

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dutiny v pájených spojích

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej KOUBA**
Osobní číslo: **E12B0113P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Dutiny v pájených spojích**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou bezolovnatého pájení a vzniku dutin ve spoji.
2. Vypracujte přehled typů dutin a popište příčiny jejich vzniku.
3. Navrhněte a provedte experiment sledující vznik dutin v bezolovnatém pájeném spoji.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. R. J. Klein Wassink: Soldering in electronics
2. Raiyo Aspandiar: Voids in Solder Joints
3. Jian Zou: Effect of Cu Substrate and Solder Alloy on the Formation of Kirkendall Voids in the Solder Joints during Thermal Aging

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Václav Wirth

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení vzniku dutin v bezolovnatých pájených spojích. Teoretická část se zabývá problematikou bezolovnatého pájení, složením a vlastnostmi nejpoužívanějších bezolovnatých pájecích slitin. Dále popisuje přehled dutin ve spojích, princip jejich vzniku a vlivy ovlivňující jejich výskyt. V praktické části je popsán navržený experiment, který sleduje vliv teplotního pájecího profilu a velikosti apertury šablony na tvorbu dutin v pájených spojích.

Klíčová slova

Dutiny, pájený spoj, bezolovnaté pájení, teplotní pájecí profil, apertura

Abstract

This bachelor thesis is focused on solving issues related to voids formation in lead-free solder joints. Theoretical part deals with lead-free soldering, composition and properties of the most popular solder alloys. At least but not last theoretical part describes types of voids in solder joints, basic principles of voids formation and factors which has influence on their occurrence. In practical part is described experiment which observes influence of reflow profile and reduction of aperture size on voids formation in solder joints.

Key words

Voids, solder joint, lead-free soldering, reflow profile, aperture

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 31.5.2016

Ondřej Kouba

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Václavu Wirthovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD.....	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 BEZOLOVNATÉ PÁJENÍ	11
1.1.1 <i>Problematika bezolovnatého pájení.....</i>	<i>11</i>
1.1.2 <i>Složení bezolovnatých pájek</i>	<i>12</i>
1.1.3 <i>Slitiny pro bezolovnaté pájení.....</i>	<i>12</i>
1.1.4 <i>Srovnání bezolovnatých slitin podle teploty tavení.....</i>	<i>14</i>
1.2 DUTINY V PÁJCE	16
1.2.1 <i>Makro dutiny.....</i>	<i>17</i>
1.2.2 <i>Planární mikro dutiny.....</i>	<i>19</i>
1.2.3 <i>Intermetalické dutiny</i>	<i>20</i>
1.2.4 <i>Špendlíkové dutiny</i>	<i>21</i>
1.2.5 <i>Dutiny vzniklé smrštěním</i>	<i>22</i>
1.2.6 <i>Dutiny v mikropropojích.....</i>	<i>22</i>
1.3 Vlivy ovlivňující výskyt voidů	24
1.3.1 <i>Vliv pájecí pasty.....</i>	<i>24</i>
1.3.2 <i>Vliv teplotního pájecího profilu</i>	<i>25</i>
1.3.3 <i>Vliv povrchových úprav</i>	<i>29</i>
1.3.4 <i>Vliv šablony pro tisk pájecí pasty a design DPS</i>	<i>32</i>
1.3.5 <i>Vliv tavidla.....</i>	<i>35</i>
1.3.6 <i>Vliv vakua při pájení v parách.....</i>	<i>38</i>
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	41
2.1 TESTOVACÍ VZOREK	41
2.2 PÁJECÍ PASTA	41
2.3 ŠABLONA.....	42
2.4 PÁJENÍ PŘETAVENÍM.....	42
2.4.1 <i>Výroba teplotního čidla</i>	<i>43</i>
2.4.2 <i>Volba teplotních profilů.....</i>	<i>43</i>
2.5 POPIS KONTROLY VZORKŮ	45
2.5.1 <i>Kontrola pomocí RTG.....</i>	<i>45</i>
2.5.2 <i>Metalografické výbrusy.....</i>	<i>46</i>
2.6 VYHODNOCENÍ VZORKŮ	47
2.6.1 <i>Vliv teplotních pájecích profilů.....</i>	<i>48</i>
2.6.2 <i>Vliv redukce apertur</i>	<i>49</i>
ZÁVĚR	52
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	54
PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratek

Ag.....	Chemický vzorec pro stříbro
Au.....	Chemický vzorec pro zlato
Bi.....	Chemický vzorec pro bismut
Cu.....	Chemický vzorec pro měď
Cu ₃ Sn	Intermetalická sloučenina vznikající během difuze mědi a cínu
Cu ₆ Sn ₅	Intermetalická sloučenina vznikající během difuze mědi a cínu
Ge.....	Chemický vzorec pro germanium
In	Chemický vzorec pro indium
Ni	Chemický vzorec pro nikl
Sb	Chemický vzorec pro antimon
Zn.....	Chemický vzorec pro zinek
BGA.....	Ball Grid Array - pouzdro s kulovými vývody
BTC.....	Bottom Termination Components – skupina komponent s připojením pod součástkou
DFN	Dual Flat No-lead - pouzdro bez klasických drátových vývodů
DPS	Deska plošných spojů
ENIG.....	Electroless Nickel Immersion Gold - povrchová úprava mědi, nanesení chemického niklu a imersního zlata
FR4.....	Flame Retardant Class 4 - kompozitní materiál ze skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice
Fine – pitch	Jemná (malá) rozteč vývodů
HAL	Hot Air Levelling - povrchová úprava mědi, žárové nanesení pájky na měď
IPC-7095C	Norma poskytující užitečné a praktické informace ohledně používání BGA pouzder
IPC-A-610F	Standard pro montáž elektronických sestav
OSP	Organic Solder Preservatives – ochranná organická vrstva
Pt1000	Označení teplotního senzoru
QFN	Quad Flatpack No-lead - pouzdro bez klasických drátových vývodů
Qn.....	Heating factor - integrál průběhu teploty nad teplotou tavení slitiny
RoHS.....	Směrnice zakazující používání nebezpečných látek při výrobě elektrických a elektronických zařízení

RSS	Ramp Soak Spike - sedlový teplotní pájecí profil
RTG	Rentgenová kontrola
RTS	Ramp to Spike - lineární teplotní pájecí profil
SAC.....	Bezolovnatá pájecí slitina složená z cínu, stříbra a mědi
SAC305.....	Bezolovnatá pájecí slitina složená z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi
SAC3-XF3+	Označení pájecí slitiny
SMD.....	Surface Mount Device - součástka pro povrchovou montáž plošných spojů
SnPb.....	Olovnatá pájecí slitina složená z cínu a olova
TAL.....	Time above liquidus – čas nad liquidem (teplotou tavení)
VPS	Vapour phase soldering – pájení v parách

Úvod

Pájený spoj je již od počátků výroby elektroniky nedílnou součástí elektronických zařízení. V těchto spojích se velmi často objevovalo ekologicky i zdravotně závadné olovo, proto se jeho náhrada v pájkách řešila po celém světě. Ačkoliv bezolovnaté pájení bylo z ekologického hlediska ideálním řešením, přechod s sebou pochopitelně přinesl spoustu otázek nejen ohledně spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů, ale třeba i o nákladech spojených s tímto přechodem

Právě spolehlivost bezolovnatých pájených spojů mohou výrazně ovlivnit dutiny, na které je zaměřena tato práce. Je známo, že se dutiny mnohem častěji vyskytují v bezolovnatých pájkách, a že mohou ovlivňovat mechanické a elektrické vlastnosti pájeného spoje. V teoretické části je popis jednotlivých typů dutin a jejich vznik, který může být zapříčiněn návrhem desky plošných spojů nebo procesem pájení. Jejich výskyt lze ovšem ovlivňovat mnoha faktory, které jsou popsány v poslední podkapitole teoretické části.

Mezi faktory ovlivňující výskyt dutin v pájených spojích patří zejména výběr pájecí pasty a tavidla, povrchové úpravy desky plošných spojů, teplotního pájecího profilu při pájení přetavením, použití vakua při pájení v parách nebo množství nanesené pájecí pasty. Experimentální část této práce se zabývá vlivem teplotního pájecího profilu, především ovlivněním výskytu dutin maximální teplotou profilu a časem nad teplotou tavení. Dále se zaměřuje na vznik dutin v závislosti na použitém množství nanesené pájecí pasty, tudíž redukcí velikosti apertur v šabloně. Dutiny byly zkoumány pomocí rentgenu a mikroskopu a vyhodnoceny pomocí vhodných softwarů.

1 Teoretická část

1.1 Bezolovnaté pájení

Pájení je způsob metalurgického spojování dvou kovů třetím roztaveným kovem – pájkou, který má nižší teplotu tavení než spojované části. Ke spojení dojde difúzí atomů pájky do materiálu spojovaných částí. Více o pájení se lze seznámit např. v knize od R. J. Klein Wassinka – *Soldering in Electronics* [1]. Pájky byly používány k propojování materiálů již od počátku elektrotechnického a elektronického průmyslu. V těchto pájecích slitinách bylo široce rozšířeno olovo pro jeho osvědčenou spolehlivost v kombinaci s cínem. Nicméně olovo se považuje nejen za ekologicky, ale také i zdravotně závadný kov, a proto se náhrada olovnatých pájek řešila po celém světě. Už od roku 1993 se v USA považuje olovo za škodlivé pro lidské zdraví a od té doby byla snaha omezit tento kov v pájkách. Netrvalo dlouho a k tomuto kroku se odhodlalo i Japonsko. V Evropě vznikla direktiva RoHS, která vstoupila v platnost 1. července 2006. Tato směrnice zakazuje používání nebezpečných látek při výrobě elektrických a elektronických zařízení, mezi něž patří právě i olovo. Rovněž se výrobky neodpovídající směrnici RoHS nesmějí dovážet do Evropy. [2, 3]

V pájených spojích je použito pouze nepatrné procento olova používaného v průmyslu, avšak problém je v tom, že většina elektronických zařízení obsahující olovnatou pájku končí na skládkách odpadů a olovo může poté znečišťovat podzemní vodní zdroje. [2]

1.1.1 Problematika bezolovnatého pájení

Zavedení bezolovnatého pájení sebou přineslo několik změn a to nejen ve změně pájecích slitin, ale i v materiálech pro DPS, součástkách a výrobních technologiích. Proto je evidentní, že pro výrobce těchto slitin, součástek atd. tyto změny byly velice nákladné.

Co s sebou také přináší přechod na bezolovnaté pájení? Nejenže olovo v pájkách zaručovalo výborné mechanické vlastnosti, ale také olovnaté pájky měly hlavní výhodu v nižší teplotě tavení. Teplota tavení u bezolovnatých pájek je o 20 až 45 °C vyšší než u pájek SnPb, je tedy potřeba většího množství dodané energie na roztavení pájky a dochází k vyššímu namáhání součástek – výrobky mohou mít výrazně kratší životnost. Vyšší teplota rovněž napomáhá častějšímu vzniku kuliček pájky během pájení. Mezi další problémy patří například špatná roztékavost bezolovnaté pájky, spoje jsou křehčí a hůře snášejí vibrace.

Bezolovnatá pájka také snižuje životnost pájecího hrotu. Je to způsobeno oxidací, tedy zčernáním povrchu hrotu a pájka tím ztrácí svou přilnavost k hrotu. [2]

1.1.2 Složení bezolovnatých pájek

V současné době jsou bezolovnaté pájky většinou tvořeny vysokým obsahem cínu a zbytek je doplňován drahými kovy, jako jsou Au, Ag, Cu. Tím je i výsledná cena bezolovnaté pájky vyšší než u pájek olovnatých. Dále mohou být pájky doplněny kovy - Bi, In, Zn, Sb a Ge. Cena slitiny je závislá na použití jednotlivých složek slitiny a dostupnosti prvků.

Prvky použité ve složení bezolovnatých pájek [4]:

- **stříbro (Ag)** – dobré elektrické vlastnosti; snížení bodu tavení; lepší smáčení; zlepšení pevnosti spoje; vysoká cena,
- **měď (Cu)** – snižuje bod tání; zlepšuje odolnost proti únavě tepelného cyklu; lepší smáčivost; způsobuje křehkost,
- **zinek (Zn)** – snižuje bod tání; levný; náchylný k oxidaci a proto není vhodný pro pájení vlnou; kratší životnost spoje,
- **bismut (Bi)** – ve slitině s cínem výrazně snižuje bod tání a zlepšuje smáčivost,
- **antimon (Sb)** – přidává se ke zvýšení pevnosti bez ovlivnění smáčivosti; snižuje povrchové napětí; omezuje růst whiskerů,
- **indium (In)** – snižuje bod tání a zlepšuje tvárnost; horší mechanické vlastnosti, kvůli vysokému podílu prvku v pájce a vysoké ceně prvku je i cena pájky vysoká,
- **nikl (Ni)** – zabraňuje odsmáčení; předchází cínovým whiskerům,
- **germanium (Ge)** – zabraňuje oxidaci; snižuje povrchové napětí; zvyšuje pevnost v tahu; snižuje vývoj mikrotrhlin.

1.1.3 Slitiny pro bezolovnaté pájení

Vzhledem k uvedeným celosvětovým požadavkům na bezolovnaté pájení je nutné, aby slitiny splňovaly jisté požadavky. Níže jsou uvedené hlavní z nich [5, 6]:

- **nízká teplota tavení** – teplota tavení by měla být dostatečně nízká, aby nedošlo k poškození konstrukce nebo součástek, ale zároveň dostatečně vysoká, aby pájený spoj odolal provozním teplotám zařízení; u většiny bezolovnatých pájek se dá

tekutého stavu dosáhnout v rozmezí teplot 195 – 227 °C,

- **dobrá smáčivost** – tj. aby pájka dobře přilnula ke spojovaným materiálům; dá se zlepšit pomocí tavidel,
- **dobrá dostupnost kovů** – měly by být dostatečné zásoby nebo rezervy kovů (Sn, Ag, Cu, Zn, Sb),
- **nízké náklady** – je nepravděpodobné, že by výrobci elektronických zařízení používali dražší pájky, i když by prokazovaly lepší vlastnosti.

Mezi další požadavky v oblasti elektroniky samozřejmě patří dobrá elektrická a tepelná vodivost, dostatečná mechanická pevnost, ale i lesklost spoje. Aby se dosáhlo těchto požadavků, mnoho slitin obsahuje malé množství třetího nebo čtvrtého prvku.

Příklady bezolovnatých slitin [2]:

- **Sn96,5/Ag3,5** – jedna z nejvhodnějších slitin; teplota tavení je 221 °C; vyznačuje se nejhorším smáčením při pájení přetavením mezi slitinami s vysokým obsahem cínu,
- **Sn99,3/Cu0,7** – teplota tavení této pájky je 227 °C; svou jakostí se rovná pájce SnPb; nejhorší mechanické vlastnosti ze všech bezolovnatých pájek; menší teplotní odolnost; používá se k pájení vlnou vzhledem k nízké ceně,
- **Sn96,5/Ag3/Cu0,5** – označení SAC; nejpoužívanější; teplota tavení kolem 217 °C; spolehlivost spoje srovnatelná s pájkou SnPb; pájitelnost lepší než u slitin SnAg a SnCu,
- **Sn96,2/Ag2,5/Cu0,8/Sb0,5** – větší odolnost proti únavě než u pájek SnPb; přídavek 0,5 % Sb tuto slitinu dále zpevní,
- **Sn97/Cu2/Sb0,8/Ag0,2** – vhodná pro ruční pájení a pro pájení vlnou,
- **Sn95/Sb5** – vysoká teplota tavení mezi 232-240 °C; špatné smáčení pájky,
- **Sn89/Zn8/Bi3** – bod tavení mezi 191-195 °C blízký bodu tavení pájky SnPb; bismut zmenšuje korozi způsobenou zinkem ve vlhkých podmínkách; vyrobeny za účelem zlevnění výrobků,
- **Bi58/Sn42** – teplota tavení pouze 138 °C; odolnost vůči zhrubnutí; vlastnosti podobné pájce SnPb; pro nízkoteplotní aplikace nebo některé spotřební výrobky.

V současnosti je nejpoužívanější bezolovnatá pájecí slitina SAC305. Tato slitina obsahuje 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Vyznačuje se vynikající odolností proti

únavě, vynikající spolehlivostí pájeného spoje, nejlepší smáčivostí z SAC slitin, ale také tím, že se dá sloučit se všemi typy tavidel.

1.1.4 Srovnání bezolovnatých slitin podle teploty tavení

Slitiny pro bezolovnaté pájení můžeme podle teplot tavení rozdělit do 3 skupin: nízkoteplotní, slitiny se střední teplotou tavení a slitiny s vysokou teplotou tavení. Většina bezolovnatých slitin bohužel není eutektická (v tabulce nemají označení „e“), tzn., že v jistém rozmezí teplot vedle sebe existují jak pevná, tak i tekutá fáze.

Tab. 1.I: Nízkoteplotní slitiny (zdroj: [2]).

Složení [%]	Teplota tavení [°C]	Poznámka
In51/Bi32,5/Sn16,5	60e	Slitina s nejnižším bodem tavení.
In66,3/Bi33	72e	Špatné smáčení.
Bi57/In26/S17	79e	Kritické smáčení.
In52/Sn48	118e	Dobře smáčející slitina s nejnižší teplotou.
Bi58/Sn42	138e	Dobré tepelné vlastnosti.

V Tab. 1.I je vidět, že nízkoteplotní slitiny obsahují větší množství prvků india nebo bismutu a mají horší smáčení. Teplota tavení těchto prvků je pod 180 °C. Ze zde uvedených se pro pájení v elektrotechnice prakticky využívá pouze poslední uvedená slitina Bi58/Sn42.

Tab. 1.II: Slitiny se střední teplotou tavení (zdroj: [2]).

Složení [%]	Teplota tavení [°C]	Poznámka
Sn86,5/Zn5,5/In4,5/Bi3,5	174-186	Zn silně oxiduje.
Sn83,6/In8,8/Zn7,6	181-187	Zn silně oxiduje.
Sn77,2/In20/Ag2,8	175-187	Nevhodné pro teploty nad 100°C.
Sn86,9/In10/Ag3,1	204-205	
Sn91/Zn9	199e	Zn silně oxiduje.

Některé slitiny se střední teplotou tavení jsou znázorněny v Tab. 1.II. Tyto slitiny mají jako majoritní prvek cín a mnohdy se přidává zinek, který snižuje teplotu tavení, ale zároveň

je náchylný k oxidaci. Teplota tavení těchto slitin je od 180 °C a dosahuje až 210 °C.

Tab. 1.III Slitiny s vysokou teplotou tavení (zdroj: [2]).

Složení [%]	Teplota tavení [°C]	Poznámka
Sn96,5/Ag3/Cu0,5	217-220	Oblíbená Pb-free slitina.
Sn91,8/Ag3,4/Bi4,8	211-213	Deska a vývody musí být bez Pb.
Sn96,5/Ag3,5	221e	Horší smáčení.
Sn99,3/Cu0,7	227e	Levná slitina pro pájení vlnou.
Sn99/Sb1	232-235	Antimon zvyšuje pevnost.
Sn97/Sb3	232-238	
Sn95/Sb5	235-240	
Sn65/Ag25/Sb10	233	Křehká slitina.
Au80/Sn20	280e	Pb-free slitina s nejvyšší teplotou tavení.

Některé slitiny s vysokou teplotou tavení jsou vypsány v Tab. 1.III. Mezi tyto slitiny patří i například v současnosti nejpoužívanější bezolovnatá pájka SAC305. U většiny těchto slitin obsah cínu přesahuje 90 % složení a teplota tavení přesahuje 210 °C.

1.2 Dutiny v pájce

Je známo, že na rozdíl od olovnatých pájek se u bezolvnatých mnohem častěji vyskytují dutiny - voidy. Dutiny se projeví snížením mechanické odolnosti, spolehlivosti a vodivosti pájeného spoje. Vliv na spolehlivost mají zejména velikost, množství a umístění dutin v pájeném spoji. Menší množství dutin nemá závažný vliv na spolehlivost spoje, ovšem zatím nebyla určena přijatelná úroveň dutin ve spoji. Nejlepší řešení by bylo jejich úplné odstranění. [7]

Faktorů ovlivňující větší výskyt dutin u bezolvnatých pájek je několik [8]:

- vyšší povrchové napětí,
- snížená rychlost smáčení,
- vyšší teploty tavení,
- koncentrace rozpouštědel v tavidlech.

