



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie**

Studium vlivu množství tavidla na výskyt voidů v pájeném spoji

**Study of the influence of flux amount on the occurrence of voids
in solder joints**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

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

Bc. Daniel Růžička

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Daniel Růžička**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Technologické systémy

Název tématu: **Studium vlivu množství tavidla na výskyt voidů v pájeném spoji**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s tematikou voidů v oblasti pájených spojů.
- 2) Připravte si sadu vzorků, u kterých budete sledovat výskyt voidů s ohledem na množství tavidla uvnitř pájecí pasty.
- 3) Výskyt voidů v pájených spojih vyhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

- [1] HWANG J. S.: Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálů pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2
- [4] WASSINK R. J. K.: Soldering in Electronics, second edition, Electrochemical Publication 1989, ISBN: 0 901150 24 X

Vedoucí: Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


doc. Ing. Pavel Mach, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 3. 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze 12. května 2014

.....

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu, Ing. Karlu Duškovi, Ph.D., za ochotu, trpělivost, cenné rady a pomoc při řešení problému souvisejících s touto prací. Mému bratrově za pomoc při tvorbě programu na zpracování naměřených dat a v neposlední řadě mé přítelkyni za psychickou podporu.

Anotace

Cílem této diplomové práce je seznámení se tematikou voidů v pájených spojích. Teoretická část této práce se zabývá technologiemi pájení, které se běžně používají, základními typy tavidel a chybami, které mohou vzniknout při procesu pájení. Z chyb jsou detailně probrány voidy. Praktická část se zabývá vlivem, jaký má množství tavidla v pájecí pastě na výskyt voidů v pájených spojích. Tento vliv je zkoumán jak s olovnatou, tak i s bezolovnatou pájecí pastou.

Annotation

The objective of this thesis is to introduce the occurrence of voids in solder joints. The theoretical part of this thesis deals with technologies of soldering that are used in common practice, basic types of fluxes and soldering defects. Voids are mainly introduced from defects. The practical part of this work deals with the influence of flux amount on the occurrence of voids in solder joints. This influence is studied both with lead solder paste and with lead-free solder paste.

Obsah

1. Úvod.....	9
2. Teorie pájení	10
2.1. Pájitelnost.....	10
2.2. Typy smáčení	10
2.2.1 Nesmáčení.....	10
2.2.2 Smáčení.....	11
2.2.3 Odsmačení	11
3. Metody pájení	12
3.1. Ruční pájení	13
3.2. Strojní pájení	13
3.2.1 Pájení vlnou	13
3.2.2 Pájení přetavením	15
3.2.3 Pájení laserem	19
4. Tavidla	21
4.1. Tavidla rozpustná v rozpouštědle.....	21
4.1.1 Pryskyřičná tavidla na bázi kalafuny	21
4.1.2 Syntetická tavidla.....	22
4.2. Tavidla rozpustná ve vodě	22
4.3. Bezoplachová tavidla	22
4.4. Klasifikace tavidel.....	23
4.4.1 PC J-STD-004.....	23
4.4.2 EN 9454-1	24
5. Chyby pájení	25
5.1. Špatná geometrie pájeného spoje.....	25
5.2. Tombstone efekt.....	26
5.3. Rozstřík pájky	27

5.4.	Popcorn efekt	28
5.5.	Nesmáčení	29
5.6.	Odsmáčení	29
5.7.	Zbytky nepřetavené pájecí pasty	30
5.8.	Whiskery	31
5.9.	Voidy	32
5.9.1	Makrovoidy	32
5.9.2	Mikrovoidy	35
5.9.3	Shrinkange voidy	36
5.9.4	Voidy v mikropropojích	36
5.9.5	Kirkendallový voidy	39
5.9.6	Dírkové voidy	40
6.	Praktická část	42
6.1.	Zadání	42
6.2.	Příprava vzorků	44
6.3.	Nanášení pájecí pasty	44
6.4.	Osazování desek	45
6.5.	Přetavení	46
6.6.	Analýza vzorků	47
6.7.	Vyhodnocení	50
6.7.1	Kapalná tavidla	50
6.7.2	Gelová tavidla	52
6.7.3	Shrnutí	54
7.	Závěr	56
8.	Citovaná literatura	57
9.	Seznam příloh	60
10.	Seznam obrázků	61
11.	Přílohy	63

1. Úvod

Spolehlivost pájeného spoje závisí na mnoha faktorech. Pájený spoj by měl zajišťovat dobré elektrické a i mechanické spojení součástek s deskou plošných spojů. Tyto dva důležité požadavky mohou být ovlivněny voidy (dutiny) vyskytujícími se v pájených spojích.

V teoretické části této práce se budu zabývat technologiemi pájení, které se užívají v praxi. Dále základními typy tavidel a jejich dělením. Na závěr teoretické části jsou popsány nejčastější chyby, které se mohou vyskytovat při procesu pájení. Důraz je kladen hlavně na výskyt voidů v pájených spojích. Jsou zde probrány všechny známé typy voidů a jejich výskyt.

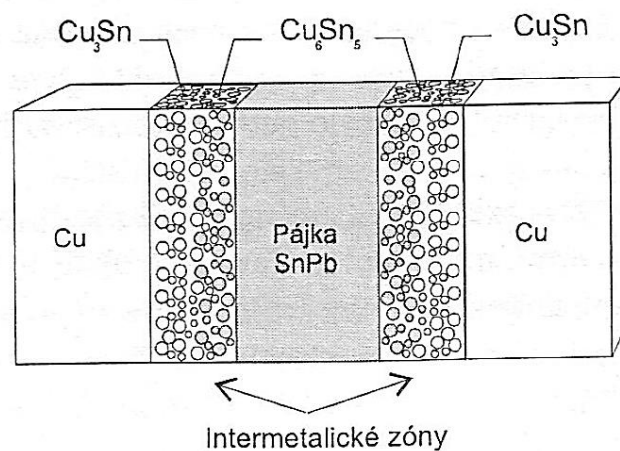
Praktická část této práce se zabývá studiem vlivu množství tavidla v pájecí pastě na výskyt voidů v pájených spojích. Tento vliv je zkoumán pro dvě různá množství tavidla přidaná tavidla do pájecí pasty. Pájecí pasta byla použita olovnatá i bezolovnatá.

2. Teorie pájení

Při procesu pájení dochází k metalurgickému spojování dvou kovů roztavenou pájecí slitinou. Roztavená pájka difunduje do povrchu pájeného kovu. Tím vznikne mezifázové rozhraní mezi dvěma kovy (viz Obrázek 1).

Pájení lze rozdělit, podle toho při jaké teplotě probíhá, na měkké a tvrdé. U měkkého pájení se používají teploty pájky do 500 °C. U tvrdého teploty nad 500 °C.

V elektrotechnickém průmyslu se nejvíce používá pájení měkké, kterým se budu zabývat. (1)



Obrázek 1 Intermetalický spoj (1)

2.1. Pájitelnost

„Pájitelnost definujeme jako schopnost povrchu kovu být rychle a v daném čase na celé ploše smočen pájkou.“ (2)

2.2. Typy smáčení

Během smáčení mohou nastat následující situace:

2.2.1 Nesmáčení

Při nesmáčení nedojde ke tvorbě metalurgické vazby. To má za následek viditelné rozhraní mezi pájkou a pájeným materiálem. K tomuto jevu dochází, pokud tavidlo nedokáže dostatečně odstranit z povrchu pájeného materiálu oxidy. To může být způsobeno tím, že je vrstva oxidů příliš silná nebo nedostatečnou aktivitou tavidla.

2.2.2 Smáčení

Při smáčení dochází ke tvorbě metalurgické vazby mezi povrchem pájeného materiálu a pájecí slitinou. Díky tomu se vytvoří dokonalý povrch.

2.2.3 Odsmačení

Pokud je spoj během pájení zahříván delší dobu, tak cín, který je v pájce obsažen, ustupuje z pájky a podílí se na růstu intermetalických vrstev. V pájce se zvyšuje obsah olova, které má špatnou smáčivost, a pájka ustupuje z již dříve smáčených oblastí (viz Obrázek 14). U bezolovnatých pájek může dojít k tomuto jevu, pokud je pájen povrch z drahých kovů. Ty se velmi snadno rozpouští v pájce s vysokým obsahem cínu. Pokud je pod povrchovou vrstvou z drahých kovů materiál se špatnou pájitelností, pájka opět ustoupí ze spoje. (1), (3)

3. Metody pájení

Pokud je zapájený spoj proveden správně, dochází k elektrickému i mechanickému spojení pájených součástí. Dodané množství pájky do spoje by mělo být takové, aby bylo vytvořeno dokonalé spojení. Obrysy vodiče by měly být pod pájkou dobře viditelné. Pro usnadnění optické kontroly je vhodnější lesklý a hladký povrch.

K vytvoření kvalitního pájeného spoje je potřeba dodržet několik základních úkonů:

Zde jsou uvedeny úkony, které je nutné dodržet, aby byl vytvořen kvalitní pájený spoj.

1. Fixovat pájené součásti v požadované poloze
2. Nanést tavidlo a aktivovat ho
3. Ohřát spoje na pracovní teplotu
4. Dodat pájku do spoje
5. Ochladit spoj
6. Očistit spoj od zbytků tavidla

Jejich přesné dodržení však není nutné, protože se jedná o základní princip. Provádění některých úkonů může probíhat současně, nebo se mohou, v závislosti na použité technologii, provádět během pracovního procesu na různých místech.

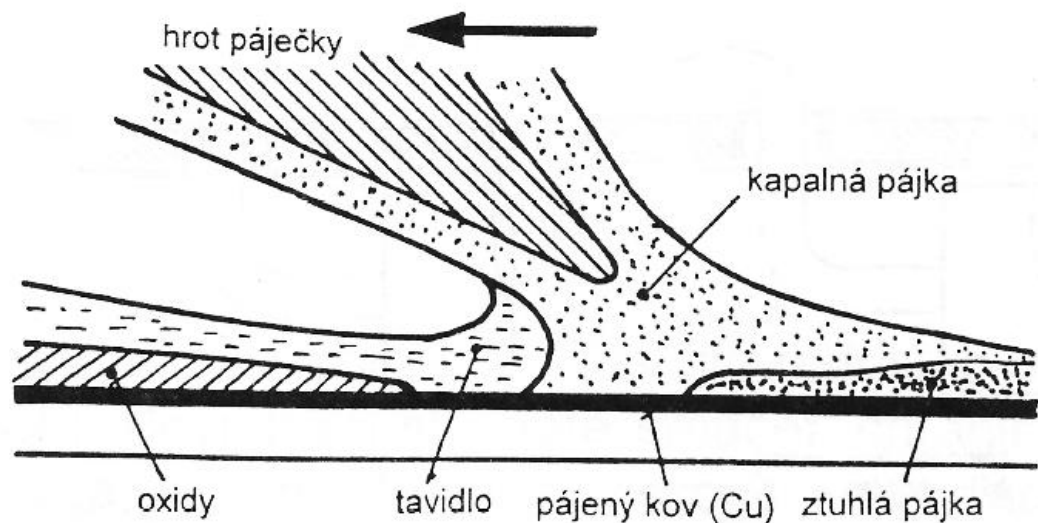
Používanými technologiemi se bude zabývat následující část. (2)

3.1. Ruční pájení

Při ručním pájení se používá pájedlo. K zahřívání pájeného spoje slouží hrot pájedla. Na spoj se nanese tavidlo a po zahřátí hrotem se dodá pájka do spoje. Následně dojde k vytvoření spoje. (1)

Proces ručního pájení je znázorněn na následujícím obrázku (Obrázek 2).

I přes velkou rozšířenost ručního pájení má tento způsob několik nevýhod. Patří mezi ně špatné určení množství pájky ve spoji, větší tepelné namáhání pájených součástí a v neposlední řadě horší reprodukovatelnost pájeného spoje. Tento způsob je určen spíše než pro hromadnou výrobu pro opravářenskou činnost. (1)



Obrázek 2 Ruční pájení (2)

3.2. Strojní pájení

Strojní pájení v porovnání s ručním poskytuje mnoho výhod pro velkosériovou výrobu. Patří mezi ně rychlost, přesnost a vysoká efektivita.

Dále budou probrány nejvýznamnější způsoby strojního pájení.

3.2.1 Pájení vlnou

Tento způsob strojního pájení je nejstarší. Patentování této metody proběhlo v roce 1955. K jejímu rozšíření napomohla vysoká efektivnost a vysoká kvalita a spolehlivost pájených spojů.

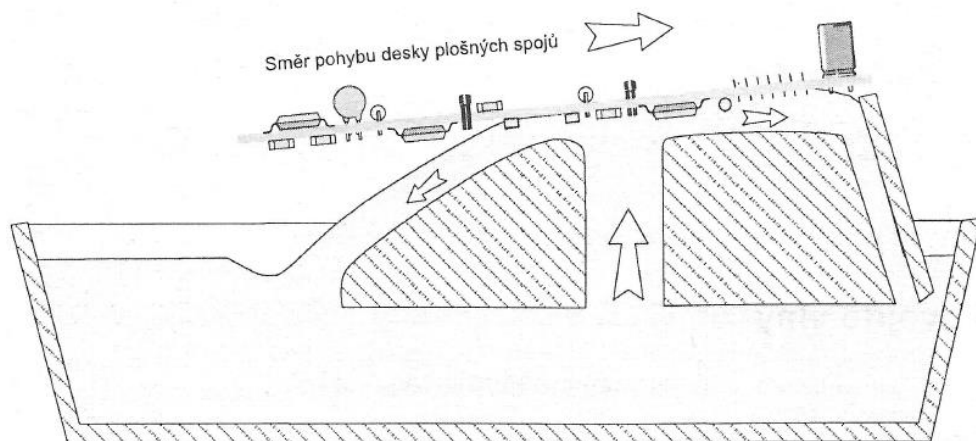
Další výhodou je možnost použít tuto metodu pro povrchovou montáž (SMT) i pro pájení vývodových komponent (THT). (1)

Zařízení pro pájení vlnou spolu s dalšími zařízeními, která zajišťují nanášení tavidla či předehřev, bývají součástí celé výrobní linky. Ohřívání a dodání pájky do spoje probíhá v jednom okamžiku. (2)

Pájení vlnou se skládá ze tří základních operací:

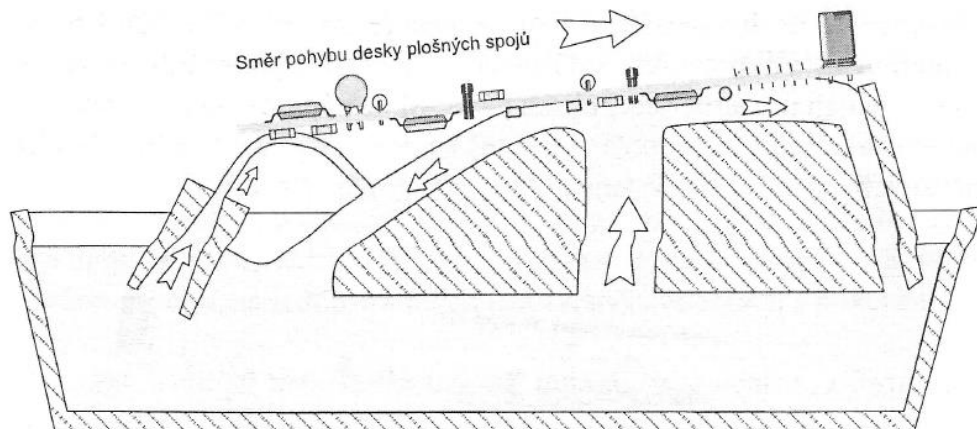
- *Aktivace* – při této operaci dochází k aktivaci povrchů. To zamezuje vzniku oxidů na povrchu pájeného spoje a zvyšuje to jeho kvalitu.
- *Předehřev* – Pokud by došlo ke kontaktu komponent, které by měly pokojovou teplotu, s horkou pájkou, mohlo by dojít k jejich zničení v důsledku teplotního šoku. Proto se pájené komponenty ohřívají na teplotu přibližně 100 °C.
- *Pájení* – dojde k dodání pájky do spoje pomocí pájecí vlny.

