



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

Analýza voidů v pájených spojích

Voids analysis inside the solder joints

Bakalářská práce

květen 2018

Autor práce: Nickolas Němeček

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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 25. 5. 2018

.....
podpis bakalanta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němeček** Jméno: **Nickolas** Osobní číslo: **457038**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza voidů v pájených spojích

Název bakalářské práce anglicky:

Void analysis inside the solder joints

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení přetavením a s chybami, které mohou při této technologii vzniknout.
- 2) Seznamte se se vznikem voidů a vlivy na jejich vznik. Především se zaměřte na procesní voidy (makro voidy)
- 3) Připravte vzorky, na kterých provedete analýzu voidů. Výsledky experimentu vyhodnoťte s ohledem na použité materiály a podmínky přípravy vzorků.

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské 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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace:

Tato bakalářská práce se zabývá technologií v bezolovnatém pájení zejména v oblasti pájení přetavením a chybami, které vznikají během tohoto procesu v pájených spojích. Teoretická část práce se zabývá technologií pájení, rozdělením typu chyb a hlavní příčinou jejich vzniku. V praktické části vytvořím návrh desky plošného spoje s různými povrchovými úpravami, a k tomu příslušné šablony s odlišnou tloušťkou. V navrženém experimentu budu dále zkoumat výskyt voidů v pájených spojích na připravených vzorcích při použití dvou různých bezolovnatých pájecích past.

Klíčová slova:

Pájení přetavením, Povrchová úprava, Pájený spoj, Chyby při pájení, Voidy

Summary:

This bachelor thesis deals with the technology in lead free soldering especially in the sphere of soldering reflow and the errors that arise during this process in solder joints. The theoretical part of the thesis deals with soldering technology, the type of errors and what may be there main cause of their occurrence. In the practical part, I will create a design of a printed circuit board with different surface finishes, and the corresponding templates of different thickness. In the proposed experiment I will further study the occurrence of voids in solder joints at prepared samples using two different lead-free solder pastes.

Index terms:

Reflow, Surface finish, Soldered joint, Errors during soldering, Voids

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D. za účinnou metodickou a odbornou pomoc a delší cenné rady při zpracování projektu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petr Veselý a Bc. Martin Kozák za jejich rady. Nakonec chci poděkovat rodině za podporu při studiu a vytváření práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	7
Úvod	8
1. Bezolovnaté pájení	9
1.1. Složení bezolovnatých pájek	9
1.2. Účinky legujících prvků v pájce	10
1.3. Slitiny pro bezolovnaté pájení	11
2. Tavidla	12
2.1. Tavidla v elektronické montáži	12
3. Povrchové úpravy pájecích plošek	13
3.1. HAL	13
3.2. OSP	13
3.3. ENIG	14
3.4. Imersní cín	14
3.5. Imersní stříbro	14
3.6. Spolehlivost povrchových úprav	14
4. Pájení přetavením	16
4.1. Konvekční pájení	16
4.2. Pájení infračerveným zářením	17
4.3. Pájení v parách	18
4.4. Nanášení pájecí pasty	18
4.5. Teplotní pájecí profil	19
5. Chyby při pájení	21
5.1. Můstky	21
5.2. Whiskery	21
5.3. Tombstone efekt	22
5.4. Voidy v pájeném spoji	22
5.4.1. Vliv voidů a jejich vznik	23
5.4.2. Makrovoidy	23
5.4.3. Mikrovoidy	24
5.4.4. Kirkendallový voidy	25
5.4.5. Voidy vzniklé smršťováním pájky	25
5.4.6. Voidy v mikropropojích	26
5.4.7. Dírkové voidy	26

Praktická část.....	27
1. Návrh experiment.....	27
1.1. Návrh DPS.....	27
1.2. Povrchové úpravy.....	27
1.3. Metoda nanesení pájecí pasty.....	28
1.4. Pájecí pasty.....	29
1.5. Pájení přetavením.....	29
1.6. Teplotní profil.....	30
1.7. Snímky pájených spojů pomocí RTG.....	31
1.8. Analýza RTG snímku.....	31
2. Vyhodnocení vzorků.....	32
2.1. Četnost makrovoidů v pájených vzorcích.....	33
2.2. Celková plocha makrovoidů ve vzorcích.....	35
2.3. Porovnání výsledků tloušťky šablony.....	39
2.4. Porovnání výsledků povrchových úprav.....	39
2.5. Porovnání výsledků pájecích past.....	39
Závěr.....	40
Seznam použité literatury.....	41

Seznam použitých symbolů a zkratk

RoHS	Restriction of hazardous substances directive – Směrnice zakazující používání některých nebezpečných látek při výrobě elektrických a elektronických zařízení
SAC	Slitina cínu, stříbra a mědi
DPS	Deska plošného spoje
ENIG	Electroless nickel immersion gold – typ povrchové úpravy
OSP	Organic surface protectives – typ povrchové úpravy
HAL(HASL)	Hot air solder leveling – typ povrchové úpravy
BGA	Ball grid array – pouzdro s kulovými vývody
IR	Infrared radiation – infračervené záření
RTG	Rentgenové záření
FR4	Flame retardant class 4 – základní materiál na výrobu DPS
SMD	Surface mount device – součástka pro povrchovou montáž plošných spojů

Úvod

Pájení je stále ještě nepoužívanější technika výroby elektronických sestav. Její funkcí je mechanicky a vodivě připojit součástku k desce plošných spojů. Jsou zde kladeny vysoké nároky na spolehlivost pájených spojů.

Spolehlivost pájeného spoje úzce souvisí s materiály, ze kterých se pájený spoj skládá. S rozmachem elektroniky v takto obrovském měřítku se ve spojích velmi často objevovalo ekologicky i zdravotně závadné olovo. Negativní vliv olova na lidský organismus je známý již dlouho. V současné době dochází k postupnému omezování jeho používání ve všech odvětvích průmyslu. I přes to, že bezolovnaté pájení bylo z ekologického hlediska ideálním řešením, přechodem z olovnatých pájek na bezolovnaté byl pozorován zvýšený výskyt tvorby dutin (voidu) ve spoji. Výskyt dutin má vliv na spolehlivost mechanických a elektrických vlastností pájeného spoje.

Voidy se budu zabývat ve své práci, kdy v teoretické části této práci nejprve čtenáře seznámím zejména s pájením přetavením a s vybranými chybami, které mohou ve spojích při této technologii vzniknout. Zaměřím se na problematiku vzniku voidů a řešerši toho, co může mít vliv na vznik voidů, včetně toho, jaký to má důsledek na spolehlivost pájených spojů.

V praktické části této práce se budu zabývat sledováním výskytu voidů v závislosti na použitém množství nanesené pájecí pasty, na různých typech povrchových úprav.

1. Bezolovnaté pájení

Měkká pájka je kovová slitina s bodem tání v rozmezí 90 °C do 450 °C, využívaná v procesu nazývaném pájení, ve které se roztaví, aby se spojily kovové povrchy. Pájky byly používány k propojování materiálů již od počátku elektronického a elektrotechnického průmyslu. V pájecích slitinách bylo široce použito olovo pro jeho osvědčenou spolehlivost v kombinaci s ostatními kovy. Ekologicky zaměřená legislativa v Evropě měla za následek vznik direktivy RoHS, která vstoupila v platnost od 1. července 2006. Ta zamezuje používání nebezpečných látek při výrobě elektrických a elektronických zařízení s negativním dopadem na lidské zdraví, mezi ně patří i olovo. Z důvodu vysoké toxicity olova a jeho sloučenin bylo zapotřebí nahradit pájecí slitiny méně toxickými materiály, které mají nejen příznivější dopad na životní prostředí, ale také splňují nastavená kritéria pro již zavedené technologie a postupy během pájení.

Přechod na bezolovnaté pájky s sebou přinesl řadu změn a nových faktorů. Mezi nimi byl i zásah do technologického procesu pájení. To spočívalo nejen v nalezení alternativní slitiny s požadovanými vlastnostmi, ale zároveň i v použití vhodných tavidel a nalezení náležitých povrchových úprav desky plošného spoje pro potřebné výsledky. Kromě odlišných vlastností je podstatné zdůraznit, že změnu na používání bezolovnatých pájek přineslo i zvýšení nákladů. [1] [2]

1.1. Složení bezolovnatých pájek

V dnešní době jsou bezolovnaté pájky většinou tvořeny vysokým obsahem cínu a zbytek je doplňován drahými kovy. Cena slitiny je závislá na ceně jednotlivých použitých složek, kde ve většině případů jsou dražší než olovnaté pájky. Výběr vhodné pájecí slitiny není snadný. Je nutné volit mezi parametry, jako je pevnost spoje, teplota tavení, smáčení, vhodnost pro povrchovou úpravu, náchylnost k oxidaci, toxicita a cena. [1]

Hlavní obtíží bezolovnatých pájek je jejich teplota tavení, která ve většině případů není tak nízká, jako tomu je například u cín-olovnatých pájek. Cín je základní kov nejčastěji používaný pro bezolovnaté pájky, taví se při teplotě 232 °C. V kombinaci s dalšími materiály jako je stříbro a měď je hranice teploty tání v rozmezí 217 °C až 229 °C. To znamená, že materiály, které mají být spojeny, musí být schopny odolat vyšším teplotám během procesu pájení. Tabulka 1 ukazuje teploty tání kovů nejčastěji používaných v elektronických sestavách, které se používají jako náhrada za olovo. Cín-stříbro-měď (SnAgCu, nebo SAC) a cín-měď (SnCu, nebo SC) patří mezi slitiny, které se využívají a získávají největší pozornost jako náhrada za cín-olovnaté pájecí slitiny.

Od doby, co RoHS vstoupila v platnost, se slitina SAC stala standardní bezolovnatou pájecí slitinou. Slitinu SAC lze použít jako základ a zlepšit její vlastnosti přidáním dalších komponent. Přidání čtvrtého legujícího prvku má například vliv na snížení teploty tání. [2]

Tabulka 1: Teploty tání kovů používané v elektronických sestavách. [3]

Kov	Teplota tání (°C)
Bismut (Bi)	271
Měď (Cu)	1083
Zlato (Au)	1063
Indium (In)	157
Nikl (Ni)	1453
Stříbro (Ag)	960
Cín (Sn)	232
Zinek (Zn)	419

1.2. Účinky legujících prvků v pájce

Neúplný seznam některých hlavních vlivů důležitých základních, legujících prvků a nečistot je uveden níže. Je třeba mít na paměti, že prvek, který je žádoucí v jedné aplikaci může být považována za nečistotu v jiné.

Cín (Sn). Základní kov v pájkách jak olovnatých, tak bezolvnatých. Hlavní výhodou je dobrá smáčivost povrchů a poměrně nízká teplota tavení. Má dobrou tepelnou i elektrickou vodivost a tendenci poskytovat dobrou pevnost spojů. Je náchylný na růst tzv. whiskerů (tenké cínové vlásky/vousy), pokud nejsou přítomny jiné legující prvky na zabránění jejich vzniku. Cín rozpouští kovy jako je například zlato, stříbro, měď. Nevýhodami jsou nízká mechanická pevnost a snadná tvorba intermetalických slitin.

Stříbro (Ag). Drahý kov, který má dobré elektrické vlastnosti, snižuje bod tání a projevuje se taky tím, že zlepšuje smáčivost a zvyšuje pevnost spoje. Zároveň zlepšuje odolnost proti únavě při tepelném cyklování.

Bismut (Bi). Zlepšuje smáčivost a významně snižuje teplotu tání. Pomáhá proti vzniku cínových whiskerů. Tento materiál je celkem drahý a jeho dostupnost je relativně nízká.

Měď (Cu). V elektrotechnice hojně používaný prvek, zvláště pro výrobu vodičů. Projevuje se dobrou smáčivostí povrchu i mechanickou pevností. Snižuje bod tání slitiny. Zlepšuje odolnost proti únavě tepelného cyklování, snižuje rychlost rozpouštění mědi z pájených částí. Nicméně, měď vytváří intermetalický spoje a podporuje růst whiskerů.

Germanium (Ge) zabraňuje tvorbě oxidace. Snižuje povrchové napětí a vznik mikrotrhlin, zvyšuje pevnost v tahu.

Indium (In) se využívá ke snížení bodu tání slitiny a zlepšuje tvárnost pájeného spoje. Má dobrou smáčivost povrchu, ale mechanické vlastnosti nejsou nejvhodnější. Je náchylný k oxidaci, a proto je vhodné vyhýbat se aplikacím, kde k ní dochází. Indium může spájet mnoho nekovů včetně

skla. Má tendenci způsobit nežádoucí dopování v polovodičích. Kvůli vysokému potřebnému podílu prvku v pájce a vysoké ceně prvku je i cena pájky vysoká.

Nikl (Ni) zabraňuje od smáčení a předchází růstu whiskerů.

Antimon (Sb) přidává se ke zvýšení pevnosti bez ovlivnění smáčivosti. Snižuje povrchové napětí. Je toxický pro lidský organismus. Omezuje růst whiskerů.

Zinek (Zn) snižuje teplotu tání, je cenově dostupný. Nevýhodou je jeho náchylnost k oxidaci, není vhodný pro pájení vlnou. Snižuje dobu životnosti spoje.

Zlato (Au) snadno se rozpouští, vytváří intermetalické látky a snižuje bod tání cínových pájek. Při koncentracích nad 0,5 % odbourává smáčení. Slitiny s vyšším podílem cínu mohou přijmout více zlata, aniž by se staly křehkými. [2] [3]

1.3. Slitiny pro bezolovnaté pájení

Vzhledem k uvedeným celosvětovým požadavkům na bezolovnaté pájení je nutné, aby slitiny splňovaly jisté požadavky. Zde jsou uvedeny hlavní z nich:

Nízká teplota tavení. Teplota by měla být dostatečně nízká, aby nedocházelo k poškození konstrukce nebo součástek, ale zároveň dostatečně vysoká, aby pájený spoj odolal provozním teplotám zařízení.

Dobrá smáčivost. Pájka by měla dobře přilnout ke spojovaným materiálům; smáčivost se dá zlepšit pomocí tavidel.

Dobrá dostupnost kovů.

Nízké náklady.

