerovnoměrnému ohřevu součástek, který je způsoben rozdílnou absorpcí záření, která je zapříčiněna jejich rozdílnými povrchy. Proto se tedy používá pouze jako předehřev či podpůrný ohřev.

Pájení v parách opět využíváme, když potřebujeme ohřát celou desku plošného spoje. Přenos tepla zde probíhá na principu kondenzace. Celou desku vložíme do uzavřené pece nad nádobu s kapalným médiem, které následně přenáší teplo. Pec se uzavře a začne se ohřívat nádoba s kapalinou. Ta se začne vypařovat a kondenzovat na desce plošného spoje a tím jí předá své teplo.

2.1.3 Pájení vlnou

Jedná se o způsob pájení, který je vhodný pro desky s osazenými THT součástkami. S výhodou se využívá toho, že jsou pájené vývody ve stejné rovině. Deska se protáhne vrchní rovinou vlny, díky čemuž dojde k hromadnému pájení. Vlna se vytváří tak, že v nádobě s roztavenou pájkou působí čerpadlo, které ji rozproudí. Pomocí různých tvarů trysek se nastavuje různý tvar vlny. Nejčastěji se deska protahuje pod určitým úhlem, aby nedocházelo ke spojování blízkých vývodů. Unašeč, na kterém je umístěna DPS je opatřen ohnutým plechem v přední části, který slouží k odstraňování oxidů z povrchu lázně.

2.1.4 Pájení ultrazvukem

Specifickou metodou pájení, je pájení ultrazvukem. Zde není za potřebí použití tavidla, protože ultrazvuk odstraňuje oxidy. Pájecí zařízení se skládá z vysokofrekvenčního generátoru a z hrotu, který přenáší kmity na pájené místo. Výhodou této metody je, že lze pájet i na materiály, které jsou běžnými metodami nepájitelné, jako například hliník, sklo, keramika apod... K pájení se využívají pájky zvané active solders, mezi které často obsahují In, Ti, Sn a další.

2.2. Chyby vzniklé při pájení

V této kapitole se budu věnovat vybraným chybám, které se mohou vyskytnout v procesu pájení nebo u pájených spojů.

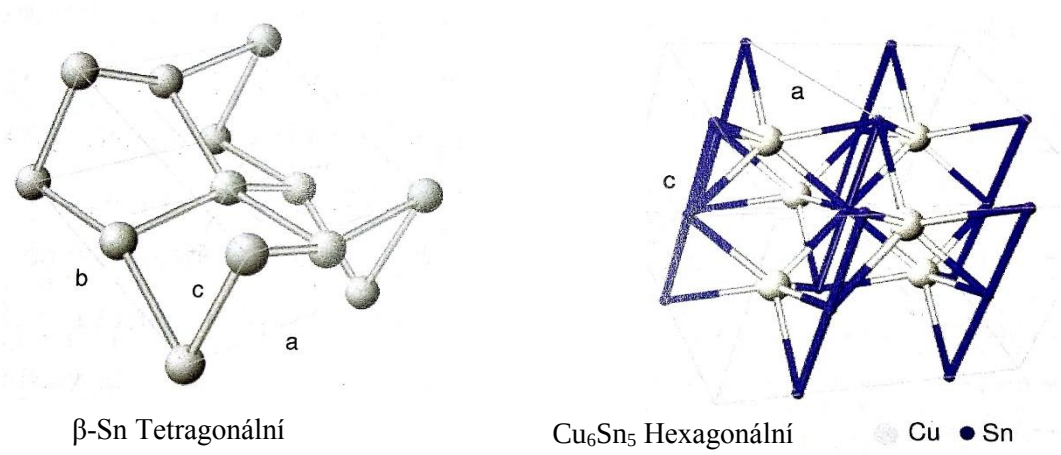
2.2.1 Intermetalické sloučeniny

Intermetalické sloučeniny jsou problémem obzvláště u bezolovnatých pájek. V dnešní době představují obzvlášť velký problém, protože dochází k miniaturizaci součástek a vlivem toho také ke zmenšování vývodů a snižování tloušťky jejich pokovení. Proto je třeba dosáhnout co nejmenší tloušťky intermetalické vrstvy. Základním pravidlem pro intermetalické vrstvy je, že by neměla být silnější než polovina tloušťky povlaku pájky, jinak výrazně poklesne schopnost pájitelnosti. Během pájení pájkou na bázi SAC na rozhraní pájky a mědi dojde k vytvoření intermetalických sloučenin Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn. Tloušťka těchto vrstev obvykle bývá kolem 1 μm. Sloučenina Cu_3Sn nám pozitivně ovlivňuje pájený spoj, protože je nutnou podmínkou dobrého smáčení a vazby mezi pájkou a pájeným materiálem. Sloučenina Cu_6Sn_5 obdobně jako například Ag_3Sn vytváří jehlice, které jsou křehké. Tyto jehlice zvyšují tvrdost spoje.

Na tvorbu intermetalických sloučenin má vliv mnoho aspektů, jako například teplota přetavení, čas pájení, ochlazování, znečištěné povrchy, opakované pájení, pára z nekvalitních galvanických povlaků nebo složení pájky. Jejich nárůst můžeme tady například minimalizovat rychlým ochlazováním roztavené pájky.

Spoj s intermetalickou vrstvou je tvrdý, křehký a méně odolný vůči vibracím. Intermetalická vrstva také roste vlivem stárnutí a to obzvláště, když je vystavena vysoké teplotě.

Intermetalické sloučeniny vznikají díky rozdílu ve tvaru krystalických struktur Sn a ostatních kovů. Krystalické struktura základních kovů je odlišná oproti té u intermetalické struktury.



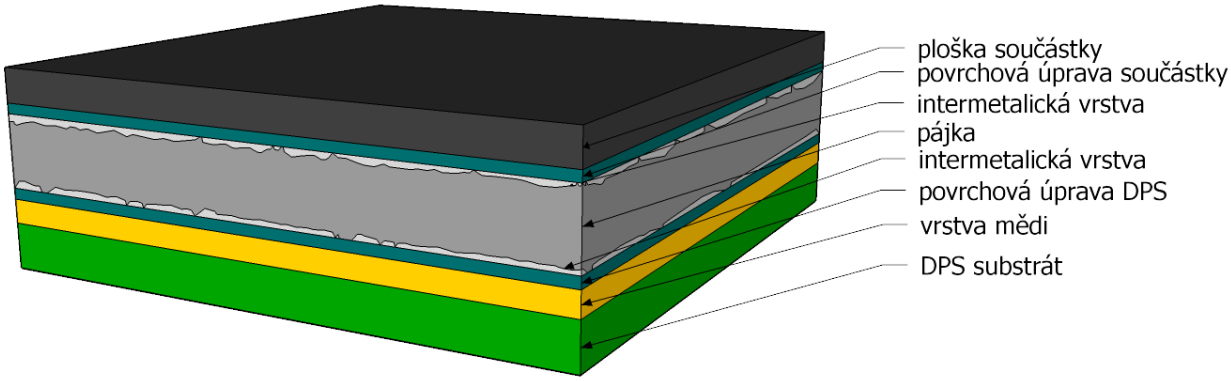
β-Sn Tetragonální Cu_6Sn_5 Hexagonální

Obr. 1 Porovnání β-Sn struktury a Cu_6Sn_5 struktury [6]

Z předchozích obrázků si můžeme všimnout rozdílu v uspořádání krystalové mřížky β – Sn a intermetalické vrstvy. Zde je vidět, že mřížka β – Sn obsahuje méně atomů oproti intermetalickým mřížkám. Z takto vzniklé struktury, která má větší hustotu uspořádání atomů, vyšší stupeň vazby

a odlišné chemické vazby vyplývá vyšší pevnost, ale zároveň také křehkost intermetalické sloučeniny oproti β – Sn

Nejdůležitějším okamžikem, kdy začne vznikat intermetalická sloučenina je, když dojde k roztavení pájky. V okamžiku, kdy roztavená pájka přijde do styku s pájecí ploškou, dochází k chemické reakci a vzniku intermetalické sloučeniny nepravidelného tvaru. Takto vzniklé rozhraní působí jako bariéra pro další migraci atomů kovů. Avšak zůstávají zde úzké kanálky, které zde vznikají díky nepravidelnému tvaru narostlé vrstvy. Tyto kanálky umožňují pokračující difúzi. Ta je velmi rychlá na počátku pájení a postupně se zpomaluje. Dochází zde k pohybu dvou mezifázových rozhraní. Prvním je rozhraní mezi intermetalickou vrstvou a pájecí ploškou. To se vždy pohybuje směrem k pájecí plošce. Druhé rozhraní, mezi intermetalickou vrstvou a pájkou, které se nejprve pohybuje směrem k pájecí plošce, dokud dochází k rozpouštění intermetalické vrstvy, poté se jeho pohyb otočí směrem do pájky.



Obr. 2 Vizualizace intermetalické vrstvy v pájeném spoji

Během pájení dochází k rozpouštění slabé vrstvy základního materiálu (pájeného substrátu) a reakci s pájkou. Ve většině případů je to měď, nikl a zlato. Díky tomu dojde k vytvoření intermetalické vrstvy. Pro vytváření intermetalických vrstev je obzvláště důležitý cín, který se vyskytuje ve většině bezolovnatých pájek. Proto je většina intermetalických sloučenin na bázi Cu-Sn, Au-Sn a Ni-Sn. U Cu-Sn dochází k vytváření dvou druhů sloučenin, a to Cu_3Sn a Cu_6Sn_5. V blízkosti pájecí plošky vzniká Cu_3Sn, která je také tenčí a poté dále vzniká Cu_6Sn_5.

Velkým problémem spolehlivosti pájených spojů je kinetika nárůstu intermetalické sloučeniny při nebo nad pokojovou teplotou. Dochází zde k pohlcení atomů mědi, s tím souvisí vznik tzv. Kirkendallových voidů, tedy prázdných míst. Je tedy třeba dát pozor na růst intermetalické vrstvy. Přestože je intermetalická vrstva podmínkou dobrého smáčení a kvalitní vazby, tak její přílišný nárůst způsobuje křehkost spoje a také nestejnorodosti fyzikálních a elektrických vlastností.

Růst intermetalické vrstvy se snažíme omezit, a proto se používají difúzní bariéry. Jedná se o vrstvy z materiálu, který narůstá pomaleji než Cu_6Sn_5. Používá se například nikl, který vytváří intermetalickou fázi Ni_3Sn_4. Můžeme ho nalézt například v povrchové úpravě ENIG.

Důležitými vlastnostmi intermetalických sloučenin tedy jsou:

- Tloušťka mezifázové vrstvy intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 roste s klesající rychlostí ochlazování. Budeme-li ochlazovat pomalu (desetiny až jednotky °C za sekundu), tak nám naroste intermetalická sloučenina kolem 10 μm tlustá. Budeme-li ochlazovat střední rychlostí (víc než 10 °C za sekundu), tak nám naroste intermetalické sloučenina 5 μm tlustá.
- Intermetalické sloučeniny vykazují závislost mezi tloušťkou vrstvy a pevností ve smyku. Čím je vrstva silnější, tím je spoj křehčí. U slabších vrstev spoj vykazuje jistou pružnost.
- Mezi intermetalickou sloučeninou Cu_6Sn_5 a pájecí ploškou roste vlivem stárnutí také intermetalická sloučenina Cu_3Sn. [6]
- Vlivem stárnutí ztrácejí svou pružnost i spoje, kde je tenká intermetalická vrstva.
- Směr intermetalických sloučenin Ag_3Sn je náhodný a nelze ho nijak ovlivnit řízením chladnutí.

2.2.1.1 Difúze

Difúze je proces, kdy dochází k přemísťování atomů vlivem teplotního nebo koncentračního gradientu. U nehomogenních slitin dochází k makroskopickému toku příměsových atomů vlivem koncentračního gradientu. U čistých kovů je nutným předpokladem pro migraci atomů vakance[1]. S teplotou roste koncentrace vakancí a jejich pohyblivost. Když se v soustavě vyskytuje atom, který tepelným kmitáním získal aktivační energie, tak se tento atom přemístí na místo vakance a ta se posune na místo původního atomu. Toto místo mohou obsadit další atomy. Můžeme tedy říct, že tok atomů je spojený s opačným tokem vakancí.

Difúze probíhá u substitučních tuhých roztoků především pomocí vakančního mechanizmu. Problém nastává u difúzního žíhání dvou omezeně rozpustných kovů, které spolu vytváří intermetalickou sloučeninu, která může oba dané kovy rozpouštět. Při difúzním žíhání při zvýšené teplotě může dojít ke vzniku intermetalické sloučeniny mezi základními kovy, a navíc na okrajích této sloučeniny vzniknou tuhé roztoky, kde je jeden kov rozpuštěný do druhého. Takto vzniklá vrstva brání přímému styku kovů a ty můžou mezi sebou difundovat jen skrz intermetalickou vrstvu. Proto difúzní schopnost atomů v této vrstvě ovlivňuje množství předifundovaného kovu a koncentraci na mezifázovém rozhraní. Difúze je proces, který během životnosti pájeného spoje ovlivňuje nárůst intermetalické vrstvy. [6]

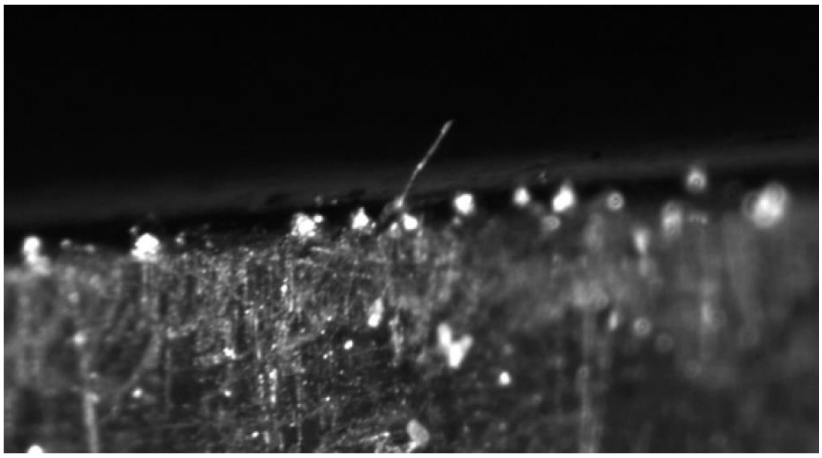
Intermetalická sloučenina	Aktivační energie [kJ/mol]
Cu_6Sn_5	116
Cu_3Sn	67
Ni_3Sn_4	88

Tab. 2 Aktivační energie intermetalických sloučenin [6]

[1] Volné místo v krystalové mřížce

2.2.2 Whiskery

Díky legislativním požadavkům na bezolovnaté pájky se objevil problém ve formě whiskerů. Jedná se o jehlicovité krystaly vznikající na povrchu kovů. Ve větší vzdálenosti přecházejí do vláknovitého uskupení. Vznikají na různých kovech, jako je cín, zinek, kadmium nebo antimon, avšak v elektrotechnice je pro nás největší problém právě s cínem, který je hlavní složkou většiny pájek. Whiskery způsobují v elektrickém obvodu zkrat. Můžeme mít zkrat trvalý, kde whisker spojuje neustále 2 vodiče. Bylo dokázáno, že skrz něj může protékat proud až 10 mA. Poté máme krátkodobý zkrat, kde může protékat proud až 50 mA a díky tomu následně dojde k odpaření whiskeru. V neposlední řadě tu máme volně se pohybující úlomky whiskerů, které se vlivem vibrací uvolní a poté mohou napáchat v zařízení nevratné škody. [7]



Obr. 3 Whisker na hraně vzorku [7]

2.2.3 Můstky

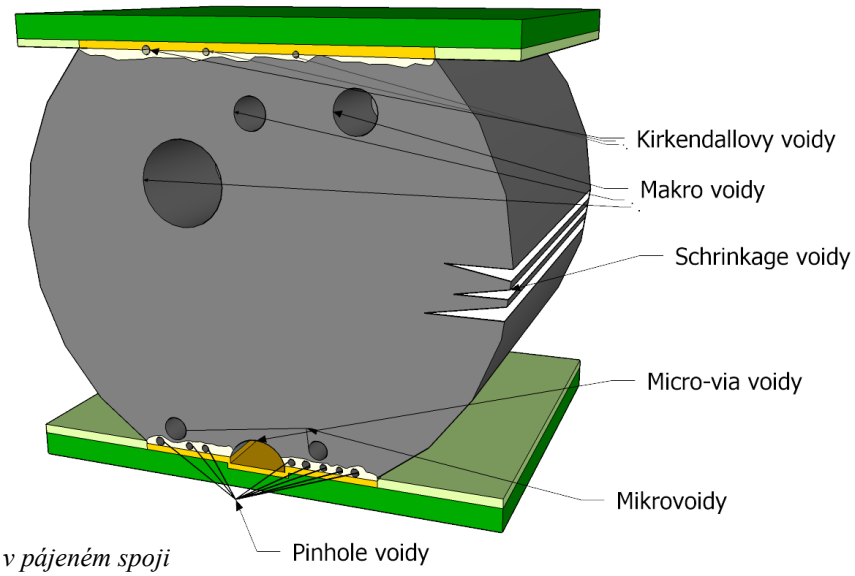
Můstky jsou vodivá propojení mezi sousedními pájenými vývody, které jsou tvořené přebytečnou pájkou. Díky své velikosti dokáží již přenášet poměrně velké proudy. Abychom se jim vyvarovali, tak můžeme například zvolit jiný pájecí profil, aby došlo ke správnému průběhu zapájení, dále můžeme použít jiné tavidlo, či pájku, která při daném procesu nebude vytvářet můstky.

