

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGIE



Diplomová práce

Dutiny v pájených spojích

Voids inside solder joints

Autor práce: Jan Kulhavý
Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
Studijní obor: Elektronika, energetika a management – Technologické systémy
Akademický rok: 2018/2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kulhavý** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **434959**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Dutiny v pájených spojích

Název diplomové práce anglicky:

Voids inside solder joints

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení přetavením a s vybranými chybami, které se u této technologie vyskytují.
- 2) Připravte si vzorky, které podrobíte analýze dutin ve spojích.
- 3) Výsledky analýz vyhodnotte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Řepka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Jan Kulhavý

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho pomoc a rady, za vedení mé práce a za inspiraci po dobu studia.

Dále bych rád poděkoval Ing. Martinovi Kozákovi za jeho rady a pomoc s jasovou analýzou voidů a Ing. Petrovi Veselému za ochotu a konzultace při přípravě vzorků.

V neposlední řadě chci poděkovat mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia a vkládali do mě svoji plnou důvěru.

Anotace:

Cílem této diplomové práce je seznámit čtenáře s chybami, které se mohou vyskytnout na desce plošného spoje se zaměřením na dutiny ve spojích.

Teoretická část pojednává o teorii pájení, vysvětluje základní vlastnosti pájeného spoje, různé technologie pájení a popisuje chyby, které se na DPS mohou objevit.

Praktická část je zaměřena na zkoumání různých vnějších vlivů na vznik dutin ve spojích.

Klíčová slova:

Dutiny, tavidlo, pájení, DPS (deska plošného spoje)

Abstract:

A goal of this diploma thesis is to introduce the reader defects that can appear on printed circuits board, mainly voids.

The theoretical part deals with soldering theory, it explains basic attributes of soldered joint, different soldering technologies and it describes defects that can appear on PCB.

The practical part is focused on examination of various factors that can have affection on voids growth.

Key words:

Voids, flux, soldering, PCB (printed circuit board)

Obsah

1. Úvod	15
2. Pájení.....	16
2.1 Vysvětlení pojmů souvisejících s pájením	16
2.1.1 Přetavení pájky.....	16
2.1.2 Difuze	16
2.1.3 Smáčivost	17
2.1.4 Povrchové napětí	18
2.1.5 Intermetalická vrstva.....	19
2.1.6 Oxidace povrchu.....	20
2.1.7 Fázový diagram	20
2.2 Nejčastější druhy pájecích slitin	21
2.2.1 Sn63Pb37	22
2.2.2 SC pájky	22
2.2.3 SAC pájky.....	22
2.2.4 SA pájky	23
2.2.5 SB pájky	23
2.3 Technologie pájení	23
2.3.1 Pájení vlnou.....	23
2.3.2 Pájení ponorem	24
2.3.3 Pájení vlečením	24
2.3.4 Pájení přetavením	25
2.3.5 Ruční pájení.....	26
2.4 Povrchové úpravy.....	27
2.4.1 Funkce povrchových úprav	27
2.4.2 HAL.....	28
2.4.3 ENIG.....	28

2.4.4	OSP	29
2.4.5	Imerzní Sn.....	29
2.5	Nepájivá maska	29
2.5.1	Funkce nepájivé masky.....	29
2.5.2	Snímatelná nepájivá maska	30
2.5.3	Permanentní nepájivá maska	30
2.6	Tavidla	30
2.6.1	Funkce tavidla.....	31
2.6.2	Typy tavidel	31
2.6.3	Složky tavidla	32
2.7	Kvalita výsledného spoje	32
2.7.1	Faktory ovlivňující výslednou kvalitu spoje	33
2.7.2	Chyby vzniklé při procesu pájení	33
2.7.3	Chyby vzniklé po procesu pájení	37
2.7.4	Stárnutí materiálů	39
2.7.5	Mechanické namáhání	39
2.7.6	Tepelné namáhání.....	40
2.7.7	Proudové namáhání	40
3.	Voidy.....	41
3.1	Makrovoidy.....	41
3.2	Planární mikrovoidy.....	44
3.3	Shrinkage voidy	45
3.4	Mikro-via voidy.....	45
3.5	Kirkendallové voidy	46
3.6	Pinhole voidy	46
4.	Průběh experimentální části	48
4.1	Použité přístroje a programy	48
4.2	Použité pájecí pasty.....	51