Pro dodání pájky do spoje se užívají dva základní typy pájecích vln. *Jednoduchá* (Obrázek 3) a *dvojitá* (Obrázek 4). (2)



Obrázek 3 Zařízení s jednoduchá pájecí vlnou (1)

Výhodou zařízení s jednoduchou vlnou je jeho konstrukční jednoduchost v porovnání se zařízením s dvojitou vlnou. Toto zařízení lze použít pro klasické vývodové součástky i pro součástky pro povrchovou montáž. Může se vyskytnout problém u součástek s dlouhými vývody. U nich může docházet ke tvorbě *praporků*. U součástek pro povrchovou montáž je nutné brát ohled na to, že je tato metoda vhodná pro nižší integrace. (1)



Obrázek 4 Zařízení s dvojitou pájecí vlnou (1)

Jak již název napovídá, používá zařízení s dvojitou vlnou dvě vlny. Jako první přichází do kontaktu s deskou vlna *turbulentní*, která proudí proti pohybu desky. Má za úkol smočit všechny součástky bez ohledu na zkratky, které mohou vzniknout mezi součástkami. Odstranění zkratů a vytvoření optimálního spoje zajišťuje vlna *laminární*. Zařízení používá dvě elektrodynamická čerpadla a velké množství pájecí slitiny, což patří mezi jeho nevýhody. Další nevýhodou je tepelné namáhání součástek, které musí procházet dvěma pájecími vlnami. (1)

Pájecí proces je nutné nastavit s ohledem na maximální dobu, po kterou mohou být součástky v pájce, aby nedošlo k jejich zničení vlivem tepla. Rychlost posuvu pro součástky povrchové montáže se používá v rozmezí 1 až 4 cm/s s maximální dobou pobytu součástky v pájce 10 s. K ochraně povrchu pájky před oxidací se používá olej nebo ochranná atmosféra (dusík nebo argon). (2)

3.2.2 Pájení přetavením

Při pájení přetavením se pájka do spoje nedodává při samotném pájecím procesu, ale je ve spoji před samotným přetavením ve formě pájecí pasty. Pájecí pasta je v porovnání s tyčovou pájkou přibližně desetkrát dražší. (1)

3.2.2.1 Pájecí pasta

Základem pájecí pasty je pájecí slitina a tavidlo. V pájecí pastě jsou tyto složky obvykle v poměru 9:1. (1)

V pájecí pastě se nachází pájecí slitina ve formě kuliček. Velikost těchto kuliček by měla být rovnoměrná. Zrna velmi malých průměrů je nutné omezit, protože jejich přítomnost v pájecí pastě zvyšuje podíl oxidů. Oxidy v pájecí pastě mohou zhoršovat smáčivost. (1)

Tavidlo (viz kapitola 5), které je součástí pájecí pasty, se stará o odstraňování oxidů během procesu pájení. Tavidlo má dále vliv na mechanické vlastnosti pájecí pasty. Vhodné tavidlo zajišťuje dobrou roztíratelnost a skladovatelnost. Základem tavidla jsou čtyři složky:

- *Pryskyřice* – Určuje konzistenci pájecí pasty, zabraňuje vysrážení kuliček pájky a pomáhá udržovat součástky na pájecích plochách.
- *Aktivátor* – odstraňuje po zahřátí oxidy z povrchu spoje.
- *Tixotropní činidlo* – ovlivňuje tlakově závislou viskozitu pájecí pasty.
- *Rozpouštědlo* – rozpouští pryskyřici a aktivátor. (1)

Správnou manipulací a uchováváním pájecí pasty lze dosáhnout nejlepších výsledků. Pokud je vlhkost vzduchu nízká, dochází k vysušování pájecí pasty a tím se ztěžuje nanášení přes šablonu. Vysoká vlhkost může naopak způsobit navlhání pasty a to může způsobit nedokonalé spoje. (3)

Možnosti nanášení pájecí pasty jsou následující:

- *Dispenser* – nanášení pájecí pasty probíhá ručním disperzerem nebo poloautomatickým disperzerem. Ruční disperzer vytlačuje pastu pomocí pístu, který je buď stlačován rukou nebo vzduchem z malého kompresoru. Jedná se o jednoduchý způsob vhodný pro opravářskou činnost. Při poloautomatickém nanášení může být disperzer vybaven předehřevem, který rovnoměrně prohřívá pájecí pastu a zajišťuje stále stejnou viskozitu.
- *Sítotisk* – Pro výrobu sítotiskového síta se používá kovové, nylonové nebo polyesterové síto, na které je nanášena vrstva materiálu citlivého na světlo. Ten slouží k vytvoření požadovaného motivu pro nanášení pájecí pasty. Osvícením fotocitlivého materiálu na místech, kde mají být otvory pro nanášení pájecí pasty, a následným vyleptáním vzniknou otvory pro nanášení pájecí pasty. Během nanášení pájecí pasty se síto nachází 0,8 mm až 1 mm nad deskou plošného spoje. Pasta umístěná na síto se roztírá pomocí stěrky. Síto je

v místě kontaktu se stěrkou přitisknuto k desce plošného spoje, po jejím průjezdu se síto nadzvedne a pájecí pasta zůstane na spoji.

- *Šablonový tisk* – tento způsob se podobá sítotisku. Síto je nahrazeno kovou šablonou s otvory. Tyto otvory se leptají nebo vyřezávají laserem. Nejčastějšími materiály pro výrobu šablon jsou nerezová ocel nebo niklová mosaz. Na rozdíl od síta se šablona při nanášení pájecí pasty nachází na desce plošného spoje. Šablona má v porovnání se sítem mnohem vyšší živostnost. Nevýhodou jsou vyšší náklady na pořízení. (1)

Komponenty jsou při pájení přetavením ohřívány ve dvou fázích. V první fázi dojde k předehevu, kdy se vypaří rozpouštědla a nastartují se aktivátory. Ve druhé fázi následuje přetavení, kdy se vytvoří spoj. Zahřívat komponenty lze následujícími způsoby: (1)

- Pájení zářením
- Pájení v parách
- Pájení proudem horkého plynu
- Pájení laserem

3.2.2.2 Pájení zářením

Tento způsob je založen na absorpci záření o vhodných vlnových délkách pájenými komponenty. Záření vytváří infračervené zářiče. Toto záření je pohlcováno v závislosti na barvě, kterou mají pájené komponenty. Komponenty tmavé barvy pohlcují větší množství vyzařované energie než komponenty lesklé. Tento jev má za následek to, že dochází k většímu tepelnému namáhání pájených komponent. V praxi se používá kombinace pájení zářením a prouděním horkého plynu. (1), (2), (4)

Je nutné nastavit tepelný profil pro každý typ pájené desky, protože komponenty nemají nikdy stejnou teplotu jako zdroj tepla. (5), (6)

3.2.2.3 Pájení v parách

Teplo se při tomto způsobu pájení přenáší pomocí páry kapalin. Tyto kapaliny musí být vůči použitým komponentám inertní. Nejpoužívanějšími kapalinami jsou fluorouhlíky. Po zahřátí kapaliny na bod varu se komponenty umístí do vzniklých par. Při kondenzaci par na chladném

povrchu dojde k předání latentního tepla pájce, a ta se roztaví. Výhodou je, že při tomto způsobu pájení nedochází k oxidaci pájených spojů, protože páry neobsahují kyslík. (1), (2), (4)

3.2.2.4 Pájení proudem horkého plynu

Komponenty jsou ohřívány proudem horkého plynu, který se zahřívá v zahřívacím zařízení a do pece je vháněn pomocí ventilátorů. Nejčastěji se používá vzduch nebo dusík. Výhodou oproti pájení zářením je to, že dochází k rovnoměrnému ohřevu všech komponent.

3.2.2.5 Pájení laserem

Tento způsob je probrán v následující kapitole (3.2.3) jako samostatná metoda, protože se používá i k přímému tavení pájecí slitiny ve formě drátu.

3.2.3 Pájení laserem

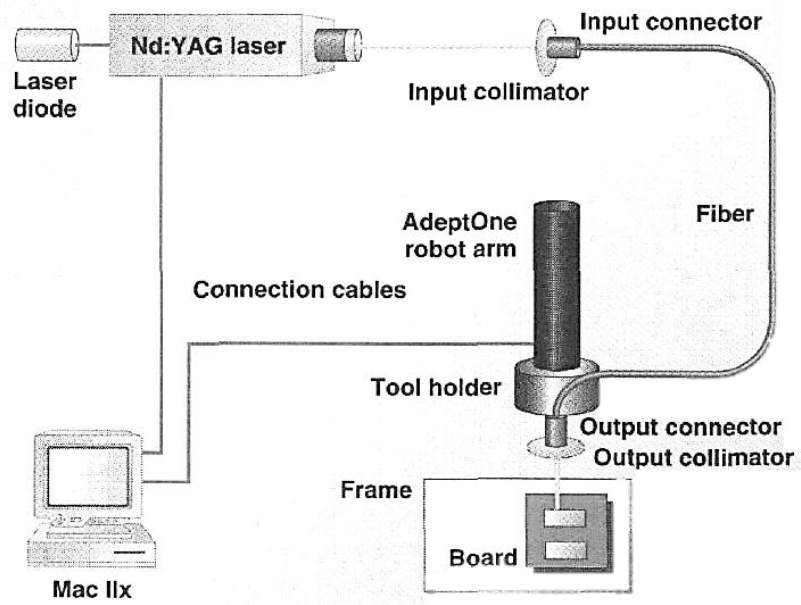
Laserové pájení poskytuje mnoho výhod v porovnání s pájením přetavením. Spojе vykazují vysokou kvalitu. Tento způsob je vhodný pro desky s vysokou integrací, protože umožňuje pájení těžko dosažitelných komponent

Pájení pomocí laseru poskytuje mnoho výhod oproti pájení přetavením. Spoj pájený laserem vykazuje vysokou kvalitu. Je také vhodné pro hustě osazené desky, jelikož komponenty, které by byly těžko dosažitelné pomocí jiných metod, mohou být pájeny, aniž by tento proces ovlivnil okolní součástky. Jedná se o lokální metodu, protože laserový paprsek zahřívá jedno místo po druhém. Schématické uspořádání systému znázorňuje Obrázek 5. Pájka může být do spoje dodána ve formě pájecí pasty nebo drátku, který je postupně odtavován.

Mezi výhody pájení pomocí laseru patří:

- *Nezahřívá součástky.* Laserový paprsek zahřívá jen spoj, a tak se pájené součástky zahřívají jen minimálně.
- *Minimální vznik intermetalických struktur.* Protože ohřev probíhá velmi rychle, nedochází ke vzniku intermetalických struktur (cca 5 ms).
- *Jednotvárnost pájených spojů.* Díky tomu, že množství energie dodané do spoje může být řízeno velice přesně, jsou reprodukovány ve stejné kvalitě.
- *Analýza.* Monitorováním infračerveného záření před a po pájecím procesu lze zjistit, zda byl spoj zapájen dobře. V případě že ne, může být proces opakován.
- *Flexibilita.* Součástky mohou být osazovány postupně.

Nevýhodou této metody může být nižší rychlost v porovnání s konvenční metodou pájení přetavením. Rychlost se pohybuje kolem 40 zapájených kontaktů za 1 s při použití laseru o výkonu 30 W. Tato metoda není tak rozšířená, používá se přibližně v 5 %. (7), (8)



Obrázek 5 Schematické znázornění laserového systému (8)

4. Tavidla

Tavidlo v pájecí pastě má dvě základní funkce. Jednou je zlepšení smáčení pájeného spoje. To je zajištěno odstraněním oxidů z povrchu spoje. Druhou funkcí je vytvoření viskózní směsi ve spojení se zrnny pájecí slitiny. Správná viskozita je důležitá pro nanášení pájecí pasty. Tekutá pájecí pasta by se při nanášení tavidla roztékala a negativně by ovlivňovala kvalitu pájeného spoje. Naopak vysoce viskózní pasta by se obtížně nanášela. Schopnost tavidla odstraňovat oxidy z povrchu se nazývá aktivita tavidla. Tavidlo by mělo mít v ideálním případě nízkou aktivitu za běžných teplot. Aktivní by mělo být za teplot, při kterých probíhá proces pájení.

Tavidla lze rozdělit na 2 základní typy:

- Tavidla rozpustná v rozpouštědle
- Tavidla rozpustná ve vodě

4.1. Tavidla rozpustná v rozpouštědle

4.1.1 Pryskyřičná tavidla na bázi kalafuny

Základem tavidla je borovicová pryskyřice. Pro zvýšení aktivity se přidávají různé aktivátory. Tavidla se dělí podle aktivity následujícím způsobem:

- *R (Rosin)* – toto tavidlo má nejnižší aktivitu a je vhodné jen na povrchy s dobrou pájitelností. Jedná se o pryskyřici rozpuštěnou v lihovém roztoku. Tavidlo je při pokojové teplotě neaktivní a elektricky nevodivé, a proto nemusí být odstraněno.
- *RMA (Midly Activated Rosin)* – základ je stejný jako u předchozího typu, navíc jsou do něj přidány aktivátory pro zvýšení aktivity. Tavidlo není nutné po pájení odstraňovat. Je však nutné brát ohled na to, že aktivátory, které jsou vázány v pryskyřici, se mohou po nedokonalém odstranění zbytků tavidla podílet na korozi.
- *RA (Activated Rosin)* – tento typ je agresivnější než RMA. Tavidla by měla být po pájení odstraněna. Pokud by zůstala na povrchu desky, mohla by způsobit dlouhodobou korozi, zvláště ve vlhkém prostředí.
- *RSA (Superactivated Rosin)* – jedná se o velmi agresivní tavidlo, z čehož vyplývá nutnost odstraňovat jeho zbytky po pájení.

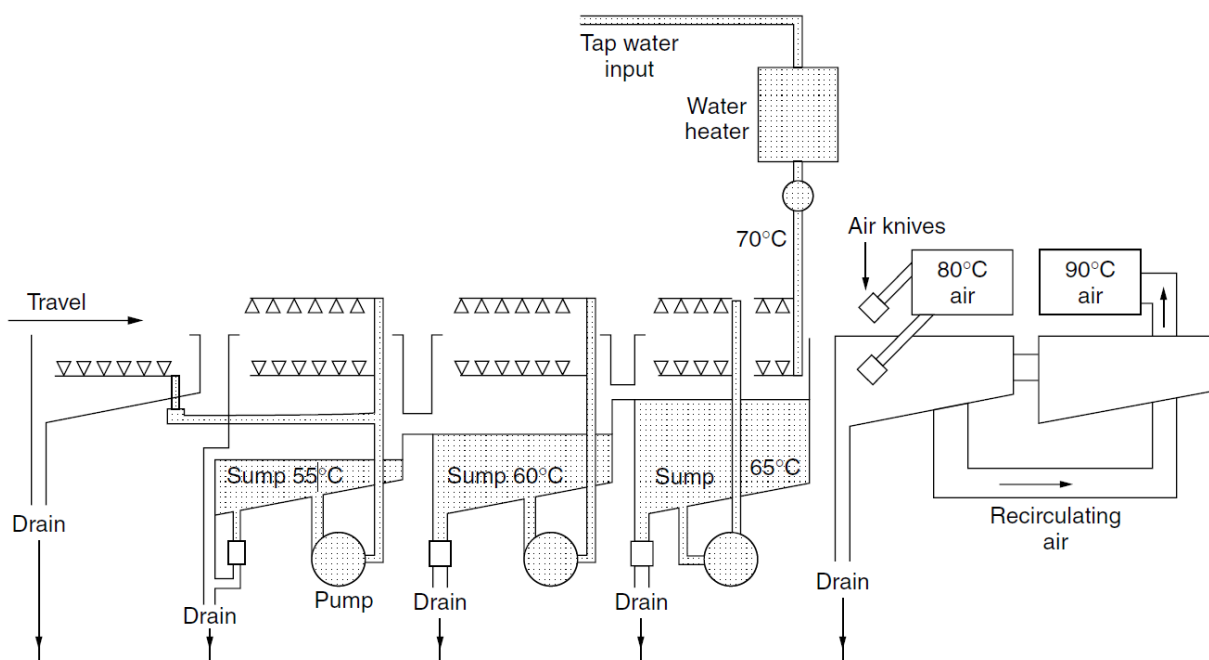
4.1.2 Syntetická tavidla

Složení přírodních pryskyřic je závislé na geografické poloze, kde byly získány. Dalším problémem pryskyřičných tavidel je to, že mohou zanechávat zbytky nerozpustné ve stejných rozpouštědlech. Snahou výrobců bylo odstranit tyto faktory, a tak došlo k vývoji tavidel syntetických.

- SA – tyto tavidla mají stejnou aktivitu jako pryskyřičná tavidla, ale mají nižší úroveň iontového znečištění.

4.2. Tavidla rozpustná ve vodě

Tato tavidla obsahují organické kyseliny a mají větší aktivitu než tavidla pryskyřičná. Z toho důvodu je nutné je po procesu pájení odstranit. K jejich odstranění lze použít demineralizovanou vodu. Tento proces není finančně náročný. Na následujícím obrázku je uveden příklad linky zajišťující oplach desek.



Obrázek 6 Příklad systému pro vodné čištění desek (9)

4.3. Bezoplachová tavidla

Na rozdíl od ostatních tavidel, není nutné bezoplachová tavidla odstraňovat po procesu pájení. To pomáhá uspořit náklady spojené s čištěním desek. Na to tavidla je kladeno několik požadavků:

- Nesmí zanechávat korozivní a lepivé zbytky
- Musí umožnit vnitroobvodové testování
- Musí splňovat předpisy o ochraně zdraví

4.4. Klasifikace tavidel

Dva nejvýznamnější způsoby klasifikace jsou tyto:

- Dle IPC J-STD-004
- Dle ČSN EN 9454-1

4.4.1 PC J-STD-004

Norma IPC J-STD-004 dělí tavidla podle složení a podle aktivity.