Obr. 4 Můstky (zkraty)mezi dvěma vývody [25]

2.2.4 Voidy

Voidy jsou dutiny vzniklé v pájeném spoji, které jsou vyplněné vakuem, plynem nebo jinými zbytky. Vznikají obzvláště při pájení přetavením, a to hlavně při použití bezolovnatých pájek. Mají neblahý vliv na pevnost pájeného spoje. S jejich stoupajícím množstvím a velikostí klesá pevnost a při jistém namáhání může dojít k porušení spoje. Jsou způsobeny různými mechanizmy od nastavení tepelného profilu přes složení pájecí pasty až po povrchovou úpravu DPS. Známé jsou následující druhy voidů [8]:

- Makrovoidy. Jsou způsobené obsahem různých látek v tavidle, které se uvolňují, a také vodní párou uvolňovanou během pájení. Tyto plyny jsou zachyceny roztavenou pájkou ve fázi tuhnutí a tím se vytvoří dutiny.
- Planární mikrovoidy se vyskytují na rozhrání pájecí plošky a pájky. Není přesně známý původ jejich vzniku, avšak zřejmě největší vliv na jejich vznik má povrchová úprava DPS.
- Schrinkage voidy vznikají jako trhlinky během ochlazování roztavené pájky vlivem smršťování, které mají podlouhlý tvar. Vyskytují se u pájecí pasty SAC.
- Micro-via voidy se mohou objevit na deskách, kde se používají prokovení pro spojení dalších vrstev. Vznikají díky plynům, které se během pájení přetavením začnou z těchto propojů uvolňovat. Pro omezení vzniku je vhodné tyto propoje zvětšit.
- IMC Kirkendallovy voidy nevznikají bezprostředně během pájení, ale až během životnosti spoje. Vznikají díky elektromigraci atomů na rozhraní dvou různých kovů. Tudíž vznikají například mezi mědí na DPS a intermetalickými sloučeninami. Vliv na jejich růst má průtok proudu, který unáší dané atomy.
- Pinole voidy vznikají na podobném místě jako IMC voidy, ale jejich příčina je odlišná. Vytvářejí se díky nečistotám a plynům zachyceným ve vrstvě mědi případně na povrchové úpravě



Obr. 5 Typy voidů v pájeném spoji

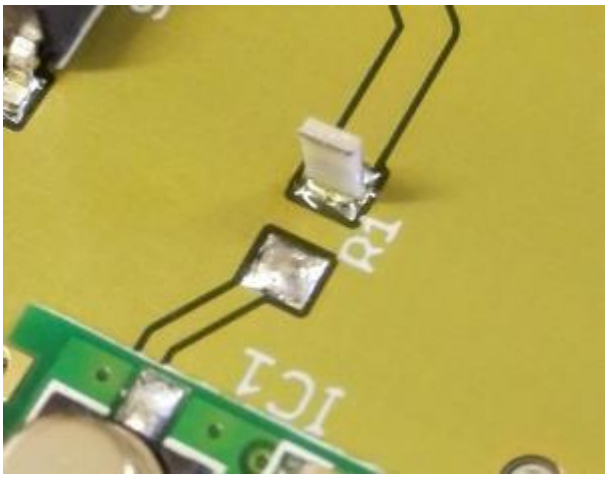
pájecích plošek. Tyto plyny se během pájení přetavením uvolňují a na rozhraní vytvářejí malé dutinky. [9]

2.2.5 Tombstone efekt

Jedná se o problém, kdy dochází ke zvedání součástek. Vyskytuje se většinou u pasivních komponent, které mají dva vývody, každý na jednom konci. Tento efekt nastává při pájení přetavením. Byl znám již od samotného počátku pájení, avšak více se začal objevovat díky neustále miniaturizaci součástek a nástupu bezolovnatých pájek.

Za příčinu bývá udáváno rozdílné počáteční smáčení obou konců součástky. Je to dáno zejména rozdílnou teplotou a smáčivostí daných spojů. V ideálním případě dojde k roztavení pájky a smáčení na obou koncích naráz a díky tomu se součástka uchytí rovnoměrně. Pokud se však rychleji přetaví pájecí pasta na jednom konci součástky, dojde k nerovnoměrnému působení sil, které způsobí její nadzvednutí.

Minimalizovat tento jev můžeme například díky speciálnímu složení pájecí pasty. Zaprvé musíme použít pájecí pastu, která má stabilní tavidlo v celém teplotním rozsahu. Zadruhé použijeme pastu, která má teplotu tavení ve dvou krocích. Z toho vyplývá, že musí být složena z kuliček dvou druhů kovů. Například kdy dojde k roztavení jednoho druhu při 179 °C a druhého při 183 °C. Takovéto vlastnosti má pájecí pasta Sn62.5 /Pb36.5 /Ag1.0. [10]

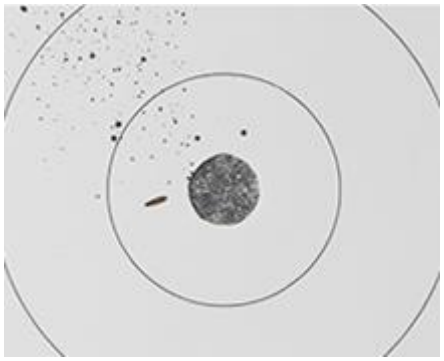


Obr. 6 Tombstone efekt [26]

2.2.6 Rozstřik tavidla

Díky nevhodné volbě tavidla, kombinaci materiálů, vysoké vlhkosti nebo nevhodně zvolenému teplotnímu profilu může dojít k rozstřiku tavidla do okolí. Je to dáno tím, že smáčení není ideální a dochází k rychlému úniků plynů z místa pájení. Díky tomu, že plyny opouštějí pájený spoj velkou rychlostí, s sebou unášejí tavidlo a s ním také část pájecí pasty.

Tento efekt můžeme redukovat použitím vhodné masky DPS, která změní povrchové napětí. Dále tento problém můžeme vyřešit také volbou vhodného tavidla, které nezpůsobuje rozstřik, či změnou teplotního profilu. [11]

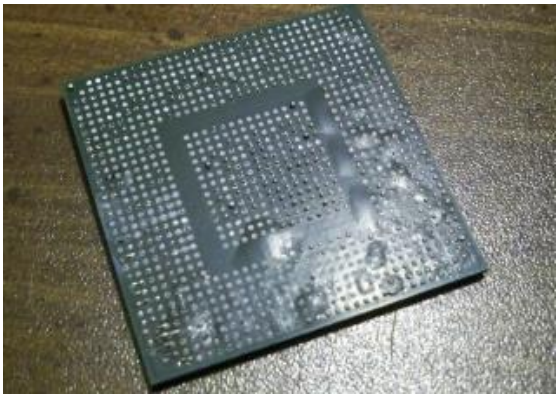


Obr. 7 Rozstřik pájky [27]

Na obrázku výše si můžeme všimnout rozstřiku pájky do okolí ze zkušebního padu. Je zde vidět, že vzdálenost rozstřiku je mnohonásobně větší než velikost padu.

2.2.7 Popcorn efekt

Popcorn efekt je defekt vyskytující se u součástek pájených přetavením. Problémem je vlhkost, která se dostane do pouzdra součástky. Během přetavení, kdy je součástka vystavena vysoké teplotě dojde k vypařování vlhkosti a tvorbě páry. Ta expanduje uvnitř součástky a způsobí její destrukci, protože nemá kudy unikat z pouzdra. Nejen že je pouzdro neforemné a již ho nelze přesně kontaktovat na pájecí plošky, ale také dojde k poškození vodivých cest uvnitř, což má za následek nevratné poškození součástky.



Obr. 8 Popcorn efekt [28]

Aby k takovému poškození součástek nedocházelo, tak se musí dodržovat MSL standard. Ten je definovaný pro každou součástku. Je rozdělen do 8 kategorií, kde nám každá říká, jak dlouho se daná součástka může vyskytovat v daném prostředí, aniž by při jejím pájení došlo právě k již zmiňovanému popcorn efektu. Tyto požadavky je třeba dodržovat od vyrobení součástky, přes její dopravu až po její montáž.

3. Pájky

Pájka je přídavný materiál při pájení, který následně vytvoří pájený spoj. Základní vlastností pájek je nižší teplota tavení oproti základním materiálům. Na rozdíl od sváření, kde musí mít drát stejné složení jako základní materiál, pájka stejné složení mít nemusí. Ke kapilárnímu pájení je nezbytné, aby pájka měla dobré smáčení, vzlínavost a roztékavost. Tyto vlastnosti ovlivňuje tavidlo a složení pájky. Pájka má částečnou schopnost rozpouštět základní materiál a difundovat do něj. Avšak neměla by vytvářet intermetalické sloučeniny. Pro pájený spoj jsou nejvhodnější pájky s malým rozdílem elektrochemického potenciálu, aby se zabránilo následné korozi. Pájka musí mít dobré mechanické vlastnosti sama o sobě. Musí také vykazovat dobré mechanické vlastnosti po vytvoření pájeného spoje. Pájky se vyskytují ve formě pevných pájek a pájecích past. Dělíme je na pájky pro tvrdé pájení, kde je teplota tavení vyšší než 450 °C, a pro měkké pájení, kde je teplota tavení menší než 450 °C. [4] Při pájení musí být dodrženo jednoduché pravidlo kde:

T_{tav} (tavidla) $<T_{tav}$ (pájky) $<T_{tav}$ (zákl. materiálu) [12]

3.1. Tvrdé pájky

Využívají se tam, kde je kladen důraz na vysokou pevnost pájených spojů. To znamená především ve strojírenství. Teplota tavení pájky je přes 450 °C, avšak obvykle bývá kolem 700 °C. Samozřejmě musí být tato teplota nižší než teplota tavení základního materiálu. Díky tomu, že pájka se s materiály spojuje na základě difuze, tak nám umožňuje spojit dva rozdílné druhy kovů. Dále tvrdé pájení využíváme tam, kde není možné použít sváření. Jedná se o tenké materiály, které by během sváření prohořely. Je to například i ve zlatnictví. Také využíváme tvrdé pájení tam, kde bychom se například se svářečkou nedostali, nebo by nebylo možné tak velkou hmotu svářením vytvořit. To je například vytváření vylomených zubů na ozubených kolech. Můžeme pájet materiály jako ocel, litinu, hliník, měď, nikl, keramicko-kovové materiály a grafit. V případě, že naneseme vrstvu niklu, mědi nebo stříbra, tak můžeme pájet i nerez, wolfram, tantal, niob, grafit a keramiku. Výhodou je vysoká pevnost takto vytvořených spojů, a to více než 400 MPa v tahu a 100-300 MPa ve střihu. Tvrdé pájky se vyrábějí na bázi mědi, mosazi, zlata stříbra a hliníku. [12]

3.2. Měkké pájky

Měkké pájky jsou takové, které mají nízkou teplotu tavení, a proto jsou vhodné především v elektrotechnice. Díky své nízké teplotě, ale vykazují menší pevnost. Z těchto důvodů je třeba dbát na to, aby spoje nebyly tepelně a mechanicky namáhány. Pájku tvoří slitiny těžkých kovů jako je Sn, Pb, Cd, Sb, Bi a další. Dříve se používaly pro své výhodné vlastnosti hlavně pájky ze směsi cínu a olova. Olovo však bylo zakázáno Směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU. Tato směrnice se zkráceně nazývá RoHS z anglického *Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical*

and electronic equipment. Směrnice zakazuje použití také dalších látek jako je kadmium, rtuť, šestimocný chróm, polybromované bifenyly a polybromované difenylethery. [13] To přineslo do pájení značné problémy, protože olovnatá pájka byla použitelná v celém rozsahu teplot a aplikací. Pouhou změnou poměru cínu a olova se dalo dosáhnout různých vlastností jako změny teploty tavení nebo viskozity pájky během pájení ale také ceny, protože cín je dražší než olovo. U bezolovnatých pájek se vyskytují komplikace. Většina z nich je dražší než olovnatá pájka. Je to dáno přidanými látkami, které jsou dražší než olovo. Většinou obsahují minimálně 60 % cínu. Další výraznou změnou je odlišná teplota tavení. Ta je u olovnatých pájek kolem 183 °C, avšak u bezolovnatých je ve většině případů vyšší. Všechny tyto rozdíly mají za následek zásah do technologického procesu i návrhu plošných spojů. Vzhledem k malému rozsahu teplot vhodných pro pájení je třeba, aby pájecí pece pracovaly s mnohem větší přesností. Dále je doporučováno používat ochrannou atmosféru, která zabrání vniku nežádoucích látek do pájeného spoje. Rovněž je zapotřebí hlídat přesné nastavení teplotního profilu. [14] Pájky se dodávají v pevné formě, využívané buď jako náplň pro pájení vlnou, pro drobné ruční pájení nebo ve formě past, které se dnes používají v hromadné výrobě.

3.2.1 Pájka Sn/Pb

Je nejčastěji používanou měkkou pájkou s podílem Sn 60–63 % a Pb 37–40 %. Jak jsem již psal výše, tak se používá spíše jen pro prototypovou výrobu, kde se vyskytuje ruční pájení. Teplota tavení se pohybuje v rozmezí 183-189 °C, což je ideální teplota z hlediska návrhu procesů, použitých součástek a běžného provozu daného zařízení. Cín u této pájky vykazuje velice dobré smáčecí vlastnosti. Značnou výhodou je, že tato pájka nevytváří intermetalické sloučeniny. [15]

3.2.2 Pájka Sn/Ag

Podíl základních látek je většinou 96,5 % Sn a 3 ,5 % Ag. Teplota tavení je zde o hodně vyšší než u olovnaté pájky a to 221 °C. Tato pájka vykazuje velice dobré smáčení a pevnost pájeného spoje. Svými vlastnostmi je poměrně dobře zaměnitelná s olovnatou pájkou. Přesto, že vykazuje tato pájka dobrou mikrostrukturální stabilitu, tak při nevhodně zvolené vysoké teplotě přetavení dochází k nárůstu intermetalických sloučenin jako je Cu_6Sn_5 nebo Ag_3Sn. Tomu se můžeme vyvarovat použitím jiných povrchových úprav pájecích plošek. [16]

3.2.3 Pájka Sn/Ag/Cu

Podíl základních složek zde bývá různý, avšak pohybuje se okolo 95 % Sn, 4 % Ag a 1 % Cu. Tato pájka je vhodná tam kde, chceme dosáhnout podobné tepelné odolnosti zařízení jako u pájky olovnaté. Odolnost je dána teplotou tavení okolo 216 °C. Reakcí se základním materiálem vytváří intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5. [16]

3.2.4 Pájka Sn/Cu

Podíl základních složek zde je 99,3 % Sn a 0 ,7 % Cu. Díky své vysoké teplotě tavení, která je 227 °C, se používá například v automobilovém průmyslu. Je vhodnou náhražkou za pájecí pasty s obsahem stříbra a olova. Při reakci se základním materiálem vytváří intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5. [16] [17]

3.2.5 Pájka Sn/Ag/Bi

Podíl základních složek je zde 91,8 % Sn, 3 ,4 % Ag a 4 ,8 % Bi. Bizmut byl do této pájky přidán kvůli snížení bodu tavení, který je díky tomu v rozmezí 200–216 °C. Tato pájka vykazuje poměrně dobrou tepelnou odolnost. Dojde-li ke kontaminaci bizmutu s olovem, například z povrchové úpravy, tak má tato směs teplotu tavení 97 °C, což by v jistých aplikacích mohlo způsobovat problémy. [16]

3.2.6 Pájka Sn/Bi

Poměr základních složek je 42 % Sn a 58 % Bi. Díky nízké teplotě tavení, která je 139 °C, je tato pájka vhodná pro použití v teplotně citlivých aplikacích. Dojde-li ke smíšení s olovem ze základního materiálu, může vzniknout směs, která má teplotu tavení 97 °C. Díky vysokému obsahu bizmutu se zde velice rychle objevuje oxidace na vzduchu, a proto musejí být používána speciální tavidla. [16]

3.2.7 Pájka Sn/Sb

Poměr základních složek je zde 95 % Sn a 5 % Sb. Díky vysoké teplotě tavení, která je 232-240 °C. je vhodná pro vysokoteplotní aplikace. Díky vysokému obsahu antimonu je zde riziko tvorby intermetalické sloučeniny SbSn. [16]

3.2.8 Pájka Sn/Ag/Sb

Poměr základních složek je zde 65 % Sn, 25 % Ag a 10 % Sb. Jedná se o vysokoteplotní pájku, která vykazuje poměrně velkou creepovu pevnost, což je odolnost proti dlouhodobému konstantnímu zatížení. Díky poměrně vysokému obsahu antimonu je zde problém se špatným smáčením. Na to má vliv velice rychlá oxidace antimonu. Kvůli pomalému smáčení zde dochází k vytváření intermetalických sloučenin Ag_3Sn, které mohou mít za následek následné porušení spoje. [16]

3.2.9 Pájka In/Sn

Poměr základních složek je 52 % In a 45 % Sn. Díky nízké teplotě přetavení, 118 °C, je pájka vhodná pro nízkoteplotní aplikace. Indium je kvůli své nízké teplotě tavení náchylné na tvorbu studených můstků. Má poměrně dobré antioxidační účinky, avšak při vysoké vlhkosti na sebe může vázat vlhkost. [16]

3.2.10 Pájka Sn/Zn

Poměr základních složek je zde 91 % Sn a 9 % Zn. Tato pájka má poměrně nízkou teplotu tavení. Obsah zinku vede k oxidaci a korozi. Tato pájka je citlivá na kyseliny a alkaly, díky čemuž je její kompatibilita s tavidly problémová. [16]

3.2.11 Pájka Au/Sn

Poměr základních složek je zde 80 % Sn a 20 % Au. Teplota tavení je zde velmi vysoká a to 280 °C. Je používána v omezené míře, protože zlato je drahý a nedostupný kov. [16]

3.3. Pájecí pasty

Pájecí pasty se využívají dnes při hromadné montáži, a to při pájení přetavením. Hlavními složkami jsou legovaný prášek pájecí slitiny a organické tavidlo. Dále se do směsi přidávají další složky jako nosná směs, která má funkci pojidla, a rozpouštědla, která určují viskozitu a přilnavost. Díky těmto vlastnostem jsou součástky drženy na desce, dokud nedojde k přetavení. Vyskytují se zde problémy s reakcí kovových slitin a tavidla již za běžných okolních podmínek, to má za následek znehodnocení pasty a vytvoření nekvalitního spoje. [6]

Nejčastěji používaný kovový prášek vychází z pájky SnAgCu. Můžeme ho vyrábět několika způsoby. [6]

- Elektrolytické vylučování – metoda, která vytvoří nejčistší částečky, avšak nekulového tvaru.
- Mechanické zpracování kovu – má za následek nepravidelný tvar částic.
- Chemická redukce nebo rozprašování roztaveného kovu – jedná se o nejčastěji používanou metodu. Částečky mají oválný až kulový tvar.

Rozměry částeček vycházejí z vlastností zařízení, pomocí kterého se pasta bude nanášet a jemnosti šablony DPS. V ideálním případě se snažíme vyrobit kruhové částečky stejných rozměrů, protože v opačném případě, by nám vznikly problémy při pájení. Čím jsou vyrobené částečky menší, tím více oxidují, kvůli větší ploše povrchu. Proto se během výroby používá ochranné atmosféry. Obsah kovu v pájecí pastě je obvykle 85-90 % z celkové hmotnosti.

Vlivem vnějších činitelů dochází ke změnám požadovaných charakteristik pájecí pasty, a to má za následek její znehodnocení. Z toho vyplývá, že musíme dbát na správné uchovávání, aby k těmto změnám nedocházelo. Vnější vlivy, které nám mohou ovlivnit vlastnosti pájecí pasty jsou tyto:

- Vlhkost
- Skladování
- Nadměrná teplota

- Podmínky tisku
- Aklimatizace pájecí pasty
- Nanášení pasty na šablonu
- Skladování nádob s otevřenou pájecí pastou

Pájecí pastu můžeme nanést na DPS různými způsoby. Jedním z nich je sítotisk, kde je pasta protlačována stěrkou na pájecí plošky skrze otvory vytvořenými v sítu. Další možností je tisk přes šablonu. Zde používáme šablonu, na které jsou vytvořené potřebné otvory pro nanášení pasty. Opět ji přeneseme stěrkou. Další možností je dávkováním, což používáme spíše při opravách, kde se požadované množství pájecí pasty nanáší postupně na jednotlivé pájecí plošky.