4.3	Postup přípravy vzorků	51
5.	Vyhodnocení experimentální části.....	56
5.1	Tabulka naměřených hodnot	56
5.2	Vyhodnocení vlivu typu povrchové úpravy.....	57
5.3	Vyhodnocení vlivu typu nepájivé masky	60
5.3.1	Měření drsností a roztékavostí tavidel.....	60
5.3.2	Vyhodnocení vlivu typu nepájivé masky	63
5.4	Vyhodnocení vlivu tavidla použité pájecí pasty	65
5.5	Vyhodnocení vlivu tloušťky šablony na šablonotisk	67
5.6	Vyhodnocení vlivu plochy vývodů součástek.....	70
6.	Závěr.....	74
	Zdroje	78
	Seznam obrázků	82
	Seznam tabulek.....	84
	Seznam rovnic	86
	Seznam použitých zkratk.....	87

1. Úvod

Pájení je v dnešní době nedílnou součástí takřka veškeré vyrobené elektroniky. Stejně jako mnoho dalších oborů a věd i pájení v posledních desetiletích prošlo značným vývojem. Snad nejvýznamnějším krokem bylo striktní omezení zdraví nebezpečných kovů v elektrotechnice, do kterých spadá i olovo, což vedlo k drastickému omezení do té doby nejrozšířenější pájky SnPb. Bylo nutné najít nové vhodné materiály, které by se daly k pájení používat. Tyto nové materiály s sebou ovšem přinesly nové problémy, které je nyní nutné vyzkoumat a překonat. Jako příklad mohu uvést pájecí pastu SAC, obsahující stříbro, které má sice výborné pájecí vlastnosti, ale podporuje elektromigraci a tím růst dendritů, které mohou způsobit zkrat systému. Nejedná se samozřejmě jen o výskyt dendritů, přechod na bezolovnaté pájky a postupná miniaturizace přinesly mnoho dalších problémů, jedním z nich jsou dutiny vzniklé ve spojích, tzv. voidy, kterými se tato práce zabývá. Voidy se ve spojích sice vyskytovaly již dříve, nicméně právě i volba pájky může mít vliv na koncentraci a velikost vzniklých voidů. Protože voidy mohou snižovat mechanickou spolehlivost a elektrickou i tepelnou vodivost výsledného spoje, je vhodné na toto téma provádět výzkumy, které nám osvětlí příčiny vzniku voidů a nastíní možnosti jejich omezení.

V teoretické části této práce se budu nejprve obecně zabývat pájením, popíšu základní technologie pájení a soustředím se na chyby, které se mohou na desce plošných spojů vyskytnout, a to nejen na jejich popis, ale i na podmínky, které jejich vznik ovlivňují, a kontrolní metody, kterými se dají vzniklé chyby včas odhalit. V samostatné kapitole pak sepíšu stručnou teorii o voidech.

V praktické části si navrhnu desku plošných spojů, kterou dále použiji k výzkumu různých vlivů na vznik dutin a výsledky experimentů zanalyzuji a vyhodnotím.

2. Pájení

V této kapitole se budu zabývat samotným pájecím procesem. Vysvětlím několik základních pojmů a přiblížím nejčastější typy pájek, povrchových úprav, možné metody pájení, chyby, které se v procesu mohou vyskytnout a kontrolní postupy, které nám umožňují vzniklé chyby monitorovat.

2.1 Vysvětlení pojmů souvisejících s pájením

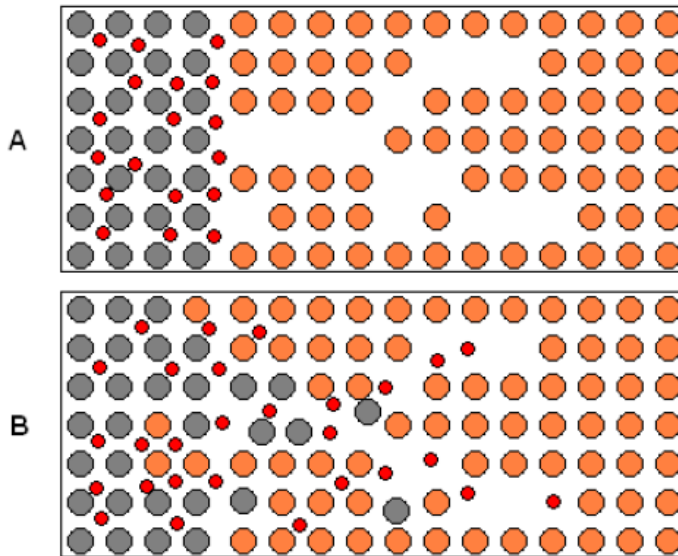
V této kapitole vysvětlím základní pojmy, které se vyskytují v souvislosti s pájecím procesem.