Dobrá tepelná a elektrická vodivost, mechanická pevnost. Dosažení těchto požadavků se využívají variace kombinací slitin obsahující více množství prvků ve svém složení. V dnešní době je nejpoužívanější bezolovnatá pájecí slitina SnAgCu (SAC). Nejvyužívanější slitina SAC obsahuje procentuálně složení pájky přibližně 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Vyznačuje se vynikající odolností proti únavě, vynikající spolehlivostí pájeného spoje, nejlepší smáčivostí ze SAC slitin a je možné ji sloučit téměř se všemi typy tavidel. [1]

2. Tavidla

Úspěšné vytvoření pájeného spoje vyžaduje kontakt kapalně pájky s kovem, ke kterému se má spojit, aby mohlo dojít k inicializaci smáčení. Problém nastává v tom, že téměř všechny kovy podílející se na pájení podléhají na vzduch oxidaci. To zabraňuje kontaktu kovu s kovem, stejně jako smáčitelnosti a tvorbu metalurgické vazby, pokud nejsou odstraněny oxidy. Tavidla se používají při pájení, aby se tyto vrstvy oxidů odstranily a chránily povrch proti další oxidaci během pájení. [2]

Tavidla jsou stejnorodé směsi chemických sloučenin, organických nebo anorganických, které snižují oxidaci při procesu pájení. Tavidla se vyskytují v tekutém stavu (živice), tuhém stavu (organické látky) nebo jako pasta z anorganických solí, kyselin a zásad. Hlavní úkolem tavidla je dosažení optimální pájitelnosti, zamezení přístupu reakčních prvků a podpořit smáčení tím, že chemicky čistí kontakty, snižuje povrchové napětí v rozhraní pájka/tavidlo a rozloží rovnoměrně teplotu na celé ploše pájeného spoje. Během zvýšení teploty dochází k redukci oxidů, která je doprovázena odplyněním. Čas redukce lze zkrátit použitím vyšší aktivity tavidla. Odplynění a proces aktivace tavidla jsou ovlivněny právě zvoleným teplotním profilem. Příliš velké množství tavidla v pájecí pastě může přinést nutnost nanést většího objemu pasty, aby se dosáhlo požadovaného objemu spoje. Vyšší množství zbytků tavidla může ovlivnit spolehlivost produktu. [4]

I přes to, že tavidla při pájení jsou nezbytná, je velmi často nutné po ukončení procesu pájení tavidlo z DPS chemicky odstranit kvůli jeho agresivním vlastnostem. Tyto vlastnosti by mohly negativně ovlivnit základní požadavky pro pájené spoje, jako jsou pevnost v tahu a smyku při namáhání, vysoká elektrická vodivost, odolnost vůči korozi a oxidaci. Elektrická vodivost může být ovlivněna chybami vznikajícími při pájení (zanesení tavidla do spoje, voidy, trhliny špatný přechod pájky). V dnešní době je snaha vyvíjet tavidla, která nebudou agresivní, bez halogenů a s nízkou teplotou tání, převážně na bázi syntetických živic. [1]

2.1. Tavidla v elektronické montáži

Úloha tavidel v elektronickém pájení je snížení povrchového napětí pájek na tolik, aby se zlepšil kapilární tok a chránily se substráty na povrchu proti oxidaci při procesu pájení. Tavidla určena pro montážní procesy mohou účinně odstraňovat pouze lehkou oxidovou vrstvu. V případě příliš zoxidovaných povrchů by měli pájení předcházet předčišťovací kroky zoxidovaných povrchů.

Použitá tavidla musí řešit tři problémy z pohledu kompatibility materiálů. Za prvé nepoškodit obaly součástek, základní materiály a povrchové úpravy při procesu pájení. Za druhé zamezit korozi po montáži vzniklé z reziduí tavidel s vysokým obsahem iontů. To se provádí zavedením procesu čištění. Za třetí čisticí prostředky a postupy používané k odstranění zbytků tavidla musí být kompatibilní se zařízeními a být podle ekologických předpisů. [2]

3. Povrchové úpravy pájecích plošek

Povrchové úpravy slouží především jako ochrana mědi před oxidací a také k dobré smáčitelnosti pájecích plošek, a to i po delším skladování desek plošných spojů. Složení povrchových úprav má zásadní vliv na tvorbu intermetalických sloučenin. V tabulce 2 jsou uvedeny nejčastěji využívané povrchové úpravy. Tabulka 2 znázorňuje technologii vytvoření povrchových úprav, a taky jaká je tloušťka vytvořené vrstvy. [5]

Tabulka 2: Nejčastěji používané povrchové úpravy DPS. [6]

Povrchová úprava	Technologie	Tloušťka vrstvy [μm]
Ponor do Ag	Ponor DPS do chemické koupele	0,15 – 0,3
Ponor do Sn	Ponor DPS do chemické koupele	0,6 – 1,2
ENIG	Ponor DPS do chemické koupele (2x)	Ni: 4 – 6
		Au: 0,05 – 0,2
OSP	OSP nanesená sprejováním na DPS	0,2 – 0,6
HAL	Ponor do koupele taveniny pájky, nadbytečná pájka následně odstraněna horkovzdušnými noži	5 – 45

3.1. HAL

Povrchová úprava HASL (Hot Air Solder Leveling) nebo HAL (Hot Air Leveling) je jedna z nejpoužívanějších a spočívá v ponoření desky plošného spoje do roztavené cínové pájecí slitiny, která může být olovnatá nebo bezolvnatá. Přebytná pájka je pak odstraněna pomocí horkovzdušných nožů, které foukají na DPS teplý vzduch. Tato povrchová úprava má mnoho výhod, mezi ně patří: vynikající pájitelnost, dlouhá doba skladovatelnosti, možnost vícenásobného teplotního cyklu. Mezi nevýhody patří teplotní šok DPS způsobený při nanesení povrchové úpravy, a nestejněměrná tloušťka povrchové úpravy na pájecích ploškách. Povrchová úprava HASL je vhodná pro nižší konstrukční třídy návrhu a není vhodná pro součástky s jemnými rozestupy vývodů. [6]

3.2. OSP

OSP (Organic Surface Protectives) se nanáší chemickou metodou, při které se na odhalený měděný povrch DPS nanese organické inhibitory oxidace mědi, které slouží k ochraně před oxidací a zvyšují čas skladování DPS. Tato metoda se nejčastěji používá pro jednostranné desky plošných spojů, u kterých je pájitelnost velice dobrá. Velkou výhodou této povrchové úpravy je, že vytváření vrstvy je levné, vrstva je odolná vůči otěru a lehce se aplikuje. Nevýhoda oproti HAL je, že při vícenásobném teplotním cyklu se výrazně zhoršuje kvalita pájitelnosti a s časem se zkracuje doba její skladovatelnosti. [5]

3.3. ENIG

Povrchová úprava ENIG (Electroless nickel immersion gold) je chemicky nebo galvanicky nanosená vrstva niklu a poté imerzně nanosená vrstva zlata na odhalený měděný povrch DPS, kde tenká vrstva zlata poskytuje niklu ochranu před oxidací. Nikl zabraňuje difúzi mědi do pájky. Zlato slouží k zabránění oxidace niklu, který má při oxidaci nízkou pájitelnost.

Tato povrchová úprava je výborně pájitelná, hodí se pro součástky s velmi jemnými vývody a je vhodná pro bezolovnaté pájení. Další výhodou je možnost vícenásobného průchodu pecí při pájení, její skladovatelnost je několik měsíců, je kompatibilní s niklem a cínem. Nevýhodou je, že se jedná se o nejdražší povrchovou úpravu, přičemž tato metoda je technologicky náročná a při nesprávném provedení se mohou objevit vady na povrchu DPS. ENIG se používá pro náročné desky, kde to bývá často jediná vhodná metoda. [5] [6]

3.4. Imersní cín

Na měděný povrch DPS se chemicky nanáší vrstva cínu. DPS je ponořena do lázně chemického cínu a tím vznikne vrstva imersního cínu. Cín za přítomnosti vzduchu značně oxiduje a je časem potažen organickou vrstvou, která ztrácí kvalitu povrchové úpravy. Tato metoda je technologicky nenáročná, ekologicky vyhovující a poměrně levná. Při použití této vrstvy je velké riziko tvorby intermetalických sloučenin a whiskerů. [6]

3.5. Imersní stříbro

Stříbrná povrchová vrstva je nanášena na měděný povrch. Vrstva stříbra má velmi dobrou smáčivost a pájitelnost, přesnou tloušťku, dokáže odolat několikanásobnému pájení a lze ji použít vertikálně a horizontálně. Musí se skladovat ve speciálních podmínkách, jinak dochází k její oxidaci. Tato povrchová úprava je kompatibilní s většinou montážních procesů. Je vhodná pro pájení BGA pouzder. Může se použít v kombinaci se zlatem a dobře se kontroluje vrstva stříbra. Při maximální tloušťce pár desetin μm a dokonale naneseném rovinném povrchu je tato úprava vhodná pro velmi malé rozestupy vývodů součástek [5]

3.6. Spolehlivost povrchových úprav

Vysoké povrchové napětí bezolovnaté pájky snižuje smáčivost mědi, je proto vhodné řešit problém již na úrovni výroby desky plošných spojů. Jedním z mechanismů, kterým povrchové úpravy přispívají ke spolehlivosti, je zvýšení smáčivosti pájecí plošky. Vhodná povrchová úprava zvyšuje povrchové napětí a zlepšuje tak roztečení bezolovnaté pájky.

Ochrana měděných ploch před působením tavidel je dalším mechanismem. Vysoce aktivovaná tavidla se chovají jako kyseliny, proto mohou kromě své primární funkce také poškozovat měděnou plochu.

Dále povrchová úprava musí chránit pájecí plošky před oxidací. Desky plošných spojů se často skladují delší dobu, měď bez povrchové úpravy začíná rychle oxidovat, což DPS zcela znehodnocuje.

Povrchová úprava může zabraňovat difuzi mezi mědí a cínem. Difuze způsobuje intermetalické sloučeniny na rozhraní dvou kovů, které narušují pevnost spoje. Na tvorbu intermetalických sloučenin je potřeba dát pozor při výběru povrchové úpravy, některé z nich mohou tento efekt naopak posílit. Rozdílná rychlost difuze má za následek tvorbu voidů. [6]

Další aspekt z pohledu spolehlivosti je rovinnost povrchu povrchových úprav. Pro některé aplikace může být výsledný povrch vytvořený galvanickým pokovením nedostatečně rovný. V tabulce 3 je znázorněno, které povrchové úpravy mají dostatečnou rovinnost pro Fine Pitch aplikace. Použití aditiv v galvanizační lázni dokáží nerovnosti povrchu dobře kompenzovat.

Způsobu, jak upravit měděné kontaktní plošky, je několik. Jejich výběr závisí na tom, jakou používáme pájku, jaký způsob pájení provozujeme a v neposlední řadě také na ceně, kterou jsme ochotni do povrchové úpravy investovat. Nejběžnější povrchové úpravy včetně hlavních vlastností je možné vidět v tabulce 3. Z tabulky je patrné, že všechny tyto povrchové úpravy jsou vhodné pro bezolovnaté pájení. [6]

Tabulka 3: Srovnání povrchových úprav. [7]

Parametr	HAL	OSP	ENIG	Chem. Ag	Chem. Sn
Vícenásobný teplotní cyklus	Ano	Problematické	Ano	Ano	Ano
Rovinnost povrchu	Ne	Ano	Ano	Ano	Ano
Fine Pitch aplikace	Problematické	Ano	Ano	Ano	Ano
Kontaktování	Ne	Ano	Ne	Ano	Ne
Teplotní stres nad 65 °C	Ano	Ne	Ne	Ne	Ne
Údržba lázně	Obtížná	Střední	Snadná	Snadná	Snadná
Řízení procesu	Střední	Obtížná	Snadné	Snadné	Snadné
Náklady	Střední	Vysoké	Nízké	Střední	Nízké
Bezolovnatá SAC pájka	Ano	Ano	Ano	Ano	Ano
Ekologické aspekty	Špatné (pb)	Dobré	Dobré	Dobré	Dobré

4. Pájení přetavením

Pájení přetavením označované výrazem reflow soldering nebo zkráceně reflow hraje v současné době nepostradatelnou roli v případě vodivého kontaktování součástek na DPS. Reflow je jasně odlišná metoda pájení od všech ostatních technologií pájení. Liší se tím, že se používá pájecí pasta. U reflow se součástka pokládá na pájecí pastu, která je nanesena na vodivé místo (pájecí plošku) desky plošného spoje. Osazená DPS prochází posléze přetavovací pecí, ve které dochází k přetavení pájecí slitiny při teplotě vyšší, než je teplota tání pájky obsažené v pájecí pastě. Součástky jsou v peci pomocí povrchového napětí automaticky vycentrovány na dané plošky a připájeny. Kvalitu spoje ovlivňuje zvolená pájecí pasta. Technologie reflow je vhodná pro osazování jednostrannou nebo oboustrannou povrchovou montáží a některými druhy kombinované povrchové montáže. [2]

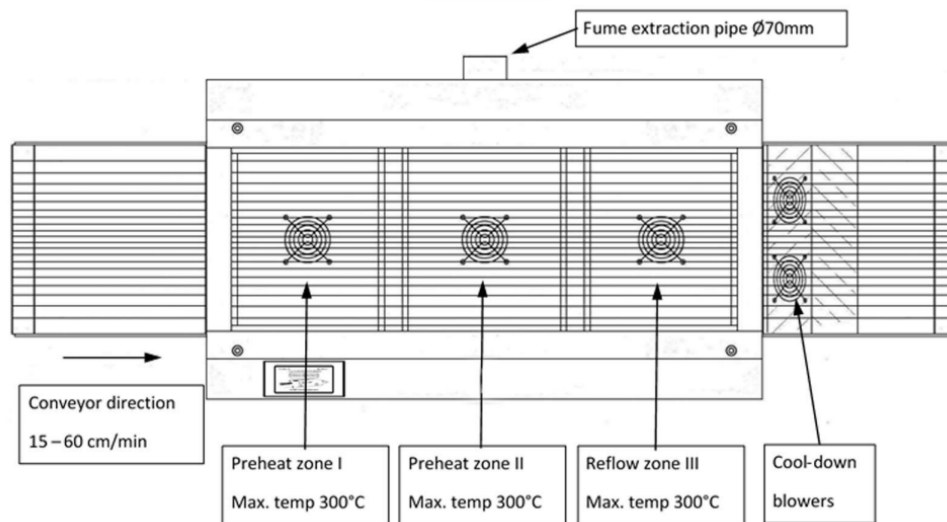
Pájení reflow je v přetavovací peci realizováno pomocí přenosu teplota. Při pájení musí být zajištěn dostatečný přísun tepla na DPS, aby bylo zajištěno kvalitní zapájení všech komponent. V dnešní době se využívá při procesu reflow několik druhů technologií. Každá má v praxi své výhody a nevýhody. Mezi tyto technologie pro pájení přetavením patří: konvenční pájení (pájení horkým vzduchem nebo plynem), pájení infračerveným zářením, pájení v kondenzovaných parách, pájení laserem a kontaktní metoda. [6]

Z těchto metod jsou nejvíce v praxi používány pájení konvenční, pájení infračerveným zářením a pájení v parách. [2]

4.1. Konvekční pájení

Konvekční pájení je realizovatelné pomocí nenucené i nucené konvekce. Ve výrobě se preferuje využití nucené konvekce. Důvodem toho je, aby bylo možné dodat dostatečný přísun tepla pomocí soustav ventilátoru a topení na desku plošného spoje. Konvekční pec využívá primární zdroje tepla z topných článků k získání potřebné energie pro přetavení pájecí pasty. Teplo od zdroje topných článků se získává z ohřátého plynu (vzduch, dusík, ...) pomocí soustavy ventilátoru po jedné nebo obou stranách montážní a propojovací sestavy. Tím, jak je teplý plyn do trysek v peci vháněn velkou rychlostí, ohřeje všechna místa rovnoměrněji a dochází tak k lepšímu prohřátí celé desky.