V dnešní době miniaturizace součástek je třeba také řešit přesnost šablon. Nanesení pájecí pasty je jedním z nejkritičtějších okamžiků operace pájení, a proto k jeho vyladění operátoři věnují až 40 % produkčního času. Výška nanesené pájecí pasty, její plocha a objem jsou určujícími faktory pro ověřování kvality tisku. [6]

3.4. Tavidla

Tavidlo má za úkol chránit pájené plošky před oxidací a zároveň odstranit již vzniklou oxidaci. Dále brání přístupu reakčních kovů během procesu pájení, snižuje povrchové napětí rozhraní pájka tavidlo, čímž zlepšuje smáčivost. V neposlední řadě také chemicky čistí kontakty, díky čemuž dojde k rovnoměrnému rozložení pájky. Z toho také vyplývá jeho důležitá vlastnost, že musí mít nižší aktivační teplotu, než je teplota tavení samotné pájky, aby mohlo včas zapůsobit. Tato teplota musí být zhruba o 50 °C nižší než teplota roztavení pájky. Během pájení má tavidlo za úkol pokrýt celou pájenou plošku, aby chránilo pájený spoj před přístupem vzduchu a tím zabránilo oxidaci. Tavidla se dodávají ve formě roztoku, pasty ale i pevného materiálu. Tavidla pro ruční a strojní pájení nejsou zaměnitelná, protože jsou navržená vždy pro danou technologii. V pájecí pastě má tavidlo vliv také na její viskozitu a lepkavost. Nesmí obsahovat zdraví škodlivé látky a nesmí být škodlivé ani pro životní prostředí. [6] [4]

Dle americké normy MIL-F-14256 dělíme z pohledu složení tavidla na [6] [18]:

3.4.1 Oplachová

Jedná se o taková tavidla, která se musejí po dokončení procesu pájení odstranit, protože zde zanechávají korozivní zbytky, které mají za následek následnou korozi pájeného spoje. Mohou to být například zbytky chloru.

3.4.2 Bezoplachová

Na rozdíl od předchozích tato tavidla neobsahují a nezanechávají zbytky, které by mohly způsobit korozi pájeného spoje, a naopak mohou obsahovat látky, které po zapájení chrání pájený spoj před korozí.

3.4.3 Anorganická

Jejich složení je na základě halogenových a bezhalogenových solí, které mají vysoce korozivní účinky na pájený spoj. Vyrábějí se jako pasty nebo roztoky.

3.4.4 Organická tavidla

Existují taková, která jsou rozpustná ve vodě, která jsou neaktivovaná, nebo aktivovaná bez halogenů, nebo aktivovaná s halogeny. Nebo máme rozpustná v rozpouštědle, která jsou na bázi kalafuny a syntetická.

3.4.5 Živicová

Jsou založená na bázi kalafuny a podle jejich úrovně aktivity je dále dělíme na:

a) **R** (**R**esin)

Skládá se z rozpuštěné živice v rozpouštědle jako je metylalkohol nebo izopropylalkohol. Je to neaktivované tavidlo s nejnižší aktivitou. Používá se tam, kde jsou povrchy snadno pájitelné jako je třeba měď. Jeho zbytky nemají korozivní účinky a není je tedy třeba odstraňovat.

b) **RMA** (**R**esin **M**idle **A**ctivated)

Skládá se z živice rozpuštěné v rozpouštědle a malého množství aktivátoru jako jsou kyseliny či halogenidy. Kvůli své nízké aktivitě se využívá opět u lehko pájitelných povrchů. Zbytek po tomto tavidle obvykle nebývá korozivní a vodivý, avšak v případě, když je aktivní tak je třeba ho nezbytně odstranit rozpouštědlem.

c) **RA** (**R**esin **A**ctivated)

Skládá se ze živice rozpuštěné v rozpouštědle a agresivního aktivátoru. Proto jsou aktivnější než RMA. Jsou použitelnější již pro povrchy, které jsou obtížněji pájitelné a mírně zoxidované. Díky těmto tavidlům dochází poměrně rychle ke smáčení povrchu. Díky své agresivitě je třeba je odstranit neprodleně po zapájení spoje.

d) **RSA** (**R**esin **S**trong **A**ctivated)

Toto tavidlo obsahuje ještě silnější aktivátory než předchozí. Můžeme ho používat na špatně pájitelných površích a silně zoxidovaných. Pro své agresivní korozivní účinky je ho třeba opět neprodleně po dokončení pájení odstranit.

3.4.6 NC (No-Clean)

Skládají se ze živice rozpuštěné v rozpouštědle a malého množství aktivátoru, díky tomu jsou vhodné pro snadno pájitelné spoje a není je třeba po pájení odstraňovat, protože nemají korozivní účinky.

3.4.7 WS (Water Soluable)

Skládají se z organických kyselin, tixotropních sloučenin a jistého rozpouštědla. Jsou velice aktivní a díky tomu je vhodné je používat na obtížně pájitelné spoje. Je třeba je ale po pájení okamžitě odstranit.

3.4.8 Podle technologie pájení

V neposlední řadě také tavidla dělíme dle technologie pájení, protože pro každou technologii je potřeba jiná směs, která vyplývá z průběhu samotného procesu. Rozlišujeme pájení vlnou, přetavením a ruční pájení.

Dále zde máme klasifikaci tavidel dle *Internation Standard Organisation* (ISO), kde můžeme nalézt dokonce 2 normy, které se tímto zabývají. První je DIN EN 61190-1–1, kde jsou tavidla dělena na základě chemického složení a aktivity tavidla. Složení rozlišuje na přírodní živici, živici, organická a anorganická. Následně jsou přidávány halogenidy, které určují úroveň aktivity tavidla. Díky těmto údajům jsou již tavidla označovaná.

Druhou normou ISO, která se zabývá dělením tavidel je ISO 9454-1, která dělí tavidla na základě složení.

Typ tavidla	Základ	Aktivátor	Forma
1 Živice	1 živice	1 bez aktivátoru	A tekutá
	2 bez živice	2 s halogenidy	
2 Organické	1 vodou rozpustné	3 bez halogenidů	
	2 vodou nerozpustné		B pevná
3 Anorganické	1 soli	1 chlorid amonný	
		2 bez chloridu amonného	
	2 kyseliny	1 fosforečné	C pasta
		2 jiné kyseliny	
	3 alkálie	1 amíny nebo amoniaky	

Tab. 3 Rozdělení tavidel dle ISO 9454-1

3.4.9 Tavidla pro bezolovnaté pájení

U bezolovnatých pájek mají tavidla za úkol především zlepšit smáčivost, kvůli povrchovému napětí těchto pájek. Vzhledem k tomu, že mají bezolovnaté pájky vyšší teplotu tavení než olovnaté,

musejí tavidla také vydržet vyšší teploty. S tím souvisí jejich výparnost, která se nesmí zvýšit, protože by to mělo za následek například tvorbu můstků a dalších vad. Proto se používají tekutá tavidla s vyšším obsahem pevné složky. V hromadné výrobě se většinou používají vodou omývatelná tavidla. Ta mají velké množství aktivátorů, které umožňují snadné pájení mědi. Díky velkému množství aktivátorů se zlepšuje smáčivost povrchů a snižuje se riziko oxidace během pájení. Avšak pro své velké korozivní účinky je třeba je okamžitě po zapájení odstranit.

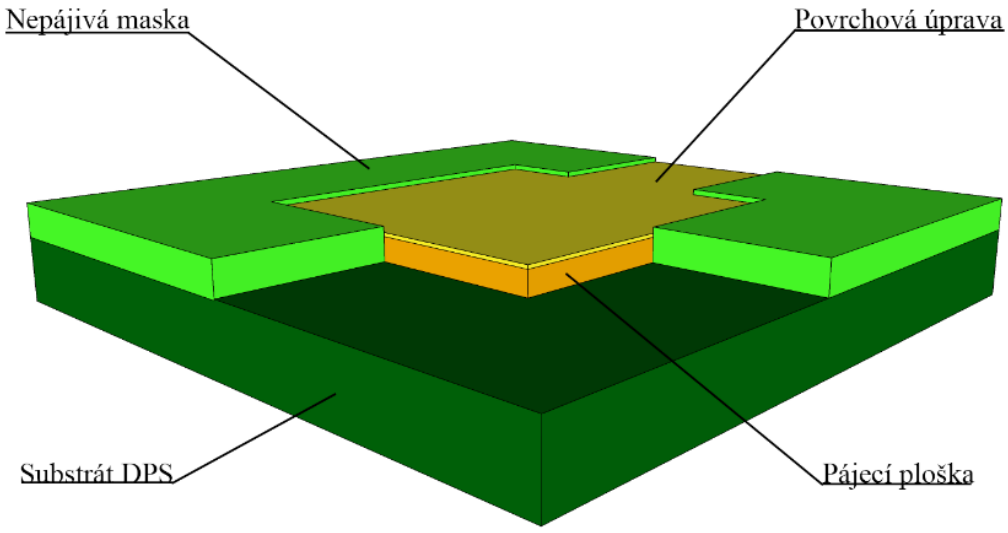
Vhodným tavidlem pro bezolovnaté pájky je VOC-free. Je to ekologické tavidlo bez unikajících organických složek. Obsah pevné složky je zde 4–15 %. Nejsou tolik prchavé jako tavidla na bázi alkoholu a není zde riziko vzplanutí. Jejich aplikace na substrát je ale obtížnější. Díky tomu, že dochází ke zlepšené disociaci kyseliny v tekuté fázi, je tavidlo rychle aktivní a rychle odstraňuje oxidy. Vhodným aktivátorem je zde živice. Ta má ideální fyzikální a chemické vlastnosti. V tekutém stavu má čistící efekt a zvyšuje smáčivost pájky. Díky tomu dostaneme ideální čistou měď na pájecí plošce. Živice také nejsou rozpustné ve vodě, a proto poskytují ochranu proti korozi, která je způsobena okolní vlhkostí během procesu pájení.

4. Povrchové úpravy

Povrchové úpravy jsou nedílnou součástí celého pájecího procesu. Ovlivňují nám jak průběh pájení, tak i výslednou kvalitu. Vlivem okolního prostředí měď velice rychle oxiduje a tím ztrácí svoji pájitelnou schopnost, je třeba ji tedy opatřit jistou povrchovou ochranou, která této oxidaci zabrání v dlouhodobém časovém horizontu. Jedním z nejdůležitějších úkolů je tedy zabránění oxidace a korozi před samotným zapájením, aby se zachovala pájitelnost, která zaručuje vytvoření kvalitního a pevného spoje. Dalším velice důležitým úkolem je vytvoření bariéry, která zabrání rozpouštění látek a tím minimalizuje růst intermetalických sloučenin. Použité materiály pro povrchové úpravy musí být vhodně zvoleny, aby bylo možné pájet bezolovnatými pájkami. Ve většině případů je také třeba, aby bylo možné pájet opakovaně, bez jakékoliv ztráty kvality a funkčnosti pájeného spoje. Z tohoto důvodu existuje mnoho povrchových úprav, aby bylo možné si mezi nimi vybírat. [6]

4.1. Povrchové úpravy DPS

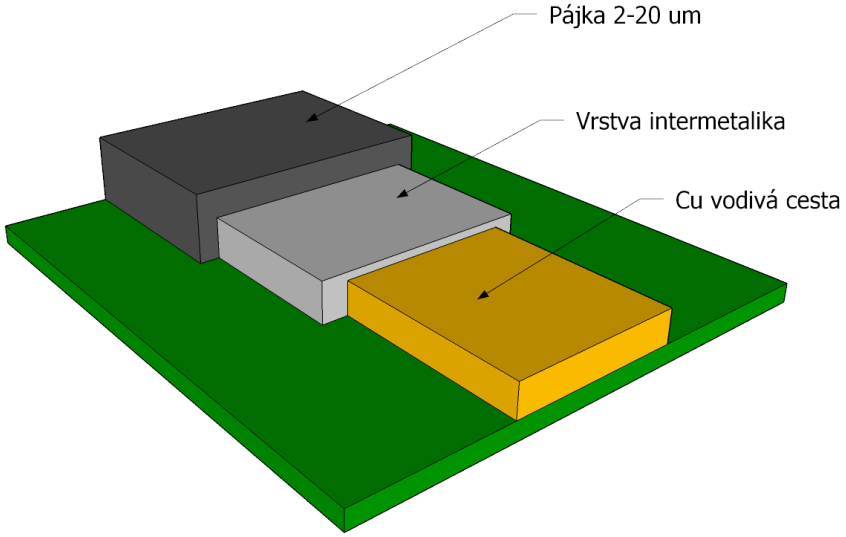
Povrchová úprava DPS tvoří důležitý propoj mezi součástkou a pájecí ploškou. Její nejdůležitější funkcí je poskytnutí ochrany čisté mědi, aby byla zachována její pájitelnost. Kromě toho má ještě mnoho dalších funkcí jako jsou elektrické a mechanické požadavky a požadavky na životnost a spolehlivost. Jiná část postupu pájení zřejmě neprošla za celou dobu takovým vývojem jako tato. Je to dáno neustálým vývojem požadavků na ekologii, cenu, životnost ale také produktivitu. Velký dopad mělo zavedení RoHS a tím pádem bezolovnatých pájek. [5]. Níže budou vybrané povrchové úpravy popsány podrobněji.



Obr. 9 Povrchová úprava DPS

4.1.1 HASL

HASL (Hot Air Solder Leveling), je proces, kdy je nanesena vrstva roztavené pájky na měď. Dříve se používaly pájecí slitiny převážně na bázi cínu a olova, ale dnes kvůli RoHS jsou nahrazeny slitinami na bázi cínu a mědi. Tloušťka nanesené vrstvy se pohybuje mezi 2 až 20 µm. Tato povrchová úprava vykazuje poměrně vysokou odolnost. Nevýhodou je, že během nanášení dochází k vytváření intermetalických vrstev a to, že DPS je vystavena tepelnému namáhání. Tato povrchová úprava se nehodí pro DPS, kde se osazují součástky s velmi malými rozestupy vývodů. Nanášení může probíhat jak ve vertikální, tak v horizontální poloze. Nejprve musí být měď dokonale očištěna. Poté je DPS ponořena do roztavené pájky. Okamžitě po vytažení je přebytečná pájka odstraněna proudem horkého vzduchu. [5]



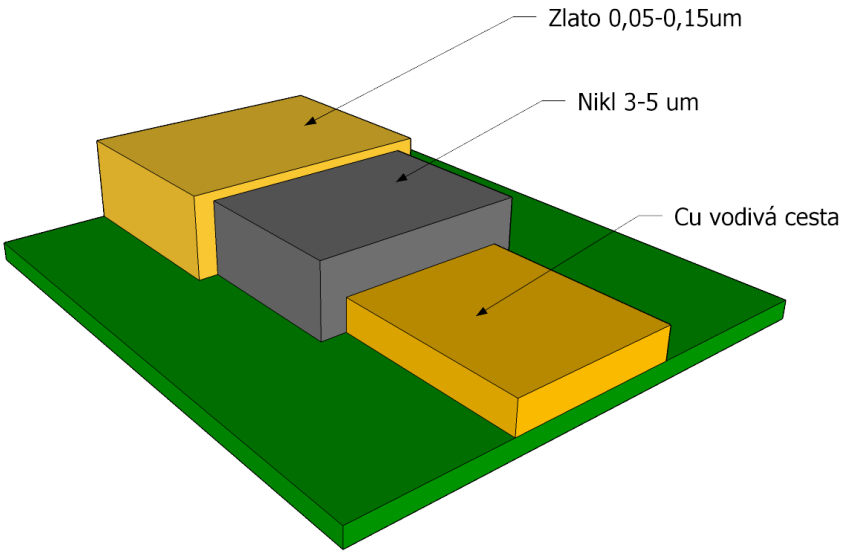
Obr. 10 HASL

HASL	
Výhody	Nevýhody
Levné	Nerovnost povrchu
Snadno dostupné	Špatná přesnost vývodů
Opakovatelně pájitelné	Silné intermetalické vrstvy
	Může obsahovat olovo
	Možné tepelné poškození DPS
	Možnost tvorby můstků
	DPS je tepelně namáhaná

Tab. 4 Výhody a nevýhody HASL [5]

4.1.2 ENIG

Z chemického hlediska je zlato ideálním prvkem pro povrchovou úpravu, protože neoxiduje, tudíž ho neovlivňují teplotní ani skladovací podmínky, které by jinak mohly zkrátit dobu pájitelnosti. Díky tomu, že se okamžitě zlato rozpouští do pájky, tak podporuje smáčení. Bohužel ale také zlato negativně ovlivňuje spoj svojí křehkostí, obsahuje-li ho povrchová úprava více než 3 %. Z tohoto důvodu musejí být zlaté povlaky nejvýše o tloušťce 0 ,3 µm. Zlato se také velice rychle rozpouští do mědi, aby se tomuto zabránilo, používá se mezivrstva niklu. Ten není nanášen elektrolyticky ale redukcí



Obr. 11 ENIG

fosforu, který zde může způsobovat tvorbu černých nesmáčivých plošek (black pad effect). V běžné praxi se používá 3 a 5 µm silná vrstva niklu a 0,05 až 0,15 µm vrstva zlata. Před nanášením niklu je třeba povrch očistit a poté je nanesen katalyzátor, který nám usnadňuje nanášení niklu. [5]

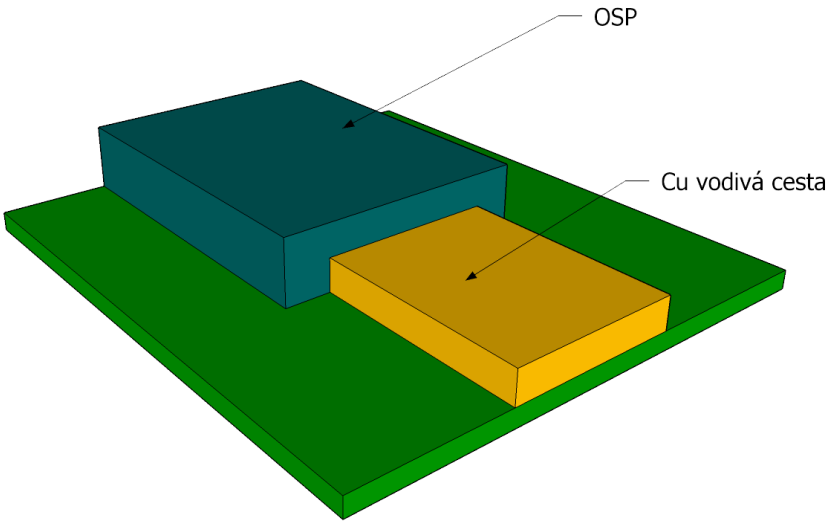
ENIG

Výhody	Nevýhody
Přesný rovinný povrch	Drahé
Plošné kontakty	Křehké
Snadno dostupné	Není znovu pájitelné
Nedochází k rozpouštění mědi	Možnost poškození masky
Bez olova	Černé plošky
Dlouhá životnost	Velmi složité nanášení

Tab. 5 Výhody a nevýhody ENIG [5]

4.1.3 OSP

Je to povrchová ochrana sestávající se z tenké organické vrstvy. Prvky, které se používají nejčastěji a které se vyvinuly z dřívějších potahových nátěrů, jsou benzimidazoly a fenylimidazoly. Většinou vydrží několik operací pájení za sebou. Přesto, že se jedná o nejjednodušší a nejlevnější povrchovou úpravu, tak se jí ještě nepodařilo vytlačit HASL. Při použití této povrchové úpravy mohou nastat problémy s její degradací jak teplem, tak i časem, tudíž není vhodná pro dlouhodobé uchovávání. Před nanášením je nezbytně nutné odstranit všechny nečistoty, vzniklé předchozími kroky výroby DPS. Poté dochází k nanášení OSP. To může probíhat nástřikem nebo poléváním. Nejčastěji se v praxi používá polévání. Tato povrchová úprava se nanáší jako poslední krok při výrobě DPS, protože je velmi křehká, citlivá na manipulaci a otisky prstů. Než dojde k zabalení desky opatřené OSP, tak by měla být