Velikost dutin je jedním z faktorů, který nejvíce ovlivňuje pájený spoj. Méně větších dutin je horší než více menších, jelikož snižují odolnost pájeného spoje. Je to tím, že jak se zmenšuje tloušťka mezi dutinou a povrchem pájky, zvyšuje se možnost výskytu poruchy. Průřez spoje se zmenšuje stupňující se velikostí dutin, tím se zvyšuje odpor, a také se zmenšuje schopnost odvádět nežádoucí teplo. Dopad dutin se stává závažnější, pokud jsou voidy na povrchu pájky, jelikož může dojít k šíření trhlin. *Yunus* [9] došel k závěru, že u pájených spojů s dutinami většími než 50 % plochy spoje, a které jsou mechanicky namáhány, se životnost spoje snižuje o 25-50 %. [9, 10]

V současnosti existují normy IPC-A-610 a IPC-7095, které voidy považují za procesní anomálie, procesní indikátor nebo defekt pájení. IPC-A-610 se zabývá kritérii přijatelnosti pro vizuální kontrolu kvality elektronických sestav. Nejnovější revize tohoto standardu je IPC-A-610F, která povoluje, aby dutiny zabíraly maximálně 30 % plochy BGA kuličky zkoumané rentgenem. Výjimkou v této normě jsou uvedeny planární mikro dutiny a dutiny v mikropropojích, které nemusí splňovat toto kritérium. V takovém případě musí být přijatelné množství dutin dáno domluvou mezi výrobcem a zákazníkem. Nejnovější revizí IPC-7095 je revize C, která byla vydána v roce 2013. Tato norma poskytuje užitečné a praktické informace pro toho, kdo používá BGA pouzdra, nebo se rozhoduje zavést montáž

těchto komponentů. Tato norma mimo jiné udává povolenou velikost voidů v BGA kuličkách. Povolená velikost voidů se liší dle velikosti kuličky pájky a umístění dutin. Nejžádanější je třída III, jelikož má nejprísnejší kritéria přijatelnosti. Do celkové plochy voidů se nezapočítávají voidy o velikosti menší než 2 % celkové plochy kuličky. [11]

Třídění dutin pro kuličky o průměru 1-1,5 mm je znázorněno v Tab. 1.IV. Pokud se jedná o kuličky s jiným průměrem, liší se povolená maximální velikost voidů.

Tab. 1.IV: Třídění dutin dle normy IPC-7095C pro kuličky o průměru 1-1,5 mm (zdroj: [12]).

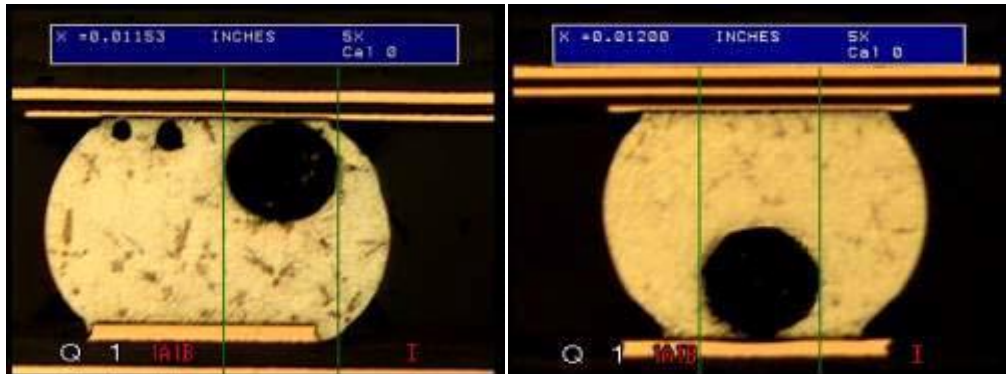
Umístění dutiny	Třída I	Třída II	Třída III
Voidy v pájce před zapájením	Až 90 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 20 % plochy kuličky.		
Voidy na rozhraní pouzdra před zapájením	Až 80 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 15 % celkové plochy.	Až 70 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 10 % celkové plochy.	Až 50 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 5 % celkové plochy.
Voidy ve spoji po přetavení	Až 100 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 25 % plochy kuličky.		
Voidy na rozhraní pouzdra po přetavení	Až 100 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 25 % celkové plochy.	Až 80 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 20 % celkové plochy.	Až 60 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 15 % celkové plochy.
Voidy na rozhraní substrátu po přetavení	Až 100 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 25 % celkové plochy.	Až 80 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 20 % celkové plochy.	Až 60 % kuliček smí obsahovat voidy, maximální velikost voidů je 15 % celkové plochy.

Dle příčin vzniku lze dutiny rozdělit na několik typů. Dutiny, které vznikají během procesu pájení, se nazývají makro dutiny. Další typy dutin jsou způsobeny hlavně návrhem výrobku (materiály, povrchové úpravy, atd.). Tyto dutiny se rozdělují na planární mikro dutiny, intermetalické dutiny, špendlíkové dutiny a dutiny vzniklé smrštěním. Podrobněji jsou tyto dutiny popsány v samostatných podkapitolách 1.2.1 až 1.2.6.

1.2.1 Makro dutiny

Makro dutiny, neboli také dutiny z procesu, vznikají uvolňováním těkavých složek tavidel a pájecích past, které nemají dostatek času k uniknutí před zatuhnutím pájky. Velikost

těchto dutin je v rozmezí 100 až 300 μm v jejich průměru. Dutiny se nevyskytují pouze na rozhraní pájky a substrátu, ale mohou se vyskytovat kdekoliv v pájeném spoji. Na *Obr. 1.1* je výbrus BGA spoje s makro dutinou. [13]



Obr. 1.1: Makro dutiny v pájených spojích (převzato z: [13]).

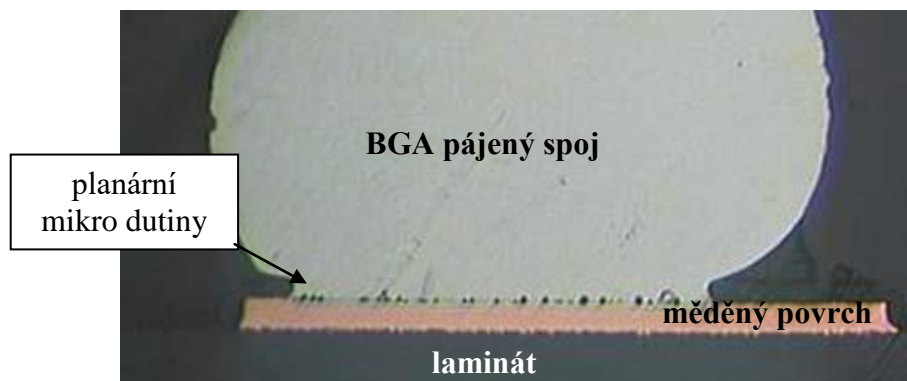
Faktory ovlivňující vznik makro dutin [13]:

- **pájecí pasta**
 - rozpouštědlo – množství; teplota varu; těkavost,
 - natisknuté množství,
 - vlastnosti práškové pájky,
 - tavidlo – aktivita, množství,
- **pájecí profil**
 - vrchol teplotního profilu,
 - čas nad teplotou liquidu (tavení),
 - doba aktivace tavidla,
 - strmost profilu,
 - užití ochranné atmosféry,
- **DPS a součástky**
 - povrchová úprava,
 - velikost a design (např. pájecí maska, pokovení, materiál substrátu),
 - obsah oxidů na pájeném povrchu,
 - znečištění,
- **všeobecné faktory**
 - teplota a vlhkost okolí,
 - znečištění během montáže desky.

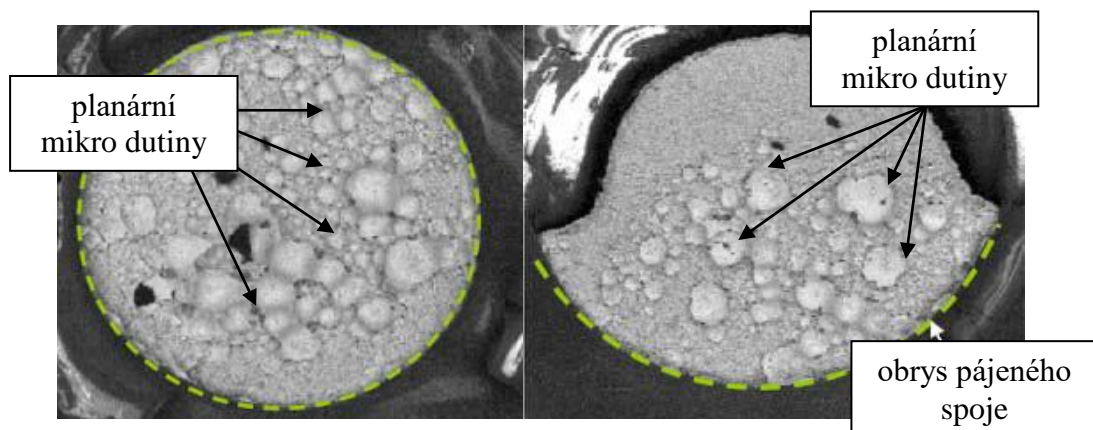
Je nezbytná kontrola těchto faktorů ke snižování výskytu makro dutin. Studie Coyla [14] došla k závěru, že hlavním faktorem ovlivňujícím spolehlivost spoje ovšem není velikost dutin a jejich počet, ale umístění těchto dutin. [13, 14]

1.2.2 Planární mikro dutiny

Planární mikro dutiny, neboli také „Champagne voids“, se vyskytují v jedné rovině na rozhraní intermetalických vrstev a pájky. Velikost těchto dutin je v porovnání s procesními dutinami menší a v jejich průměru jsou menší než 1 μm . Vznikají při využití různých povrchových úprav, typické jsou pro povrchovou úpravu ImAg, ovšem v praxi jsou pozorovány i při využití povrchových úprav OSP a ENIG. Na Obr. 1.2 je řez BGA spoje se znázorněnými planárními mikro dutinami. Na Obr. 1.3 jsou vidět planární mikro dutiny po oddělení pájeného spoje od substrátu. Často jsou planární mikro dutiny zaměňovány s jiným typem mikro dutin, které se nazývají intermetalické (Kirkendallové) dutiny. [13]



Obr. 1.2: Výskyt planárních mikro dutin (převzato z: [13]).



Obr. 1.3: Oddělené pájené spoje od substrátu (převzato z: [13]).

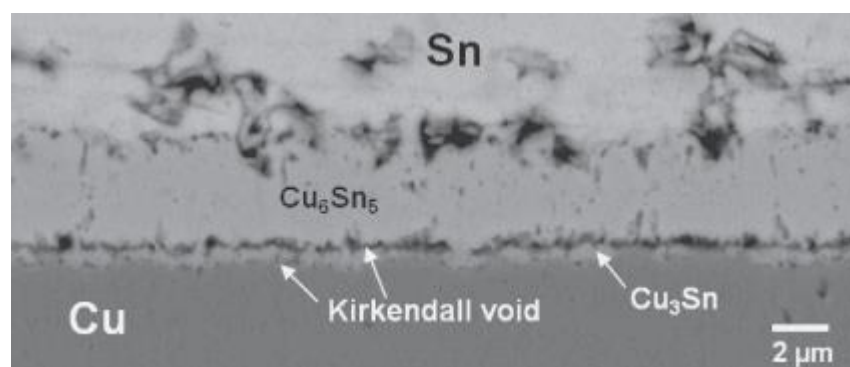
Na rozdíl od procesních dutin, planární mikro dutiny snižují pevnost spoje urychlováním šíření trhlin při tepelném nebo mechanickém namáhání. Spolehlivost spoje je také ovlivněna prací s pokročilejší Fine – pitch technologií (např. BGA), kde je šance šíření trhlin větší. [15]

Dle článku *A study of planar microvoiding in Pb-free solder joints* [15] vznikají planární mikro dutiny stejně jako procesní dutiny. Uvádí, že tavidlové zbytky nemají dostatek času k uniknutí před zatuhnutím pájky.

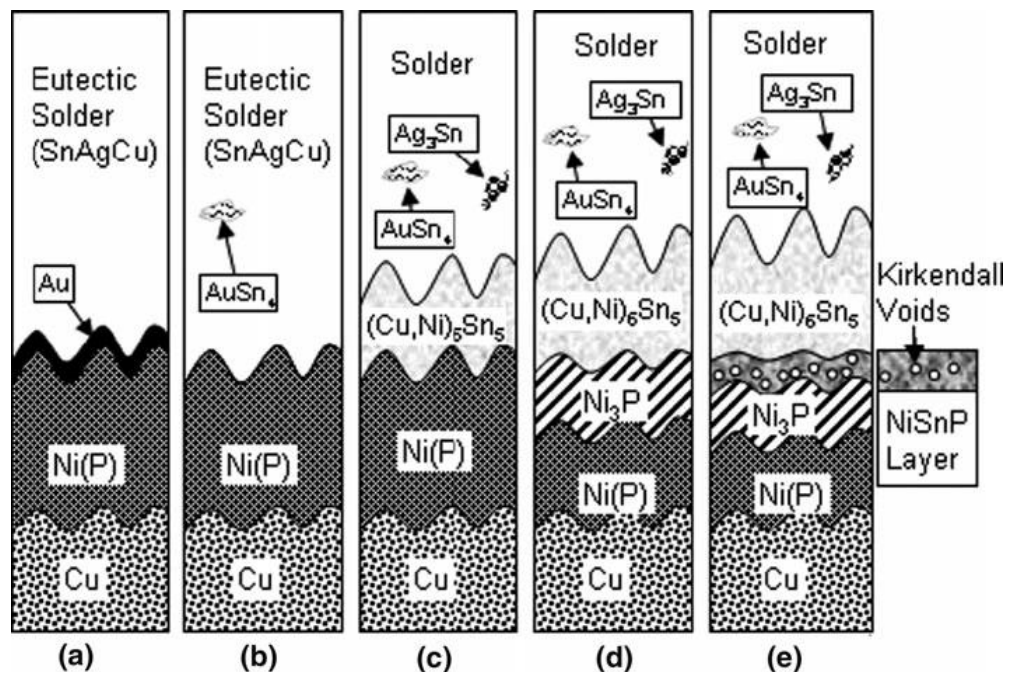
1.2.3 Intermetalické dutiny

Intermetalické dutiny, neboli také Kirkendallové dutiny, se vyskytují v intermetalických sloučeninách, vznikajících mezi pájkou a měděnou ploškou. V současnosti se má za to, že vznikají při dlouhodobějším teplotním namáhání rozhraní dvou kovů, kdy teplota přesahuje 100 °C. Je to dáno rozdílnou rychlostí difúze dvou kovů, které jsou ve styku. Tyto dutiny nejsou zjistitelné pomocí rentgenu. Výskyt tohoto typu dutin je zobrazen na *Obr. 1.4*. Vznik intermetalických dutin je schematicky znázorněn na *Obr. 1.5*. [13]

Jedním z případů, kde se tento jev vyskytuje, je mezi kovy Cu a Sn. Během interdifúze mědi a cínu vzniká intermetalická sloučenina Cu_6Sn_5 (poblíž cínu) a intermetalická sloučenina Cu_3Sn (poblíž mědi). Měď z povrchu pájecí plošky difunduje do cínu mnohem rychleji než naopak a tím v mědi vznikají díry. Tyto díry se nezaplní atomy cínu, spojují se a tím vznikají Kirkendallové dutiny. [13]



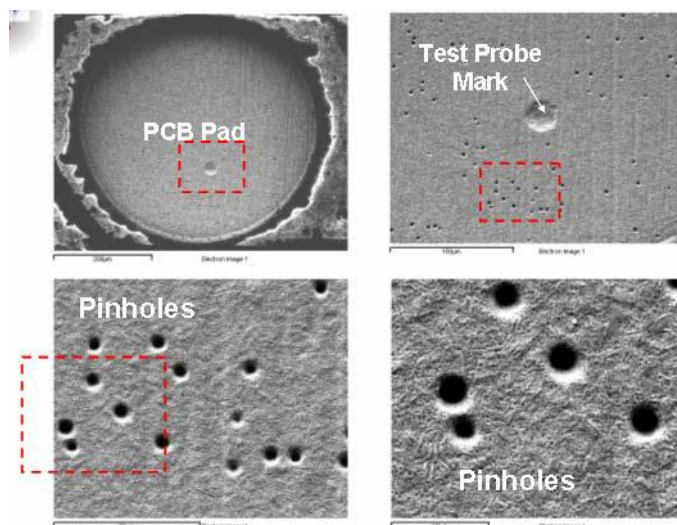
Obr. 1.4: Výskyt Kirkendallových dutin (převzato z: [16]).



Obr. 1.5: Schématické znázornění vzniku Kirkendallových dutin při využití SnAgCu pájky a povrchové úpravy ENIG nanesené na měděnou plošku (převzato z: [17]).

1.2.4 Špendlíkové dutiny

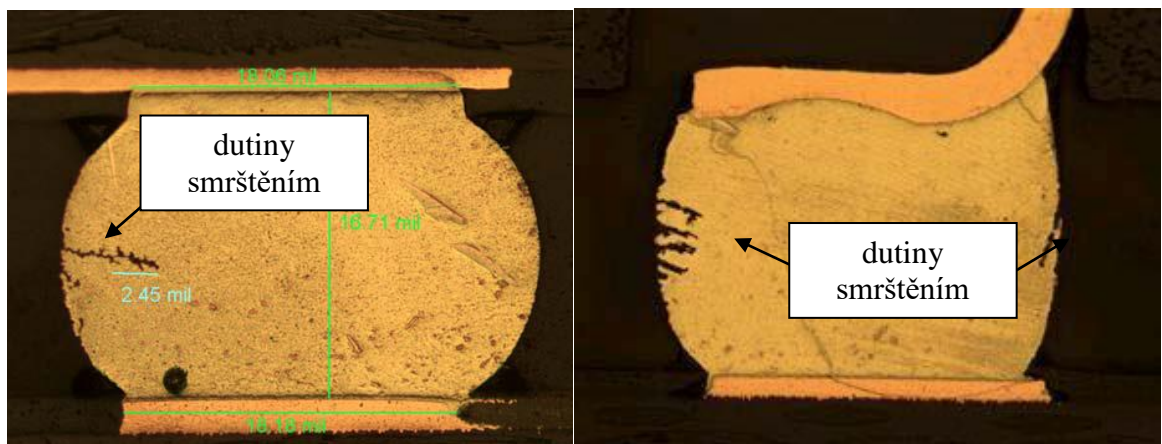
Špendlíkové (Pinhole) dutiny se nachází v měděné plošce DPS. Vznikají během pájení přetavením, únikem plynů z pokovení pájecích ploch. Příčina je v galvanické mědi, kde během pokovení dojde k zadržení chemikálií. Pohled na měděnou plošku DPS a přiblížení na špendlíkové dutiny je na Obr. 1.6. [18]



Obr. 1.6: Pinhole dutiny na DPS (převzato z: [13]).

1.2.5 Dutiny vzniklé smrštěním

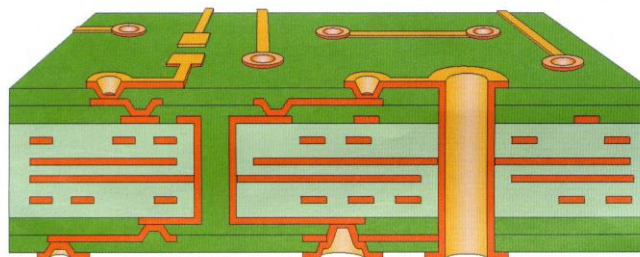
Dutiny způsobené objemovým smrštěním pájecí slitiny při změně z kapalného do pevného skupenství. Ojedinele se vyskytovaly u pájecích slitin SnPb a nejčastěji jsou pozorovány u pájecích slitin SAC. Vznikají na povrchu pájky, kde tuhnutí probíhá nakonec. Tyto dutiny nemají žádný vliv na spolehlivost pájeného spoje a množství těchto dutin se nezvětšuje při teplotním ani mechanickém namáhání. Nazývají se také „Shrinkhole voids“, „Sink holes“ nebo „Hot tears“ a jsou vidět na *Obr. 1.7*. [13, 19]



Obr. 1.7: Výskyt Shrinkhole dutin (převzato z: [13]).