Konvekční pece se skládají z několika nezávisle regulovatelných teplotních zón a pohyblivého pásového dopravníku. [6]

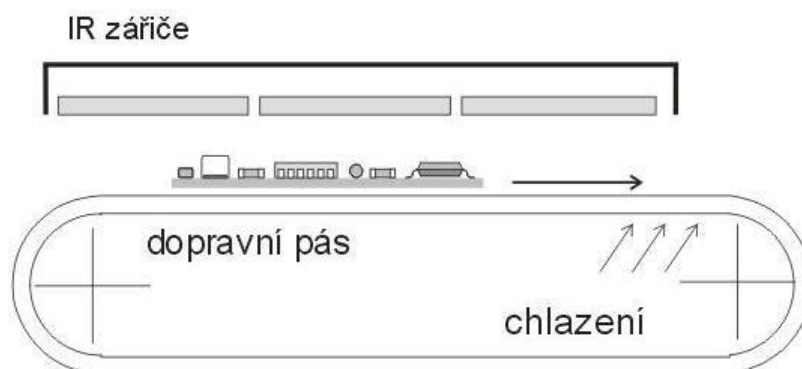


Obrázek 1: Schéma konvekční reflow pece (pohled shora). [8]

4.2. Pájení infračerveným zářením

Pro pájení infraohřevem se využívá IR (infračervené) zářičů, které vyprodukují energii potřebnou k přetavení pájecí pasty na montážním celku. Množství absorbovaného tepla závisí na koeficientu vlnové délky záření. Na pájecí proces se využívají nejčastěji průběžné infračervené pece, které jsou vybaveny pásovým dopravníkem. Jako IR zářiče se nejčastěji používají wolframové zářiče a jsou komponovány nad i pod dopravník, což má pak za následek, že DPS je ozařována z obou stran. Soustava IR zářičů je v peci rozložena tak, aby v jednotlivých zónách byl zajištěn charakteristický teplotní profil, podobně jako to je u soustavy konvenčního modulu v konvenční peci.

Při tomto druhu pájení dochází k nerovnoměrnému rozložení teploty na povrchu DPS. Je známo, že součástky s tmavší barvou jsou více zahřívány oproti místům s lesklým povrchem. Důsledkem toho jsou některé součástky více tepelně namáhány, což má vliv na výslednou kvalitu pájecího procesu. [7] [8]

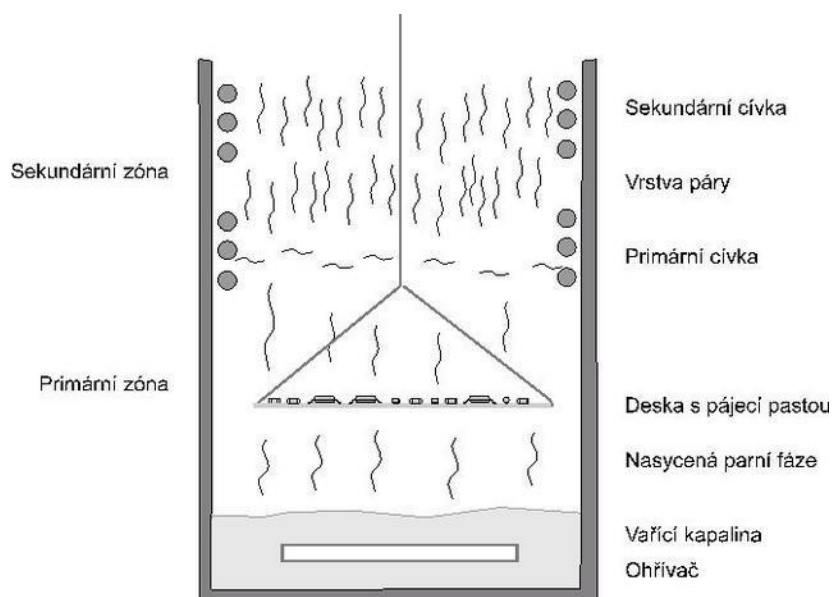


Obrázek 2: Jednoduchý model přetavovací pece využívající infračervené záření. [8]

4.3. Pájení v parách

Pájení v parách pracuje na principu zahřívání kapaliny na bod varu a jejím následném odpaření. Osazené součástky v pájecí pastě se nejdříve přehřejí a poté se vloží do zóny odpařování. Pára kondenzuje na plochách DPS, součástek a jejich vývodu. Během kondenzace dochází k uvolňování tepla, které má za následek přenos par. To způsobí zahřívání desky plošného spoje a součástek na teplotu nutnou pro přetavení pájecí pasty a vytvoření pájeného spoje. Teplota, která kondenzaci způsobí je mnohem vyšší, než je teplota tavení pájky, pro bezolovnatou technologii je kolem 240 °C. Pro zabránění úniku páry ze stroje se využívá chladicího okruhu, kde pára kondenzuje a stékají zpět do zásobníku. Možné tekutiny využívající při pájení v parách jsou fluorouhlíky a perfluoropolyétery. [9]

Výhoda této technologie je, že se teplo dostane ve stejný čas a při stejném rozložení na celou pájenou DPS, a proto zde nenastává problém s rozdílnou tepelnou kapacitou komponent. Další výhodou je to, že pára vytlačuje z pájecího prostoru kyslík, takže při pájecím procesu nedochází k oxidaci pájených spojů. Nevýhoda je ta, že k dispozici jsou jen některé pájecí teploty a dochází ke ztrátám drahé kapaliny během pájecího procesu. [7] [9]



Obrázek 3: Znárodnění principu pájení v parách. [9]

4.4. Nanášení pájecí pasty

Pájecí pasty obsahují pájecí zrna z kovové složky, tavidla a modifikátory. U pájecích past hraje velkou roli nejenom typ tavidla a pájecí slitiny, ale také velikost zrn, kdy pro jemnější montáž je zapotřebí použít pastu s jemným zrnem. Pájecí pastu lze nanášet níže uvedenými způsoby.

Jeden způsob je dávkování disperzerem. Dávkování se provádí nejčastěji pomocí pístu, který tlačí tlakem pastu a vytlačuje ji ven z trysky na pájecí plošky. Přesnější metodou je využití šroubovice zkombinované s pístem, kde je pasta vháněna nejprve do šroubovice a z ní pak následně vytlačována

na daný povrch. S metodou dávkování disperzerem se lze nejčastěji setkat při prototypové výrobě, nebo při opravách vadných spojů.

Další způsob nanášení je tiskem přes šablonu. Pro tisk pasty v sériové výrobě se začaly používat leptané nebo galvanicky vyráběné šablony, které začaly rychle nahrazovat dávkovače a síta. Při této metodě nanášení pájecí pasty se musí do upevňovacího rámu umístit kovová šablona s přesným vzorem, který se má nanést na DPS. Šablona vyrobená z kovu se neprohýbá a je umístěna přímo na DPS. Po upevnění šablony a přiložení na desku lze nanášet pájecí pastu pomocí těrky. Tloušťka šablony se pohybuje kolem 0,1 mm - 0,5 mm a reguluje nám množství nanášené pasty. [10] [11]

4.5. Teplotní pájecí profil

Při pájení přetavením jsou nejdůležitějšími parametry teplota oblasti teplotního vyrovnání, strmost profilu během přetavení, maximální teplota a čas strávený nad teplotou tavení. Každá pájecí pasta má v katalogu uveden optimální pájecí profil, který je zapotřebí v peci správně nastavit, aby došlo ke spolehlivému zapájení všech míst na DPS. [7]

Profil reflow se skládá ze čtyř oblastí (Obr. 2) [2]:

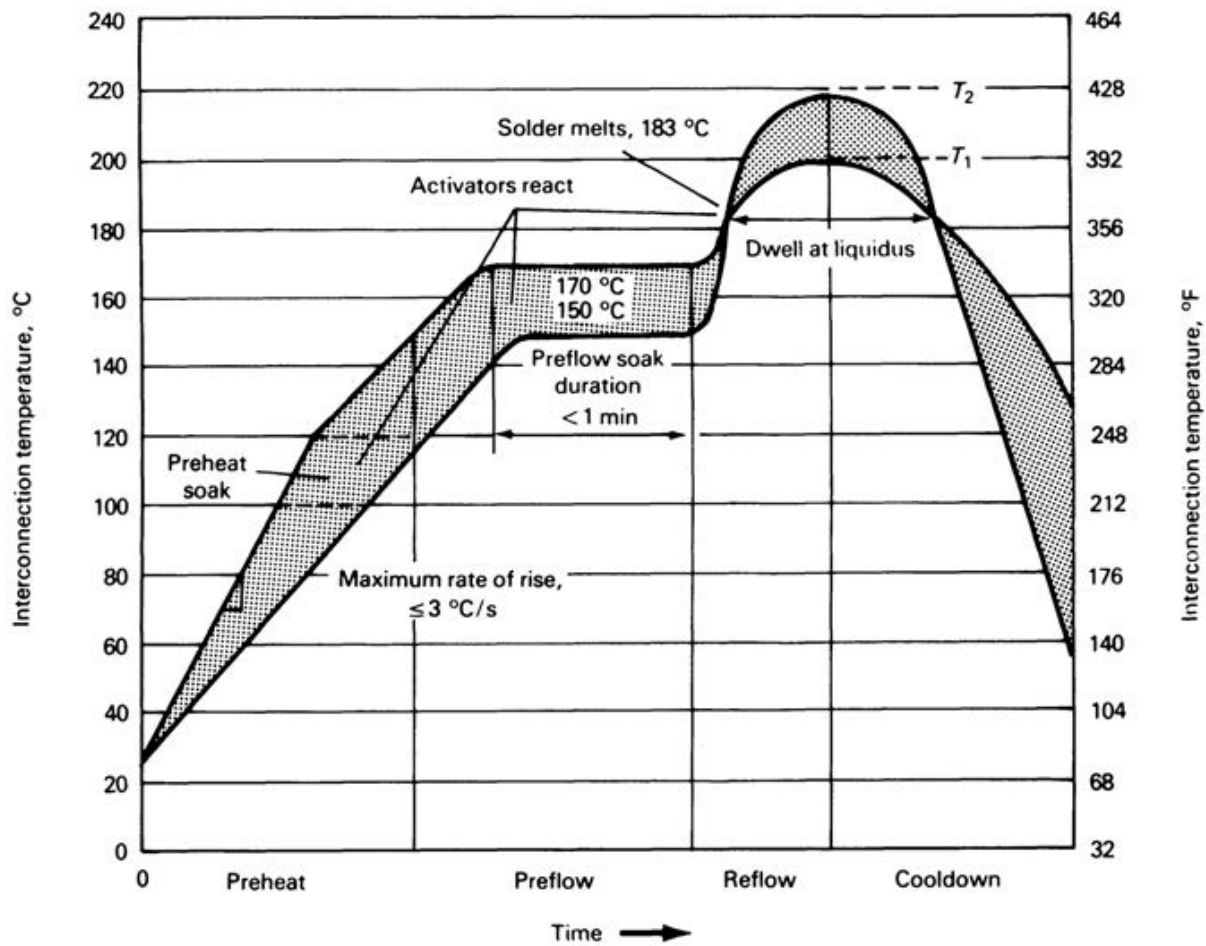
- Preheat – předeřev
- Preflow soak – oblast vyrovnání teploty, aktivace tavidla
- Reflow – přetavení pasty
- Cooldown – chlazení

Předeřev. Předeřevu se využívá proto, aby se snížilo riziko tepelného šoku a případné delaminace u komponent a DPS. Rychlost a doba ohřevu by měla vycházet z typů použitých materiálů. Během fáze předeřevu začínají působit aktivátory a začnou se odpařovat rozpouštědla, zároveň dochází v tomto stádiu k redukci oxidů. [2]

Preflow. Předtím, než se dosáhne teploty reflow, je DPS přivedena k teplotě pod bod tavení pájky. Zde aktivátory tavidla reagují s povrchem a dochází k čištění pájecích plošek. Teplotní rozsah a doba trvání této oblasti vyrovnávající teploty se odvíjí od zvoleného typu tavidla a složení pájecí pasty. Je-li časový interval preflow příliš dlouhý, může dojít k oxidaci pasty a degradaci tavidla. [2]

Reflow. Během reflow fáze jsou všechny pájené spoje na DPS v oblasti dosahujících požadovaných vrcholových teplot. Většina výrobců pájek doporučuje přiblížit maximální teplotu přibližně 15 až 30 °C nad bodem tání slitiny, aby se zajistilo dobré zapájení všech součástek. Doba trvání, kdy je pájený spoj nad bodem tání pájecí pasty se nazývá čas nad liquidem. Je to nejdůležitější část reflow, protože se jedná o nejvyšší teploty, které musí DPS během procesu vydržet. [2]

Cooldown. Část teplotního profilu, kdy DPS již překročila svou maximální teplotu a začíná chladnout, během toho dochází k tuhnutí pájeného spoje. Chlazení lze napomáhat například: ventilátory, přičemž rychlejší chlazení podporuje jemnější růst zrn ve spojích. [2]



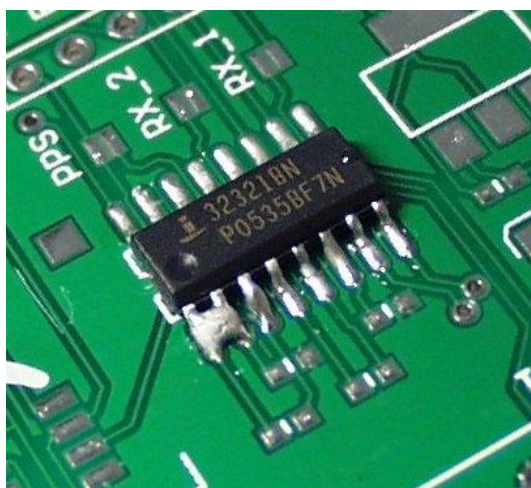
Obrázek 4: Průběh teplotního profilu. [2]

5. Chyby při pájení

Během celého procesu pájení se může vytvořit mnoho defektů a chyb. Tyto chyby mají pak značný vliv na spolehlivost a správnou funkčnost DPS. Níže je uveden přehled vybraných chyb, se kterými se můžeme v této problematice setkat.