Obr. 12 OSP

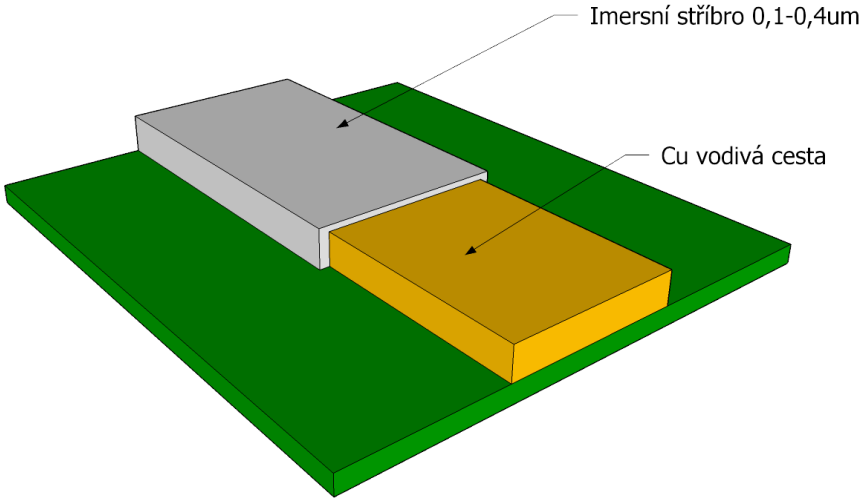
stabilizována při pokojové teplotě. Dojde-li k uzavření vlhkosti do obalu, tak to může způsobit zčernání ochrany. Vzhledem k metodě nanášení není možné přesně kontrolovat tloušťku vrstvy OSP. Ta se později nedá ani přesně změřit, a to může mít za následek nedostatečnou ochranu, je-li vrstva příliš tenká. V případě příliš tlusté vrstvy může docházet ke zhoršení pájitelnosti. [5]

OSP	
Výhody	Nevýhody
Přesný rovinný povrch	Nedá se přesně měřit tloušťka
Nejlevnější povrchové úprava	Velký povrchový odpor
Jednoduché nanášení	Kratší životnost
Snadno dostupné	Nemožnost finální kontroly
Bez olova	Degraduje opakovaným pájením
Opakovatelně pájitelné	Citlivé na manipulaci
Vysoká produktivita	
Nízká cena	

Tab. 6 Výhody a nevýhody OSP [5]

4.1.4 Imersní stříbro

Stříbro bylo zvoleno jako povrchová úprava již od počátku výroby DPS pro svoje výhodné vlastnosti. Je to nejlepší vodič a vykazuje nejmenší kontaktní odpor ze všech kovů. Díky tomu, že patří mezi ušlechtilé kovy, tak je odolnější oproti oxidaci než ostatní. Z počátku stříbro tvořilo dendrity mezi vodiči, avšak postupem času byla tato metoda natolik zdokonalena, že byl růst minimalizován. Tloušťka této vrstvy je mezi 0,1 až 0,4 µm. Samotná metoda nanášení je jednoduchá, avšak musí se hned chránit před poškozením, protože to by mohlo mít za následek korozi. Před nanášením je třeba opět řádné očistit podklad od nečistot. Vrstva se nanáší v posledním kroku výroby DPS, aby nebyla poškozena. Nejčastěji se používají metody stříkání nebo polévání. [5]



Obr. 13 Imersní stříbro

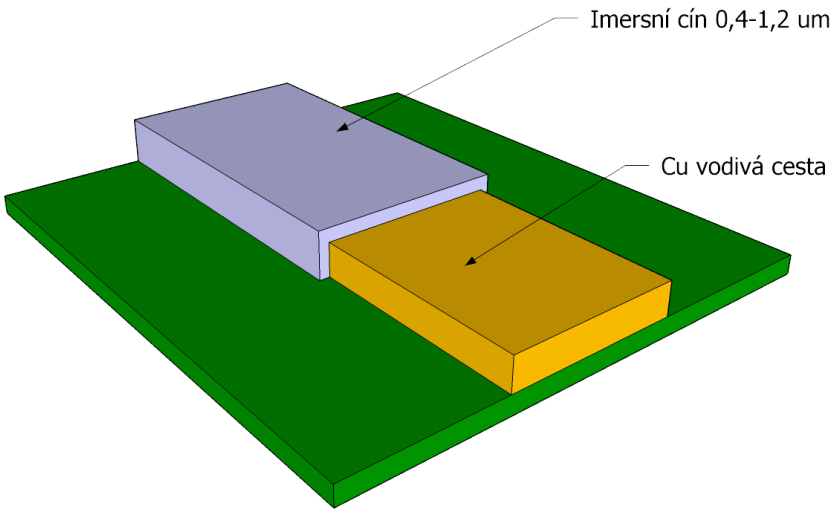
Imersní stříbro

Výhody	Nevýhody
Přesný rovinný povrch	Citlivé na manipulaci
Jednoduchý proces	Vznik mikrovoidů
Snadno dostupné	Poškozená vrstva může korodovat
Bez olova	Možnost poškození rozhraní masky
Opakovatelně pájitelné	
Vysoká produktivita	
Snadné měření tloušťky	
Výborné kontaktní vlastnosti	
Nedegraduje opakovaným pájením	

Tab. 7 Výhody a nevýhody imersního stříbra [5]

4.1.5 Imersní cín

Jedná se o povlak z čistého cínu o tloušťce 0,6 až 1,2 µm. Zajišťuje velice dobrou pájitelnost. Cín vytváří lehce intermetalickou vrstvu s mědí. Vzhledem k životnosti tudíž může ovlivňovat kvalitu pájeného spoje. Nanáší se pomocí galvanického procesu, a to ve vertikální nebo průběžné poloze. Metoda v průběžné poloze na pásu se příliš nepoužívá, protože je konstrukčně složité mít připravenou lázeň, kterou nepřetržitě projíždějí DPS. Proto se spíše používá vertikální nanášení, kde jsou koše s DPS ponořovány do připravené lázně. Linky používané pro nanášení cínu, by měly zůstat vyčleněné pouze pro tuto metodu, protože vylučovaná síra by mohla poškodit ostatní povrchové úpravy. [5]



Obr. 14 Imersní cín

Imersní cín

Výhody	Nevýhody
Přesný rovinný povrch	Citlivé na manipulaci
Levná povrchová úprava	Poškozená vrstva může korodovat
Bez olova	Růst whiskerů
Vysoká přesnost	Degradace s časem a teplem
Znovu pájitelné	Možnost poškození rozhraní masky

Tab. 8 Výhody a nevýhody imersního cínu [5]

4.2. Povrchové úpravy součástek

Od té doby, co se začaly používat bezolovnaté pájky, tak se vyskytly problémy v povrchových úpravách součástek. Prvním problémem je, že se výrobci nesjednotili v označování těchto povrchových úprav, a tudíž v některých případech nemáme možnost rozpoznat, jaká úprava byla použita. To může způsobovat značné problémy v kvalitě spoje, protože zde začnou vznikat interakce mezi jednotlivými materiály. Například reakce bizmutu s olovnatou pájkou vytvoří nízkoteplotní slitinu, která zhoršuje kvalitu spoje. Navíc každá povrchová úprava má své skladovací podmínky a při nedodržení těchto podmínek se může stát nepájitelnou. V poslední době se však většina výrobců začíná přiklánět k povrchové úpravě z matného cínu. Hlavními důvody k volbě této úpravy je její cena, kompatibilita se současnými bezolovnatými pájkami a spolehlivost. Jedinou nevýhodou této úpravy je možnost růstu whiskerů, avšak již jsou zvládnuty postupy, jak je co nejvíce eliminovat. [6]

4.2.1 Povrchová úprava Sn

Jak jsem psal již výše, je to nejvíce používaná povrchová úprava pro své značné výhody. Je velice dobře pájitelná s běžně používanými pájecími pastami, avšak pouze při prvním přetavení. Je vhodná obzvláště pro pasivní součástky a součástky s páskovými vývody. Může vytvářet whiskery. [6]

4.2.2 Povrchová úprava Sn/Ag a Sn/Ag/Cu

Jedná se o dvoj, respektive troj složkovou povrchovou úpravu, díky čemuž je proces jejího nanášení složitější. Používá se většinou pro BGA součástky a její cena je závislá především na množství Ag. Díky obsahu Sn může opět vytvářet whiskery. [6]

4.2.3 Povrchová úprava Sn/Cu

Opět se jedná o dvojsložkovou povrchovou úpravu jako v předchozím případě. Z toho také vyplývá obtížnější proces nanášení této povrchové úpravy. Používá se pro BGA součástky, ale její cena je nízká oproti předchozí, protože neobsahuje Ag. Díky obsahu Sn může vytvářet whiskery. [6]

4.2.4 Povrchová úprava Ni/Au a Pd/Au

Vhodná pro součástky s velmi malými vývody. Díky tomu, že neobsahuje Sn, tak nevytváří whiskery, ale je poměrně drahá díky obsahu Au. [6]

4.2.5 Povrchová úprava HASL

Proces této úpravy je obdobný, jak již bylo popsáno u DPS. Vývody součástky jsou ponořeny do roztavené pájky a po vyjmutí je přebytečná pájka odstraněna horkým vzduchem. Výhodou je, že lze takto ošetřené vývody pájet vícenásobně. Nevýhodou je, že nejsou příliš rovinné, a proto není vhodná pro součástky s velmi malým rozestupem vývodů. [6]

4.2.6 Povrchová úprava Sn/Bi

Jedná se opět o dvojsložkovou povrchovou úpravu, a proto je její nanášení obtížnější. Nevýhodou je, že je bizmut toxický a díky přítomnosti Sn vytváří whiskery. [6]

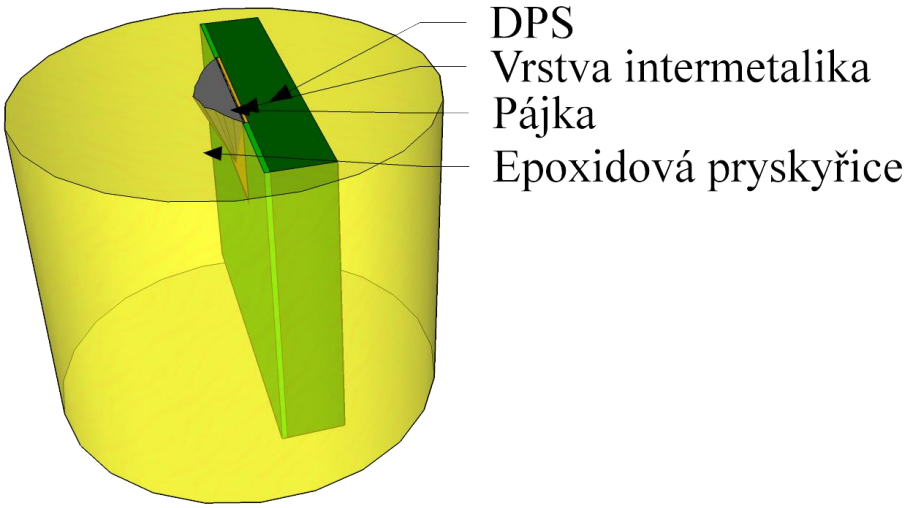
5. Metody pro vyhodnocení intermetalických sloučenin

5.1. Metoda výbrusu

Jedná se o inspekční metodu používanou pro kontrolu DPS během výroby, která nám umožňuje sledovat mnoho faktorů, jako například parametry pokovení, kvalitu vrtání, kartáčování, začištění vrtaných otvorů, napojení vnitřních vrstev mědi na pokovení, tloušťku nepájivé masky, tloušťku pájky nebo také tloušťku intermetalické vrstvy. Je spousta vlastností, které můžeme touto metodou sledovat. Ve výrobě je nejlepší testovat vlastnosti přímo na vzorku dané DPS, když však vyrábíme jednokusovou DPS, tak je vhodné si vyrobit testovací kupóny v okolí desky, které musejí splňovat určité parametry a umožní nám otestovat parametry.

Máme-li stanovené místo, kde chceme výbrus provádět, tak je třeba připravit vzorek. Ten si nejprve vyřízneme z požadované DPS a zabrousíme brusným kotoučem 180. K řezání se používají speciální pilky. Je třeba dodržovat to, aby všechny řezy byly vůči DPS kolmé, aby nám nedeformovaly, výsledný obraz. Takto získaný vzorek je třeba zalít (například do pryskyřice), aby byl připraven pro další broušení. Vzorek umístíme do nádobky, ve které je držák zaručující, že vzorek bude kolmý ke dnu nádobky. Poté do nádobky nalijeme pryskyřici. Buď epoxidovou nebo akrylátovou. Výhodou akrylátové je rychlé tuhnutí, které trvá okolo 30 minut, což ve výrobě může zajišťovat rychlé testování. Její nevýhodou oproti epoxidové je, že nezatýká do drobných dutin. Epoxidová pryskyřice tuhne kolem 24 h. Máme-li vzorek zalitý do pryskyřice, tak přistoupíme k následnému broušení a leštění. To se provádí pomocí speciálních brusných kotoučů, které jsou umístěné na rotační brusce. Tyto kotouče jsou většinou namáčeny vodou a to jednak, aby nevznikal prach a výsledek byl hladší než při suchém broušení. Postupně jsou střídány kotouče s velkou hrubostí až po velmi jemné brusné kotouče. Tím docílíme velice hladkého a rovinného povrchu. Pokud chceme sledovat nějaké méně jemné jevy, tak by nám takto zbroušené vzorky již stačily, avšak pro použití v elektronovém mikroskopu a sledování velmi tenké intermetalické vrstvy, je třeba ještě pokračovat dále, a to s využitím diamantové brusné pasty. Ta se nanáší na filcový kotouč, který ji do sebe absorbuje. V prvním kroku se využívá například sedmimikronová pasta a v druhém kroku jednomikronová pasta. Díky tomu dosáhneme velice hladkého

povrchu. Pro zvýraznění jednotlivých vrstev ještě můžeme aplikovat leptací činidlo. Tímto postupem máme připravené velice precizní a přesné výbrusy vzorků pro elektronový mikroskop. [19]



Obr. 15 Výbrus – DPS zalitá do epoxidové pryskyřice

5.2. Elektronová mikroskopie

Na rozdíl od světelných mikroskopů, které k zobrazení využívají elektromagnetické vlnění ve viditelné oblasti, tak elektronové mikroskopy využívají elektrony. Bylo zjištěno, že elektrony mají nejen korpuskulární, ale i vlnový charakter stejně jako elektromagnetické vlny, tedy světlo. Elektronové mikroskopy místo skleněných čoček využívají čočky elektromagnetické, protože sklo by bylo pro rychle letící elektron bariérou. Z počátku byly objeveny transmisní elektronové mikroskopy a později skenovací elektronové mikroskopy.

Pro vlnovou délku elektronového paprsku platí:

$$\lambda \approx \frac{h}{\sqrt{2\, m_0\, eU}} \qquad (1)$$

Kde λ – vlnová délka elektronů, h – Planckova konstanta, m – hmotnost elektronu, e – náboj elektronu, U – urychlovací napětí.

Dosazením známých konstant dostaneme výsledný vztah pro vlnovou délku:

$$\lambda = \frac{1,226}{\sqrt{U}} \qquad (2)$$

Kde λ – vlnová délka elektronů, U – urychlovací napětí.

Dosadíme-li do výsledného vztahu hodnoty urychlovacího napětí, tak získáme výsledné vlnové délky pro dané typy mikroskopů. U skenovacího mikroskopu je běžná hodnota urychlovacího napětí 10 kV. Pro tuto hodnotu je vlnová délka λ = 0 ,01226 nm. Pro transmisní elektronový mikroskop je

typická hodnota 100 kV. Pro tuto hodnotu je vypočtená vlnová délka $\lambda = 0,0039$ nm. Můžeme si všimnout, že tyto hodnoty jsou mnohonásobně menší oproti vlnové délce světla, která je 500 nm. Díky tomu je zřejmé, že elektronové mikroskopy jsou schopny poskytnout detailnější obraz. Elektronový mikroskop má rozlišení lepší o 2 až 3 řády oproti světelnému, což znamená v řádu desetin nm. To postačuje k zobrazení jednotlivých atomů. Z výše uvedené rovnice tedy vyplývá, že větší rozlišovací schopnost získáme větším urychlovacím napětím. Rozlišovací schopnost může být také zvětšována korekcí vad elektromagnetických čoček.

Nejdůležitější součástí elektronového mikroskopu je zdroj elektronů. Tento zdroj nazýváme elektronová tryska. Abychom uvolnili elektron z atomu, tak mu musíme dodat energii, která je vyšší než jeho vazební energie. To můžeme zajistit těmito způsoby:

- **Sekundární emise –** studené kovové vlákno, které je katodou bombardováno urychlenými ionty. Nárazy iontů zapříčiní uvolnění elektronů. Dnes se již tato metoda příliš nevyužívá.
- **Termoemise –** zahříváním katody dojde ke zvýšení energie. Když toto zahřátí překročí jistou mez, tak dojde k uvolňování elektronů.
- **Autoemise –** Proti hrotu umístíme elektrodu, která má vysoké kladné napětí, což způsobí vznik silného elektrického pole v okolí hrotu, které z něj vytrhává velké množství elektronů.

Účinnost emise elektronů lze zvýšit vytvarováním hrotu do tvaru písmene V. Většinou se katoda vyrábí z wolframu a používá se při pracovní teplotě 2 800 K. Nevýhodou wolframu je nižší životnost. V dnešní době je již rozšířená katoda z LaB_6. Ta má až 10 x větší emisi elektronů a mnohonásobně větší životnost.

Další nedílnou součástí elektronového mikroskopu je elektromagnetická čočka. Ta je většinou ve tvaru Solenoidu. Skládá se z cívky s velkým počtem závitů. Uvnitř takto vytvořené cívky vzniká téměř homogenní magnetické pole. Trajektorie elektronů vstupujících do čočky je spirálová. Změnou magnetické indukce dochází ke změně ohniskové vzdálenosti, čímž lze ovlivňovat zaostření čočky. Vlivem průchodu proudu dochází k jejímu zahřívání, a proto je třeba elektromagnetické čočky chladit. Vzhledem k tomu, že není elektromagnetické pole úplně homogenní, tak může docházet k vadám.

Protože elektronový mikroskop pracuje s velmi malými částicemi, tak je třeba, aby bylo v tubusu vakuum. To je zde ze dvou hlavních důvodů:

- Díky tomu, že vzduch není ideální izolant, tak by mohlo dojít ke vzniku výboje mezi katodou a anodou.
- Kvůli obsahu molekul O_2, N_2, CO_2 může dojít ke kontaminaci tubusu a vzorku.