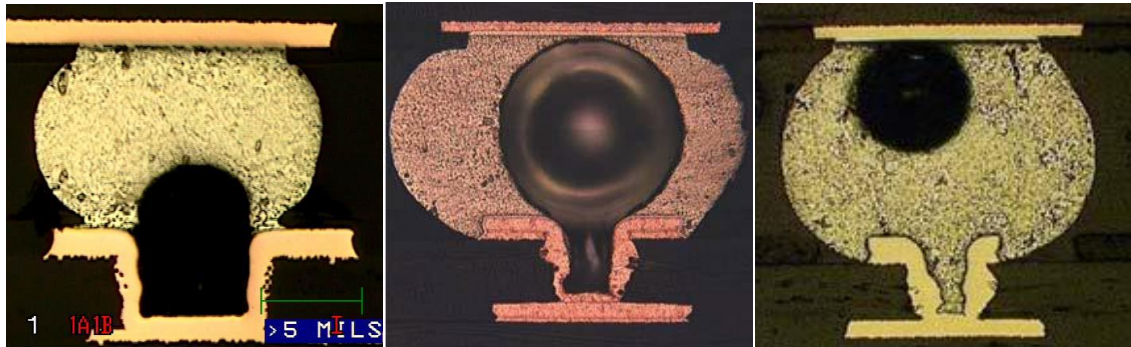
1.2.6 Dutiny v mikropropojích

Tyto dutiny se v odborných člancích nazývají Microvia voids. Název těchto dutin je odvozen od výrazu microvia, což je typ vícevrstvého plošného spoje ukázaného na *Obr. 1.8*. Tento typ plošných spojů využívá skryté, slepé a průběžné otvory menší než 150 μm k propojení jednotlivých vodivých vrstev. Otvory bývají pokovené, nebo se využívá vodivá pasta, která je do nich během výroby vetřena. Tyto cesty se využívají pro zmenšení rozměrů desky, snížení hmotnosti a snížení počtu vrstev desky. [20, 21]



Obr. 1.8: Microvia (převzato z: [21]).

Jde o to, že tyto dutiny se vyskytují právě v těchto otvorech. Vznikají jako následek unikajících plynů z otevřených nebo překrytých microvia otvorů během pájení přetavením. Dutiny nacházející se v oblastech s větším stresovým namáháním mohou výrazně ovlivnit spolehlivost pájeného spoje. Dutiny nebývají zahrnuty do 30 % specifikace dle IPC-A-610F. Na Obr. 1.9 jsou vícevrstvé plošné spoje s dutinami v mikropropojích. [18]



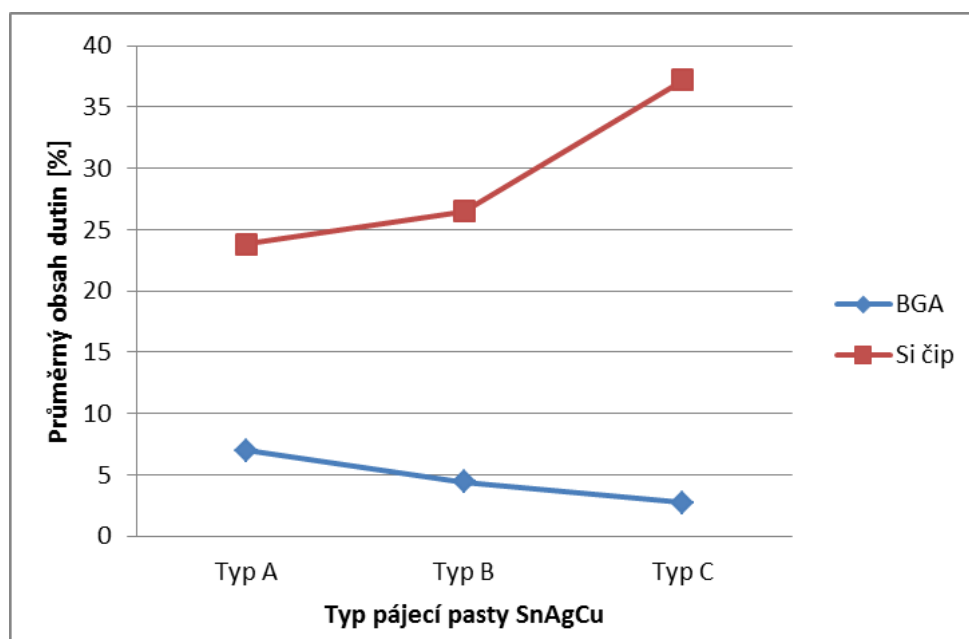
Obr. 1.9: Výskyt microvia voidů (převzato z: [13, 22]).

1.3 Vlivy ovlivňující výskyt voidů

Vlivů, které ovlivňují výskyt dutin v pájených spojích, je velké množství. Nutno říci, že není vždy nejlepší dosahovat extrémních hodnot (např. maximální teploty u pájecího profilu) a je nutné dodržovat mezní parametry ať už pájecí pasty, součástky nebo dalších komponent.

1.3.1 Vliv pájecí pasty

Z prezentace *The voiding phenomenon* [23] je převzat Obr. 1.10, na kterém je znázorněn vliv použití různých pájecích past na tvorbu dutin v pájených spojích a dále vliv použitých součástek. Byly použity tři různé SnAgCu slitiny, ovšem s jinými poměry jednotlivých prvků (typ A, B, C).



Obr. 1.10: Vliv použitých pájecích past na tvorbu dutin (převzato z: [23]).

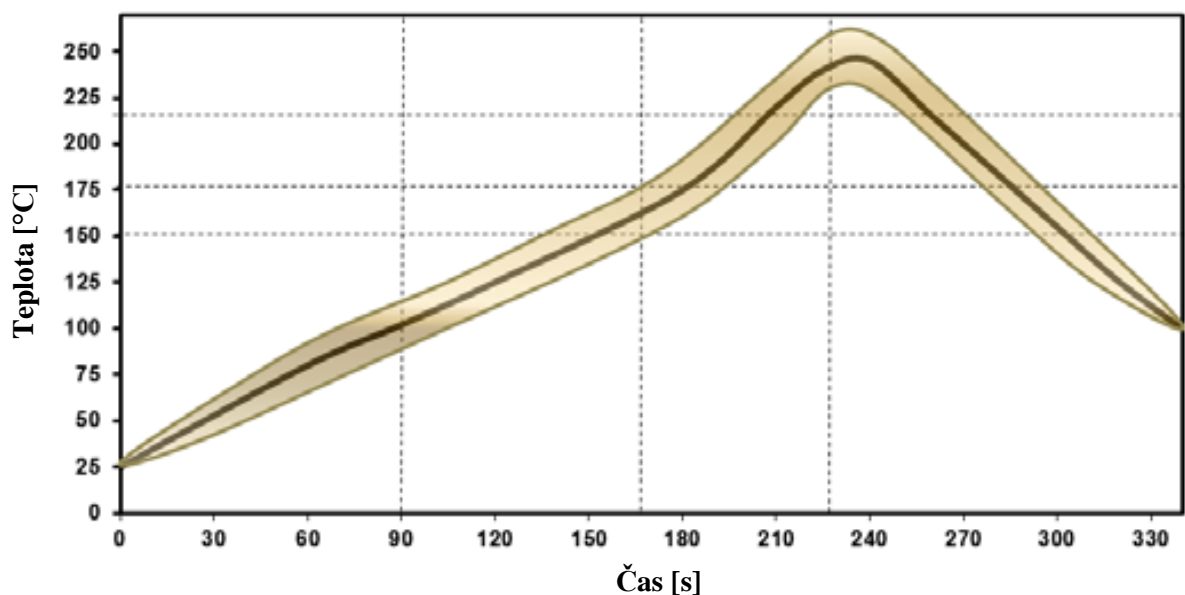
Z Obr. 1.10 je patrné, že se lišila tvorba dutin u BGA součástky a Si čipu (pájecí ploška o rozměrech 11 x 11 mm). Ať už byla použita jakákoliv pájecí pasta, u pájecí plošky se vyskytovalo mnohem větší množství dutin. Také je zřejmé, že se lišil průměrný obsah dutin v součástce v závislosti na použité pájecí pastě, např. u BGA součástky se 176 vývody a použití pájecí pasty SAC typu A se vyskytovalo větší množství dutin než u pájecí pasty SAC typu C. U pájecí plošky tento vliv byl opačný - typ A měl menší vliv na tvorbu dutin než typ C.

1.3.2 Vliv teplotního pájecího profilu

Pomocí vhodného teplotního pájecího profilu se dá dosáhnout menšího výskytu dutin a tím se dá dosáhnout lepší jakosti i životnosti pájeného spoje. Při pájení přetavením jsou nejdůležitějšími parametry teplota oblasti teplotního vyrovnání, strmost profilu během přetavení, maximální teplota a čas strávený nad teplotou tavení. Tyto parametry ovlivňují výskyt voidů a tím i spolehlivost spoje. Každá pájecí pasta má v katalogu uveden optimální pájecí profil.

- **RTS profil**

Na Obr. 1.11 je znázorněn lineární RTS (Ramp To Spike) profil, který je charakteristický lineárním nárůstem teploty až do maximální teploty. Tento profil je vhodný pro aplikaci ve většině případů.



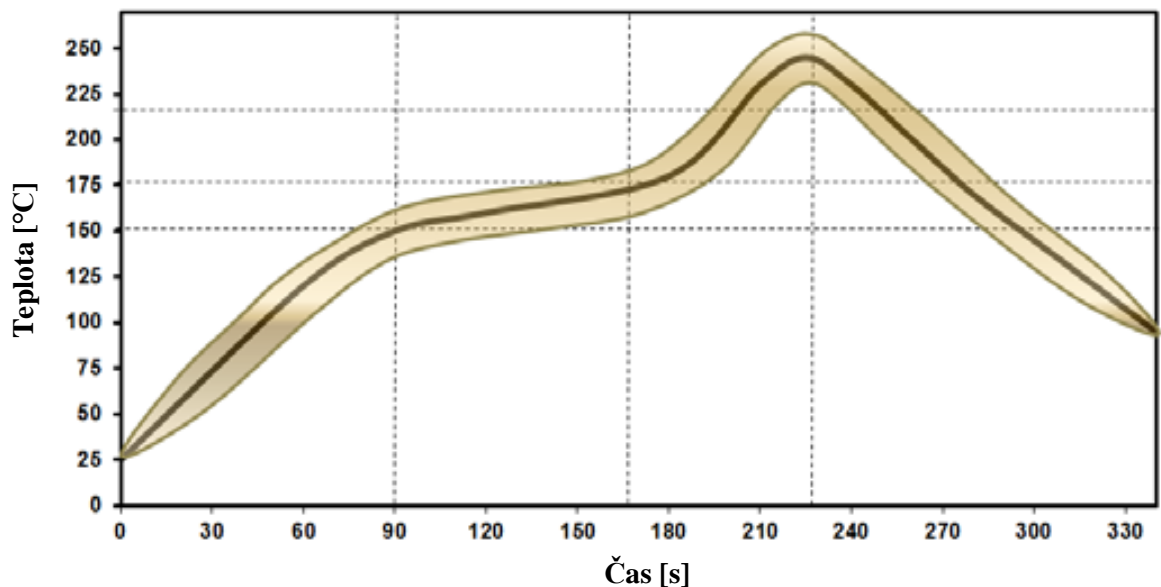
Obr. 1.11: Lineární pájecí profil RTS (převzato z: [24]).

Strmost typického RTS profilu se pohybuje mezi 1,5 – 3 °C/s. Další částí profilu je čas strávený nad teplotou liquidu (TAL). Doporučuje se, aby tento čas trval přibližně 30 - 60 sekund a maximální teplota by měla být mezi 235 – 260 °C. Do konce této fáze by měl RTS profil trvat 3,5 až 4,5 minuty a poté nastává fáze chlazení, v které by teplota měla klesat maximálně o 4 °C za sekundu. V případě optimalizovaného RTS profilu pro snížení dutin můžeme narazit na pár odlišností. Strmost profilu by se měla pohybovat od 1,5 °C/s ovšem

maximálně do 2 °C/s a to také do maximální teploty 235 – 260 °C. Délka optimalizovaného profilu by měla být od 4 do 4,5 minuty. [24]

- **RSS profil**

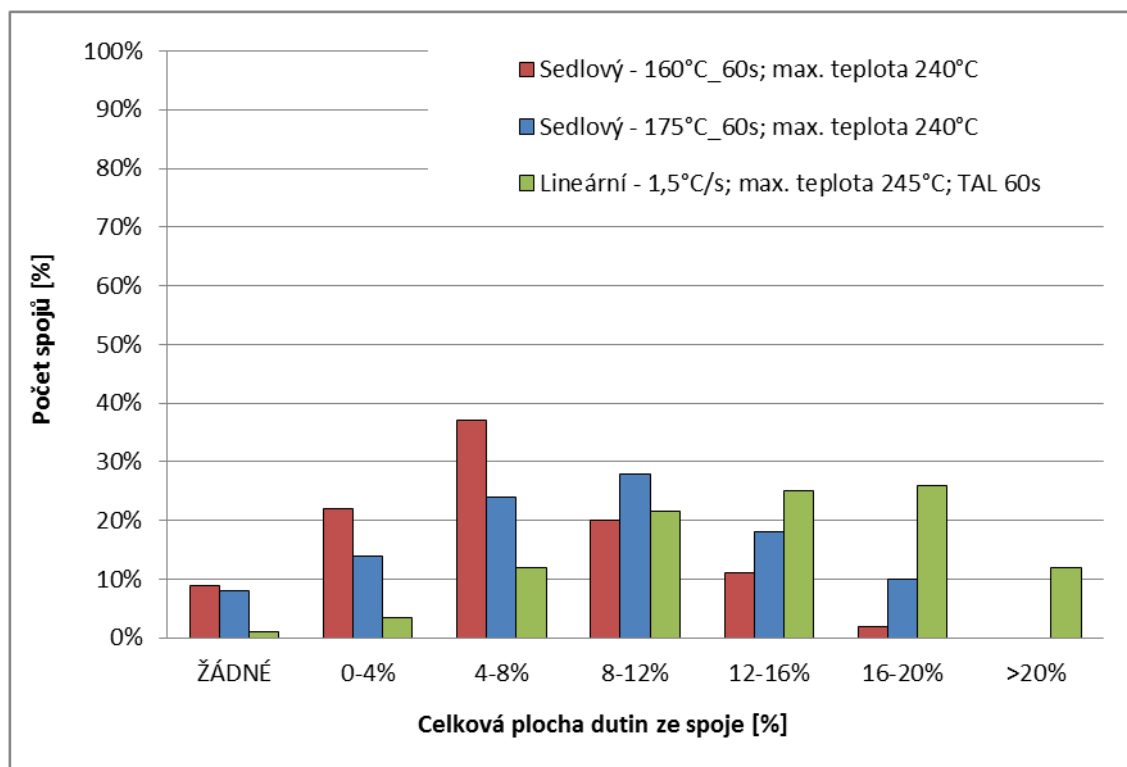
Dalším typem je RSS (Ramp Soak Spike) profil, který se navíc skládá z oblasti teplotního vyrovnání a je znázorněn na *Obr. 1.12*. RSS profil je vhodný pro zařízení, která se vyznačují špatným přenosem tepla.



Obr. 1.12: Sedlový pájecí profil RSS (převzato z: [24]).

U typického RSS profilu by se strmost předehřevu měla pohybovat mezi 2 – 3 °C/s po dobu 60 až 90 sekund. Nadměrná strmost může uvolňovat složky s nízkým bodem varu, což způsobuje rozstříknutí tavidla nebo vytváření kuliček pájky. Nastává oblast teplotního vyrovnání. Teplota této oblasti je mezi 150 – 170 °C a trvat by měla od 45 do 75 sekund. Další fáze se shodují s RTS profilem. Jedná se o stejný čas strávený nad teplotou liquidu (30 – 60 s), stejnou maximální teplotu (235 – 260 °C) a stejně rychlé chlazení (maximálně 4 °C/s). Doba pájecího profilu by měla trvat od 3,5 do 4,5 minuty. U tohoto profilu se ovšem mnohem více liší pájecí profil, pokud chceme dosáhnout výskytu co nejmenšího počtu dutin. Liší se hlavně v oblasti teplotního vyrovnání, kdy se hýbe s její teplotou a dobou trvání. [24]

Obr. 1.13 ze studie *Four ways to reduce voids in BGA / CSP package to substrate connections* [7] znázorňuje, jak se liší výskyt voidů při využití třech různých teplotních pájecích profilů u pouzdra BGA s 256 vývody.



Obr. 1.13: Procentuální výskyt voidů a podíl jejich plochy ve spoji (převzato z: [7]).

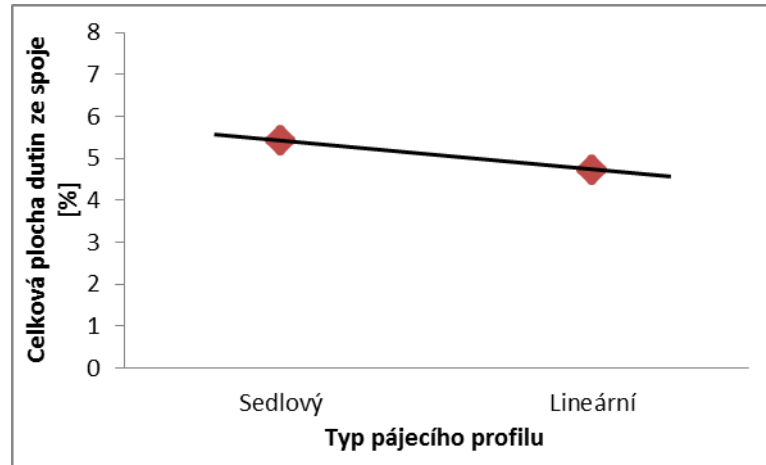
- **Profily RSS s rozdílnou oblastí teplotního vyrovnání**

U prvního zvoleného pájecího profilu RSS byla teplota oblasti teplotního vyrovnání 160 °C, tato zóna trvala 60 s a maximální teplota profilu byla 240 °C. Necelých 40 % z 256 spojů obsahovalo dutiny, které zabíraly pouze 4-8 % plochy spoje a v 9 % spojů se dokonce dutiny nevyskytovaly. Téměř žádné spoje neobsahovaly více než 16 % plochy, kterou by tvořily dutiny. U druhého použitého profilu RSS se lišila pouze teplota oblasti teplotního vyrovnání, která činila 175 °C. U tohoto profilu se dutiny podílely na větší ploše spojů oproti tomu předešlému. Dutiny mnohdy zabíraly více než 8 % plochy spoje. Po porovnání těchto dvou profilů se dá říci, že co se týče dutin, na tom byl o něco lépe profil s menší teplotou oblasti teplotního vyrovnání.

- **Profily odlišného tvaru (RTS a RSS)**

Poslední z pájecích profilů byl typu RTS, kdy teplota lineárně narůstala 1,5 °C/s, maximální teplota dosahovala 245 °C a čas strávený nad liquidem byl 60 s. Tento profil neměl téměř žádné spoje bez dutin. Ve srovnání se sedlovým profilem je na tom určitě hůře právě RTS, jelikož dutiny ve spojích tvořily větší podíl plochy. Ovšem lišila se zde maximální teplota, která mohla výsledky ovlivnit.

Tímto problémem se také zabývala studie [25], ve které ovšem byly použity stejné maximální teploty. U sedlového profilu byla teplota oblasti teplotního vyrovnání 180°C. Výsledek této studie je na *Obr. 1.14*.



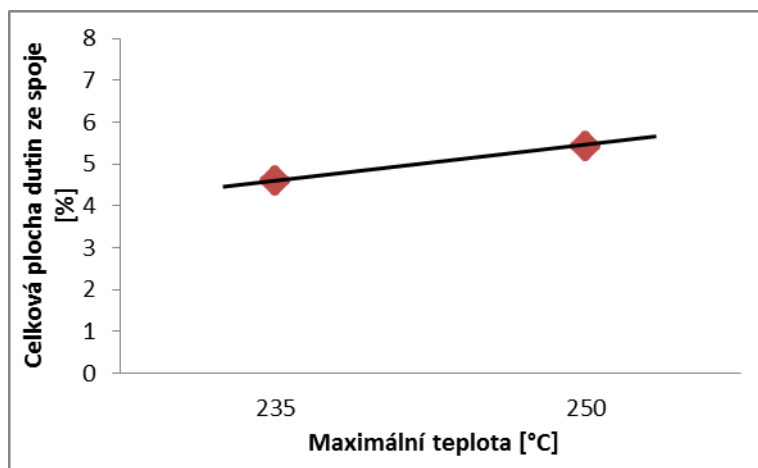
Obr. 1.14: Vliv tvaru pájecích profilů (převzato z: [25]).