Tabulka 1 Klasifikace tavidel dle IPC J-STD-004

Flux Type Symbol	Flux Material of Composition	Symbol	Flux Activity Levels (% Halide)	Flux Type
A	Rosin	RO	Low (0%)	L0
B			Low (<0.5%)	L1
C			Moderate (0%)	M0
D			Moderate (0.5-2.0%)	M1
E			High (0%)	H0
F			High (>2%)	H1
G	Resin	RE	Low (0%)	L0
H			Low (<0.5%)	L1
I			Moderate (0%)	M0
J			Moderate (0.5-2.0%)	M1
K			High (0%)	H0
L			High (>2%)	H1
M	Organic	OR	Low (0%)	L0
N			Low (<0.5%)	L1
P			Moderate (0%)	M0
Q			Moderate (0.5-2.0%)	M1
R			High (0%)	H0
S			High (>2%)	H1
T	Inorganic	IN	Low (0%)	L0
U			Low (<0.5%)	L1
V			Moderate (0%)	M0
W			Moderate (0.5-2.0%)	M1
X			High (0%)	H0
Y			High (>2%)	H1

Tato klasifikace poskytuje analogii mezi klasifikací pryskyřičných tavidel na bázi kalafuny, tavidel rozpustných ve vodě a synteticky aktivovaných tavidel (viz Tabulka 2):

Tabulka 2 Klasifikace tavidel

L0	Všechna R
	Některá RMA
	Některá bezoplachová
L1	Většina RMA
	Některá RA
M0	Některá RA
	Některá bezoplachová
M1	Většina RA
	Některá RSA
H0	Některá tavidla rozpustná ve vodě
H1	Některá RSA
	Většina tavidel rozpustných ve vodě a synteticky aktivovaných tavidel

4.4.2 EN 9454-1

Tato norma dělí tavidla podle složení základu tavidla a podle druhu aktivátoru.

Tabulka 3 Dělení tavidel dle EN 9454-1

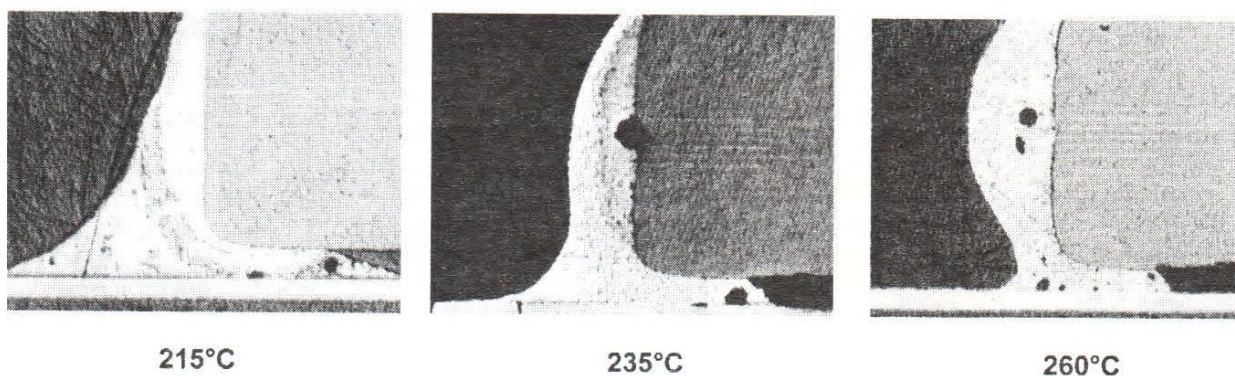
Klasifikace tavidla			Kód
Typ tavidla	Základ tavidla	Aktivace tavidla	
1. Pryskyřičná	1. Kalafuna	1. Bez aktivátorů	1.1.1
		2. Halogeny	1.2.1
	2. Nekalafunová pryskyřice	3. Nehalogenové aktivátory	1.1.2
			1.2.2
			1.1.3
			1.2.3
2. Organická	1. Vodou ředitelná	1. Bez aktivátorů	2.1.2
		2. Halogeny	2.1.3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

5. Chyby pájení

Faktorů, které ovlivňují spolehlivost pájené spoje, je mnoho. V následující části budou probírány problémy, které se mohou vyskytnout během procesu pájení. Tyto problémy mají vliv na spolehlivost pájeného spoje.

5.1. Špatná geometrie pájeného spoje

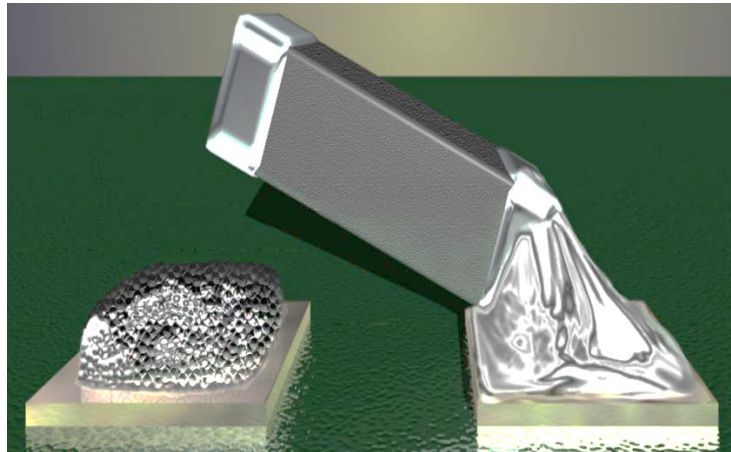
Špatná geometrie pájeného spoje se projevuje při procesu přetavení, pokud má pájená součástka a deska plošného spoje různou teplotu. Pokud bude mít součástka vyšší teplotu než deska plošného spoje, dojde k tomu, že se tekutá pájka vytáhne nahoru po součástce. Tato situace je zachycena na následujícím obrázku (Obrázek 7). Na prvním obrázku je pohled na řez správně provedeným spojem při použití olovnaté pájky a teploty přetavení 215 °C. Uprostřed je pohled na správně provedený spoj s použitím bezolovnaté pájecí slitiny při teplotě 235 °C. Poslední obrázek zachycuje neakceptovatelný spoj při použití bezolovnaté pájky a teploty 260 °C. Změna geometrie pájeného spoje může negativně ovlivnit jeho mechanickou odolnost. (1)



Obrázek 7 Špatná geometrie pájeného spoje (1)

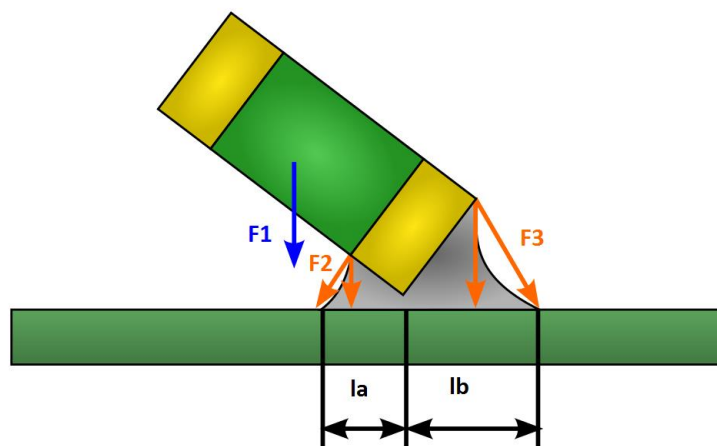
5.2. Tombstone efekt

Tombstone efekt (nebo též Manhattan efekt, Drawbridging či Grabstein efekt) je jev, který je charakteristický tím, že při něm dochází k vertikální orientaci součástky a přerušení obvodu (Obrázek 8).



Obrázek 8 Tombstone efekt (10)

Tento jev je způsoben rozdílnou dobou ohřevu obou konců součástek. Když prochází deska plošných spojů přetavovací pecí, dochází k tomu, že jedna strana součástky se ohřeje dříve než druhá. Tato doba je velmi krátká, ale ve výjimečných případech může způsobit to, že se pájecí pasta přetaví dříve na jedné straně součástky. To následně vede k tomu, že síly působící na součástku nejsou v rovnováze. Smáčecí síla vyvolaná roztavenou pájkou je vyšší než přilnavost pájecí pasty. V důsledku tohoto dochází k nadzvedávání součástky smáčecí silou.



Obrázek 9 Tombstone efekt – silové poměry (11)

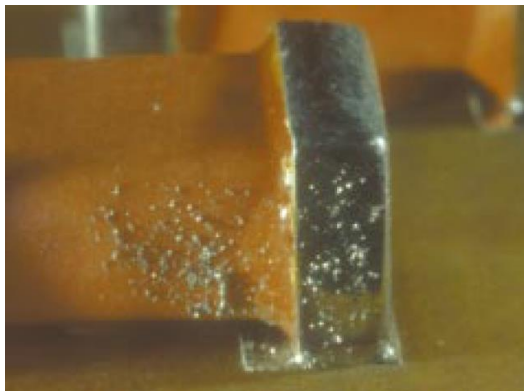
- $F1$ – tato síla je ovlivněna pouze rozměry součástky a její hmotností.
- $F2$ – smáčecí síla vyvolaná povrchovým napětím roztavené pájky v opačném směru než $F3$. Její velikost ovlivňuje přesah la .
- $F3$ – smáčecí síla vyvolaná povrchovým napětím roztavené pájky.

Z obrázku (Obrázek 9) je patrné, že velikost síly $F3$, která způsobuje nadzvedávání součástek, závisí na délce přesahu lb . Při konstrukci DPS je nutné na toto brát ohled.

Tombstone efekt se ve větší míře vyskytuje při použití bezolovnatých pájecích slitin. Je to dáno tím, že bezolovnatá pájecí slitina má větší povrchové napětí. (12), (13), (10)

5.3. Rozstřík pájky

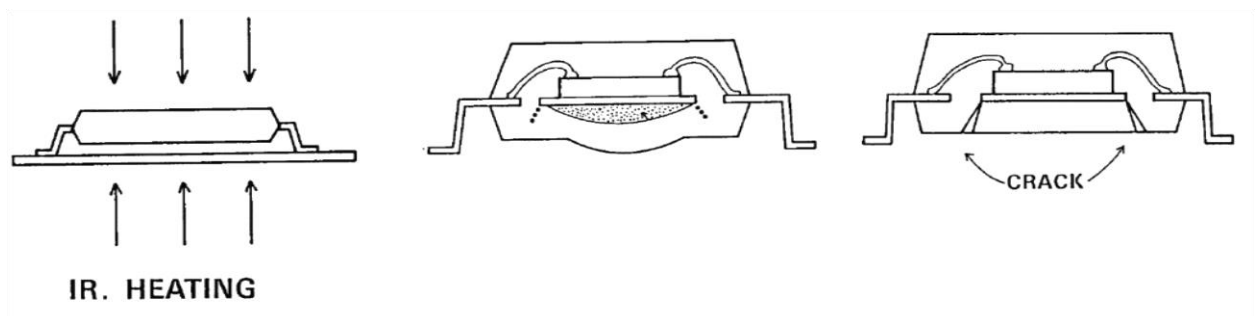
Rozstřík pájky (viz Obrázek 10), může být způsoben rychlým nárůstem teploty během přetažení. Tavidlo se rychle odpařuje a výpary uvolňující se ze spoje způsobí rozstříknutí pájky kolem spoje. (1), (14)



Obrázek 10 Rozstřík pájky (15)

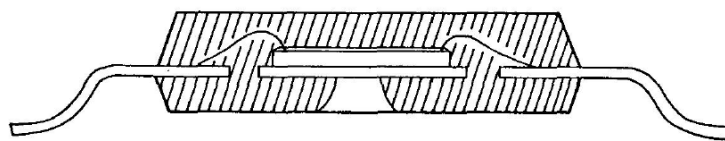
5.4. Popcorn efekt

Pokud je pouzdro integrovaného obvodu vystaveno vzdušné vlhkosti, pak tuto vlhkost absorbuje. To vede k narušení adhezních sil mezi jednotlivými vrstvami v pouzdře integrovaného obvodu. Během procesu přetavení, který probíhá při teplotě 215 °C až 260 °C, dochází k tepelnému namáhání vrstev integrovaného obvodu a tím k delaminaci vrstev. Vlhkost obsažená v pouzdře se během procesu přetavení začne uvolňovat ve formě páry, a protože tepelným namáháním byly narušeny adhezní síly, dojde k nafouknutí spodní části pouzdra a následnému prasknutí. Na následujícím obrázku je tento jev naznačen.



Obrázek 11 Popcorn efekt (16)

S nástupem bezolovnatých pájek se tento problém vyskytuje častěji v důsledku nutnosti použití vyšší teploty během procesu přetavení. Tento jev se dá zjišťovat velmi obtížně. Optická kontrola ho neodhalí, protože k poškození dochází ve spodní části pouzdra. Ani použití kontrolních RTG zařízení nemusí vést k uspokojivým výsledkům. (17), (18), (1)

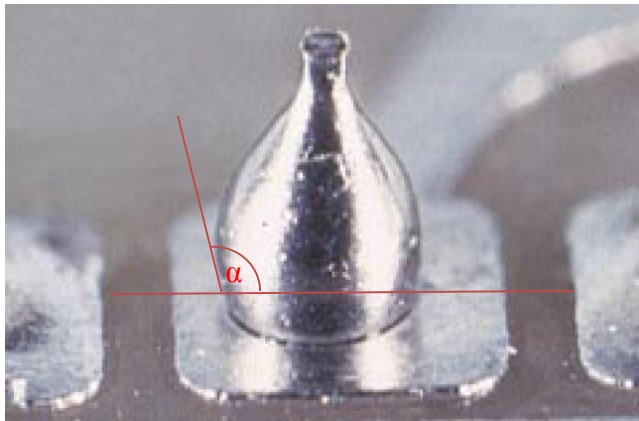


Obrázek 12 Provedení pouzdra pro omezení vzniku Popcorn efektu (16)

5.5. Nesmáčení

Nesmáčení se projevuje tak, že pájka nevytvoří spoj na celé ploše pájené oblasti (viz Obrázek 13). Je patrný velký stykový úhel α mezi pájkou a kontaktní ploškou. Příčiny nesmáčení jsou následující: (1), (14), (9)

- Nízká aktivita pájecí pasty
- Příliš vysoká teplota předehřevu
- Dlouhá doba předehřevu
- Krátká doba přetavení
- Oxidace pájených povrchů



Obrázek 13 Nesmáčený spoj (15)

5.6. Odsmaččení

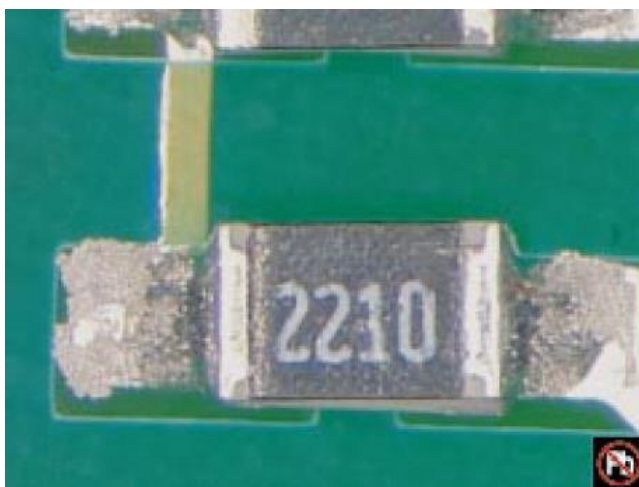
Pokud je spoj během pájení zahříván delší dobu, tak cín, který je v pájce obsažen, ustupuje z pájky a podílí se na růstu intermetalických vrstev. V pájce se zvyšuje obsah olova, které má špatnou smáčivost, a pájka ustupuje z již dříve smáčených oblastí (viz Obrázek 14). U bezolovnatých pájek může dojít k tomuto jevu, pokud je pájen povrch z drahých kovů. Ty se velmi snadno rozpouští v pájce s vysokým obsahem cínu. Pokud je pod povrchovou vrstvou z drahých kovů materiál se špatnou pájitelností, pájka opět ustoupí ze spoje. (1), (14)



Obrázek 14 Odsměření (15)

5.7. Zbytky nepřetavené pájecí pasty

Zbytky nepřetavené pájecí pasty se mohou v pájeném spoji vyskytovat, pokud nebylo použito potřebné teploty pro přetavení nebo pokud byla doba, po kterou tato teplota působila, příliš krátká.