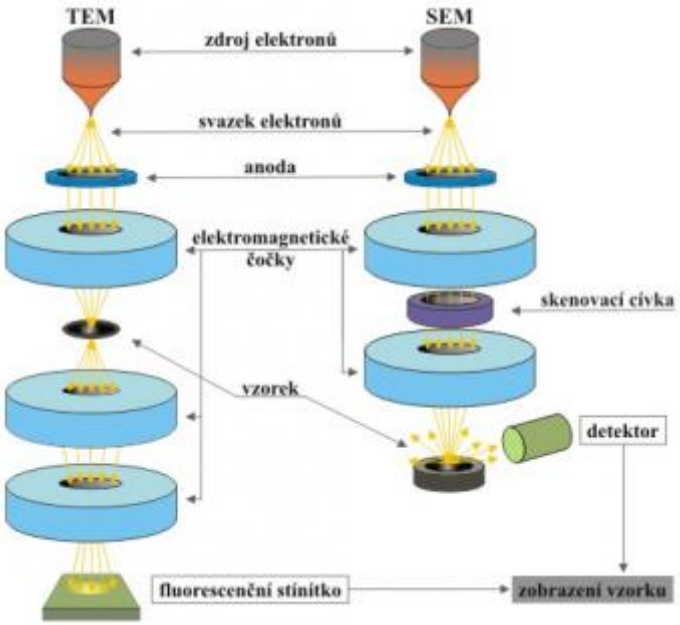
Vlivem částic obsažených ve vzduchu by mohlo docházet ke srážkám, které by způsobily změnu energie a směr pohybu elektronů. To by mělo za následek nemožnost pozorování vzorku. Aby se dosáhlo dostatečného vakua (10^{-3} až 10^{-5} Pa), tak je třeba řadu vývěv, které to umožní. Máme rotační,

difúzní, iontové a turbomolekulární vývěvy. Používají se v několika krocích pro dosažení co nejlepšího výsledku. Jako první se používá rotační a poté se postupuje dále. [20]

Transmisní elektronový mikroskop využívá k vytvoření viditelného obrazu fluorescenčního stínítka. Elektrony, které projdou skrz nebo difraktují na sledovaném vzorku, vytvoří na stínítku obraz. Proto musí být vzorek velmi tenký, přibližně 1 μm, v opačném případě by způsoboval pohlcování elektronů. Obraz prošlých elektronů je pomocí objektivu a projektivu zvětšen a směřován na stínítko. [21]

Skenovací elektronový mikroskop využívá k vytvoření viditelného obrazu odražených paprsků od zkoumaného vzorku. Pomocí clony, která vybere pouze určitý svazek elektronů a projekční čočky, je postupně celý povrch vzorku skenován. To znamená, že postupně svazek projede přes všechny body vzorku. Tyto odražené elektrony jsou převáděny na viditelný obraz pomocí detektoru. Rozlišujeme 4 druhy elektronů, které opouštějí povrch materiálu:

- **Zpětně odražené elektrony –** poskytují informaci o reliéfu a složení vzorku. Umožňují rozlišovací schopnost 50–200 nm.
- **Sekundární elektrony –** poskytují informaci pouze o reliéfu. Umožňují rozlišovací schopnost 5 -15 nm.
- **Augerovy elektrony –** Tyto elektrony jsou vyráženy ze vzorku a pomáhají nám získat informace o materiálovém složení.
- **Primární elektrony –** Detekují se u transmisního mikroskopu po průchodu materiálem. Pro další získání informací o vzorku můžeme sledovat RTG záření a viditelné světlo. [21]

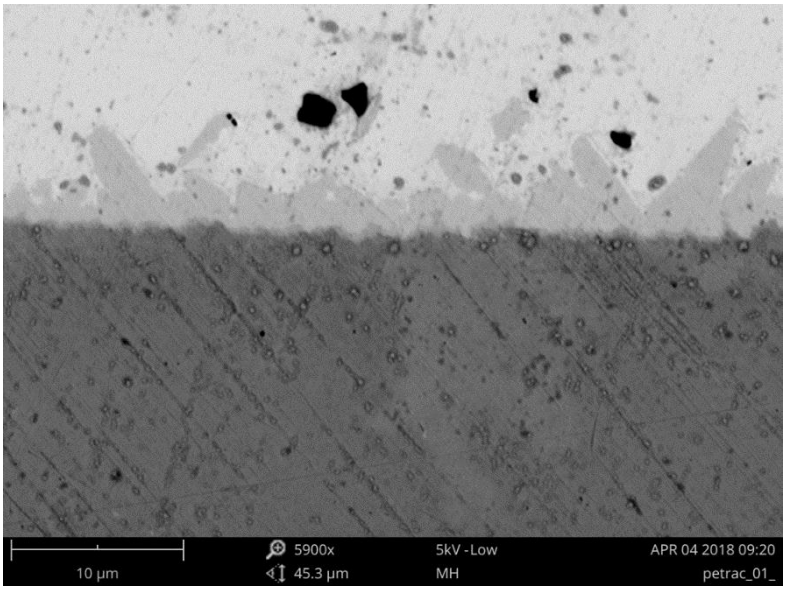


Obr. 16 Porovnání elektronových mikroskopů [29]

5.3. Měření tloušťky intermetalické vrstvy

Metoda měření tloušťky intermetalické vrstvy vychází z analýzy snímků z elektronového mikroskopu. Ty je třeba nejprve co nejlépe nasnímat, aby byly výrazné kontrasty mezi jednotlivými vrstvami. Bez tohoto kroku by nebylo možné přesně určit tloušťku intermetalické vrstvy, protože by nebylo zřejmé, kde končí. Nesmí být opomenuto také měřítko nasnímaného obrázku, které nám poslouží při následném vyhodnocování tloušťky.

K následné obrazové analýze byl zvolen program NIS-Elements, sloužící k výběru oblasti s intermetalickou sloučeninou a poté program BitmapCounter, který jsem vytvořil a slouží k výpočtům. První jmenovaný obsahuje velké množství funkcí sloužících k obrazové analýze, ale pro mé potřeby byla nejdůležitější funkcí ta, která slouží k označování. Je zde možnost automatického i ručního výběru.



Obr. 17 Snímek z elektronového mikroskopu

Důvodem, proč jsem zvolil právě tento program, je jeho velice dobře fungující automatický výběr, který oproti jiným programům umí správně rozeznat požadovanou oblast, což velice usnadňuje práci. Pomocí nástroje výběru, lze požadovanou oblast označit a následně ji lze ještě zpřesnit, dle potřeby. V případě, když není oblast označena celá správně, tak lze pomocí ručního výběru danou oblast zvětšovat či zmenšovat. Další důležitou funkcí, která byla potřebná pro výpočet tloušťky intermetalické vrstvy, je přepočet měřítka. Pomocí této funkce lze označit měřítko a získat jeho délku v pixelech. Při použití mikroskopu PHENOM ProX, kde na snímku délka 10 µm odpovídá 190 pixelům, je přesnost zhruba ± 0,052 µm, což je pro potřeby této analýzy naprosto postačující, protože tloušťky intermetalických sloučenin se pohybují kolem 2 až 5 µm. Posledním krokem potřebným pro získání obrazu, který bude zpracovatelný v dalším programu, je převod na binární soubor, kde v černých oblastech budou 0 a v bílých 1. Takto získaný obraz musí být uložen jako bitmap.

Další možností pro vytvoření potřebného binárního souboru je použít nástroj jako například Adobe Photoshop, Gimp nebo ImageJ. Všechny tyto programy umožňují označení dané oblasti, kde ji poté můžeme vyplnit bílou barvou a okolí černou, čímž získáme opět bitmapový soubor pouze s dvěma úrovněmi. Adobe Photoshop má zřejmě ze všech tří uvedených nejlepší výběrový nástroj zvaný nástroj pro rychlý výběr. Pomocí něj lze danou oblast označovat postupně a následně ji ještě zpřesňovat.

Obr. 18 Výstupní soubor z programu NIS-Elements

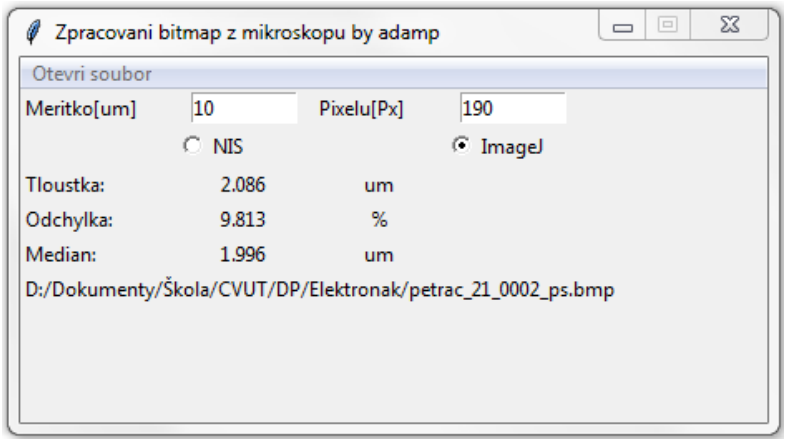
Přichytávání k hranám zde funguje velice dobře. Následně již stačí danou oblast vyplnit bílou barvou a okolní oblast černou. Tento program lze stáhnout ve třicetidenní zkušební verzi, která je pro dané účely dostačující. Gimp již není tolik sofistikovaný, ale v některých případech je dobrou náhradou za Photoshop, avšak jedná se zcela o freeware. Posledním jmenovaným je ImageJ [22], kde označení oblasti probíhá odlišně. Nejprve je třeba obraz zmenšit co nejvíce k intermetalické vrstvě a poté pomocí nástroje treshold vybereme daný odstín šedé. Tím máme přibližně vybranou oblast a poté již stačí nevhodná místa překrýt černou barvou. Výstupem ze všech tří výše uvedených programů je, oproti NIS-Elements, 8 bitový bitmapový soubor, což znamená, že zde nemáme pouze logické hodnoty 1 a 0, ale 255 a 0. Na toto nesmíme poté zapomenout při výpočtech. Tato metoda byla použita pouze u vzorků, kde nebyl dostatečně ostrý rozdíl mezi rozhraními, aby ho mohl poznat NIS-Elements.

Pro výpočet průměrné tloušťky intermetalické vrstvy jsem napsal program v jazyce Python. Vstupním souborem je již výše zmíněný bitmapový soubor, který je možné v programu vybrat a otevřít pomocí dialogového okna. Následně je soubor převeden na pole, kde jsou jednotlivé pixely reprezentovány svými binárními hodnotami, tedy 1 a 0, nebo hodnotami 255 a 0, v případě programů Photoshop, Gimp a ImageJ. Dále tedy již se souborem program pracuje pouze jako s polem. V dalším kroku je třeba udělat součty jednotlivých sloupců pole, abychom získali tloušťku intermetalické vrstvy. Vzhledem k tomu, že šířka obrázku je 1024 pixelů, tak se v poli vyskytuje 1024 sloupců a díky tomu je výsledná tloušťka průměrem 1024 hodnot. Dále jsem přidal do programu výpočet směrodatné odchylky a mediánu. Výhodou Pythonu je, že počítá směrodatnou odchylku ze všech zadaných hodnot a nesnaží se oproti jiným programům vybrat jen určité hodnoty, které nejlépe charakterizují daný vzorek. V případě analýzy profilu intermetalické vrstvy je to důležité, protože nás zajímá členitost povrchu v celém rozsahu, aniž by byly vypuštěny některé hodnoty. Poté nesmíme zapomenout, že sice v prvním

případě jsou výsledné hodnoty v pixelech, ale v druhém případě je musíme vydělit 255. Získané hodnoty průměrné tloušťky a mediánu jsou po výpočtech v pixelech, a proto je tedy třeba přepočítat hodnoty na mikrometry. K tomu nám slouží změřená délka měřítka v pixelech pomocí programu NIS-Elements. Tudíž při známém měřítku v pixelech a mikrometrech není již problém vypočtené hodnoty přepočíst na mikrometry.

Nejprve jsem program využíval v režimu terminálu, kde byly výstupní hodnoty pouze textového charakteru, ale poté jsem pro snadnější reprodukovatelnost a jednodušší použití přešel k vytvoření grafického rozhraní. V jazyce Python je pro tvorbu grafického rozhraní jednoduchá knihovna Tkinter, která umožňuje skládání pomocí jednotlivých bloků. Rozhraní jsem rozdělil do čtyř základních částí, aby bylo ovládání co nejvíce jednoduché. V první se nachází tlačítko sloužící k výběru souboru. Po stisku tlačítka se otevře systémové okno pro výběr souboru. Po vybrání souboru a otevření v programu již dojde k samotnému výpočtu. Druhou částí programu jsou dvě textová pole, do kterých zadáváme přepočetní konstanty z pixelů na mikrometry. Další částí je výběr programu, ve kterém byl vstupní soubor vytvořen. Je to kvůli hodnotám, které reprezentují černou a bílou barvu, jak jsem psal již výše. Je zde volba programu NIS a ImageJ, který reprezentuje druhou skupinu. Poslední a také nejdůležitější částí je výpis vypočtených hodnot, kde jsou tyto hodnoty zaokrouhleny na tři desetinná místa. Průměrná tloušťka a medián se zobrazují v mikrometrech a standardní odchylka v procentech. Program je zkompilován jako samostatně stojící aplikace, tudíž není potřeba mít na svém počítači nainstalovaný Python.

Poté již stačí získaná data zpracovat v programu Excel pro porovnání jednotlivých vrstev. Tato metoda je mnohem přesnější oproti měření tloušťky pomocí několika zvolených bodů. Dochází zde k výpočtu průměrné tloušťky v celé šířce zaznamenaného obrazu, což v mém případě znamená průměrování z 1024 hodnot. Tím získáme lépe vypovídající výsledky. Můžeme si z *Obr. 18 Výstupní soubor z programu* NIS-Elements všimnout, že se na intermetaliku vyskytují výstupky, které by jednotlivá měření mohly značně ovlivnit, kdežto u mnou použité metody, jsou tyto výběžky zprůměrovány se zbytkem vrstvy.

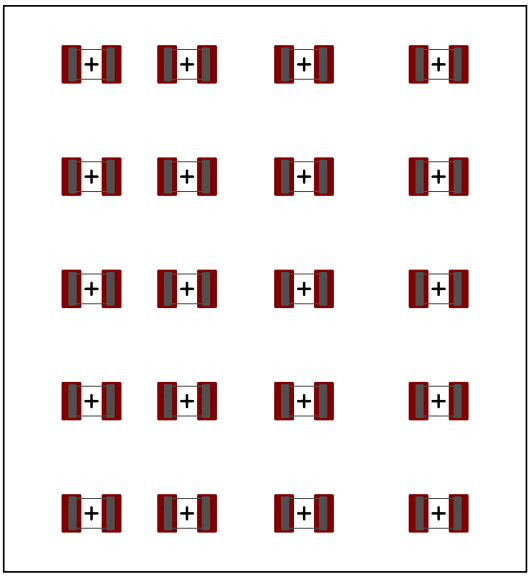


Obr. 19 Program BitmapCounter

6. Výroba vzorků

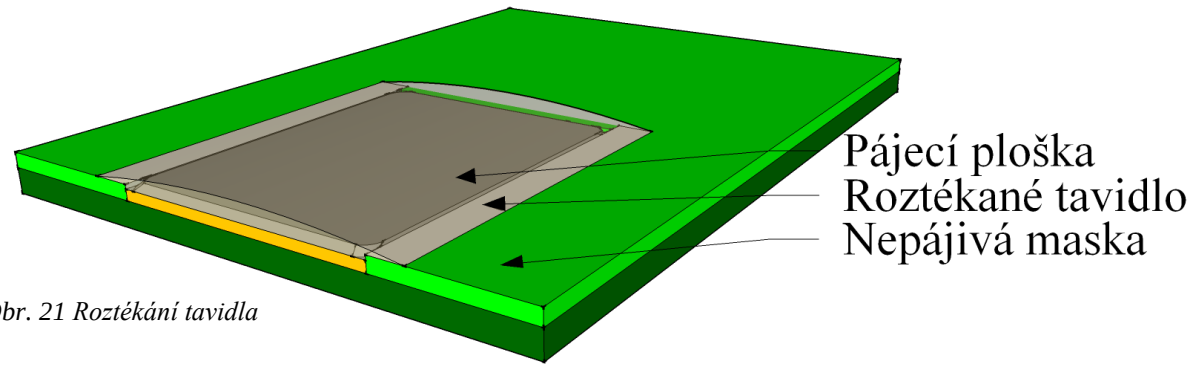
Použité desky plošných spojů byly původně navržené pro analýzu voidů, a proto se vyznačují jistými specifiky, která v mém případě nebudou na škodu, ale ba naopak mi umožní analyzovat vlivy, které ještě analyzovány řádně nebyly. Deska obsahuje 20 pájecích umístění (40 pájecích plošek) pro SMD součástky velikosti pouzdra 1812. V mém případě bylo pro analýzu využito 8 pájecích plošek bez osazených součástek z dané DPS, respektive 4 pájecí plošky pro každou kombinaci, bereme-li v úvahu analýzu vlivu druhého přetavení DPS.

Pro danou DPS byly zvoleny dva druhy nepájivé masky. Bílá, která je lesklá a černá, která je matná. Nepájivé masky se vyznačují především rozdílnou drsností, která by mohla mít vliv na vznik



Obr. 20 Vzor použité DPS

intermetalických sloučenin díky vlivu rozdílné roztékavosti tavidla. Je to způsobeno tím, že při zahřátí pájecí pasty, začne docházet k roztékání tavidla do okolí pájecí plošky. Úroveň roztékání závisí na volných energiích jednotlivých povrchů. Tyto energie jsou reprezentovány povrchovým napětím působícím podél povrchu. [11] V závislosti na tom, jak moc se uvolňuje tavidlo z pájecí pasty, tak mohou rozdílně narůstat intermetalické sloučeniny. Což je jedním z mých cílů analýzy vzorků.