Zde se výsledek liší oproti předchozí studii. Výsledky mohly být ovlivněny volbou této teploty, ale také samozřejmě použitými materiály. Zatímco u předešlé studie na tom výrazně lépe byl sedlový profil, zde dutiny zabíraly menší plochu ze spoje u lineárního profilu (RTS).

- ***Rozdílné maximální teploty, rozdílné časy nad teplotou liquidu (TAL)***

Dle závěru studie *Voiding of Lead-Free Soldering at Microvia* [25], vyšší maximální teplota pájecího profilu způsobuje větší množství voidů ve spoji, což je znázorněno na *Obr. 1.15*. Je to dáno tím, že při vyšší teplotě se tavidlo vysouší rychleji, zvyšuje se viskozita a uvnitř pájky může být uzavřen plyn. Jinými slovy, maximální teplota neovlivňuje vznik dutin uvolňováním těkavých složek tavidel, které ve spoji mohou být zadrženy v pájce. Článek *Minimizing BTC Voids* [26] došel ke stejnému závěru u BTC komponent. Uvádí, že vyšší maximální teplota a delší TAL způsobuje výskyt většího množství dutin.

Co se týče vlivu času stráveného nad teplotou liquidu (TAL), ten má opačný vliv na tvorbu dutin než maximální teplota. Čím delší je TAL, tím delší je i čas na únik plynů z kapalné pájky před zatuhnutím a je tedy menší šance na zachycení plynu. Ovšem tento vliv není tak zásadní, jako správná volba maximální teploty.



Obr. 1.15: Vliv maximální teploty pájecích profilů (převzato z:[25]).

1.3.3 Vliv povrchových úprav

Povrchové úpravy slouží především jako ochrana mědi před oxidací, k dobrému galvanickému spojení součástek a také k dobré smáčitelnosti pájecích ploch pro součástky i po delším skladování desek plošných spojů. Je mnoho druhů povrchových úprav, ovšem mezi nejpoužívanější se řadí především – HAL, OSP, ENIG, imersní cín.

Popis nejpoužívanějších povrchových úprav DPS [27–29]:

- **HAL** (Hot Air Levelling) – také se používá zkratka HASL a jedná se o nejpoužívanější povrchovou úpravu, která spočívá v ponoření DPS do roztavené cínové pájecí slitiny (olovnaté nebo bezolovnaté) a následné vyrovnaní povrchu horkým proudem vzduchu; mezi výhody patří vynikající pájitelnost, dlouhá doba skladovatelnosti a možnost vícenásobného teplotního cyklu; mezi nevýhody patří velký teplotní šok DPS způsobený větší teplotou pájky a nesplňuje požadavky dokonalé rovinnosti; povrchová úprava HAL je vhodná pro nižší konstrukční třídy návrhu,

- **OSP** (Organic Surface Protectives) – chemická metoda, při které se na odhalený měděný povrch tištěného spoje nanese organické inhibitory oxidace mědi; tato metoda se nejčastěji používá pro jednostranné desky plošných spojů, u kterých je pájitelnost velice dobrá; nevýhodou oproti metodě HAL je, že při vícenásobném teplotním cyklu se výrazně zmenšuje pájitelnost a také se zkracuje doba skladovatelnosti; nicméně, tato povrchová úprava je nejlevnější, a pokud je poškozena, dá se snadno odstranit a nahradit novou,

- **ENIG** (Electro-less Nickel/Immersion Gold) - chemicky nebo galvanicky nanesená vrstva niklu a poté imersně nanesená vrstva zlata na odhalený měděný povrch DPS, kde tenká vrstva zlata poskytuje niklu ochranu před oxidací; tato metoda vznikla jako náhrada HALu kvůli lepší rovinnosti; 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,

- **imersní cín** (Immersion Tin) - na měděný povrch DPS se chemicky nanáší vrstva cínu. DPS je ponořena do lázně chemického cínu a tím vznikne vrstva imersního cínu; jelikož cínová pájka obsahuje převážně cín, tím je dosažena dobrá smáčivost s chemickým cínem; tato metoda povrchové úpravy je technologicky nenáročná, ekologicky vyhovující a poměrně levná; u této úpravy mohou vznikat intermetalické vrstvy nebo tzv. cínové whiskery, což jsou elektricky vodivé krystaly samovolně vyrůstající na povrchu cínu.

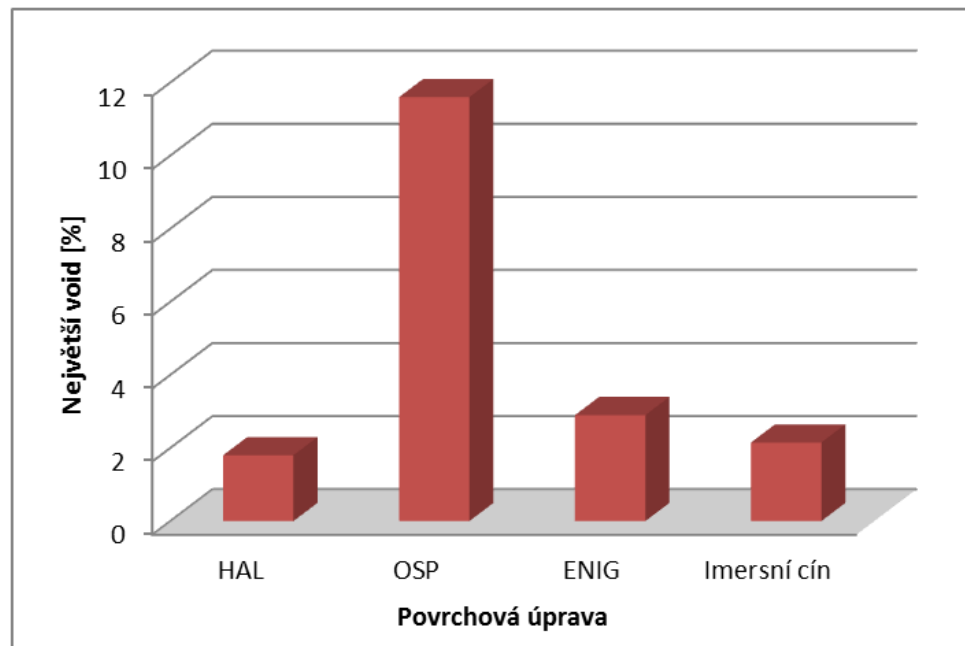
V Tab. 1.V jsou popsány základní parametry povrchových úprav popsaných výše. Z posledního řádku tabulky je patrné, že všechny tyto povrchové úpravy jsou vhodné pro bezolovnaté pájení.

Tab. 1.V: Srovnání povrchových úprav (zdroj: [6]).

Parametr	HAL	OSP	ENIG	ImSn
Vícenásobný teplotní cyklus	ano	probl.	ano	ano
Rovinnost povrchu	ne	ano	ano	ano
Tloušťka vrstvy / μm /	1 - 20	0,5	5	0,1
Fine Pitch aplikace	probl.	ano	ano	ano
Kontaktování	ne	ne	ano	ne
Teplotní stres nad 65°C	ano	ne	ne	ne
Údržba lázně	obtížná	snadná	střední	snadná
Řízení procesu	střední	snadné	obtížné	snadné
Náklady	střední	vysoké	vysoké	nízké
Ekologické aspekty	špatné (pb)	dobré	dobré	dobré
Bezolovnatá pájka SnAgCu	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje

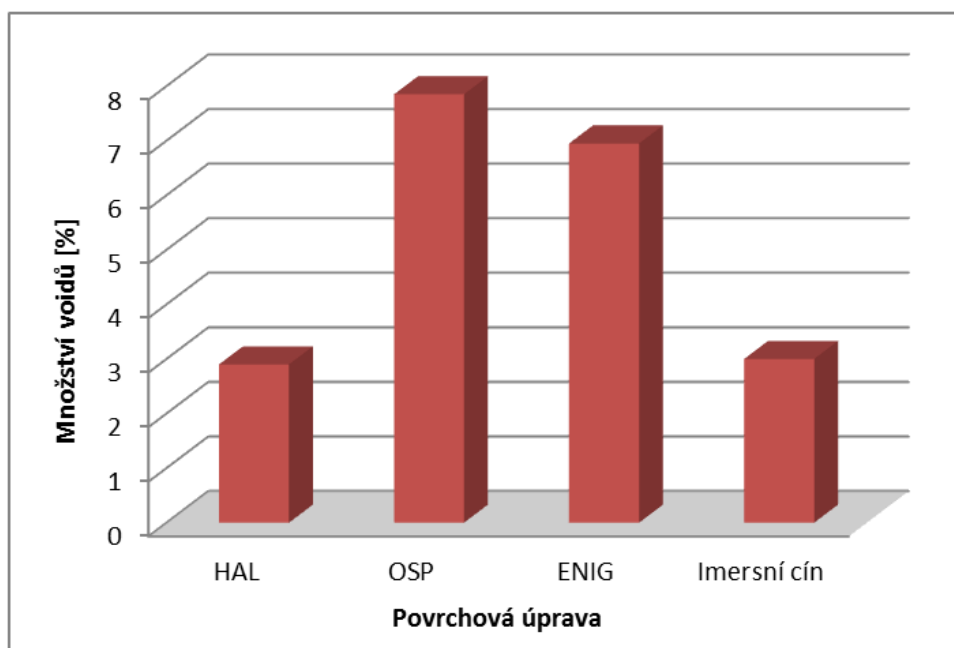
Co se týče výskytu dutin v pájených spojích při využití různých povrchových úprav, touto problematikou se zabývala studie *Does PCB pad finish affect voiding levels in lead-free assemblies?* [29]. V této studii byly pro všechny desky plošných spojů s jinými povrchovými úpravami použity stejné materiály, součástky i podmínky. Všechny desky byly

poté skladovány shodným způsobem. Výsledné měření se provádělo pomocí rentgenové kontroly a následně bylo vyhodnoceno pomocí vhodného softwaru.



Obr. 1.16: Procentuální vyjádření největšího voidu (převzato z: [29]).

Část studie [29] byla zaměřena na maximální velikost voidu při využití různých povrchových úprav (Obr. 1.16). Výsledky ukazují, že dutiny při využití metody OSP mají tendenci být mnohem větší v porovnání s jinými povrchovými úpravami. Při porovnání s následujícími výsledky to naznačuje, že povrchová úprava OSP produkuje nebo zachycuje nejvíce plynů v bezolovnatých pájkách. Tato část studie současně s následující poukazuje na to, že povrchová úprava ENIG má poměrně velké množství dutin, které ovšem mají tendenci být malé. To by mohlo být způsobeno tím, že během přetavení vznikají plyny o jiném složení než u jiných povrchových úprav. Nejlépe na tom z hlediska velikosti voidu byly povrchové úpravy HAL, imersní cín a imersní stříbro.



Obr. 1.17: Procentuální množství voidů (převzato z: [29]).

Další část studie [29] byla zaměřena na největší procentuální výskyt voidů (Obr. 1.17). Největší výskyt dutin byl u metody OSP a ENIG. Je to dáno tím, že tyto metody během odstraňování oxidů z povrchu desky produkují nejvíce plynů, kterými jsou dutiny tvořeny. Na druhou stranu nejlepší výsledky byly u metod HAL a imersní cín. Nutno dodat, že všechny testované povrchové úpravy vyhověly normě IPC-7095 třídy I. (tj. dutiny zabíraly méně než 30 % plochy BGA kuličky).

1.3.4 Vliv šablony pro tisk pájecí pasty a design DPS

Pro nanášení pájecích past se nejčastěji používají metody šablonový tisk, sítotisk a dispenze. U šablonového tisku se používá kovová fólie s motivem, která je upnuta v rámu, a poté se přikládá přímo na substrát. Pájecí pasta se aplikuje do volného prostoru šablony pohybem stěrky, která je nakloněna pod určitým úhlem a přitlačena definovanou silou k šabloně. Po dokončení aplikace pájecí pasty se šablona od substrátu odtrhne. Tloušťka natisknuté pájecí pasty odpovídá tloušťce šablony. [6]

Mezi hlavní faktory kvalitní šablony patří [6, 7]:

- materiál,
- tloušťka,

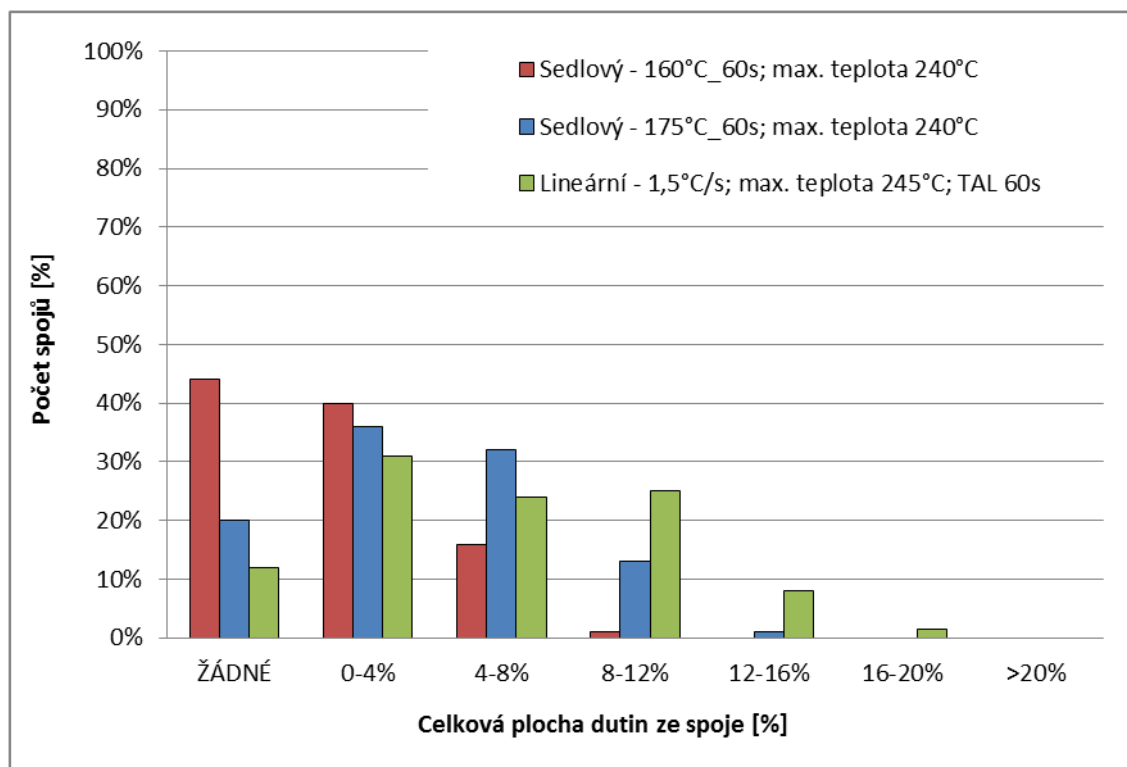
- druh předlohy,
- velikost apertury,
- technologie výroby.

Jedním z klíčových prvků šablony je maximalizovat množství pájecí pasty, které se přenáší přes otvor šablony na DPS. Tento proces se nazývá efektivita přenosu. Důležitý je také správný tvar apertur, který nám zajišťuje, aby po odtržení šablony zůstala pájecí pasta na DPS místo na stěnách apertur. S procesem nazývaným efektivita přenosu jsou spjaty dva pojmy, poměr stran (aspect ratio) a poměr ploch (area ratio). Aspect ratio je poměr mezi šířkou apertury a tloušťkou šablony. Area ratio je poměr plochy podstavy apertury a stěn apertury. Při vyšším area ratio je vyšší i efektivita přenosu a tím na stěnách šablony nezůstávají nechtěné zbytky pájecí pasty. [7]

Redukce naneseného množství pájecí pasty není vnímáno jako drastické opatření ke snížení dutin. Nicméně tavidlo tvoří podstatnou část objemu pájecí pasty, snížení množství natisknuté pájecí pasty o 10 % má veliký vliv na snížení množství tavidla, a tím i na počet dutin v pájených spojích. Taková redukce je možná redukcí velikosti apertur v šabloně, designem DPS nebo tvarem apertur v šabloně pro tisk pájecí pasty. [7]

- **Velikost apertur v šabloně**

Studie *Four ways to reduce voids in BGA / CSP package to substrate connections* [7] se zabývala vlivem velikosti apertur šablony pro tisk pájecí pasty na tvorbu voidů. Na *Obr. 1.13* je znázorněn procentuální výskyt voidů a jejich plocha ze spoje při využití tří rozdílných teplotních profilů. Poté se stejné měření provedlo ještě jednou, ovšem po zmenšení apertur v šabloně pro tisk pájecí pasty o 10 %, což znázorňuje *Obr. 1.18*.



Obr. 1.18: Procentuální výskyt voidů a podíl jejich plochy ve spoji po zmenšení apertur o 10% (převzato z: [7]).

Po porovnání Obr. 1.13 a Obr. 1.18 je patrné, že se ve více pájených spojích nevyskytovaly žádné dutiny a skoro u žádných spojů dutiny neměly více než 12 % podíl plochy z pájeného spoje. Nicméně se zde nacházelo více spojů s plochou dutin 4-8 % velikosti spoje. Z těchto výsledků je zřejmé, že zmenšením apertur se dosáhlo lepších výsledků, než před redukcí.

Specifickou skupinou jsou BTC komponenty (anglicky Bottom Termination Components), do které patří mnoho různých typů komponent (např. pouzdra QFN, DFN). Tyto komponenty mají jednu společnou, avšak nepříjemnou vlastnost (co se týče dutin), a tou jsou velké kontaktní tepelně vodivé plošky, které slouží k dostatečnému odvodu tepla. QFN pouzdro je zobrazeno na Obr. 1.19. [26]

U takovýchto větších pájených ploch dochází k špatnému odpařování tavidel před zatuhnutím pájky a tím jsou tyto plochy náchylnější k výskytu dutin. Proto se využívá metoda, při které se tato plocha rozdělí na několik částí nebo se upraví tvar apertur šablony tak, aby pájecí pasta byla natištěna do několika malých kvadrantů.



Obr. 1.19: QFN pouzdro (převzato z: [26]).

- **Design DPS**

Právě u BTC komponent se dá výskyt voidů omezit designem DPS, neboli rozdělením velkých plošek nepájivou maskou, která plošku rozdělí na několik menších částí, a tím se zabráňuje spojování menších dutin do jednoho velkého. Nepájivé masky mají v tomto případě ještě jednu vlastnost, a to takovou, že umožňují volný průchod vypařujícími se zbytkům tavidla. Pokud mají tyto plošky vodivé otvory skrz laminát, tzv. thermal vias, dá se omezit výskyt voidů tím, že přes tyto otvory nebude aplikována pájecí pasta nebo nepájivá maska. Mohou totiž sloužit jako úniková cesta k odpařování zbytků tavidla. [26]

- **Tvar apertur v šabloně**

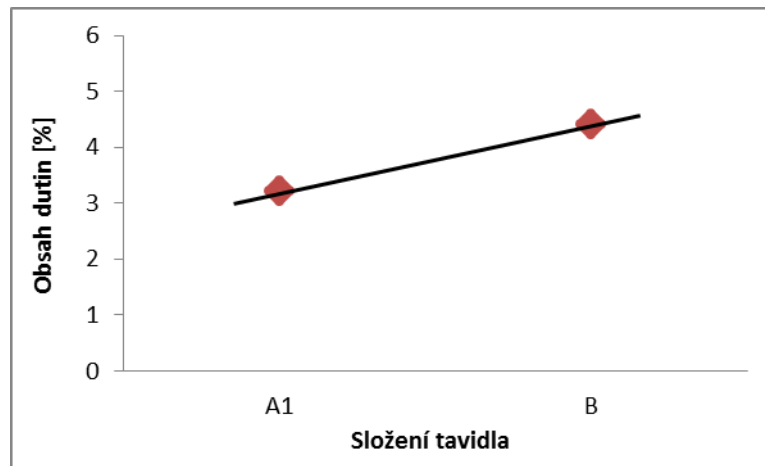
Další možností omezení výskytu dutin je tvar apertur v šabloně. Princip je stejný jako u rozdělení plošek nepájivou maskou. Spočívá to v rozdělení jednoho otvoru šablony do více částí. *Seelig s O'Neillem* [26] došli k závěru, že množství a velikost voidů nejsou závislé na procentu pokrytí pájecí plošky jako spíše na tvarech otvorů. Z toho vyplývá, že návrhy které nechávají volnější cesty pro odpařování tavidla, jsou lepší než ty, u kterých se tavidlo hůře odpařuje.