Obrázek 15 Nepřetavená pájecí pasta na spoji (15)

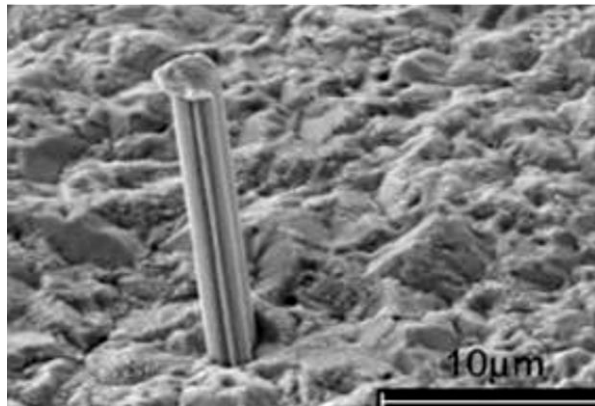
5.8. Whiskery

Při používání pájecích slitin s vysokým obsahem cínu může docházet na povrchu pájky k růstu whiskerů. Jedná se o monokrystalické štětiny, které vyrůstají z povrchu některých kovů. Patří mezi ně cín, zinek, antimon a kadmium. Jejich délka se pohybuje v řádu mikrometrů. Ve výjimečných případech až několik milimetrů.

Na růst whiskerů mají vliv následující faktory:

- *Tlakové napětí v povrchové vrstvě* – Příkladem může být ohýbání vývodů součástek a konstrukčních prvků. Se vzrůstajícím napětím se zvyšuje riziko růstu whiskerů v místech ohybu a to jak na vnitřní, tak i vnější straně.
- *Teplota* – k nejvyššímu výskytu whiskerů dochází při teplotách 25 °C až 60 °C. K zastavení růstu dochází za teplot vyšších než 150 °C a nižších než -40 °C.
- *Tlak* – s nižším tlakem klesá možnost růstu whiskerů
- *Vlhkost* – nejprůzračnější pro růst whiskerů je vlhkost vyšší než 85 %.
- *Zrnitost povrchu* substrátu – pokud je nanášena cínová vrstva na zrnitější povrch, snižuje se výskyt whiskerů, v porovnání s hladkým povrchem.

Whiskery představují riziko pro spolehlivost. Jelikož jsou křehké, tak může dojít k jejich odlomení a mohou způsobit zkrat. (19)



Obrázek 16 Příklad whiskeru (20)

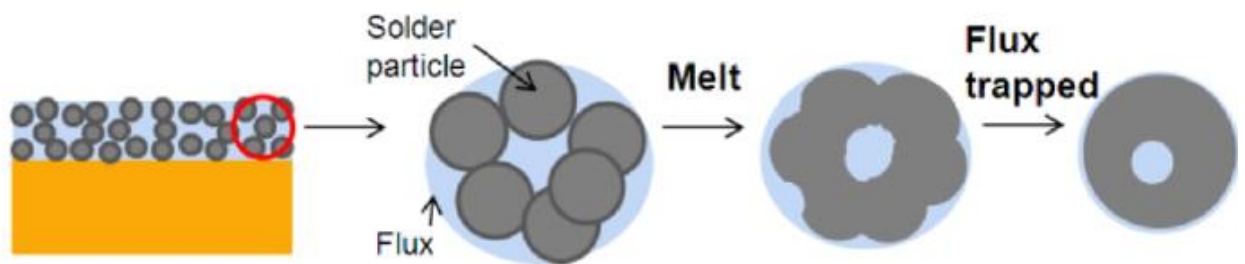
5.9. Voidy

Voidy jsou nevodivé dutiny v pájených spojkách a jako takové představují komplikaci pro spolehlivost pájeného spoje. V důsledku jejich přítomnosti může docházet k tepelnému namáhání pájeného spoje (zvýšením odporu spoje) nebo může dojít ke snížení odolnosti plošného spoje proti vibracím. Zde jsou uvedeny jednotlivé typy, se kterými se můžeme setkat: (21)

- Makrovoidy
- Mikrovoidy
- Shrinkage voidy
- Voidy v mikropropojích
- Kirkendallové voidy
- Dírkové voidy

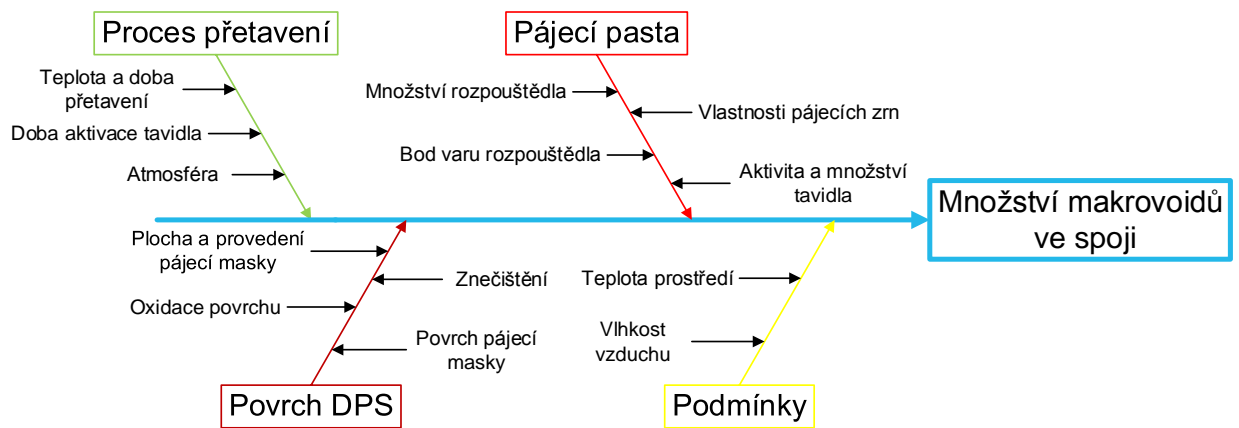
5.9.1 Makrovoidy

Nejrozšířenějším typem voidů jsou makrovoidy. Mohou se vyskytovat kdekoli v objemu pájeného spoje. Velikost těchto voidů se pohybuje v rozmezí $100\ \mu\text{m} \div 300\ \mu\text{m}$. Důvodem jejich vzniku je odpařování složek pájecí pasty. Na následujícím obrázku je zachycen princip vzniku makrovoidů během přetavení pájecí pasty. Při přetavení dochází ke změně skupenství složek pájecí pasty z kapalného na plynné. Tyto plynné složky mají tendenci opustit pájený spoj. Pokud není doba, po kterou je pájka v kapalném stavu dostatečně dlouhá, plynné složky zůstanou ve spoji a vznikne dutina. Dále mohou vznikat během redukce oxidů na pájeném povrchu.



Obrázek 17 Princip tvorby makrovoidů (22)

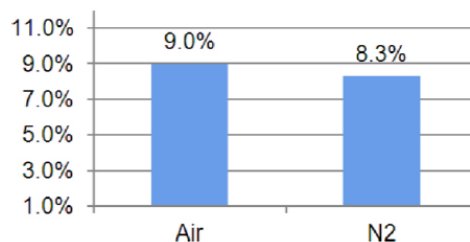
Makrovoidy lze považovat za procesní voidy z důvodu toho, že je jejich vznik závislý na podmínkách, při kterých byl prováděn pájecí proces. V diagramu (Obrázek 7) jsou uvedeny vlivy, které přispívají ke vzniku makrovoidů ve spoji.



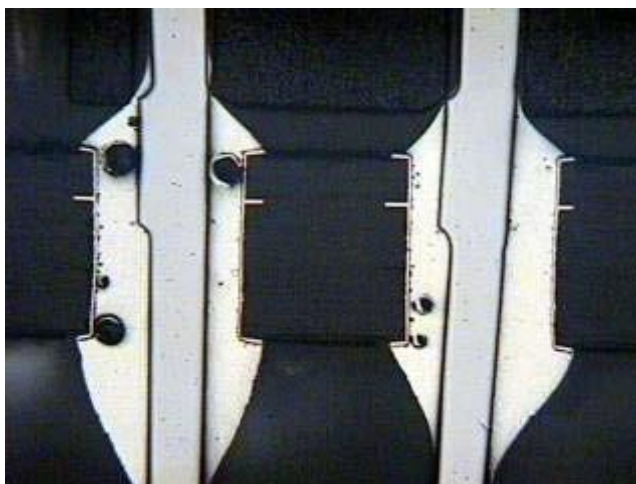
Obrázek 18 Faktory ovlivňující vznik makrovoidů (21), (22)

Při procesu přetavení ovlivňují tvorbu voidů tyto faktory:

- *Doba aktivace tavidla* – Prodloužení této doby zvyšuje pravděpodobnost toho, že tavidlo použité v pájecí pastě bude mít dostatek času na odstranění oxidů z povrchu spoje.
- *Doba přetavení* – Doba přetavení by měla být tak dlouhá, aby se veškeré tavidlo ze spoje mohlo odpařit. Pokud není doba dostatečně dlouhá, nestihnou plynné části tavidla opustit pájený spoj.
- *Atmosféra* – Použití ochranné atmosféry N_2 by teoreticky mělo způsobovat větší povrchové napětí pájky než při přetavení v běžné atmosféře. Následkem toho by nestihly výparu z tavidla opustit spoj. Povrchová vrstva SnO , která se tvoří na povrchu pájky v běžné atmosféře, má nižší povrchové napětí než povrchová vrstva Sn při použití ochranné atmosféry dusíku. Tento teoretický předpoklad nebyl v (22) potvrzen.



Obrázek 19 Procentní zastoupení voidů v závislosti na použité atmosféře (22)



Obrázek 20 Makrovoidy v THT spoji (21)



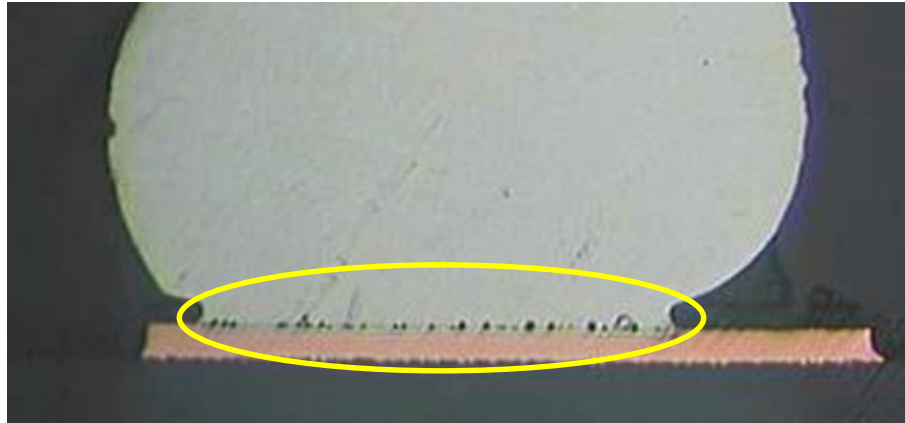
Obrázek 21 Makrovoidy v BGA spoji (21)

V průmyslu se má za to, že makrovoidy neovlivňují spolehlivost pájeného spoje. Ve zprávě z IPC Solder Value Council (23) se zabývali zkoumáním vlivu střídavého tepelného namáhání na spolehlivost pájeného spoje. Výsledkem bylo, že toto namáhání nemá na spolehlivost pájeného spoje žádný vliv. Nebyly zde však zkoumány další vlivy, jako mechanické nárazy, vibrace a ohýbání.

Poloha makrovoidů ve spoji má větší význam než jejich velikost. Menší makrovoidy na rozhraní pájky a plošky DPS představují pro spolehlivost spoje větší riziko než větší makrovoid nacházející se uprostřed pájeného spoje. (23), (22)

5.9.2 Mikrovoidy

Mikrovoidy dosahují velikosti do $50\ \mu\text{m}$ a vyskytují se ve větších skupinách na rozhraní pájky a plošky plošného spoje, na vrchní intermetalické vrstvy jak je patrné z následujícího obrázku (Obrázek 22), kde je tato situace zachycena u BGA spoje.



Obrázek 22 Mikrovoidy v BGA spoji

Důvod jejich vzniku není zatím přesně znám, ale má se za to, že může být způsoben oxidací pájeného povrchu nebo reakcí při růstu intermetalické vrstvy.

Přítomnost těchto voidů se nedá odhalit systémovými testy, ale je nutné použít kontrolní RTG zařízení. Při RTG kontrole může dojít k tomu, že budou mikrovoidy zakryty většími makrovoidy a sníží se možnost jejich odhalení. (21)

5.9.3 Shrinkange voidy

Shrinkange voidy nejsou typickými voidy, protože nemají kulatý tvar. Formují se do dendritických struktur od povrchu pájeného spoje. Vznikají při pomalém tuhnutí pájky, kdy se pájka ve spoji vyskytuje v různých skupenstvích. Ačkoli se vyskytují ve všech pájecích slitinách, k jejich většímu výskytu dochází u bezolovnatých pájecích slitin. Mohou se vyskytovat ve všech typech spojů. Na následujícím obrázku je příklad jejich výskytu v BGA spoji.

Tyto voidy nemají vliv na spolehlivost spoje. Přestože vypadají jako praskliny, při vytavení tepelnému namáhání se dále nijak nerozšiřují.

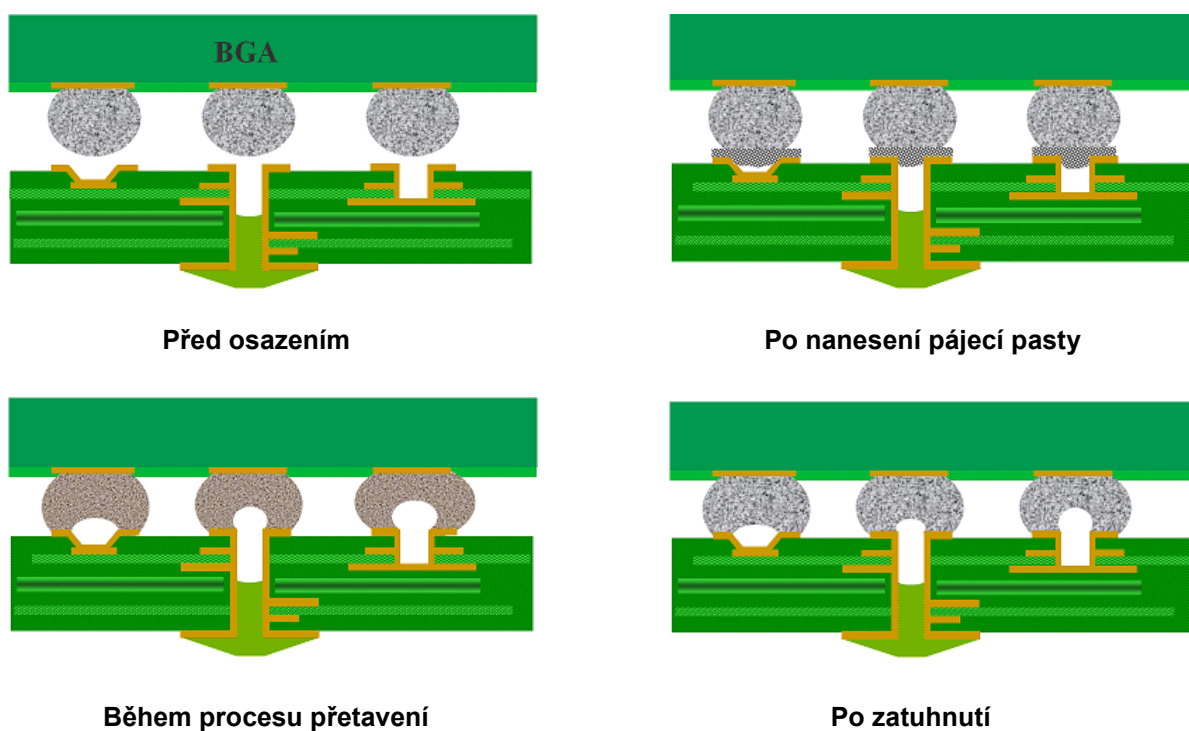
Jejich výskytu se dá zabránit zrychleným chlazením přetaveného spoje. To minimalizuje výskyt míst s různou teplotou ve spoji a postupné tuhnutí pájky. (21)



Obrázek 23 Shrinkange voidy (21)

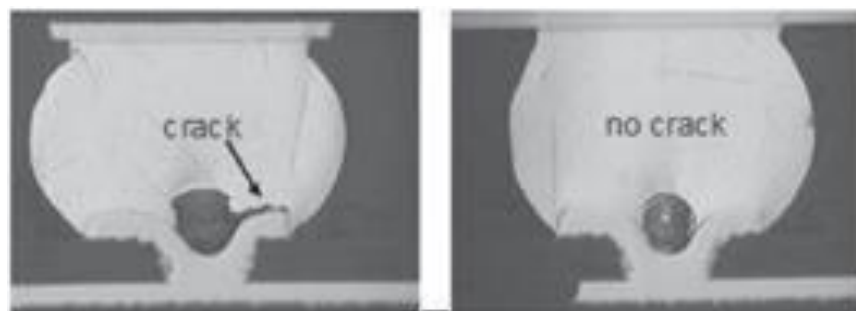
5.9.4 Voidy v mikropropojích

Důvodem vzniku voidů je přítomnost mikropropojů na desce plošného spoje. Mechanismus vzniku je znázorněn na následujícím obrázku (Obrázek 24). Při nanášení pájecí pasty na plošky s mikropropojem se pasta nedostane do celého prostoru mikropropoje a nemůže následně smáčet celý vnitřní povrch mikropropoje. Po osazení BGA pouzdra dojde k uzavření vzduchu v objemu mikropropoje. Tento vzduch se během procesu přetavení rozpíná a proniká do kuličkových vývodů BGA.