5.1. Můstky

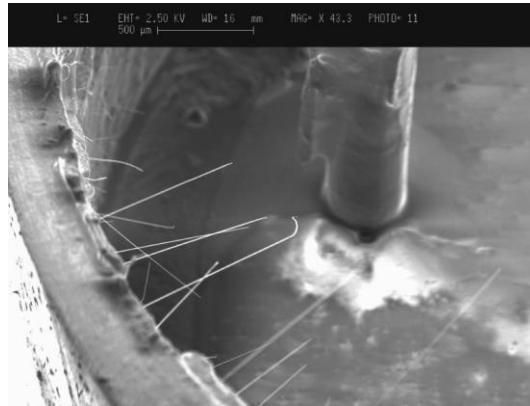
Můstky jsou jen jedním z mnoha problémů, které se mohou na DPS vyskytnout během výroby. Dochází k tomu, když se dva nebo více spojů propojí díky nadměrnému množství pájky, čímž vzniká spojující most. V některých případech není identifikace pájecí mostu tak snadná, jedná se především o mikroskopické velikosti můstků nebo špatně viditelné můstky pod pouzdry součástek. Možné příčiny vzniku můstku jsou například: příliš malá vzdálenost mezi pájecími ploškami, špatně nanesená pájecí pasta nebo špatné osazení součástky. [12]



Obrázek 5: Pohled zblízka na můstek vytvoření mezi dvěma spoji. [12]

5.2. Whiskery

Cínové whiskery jsou tenká kovová vlákna, které vycházejí z cínových povrchů. Tyto vlákna jsou vodivá a mohou způsobit zkratky mezi sousedními vodiči, které pak mohou poškodit funkčnost DPS. Whiskery dosahují velikosti až do 1 cm a podmínky mající vliv na jejich růst je vlhkost, teplota teplotního cyklu, tlak, apod. [13]

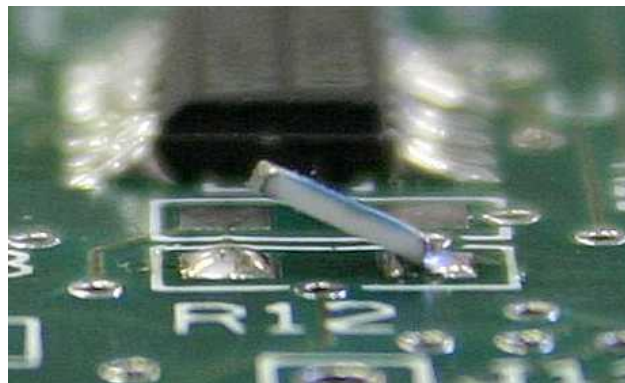


Obrázek 6: Cínové whiskery na desce z cínu. [15]

5.3. Tombstone efekt

Tombstone efekt je jen jedním z mnoha problémů, které se mohou vyskytnout během procesu pájení součástek na DPS. Tombstone je typický u dvou vývodových součástek pro povrchovou montáž, jako je například rezistor nebo kondenzátor. Součástka je zvednuta díky nerovnováznosti smáčecích sil u jejich vývodů. Když se součástka postaví na jeden konec, je DPS nefunkční a elektrický obvod je rozpojen. Některé z nejčastějších příčin problému vznik tombstone efektu na DPS může zahrnovat [14]:

- Teplota reflow pece je nerovnoměrná
- Pájecí pasta byla nanášena na pájecí plošky nerovnoměrně
- Nepřesné osazení součástky na pájecí plošky



Obrázek 7: Efekt tombstone znázorněný na SMD součástce. [16]

5.4. Voidy v pájeném spoji

Přechod na bezolovnaté pájky s sebou přinesl mnoho problémů se spolehlivostí pájeného spoje a jeho kvalitou. U olovnatých pájek se tyto problémy taktéž vyskytovaly, jenže v menší míře. Jedním z těchto problémů je zvýšená tvorba voidů (dutin) ve spoji. Vznik voidů je typický při procesu pájení přetavením. Faktory ovlivňující tvorbu dutin zahrnují interakci mnoha faktorů.

Voidy v pájených spojích jsou považovány za hrozbu z pohledu spolehlivosti pájených spojů, a tedy elektronických sestav. Následkem tvorby dutin se může vyskytnout problém celého zařízení, obzvláště při tepelném, nebo mechanickém namáhání. Literatura uvádí, že menší množství dutin nemá závažný vliv na spolehlivost spoje. Nejlepší řešení by bylo jejich úplné odstranění z pájených spojů, což není snadné dosáhnout. [15]

5.4.1. Vliv voidů a jejich vznik

Voidy jsou definovány jako dutiny vytvořené v pájeném spoji. Příčin vzniku dutin je několik. Jednou z příčin je odpařování tavidla, které je zachyceno v pájeném spoji během reflow.

Voidy se projevují snížením mechanické odolnosti, spolehlivosti a vodivosti pájeného spoje. Vliv na spolehlivost pájeného spoje má zejména velikost, množství a umístění voidů v pájeném spoji.

Pájené spoje v elektronické sestavě plní elektrickou, mechanickou a tepelnou funkci. Odpor pájeného spoje by měl být co nejmenší a neměla by být velká odchylka v odporu mezi sousedními pájecími spoji, aby nedocházelo k nerovnoměrnému proudovému zatížení. Odpor pájeného spoje závisí na velikosti a četnosti voidů ve spoji. Je proto důležité množství voidů ve spojích, pokud možno co nejvíce omezit. [15]

Znamé typy voidů jsou tyto: makrovoidy, mikrovoidy, Kirkendallové voidy, shrinkage voidy (vzniklé smršťováním pájky), voidy v mikropropojích a dírkové voidy.

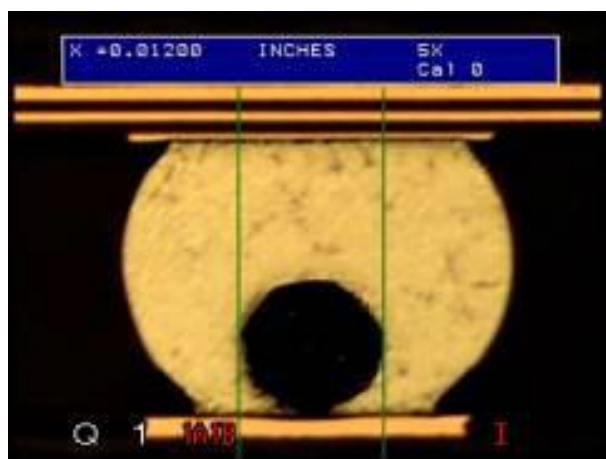
5.4.2. Makrovoidy

Makrovoidy, jinak také nazývané procesní voidy, je možné najít v pájecích spojích nejčastěji. Lze je snadno detekovat na první pohled na rentgenových snímcích pájených spojů. Velikost těchto dutin je definována nad 100 μm v průměru. Jedná se o plynné útvary, podobající se kulovitému tvaru, které zůstávají v pájce po jejím ztuhnutí. Hlavní příčina vzniku jsou těkavé látky obsažené v tavidlech. Během chladnoucí pájky zůstávají tyto látky v kapse plynu obklopeny a zachyceny v pájeném spoji. Procesní voidy bývají rozprostřeny v celém objemu spoje a nabývají několika velikostí. Pevnost spoje nejvíce ohrožují ne samotné dutiny, ale jejich vliv při provozu obvodu, a to především pokud jsou dutiny rozmístěny ve spoji blízko sebe, či v jedné rovině. V těchto oblastech pak dochází při průchodu proudem k většímu zahřívání spoje a možnému vzniku nejrůznějších mikroprasklin. [16]

Vlivy na vznik makrovoidů: [17]

- Pájecí pasta
 - rozpouštědlo (množství, teplota varu, těkavost),
 - nanesené množství,
 - vlastnosti pasty (materiál, složení, ...),
 - tavidlo (aktivita, množství),
- Pájecí profil
 - maximální teplota,
 - čas nad teplotou liquidu,

- doba aktivace tavidla,
- strmost profilu,
- užití ochranné atmosféry,
- DPS a součástky
 - povrchová úprava,
 - velikost a design (pájecí maska, pokovení, materiál substrátu),
 - obsah oxidů na pájeném povrchu,
 - znečištění
- všeobecné faktory
 - teplota a vlhkost okolí,
 - znečištění během montáže desky

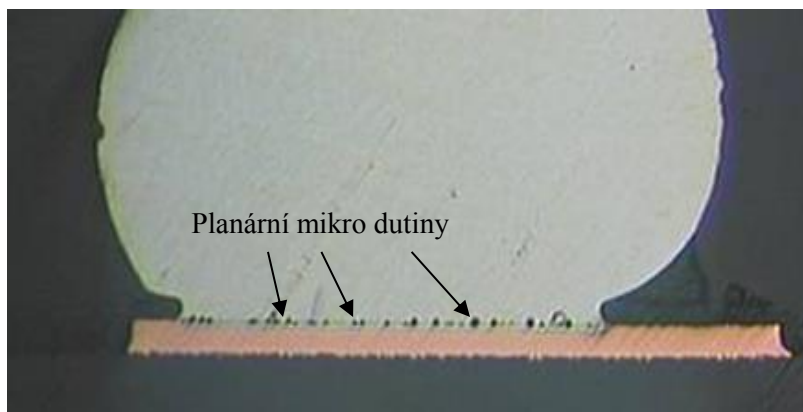


Obrázek 8: Makro dutiny v pájených spojích. [19]

5.4.3. Mikrovoidy

Mikrovoidy jsou malé dutinky na rozhraní pájeného povrchu spoje a pájky nad intermetalickou vrstvou. Rozměrově jsou menší než 25 μm . Jsou nebezpečné tím, že se vytváří v souvislé vrstvě na rozhraní spoje. Přítomnost mikrovoidů je těžko detekovatelná na funkčním testu ihned po výrobě. Způsobují degradaci spoje v průběhu stárnutí, což může způsobit poruchy ztráty pevnosti spoje či změnit elektrickou vodivost pájeného spoje.

Vznik mikrovoidů souvisí s volbou pájecí slitiny a povrchové úpravy měděných ploch. Nejvíce mikrovoidů je možné pozorovat při pájení nedostatečně hladkých povrchů a při použití nevhodných povrchových úprav. [17]



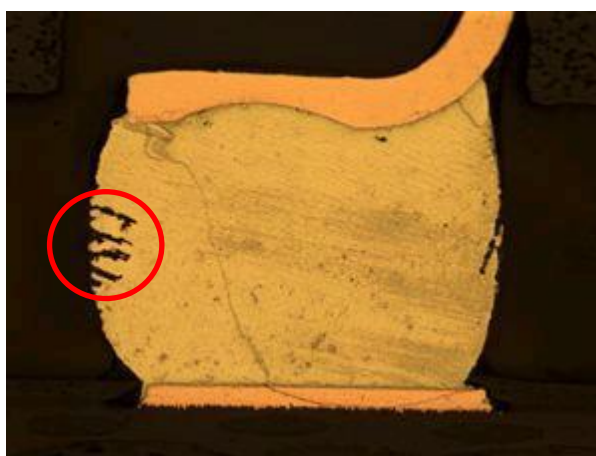
Obrázek 9: Výskyt planárních mikro dutin. [19]

5.4.4. Kirkendallové voidy

Kirkendallové voidy neboli také intermetalické dutiny, se vyskytují při použití olovnatých i bezolovnatých pájecích slitin. Jejich vznik je v důsledku elektromigrace atomů dvou kovů na jejich rozhraní například rozhraní mědi a spodní intermetalické vrstvy pájeného spoje. Dostačující pro tvorbu Kirkendallových voidů mezi rozhraním dvou kovů je dostačující dlouhodobé vystavování teplotě vyšší než 100 °C. Tyto voidy se tvoří postupně a po přetavení jejich výskyt není možné detekovat ani predikovat. [17]

5.4.5. Voidy vzniklé smršťováním pájky

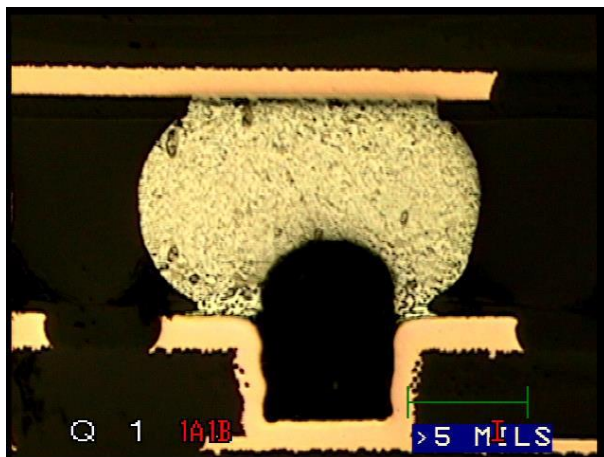
Tento druh voidů se odborně nazývá Shrinkage voidy. Tvoří se převážně při používání bezolovnatých pájek SAC při procesu chladnutí, který způsobuje předčasné smršťování ještě před ztuhnutím pájecího spoje. V průběhu tuhnutí narušený spoj vytváří větší množství shrinkage voidů, které jsou často vidět na rentgenových snímcích. Podobají se prasklině (dendritické větvi). Nemají vliv na spolehlivost pájeného spoje a v průběhu tepelného stárnutí se nezvětšují. Jsou přirozenou součástí SAC spojů a je možné je pomocí vhodného pájecího profilu minimalizovat. [17]



Obrázek 10: Shrinkage voidy. [19]

5.4.6. Voidy v mikropropojích

Mikro-Via voidy, dutiny tohoto typu se nejčastěji nachází v přítomnosti mikropropoje v oblasti pod BGA pouzdrém. Dutiny jsou způsobeny dostatečně nevyplněným mikropropojem pájkou a jejich tvar může být různý. Vytvoření těchto voidů je nejvíce ovlivněno složením tavidla a povrchovou úpravou mědi, kterou je mikropropoj pokoven. Nevhodně zvolenou povrchovou úpravu lze kompenzovat použitím více aktivovaného tavidla, které umožní pájce se lépe roztéct a zaplnit mikropropoje. Spolehlivou cestou, jak se vyhnout dutinám je vyplnění a vyhlazení mikropropoje před osazením BGA. Tímto způsobem zamezíme případné možnosti nezaplnění propoje. Dalším způsobem zamezení výskytu těchto voidů je například tiskem výplňové pasty. [17]



Obrázek 11: Mikro-via void. [19]

5.4.7. Dírkové voidy

Dírkové dutiny jinak nazývané Pin Hole voidy, se vyskytují podobně jako Kirkendallovsky voidy na rozhraní spodní intermetalické vrstvy a měděné vrstvy DPS, nicméně princip jejich vzniku je odlišný. Na jejich tvorbě mají hlavní podíl vady ve vrstvě galvanické mědi DPS, která přichází do kontaktu s pájecí slitinou. Chemické látky se usazují během výroby ve vadných ploškách a v průběhu pájení se odpařují. Jejich velikost je mikroskopická, řádově 1-3 μm a k detekci je zapotřebí elektronový mikroskop. Pin hole voidy mají vliv na kvalitu pájeného spoje. Jejich přítomnost v oblasti intermetalických vrstev zvyšuje pravděpodobnost vzniku prasklin. Díky křehkosti intermetalických sloučenin se rychle rozšiřují a vedou až k možnému studenému spoji. Zamezení vzniku pin hole spočívá v pečlivé kontrole procesu plátování mědi. [17]

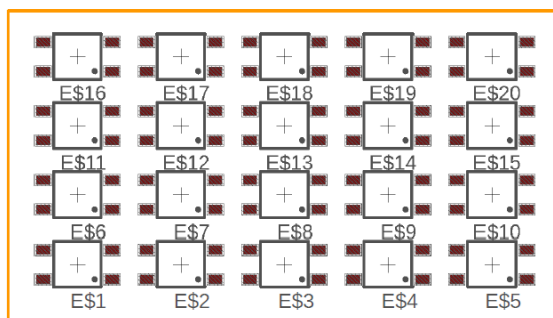
Praktická část

1. Návrh experiment

Praktická část této práce se zabývá vlastní detekcí voidů ve vzorcích pájených spojů. Výskyt voidů v pájených spojích se dá omezit několika faktory (některé jsem již zmiňoval v teoretické části). Omezením voidů lze pak dosáhnout vyšší spolehlivosti pájeného spoje. Vytvoření pájených vzorků bylo provedeno pájením přetavením, které je považováno za nejpoužívanější metodu pájení. Rozhodl jsem se, že budu analyzovat voidy s ohledem na tři odlišně tlusté šablony pro tisk pájecí pasty. Pájecí pasty jsem si zvolil dvě, které se liší pouze složením tavidla a množstvím halogenidů. Pro účely experimentu jsem navrhl DPS s třemi odlišnými povrchovými úpravami. Po vytvoření a zapájení vzorků pomocí reflow pece jsem provedl RTG pájených spojů. Následně jsem RTG snímky s voidy analyzoval pomocí vyhodnocovacího programu NIS Elements a provedl vyhodnocení takto získaných dat.