1.3.5 Vliv tavidla

K dosažení opravdu spolehlivých pájených spojů je zapotřebí, aby pájené povrchy byly co nejčistší, a právě k tomu nám slouží tavidla. Tavidla odstraňují oxidy a další nečistoty ze spojovaných povrchů. Také zlepšují přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu, čímž zlepšují smáčení materiálů pájkou a napomáhají roztékavosti pájky. Ovšem nepříznivý vliv mají zbytky tavidla, které zůstávají korozivně aktivní a elektricky vodivé. [2, 30]

- **Odlišné složení tavidla**

Vliv tavidla na tvorbu dutin je těžké určit, protože záleží na více faktorech dohromady (např. aktivita tavidla, bod varu rozpouštědla, rozpustnost, viskozita). Různé složení tavidla bylo zkoumáno ve studii [25], ovšem bez bližšího prozkoumání účinků dalších faktorů.



Obr. 1.20: Vliv rozdílného složení tavidla (převzato z: [25]).

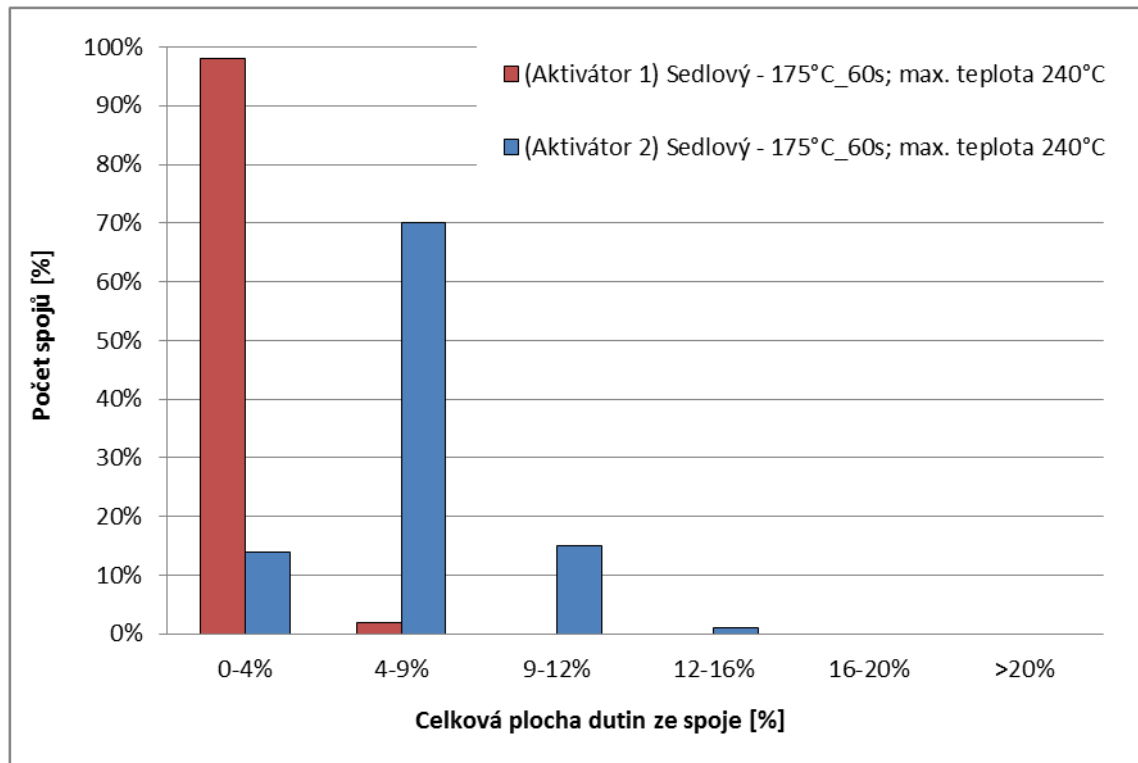
Výsledkem bylo rozdílná tvorba dutin. Avšak důkladnější poznání této problematiky by vyžadovalo rozsáhlejší studii.

- **Odlišné typy aktivátorů**

V tavidlech jsou obsaženy různé složky, které napomáhají tavidlům začít plnit svou funkci. Tyto složky se nazývají aktivátory. Mezi aktivace tavidla patří např. [2]:

- halogeny,
- nehalogenové aktivátory,
- chlorid amonný,
- kyselina fosforečná nebo jiné kyseliny,
- aminy nebo amoniak.

Účinkem aktivátorů na výskyt dutin (Obr. 1.21) se zabývali pánové *Previti, Holtzer a Hunsinger* ve studii *Four ways to reduce voids in BGA / CSP package to substrate connections* [7].

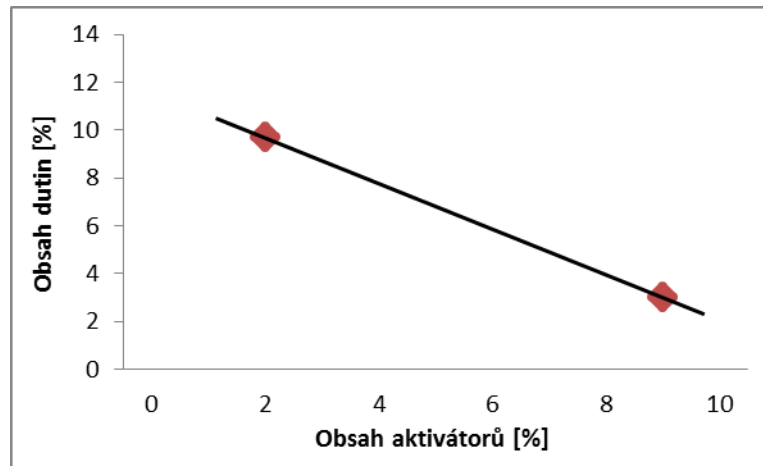


Obr. 1.21: Vliv různých aktivátorů na tvorbu voidů a podíl jejich plochy ve spoji (převzato z: [7]).

Ve výše uvedené studii [7] byly použity dva typy aktivátorů tavidla. K tomuto experimentu byl použit shodný pájecí profil. Jednalo se o sedlový profil RSS, jehož oblast teplotního vyrovnání měla teplotu 175 °C a trvala 60 sekund. Maximální teplota profilu byla 240 °C. Při použití 1. aktivátoru celkový podíl plochy dutin ve spojích byl menší, než tomu bylo u 2. aktivátoru.

- ***Odlišný obsah aktivátorů***

Také studie [25] se zabývala vlivem aktivátorů. Došla k závěru, že tavidlo s větším obsahem aktivátorů dokáže vyčistit oxidy v pájce rychleji a tím je menší šance na jejich zachycení ve spoji. Je tedy očividné, že se musí brát zřetel na výběr aktivátorů, pokud se chce omezit vznik dutin.



Obr. 1.22: Vliv rozdílného obsahu aktivátorů (převzato z: [25]).

1.3.6 Vliv vakua při pájení v parách

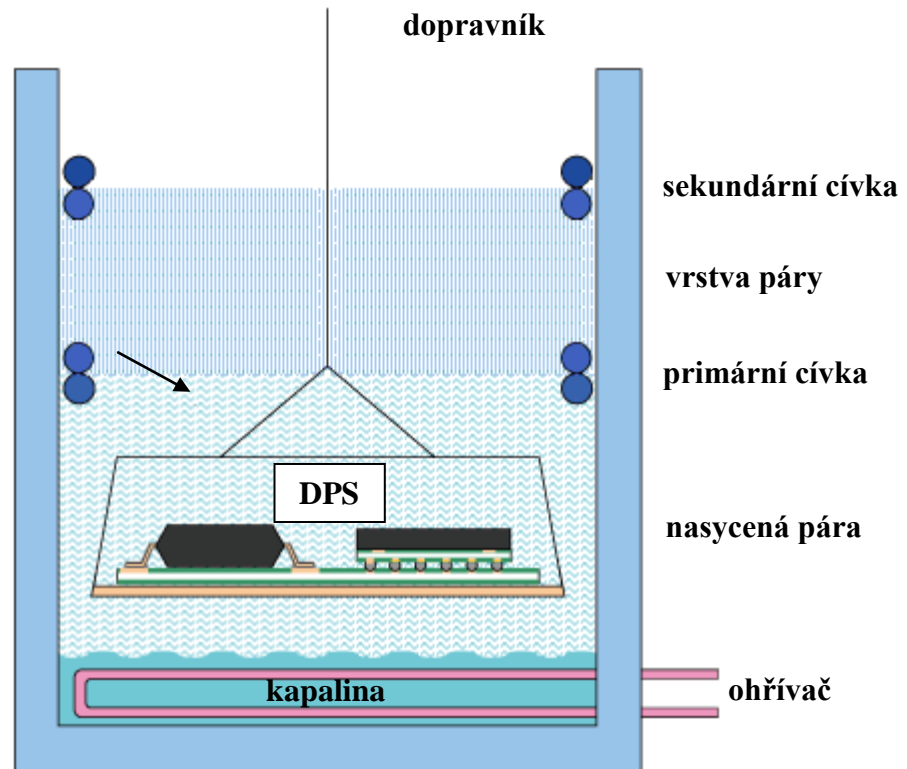
Pájení v parách (anglicky Vapour phase soldering - VPS) bylo vynalezeno počátkem 70. let 20. století firmou Bell Laboratories. Využívá se kondenzace, a proto se tato metoda nazývá také kondenzační pájení. Princip této metody spočívá v zahřívání kapaliny na bod varu a její odpaření. Poté se do zóny odpařování vloží deska plošných spojů a na jejích chladných místech pára kondenzuje, tzn., mění se z plynné do kapalné fáze. Kondenzace za vyšších teplot než je teplota tavení pájecí pasty způsobuje, že latentní teplo (energie, kterou je nutno dodat pro změnu fáze látky) páry zahřívá desku a součástky na teplotu pájení, a tím se vytváří pájený spoj. K tomuto pájení se jako kapaliny využívají fluórouhlíky s bodem varu 215 °C až 250 °C. U této metody pájení se dá využít vakua, kdy se pájka v kapalném skupenství podrobí právě vakuu, a tím dojde ke snadnějšímu úniku plynů, jež jsou v ní obsaženy. Právě pomocí vakua se dá omezit výskyt dutin v pájeném spoji. [2, 10, 20]

Mezi výhody této metody pájení patří zejména [10, 31, 32]:

- rovnoměrné zahřívání desky plošných spojů bez ohledu na její tvar,
- maximální teplota je dána bodem varu kapaliny – nemůže dojít k překročení maximální teploty,
- konstantní teplota v celém prostoru a vysoká účinnost přenosu tepla,
- nasycená pára neobsahuje kyslík – nedochází k oxidaci pájených povrchů,
- rychlý ohřev,
- vysoká kvalita pájených spojů.

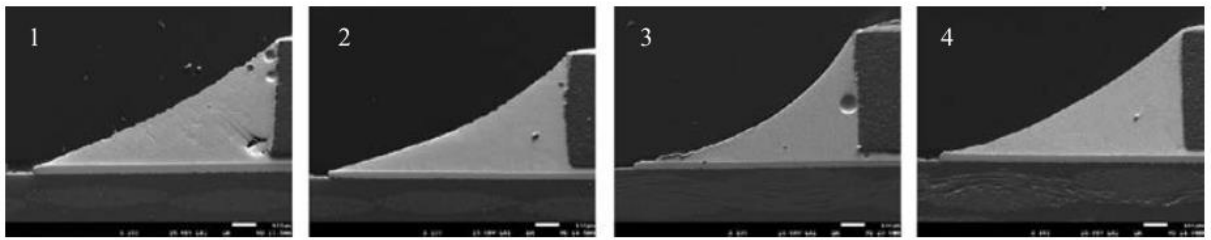
Nevýhod je značně méně [32]:

- pájení pouze při určitých teplotách.
- ne všechny materiály vydrží podmínky pájení (kombinaci času a teploty pájení),
- vyšší cena kapaliny.

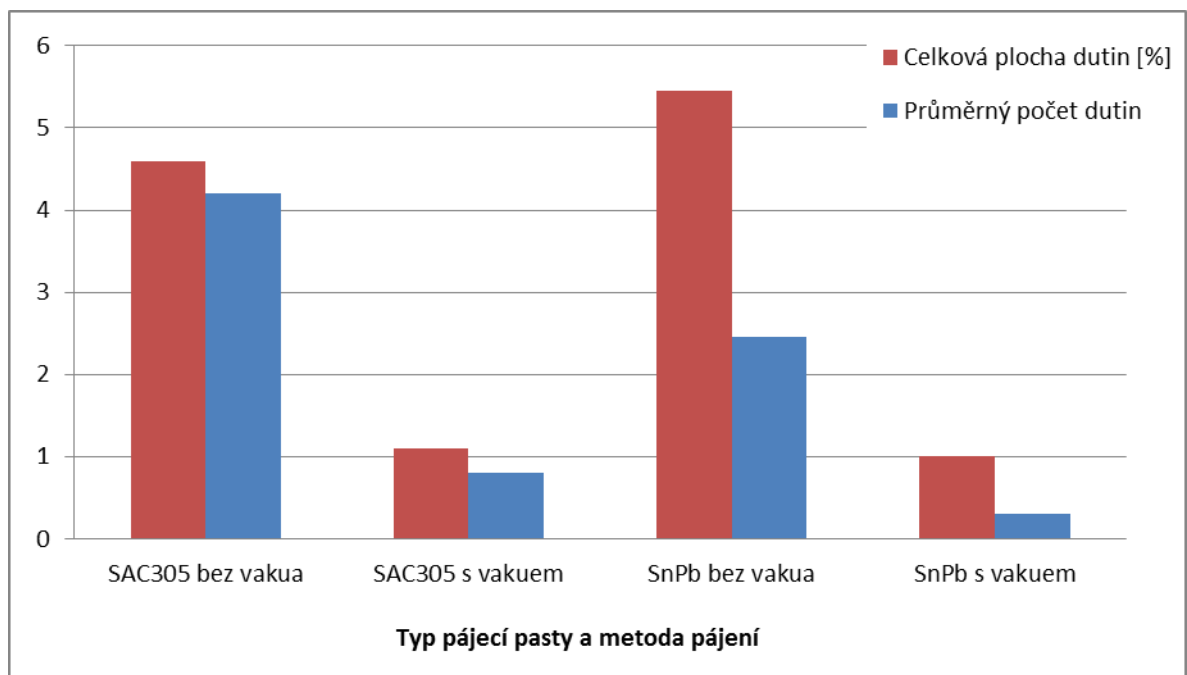


Obr. 1.23: Princip pájení v parách (převzato z: [31]).

Studie *Voids investigation in solder joints performed with vapour phase soldering (VPS)* [10] se zabývala problematikou využití vakua. Na Obr. 1.24 jsou příčné řezy vzorků pájecích slitin (SnAgCu a SnPb) s využitím pájení v parách s vakuem a bez vakua. Využily se nejpoužívanější pájecí pasty Sn63/Pb37 (olovnatá) a $\text{Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5}$ (bezolovnatá). Je vidět, že se po použití vakua voidy ve spojích téměř nevyskytovaly. Na Obr. 1.25 je znázorněna celková plocha dutin a jejich počet před a po použití vakua při pájení.



Obr. 1.24: 1 – SAC305 bez vakua; 2 – SnPb bez vakua; 3 – SAC305 s vakuem; 4 – SnPb s vakuem (převzato z: [10]).



Obr. 1.25: Vliv typu pájecí pasty a metody pájení v parách (převzato z: [10]).

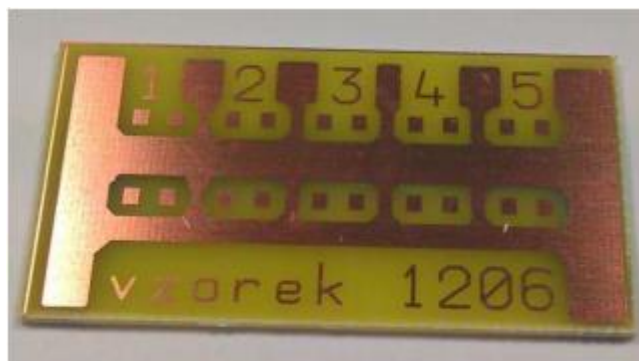
Po porovnání je zřejmé, že pokud se využila metoda s vakuem, dutiny zabíraly mnohem méně plochy pájeného spoje a ve spoji se vyskytoval i menší počet dutin. Nejlépe na tom byla kombinace pájecí slitiny SnPb právě s využitím vakua. Ovšem i u SAC pájecí slitiny vakuum omezilo vznik dutin.

2 Experimentální část

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, výskyt dutin v pájených spojích se dá omezit několika faktory, čímž se dá dosáhnout větší spolehlivosti pájeného spoje. V současnosti se za nejpoužívanější metodu pájení považuje pájení přetavením a u této metody se dá výskyt dutin omezit správným nastavením teplotního pájecího profilu. Proto cílem experimentální části bylo zjistit, jaký je vhodný pájecí profil a také jak rozměry apertur šablony ovlivňují dutiny. Experiment byl inspirován studií *Four ways to reduce voids in BGA / CSP package to substrate connections* [7].

2.1 Testovací vzorek

Pro tento experiment byla vybrána vhodná testovací deska, která je vidět na *Obr. 2.1*. Testovací deska byla z materiálu FR4 o tloušťce 1,5 mm a byla plátovaná mědí, jejíž tloušťka byla 17,5 μm . Na tomto vzorku byl vytvořen motiv pro připájení deseti povrchově montovaných součástek s čipovým pouzdrem 1206. Měděné plošky měly doporučené rozměry pro pájení přetavením. Pro SMD pouzdra 1206 tyto rozměry jsou - šířka 1,25 mm a výška 1,75 mm [33]. Měď už dále nebyla nijak povrchově upravována, a jelikož vzorky po zhotovení byly delší dobu skladovány, bylo potřeba, aby se před nanesením pájecí pasty důkladně očistily měděné plošky. Po experiment byly použity celkem tři vzorky.



Obr. 2.1: Testovací vzorek.

2.2 Pájecí pasta

Pro experiment byla využita nejpoužívanější pájecí pasta současnosti SAC305. Pájecí slitina složena z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Byla vybrána kvůli srovnatelné spolehlivosti s olovnatou pájkou SnPb. V tomto případě se jednalo o slitinu od společnosti

Cobar pod označením SAC3-XF3+, která je vhodná pro tisk přes šablonu. Základní parametry pájecí pasty jsou uvedeny v Tab. 2.I. Parametry týkající se teplotního profilu jsou v Tab.2.III.

Tab. 2.I: Základní parametry pájecí pasty Cobar SAC3-XF3+ (převzato z: [34]).

Velikost zrn [μm]	Typ tavidla	Obsah tavidla [%]	Viskozita [Pa.s]	Max. tisková rychlost [mm/s]
25-45	RELO	12	190 \pm 18 %	100

2.3 Šablona

Část experimentu se zabývala různou velikostí apertur v šabloně. V experimentu se porovnávalo rozdílné množství nanesené pájecí pasty na vliv výskytu dutin. Proto se k nanesení pasty na testovací vzorky využily dvě rozdílné šablony o stejné tloušťce 120 μm , přičemž jedna svými rozměry apertur odpovídala 100 % velikosti měděných plošek a druhá šablona měla o 10 % zmenšenou šířku i výšku apertur. Toto zmenšení stran apertur zajišťovalo, aby bylo nanесeno pouze 80 % objemu pájecí pasty. Na dva testovací vzorky bylo nanесeno 100 % objemu pájecí pasty a na jeden vzorek pouze 80 % objemu pájky. Poté všechny testovací vzorky byly ručně osazeny 1206 SMD rezistory o velikosti 1M Ω s pocínovanými kontakty.

Tab. 2.II: Porovnání parametrů použitých šablon.