Obrázek 24 Vznik voidů v mikropropojích (24)

Velikost voidů v mikropropojích závisí na velikosti mikropropojů. Typická velikost microvia je $100\ \mu\text{m}$. Velikost voidů v mikropropojích se pohybuje od $25\ \mu\text{m}$ do $100\ \mu\text{m}$. Vykytují se jak u slepých otvorů, tak i u průchozích otvorů, které mají na druhé straně nanesenou pájivou masku. Za určitých okolností mohou mít voidy v mikropropojích vliv na spolehlivost pájeného spoje. Mohou způsobit praskliny, které se při tepelném a mechanickém namáhání šíří až k okraji spoje (viz Obrázek 25), kde je na levém obrázku spoj s prasklinou a na pravém spoj bez praskliny.

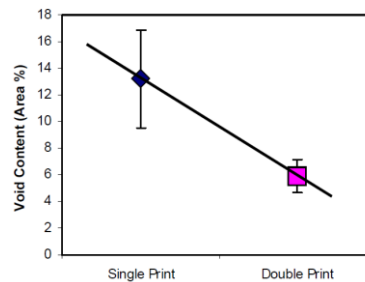


Obrázek 25 Voidy v mikropropojích (21)

Další možností jak zamezit vzniku voidů v mikropropojích je nanesení pájecí pasty do mikropropoje během šablonového tisku.

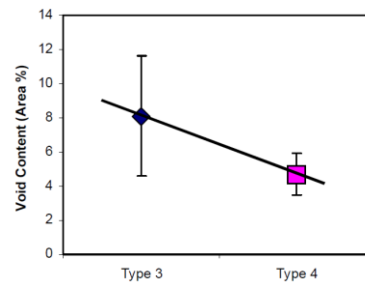
Zde je uvedeno několik faktorů, které ovlivňují výskyt voidů v mikropropojích: (25), (21)

- *Vícenásobný tisk pájecí pasty* – Při prvním průchodu těrky přes šablonu nedojde k úplnému vyplnění prostoru mikropropoje. Při užití dvojitého nanesení pájecí pasty dojde ke snížení plochy, kterou voidy zaujímají v BGA spoji.



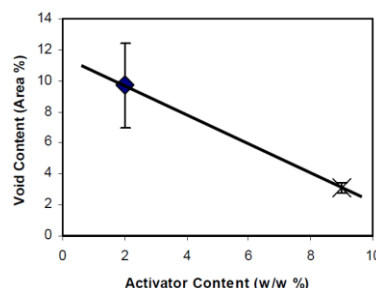
Obrázek 26 Vliv vícenásobného tisku (25)

- *Velikost zrn pájecí pasty* – Zmenšením velikosti zrn dojde k lepšímu vyplnění prostoru mikropropoje a tím i ke zmenšení voidů. Zmenšení zrn by však mohlo přispívat ke vzniku makrovoidů, protože by pájecí pasta obsahovala více oxidů, jejichž množství v pájecí pastě je nepřímo úměrné jejich velikosti.



Obrázek 27 Vliv velikosti zrn pájecí pasty (25)

- *Aktivita tavidla* – Zvýšená aktivita tavidla zvyšuje schopnost odstranit oxidy z povrchu a dojde k lepšímu smáčení a tím ke snížení velikosti voidů v mikropropojích.



Obrázek 28 Vliv aktivity tavidla (25)

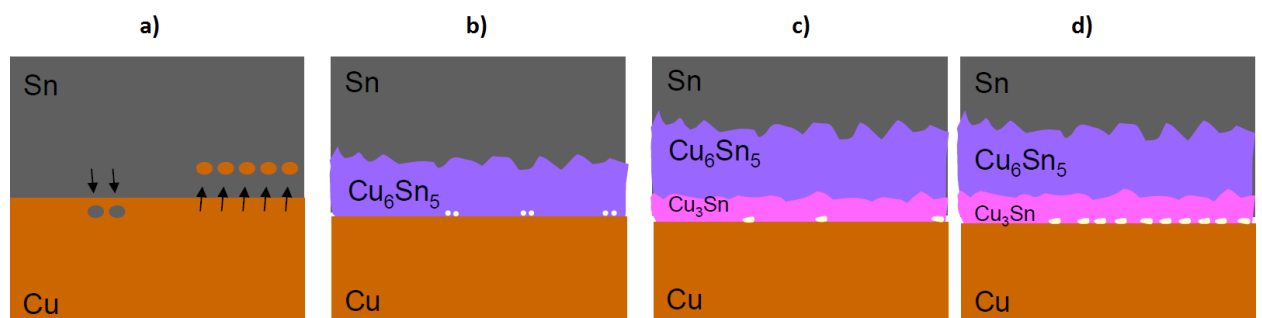
- *Složení tavidla* – zde se uplatňuje mnoho vlivů (jako aktivita tavidla, bod varu rozpouštědla, viskozita atd.), které mohou mít na tvorbu voidů vliv.

Tím, že je vznik voidů v mikropropojích způsoben nesmáčením vnitřního povrchu mikropropojů, lze jejich výskyt snížit jakýmkoli způsobem, který zlepší smáčivost. Pokud je ovšem otvor velmi malého průměru, nemusí vůbec dojít ke smáčení vlivem povrchového napětí pájky. Řešením může být, jak uvádí Stafstrom v (26), vyplnění mikropropojů mědí. Tímto lze dosáhnout zmenšení velikosti voidů o 74 %, v případě úplného vyplnění, a 64 %, v případě částečného vyplnění mikropropoje.

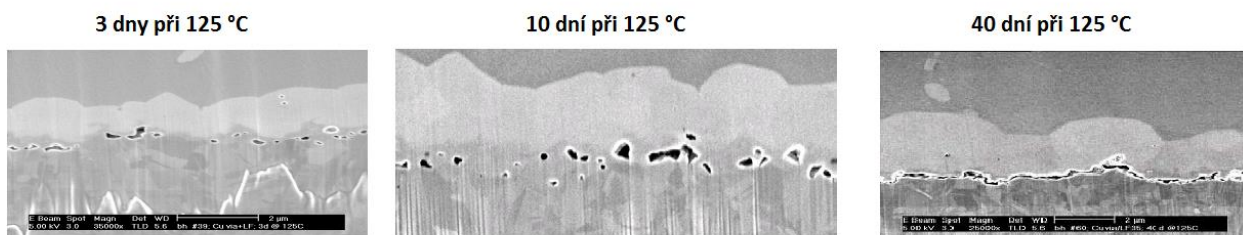
5.9.5 Kirkendallové voidy

Jejich název je odvozen od Ernesta Kirkendalla, který publikoval studie v letech 1942 a 1947, ve kterých publikoval studii zabývající se rozdílnou difuzí atomů mezi mědí a mosazí.

Kirkendallové voidy se nejčastěji nachází na rozhraní mezi intermetalickou vrstvou a mědí DPS (Obrázek) nebo v intermetalické vrstvě Cu_3Sn (obrázek), která se nachází nejbližší mědi DPS. K jejich vzniku dochází při spojování dvou kovů s různými difuzními koeficienty. Na obrázku (Obrázek 29) je znázorněn mechanismus vzniku Kirkendallových voidů na rozhraní Cu-Sn. Měď má větší difuzní koeficient, proniká tak rychleji do cínu než cín do mědi. Tato nerovnováha vede ke vzniku dutin na straně mědi. Na obrázku c) a d) je znázorněn stav po dlouhodobém tepelném namáhání, které napomáhá vzniku těchto voidů tím, že narůstá intermetalická vrstva. Na obrázku (Obrázek 30) je zachycen vývoj Kirkendallových voidů při vystavení teplotě 125 °C.



Obrázek 29 Vznik Kirkendallových voidů (21)



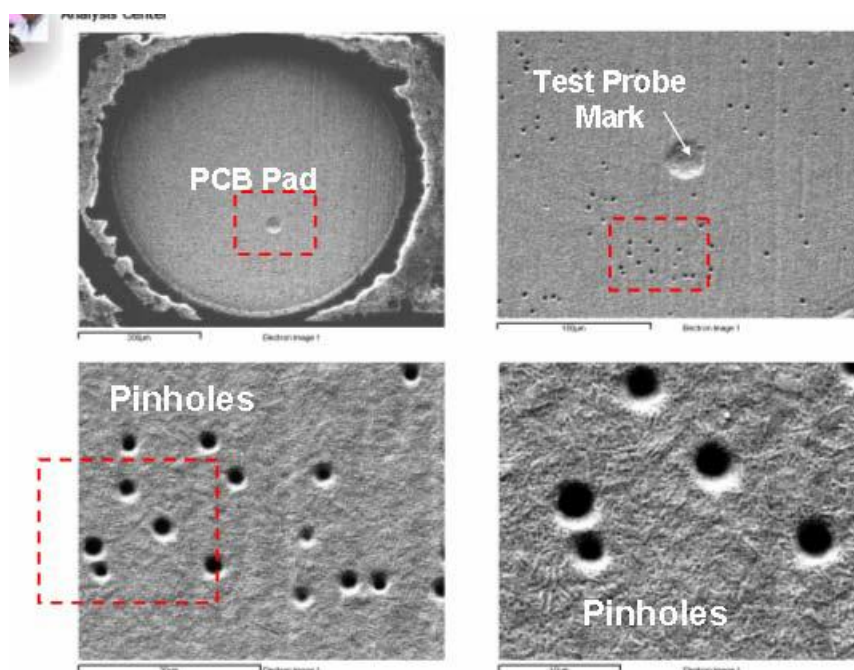
Obrázek 30 Kirkendallové voidy – vystavení teplotě 125 °C

Vznik těchto voidů neovlivňují běžné faktory, které jsou příčinou vzniku ostatních voidů. Vyskytují se při použití jak v olovnatých, tak i bezolovnatých pájecích slitin. (21), (27)

5.9.6 Dírkové voidy

Dírkové voidy se podobně jako voidy Kirendallové nachází na rozhraní intermetalické vrstvy a mědi DPS. Jejich velikost se pohybuje mezi $1 \div 3 \mu m$ a vznikají v důsledku přítomnosti dírek v měděném povrchu. K jejich detekci je nutné použít elektronový mikroskop. Pohled na povrch měděného spoje při různých zvětšeních je na obrázku (Obrázek 31).

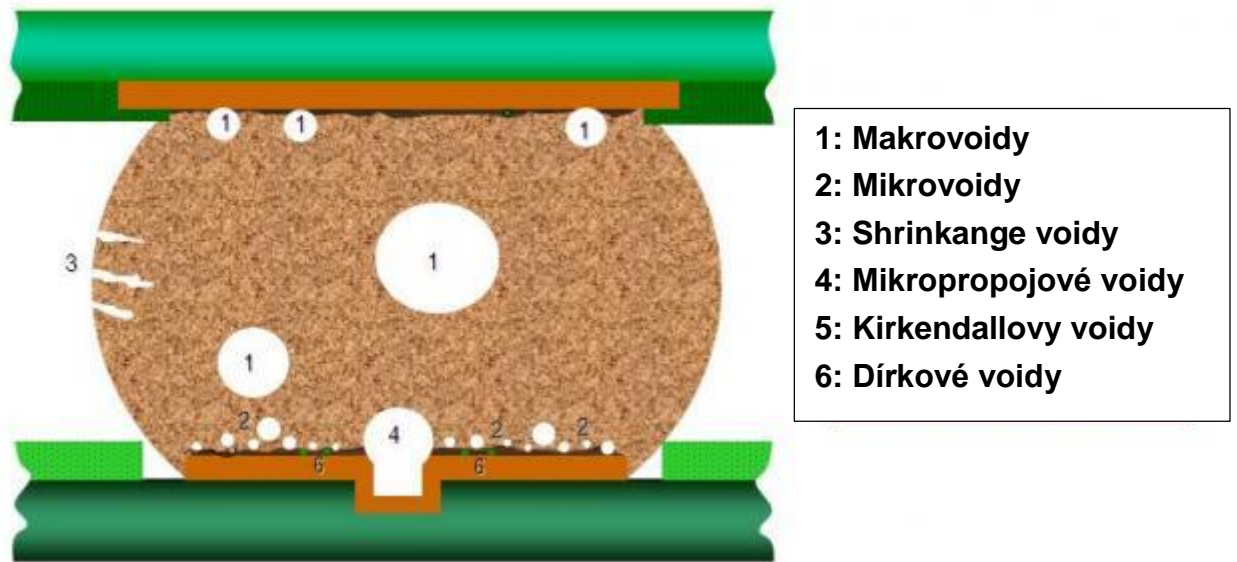
Obvykle uváděnou příčinou vzniku je to, že chemikálie používané při výrobě DPS se dostanou do těchto dírek a při procesu přetavení se odpařují. (21)



Obrázek 31 Dírky v povrchu mědi na DPS (21)

Na závěr této kapitoly je uveden obrázek (Obrázek 32), ve kterém jsou znázorněny všechny typy voidů v místech, kde se obvykle vyskytují.

Location of Voids in BGA Solder Joint after Reflow Soldering



Obrázek 32 Umístění jednotlivých typů voidů (28)

6. Praktická část

6.1. Zadání

Zadáním této diplomové práce byla analýza voidů v pájených spojích v závislosti na množství tavidla přidaného do pájecí pasty a to ve dvou poměrech. Byla použita následující tavidla:

- Gelová tavidla:
 - *NC 559*
 - *MTV-125R*
 - *TSF-6516*

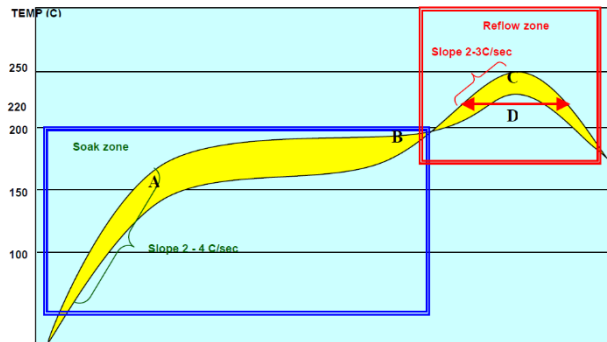
Název	IPC J-STD-004	EN 9454-1	Čištění po pájení	Pracovní teplota [°C]
NC 559	ROL0	-	Bezoplachové	221 - 300
MTV-125R	-	2.1.2	Vodou	160 - 350
TSF – 6516	ROL0	-	Bezoplachové	-

- Kapalná tavidla:
 - *Topnik G-5*
 - *JBC FL-15*

Název	IPC J-STD-004	EN 9454-1	Čištění po pájení	Pracovní teplota [°C]
Topnik G-5	-	2.2.3	Alkohol	300 - 400
JB FL-15	-	-	Bezoplachové	-

Pájecí pasty byly použity dvě, jedna olovnatá a jedna bezolvnatá.