Obr. 21 Roztékání tavidla

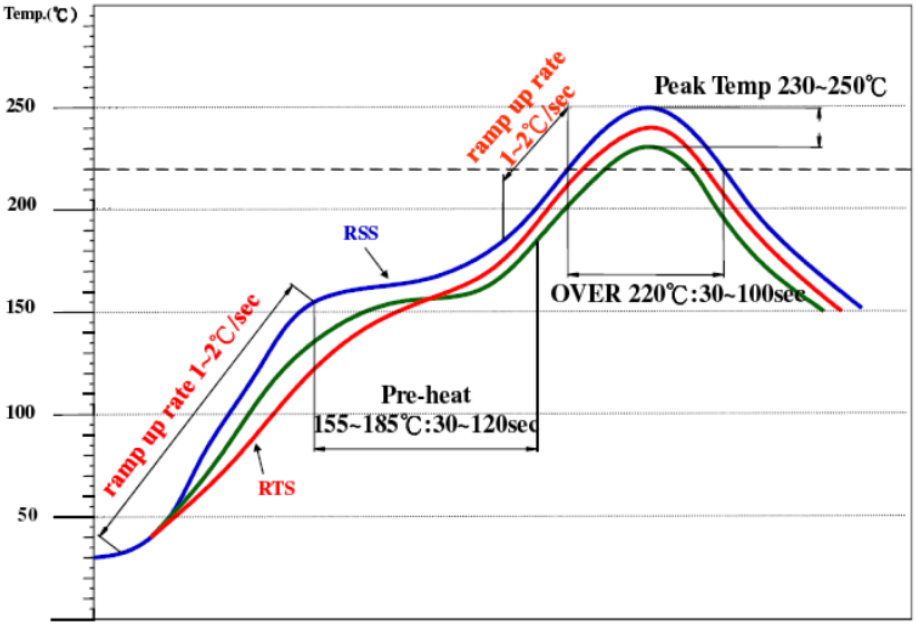
Drsnost daných nepájivých masek byla měřena pomocí Talystepu. Byl měřen parametr Ra, který představuje hodnotu největší střední aritmetické výšky nerovnosti. Naměřené hodnoty drsnosti jsou:

- Bílá maska (lesklá) Ra = (0 ,474 ± 0 ,059) μm
- Černá maska (matná) Ra = (0 ,903 ± 0 ,068) μm

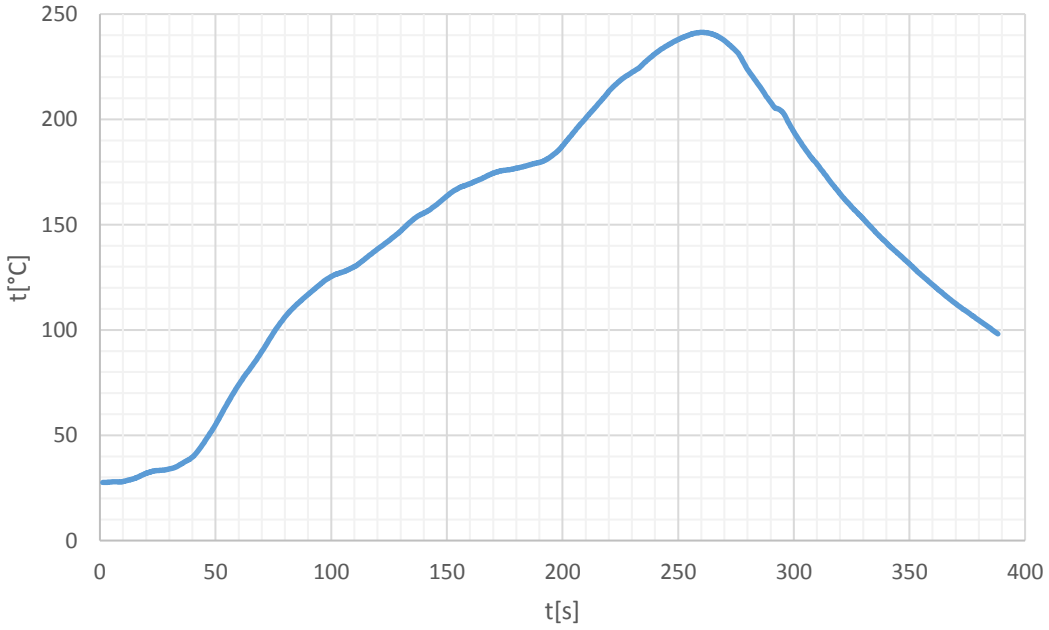
U daných desek jsou také použity tři povrchové úpravy pájecích plošek. Zvolen byl HASL, ENIG a OSP. Tyto tři byly zvoleny z důvodu své rozdílnosti, která má vliv na vznik intermetalických sloučenin, jak jsem se již přesvědčil ve své bakalářské práci. Nejtenčí intermetalická vrstva vzniká u ENIGu, protože se zde nachází vrstva niklu, která zabraňuje difúzi. Díky tomu nedochází k tak velkému rozpouštění materiálů a nevzniká tudíž tak silná intermetalická vrstva. Dále na to má také vliv, že zde není od počátku žádná intermetalická vrstva jako v případě HASLu. U OSP vznikala intermetalická vrstva o tloušťce mezi ENIG a HASL. Je to způsobeno tím, že se zde nevyskytuje žádná počáteční vrstva jako u HASL, ale zde také není žádná bariéra, která by bránila rozpouštění jednotlivých materiálů. Nejsilnější vrstva se vyskytuje u povrchové úpravy HASL. Vychází to již ze samotného principu vytváření této povrchové úpravy, kdy je na měděnou pájecí plošku nanesena pájka a seříznuta horkovzdušným nožem. Již při tomto procesu dojde k vytvoření jisté intermetalické sloučeniny. Intermetalikum pak dále narůstá při vlastním procesu pájení. Rozdíly mezi jednotlivými povrchovými úpravami jsou zřetelné, protože tloušťka je u HASL trojnásobná oproti ENIGu. [23] V mé bakalářské práci byla použita pouze jednoduchá metody měření intermetalických sloučenin, kde bylo využito nástroje přímo z aplikace elektronového mikroskopu. Nyní díky použití sofistikované metody měření, která umožňuje průměrovat tloušťku z celého snímku, může být dosaženo rozdílných výsledků.

Byly použity dva druhy pájecí pasty, které se liší hlavně použitým tavidlem. Obě jsou od výrobce Shenmao technology řady Nevo. Jde o pájecí pasty PF606-P30 a PF606-P. Obě obsahují složení kovů Sn/Ag3,0 /Cu0,5. Pajecí pasty se liší pouze použitým tavidlem, kde PF606-P30 obsahuje ROL0 a PF606-P ROL1. Obě tavidla jsou složena z kalafuny, kde ROL0 obsahuje méně než 0,05 % halidů a ROL1 méně než 0 ,5 % halidů. Množství 0,05 % se někdy považuje za bezhalidové. Daného tavidla je v pastě obsaženo v obou případech 11,5 ± 1 % hmotnosti. Výrobce udává teplotu přetavení kolem 217 °C a 219 °C. Výrobcem je doporučován následující teplotní profil, viz obrázek 22. Doba předehřátí (Pre-heat) by mněla trvat 30-120 sekund a měli bychom dosáhnout teploty 155-185 °C. Teplotě nad 220 °C (Over 220 °C) bychom měli pájku vystavit alespoň na 30-100 sekund. Vrcholová teplota (Peak temp) by měla být 230-250 °C. Teplota by měla růst s krokem 1–2 °C/s a klesat 1–6 °C/s. [24] Tento teplotní profil byl poměrně dobře dosažen při pájení čehož si můžeme všimnout dle obrázku

23. Vrcholová teplota byla 241,2 °C a nad 220 °C byla pájka vystavena po dobu 55,5 sekund. Teplota byla měřena přímo na pájecí plošce.



Obr. 22 Teplotní profil od výrobce [24]



Obr. 23 Průběh přetavení

Pájecí pasta byla na DPS nanesena pomocí šablonového tisku. Šablona pro tento způsob nanášení byla vyrobena laserovou technologií. Jedná se o jednu z vůbec nejpřesnějších metod. Velikost otvoru a tloušťka plechu nám udává množství pájecí pasty, která následně na plošce zůstane. V našem případě byl tento otvor o velikosti 1,78 mm x 3,5 mm a tloušťka plechu 100 µm. Motiv je vytvořen na

kovové planžetě se speciálními otvory, které umožňují její uchycení do Screen printeru[2]. Nejtěžším krokem je poté správně umístit DPS pod motiv šablony, aby spolu lícovaly všechny otvory a pájecí plošky. Když dosáhneme přesného slícování, tak dojde k nanesení pájecí pasty pomocí těrky. Ta musí být nanášena rovnoměrným pohybem v jednom směru, aby došlo ke správné depozici pájecí pasty na DPS.

Po nanesení pájecí pasty následovalo přetavení pájecí pasty v peci. V mém případě byla využita horkovzdušná pec Mistral 260, která umožňuje nastavení tří teplotních zón. První dvě slouží k předehřevu a třetí k samotnému přetavení. Rychlost posuvu DPS byla zvolena na 15 cm/min. Je to z toho důvodu, aby nebyl příliš strmý nárůst teploty a DPS se stihla řádně prohřát. Na výstupu z pájecí pece jsou ventilátory, které nám zajišťují ochlazení DPS, aby mohla být bezpečně vyjmuta. Vzhledem k potřebě dvojnásobného přetavení byla část vzorků přetavena se stejným nastavením ještě jednou. Nakonec byly desky rozřezány a připraveny pro výbrusy.

7. Měření a vyhodnocení výsledků

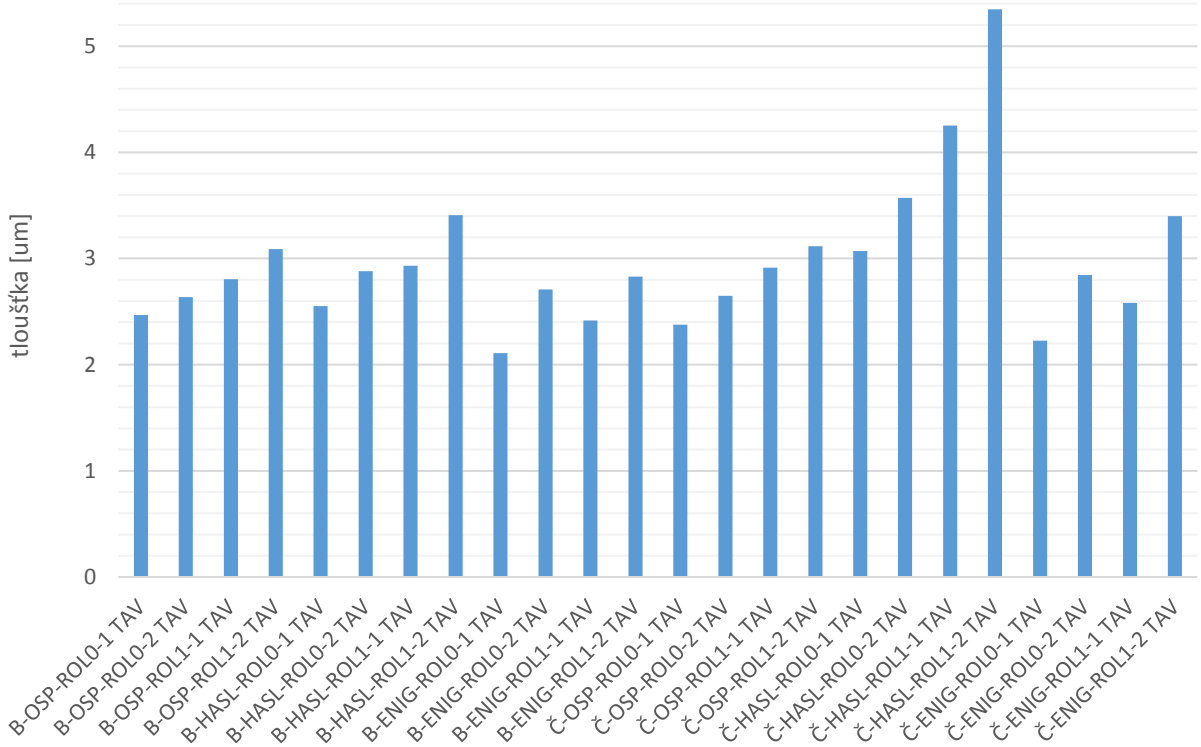
Provedl jsem analýzu výbrusů vzorků popsaných výše. Jedná se tedy o kombinaci tří povrchových úprav pájecích plošek, dvou pájecích past s rozdílným tavidlem a prvního a druhého přetavení. Pro každou kombinaci byly zkoumány tři pájecí plošky pro přesnější výsledky. Díky tomu jsem získal 24 sad vzorků. Především na nich chci ověřit správnost výsledků z mé bakalářské práce, kde jsem zkoumal vliv povrchových úprav pájecích plošek. Dále bych se chtěl zaměřit na vliv použitého tavidla na tloušťku intermetalické vrstvy. Následovat bude vyhodnocení vlivu počtu přetavení a v neposlední řadě chci prozkoumat, jak použitá nepájivá maska ovlivňuje intermetalickou vrstvu. Vyhodnocení výsledků budu provádět na základě odměřené a vypočtené průměrné tloušťky intermetalické vrstvy. Dále k vyhodnocení členitosti povrchu intermetalické vrstvy použiji směrodatnou odchylku, která mi říká, jak se od sebe jednotlivé hodnoty sloupců pixelů liší, což přímo vypovídá, jak se od sebe liší jednotlivé tloušťky intermetalické vrstvy.

7.1. Vliv různých povrchových úprav

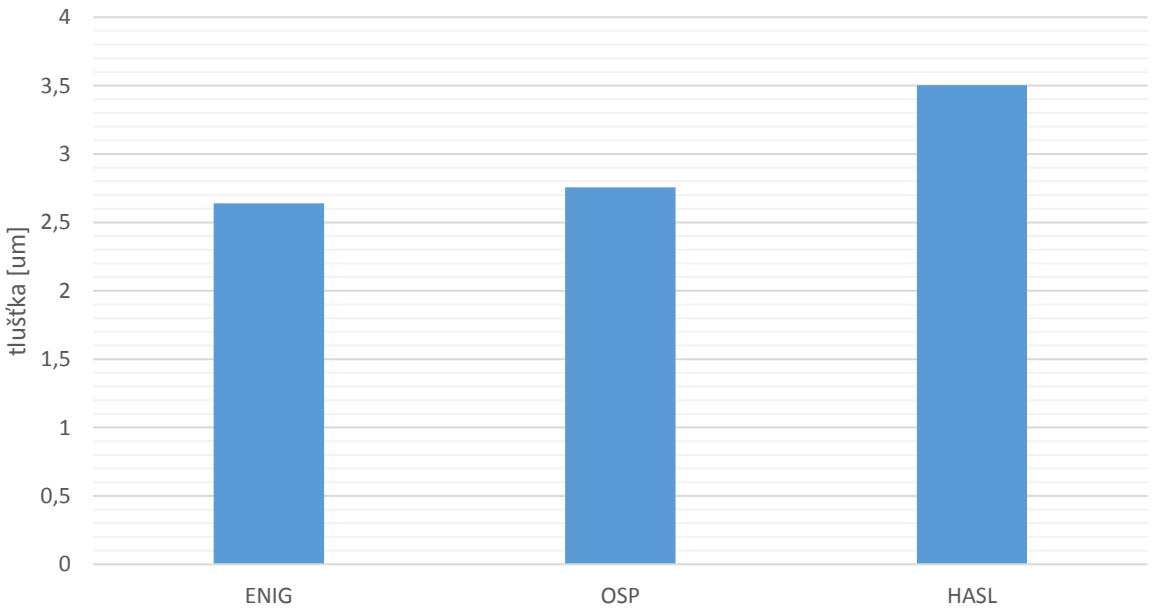
V této kapitole se zaměřím na vyhodnocení vlivu tří povrchových úprav, na tloušťku a členitost povrchu intermetalické vrstvy. Jedná se o povrchové úpravy ENIG, OSP a HASL. Tomuto tématu jsem se již věnoval ve své bakalářské práci, avšak s použitím jiné metody měření, tudíž nyní chci své výsledky potvrdit s použitím přesnější metody, která bere v potaz celou plochu. V následujících grafech jsou použity zkratky kde: B – bílá maska, Č – černá maska, OSP – povrchová úprava OSP, HASL, povrchová

[2] Screen printer – název stroje, který umožňuje držení šablony a DPS

úprava HASL, ENIG – povrchová úprava ENIG, ROL0 – tavidlo ROL0, ROL1 – tavidlo ROL1, 1 TAV – vzorky po prvním přetavení, 2 TAV – vzorky po druhém přetavení.



Graf 1 Průměrná tloušťka intermetalické vrstvy



Graf 2 Průměré hodnoty tlouštěk pro dané povrchové úpravy

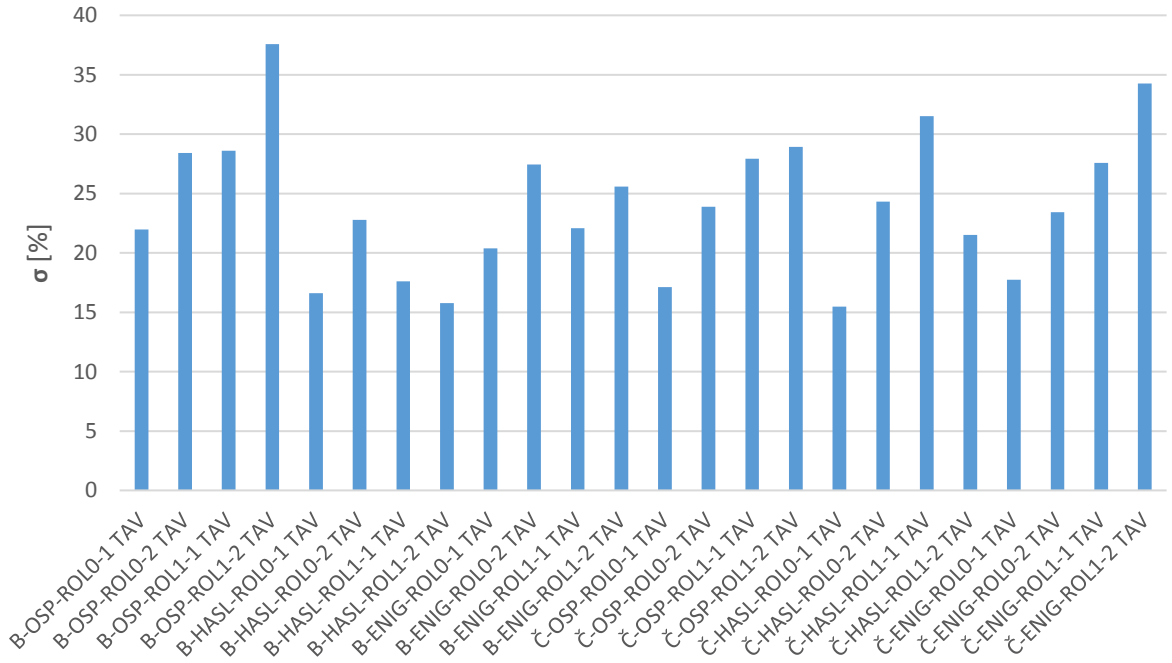
Z grafu 2 si můžeme všimnout, že nejtenčí intermetalická vrstva se vytváří u povrchové úpravy ENIG, silnější je u OSP a nejsilnější je u HASLu. Graf 2 je přesnější a více vypovídá o skutečné síle intermetalické vrstvy. Zatímco graf 3 nám zobrazuje průměrné hodnoty všech kombinací pro danou

povrchovou úpravu, což nám usnadňuje přehled oproti předchozímu. Můžeme si všimnout, že vrstvy u ENIGu a OSP se příliš neliší oproti HASL, který je mnohem silnější.