Parametry	Šablona 1	Šablona 2
Šířka apertur [mm]	1,25	1,125
Výška apertur [mm]	1,75	1,575
Tloušťka apertur [μm]	120	120
Množství pájecí pasty [%]	100	80

2.4 Pájení přetavením

Pro pájení se využila metoda přetavení. K tomuto účelu byla použita přetavovací pec s konvekčním ohřevem Mistral 260. Konvekční ohřev spočívá v zahřívání atmosféry (v tomto případě vzduch) topnými tělesy a k cirkulaci tepla uvnitř pece slouží ventilátory. Vyznačuje se nízkým tepelným namáháním a lepším rovnoměrným zahříváním oproti pájení infračerveným zářením. Pec Mistral 260 je složena ze třech nezávislých teplotních zón (první dvě zóny slouží k předehřevu, třetí k přetavení), chladicí zóny a dopravníkového pásu. Pec disponuje dotykovou obrazovkou, na které se nastavují teploty jednotlivých teplotních zón

a rychlost dopravníkového pásu. Všechny tyto parametry ovlivňují výsledný teplotní profil. [31]

2.4.1 Výroba teplotního čidla

Teplotní čidlo bylo důležitou součástí experimentu, jelikož pec neumožňovala přesné nastavení profilů dle konkrétních parametrů (strmost profilu, maximální teplota, TAL atd.). Aby se dosáhlo právě požadovaných parametrů pájecího profilu, bylo zapotřebí správného nastavení teplot jednotlivých zón a rychlosti dopravníku. K tomu sloužilo teplotní čidlo, které se opakovaně pouštělo pecí a měřilo teplotní profil. Až po dosažení požadovaných parametrů profilů se nechaly přetavit testovací vzorky.

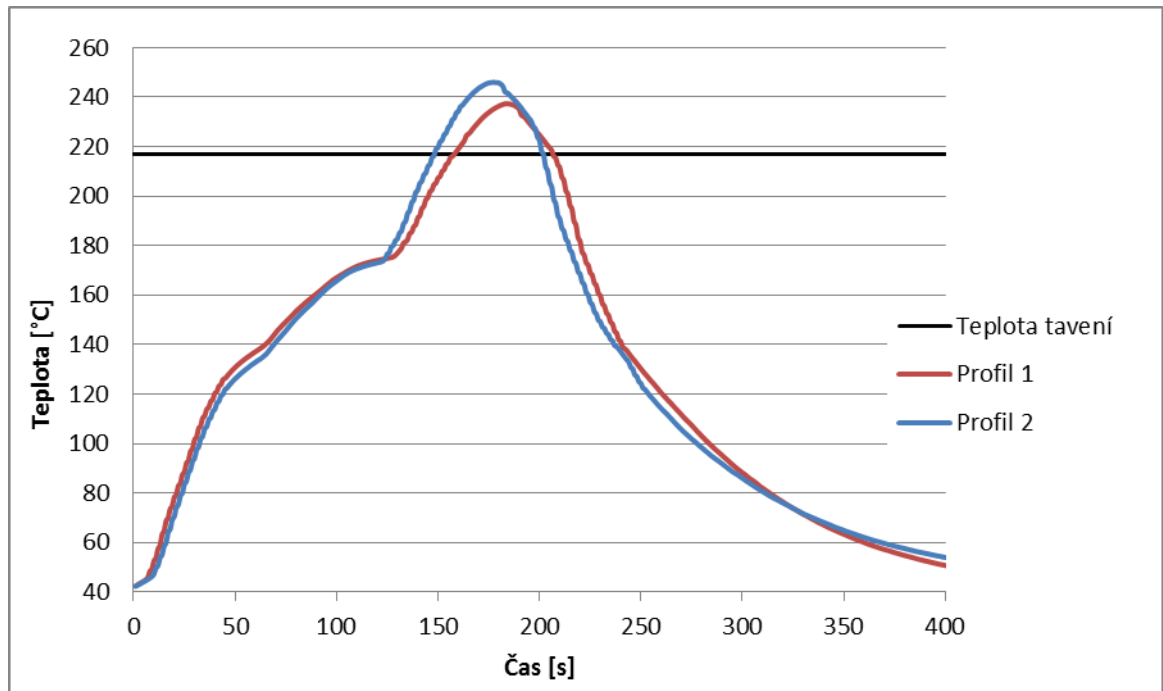
Teplotní čidlo bylo vyrobeno ze senzoru Pt1000 s drátkovými vývody od výrobce IST INNOVATIVE SENSOR TECHNOLOGY (č. produktu P1K0.520.6W.B.010), který byl přilepen pomocí teplotně vodivého lepidla ke stejné desce, z jaké byly vytvořeny testovací vzorky. Čidlo bylo propojeno s multimetrem, z něhož byly pomocí softwaru v intervalu 1 sekundy odečítány hodnoty odporu, jež se následně převáděly na teplotu.

2.4.2 Volba teplotních profilů

Jak již bylo zmíněno v předešlé kapitole, pec neumožňovala přesné nastavení profilů. Proto se v tomto experimentu zkoumal pouze vliv maximální teploty na tvorbu voidů. Parametry profilu se volily tak, aby dosahovaly k doporučeným (katalogovým) parametrům pájecí pasty od výrobce. Katalogové parametry týkající se teplotního profilu pro použití pájecí pasty Cobar SAC3-XF3+ jsou uvedeny v Tab. 2.III.

Tab. 2.III: Parametry doporučeného profilu slitiny Cobar SAC3-XF3+ a dvou zvolených profilů (zdroj z:[34]).

	Doporučený	Profil 1	Profil 2
Doba předehřevu [s]	45-100	45	40
Maximální teplota [°C]	235-250	237	246
Doba strávená nad liquidem - TAL [s]	30-50	48	53
Teplota oblasti teplotního vyrovnání [°C]	155-175		



Obr. 2.2: Použité teplotní pájecí profily pro testovací vzorky.

- **Profil 1 – nižší maximální teplota a kratší TAL (237 °C, 48s)**

Tento profil se volil tak, aby se dosáhlo spodní meze maximální teploty doporučené výrobcem pájecí pasty. Z Tab. 2.III je vidět, že u tohoto profilu všechny hodnoty odpovídaly těm doporučeným. Maximální teplota činila 237 °C, což odpovídá rozmezí (235-250 °C) udávanému výrobcem. Doba strávená nad liquidem byla 48 s a doba přehřevu trvala 45 s, což byla hraniční hodnota doporučených parametrů. Heating factor Q_n , neboli integrál průběhu teploty nad teplotou tavení slitiny u tohoto profilu byl 596 s°C. Zjednodušeně řečeno to je plocha, která je definována profilem nad teplotou liquidu. Pokud by hodnota Q_n byla příliš malá, pájený spoj by nemusel být dostatečně spolehlivý. Tento profil byl použit na jeden vzorek se 100 % objemu pájecí pasty.

Přetavovací pec byla nastavena následovně. Teplota první zóny byla 170 °C, což bylo o 5 °C méně než u druhé zóny (175 °C). Třetí zóna měla nastavenou teplotu na 271 °C a rychlost dopravníku činila 28 cm za minutu.

- **Profil 2 – vyšší maximální teplota a delší TAL (246 °C, 53s)**

U tohoto profilu se chtělo dosáhnout horní hranice maximální teploty, ovšem nepodařilo se dosáhnout všech doporučených parametrů pájecí slitiny. Maximální teplota činila 246 °C, což odpovídá rozmezí (235-250 °C) udávaným výrobcem. Ovšem TAL, neboli doba strávená

nad liquidem byla 53 s, což je překročení doporučených hodnot o 3s. Ani doba přehřevu nebyla v rozmezí a byla pouhých 40 s. Integrál průběhu teploty nad teplotou tavení slitiny u tohoto profilu byl 996 s°C. Tento profil byl použit na jeden vzorek se 100 % objemu pájecí pasty, ale i na vzorek, u kterého se použila redukce apertur (80% objemu pájky).

První zóna přehřevu měla nastavenou teplotu 165 °C. Jelikož teplotu druhé zóny ovlivňují sousední, byla nastavena na pouhých 110 °C, i když ve skutečnosti hodnota byla kolem 200 °C a třetí zóna (zóna k přetavení) měla teplotu 286 °C, tj. aby se dosáhlo vyšší maximální teploty profilu. Rychlost dopravníku byla 30 cm za minutu.

2.5 Popis kontroly vzorků

Pro 1. a 2. testovací vzorek byla použita šablona o stejných rozměrech, ovšem byl použit rozdílný teplotní pájecí profil. Zde se tedy zjišťoval vliv použitého teplotního pájecího profilu na tvorbu dutin. U 2. a 3. vzorku byl použit stejný pájecí profil, ovšem byla zde použita šablona o jiných rozměrech apertur, tzn., byl zkoumán vliv redukce apertur na tvorbu voidů. Porovnání použitých testovacích vzorků je uveden v Tab. 2.IV.

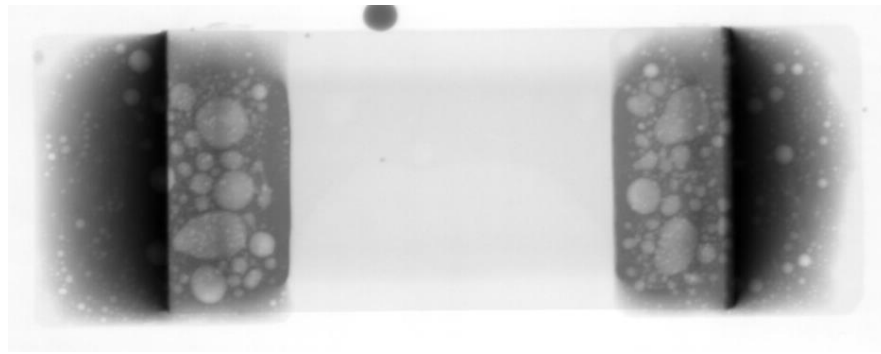
Tab. 2.IV: Porovnání použitých testovacích vzorků.

	1. Vzorek	2. Vzorek	3. Vzorek
Použitá šablona	Šablona 1	Šablona 1	Šablona 2
Použitý teplotní pájecí profil	Profil 1	Profil 2	Profil 2

2.5.1 Kontrola pomocí RTG

Testovací vzorky byly po přetavení podrobeny rentgenovému záření. Tato metoda kontroly se v současnosti používá nejen kvůli zvyšujícímu se počtu součástek na deskách plošných spojů, ale hlavně kvůli kontrole těch součástek, které mají kontakty pod svým tělem (BGA, QFN, atd.). Jedná se o nedestruktivní metodu kontroly a využívá se stejného principu jako v lékařství. Kontrolovaným předmětem procházejí rentgenové paprsky (elektromagnetické vlny extrémně vysoké frekvence), které vytváří stínový obraz založený na rozdílné hustotě materiálu. Jakmile tyto paprsky projdou předmětem, dopadem na fluorescenční stínítko se dostávají do viditelného spektra a poté už je přes zrcadlo snímán viditelný obraz. [35]

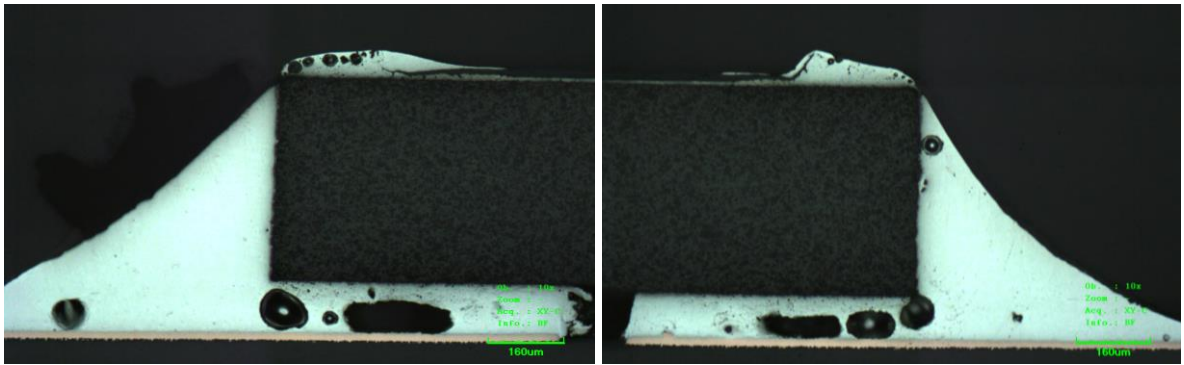
K tomuto experimentu byl k dispozici mikro-ohniskový rentgenový inspekční systém pro 3D výpočtovou tomografii GE phoenix v|tome|x s 240. Tímto rentgenem bylo vyfoceno celkem 60 snímků, jelikož se u každé součástky mimo klasického snímku použil ještě filtr, který dokáže zvýraznit dutiny ve spoji. Pomocí vhodných softwarů se tyto snímky dále vyhodnotily, což je popsáno v podkapitole 2.6.



Obr. 2.3: RTG snímek bez filtru

2.5.2 Metalografické výbrusy

Jedná se o destruktivní metodu kontroly, proto byly výbrusy zhotoveny až po rentgenové kontrole. Z každého testovacího vzorku byly použity dvě součástky, které byly následně zkoumány pod mikroskopem. Nejprve bylo nutné oddělit tyto součástky od testovacích vzorků. Poté se tyto oddělené součástky (dále vzorky) vložily do zalévací formy, kde byly za studena zality připravenou hmotou (dentakrylem). K vytvrzení byl použit tlakový hrnec, který eliminoval přítomnost vzduchových bublin v dentakrylu. Po dostatečném vytvrzení se na metalografické brusce nechaly zkoumané vzorky brousit. K broušení byly použity brusné papíry o zrnitosti 180, 600 a 1000. Jelikož po broušení mohly uvnitř pórů zůstat částice brusiva, bylo zapotřebí se těchto částic ultrazvukovým čištěním zbavit. Poslední krok před zkoumáním pod mikroskopem bylo vyleštění vzorků opět na metalografické brusce, ovšem při tomto kroku už materiál z povrchu neubývá, pouze se deformují povrchové nerovnosti. Poté už stačilo pouze pořídit snímky pomocí konfokálního mikroskopu Olympus LEXT OLS3000.



Obr. 2.4: Snímky pořízené mikroskopem.

2.6 Vyhodnocení vzorků

Vyhodnocení snímků u SMD pouzder je náročnější z důvodu nehomogenní vrstvy pájky. Kvůli tomuto problému nešlo využít automatické inspekce, kde algoritmus na základě stupně šedi detekuje přítomnost dutin. K označení dutin se tedy využilo volně dostupného softwaru Gwyddion, ve kterém se dutiny daly označit manuálně, a poté se pomocí funkce Statistika vypočítal jejich počet. Nutno říci, že tato metoda označení dutin není nejpřesnější. K výpočtu celkové plochy dutin ve spoji a největšího voidu bylo nutné použít jiný software, kde se na základě výpočtu fází vypočetla procentuální plocha dříve označených dutin a pájky ve snímku. U všech součástek se oba pájené spoje analyzovaly samostatně.



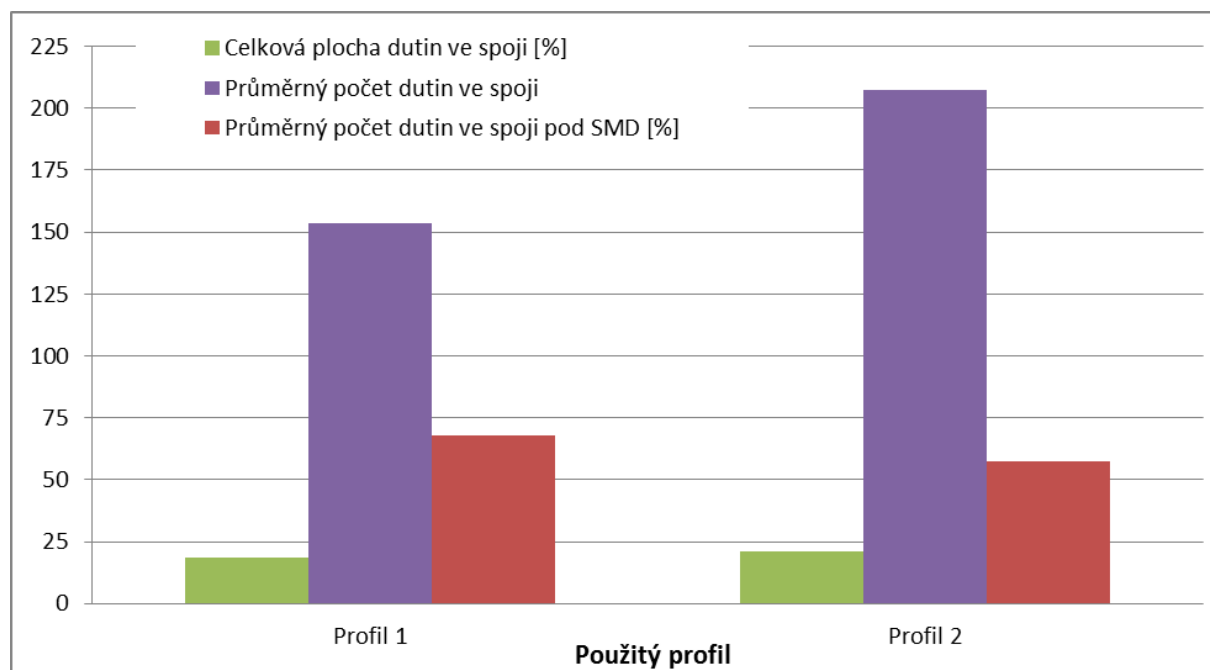
Obr. 2.5: Automatická analýza snímku.



Obr. 2.6: Manuální analýza snímku.

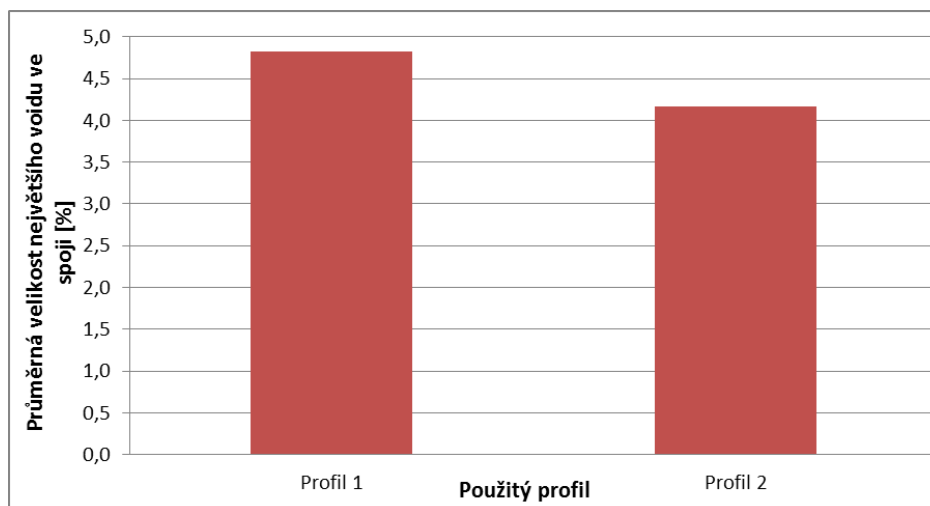
2.6.1 Vliv teplotních pájecích profilů

Zde byly využity dva pájecí profily (profil 1, profil 2), jejichž parametry jsou v Tab. 2.III. Na základě rešeršní činnosti se předpokládá, že by průměrný obsah dutin a jejich množství ve spoji mělo být větší při vyšší maximální teplotě a zároveň při delším čase nad teplotou tavení (TAL).



Obr. 2.7: Porovnání naměřených hodnot při využití odlišných teplotních profilů.

Z grafu je zřejmé, že dutiny u obou pájecích profilů zabíraly odlišnou plochu spoje. Výrazně se zde lišil i počet dutin. U profilu s vyšší teplotou a delším TAL (profil 2), se vyskytovalo průměrně o 54 dutin více, což znamenalo, že dutiny zabíraly větší plochu pájeného spoje, ovšem byly zde průměrně menší. I když se u tohoto profilu nacházelo více dutin, pouhých 57 % se jich vyskytovalo pod součástkou. U profilu s menší maximální teplotou se pod součástkou nacházelo průměrně 68 %, což může vést k trhlinám ve spoji, a tím i ke zhoršení spolehlivosti.



Obr. 2.8: Průměrná velikost největšího voidu při využití odlišných teplotních profilů.