- *Pájecí pasta: SENJU M31-GRN360-KV - Sn95,75Ag3,5Cu0,75*

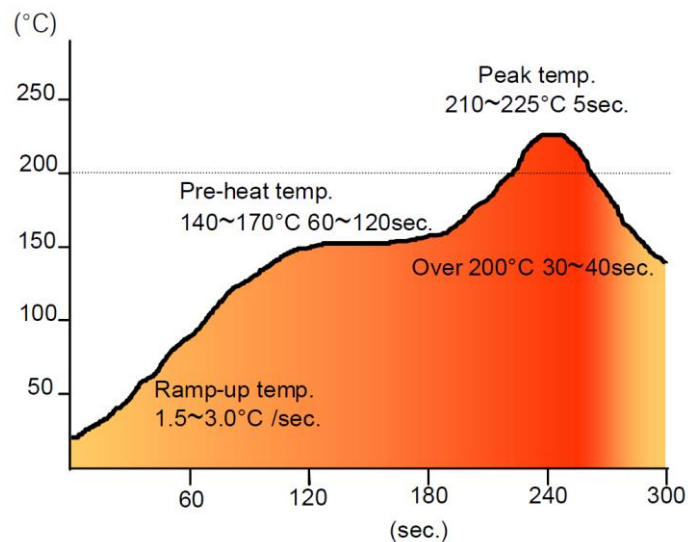


Recommendations

A; Soak start	150 – 180C	C; Peak Temp	230 – 250C
B; Soak end	180 – 200C	D; Time above	30 – 60 sec
Soak Time	60 – 120 sec		220C Solidus line

Obrázek 33 Doporučený přetavovací profil pájecí pasty SENJU M31-GRN360-KV (29)

- *Pájecí pasta: SSA48-M955 - SnPB36,8Ag0,4Sb0,2*



Obrázek 34 Doporučený přetavovací profil pájecí pasty SSA48-M955 (30)

Tabulka 4 Parametry pájecích past (29), (30)

	M31-GRN360-KV	SSA48-M955
Složení slitiny	Sn 95,75; Ag3,5; Cu 0,75	Sn62,6; Pb36,8; Ag0,4; Sb0,2
Teplota tavení [°C]	217 - 219	190
Velikost zrn [µm]	25 - 45	25 - 45
Typ tavidla	ROLO	ROLO
Obsah tavidla [%]	11,5	10
Viskozita [Pa.S]	180 ± 20	200

Pro každou pájecí pastu a každé tavidlo byly připraveny 2 směsi o různé objemové koncentraci tavidla. Pro každou kombinaci následovně:

- 2 ml pájecí pasty + 0,4 ml tavidla
- 2 ml pájecí pasty + 0,8 ml tavidla

Celkem bylo tedy vytvořeno 20 vzorků a navíc.

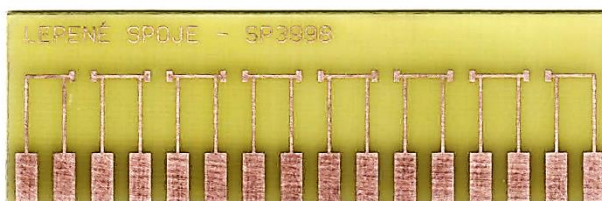
K dosažení přesného objemu byly použity injekční stříkačky o objemu 5 ml. Do těch byla následně naplněna hotová směs a následně v nich byla i uchovávána. Dále sloužily i pro dávkování pájecí pasty na šablonu při šablonovém tisku.



Obrázek 35 Injekční stříkačka s pájecí pastou

6.2. Příprava vzorků

Pro výrobu vzorků byly použity hotové desky plošných spojů o rozměrech 2,5 cm x 8 cm s tloušťkou 1,5 mm. Tloušťka měděné vrstvy je 70 μm . Rozměr pájecích plošek je 0,8 mm x 1,5 mm.

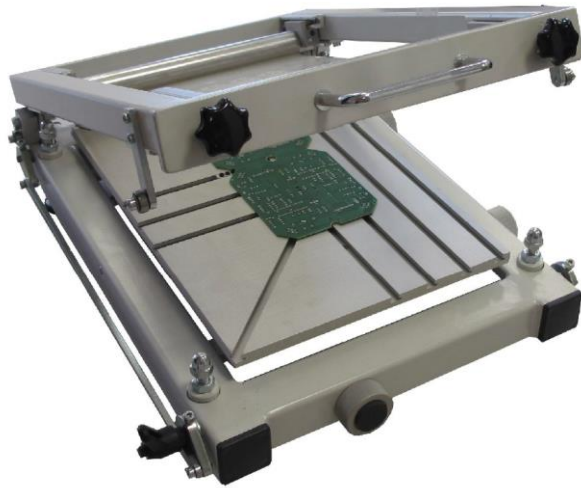


Obrázek 36 Použité DPS

6.3. Nanášení pájecí pasty

Pro nanášení pájecí pasty na desky plošných spojů byl použit přípravek pro manuální šablonový tisk. Nátisk probíhal po jednotlivých destičkách. Destička se vždy umístila do přípravku a

byla zajištěna ocelovými dorazy. Po umístění šablony na destičku je možné polohu destičky regulovat pomocí tří mikroposuvů. Pomocí třky byla nanesena pájecí pasta. Po nátisku každé kombinace pájecí pasty a tavidla byla šablona důkladně vyčištěna, aby nedošlo ke kontaminaci dalších vzorků a ovlivnění výsledků.



Obrázek 37 Šablonový tisk (31)

6.4. Osazování desek

Pro osazování desek byl použit podtlakový manipulátor. Ten umožňuje hladký pohyb v horizontální rovině a pomocí otočné hlavy i přesné umístění součástek na správné místo DPS. Součástka je uchycena podtlakem k trysce a po umístění nad místo osazení se pohybem hlavy ve vertikální ose umístí na DPS. Tímto způsobem je zajištěno to, že je součástka přesně a kolmo umístěna na pájecí plošky.



Obrázek 38 SMT manipulátor (33)

6.5. Přetavení

Přetavení osazených desek probíhalo v průběžné přetavovací peci MISTRAL 260. Pec používá pro ohřev systém topných článků. Rozvod horkého vzduchu zajišťují ventilátory. Ty se zároveň starají o rovnoměrné rozložení teploty v celém objemu pece. Pec disponuje dvěma zónami pro předehřev a jednou zónou pro přetavení.



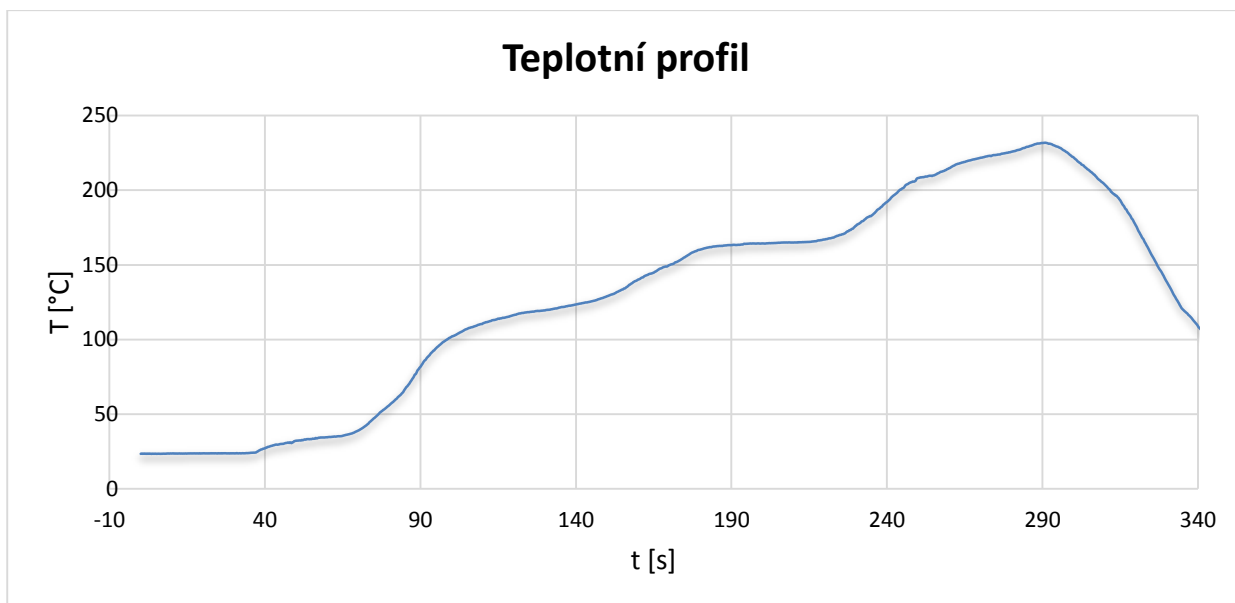
Obrázek 39 Průběžná přetavovací pec MISTRAL 260

V našem případě byly teploty jednotlivých zón nastaveny takto:

Tabulka 5 Teploty v přetavovací peci

Zóna	Teplota [°C]
1.	130
2.	180
3.	235

Teplotní profil byl změřen pomocí profilometru. Změřený profil je na následujícím grafu



Graf 1 Teplotní profil přetavovací pece

6.6. Analýza vzorků

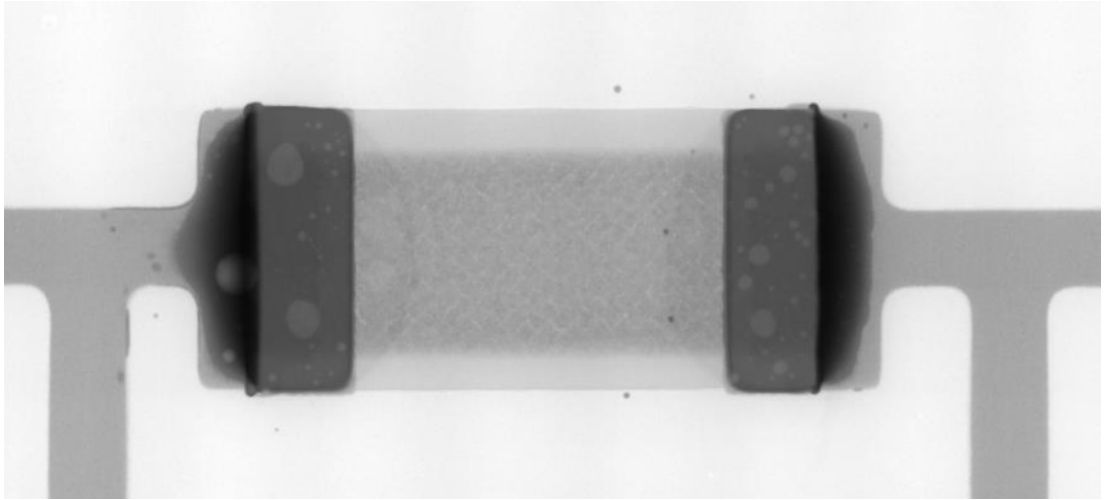
Protože se voidy vyskytují uvnitř pájeného spoje, bylo nutné použít rentgenové zařízení. V našem případě bylo použito rentgenové kontrolní zařízení *GE PHOENIX X-RAY NANOMET 180T*. Toto zařízení je vybaveno 180 kV RTG trubicí s diamantovým terčičkem a umožňuje zkoumání jak nekovových, tak i kovových materiálů. Dále umožňuje nastavení pro automatickou inspekci, díky čemuž bylo možné snímat DPS po větších sériích.



Obrázek 40 GE PHOENIX X-RAY NANOMET 180T (32)

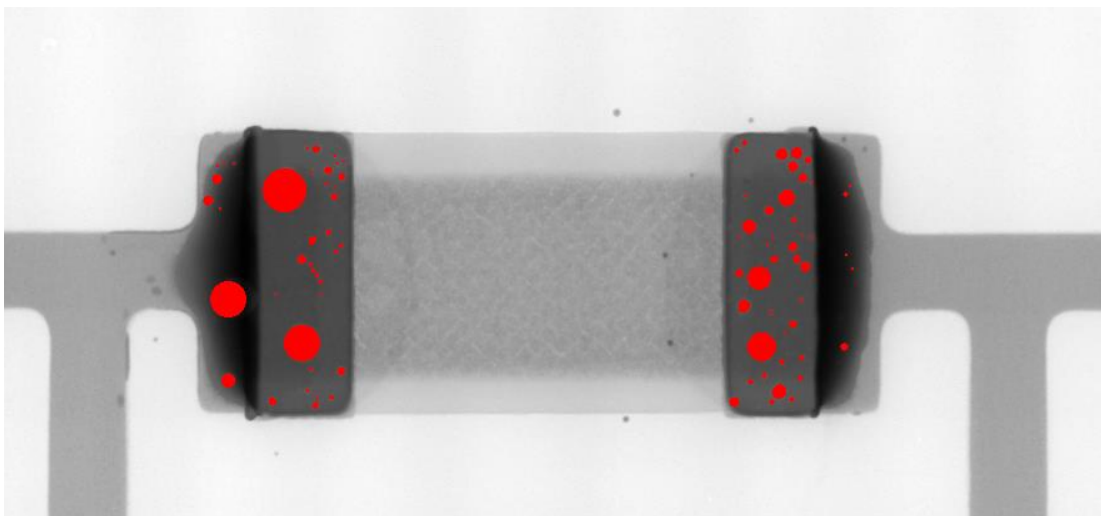
Zařízení disponuje dvěma detektory, z nichž jeden disponuje nižším rozlišením a vyšší rychlostí snímání. Druhý detektor disponuje vyšším rozlišením, ale ke snímání potřebuje delší čas. Díky tomu je předurčen pro detailnější zkoumání konkrétně vybraných oblastí. V našem případě

byl použit systém s nižším rozlišením, který splňoval naše požadavky na rozlišení snímků a následnou analýzu. Na následujícím obrázku (Obrázek 41) je snímek z RTG zařízení. V oblasti spojů jsou patrná světlá místa. Jejich přítomnost naznačuje nehomogenitu v pájeném spoji a lze je tedy považovat za voidy.



Obrázek 41 Snímek z kontrolního RTG zařízení

Pro analýzu těchto snímků byl použit software NIS-Elements. Ten umožňuje provést jasovou analýzu a následné změření ploch jednotlivých voidů a jejich sumaci. Tato analýza neprobíhá zcela automaticky a bylo nutné u každého snímku provádět korekce, protože software nerozpozná každý void zcela správně. Na obrázku (Obrázek 42) je zanalyzovaný snímek, na kterém jsou červeně vyznačeny voidy.



Obrázek 42 Detekce voidů

Pro konečnou analýzu bylo nutné stanovit jednotlivé kategorie voidů podle jejich velikosti. Stanovili jsme tyto meze, se kterými jsme dále pracovali:

- $0 \div 25 \mu m$
- $25 \div 50 \mu m$
- $50 \div 100$
- $100 \div 300 \mu m$
- $> 300 \mu m$

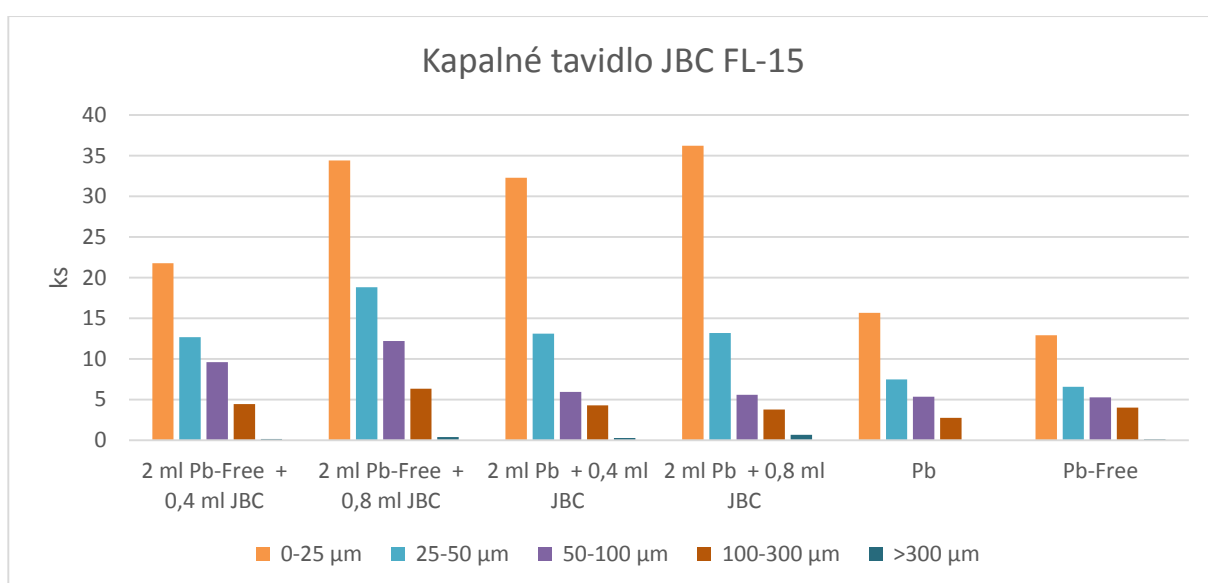
Voidy velikosti $0 \div 25 \mu m$ lze klasifikovat jako mikrovoidy. Ostatní jako makrovoidy. (21) Kategorie mikrovoidů je problematická z hlediska určení polohy jednotlivých mikrovoidů ve spoji. Mikrovoidy se nachází v jedné rovině na rozhraní intermetalické vrstvy a desky plošného spoje. Jejich polohu nelze z rentgenového snímku určit. Pro jejich přesné určení by bylo nutné provést mikrovýbrusy všech vzorků, což by bylo finančně i časově velmi náročné.

6.7. Vyhodnocení

Data získaná obrazovou analýzou všech vzorků byla dále zpracována. Na každém snímku byly označeny veškeré voidy a pro všechny vzorky jedné kombinace tavidla a pájecí pasty byly spočteny průměrné hodnoty všech skupin voidů. V následujících grafech jsou uvedeny průměrné hodnoty počtu voidů v jednotlivých kategoriích pro všechny kombinace pájecích past a tavidel.