1.1. Návrh DPS

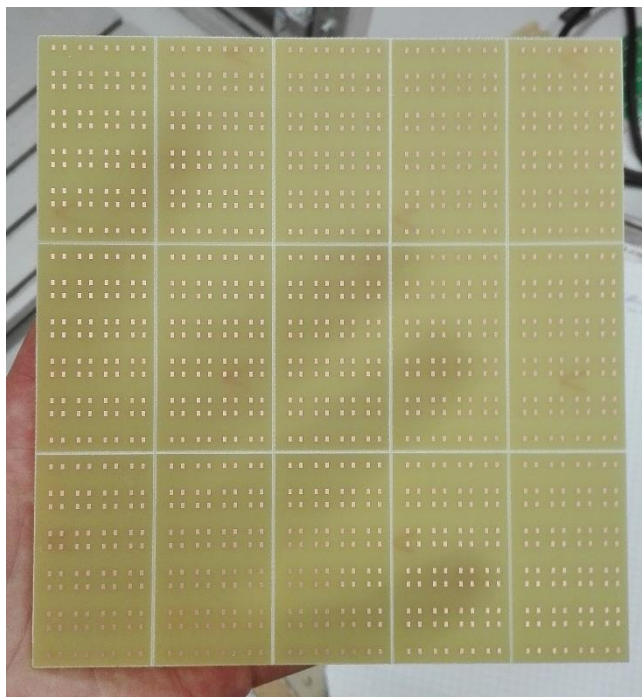
Abych mohl provést analýzu voidu bylo potřeba nejprve navrhnout testovací DPS, na které budu vytvářet pájené spoje. K návrhu DPS jsem využil program EAGLE od firmy AUTODESK. V něm jsem vytvořil motiv, který můžete vidět na obrázku 13. Na základě tohoto motivu jsem si nechal vytvořit sadu 15 destiček s různým typem povrchových úprav a k nim příslušné šablony.



Obrázek 12: Motiv použitý pro návrh DPS.

1.2. Povrchové úpravy

Pro analýzu voidu byly vybrány testovací desky z materiálu FR4 s tloušťkou 1,5 mm. Jako povrchovou úpravu měděných plošek jsem zvolil OSP, HAL a ENIG. DPS byly hned po doručení použity pro vytvoření pájených vzorků. Před nanesením pájecí pasty na pájecí plošku byla DPS očištěna izopropylem.



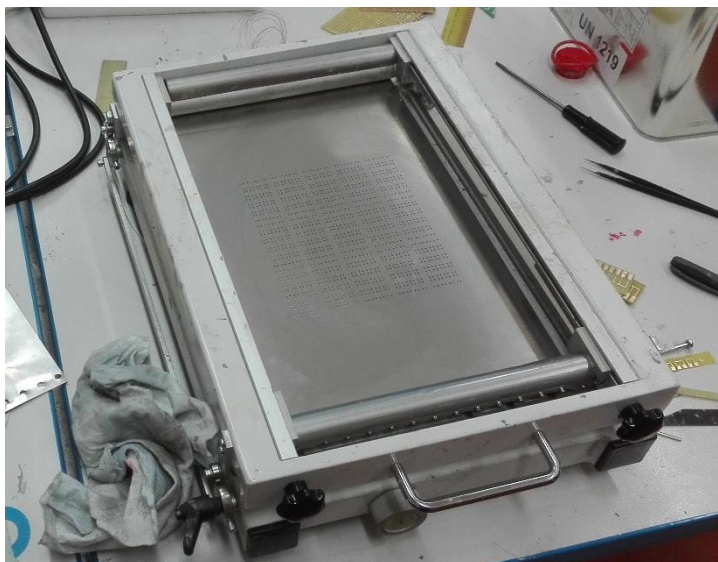
Obrázek 13: DPS s povrchovou úpravou ENIG a se zvoleným motivem.

1.3. Metoda nanesení pájecí pasty

Pro nanesení pájecí pasty na DPS byla použita metoda šablonového tisku. K DPS byly vytvořené vhodné šablony, kdy jednou částí experimentu je porovnání rozdílného množství nanesené pájecí pasty na vliv výskytu voidů. Pájecí pasta se nanášela přímo přes šablonu na DPS za pomoci třerky. Pro nanesení pasty na DPS se využily tři šablony se stejným motivem (shodný rozměr otvorů v šabloně), které se lišily v tloušťce: 100 μm , 150 μm a 200 μm . Rozdílná tloušťka šablon má za následek nanesení jiného množství pájecí pasty na DPS. Procentuálně se objem použité pasty při zvětšení tloušťky šablony o 50 μm zvětší o 25 %.

Tabulka 4: Porovnání parametrů použitých šablon.

Parametry	Šablona 1	Šablona 2	Šablona 3
Tloušťka [μm]	100	150	200
Výška otvorů [μm]	600	600	600
Šířka otvorů [μm]	1500	1500	1500
Množství nanesené pájecí pasty [%]	50	75	100



Obrázek 14: Zařízení pro šablonový tisk, pomocí kterého jsem nanášel pájecí pasty.

1.4. Pájecí pasty

Pro experiment byla využita pájecí pasta SAC305, složení slitiny je z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Pro experiment byly použity dvě bezolovnaté pájecí pasty se stejným složením pájecí slitiny, ale obsahovali odlišná tavidla s rozdílným procentuálním množstvím halogenidu. Pájecí pasty jsou od společnosti NEVO a nesou označení PF606-P25 a PF606-P.

Tabulka 5: Základní parametry pájecí pasty PF606-P25 a PF606-P. [20] [21]

Pájecí Pasta	PF606-P25	PF606-P
Složení	Sn/Ag3,0/Cu0,5/x	Sn/Ag3,0/Cu0,5/x
Teplota přetavení °C	217-219 °C	217-219 °C
Velikost zrn [μm]	20-45	20-45
Viskozita [Pa.s]	200 ± 30	200 ± 30
Množství tavidla [%]	11,5 ± 0,1	11,5 ± 0,1
Typ tavidla	ROL0	ROL1
Množství halogenidu [%]	<0,05 (v tavidle)	<0,5 (v tavidle)

1.5. Pájení přetavením

Pro pájení přetavením byla použita přetavovací pec s konvekčním ohřevem Mistral 260. Zahřívání atmosféry (vzduch) se děje přes topná tělesa a k cirkulaci tepla v peci slouží ventilátory uvnitř pece. Pec Mistral 260 je složena ze třech nezávislých teplotních zón, chladicí zóny a dopravníkového pásu. Nastavení teploty jednotlivých topných zón pro teplotní profil a rychlost dopravníkového pásu je možné pomocí dotykového displeje na peci.



Obrázek 15: Přetavovací pec Mistral 260. [8]

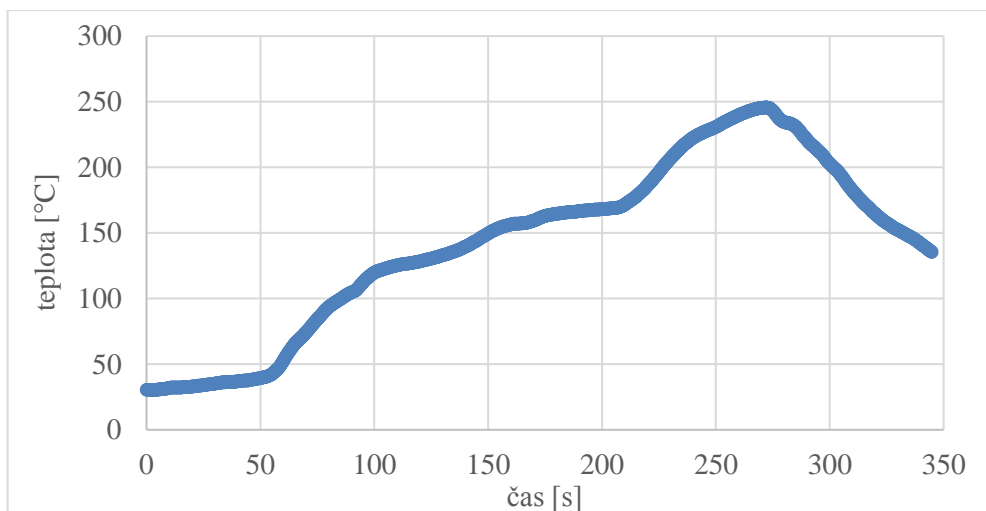
1.6. Teplotní profil

Nastavení topných zón v peci Mistral 260 bylo provedeno tak, aby teplotní profil dosahoval doporučeného průběhu pro pájecí pastu od výrobce NEVO. Katalogové parametry týkající se teplotního profilu pro použité pájecí pasty Nevo PF606-P25 a PF606-P spolu s použitými parametry pro pájení přetavením jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6: Parametry teplotního profilu

Parametry	Doporučení teplotní profil	Použito pro pájení přetavením
Předehřev čas (155-185 °C) [s]	30-120	63
Doba nad teplotou 220 °C [s]	30-100	75
Maximální teplota [°C]	230-250	245,6

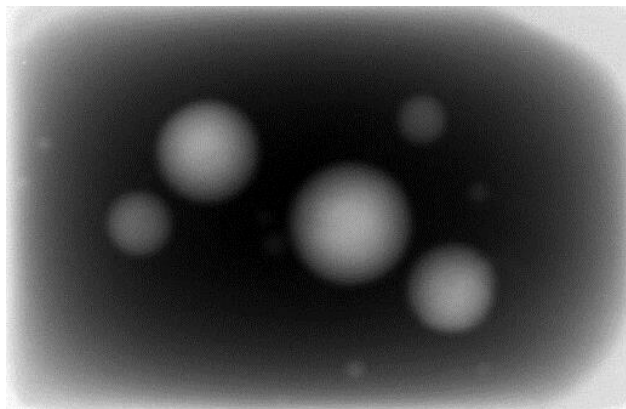
Z tabulky 6 je možné vidět, že bylo dodrženo doporučené nastavení teplotního profilu pro pájecí pastu. V grafu 1 je naměřený teplotní profil, který byl použitý pro přípravu vzorků v peci Mistral 260.



Graf 1: Použitý teplotní profil pro pájecí pasty.

1.7. Snímky pájených spojů pomocí RTG

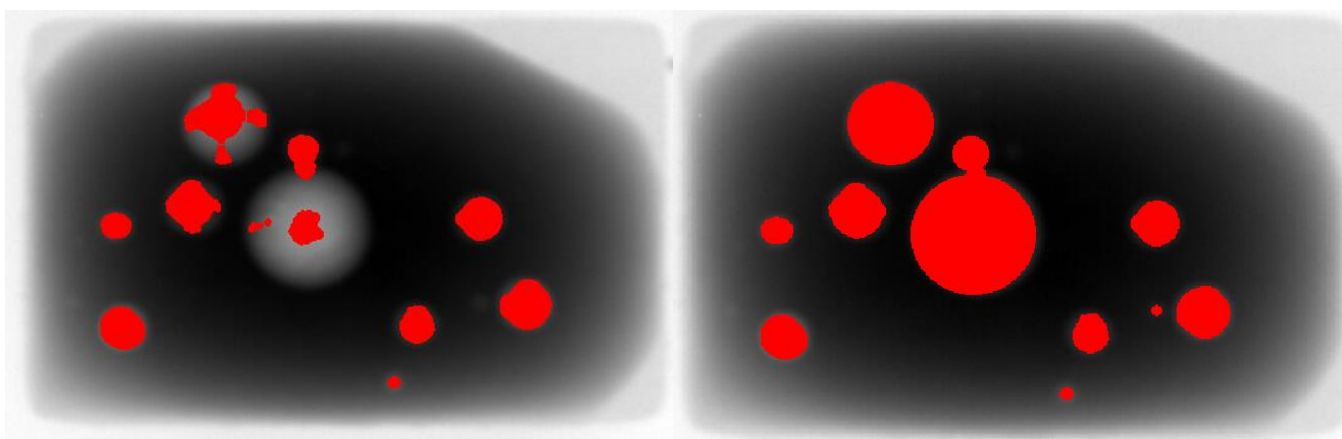
Vzorky byly po přetavení v peci podrobeny RTG diagnostice. Jedná se o nedestruktivní metodu kontroly a využívá se zde stejného principu jako v lékařství. Skrz pájené spoje prochází rentgenové paprsky, které vytváří stínový obraz založený na rozdílné hustotě materiálu. K této analýze byl využit mikro-ohniskový rentgenový inspekční systém GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T. Tímto rentgenem bylo vyfoceno celkem 360 snímků. Pomocí vhodných softwarů se tyto snímky dále vyhodnotily.



Obrázek 16: Snímek pájeného spoje z RTG.

1.8. Analýza RTG snímku

Pro vyhodnocování RTG snímku jsem použil program NIS-Elements, který umožňuje obrazovou analýzu. V tomto softwaru jsem využil makro, které je schopné vyznačit světlejší místa na RTG snímku pájených spojů a získat tak informaci o označených plochách. Makro není nejpřesnější, a proto bylo potřeba označení dutin v některých případech korigovat.



Obrázek 17: Automatická analýza snímku (vlevo) a Manuální analýza snímku (vpravo).