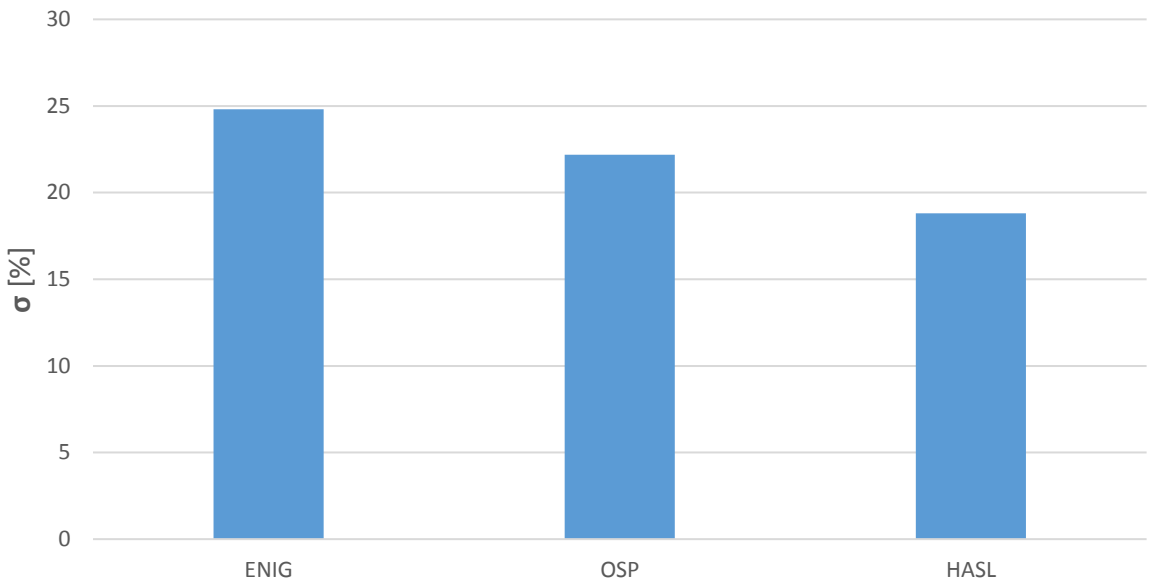
U povrchové úpravy ENIG je malá tloušťka intermetalické vrstvy dána již samotnou strukturou. Na mědi se nachází vrstva niklu a na té je vrstva zlata. Díky tomu se v místě pájeného spoje nenachází žádná intermetalická vrstva ještě před samotným nanesením pájky a zapájením, protože nikl s mědí ani zlatem takovouto vrstvu nevytváří. Během pájení dochází k rozpouštění zlata do pájky a jako difúzní bariéra zde zůstane vrstva niklu. Ta omezuje difúzi a díky tomu pak nedochází k přílišnému rozpouštění základních materiálu. Vrstva niklu tedy zabraňuje přílišnému nárůstu intermetalické vrstvy a ta je proto nejtenčí ze všech tří testovaných.

Oproti tomu se u povrchové úpravy OSP žádná takováto difúzní bariéra nenachází. Během pájení dojde k odplavení organické vrstvy, která zde tvoří ochranu proti oxidaci a pak již nic nebrání tomu, aby mohla započít difúze základních materiálů. Ta má za následek rozpouštění základních materiálů a vytváření intermetalické sloučeniny. Výhodou je, že se zde nenachází intermetalická sloučenina ještě před samotným nanesením a přetavením pájecí pasty, a proto není výsledná intermetalická vrstva tak silná jako u HASL.

Povrchová úprava HASL vykazuje nejsilnější intermetalickou vrstvu ze všech tří testovaných. Je to způsobeno samotným principem výroby této vrstvy, kdy se DPS nejprve ponoří do roztavené pájecí slitiny, která je posléze zarovnána horkými noži. Je to podobný princip jako, když dojde k několikanásobnému přetavení. Při vlastním procesu pájení pak dochází k nárůstu intermetalické vrstvy. Dále se zde nevyskytuje žádná difúzní bariéra, která by mohla nárůstu bránit, jako je to mu u ENIGu.



Graf 3 Směrodatná odchylka popisující reliéf intermetalické sloučeniny



Graf 4 Průměrné směrodatné odchylky pro jednotlivé povrchové úpravy

Reliéf povrchu intermetalické sloučeniny vykazuje přesně opačný jev než u její tloušťky. Graf 5 je opět pouze pro usnadnění čtení směrodatné odchylky mezi jednotlivými povrchovými úpravami. V Grafu 4 se jsou viditelné další závislosti, které pro toto posouzení nejsou důležité, a proto si pro stručný přehled vystačíme s Grafem 5.

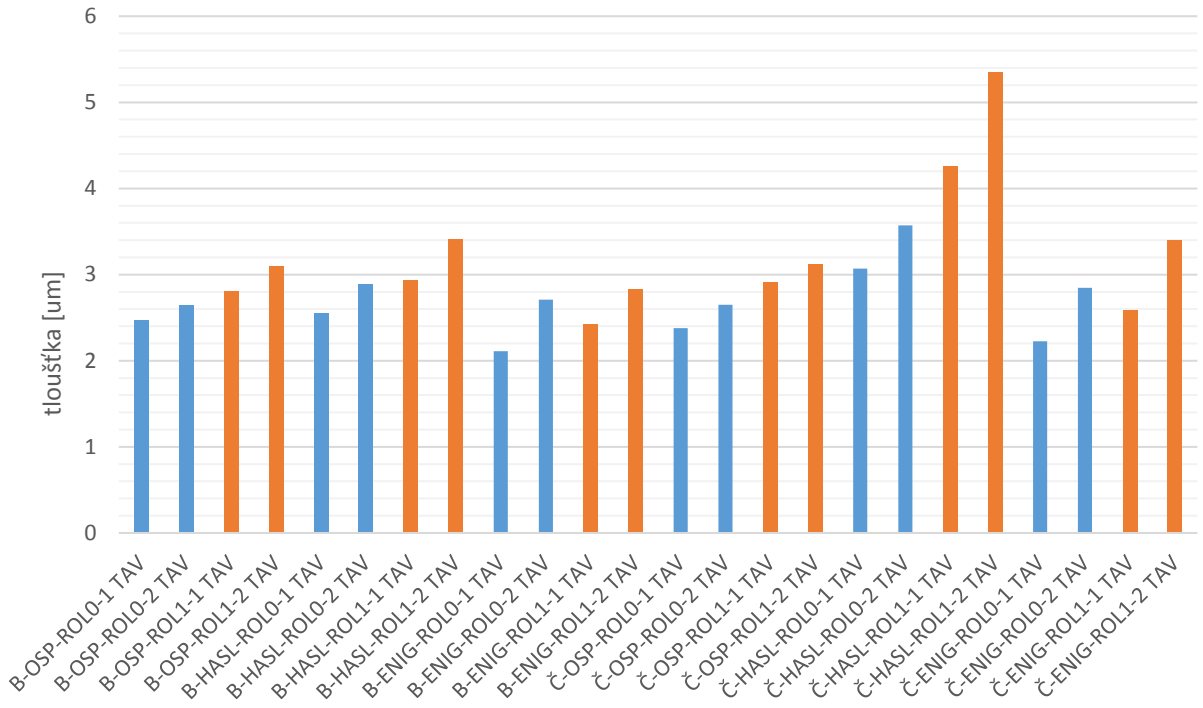
Zde si můžeme všimnout, že nejvíce členitý povrch vykazoval ENIG, kde se projevuje tenká vrstva intermetalika. Díky tomu, že je tato vrstva tak tenká, tak je hodně členitá se spoustou výběžků. Je to způsobeno tím, že vrstva niklu zabraňuje jejímu nárůstu, a proto může růst jen v určitých místech a tím vytváří členité výběžky.

Druhou úpravou v pořadí, co se týče členitosti je OSP. Je to způsobeno tím, že se jedná o nově vzniklé intermetalikum, které ale nedorostlo do takové tloušťky, aby mohlo vytvořit ucelenou vrstvu.

Nejvíce rovinnou a zároveň nejsilnější vrstvu intermetalika vykazuje HASL. Je to způsobeno tím, že se zde již před samotným nanesením pasty a přetavením nacházela intermetalická sloučenina. Po jejím opětovném zahřátí dochází k jejímu nárůstu, který již více vyplňuje mezery mezi původními výběžky, kde toto nakonec vytvoří hladší celistvější povrch.

7.2. Vliv použitého tavidla

V následujícím kroku zhodnotím vliv použitého tavidla na tloušťku intermetalické vrstvy. V mém případě byly na vzorkách použity pájecí pasty PF606-P30 s tavidlem ROL0 a PF606-P. První jmenovaná obsahuje tavidlo ROL0, které obsahuje méně než 0 ,05 % halidů a druhá ROL1, která obsahuje méně než 0 ,5 % halidů. Sice obě tavidla vykazují nízkou aktivitu, přesto je ale ROL1 agresivnější.

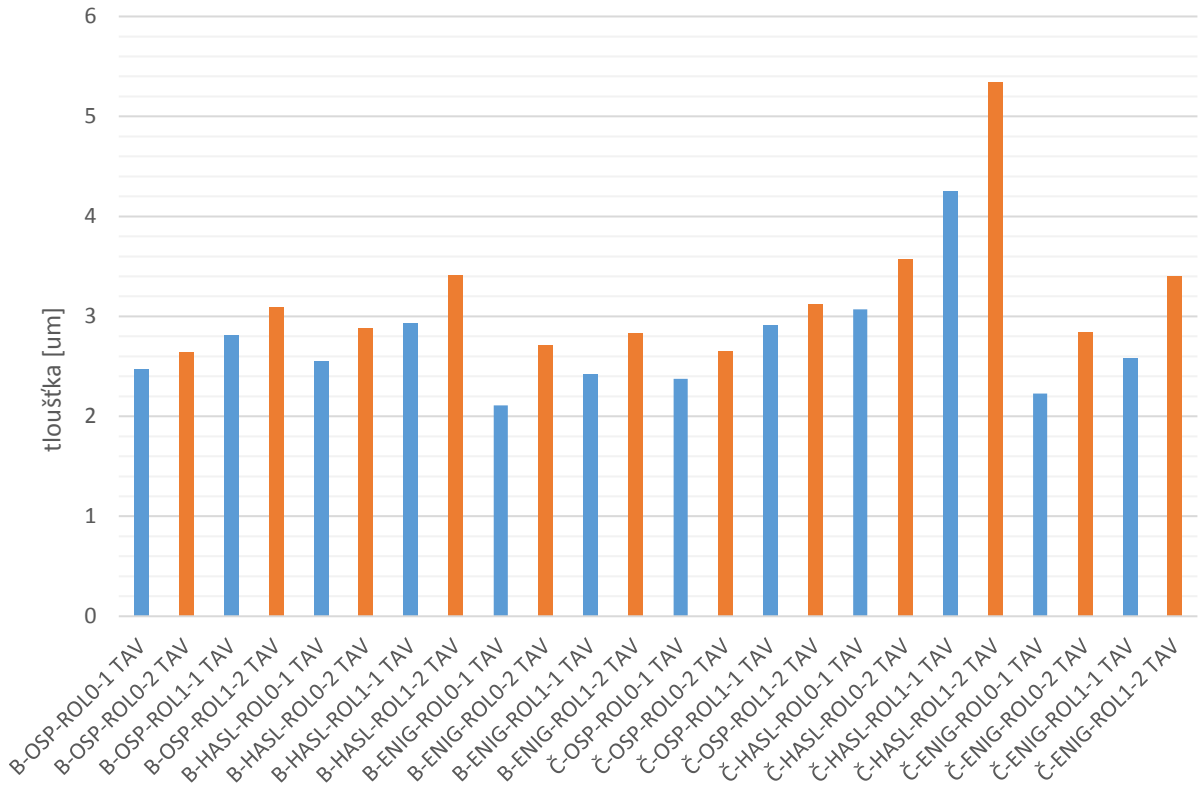


Graf 5 Porovnání použitého tavidla pro jednotlivé případy

Z grafu výše si můžeme všimnout, že ve všech případech, jak různé povrchové úpravy, tak různého počtu přetavení nebo různé nepájivé masky, byla vždy intermetalická vrstva silnější při použití pájecí pasty s tavidlem ROL1, tedy tím agresivnějším. Díky větší aktivitě tohoto tavidla dochází k lepšímu očištění a smáčení povrchů, díky čemuž na sebe mohou lépe působit základní kovy na pájecí plošce a v pájce. Vlivem větší aktivity dochází k lepšímu odstranění oxidů z povrchu mědi, které by v opačném případě tvořily difúzní bariéru, která by zabraňovala roztékání kovů. Dalším důvodem, proč je intermetalická vrstva silnější při použití agresivnějšího tavidla je, že vlivem lepšího smáčení dochází k lepšímu roztékání pájky, která může na druhý materiál působit ve větší ploše a po delší dobu. Díky těmto efektům dochází k většímu nárůstu intermetalické vrstvy. Rozdíl v tloušťce není zanedbatelný a je proto třeba dbát na správný výběr pájecí pasty, protože špatná volba by mohla ovlivnit výslednou kvalitu pájeného spoje.

7.3. Vliv několikanásobného přetavení

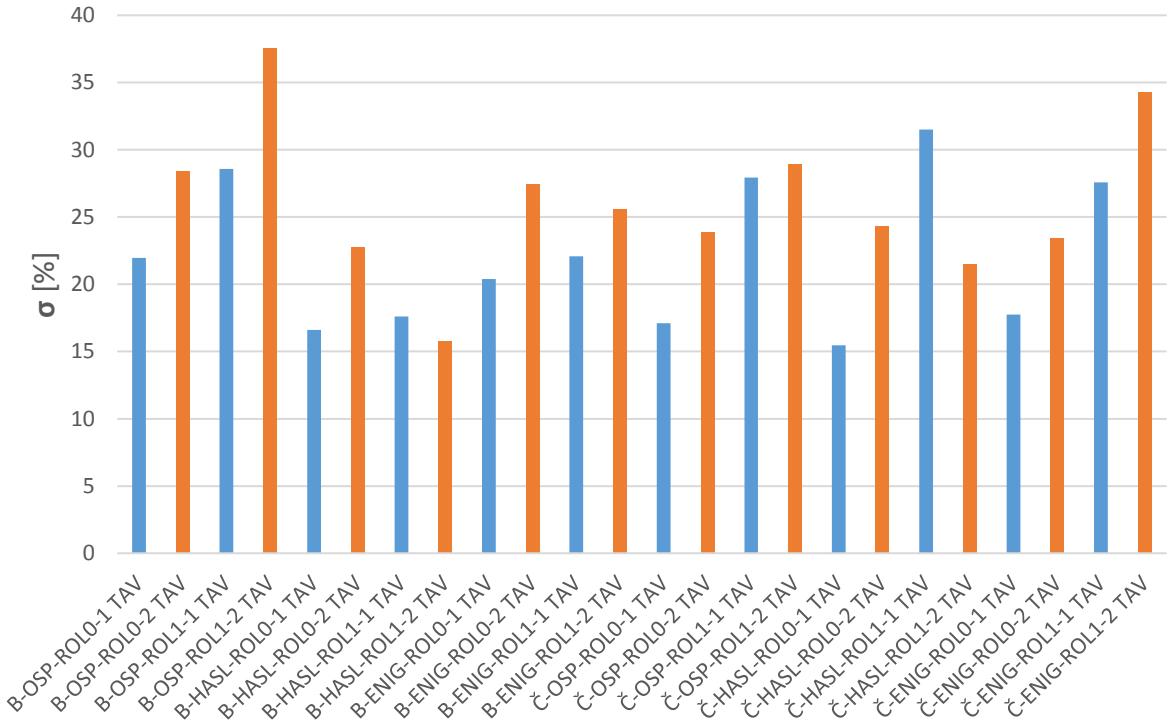
Při hromadném osazování v elektrotechnické výrobě se vyskytují případy, kdy dojde k několikanásobnému přetavení. Je to způsobeno tím, že se zvlášť osazují určité typy velkých součástek a zvlášť například malé součástky. Poté dochází k tomu, že může být nějaká součástka přetavena vícekrát.



Graf 6 Porovnání několikanásobného přetavení

Z naměřených hodnot si můžeme všimnout, že ve všech případech došlo po druhém přetavení k nárůstu intermetalické sloučeniny. Během druhého přetavení dochází k tomu, že je roztavena nejen samotná pájka, ale také vzniklá intermetalická vrstva. Díky tomu, že je roztavena, zde nepůsobí jako difúzní bariéra, ale začne docházet k opětovné difúzi mezi cínem a mědí. Z tohoto důvodu zde začne přibývat množství intermetalické sloučeniny a ta začne více narůstat.

Dále si můžeme všimnout, že se efekt druhého přetavení nejméně projevoval u povrchové úpravy OSP, kde byl nárůst ve většině případů kolem 0 ,2 µm. Na druhé pozici jsou současně ENIG i HASL, kde docházelo k nárůstu zhruba o 0 ,4 až 0 ,6 µm. Výjimkou je HASL na černé masce s pájecí pastou ROL1, kde se zřejmě ještě projevil vliv nepájivé masky. Důvod většího nárůstu u HASLu je jednoznačný, protože zde dochází z principu samotné povrchové úpravy již ke třetímu přetavení na rozhraní pájka a měď. Oproti tomu u ENIGu bude důvodem zřejmě další reakce mezi vrstvou niklu a roztavenou pájkou.



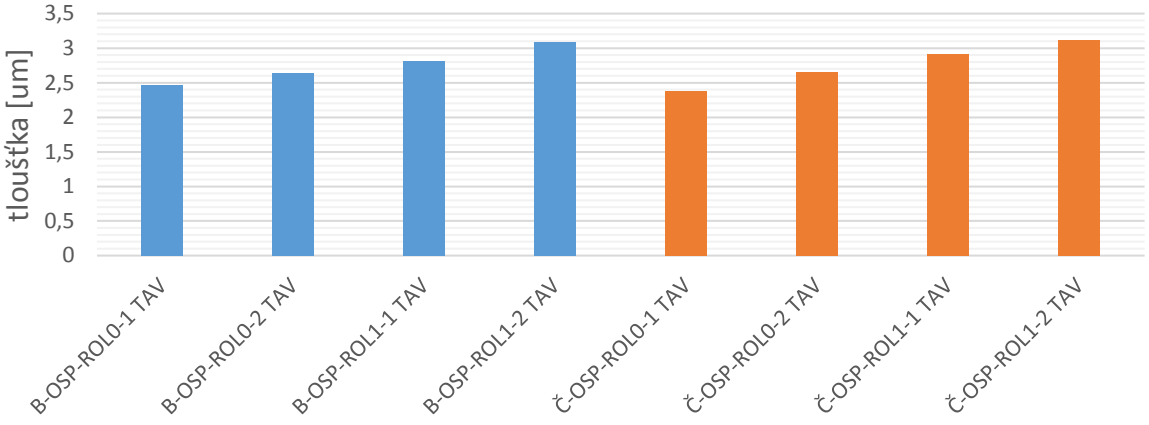
Graf 7 Porovnání členitosti povrchů vlivem několikanásobného přetavení na základě směrodatné odchylky

Z hlediska členitosti povrchu si můžeme všimnout, že ve většině případů došlo po druhém přetavení ke zvětšení hrubosti reliéfu. Je to zřejmě způsobeno tím, že difúze, ke které dochází při opětovném přetavení, je již ovlivňována samotnou intermetalickou vrstvou. Tím dochází k ovlivňování kinetiky difundujících částic, které se mohou díky tomu v určitých místech dostat dále.