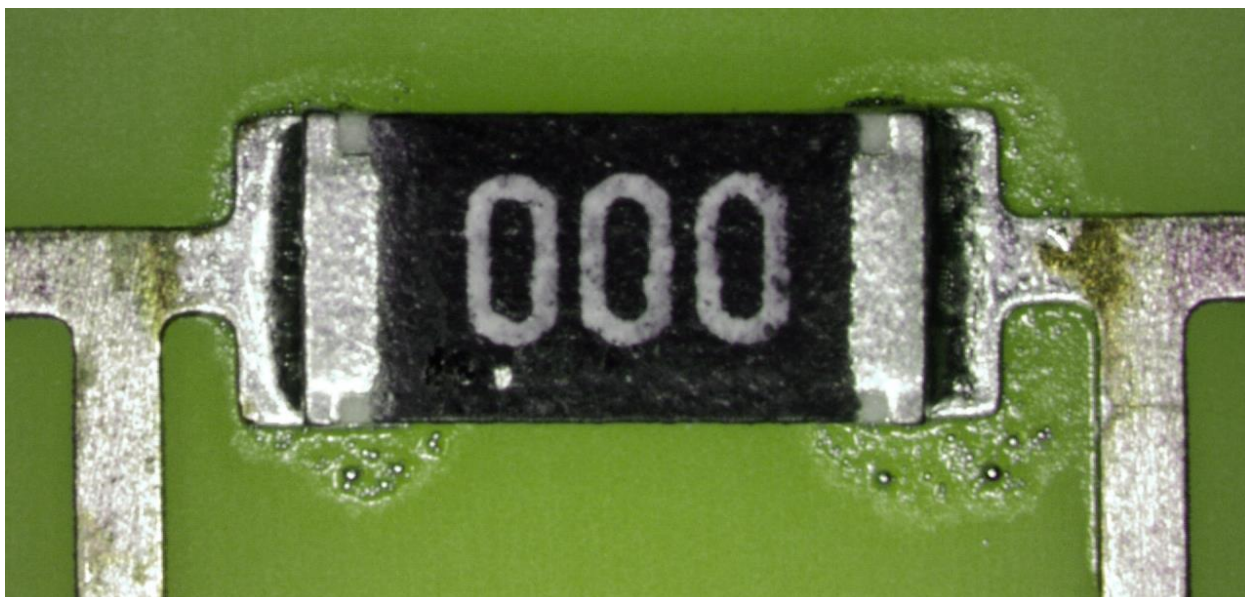
Pro porovnání jsou uvedeny i obě pájecí pasty bez přidaného tavidla

6.7.1 Kapalná tavidla

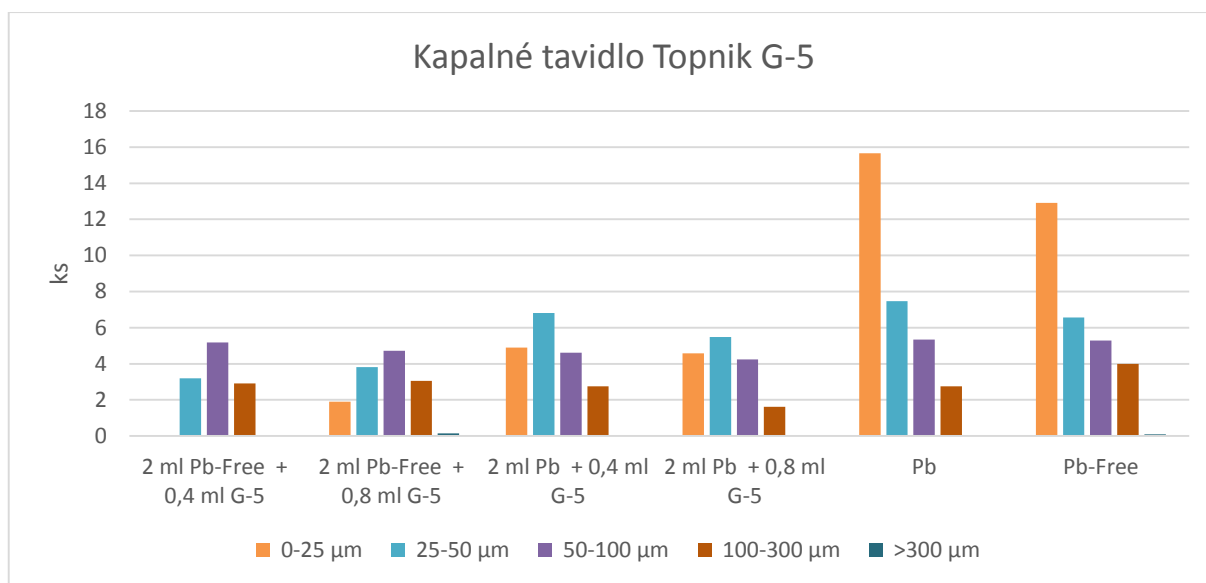


Graf 2 Kapalné tavidlo JBC FL-15

Jak je patrné z předchozího grafu (Graf 2), kde je zachycen výskyt voidů při použití tavidla JBC, toto tavidlo zapříčinilo enormní nárůst voidů v kategorii $0 \div 25 \mu\text{m}$, tedy mikrovoidů. V ostatních kategoriích je také patrný mírný nárůst, ale ne tak výrazný jako v kategorii mikrovoidů. Při kombinaci pájecí pasty a tohoto tavidla se také projevoval rozstřík pájky kolem pájeného spoje, jak je patrné z následujícího obrázku (Obrázek 43 Rozstřík pájky při kombinaci 2 ml Pb + 0,8 ml JBC).



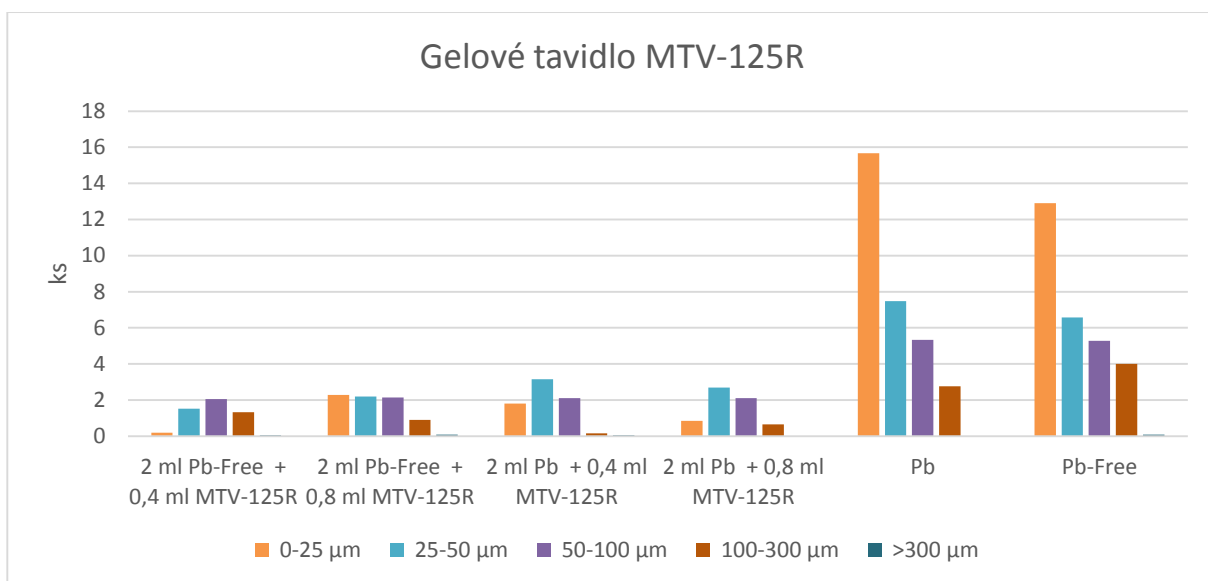
Obrázek 43 Rozstřík pájky při kombinaci 2 ml Pb + 0,8 ml JBC



Graf 3 Kapalné tavidlo Topnik G-5

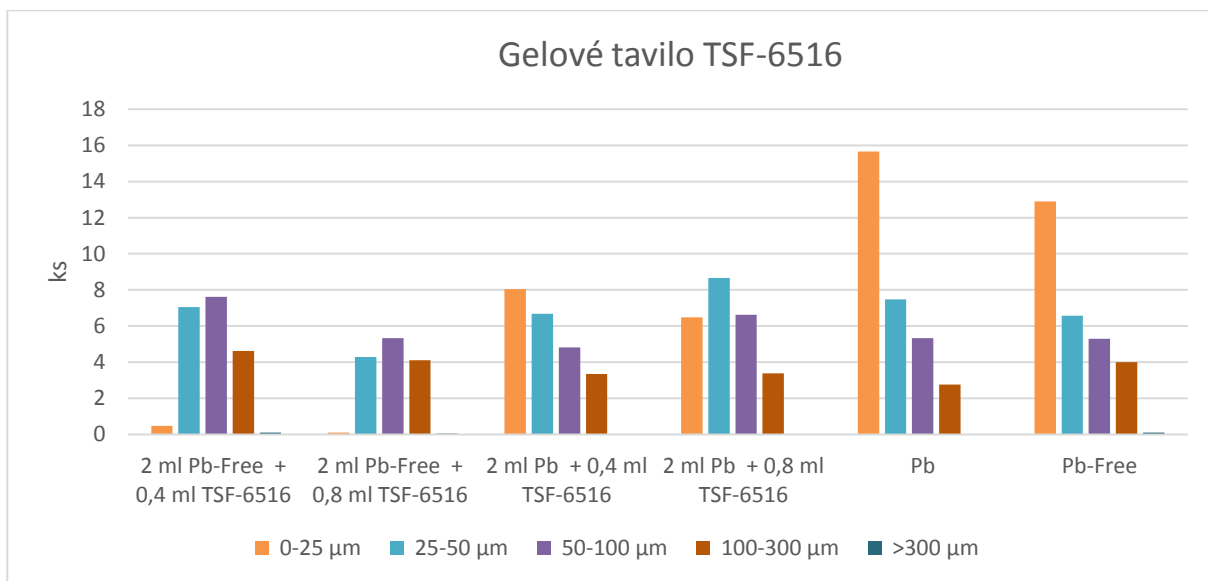
Kapalné tavidlo Topnik G-5 dosahovalo podstatně lepších výsledků než tavidlo JBC. V kombinaci s bezolovnatou pájecí pastou bylo dosaženo menšího výskytu mikrovoidů v porovnání s pastou olovnatou.

6.7.2 Gelová tavidla



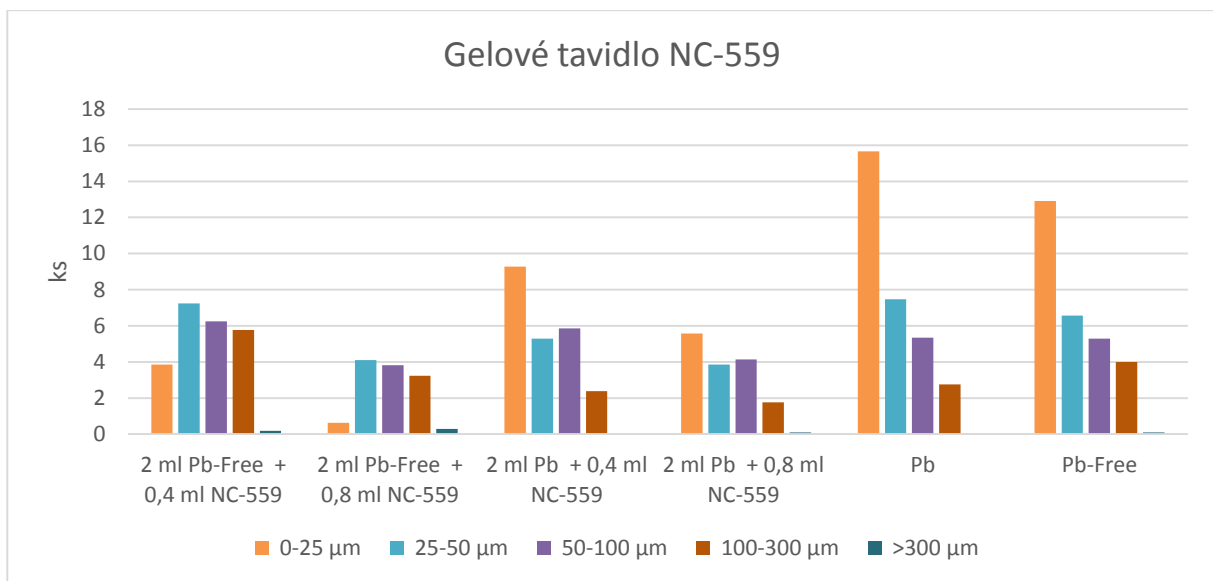
Graf 4 Gelové tavidlo MTV-125R

Nejlépeších výsledků bylo dosaženo s tavidlem MTV-125R u kterého, je jasně patrný menší výskyt voidů ve všech rozměrových skupinách.



Graf 5 Gelové tavidlo TSF-516

U tavidla TSF-516 došlo v kombinaci s bezolovnatou pájecí pastou výraznému úbytku mikrovoidů v kategorii do 25 μm. Vliv na výskyt voidů v kategoriích od 25 μm je spíše minimální. V kombinaci s olovnatou pájecí pastou došlo také k úbytku mikrovoidů, ale ne tak výraznému jako v kombinaci s bezolovnatou pájecí pastou.



Graf 6 Gelové tavidlo NC-559

Tavidlo NC-559 mělo také větší vliv na snížení mikroovoidů v kombinaci s bezolovnatou pájecí pastou.

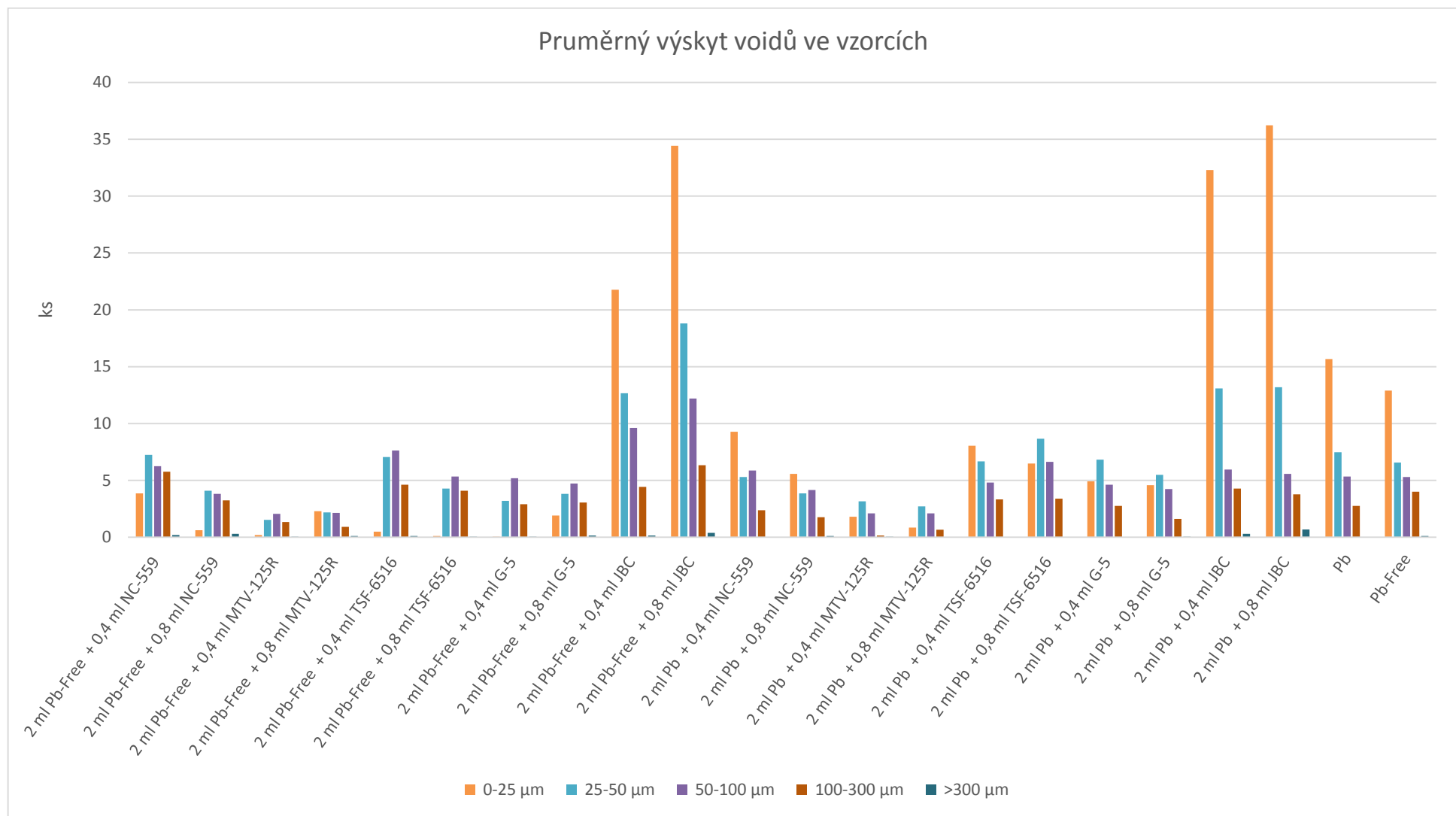
6.7.3 Shrnutí

Z naměřených hodnot také vyplývá, že v olovnaté pájce docházelo k většímu průměrnému výskytu mikrovoidů v porovnání s pájkou bezolovnatou.