Průměrná velikost největšího voidu při využití odlišných teplotních profilů je vidět na Obr. 2.8. U profilu 1, kde byla volena nižší maximální teplota a kratší TAL, byl největší void průměrně o 0,66 % velikosti spoje větší než tomu bylo u profilu 2.

Tab. 2.V: Naměřené hodnoty.

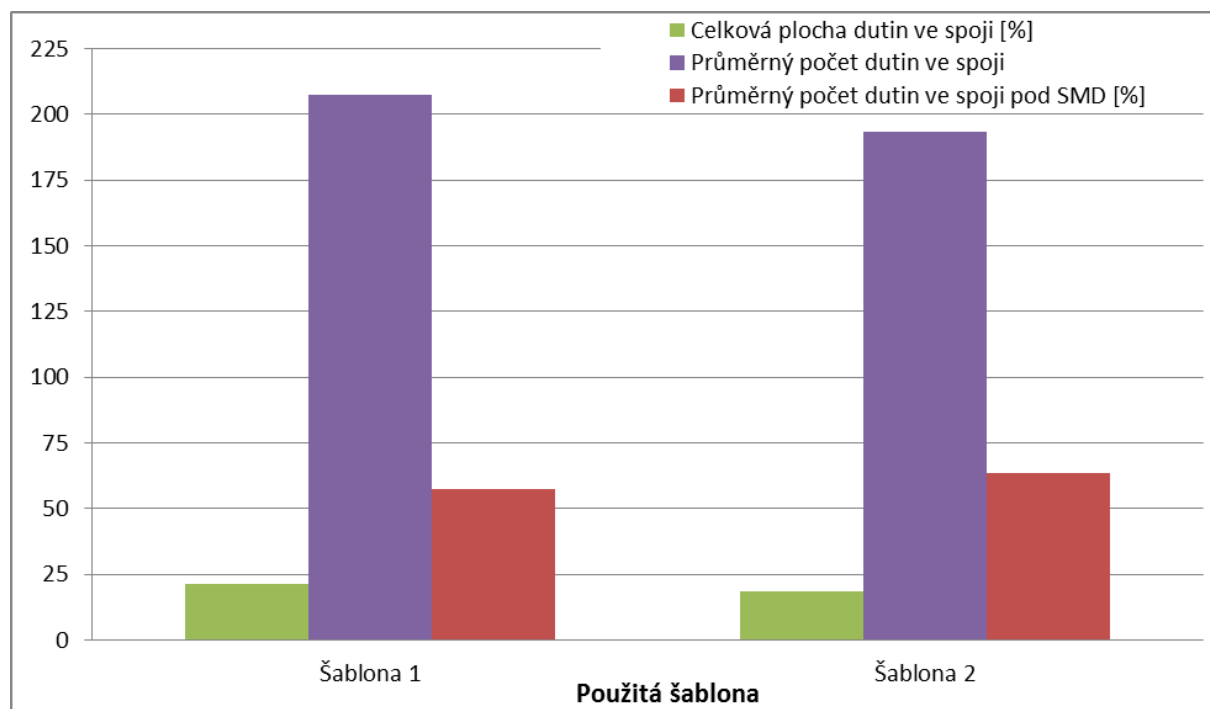
	Profil 1	Profil 2
Celková plocha dutin ve spoji [%]	18,51	21,22
Průměrný počet dutin ve spoji	153	207
Průměrná velikost dutin ve spoji [%]	0,121	0,103
Průměrná velikost největšího voidu ve spoji [%]	4,829	4,172
Průměrný počet dutin ve spoji pod SMD [%]	67,8	57,4
Průměrný počet dutin ve spoji mimo SMD [%]	32,2	42,6

Shrnutí všech naměřených hodnot týkajících se vlivu pájecích profilů je v Tab. 2.V. Z výsledků je patrné, že se v tomto experimentu výrazně lišil pouze počet dutin ve spoji a jejich umístění. Předpokládá se, že pokud poměr plochy voidů je více než 25 procent celkové plochy pájeného spoje, je spoj klasifikován jako vadný. V tomto případě spoje dosahovaly průměrně velikosti 21 – 22 % plochy pájeného spoje, tudíž nejsou posuzovány jako vadné.

2.6.2 Vliv redukce apertur

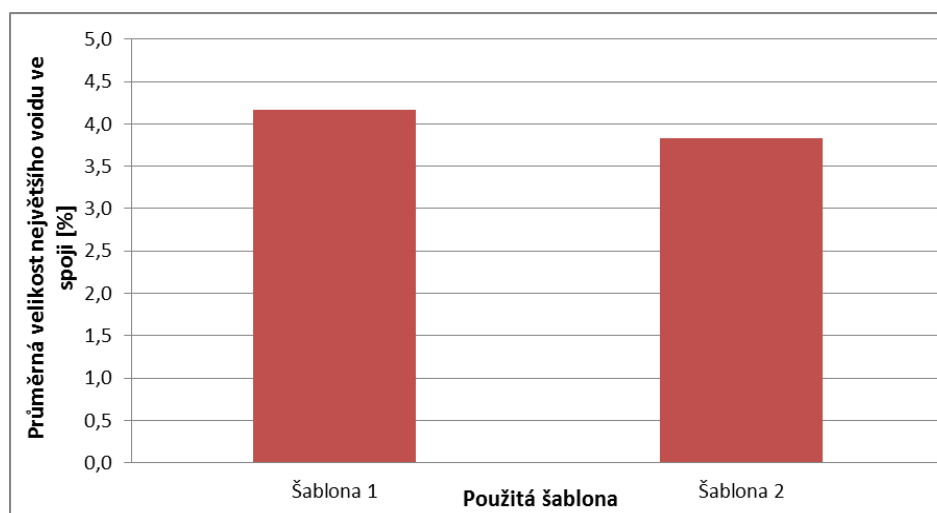
Z teoretické části se předpokládá, že i velikost apertur šablony má vliv na výskyt dutin ve spoji. Nicméně *Seelig s O'Neillem* [26] došli k závěru, že množství a velikost voidů nejsou závislé na procentu pokrytí pájecí plošky jako spíše na tvarech otvorů. V tomto experimentu

se použil stejný pájecí profil, ovšem dvě rozdílné velikosti apertur, jejichž parametry jsou uvedeny v Tab. 2.III.



Obr. 2.9: Porovnání naměřených hodnot při využití různých velikostí apertur.

Z Obr. 2.9 je zřejmé, že i velikost apertury v šabloně má vliv na tvorbu dutin. Pokud se apertura zmenšila o 10 % z výšky i šířky (šablona 2), natisklo se na měděnou plošku méně pájecí pasty. To mělo za následek, že se snížil počet vyskytujících se dutin i jejich celková plocha ve spoji. Ovšem průměrná velikost dutin byla téměř stejná, stejně tak i jejich umístění.



Obr. 2.10: Průměrná velikost největšího voidu při využití odlišných velikostí apertur.

Průměrná velikost největšího voidu je znázorněna na *Obr. 2.10*. Jeho velikost se průměrně zmenšila o 0,33 % velikosti pájeného spoje, což je téměř nepatrné zmenšení. Shrnutí všech naměřených hodnot týkajících se vlivu velikosti apertur je v *Tab. 2.VI*.

Tab. 2.VI: Naměřené hodnoty.

	Šablona 1	Šablona 2
Celková plocha dutin ve spoji [%]	21,22	18,33
Průměrný počet dutin ve spoji	207	193
Průměrná velikost dutin ve spoji [%]	0,103	0,095
Průměrná velikost největšího voidu ve spoji [%]	4,172	3,837
Průměrný počet dutin ve spoji pod SMD [%]	57,4	63,25
Průměrný počet dutin ve spoji mimo SMD [%]	42,6	36,75

I zde je vidět, že změna velikosti apertur má vliv na výskyt voidů. Z tohoto důvodu se přikláním k názoru studie *Four ways to reduce voids in BGA / CSP package to substrate connections* [7], že dutiny lze omezit redukcí naneseného objemu pájky. Ani zde nebyly spoje klasifikovány jako vadné.

Závěr

Cílem této práce bylo seznámení s problematikou bezolovnatého pájení a tvorbou dutin ve spojích. V první podkapitole teoretické části bylo obecné seznámení s pájením a odůvodněním přechodu z olovnatého pájení na bezolovnaté. Porovnání těchto typů pájení, jejich výhody a nevýhody. Mezi nevýhody bezolovnatého pájení patří zejména vysoká teplota tavení pájecích slitin.

Dalším bodem teoretické části bylo vypracování přehledu typů dutin a popsání příčin jejich vzniku. Bylo také zjištěno, že výskyt dutin ve spojích mohou ovlivňovat různé vlivy.

Praktická část se zabývala sledováním vzniku dutin ve spojích. Obzvláště pak plochou a množstvím dutin ve spoji v závislosti na parametrech pájecího profilu a naneseném množství pájecí pasty. Pro experiment byla použita testovací deska plátovaná mědí, bez další povrchové úpravy. Je známo, že i povrchové úpravy mají vliv na tvorbu dutin, ovšem tato práce se touto problematikou nezabývala. K pájení byla vybrána pájecí slitina SAC305, která byla vybrána kvůli srovnatelné spolehlivosti s olovnatou pájkou SnPb.

V experimentu byly použity teplotní pájecí profily o různé maximální teplotě a odlišném čase stráveném nad teplotou tavení. Výsledky v dostupné literatuře se liší dle použitých materiálů, ovšem došel jsem k závěru, že u profilu s vyšší maximální teplotou a delším časem stráveným nad teplotou tavení, dutiny průměrně zabíraly větší plochu spoje a vyskytovaly se i ve větším množství. I když rozdíl byl malý, je odlišný výskyt dutin způsoben hlavně vyšším rozdílem maximálních teplot. Je možné, že pokud by byl rozdíl časů strávených nad teplotou tavení větší, mohl by se výskyt dutin při využití obou profilů rovnat, ovšem k podrobnějšímu prozkoumání tohoto vlivu by bylo nutné provést další měření. Dále výsledky experimentu ukázaly, že u profilu s nižší maximální teplotou a kratším časem stráveným nad teplotou tavení se průměrně 68 % všech dutin nacházelo pod součástkou, což může vést k trhlinám ve spoji. Proto není zcela jasné, který profil byl z hlediska spolehlivosti spoje lepší. Bylo by potřeba nechat vzorky podrobit dalším měřením, například měření mechanické pevnosti.

Dalším faktorem ovlivňující vznik dutin, zkoumaným v experimentu, bylo nanesené množství pájecí pasty, neboli redukce velikosti apertur v šabloně. I zde se výsledky studií

lišily, nicméně v tomto případě se přikláním k názoru, že i velikostí apertur se dá omezit výskyt dutin. Pokud se totiž nanese o 20 % objemu pájecí pasty méně, dosáhlo se menšího množství dutin ve spoji i menší plochy, kterou tyto dutiny zabíraly.

Zatím není známa uroveň dutin pro vytvoření zcela spolehlivého pájeného spoje, proto je nutné vhodně volit nejen výběr pájecích slitin, ale i procesů, které jejich výskyt a velikost mohou alespoň ovlivňovat.

Seznam literatury a informačních zdrojů

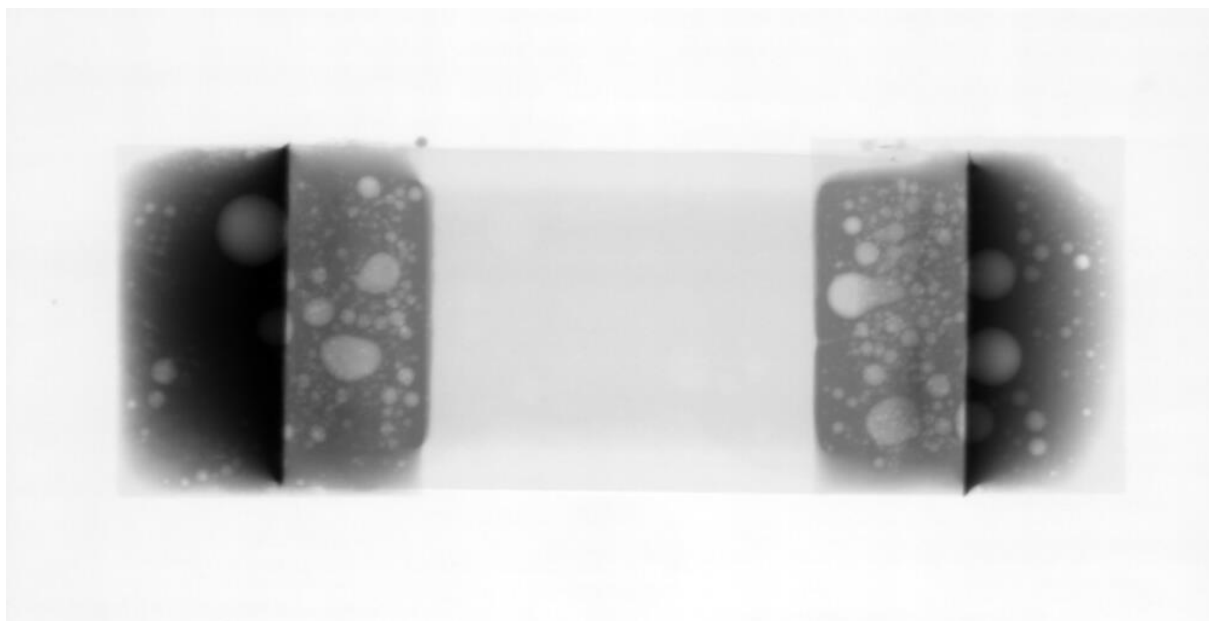
- [1] WASSINK, R.J.Klein. *Soldering in Electronics*. B.m.: Electrochemical Publications, 1984. ISBN 0901150142.
- [2] ABEL a CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. 2005. ISBN 80-903597-0-1.
- [3] ANDRAE, Anders S G, Norihiro ITSUBO a Atsushi INABA. Global environmental impact assessment of the Pb-free shift. *Soldering & Surface Mount Technology*. 2007, roč. 19, č. 2, s. 18–28.
- [4] TU, King-ning. *Solder Joint Technology- Materials, Properties, and Reliability*. B.m.: Springer New York, 2007. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-0-387-38890-8.
- [5] WU, C. M. L., D. Q. YU, C. M. T. LAW a L. WANG. Properties of lead-free solder alloys with rare earth element additions. *Materials Science and Engineering*. 2004, roč. 44, č. 1, s. 1–44.
- [6] STARÝ, Jiří a Petr KAHLE. *Plošné spoje a povrchová montáž*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, 2011.
- [7] PREVITI, Michael A, Mitch HOLTZER a Tom HUNSINGER. *FOUR WAYS TO REDUCE VOIDS IN BGA / CSP PACKAGE TO SUBSTRATE CONNECTIONS* [online]. nedatováno. Dostupné z: <http://alpha.alent.com/~media/Files/CooksonElectronics/Four Ways to Reduce Voiding in BGACSP Packages To Substrate Connections SMTA Oct 2010.pdf>
- [8] TOLENO, Brian PhD. *The effects of Pb-free solder paste formulation on voiding in reflowed assemblies* [online]. Dostupné z: http://www.emsnow.com/cnt/files/White Papers/Henkel_EffectoLeadfree_Voiding.pdf
- [9] YUNUS, Mohammad, K. SRIHARI, J. M. PITARRESI a Anthony PRIMAVERA. Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints. *Microelectronics Reliability*. 2003, roč. 43, č. 12, s. 2077–2086.
- [10] KINGA SYNKIEWICZ, Beata, Agata SKWAREK a Krzysztof WITEK. Voids investigation in solder joints performed with vapour phase soldering (VPS). *Soldering & Surface Mount Technology* [online]. 2014, roč. 26, č. 1, s. 8–11. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/SSMT-10-2013-0028>
- [11] *IPC-A-610F Amendment 1 - Surface Mount Assemblies*. 2014
- [12] ŠIMON, Vojtěch. *Mechanismy vzniku dutin u bezolovnatých pájených spojů a vliv na spolehlivost*. B.m., 2015. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [13] ASPANDIAR, Raiyo. Voids in Solder Joints. 2005, s. 1–42.
- [14] COYLE, Richard. The Influence of Solder Void Location on BGA Thermal Fatigue Life. In: *SMTAI Conference Proceedings*. 2010.
- [15] YAU, Yung-herng, Karl WENGENROTH a Joseph ABYS. A study of planar microvoiding in Pb-free solder joints. *HKPCA*. nedatováno, č. 22, s. 14.
- [16] PARK, Jong-Myeong, Seung-Hyun KIM, Myeong-Hyeok JEONG a Young-Bae PARK. Effect of Cu–Sn intermetallic compound reactions on the Kirkendall void growth characteristics in Cu/Sn/Cu microbumps. *Jpn. J. Appl. Phys* [online]. 2014, roč. 53, s. 5–6. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/1347-4065/53/5S3/05HA06>

- [17] KIM, Doosoo, Jong Hyeon CHANG, Jungil PARK a James Jungho PAK. Formation and behavior of Kirkendall voids within intermetallic layers of solder joints. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2011, roč. 22, č. 7, s. 703–716. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10854-011-0357-2>
- [18] STARÝ, Jiří. Dutiny – voidy v pájených spojích, druhy, mechanismy vzniku a vliv na spolehlivost. In: *SMT-INFO konsorciium*. 2014, s. 47.
- [19] LEWIS, Theron, Jim WILCOX a Cheikhou O. NDIAYE. Inclusion voiding in gull wing solder joints. *SMT Magazine*. 2013.
- [20] PAŠKO, Martin. *Spolehlivost bezolovnatého pájeného spoje* [online]. B.m., 2009. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18570
- [21] MACH, Pavel, Vlastimil SKOČIL a Jan URBÁNEK. *Montáž v elektronice : pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [22] HILLMAN, D a Rockwell COLLINS. “Void or Not to Void”. 2010.
- [23] DR. BELL, Hans. The Voiding Phenomenon [online]. 2011, s. 1–23. Dostupné z: http://www.ok2imh.com/storage/BELL_3.pdf
- [24] Reflow Profile Supplement - Lead-Free Solder Paste. *AIM Solder* [online]. Dostupné z: http://www.aimsolder.com/sites/default/files/reflow_profile_supplement-lead-free_9.15.pdf
- [25] JO, Hyoryoon, Benjamin E NIEMAN a Ning-cheng LEE. Voiding of Lead-Free Soldering at Microvia. *Indium Corporation of America*. nedatováno, s. 7.
- [26] SEELIG, Karl a Tim O’NEILL. Minimizing BTC Voids. *AIM Solder* [online]. [vid. 20. únor 2016]. Dostupné z: <http://pcdandf.com/pcdesign/index.php/current-issue/239-tech-tips/9730-tech-tips-1412>
- [27] Povrchové úpravy. *Lamirel PCB Europe s.r.o.* [online]. [vid. 15. březen 2016]. Dostupné z: <http://www.lamirel.cz/povrchoveupravy.aspx>
- [28] Technologie povrchových úprav plošných spojů. *SEMACH* [online]. [vid. 15. březen 2016]. Dostupné z: <http://www.semach.cz/povrchy3.html>
- [29] BERNARD, David a Keith BRYANT. Does PCB pad finish affect voiding levels in lead-free assembly. In: *Proceedings of SMTA International* [online]. 2004, s. 5. Dostupné z: http://www.nordson-at.com/technology/up_img/1428049744-498509.pdf
- [30] GRAMETBAUER, Michal. *Tavidla pro bezolovnaté pájení a jejich vliv na spolehlivost*. B.m., 2014. Západočeská univerzita v Plzni.
- [31] Total Heating Methods. *Renesas Electronics* [online]. [vid. 24. duben 2016]. Dostupné z: http://hk.renesas.com/products/package/manual/1/1_1/1_1_4/index.jsp
- [32] Pájení v parách. *SMT centrum* [online]. [vid. 24. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-v-parach/pajeni-v-parach/>
- [33] Recommended Solder Pad Dimensions. *Vishay Beyschlag* [online]. 2005 [vid. 27. duben 2016]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en/pdf/v/vishay/recommended-solder-pad-dimensions>
- [34] Anwenderhinweise Cobar No - Clean, bleifreie Lotpaste der SAC3-XF3+. *Balver Zinn* [online]. 2010 [vid. 27. duben 2016]. Dostupné z: http://www.balverzinn.com/tl_files/balverzinn/downloads/intern/TDB/UGL_SAC3-XF3+_SAC3-HF3+_DE.pdf