Úpravy analýzy snímků bylo použito u všech 360 spojů s různými povrchovými úpravami. Na snímku je vidět, že se vyskytuje mnoho voidu. Voidy, které mají plochu menší než $100 \mu\text{m}^2$, jsem do výsledného výsledku hodnot nezapočítal. Pro analýzu voidů v pájeních spojích byly použity procesní voidy (makrovoidy) nad $100 \mu\text{m}^2$.

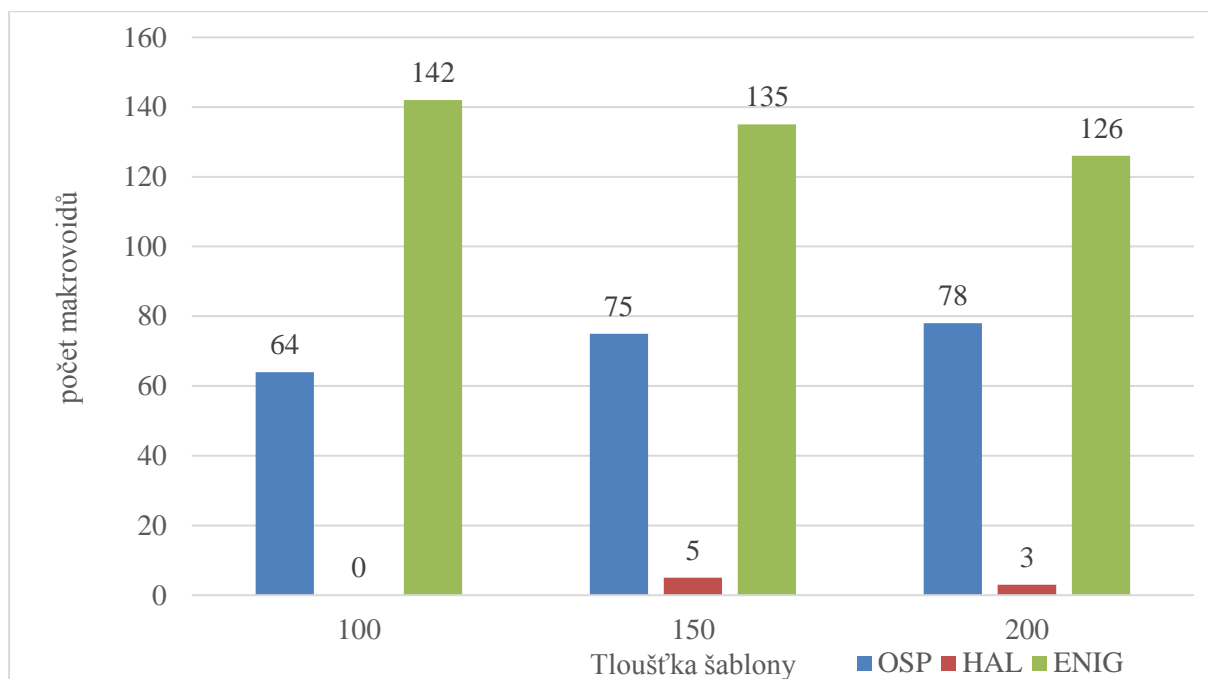
2. Vyhodnocení vzorků

Pomocí obrazové analýzy byly získány data. Tyto data byly následně zpracovány a vyhodnoceny. Pro zapájené vzorky jsem využil 2 pájecí pasty PF606-P25 a PF606-P, které se liší složením různých tavidel (více informací v tabulce 5), potom třemi různými povrchovými úpravami a třemi odlišně použitými tloušťkami šablon. Data uvedeny v tabulce 7 znázorňují počet makrovoidů, celkovou plochu makrovoidů v mikrometrech a pak makrovoidivost vzhledem k celkové ploše vzorků.

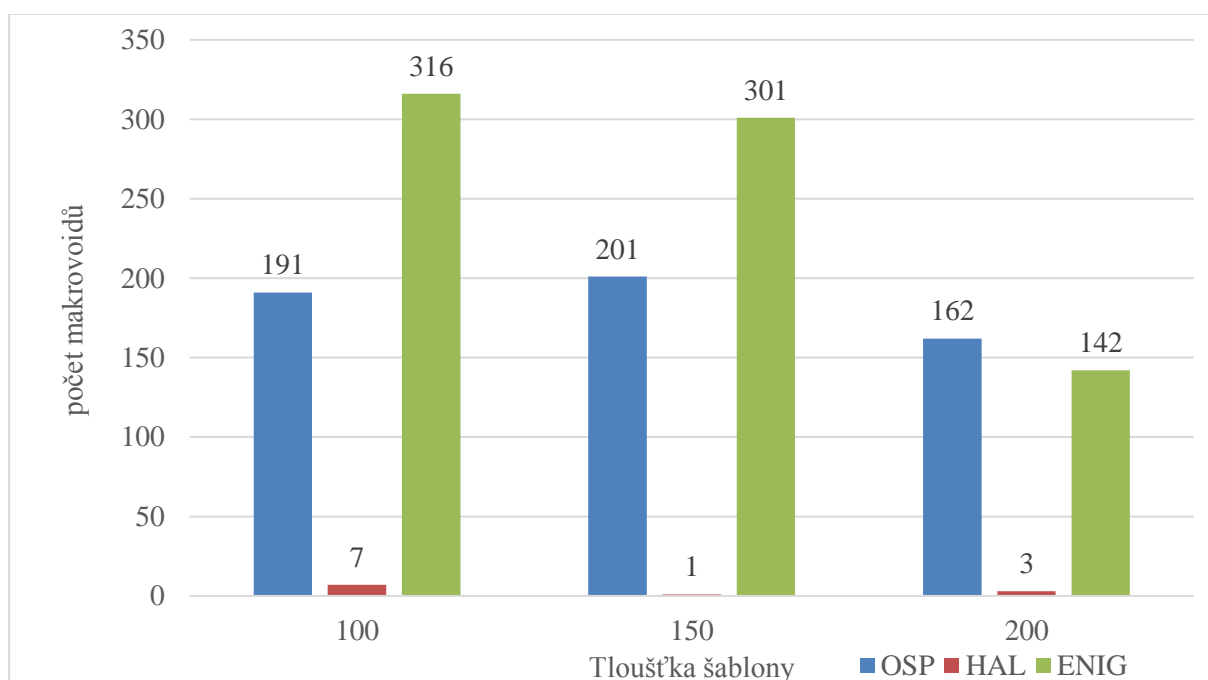
Tabulka 7: Získané hodnoty ze vzorků.

Tloušťka šablony [μm]	Typ povrchové úpravy	Typ pájecí pasty	Počet makrovoidů	Celková plocha makrovoidů [μm^2]	Makrovoidivost vzhledem k celkové ploše [%]
100	OSP	PF606-P25	64	73760	1,51
		PF606-P	191	183497	3,90
	HAL	PF606-P25	0	0	0,00
		PF606-P	7	5353	0,11
	ENIG	PF606-P25	142	99328	2,11
		PF606-P	316	123744	2,63
150	OSP	PF606-P25	75	72908	1,55
		PF606-P	201	263015	5,60
	HAL	PF606-P25	5	2054	0,04
		PF606-P	1	1076	0,02
	ENIG	PF606-P25	135	83962	1,79
		PF606-P	301	148248	3,15
200	OSP	PF606-P25	78	104020	2,21
		PF606-P	162	338448	7,20
	HAL	PF606-P25	3	2049	0,04
		PF606-P	3	2872	0,06
	ENIG	PF606-P25	126	102533	2,18
		PF606-P	142	72195	1,54

2.1. Četnost makrovoidů v pájených vzorcích

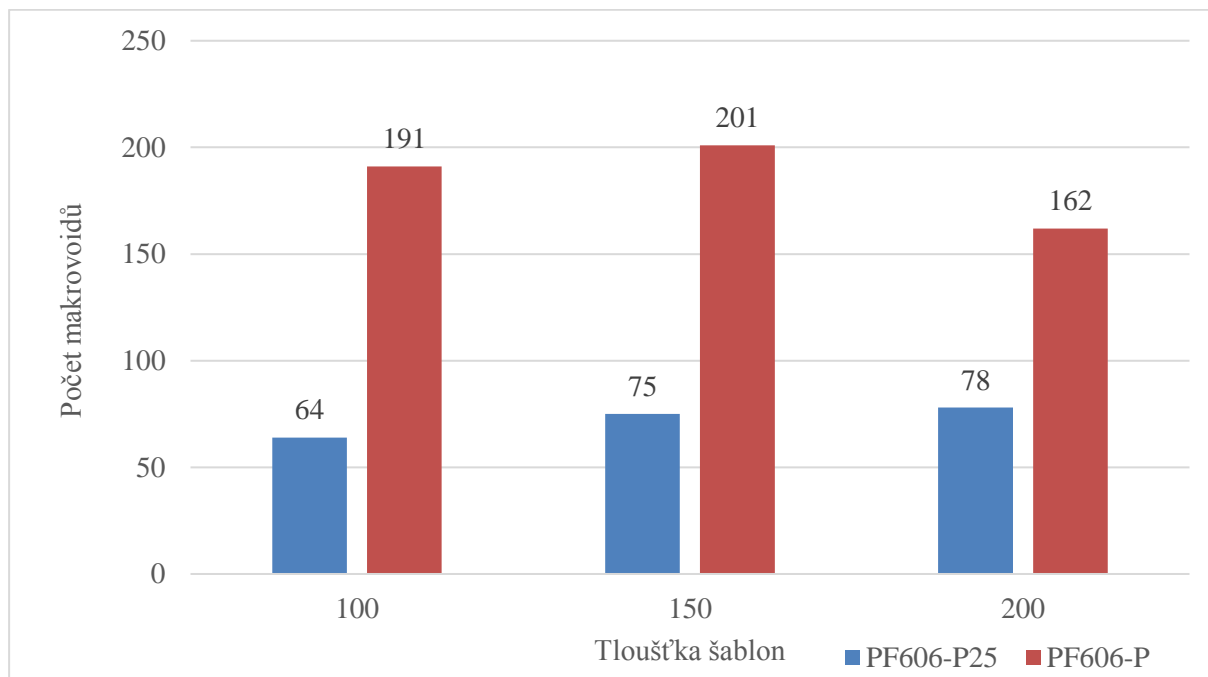


Graf 2: Celkový počet makrovoidů pro pájecí pastu PF606-P25 s ohledem na nanesené množství pájecí pasty (tloušťku šablony) a typy povrchových úprav.



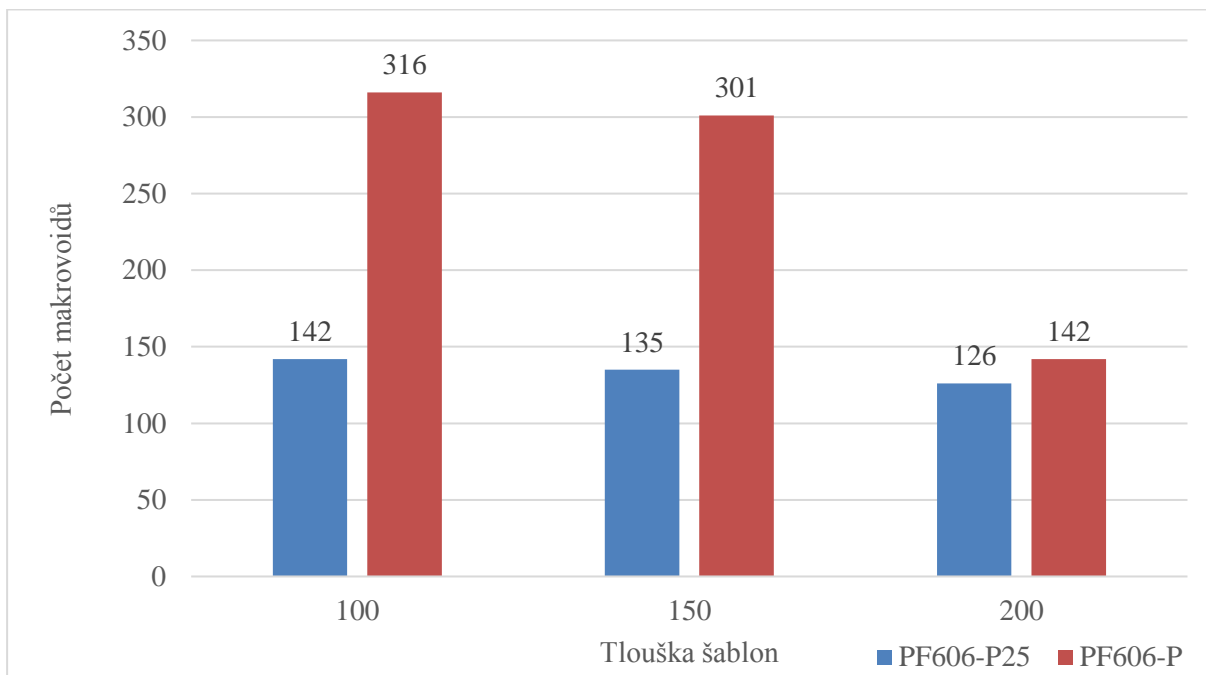
Graf 3: Celkový počet makrovoidů pro pájecí pastu PF606-P s ohledem na nanesené množství pájecí pasty (tloušťku šablony) a typy povrchových úprav.

Jak je patrné z grafů 2, 3, největší počet makrovoidů v pájených spojích se vyskytuje u povrchové úpravy ENIG při tloušťce šablony 100 μm . Při použití větší tloušťky šablony je u této povrchové úpravy vidět postupný pokles výskytu makrovoidů. Oproti tomu u povrchové úpravy OSP v kombinaci s pájecí pastou PF606-P25 došlo s použitím tlustší šablony k mírnému nárůstu četnosti makrovoidů, zatímco v kombinaci s pájecí pastou PF606-P došlo při použití nejtlustší šablony k poklesu četnosti makrovoidů. Z grafů 2, 3 je patrné, že četnost makrovoidů v případě povrchové úpravy HAL, je příliš nízká, abychom na základě toho byli schopni odhadnout nějaký trend.