Nejnižšího výskytu voidů bylo dosaženo při kombinaci pájecí pasty a gelového tavidla MTV-125R.

Na následujícím grafu jsou uvedeny pro porovnání všechny naměřené hodnoty.

V příloze (Příloha 1) jsou uvedena již zpracovaná naměřená data.



Graf 7 Průměrný výskyt voidů ve vzorcích

7. Závěr

Cílem této práce bylo studium vlivu množství tavidla na výskyt voidů v pájených spojích. Bylo použita olovnatá i bezolovnatá pájecí pasta. Voids byly rozděleny do kategorií podle průměru.

K analýze bylo použito rentgenové kontrolní zařízení. Snímky z kontrolního zařízení byly zpracovány pomocí softwaru pro analýzu obrazu. Ten umožňuje provést jasovou analýzu a následnou kvantifikaci jednotlivých voidů.

Ze získaných dat vyplývá to, že množství tavidla v pájecí pastě výskyt voidů v pájených spojích ovlivňuje. A to v závislosti na použitém tavidlu jak pozitivně, tak i negativně.

Nejhůře ze zkoumaných tavidel dopadlo JBC FL-15 u kterého došlo k výraznému zvýšení výskytu voidů v kategoriích do 50 μm . Vliv na voidy v ostatních kategoriích není tak významný.

Nejlépe naopak dopadlo tavidlo MTV-125R, u kterého došlo k výraznému snížení výskytu voidů ve všech kategoriích.

Obecně lze říci, že zvýšení množství vhodného tavidla napomáhá ke snížení výskytu voidů v pájených spojích.

Z výsledku dále vyplývá, že nižšího výskytu voidů je dosaženo při použití bezolovnaté pájecí pasty, což může být způsobeno množstvím tavidla, které tato pájecí pasta obsahuje.

Na základě naměřených dat lze konstatovat, že množství voidů v pájeném spoji lze snížit zvýšením podílu tavidla v pájecí pastě. Bylo by však nutné zjistit, jaký by to mělo vliv na viskozitu a nanášení pasty.

8. Citovaná literatura

1. Abel M, Cimburek V. Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi. Pardubice: ABE.TEC, s.r.o.; 2005.
2. Urbánek J, Klabačka E. Technologie elektronických zařízení. Praha: ČVUT; 1997.
3. Kramer A. Solder paste handling. Circuit Assembly. 2003.
4. Apell M, Howell K. The evolution of mass soldering. CircuiTree. 2002.
5. Whalley DC, Hyslop SM. A simplified model of the reflow soldering process. Soldering & Surface Mount Technology. 2002;14(1):30-7.
6. Tino UMd. Selective soldering with pb-free alloys. . 2008.
7. Růžička D. Měření pájitelnosti metodou smáčecích vah. Praha: ČVUT; 2012.
8. Fidan I. Automated laser soldering systems for surface-mount rework. Circuits Assembly. 1998.
9. Lee N. Reflow soldering processes and troubleshooting: SMT, BGA, CSP and flip chip technologies. Newnes; 2002.
10. [Http://Www.nordson.com/en-us/divisions/efd/literature/white-papers/solder/nordson-EFD-tombstone-troubleshooting.pdf](http://Www.nordson.com/en-us/divisions/efd/literature/white-papers/solder/nordson-EFD-tombstone-troubleshooting.pdf).
11. Tombstone effect [Internet].; cited 2014]. Available from: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tombstone_Effect_DE.svg.
12. Dusek K, Straka V, Brejcha M, Beshajova Pelikanova I. Influence of type of reflow technology and type of surface finish on tomb stone effect. Electronics technology (ISSE), 2013 36th international spring seminar on; ; 2013.
13. Takaki A, Kato R, Taguchi T, Suzuki RH. Protection of tombstone problems for small chip devices. Electronic components and technology conference, 1999. 1999 proceedings. 49th; ; 1999.
14. Biocca P. Lead-free SMT soldering defects: How to prevent them.
15. Acceptability of electronic assemblies. In: IPC-A-610D. ; 2005.
16. Fukuzawa I, Ishiguro S, Nanbu S. Moisture resistance degradation of plastic LSIs by reflow soldering. IEEE IRPS Conf. 1985:192-7.

17. Alpern P, Lee KC. A simple model for the mode II popcorn effect in thin plastic IC packages. Reliability physics symposium proceedings, 2003. 41st annual. 2003 IEEE international; ; 2003.
18. Alpern P, Dudek R, Schmidt R, Wicher V, Tilgner R. On the mode II popcorn effect in thin packages. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on. 2002;25(1):56-65.
19. J. Podzemský, J. Urbánek, K. Dušek. Obrazová analýza povrchu bezolovnaté povrchové úpravy zaměřená na indikaci cínových whiskerů. Electroscope. 2011, č. 1. 2011 March 21:6 s.
20. Tersztyanszky L, Illes B. Incompatibility problems in soldering technology. Electronics technology: Meeting the challenges of electronics technology progress, 2005. 28th international spring seminar on; ; 2005.
21. Aspandiar RF. Voids in solder joints. SMTA Journal. 2006;19(4).
22. Xie Xiaoqiang, Zhou Jianwei, Chae Jonghyun, Chung Myungkee. Void mechanism research and control in solder joint. Electronic packaging technology and high density packaging (ICEPT-HDP), 2011 12th international conference on; ; 2011.
23. The effect of voiding in solder interconnections formed from lead free solder pastes with alloys of tin, silver and copper. IPC SOLDER PRODUCTS VALUE COUNCIL.
24. Mentor graphics communities [Internet].; cited 2014]. Available from: <http://communities.mentor.com/mgcx/message/21559>.
25. Jo H, Nieman BE, Lee NL. VOIDING OF LEAD-FREE SOLDERING AT MICROVIA. SMTA Journal. 2002.
26. Stafstrom E, Singer A, McLenaghan J, Nishu K. Reducing solder voids with copper-filled microvias. Circuits Assembly. 2003 April;14(4):22-4.
27. Kim D, Chang J, Park J, Pak JJ. Formation and behavior of kirkendall voids within intermetallic layers of solder joints. Journal of Materials Science. Materials in Electronics. 2011 July;22(7):703-16.
28. Voids in solder joints [Internet].; cited 2014. Available from: <http://blogs.indium.com/blog/china-smt-blog/voids-in-solder-joints-i>.
29. Senju M31-GRN360-KV datasheet [Internet].; cited 2014. Available from: <http://www.senju.com/images/pdf/M31-GRN360-KV%20Series%20fly.pdf>.
30. SSA48-M955 datasheet [Internet].; cited 2014. Available from: <http://siebtronic.at/files/413226001260353601/SSA48-M955.pdf>.
31. Šablonový tisk SAB 06 [Internet].; cited 2014. Available from: [http://www.spajkovanie.sk/doc/DataSheet_SK_\(139_1\).pdf](http://www.spajkovanie.sk/doc/DataSheet_SK_(139_1).pdf).
32. Laboratoř pro vývoj a realizaci [Internet].; cited 2014. Available from: <http://lvr.fel.cvut.cz/diagnostika/cz/rentgen.html>.

33. Mikula, T. Vliv teplotního profilu na výskyt voidů v pájených spojích. Praha: ČVUT; 2013

9. Seznam příloh

Příloha 1 Naměřená data.....	64
------------------------------	----

10. Seznam obrázků

Obrázek 1 Intermetalický spoj (1)	10
Obrázek 2 Ruční pájení (2).....	13
Obrázek 3 Zařízení s jednoduchá pájecí vlnou (1)	14
Obrázek 4 Zařízení s dvojitou pájecí vlnou (1)	15
Obrázek 5 Schematické znázornění laserového systému (8).....	20
Obrázek 6 Příklad systému pro vodné čištění desek (9).....	22
Obrázek 7 Špatná geometrie pájeného spoje (1)	25
Obrázek 8 Tombstone efekt (10)	26
Obrázek 9 Tombstone efekt – silové poměry (11)	26
Obrázek 10 Rozstřík pájky (15).....	27
Obrázek 11 Popcorn efekt (16).....	28
Obrázek 12 Provedení pouzdra pro omezení vzniku Popcorn efektu (16).....	28
Obrázek 13 Nesmáčený spoj (15).....	29
Obrázek 14 Odsmačení (15)	30
Obrázek 15 Nepřetavená pájecí pasta na spoji (15).....	30
Obrázek 16 Příklad whiskeru (20).....	31
Obrázek 17 Princip tvorby makrovoidů (22).....	32
Obrázek 18 Faktory ovlivňující vznik makrovoidů (21), (22).....	33
Obrázek 19 Procentní zastoupení voidů v závislosti na použité atmosféře (22)	33
Obrázek 20 Makrovoidy v THT spoji (21).....	34
Obrázek 21 Makrovoidy v BGA spoji (21)	34
Obrázek 22 Mikrovoidy v BGA spoji.....	35
Obrázek 23 Shrinkange voidy (21).....	36
Obrázek 24 Vznik voidů v mikropropojích (24)	37
Obrázek 25 Voidy v mikropropojích (21)	37
Obrázek 26 Vliv vícenásobného tisku (25).....	38
Obrázek 27 Vliv velikosti zrn pájecí pasty (25)	38
Obrázek 28 Vliv aktivity tavidla (25)	38
Obrázek 29 Vznik Kirkendallových voidů (21)	39
Obrázek 30 Kirkendallové voidy – vystavení teplotě 125 °C	40
Obrázek 31 Dírky v povrchu mědi na DPS (21).....	40
Obrázek 32 Umístění jednotlivých typů voidů (28)	41

Obrázek 33 Doporučený přetavovací profil pájecí pasty SENJU M31-GRN360-KV (29)	43
Obrázek 34 Doporučený přetavovací profil pájecí pasty SSA48-M955 (30).....	43
Obrázek 35 Injekční stříkačka s pájecí pastou.....	44
Obrázek 36 Použité DPS.....	44
Obrázek 37 Šablonový tisk (31)	45
Obrázek 38 SMT manipulátor (33).....	45
Obrázek 39 Průběžná přetavovací pec MISTRAL 260	46
Obrázek 40 GE PHOENIX X-RAY NANOMET 180T	47
Obrázek 41 Snímek z kontrolního RTG zařízení.....	48
Obrázek 42 Detekce voidů.....	48
Obrázek 43 Rozstřík pájky při kombinaci 2 ml Pb + 0,8 ml JBC	51

11. Přílohy

		0-25 μm	25-50 μm	50-100 μm	100-300 μm	>300 μm
2 ml Pb-Free + 0,4 ml NC-559	Průměr	3,9	7,2	6,2	5,8	0,2
	Rozptyl	8,4	15,8	12,1	12,1	0,2
	Sm. Odchylka	3,0	4,1	3,6	3,6	0,4
2 ml Pb-Free + 0,8 ml NC-559	Průměr	0,6	4,1	3,8	3,2	0,3
	Rozptyl	1,7	16,1	6,6	4,0	0,5
	Sm. Odchylka	1,3	4,1	2,6	2,0	0,7
2 ml Pb-Free + 0,4 ml MTV-125R	Průměr	0,2	1,5	2,0	1,3	0,0
	Rozptyl	0,2	1,1	2,1	2,5	0,0
	Sm. Odchylka	0,5	1,1	1,5	1,6	0,2
2 ml Pb-Free + 0,8 ml MTV-125R	Průměr	2,3	2,2	2,1	0,9	0,1
	Rozptyl	14,7	9,7	2,0	0,8	0,1
	Sm. Odchylka	3,9	3,2	1,5	0,9	0,3
2 ml Pb-Free + 0,4 ml TSF-6516	Průměr	0,5	7,0	7,6	4,6	0,1
	Rozptyl	2,5	20,2	14,9	8,9	0,1
	Sm. Odchylka	1,6	4,6	4,0	3,1	0,3
2 ml Pb-Free + 0,8 ml TSF-6516	Průměr	0,1	4,3	5,3	4,1	0,0
	Rozptyl	0,2	15,1	6,7	6,8	0,0
	Sm. Odchylka	0,4	4,0	2,7	2,7	0,2
2 ml Pb-Free + 0,4 ml G-5	Průměr	0,0	3,2	5,2	2,9	0,0
	Rozptyl	0,0	4,6	8,6	2,6	0,0
	Sm. Odchylka	0,2	2,2	3,0	1,6	0,2
2 ml Pb-Free + 0,8 ml G-5	Průměr	1,9	3,8	4,7	3,0	0,1
	Rozptyl	13,9	7,9	4,1	3,4	0,1
	Sm. Odchylka	3,8	2,9	2,1	1,9	0,4
2 ml Pb-Free + 0,4 ml JBC	Průměr	21,8	12,7	9,6	4,4	0,1
	Rozptyl	116,9	48,9	12,0	2,7	0,1
	Sm. Odchylka	11,1	7,2	3,5	1,7	0,4
2 ml Pb-Free + 0,8 ml JBC	Průměr	34,4	18,8	12,2	6,3	0,4
	Rozptyl	245,7	69,9	31,0	19,0	0,2
	Sm. Odchylka	16,1	8,6	5,7	4,5	0,5
2 ml Pb + 0,4 ml NC-559	Průměr	9,3	5,3	5,9	2,4	0,0
	Rozptyl	41,7	15,7	5,6	1,8	0,0
	Sm. Odchylka	6,6	4,1	2,4	1,4	0,0
2 ml Pb + 0,8 ml NC-559	Průměr	5,6	3,9	4,1	1,8	0,1
	Rozptyl	24,0	9,1	3,1	0,8	0,1
	Sm. Odchylka	5,0	3,1	1,8	0,9	0,3
2 ml Pb + 0,4 ml MTV-125R	Průměr	1,8	3,2	2,1	0,2	0,1
	Rozptyl	9,5	6,9	2,5	0,1	0,0
	Sm. Odchylka	3,2	2,7	1,6	0,4	0,2
2 ml Pb + 0,8 ml MTV-125R	Průměr	0,9	2,7	2,1	0,7	0,0
	Rozptyl	2,7	3,8	0,8	0,8	0,0
	Sm. Odchylka	1,7	2,0	0,9	0,9	0,0

2 ml Pb + 0,4 ml TSF-6516	Průměr	8,0	6,7	4,8	3,3	0,0
	Rozptyl	57,2	14,0	4,4	5,2	0,0
	Sm. Odchylka	7,7	3,8	2,2	2,3	0,0
2 ml Pb + 0,8 ml TSF-6516	Průměr	6,5	8,7	6,6	3,4	0,0
	Rozptyl	34,0	16,6	8,6	3,6	0,0
	Sm. Odchylka	6,0	4,2	3,0	1,9	0,0
2 ml Pb + 0,4 ml G-5	Průměr	4,9	6,8	4,6	2,8	0,0
	Rozptyl	19,9	38,4	10,5	0,8	0,0
	Sm. Odchylka	4,6	6,4	3,3	0,9	0,0
2 ml Pb + 0,8 ml G-5	Průměr	4,6	5,5	4,2	1,6	0,0
	Rozptyl	10,8	14,2	3,5	1,4	0,0
	Sm. Odchylka	3,4	3,9	1,9	1,2	0,2
2 ml Pb + 0,4 ml JBC	Průměr	32,3	13,1	6,0	4,3	0,3
	Rozptyl	92,8	11,6	6,8	3,8	0,2
	Sm. Odchylka	9,9	3,5	2,7	2,0	0,5
2 ml Pb + 0,8 ml JBC	Průměr	36,2	13,2	5,6	3,8	0,7
	Rozptyl	205,1	37,5	10,5	3,8	0,7
	Sm. Odchylka	14,7	6,3	3,3	2,0	0,9
Pb	Průměr	15,7	7,5	5,3	2,8	0,0
	Rozptyl	67,1	9,9	5,7	1,5	0,0
	Sm. Odchylka	8,4	3,2	2,5	1,3	0,0
Pb-Free	Průměr	12,9	6,6	5,3	4,0	0,1
	Rozptyl	49,6	9,9	5,5	4,5	0,1
	Sm. Odchylka	7,2	3,2	2,4	2,2	0,3

Příloha 1 Naměřená data