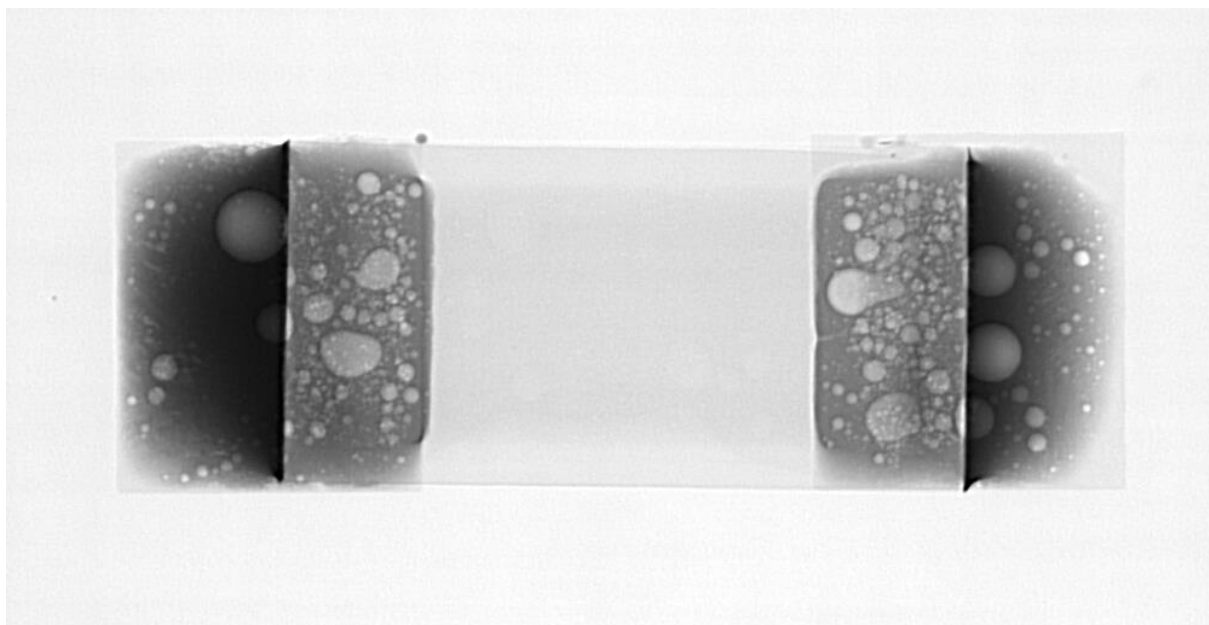
- [35] Kontrola pomocí RTG. *SMT centrum* [online]. 2010 [vid. 4. květen 2016]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/kontrolni-systemy/kontrola-pomoci-rtg/>

Přílohy

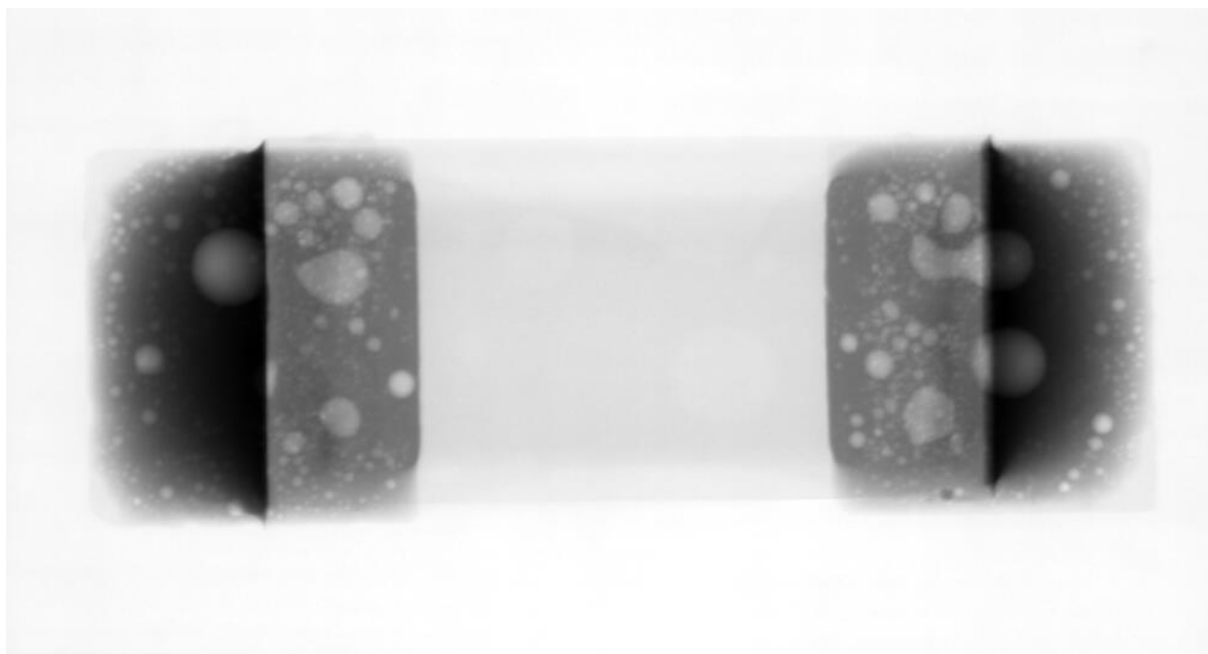
Příloha A – Rentgenový snímek součástky z 1. testovacího vzorku



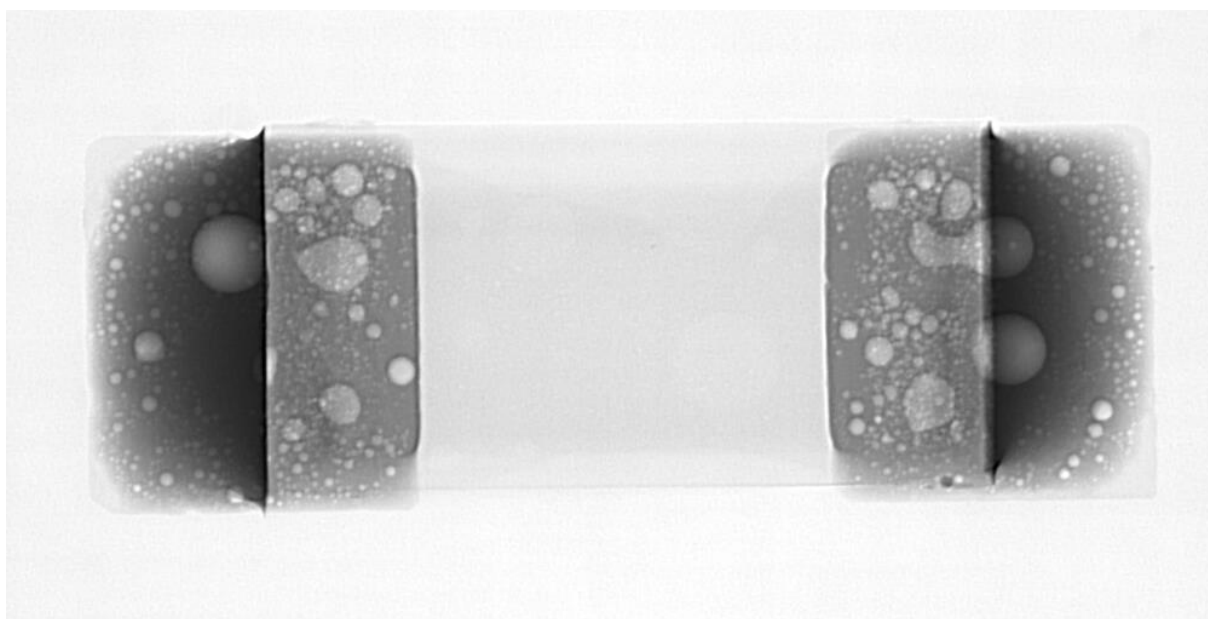
Příloha B – Rentgenový snímek součástky z 1. testovacího vzorku s využitím funkce filtru



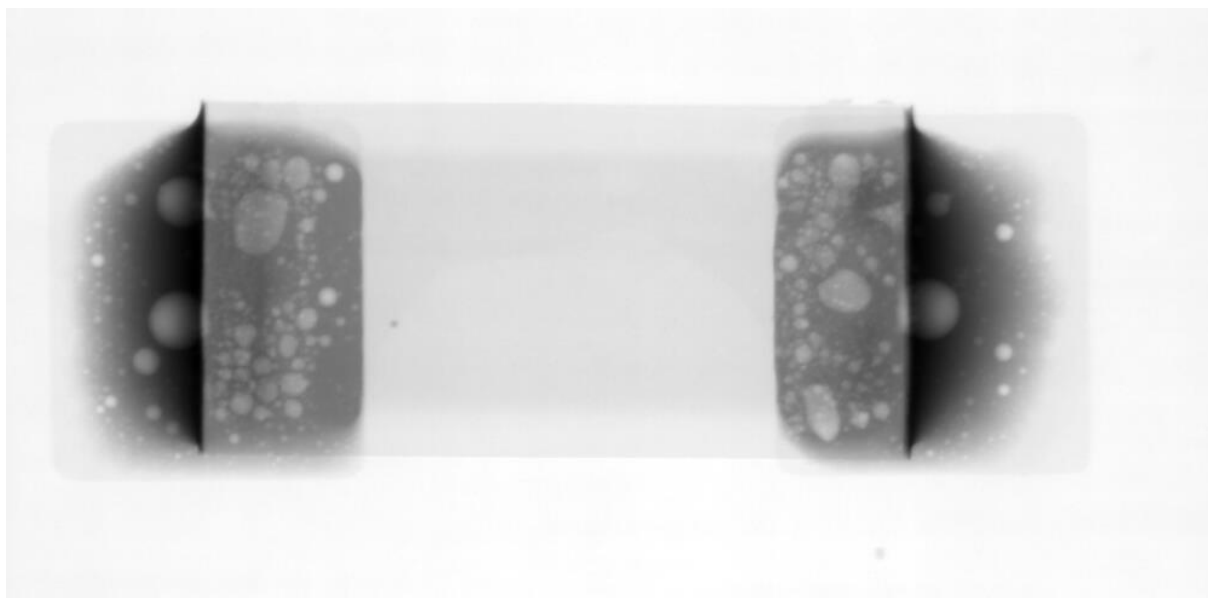
Příloha C – Rentgenový snímek součástky z 2. testovacího vzorku



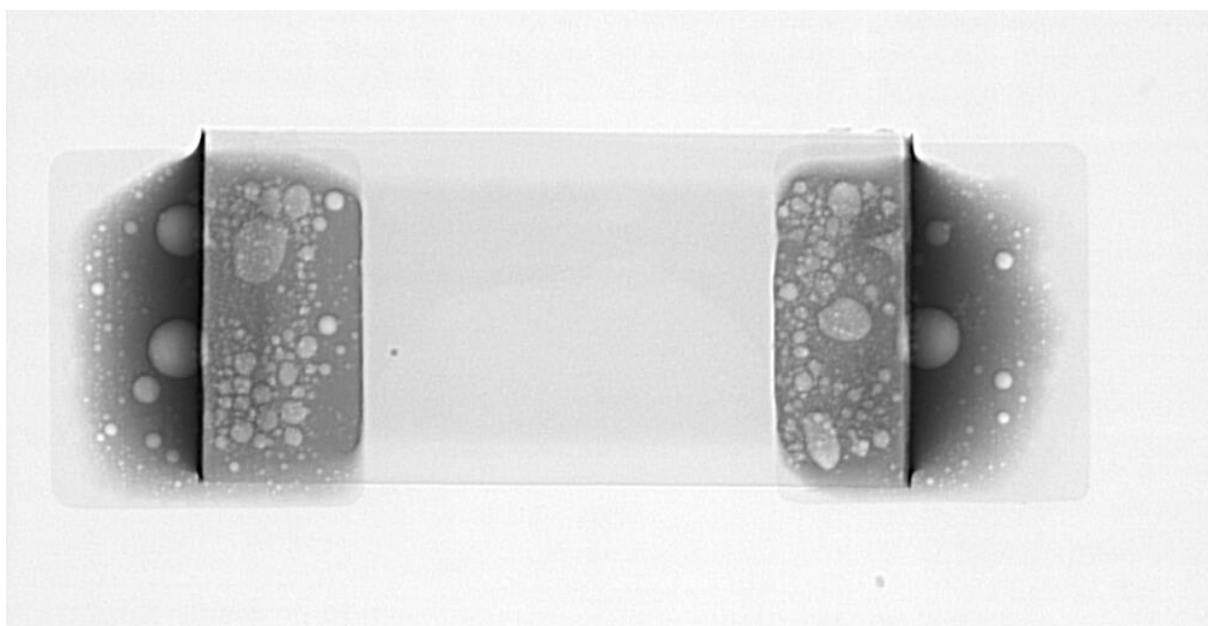
Příloha D – Rentgenový snímek součástky z 2. testovacího vzorku s využitím funkce filtru



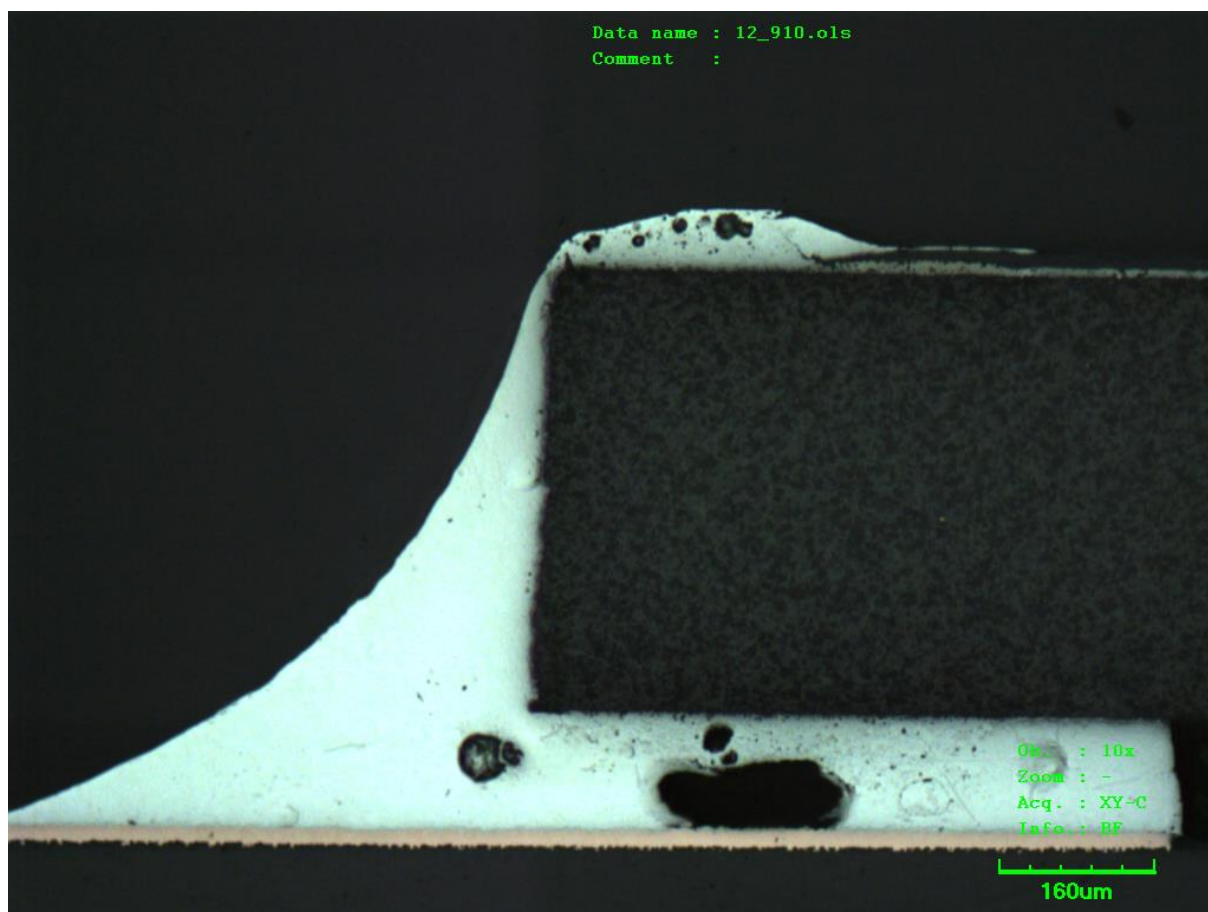
Příloha E – Rentgenový snímek součástky z 3. testovacího vzorku



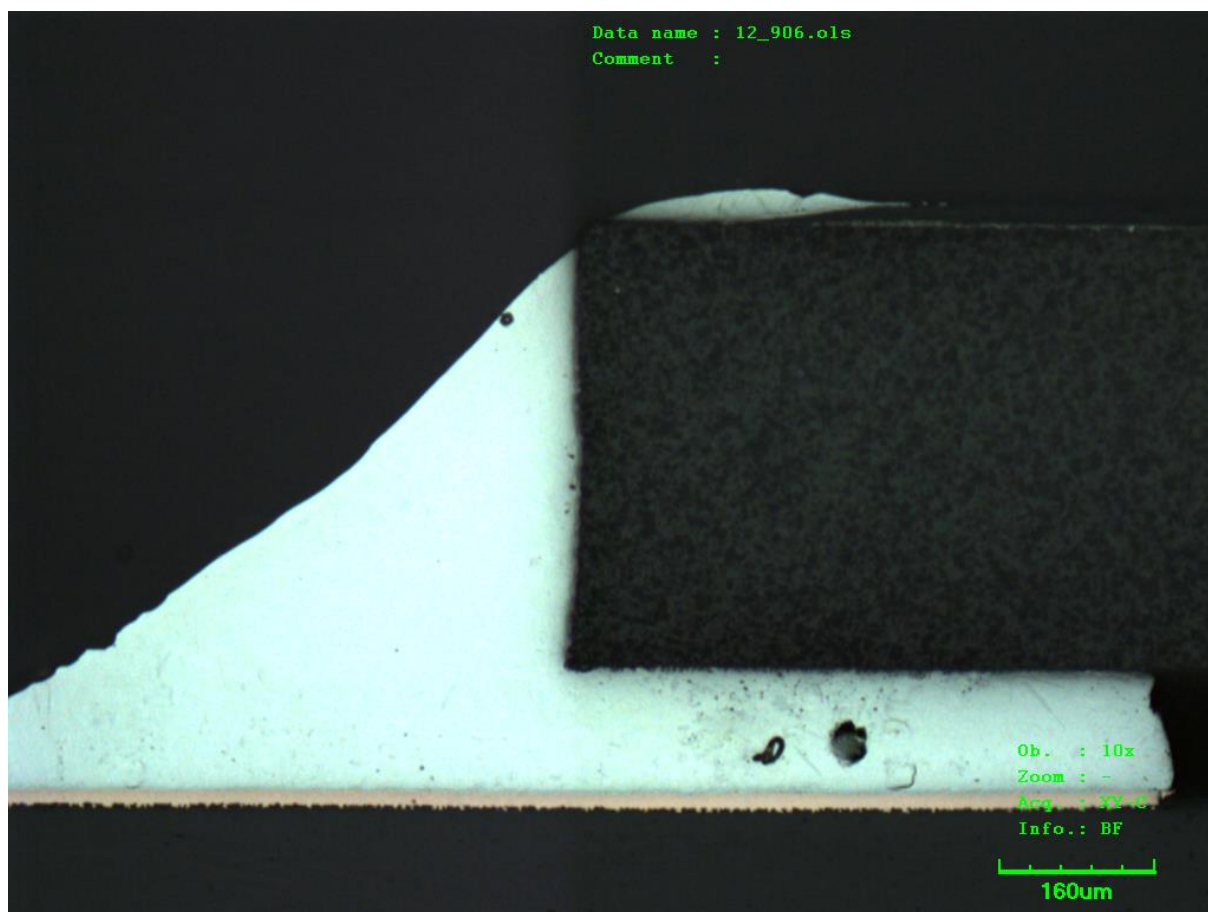
Příloha F – Rentgenový snímek součástky z 3. testovacího vzorku s využitím funkce filtru



Příloha G – Metalografický výbrus součástky z 1. testovacího vzorku



Příloha H – Metalografický výbrus součástky z 2. testovacího vzorku



Příloha I – Metalografický výbrus součástky z 3. testovacího vzorku