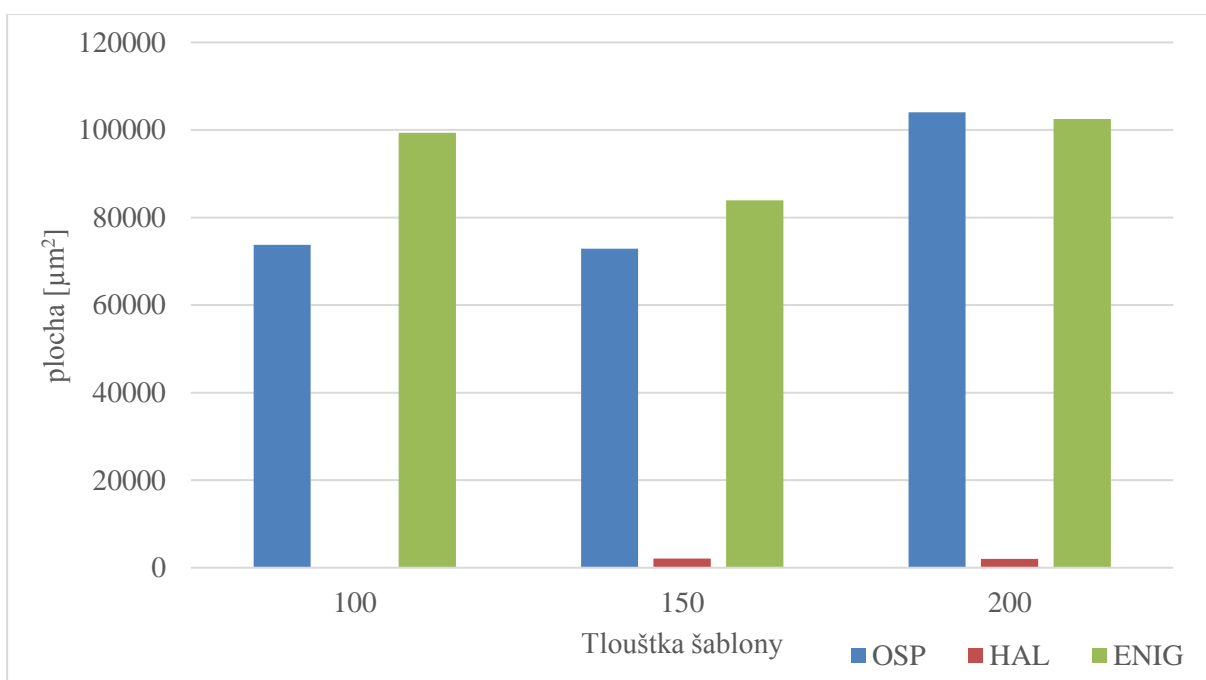
Graf 4: Četnost makrovoidů odlišných pájecích past s ohledem na nanášené množství pájecí pasty (tloušťku šablony) pro povrchovou úpravu OSP.

Z grafu 4, 5 je možné vidět, že vznikalo více makrovoidů v pájecí pastě PF606-P, která má odlišné tavidlo (větší množství halogenidů) oproti druhé pastě. Při nanášení různého množství pájecí pasty PF606-P je z výsledku možné vidět, že i přes menší objem pasty ve spojích je téměř ve všech případech výskyt makrovoidů větší oproti ostatním nanášením. V případě pájecí pasty PF606-P25 a povrchové úpravy OSP se četnost makrovoidů s nanášeným množstvím pasty mírně zvětšuje. Opačně je tomu v případě téže pasty u povrchové úpravy ENIG, kde se četnost makrovoidů snižuje s větším objemem nanášené pájecí pasty. Graf pro HAL není uděláný, protože se v této úpravě nevyskytovaly téměř žádné makrovoidy, jak znázorňuje tabulka 7.

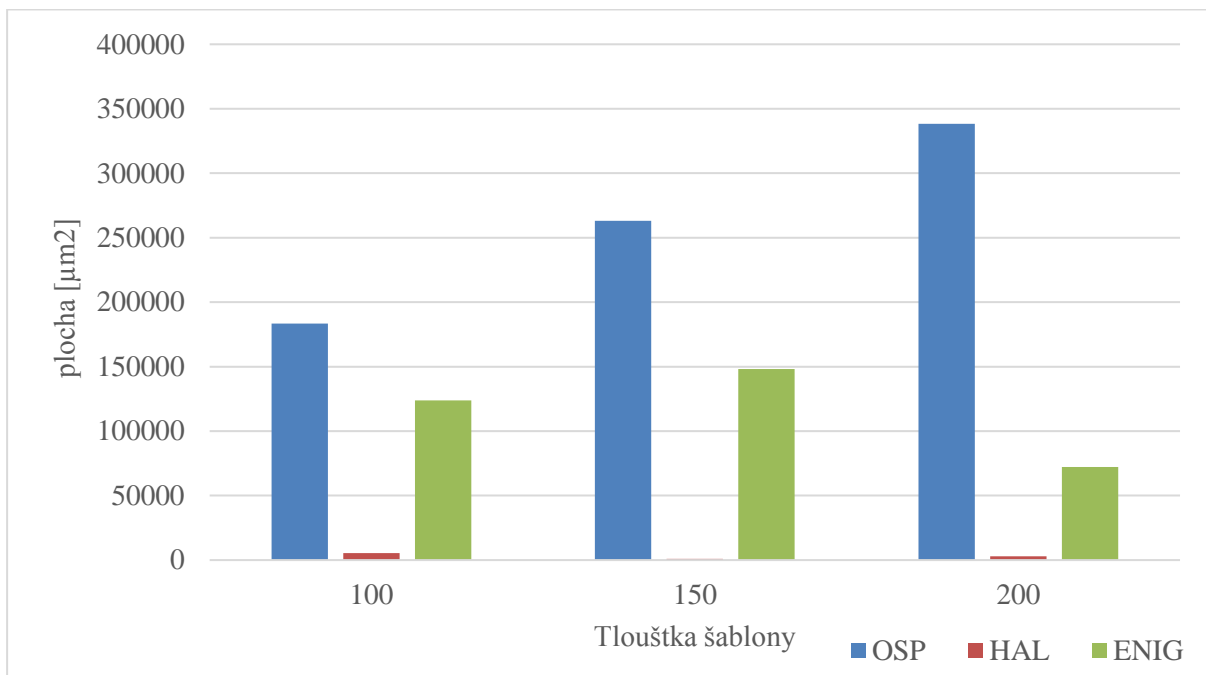


Graf 5: Četnost makrovoidů odlišných pájecích past s ohledem na nanesené množství pájecí pasty (tloušťku šablony) pro povrchovou úpravu ENIG.

2.2. Celková plocha makrovoidů ve vzorcích

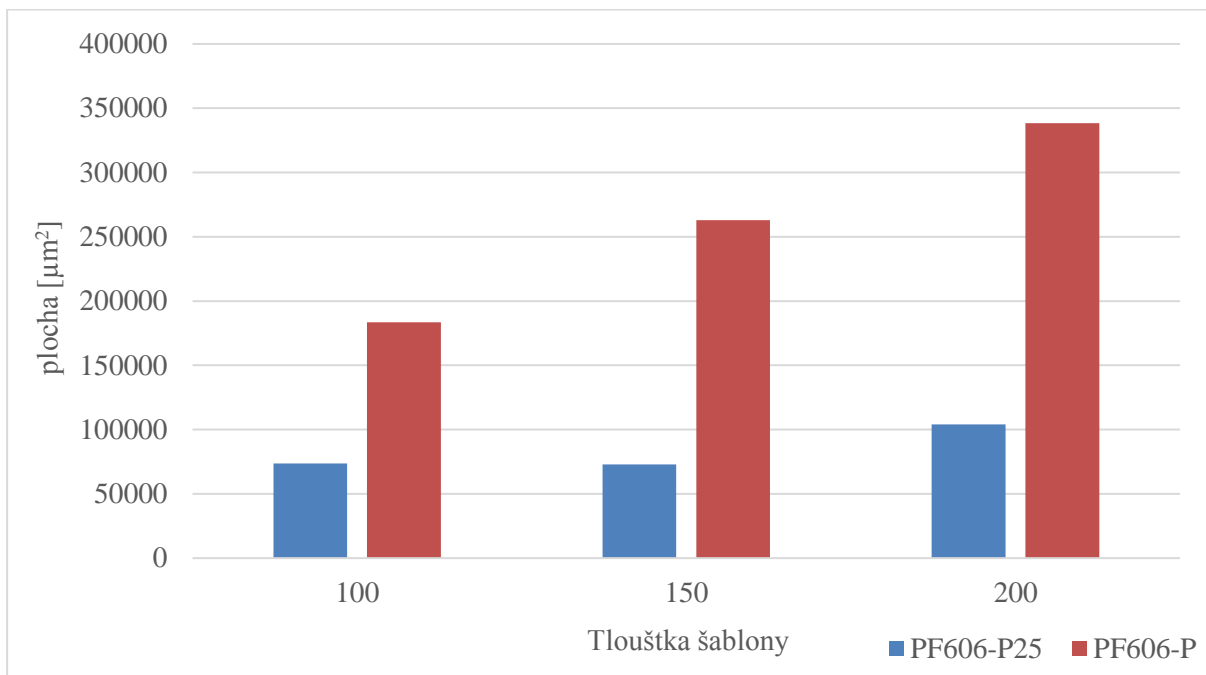


Graf 6: Celková plocha makrovoidů ve vzorcích pro pájecí pastu PF606-P25 s ohledem na nanesené množství pájecí pasty (tloušťku šablony) a typy povrchových úprav.

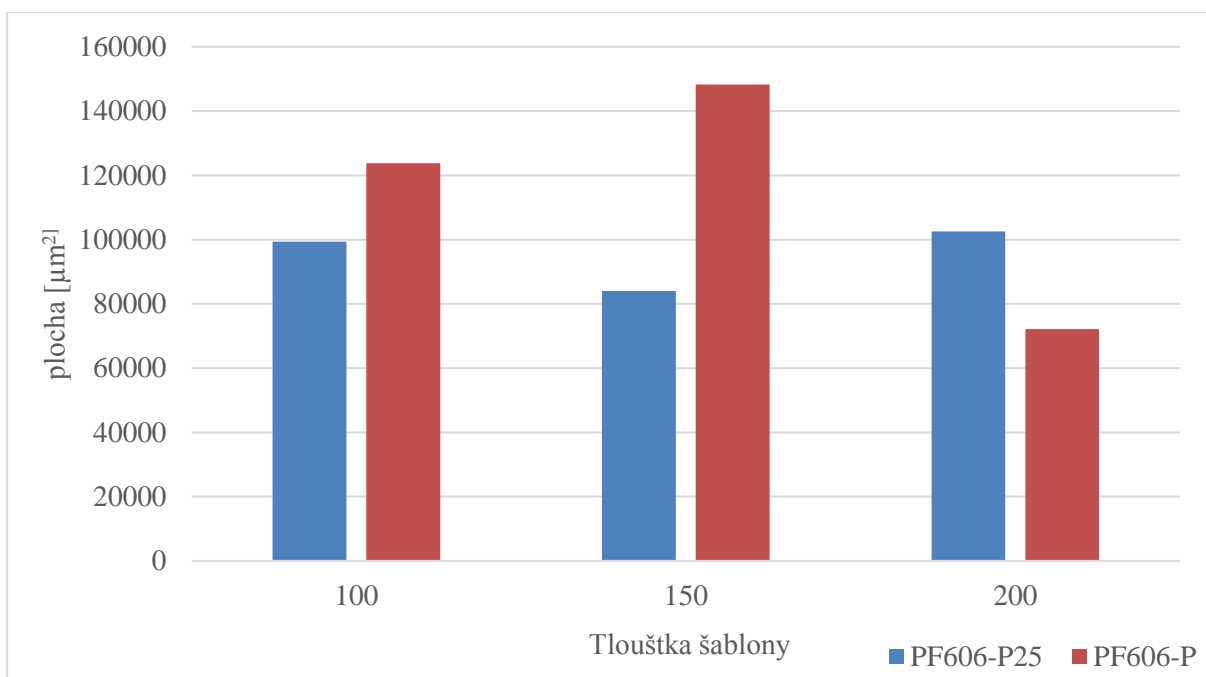


Graf 7: Celková plocha makrovoidů ve vzorcích pro pájecí pastu PF606-P s ohledem na nanesené množství pájecí pasty (tloušťku šablony) a typy povrchových úprav.

Pro povrchovou úpravu OSP je z grafu 7 patrné, že s rostoucím objemem pájecí pasty PF606-P roste i celková plocha makrovoidů ve spojích a zároveň je celková plocha větší oproti pájecí pastě PF606-P25, viz graf 6. Úprava HAL vykazuje velmi malou celkovou plochu makrovoidů v důsledku malé četnosti makrovoidů ve spojích. Celková plocha makrovoidů je u pájecí pasty PF606-P25 v kombinaci s povrchovou úpravou ENIG oproti povrchové úpravě OSP větší při tloušťkách šablony 100 a 150 µm a téměř podobnou pro tloušťku šablony 200 µm. Tomu tak není u pájecí pasty PF606-P, kde je vidět, že celková plocha makrovoidů je u povrchové úpravy OSP větší v porovnání s povrchovou úpravou ENIG. Zároveň je celková plocha makrovoidů u povrchové úpravy ENIG a pájecí pasty PF606-P nejmenší při tloušťce šablony 200 µm.

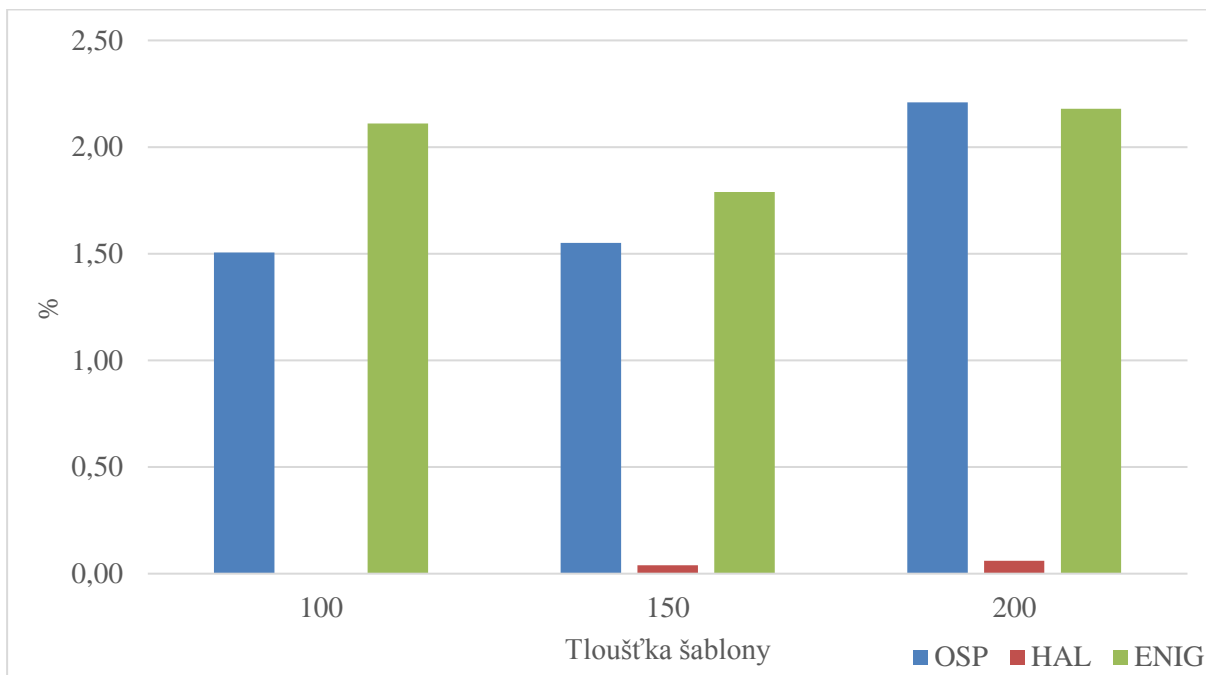


Graf 8: Celková plocha makrovoidů různých pájených past s ohledem na nanesené množství pájecí pasty (tloušťku šablony) pro povrchovou úpravu OSP.