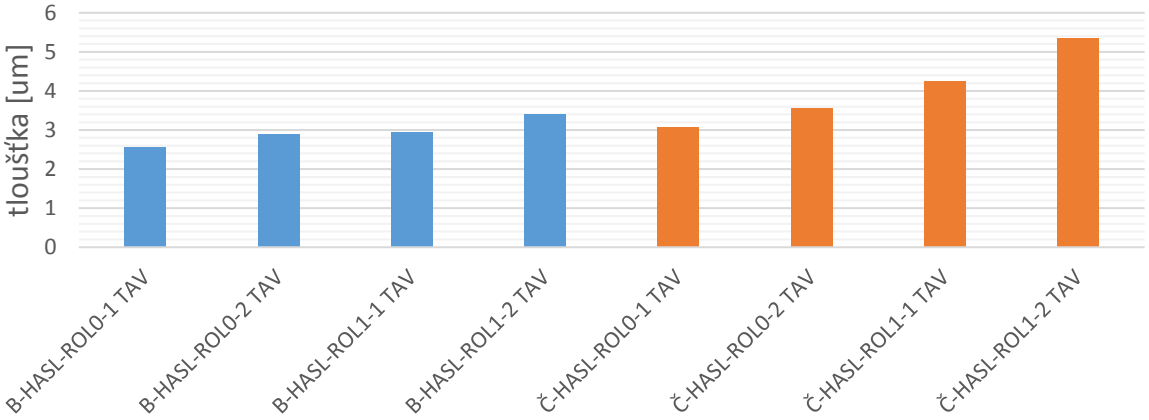
Členitost povrchu s velkou jistotou ovlivňuje kvalitu a spolehlivost pájeného spoje. Čím větší je vrstva intermetalika, tak tím je také větší pevnost pájeného spoje, ale zároveň je takovýto spoj křehčí. Vzhledem k tomu, že při zvětšení členitosti povrchu dojde také ke zvětšení plochy, kde dochází ke styku pájky s intermetalickou sloučeninou, tak toto bude s jistotou ovlivňovat pevnost a křehkost spoje. Předpokládám tedy, že se zvětšující se členitostí vlivem několikanásobného přetavení dojde ke zvýšení pevnosti a zvýšení křehkosti spoje, ale toto by bylo třeba dále ověřit mechanickým testem.

7.4. Vliv použité nepájivé masky

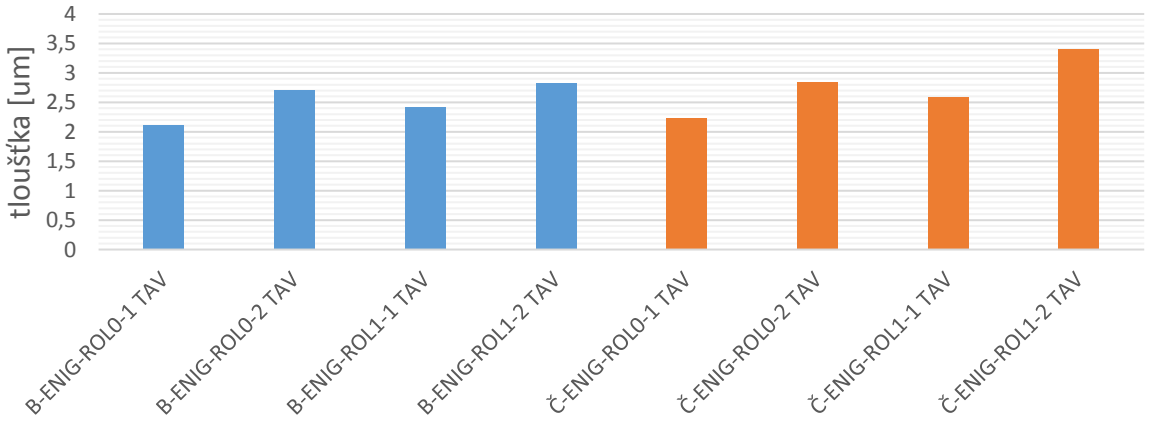
Jak jsem psal již výše, tak jsem na svých vzorcích použil dva druhy nepájivé masky. První je bíla, která je v grafech označována B, a má drsnost povrchu (0 ,474 ± 0 ,059) µm. Druhá je černa, která je v grafech označována Č, a má drsnost povrchu (0 ,903 ± 0 ,068) µm. Již před samotným měřením jsem předpokládal jistý vliv nepájivé masky. Pro větší přehlednost jsem následující grafy rozdělil do tří dle povrchové úpravy pájecí plošky, aby byl více viditelný rozdíl mezi použitými nepájivými maskami.



Graf 10 Porovnání bílé a černé masky pro OSP



Graf 8 Porovnání bílé a černé masky pro HASL



Graf 9 Porovnání bílé a černé masky pro ENIG

Nepájivá maska je na desce právě pro to, aby se do daných míst nedostala pájka, a proto by se mohlo zdát, že nemůže nijak ovlivňovat pájený spoj. Je zde ale jiný vliv, který nepřímo spojuje vliv nepájivé masky na pájený spoj. Jedná se o tavidlo. Drsnost nepájivé masky má za následek rozdílné roztékání tavidla z pájecí pasty po jejím povrchu. Úroveň roztékání je přímo závislá na volných energiích všech možných povrchů zapojených do pájecího procesu. [11] Čím je maska drsnější, tím dochází k lepšímu smáčení a tavidlo se více rozlévá do okolí. U lesklé masky dochází k uzavření tavidla v okolí pájecí plošky.

U černé masky dochází tedy k lepšímu roztečení tavidla do okolí. To má za následek rychlejší odstranění oxidů z vrstvy mědi. Díky tomu se zde nevyskytuje tak velká difúzní bariéra, která by mohla zpomalit difuzi částic mezi základními materiály. Roztavené materiály tedy na sebe mohou působit po delší dobu, a tedy snadněji vytvářet intermetalické sloučeniny. Oproti tomu u bílé masky dochází k horší roztékavosti tavidla do okolí pájecí plošky, to má za následek zhoršení difúze mezi pájkou a mědí, čímž nemůže daná intermetalická sloučenina tolik narůst.

Můžeme si všimnout, že se tento efekt nejvíce projevoval u povrchové úpravy HASL. Je to zřejmě způsobeno tím, že se zde již v počátku vyskytovala vrstva intermetalika, kde díky lepšímu roztékavosti tavidla u černé povrchové úpravy byl usnadněn proces pájení, díky čemuž mohla rychleji a snáze vrstva narůst. Můžeme si všimnout výrazného nárůstu vrstvy intermetalika u varianty s černou maskou při použití ROL1. Tato velká odchylka mohla být také způsobena nekvalitou výbrusu, tudíž ve skutečnosti nemusí být tolik výrazná.

Dále byl nárůst vrstvy vlivem použití rozdílné masky viditelný také u ENIGu. Sice je zde již nárůst znatelně menší oproti HASLu, ale stále je dobře měřitelný. Zde je vliv dán jednoznačně výše popsanými postupy, kde dochází k dobrému smáčení povrchu. Sice zde díky použité vrstvě zlata není povrch tolik zoxidovaný, ale přesto se efekt projevuje.

Nejméně znatelný byl výše popsaný efekt u povrchové úpravy OSP. V jednom případě byl dokonce opačný, ale to mohlo být způsobeno špatně nasnímanými obrazy z elektronového mikroskopu, či ovlivnění vlivem tloušťky samotné vrstvy OSP (na roztékavost by mohla mít vliv rozdílná drsnost povrchů, a tudíž by byla rozdílná tloušťka povrchové úpravy). Zde zřejmě celý proces smáčení ovlivňuje organická vrstva, která chrání pájecí plošku před oxidací. Tato vrstva ovlivňuje samotné tavidlo a tím se jev nestačí příliš projevit, protože roztavená pájka působí na měď v obou případech za podobných podmínek.

8. Závěr

V diplomové práci jsem navázal na výzkum z mé bakalářské práce. Zkoumal jsem více podrobněji vliv vnějších činitelů na růst intermetalických vrstev. V bakalářské práci jsem se zabýval pouze vlivem různých povrchových úprav pájecích plošek. V diplomové práci jsem se snažil tento vliv potvrdit za použití přesnější metody měření tloušťky intermetalik. Dále jsem se zaměřil na vliv použitého tavidla, vliv několikanásobného přetavení a v neposlední řadě na vliv použité nepájivé masky.

Nejprve bylo třeba vyrobit potřebné vzorky pro další zkoumání. Zvolil jsem kombinaci tří povrchových úprav ENIG, OSP a HASL, dále dvou nepájivých masek, kde jedna byla bílá s drsností Ra = (0 ,474 ± 0 ,059) μm a druhá černá s drsností Ra = (0 ,903 ± 0 ,068) μm. Pájecí motiv obsahoval mnoho pájecích plošek, ale já jsem využil pro danou kombinaci vždy tři. Je to z toho důvodu, aby se dal snadno vyrobit výbrus pro elektronový mikroskop. Na pájecí plošky jsem nanášel dva druhy pájecí pasty, kde první obsahovala tavidlo ROL0 a druhá ROL1. Celkem mi tedy vzniklo 24 různých kombinací pro zkoumání.

Dále jsem přistoupil k samotné analýze vzorků. Nejprve bylo třeba z připravených DPS vyrobit výbrusy, které bylo možné pozorovat v elektronovém mikroskopu. Na dané výbrusy byla použita speciální pryskyřice, která se v mikroskopu nenabíjí a díky tomu vytváří čistý obraz. Poté přišla na řadu samotná analýza v elektronovém mikroskopu, kde byly jednotlivé vzorky nasnímány pro další zpracování. Dále bylo třeba změřit tloušťku intermetalické vrstvy na daných obrázcích. Využil jsem k tomu metodu, kde jsem změřil výšku jednotlivých sloupců v pixelech, poté tuto výšku zprůměrovat z 1024 sousedních hodnot a převedl na mikrometry za pomocí nasnímaného měřítka. Tato metoda je poměrně přesná oproti prostému odměřování v několika bodech, kdy může nastat velká chyba. Pro aplikaci této metody jsem si připravil vlastní program v jazyce Python zvaný BitmapCounter. Vstupním souborem tohoto programu je obraz z elektronového mikroskopu upravený v některém z grafických editorů jako je NIS-Elements, ImageJ, Adobe Photoshop nebo GIMP. Tento soubor poté obsahuje pouze černé a bílé oblasti se kterými pak již BitmapCounter umí počítat. Ovládání tohoto programu je velice jednoduché, stačí zde zadat pouze měřítko a z jakého programu pochází vstupní soubor, poté již vše provede sám. Následně jsem takto naměřená data zpracoval do tabulek porovnávající jednotlivé vlivy.

Nejprve jsem se zabýval porovnáním jednotlivých použitých povrchových úprav pájecích plošek, kde se mi podařilo potvrdit výsledky z mé bakalářské práce. Nejtenčí intermetalická vrstva se vyskytuje u povrchové úpravy ENIG, což je způsobeno hlavně tím, že se zde nachází vrstva niklu, která působí jako difúzní bariéra a tím zabraňuje nárůstu intermetalické vrstvy. Silnější itermetalikum se nacházelo u povrchové úpravy OSP. Zde se nevyskytuje žádná difúzní bariéra, která by bránila samotnému nárůstu vrstvy, a proto může narůstat již od počátku pájení. Avšak oproti HASLu zde není od počátku žádná intermetalická vrstva, která by dále narůstala. Z tohoto důvodu je vrstva u HASLu

výrazně nejsilnější. Dále jsem zkoumal vliv povrchových úprav na reliéf intermetalické vrstvy. Zde byl trend přesně opačný oproti její tloušťce. Nejméně rovinný povrch byl u ENIGu, dále poté OSP a nejvíce vyrovnaný povrch měl HASL. Tento jev je zřejmě způsoben kinetikou difúzní reakce.

Dále jsem se zabýval vlivem použitého tavidla. Na vzorcích jsem použil tavidlo ROL0, které obsahuje méně než 0 ,05 % halidů a druhé ROL1, které obsahuje méně než 0 ,5 % halidů. Z toho vyplývá, že je druhé tavidlo agresivnější, a to se také výrazně projevilo na výsledcích. Vlivem své silnější aktivity dochází k lepšímu smáčení povrchů, kde poté může docházet snadněji k difúzi a tím většímu nárůstu intermetalické vrstvy.

Dalším vlivem, kterým jsem se zabýval, je několikanásobné přetavení. Zde byly výsledky jednoznačné, protože ve všech případech došlo po druhém přetavení k nárůstu intermetalické vrstvy. Je to způsobeno tím, že zde začne docházet k opětovné difúzi, kde pokračuje proces narůstání intermetalické vrstvy. Nejméně se vliv druhého přetavení projevoval u povrchové úpravy OSP. U ENIGu a HASLu byl efekt zhruba stejně výrazný. Dále jsem zkoumal vliv druhého přetavení na členitost povrchu intermetalika, kde ve většině případů došlo ke zvýšení drsnosti.

V neposlední řadě jsem také zkoumal vliv použité nepájivé masky. Vlivem rozdílné drsnosti dochází k rozdílnému roztékání tavidla po povrchu. Roztékání je přímo závislé na volných energiích povrchů, které se v daném pájecím procesu vyskytují. U drsnější masky tedy dochází k lepšímu smáčení. Díky tomu se rychleji odstraní oxidy z mědi a může na sebe začít působit roztavená pájka s mědí. Tím začne narůstat intermetalická vrstva. Oproti tomu hladší nepájivá maska vykazuje horší smáčení, díky čemuž je celý proces difúze pomalejší, základní materiály na sebe nepůsobí tak dlouho a vrstva intermetalika tolik nenaroste. Pokud tedy chceme ovlivnit narůstání intermetalické vrstvy tak, abychom ji měli co nejslabší, je vhodné použít hladkou nepájivou masku.

Vzhledem k výše uvedeným výsledkům měření je z hlediska co možná nejtenčí intermetalické vrstvy vhodné použít povrchovou úpravu ENIG v kombinaci s bílou nepájivou maskou a tavidlem s malou aktivitou, tedy například ROL0. Samozřejmě by na dané desce muselo dojít pouze k jednomu přetavení. Tato kombinace svými vlastnostmi odpovídá dílčím výsledkům pro tenkou intermetalickou vrstvu. Samozřejmě není jednoznačné, že by měla být použita tato povrchová úprava, protože se mohou vyskytovat jiné vnější vlivy, kde nemusí být vhodná.

9. Použitá literatura

[1] *Ottův slovník naučný: illustrovaná encyklopedie obecných vědomostí*. Praha, b.r. ISBN 80-720-3249-6. Dostupné také z: https://archive.org/details/ottvslovnknauni37ottogoog

[2] Soldering: Mettalurgy. *Encyclopædia Britannica, Inc* [online]. b.r. [cit. 2017-10-08]. Dostupné z: https://www.britannica.com/technology/soldering

[3] MERKER, Henry. *The History of Soldering: Soldering used in Electronics in a* Nutshell [online]. 2012 [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: https://prezi.com/jogp5ky0khed/the-history-of-soldering/

[4] RUŽA, Viliam, Honza REMEŠ, ed. *Pájení*. 2. uprav. a dopln. vyd. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1988.

[5] CLYDE F. COOMBS, Jr.,. Printed *circuits handbook [online]*. *6th ed. New York*: McGraw-Hill, 2008 [cit. 2016-03-17]. ISBN 00-715-1079-6.

[6] PIETRIKOVÁ, Alena, *Juraj ĎURIŠIN a Pavel MACH.* Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanije v elektronike. Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach. Košice: Equilibria, s.r.o., 2010. ISBN 978-80-55304-47-2.

[7] ŽÁK, Pavel. TVORBA WHISKERŮ PŘI MĚKKÉM PÁJENÍ V ELEKTRONICE [online]. b.r., , 9 [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/zak.pdf

[8] ING. JEŽDÍK, Petr, Karel ING. DUŠEK, Michal ING. BREJCHA, Lenka ING. HÁJKOVÁ a Ladislav ING. POSPÍŠIL. Možnosti využití RTG a CT diagnostiky (ne) jen v elektrotechnice: 1. část. *DPS* [online]. b.r., **2012**(4) [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: http://www.dps-az.cz/mereni/id:7545/moznosti-vyuziti-rtg-a-ct-diagnostiky-ne-jen-v-elektrotechnice-1-cast

[9] ZHANG, Anny. Voids in Solder Joints. In: Indium [online]. 2010 [cit. 2017-10-30].

[10] TRIP, Harry. Understanding 'tombstoning' and how to prevent it. In: Dataweek [online]. Zetech, 2003 [cit. *2017-10-30]*.

[11] DUŠEK, K. a D. BUŠEK. *Problem with no-clean flux spattering* on in-circuit testing pads diagnosed by EDS analysis. Microelectronics Reliability [online]. 2016, 56, 162-169 [cit. 2017-10-30]. DOI: 10.1016/j.microrel.2015.10.020. ISSN 00262714. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0026271415302067

[12] *Technologie I.: Pájení. In: Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci [online]*. Liberec, b.r. [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvičení13_prezetace.pdf

[13] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU *A RADY 2011*/65/EU: o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. In: . 2011. Dostupné také z: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:CS:PDF

[14] SZENDIUCH, Ivan. Pájení a *bezolovnaté pájky [online]*. 2004 [cit. 2015-11-05]. Dostupné z: http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf

[15] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. Plošné spoje *a povrchová montáž [online*]. Brno, 2011 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/METMEL/studijni-pomucky/METMEL_11_SP_BPSM_Plosne_spoje_a_povrchova_montaz.pdf. Vysoké učení technické v Brně.

[16] MIRIC, Zoran a Angela GRUSD. Lead-free alloys. Soldering & Surface *Mount Technology [online]. 1998 [*cit. 2015-11-16]. Dostupné z: http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/09540919810203793

[17] *ABTEW, Mulugeta a Guna SELVADURAY. Lead-free Solders in Microelectronics: Reports. Materials Science and Engineering: R*: Reports [online]. 2000, 27(5-6), 95-141 [cit. 2016-03-12]. DOI: 10.1016/S0927-796X(00)00010-3. ISSN 0927796x. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927796X00000103

[18] Flux, soldering, liquid, paste flux, *solder paste* and solder paste flux: For electronic/electrical use. 1st. US Army Research Laboratory: US Army Research Laboratory, 1993.

[19] TOBOLA, Miroslav. Metalografický výbrus DPS: inspekční a vývojová metoda. *DPS Elektronika od A* do Z [online**]**. 2011, 2011(3), 1 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: http://www.dps-az.cz/vyroba/id:6203/metalograficky-vybrus-dps-inspekcni-a-vyvojova-metoda

[20] KUBÍNEK, Roman, Klára ŠAFÁŘOVÁ a Milan VŮJTEK. *Elektronová* mikroskopie [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/elmikro.pdf. Skriptum. Univerzita Palackého v Olomouci.

[21] CHVÁTALOVÁ, Lucie. *Elektronové mikroskopy* [online]. b.r. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/~zmeskal/obring/presentace_2003/20_elektronove_mikroskopy.pdf

[22] ImageJ. In: *ImageJ* [online]. Bethesda, Maryland, USA: U.S. National Institutes of Health, 1997-2012 [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: https://imagej.nih.gov/ij/

[23] PETRÁČ, Adam. *Porovnání mechanických vlastností pájených spojů s ohledem na různé povrchové úpravy pájecích* plošek. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.

[24] *Lead-Free Solder Paste PF606-P: Datasheet*. 2. Brno, 2016.

[25] Whiskery. In: *DPS Elektronika od A do* Z [online]. b.r. [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: http://www.dps-az.cz/vyroba/id:6930/reseni-problemu-s-cookson-electronics-cinove-mustky

[26] Tombstone effect. In: *Mikropure* [online]. b.r. [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: http://mikropure.com/en/tombstone-effect/

[27] Flux spattering. In: *Matsuo Handa CO.,LTD.* [online]. b.r. [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: http://www.matsuo21.com/en/product/yaniiri/stg.html

[28] Popcorn effect. In: *All-spec* [online]. 2017 [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: http://blog.all-spec.com/tag/popcorn-effect/

[29] JÄGER, A. a V. GÄRTNEROVÁ. *Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich* struktura [online]. In: . Praha, 2009, s. 1 [cit. 2017-11-19].

10. Přílohy

Program BitmapCounter a všechny snímky z elektronového mikroskopu lze nalézt na přiloženém CD.