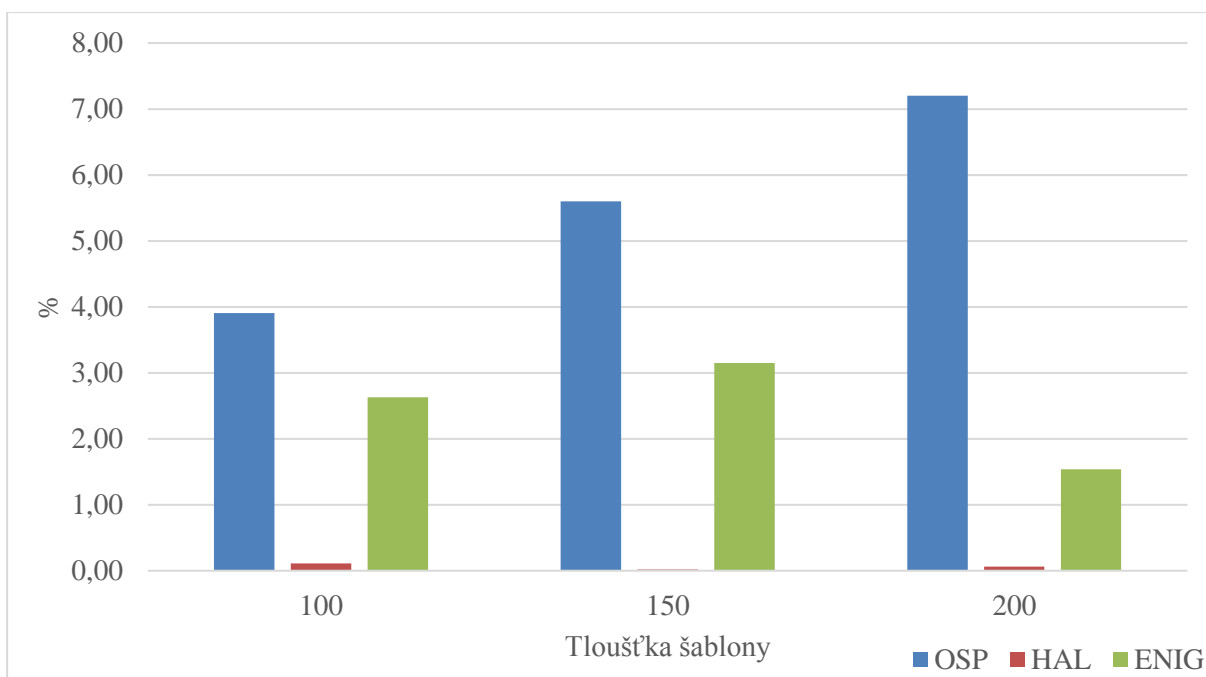


Graf 9: Celková plocha makrovoidů různých pájených past s ohledem na nanesené množství pájecí pasty (tloušťku šablony) pro povrchovou úpravu ENIG

Porovnáním grafu 8 a 9 je patrné, že pájecí pasta PF606-P zabírá větší plochu oproti pájecí pastě PF606-P25. S nanesením většího množství pájecí pasty PF606-P roste celková plocha makrovoidů téměř ve všech případech, pouze v případě povrchové úpravy ENIG došlo při tloušťce šablony 200 µm k poklesu celkové plochy makrovoidů. Nanesení většího množství pájecí pasty PF606-P25 na povrchovou úpravu OSP vedlo k postupnému mírnému nárůstu celkové plochy makrovoidů, zatímco pro povrchovou úpravu ENIG byla minimální celková plocha makrovoidů dosažena v případě šablony o tloušťce 150 µm.



Graf 10: Procentuální vyjádření poměru plochy makrovoidů vzhledem k celkové ploše pro pájecí pastu PF606-025 s ohledem na nanesené množství pájecí pasty a typy povrchových úprav.



Graf 11: Procentuální vyjádření poměru plochy makrovoidů vzhledem k celkové ploše pro pájecí pastu PF606-P s ohledem na nanesené množství pájecí pasty a typy povrchových úprav.

Grafy 10 a 11 znázorňují poměrové výsledky. Výsledky jsou podobné, jako tomu je v případě celkové plochy makrovoidů v grafech 6, 7. Z grafu 11, pro pájecí pastu PF606-P, je možné vidět, že při použití povrchové úpravy OSP je plocha makrovoidů ve spoji mnohem větší, než u ostatních povrchových úprav. Oproti tomu pro pájecí pastu PF606-025, viz graf 10, je procentuální poměr u povrchových úprav OSP a ENIG podobný.

2.3. Porovnání výsledků tloušťky šablony

Porovnání tří různých šablon o různé tloušťce bylo provedeno na základě počtu makrovoidů ve vzorcích a jejich průměrné plochy. Rozdílná tloušťka šablon má za následek nanesení jiného množství pájecí pasty na DPS. V závislosti na použité pájecí pastě a zvolené povrchové úpravě se četnost makrovoidů zvyšoval nebo zmenšoval. Nanesením o 25 % více pájecí pasty na pájecí plošku dochází ke zvětšení počtů a celkové plochy makrovoidů u povrchové úpravy OSP. Naopak u povrchové úpravy ENIG dochází ke zmenšení počtu makrovoidů a celková plocha makrovoidů je odlišná v závislosti na typu pájecí pasty.

2.4. Porovnání výsledků povrchových úprav

V tomto experimentu se využívalo třech odlišných povrchových úprav (HAL, ENIG, OSP). V případě povrchové úpravy HAL se při analýze RTG snímků nenalezly skoro žádné makrovoidy. Ze 120 snímků pájených spojů udělaných pro HAL bylo nalezeno jen 33 voidů z toho 19 makrovoidů. Stávalo se, že ve spojích nebyly přítomné žádné makrovoidy. V důsledku nízké četnosti makrovoidů ve spojích u povrchové úpravy HAL nebylo možné tak dobře porovnat výskyt makrovoidů v závislosti na velikosti šablon a použitých pájecích pastách.

Opačně tomu je u ostatních povrchových úprav. Pro povrchovou úpravu OSP se objevoval ve spojích hojný počet makrovoidů, které z použitých kombinací povrchových úprav zabíraly největší procentuální plochu s ohledem na celkovou plochu spoje.

Pro povrchovou úpravu ENIG je četnost makrovoidů největší, nicméně nevykazují ve spoji tak velkou plochou jako v případě povrchové úpravy OSP, přičemž se makrovoidy u všech použitých kombinací vyskytují náhodně v celém pájeném spoji.

2.5. Porovnání výsledků pájecích past

Zvolené pájecí pasty mají stejné složení slitiny, liší se typem tavidla (různé množství halogenidu). Z dat je jasně vidět, že počet makrovoidů ve vzorcích pájecí pasty PF606-P je ve většině případů zhruba dvojnásobně vyšší, než u pájecí pasty PF606-P25. To samé platí i pro celkovou plochu, kterou makrovoidy zabíraly. Zajímavostí u pájecí pasty PF606-P25 je ta, že při větším množství nanesené pájecí pasty byl počet makrovoidů u všech tloušťek šablon téměř stejný. To neplatí pro PF606-P, která vykazuje pokles makrovoidů s nanesením většího množství pájecí pasty.

Závěr

V této práci jsem nejprve čtenáře seznámil s technologií pájení přetavením a chybami souvisejícími s touto technologií. V prvních kapitolách teoretické části se zabývám bezolovnatým pájením a složením bezolovnatých pájek. Poté následuje zmínka ohledně typů povrchových úprav a pak samotné rozdělení technologií pájením přetavením. Následně jsem vypracoval přehled chyb vznikajících během procesu s důrazem na voidy, a příčiny mající vliv na jejich vznik.

V praktické části práce bylo cílem analyzovat voidy v pájených spojích za různých podmínek. K tomu, abych mohl analyzovat voidy bylo zapotřebí nejprve vytvořit samotné vzorky. Vzorky byly rozděleny podle typu zvolené pájecí pasty, povrchové úpravy a množství nanesené pájecí pasty. Poté jsem provedl RTG inspekci, kde pak byly jednotlivé snímky zkoumány obrazovou analýzou s následným vyhodnocením takto získaných dat.

U pájených spojů jsem sledoval plochu a množství dutin v závislosti na naneseném množství pájecí pasty, typu povrchové úpravy a dvou odlišných pájecích past. Je známo, že zvolený teplotní profil má rovněž vliv na tvorbu voidu, ovšem v této práci byl použit teplotní profil pro všechny vzorky stejný.

Z analýzy voidů v pájených spojích vyplývá, že při použití povrchové úpravy ENIG, je četnost voidů v pájeném spoji vyšší než u ostatních povrchových úprav, nicméně toto neplatí z pohledu celkové plochy voidů ve spoji. Největší plochu zabíraly voidy v případě použití úpravy OSP.

Pro povrchovou úpravu HAL, bez ohledu na použité pájecí pasty, byla plocha a četnost voidů minimální. Ze 120 snímků pájených spojů byl výskyt voidů zaznamenán jen ve 26 snímcích, kde bylo nalezeno 33 voidů a z nich 19 byly makrovoidy.

Dále je z analýzy vidět, že pájecí pasta PF606-P, která měla odlišné tavidlo oproti pájecí pastě PF606-P25, vytvářela větší četnost makrovoidů s větší plochou oproti té druhé. S toho lze usoudit, že zvolení tavidla v pájecí pastě má zásadní vliv na tvorbu makrovoidů v pájených spojích.

Další analýza v experimentu se týkala studie vlivu nanesení rozdílného množství pájecí pasty pomocí odlišně tloušťky šablony. Výsledky při různém množství nanesené pájecí pasty byly překvapivé. Pro povrchovou úpravu OSP se četnost makrovoidů projevovала přibližně stejně a celkový povrch makrovoidů se zvětšil se zvětšujícím se množstvím nanesené pájecí pasty. Naopak pro povrchovou úpravu ENIG se se zvětšujícím množstvím nanesené pájecí pasty četnost a celková plocha makrovoidů na pájecí plošce zmenšila.

Z analýzy celkově plyne, že větší část zaznamenaných voidů, které vznikaly ve vzorcích, lze klasifikovat jako procesní voidy (makrovoidy). Ukazuje se, že povrchová úprava HAL je nejvhodnější právě v důsledku toho, že se v ní objevuje nejméně voidů.

Z výsledku lze konstatovat, že použití různých povrchových úprav, pájecích past a množství nanesené pasty má značný vliv na vznik makrovoidů v pájených spojích. Pro různé aplikace je proto vhodné hledat vždy optimální řešení a pomocí materiálových nebo procesních parametrů počet makrovoidů omezit.

Seznam použité literatury

- [1] M. ABEL a V. Cimburek , Bezolovnaté pájení v legislativě i prax, Pardubice: ABE.TEC, 2005.
- [2] M. Schwartz, Soldering understanding the basics, Materials Park, Ohio: ASM International, 2014.
- [3] K.-n. TU, Solder Joint Technology Materials, Properties, and Reliability, Los Angeles: Springer, 2007.
- [4] D. Bušek, K. Dušek a et al, „Flux effect on void quantity and size in soldered joints,“ 2016.
- [5] A. Pietriková, J. Ďurišin a P. Mach, Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pro vodivé spájanie ve elektronike, Košice: Technickej univerzity v Košiciach, 2010.
- [6] J. Starý a P. Kahle, Plošné spoje a povrchová montáž., Brno, 2011.
- [7] J. Starý, Montážní a porojovací technologie, Brno: Skriptum VUT, 2010.
- [8] „Přetavení infračerveným zářením,“ ABE.TEC, s.r.o, 26 červen 2017. [Online]. Available: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-pretavenim/pretaveni-infracervenym-zarenim/>. [Přístup získán březem 2018].
- [9] „Pájení v parách,“ 26 červen 2017. [Online]. Available: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach/>. [Přístup získán březem 2018].
- [10] C. G. Koenen, „Od sítotisku k přesnému tisku pájecí pasty na DPS,“ duben 2016. [Online]. Available: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:27804/od-sitotisku-k-presnemu-tisku-pajeci-pasty-na-dps>. [Přístup získán duben 2018].
- [11] M. Kozák, „Vliv povrchové úpravy na vznik voidů v pájených spojkách,“ Praha, 2016.
- [12] S. Sattel, „What is Solder Bridging on a PCB?,“ Autodesk, 2016. [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/eagle/blog/solder-bridging-pcb/>. [Přístup získán duben 2018].
- [13] S. Sattel, „Tin Whiskers: PCB Soldering Issue,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/eagle/blog/tin-whisker-pcb-soldering-issue/>. [Přístup získán duben 2018].
- [14] S. Sattel, „What is PCB tombstoning,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/eagle/blog/what-is-pcb-tombstoning/>.
- [15] M. A. Previti, M. Holzler a T. Hunsinger, „Four ways to reduce void in BGA/CSP package to substrate connections,“ 2010. [Online]. Available: http://www.solderconnection.com/specsheets/Reduce_Voiding_in_BGACSP_Packages.pdf. [Přístup získán duben 2018].
- [16] V. Šimon, „Mechanismy vzniku dutin u bezolovnatých pájených spojů a vliv na spolehlivost,“ Ústav elektrotechnologie, Brno, 2015.
- [17] R. Aspandiar, „Voids in Solder Joints,“ v *SMTA Northwest Chapter Meeting*, 2005.

- [18] G. Budi Dharma, M. Hamdi a T. Ariga, „The Effects of Adding Silver and Indium to Lead-Free solders,“ duben 2009. [Online]. Available: <http://aws.org/bsmc/wj0409-45.pdf>. [Přístup získán 20 leden 2018].
- [19] SPIDÉ, „User manual. Mistral 260 (SHA ONE) Force Air convection oven,“ 2016.
- [20] SHENMAO TECHNOLOGY, „NEVO Lead-Free Solder Paste PF606-P,“ 1 březem 2016. [Online]. Available: <http://www.nevo-solder.com/wp-content/uploads/PF606-P25TDS-V02-01.pdf>. [Přístup získán 20 duben 2018].
- [21] SHENMAO TECHNOLOGY, „NEVO Lead-Free Solder Paste PF606-0,“ 1 březem 2016. [Online]. Available: <http://www.nevo-solder.com/wp-content/uploads/PF606-PTDS-V02-01.pdf>. [Přístup získán 20 duben 2018].