2.1.1 Přetavení pájky

Přetavení je proces, při kterém dodáváme krystalickému materiálu (pájce) tepelnou energii. Ta způsobí navýšení kinetické energie atomů a molekul materiálu, což vede k rozpadu krystalické mřížky a struktury materiálu. Při pájení jsou přítomny vždy alespoň dva různé materiály (materiál pájky a pájecí plošky), při rozpadlé krystalické mřížce dochází ke směšování materiálů a na rozhraní obou materiálů tak vzniká intermetalická vrstva. Při chladnutí spoje se začne snižovat kinetická energie atomů a molekul, obnovuje se krystalická struktura původních materiálů a vzniká nová krystalická struktura intermetalické vrstvy. [9]

2.1.2 Difuze

U kovových materiálů jsou atomy vázány ve struktuře krystalické mřížky, ale po dodání určité tepelné energie dochází ke zvyšování kinetické energie atomů až do bodu, kdy se atomy utrhnou z mřížky a začnou se pohybovat po náhodných drahách v celém objemu prostoru. Tento jev má své využití při pájení, kdy při přetavování dochází k penetraci atomů pájky do materiálu pájecí plošky a naopak. Podle velikosti a pohyblivosti různých atomů, velikosti teploty a doby působení zvýšené teploty se pak liší i hloubka průniku. Atomy, které se dostanou do druhého materiálu, se pak při chladnutí spoje podílí na rekrystalizaci struktury a tvoří tím intermetalickou vrstvu. K difúzi dochází i za běžné teploty okolí, ale v daleko menší míře. [8]



Obrázek 1. A) Difuze při pokojové teplotě B) Difuze při teplotě vyšší než bod tavení pájky [8]

Velikost difuze se řeší s pomocí difuzního koeficientu D . Ten vyjadřuje počet molů látky, které za jednu vteřinu projdou plochou o průřezu 1 m^2 při koncentračním gradientu 1 mol/m . Vztah pro difuzní koeficient v závislosti na teplotě je:

$$D (J) = D_0 \cdot e^{\frac{Q}{RT}} \quad (2.1)$$

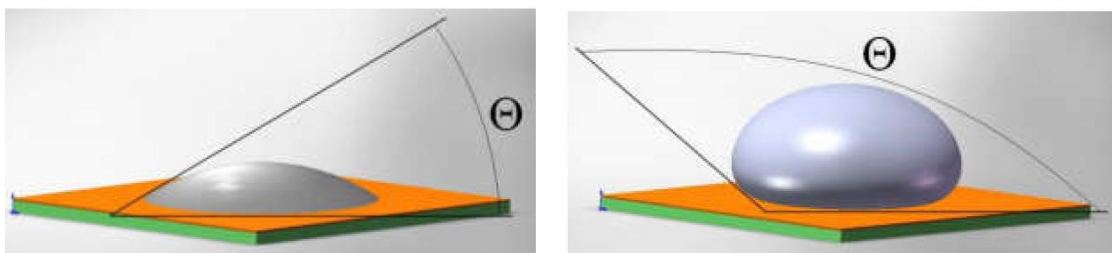
kde	$D(J)$	difuzní koeficient jako funkce teploty
	D_0	difuzní koeficient daného materiálu
	R	univerzální plynová konstanta [J/mol.K]
	T	termodynamická teplota [K]
	Q	Aktivační energie daného materiálu [J/mol]

[8]

2.1.3 Smáčivost

Smáčivost je vlastnost plochy reprezentující možnost vytvoření na jejím povrchu vytvoření rovnoměrné a souvislé vrstvy roztavené pájky. Při hodnocení smáčivosti se užívají dva hlavní faktory – stupeň smáčivosti (tj. jak daleko po povrchu se pájka rozteče) a rychlost smáčení (tj. rychlost roztečení pájky). Tyto faktory jsou ovlivňovány například materiálem pájecí slitiny, obsahem nečistot, stupněm oxidace ploch; příznivě je můžeme ovlivnit použitím tavidla a rovnoměrným zdrojem tepla. [9] [11]

Pro kvalitně zapájený spoj je třeba co nejvyšší smáčivosti pájeného povrchu i pájené součástky. Podle smáčecího úhlu se pak rozlišují stupně smáčení a na to navazující pájitelnosti:



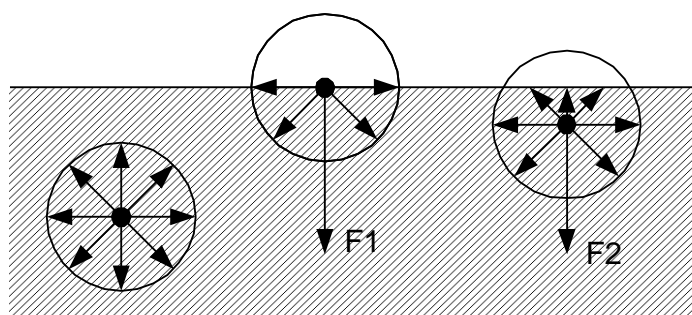
Obrázek 2. Smáčecí úhel [11]

Tabulka 1. Klasifikace pájitelnosti a smáčecího úhlu [11]

Velikost úhlu smáčení	Klasifikace pájitelnosti
$0^\circ < \theta \leq 20^\circ$	Výborné až dokonalé smáčení
$20^\circ < \theta \leq 40^\circ$	Dobré až velmi dobré smáčení
$40^\circ < \theta \leq 55^\circ$	Postačující smáčení
$55^\circ < \theta \leq 90^\circ$	Špatné smáčení
$90^\circ < \theta$	Nesmáčivost

2.1.4 Povrchové napětí

Povrchové napětí je mezifázové napětí na rozhraní kapaliny a plynu. Vzniká v důsledku rozdílných mezimolekulárních sil na rozhraní. Molekuly na povrchu kapaliny nejsou ze všech stran obklopeny jinými molekulami téhož druhu, a protože síly mezi molekulami kapaliny jsou větší než síly mezi molekulami kapaliny a plynu, jsou molekuly kapaliny vtahovány dovnitř, což vede ke vzniku napětí na povrchu. Povrch má tak oproti vnitřku kapaliny větší energii; tento přebytek energie se sníží tím, že kapka kapaliny nabyde kulovitěho tvaru, který má nejmenší možný povrch. [12]



Obrázek 3. Síly uvnitř kapaliny tvořící povrchové napětí [12]

Povrchové napětí lze definovat jako sílu působící kolmo na délku myšleného řezu povrchem, dělenou touto délkou:

$$\gamma = \frac{dF}{dl} \quad (2.2)$$

kde γ [N/m] je tzv. konstanta úměrnosti, alias povrchové napětí. [12]

Další možností je definice pomocí energetického stavu na rozhraní:

$$\gamma = \frac{E}{A} \quad (2.3)$$

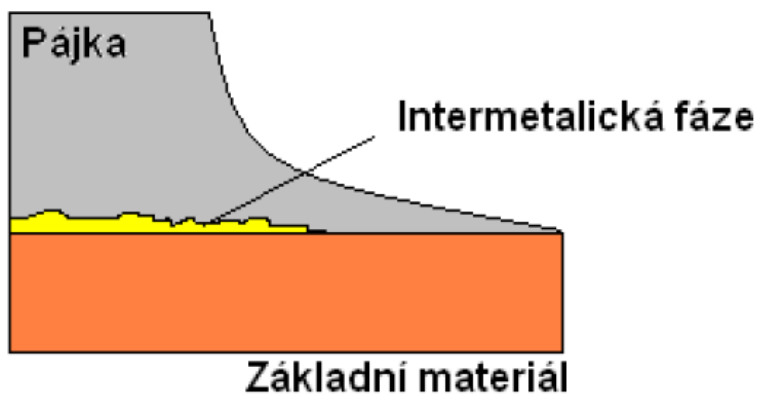
kde E [J] je povrchová energie, γ [N/m] je povrchové napětí a A [m²] je plocha povrchu rozhraní. [11]

Povrchové napětí je závislé na teplotě okolí (s rostoucí teplotou klesá) a na tlaku (s rostoucím tlakem mírně klesá). Dále je velikost povrchového napětí závislá na typu kapaliny a plynu, a tedy na velikosti mezimolekulárních sil na rozhraní a uvnitř kapky. [11] [12]

2.1.5 Intermetalická vrstva

Při přetavování materiálů dochází k difúzi materiálů pájky a pájecí plošky, čímž se na rozhraní vytvoří vrstva slitiny obou kovů, zvaná intermetalická vrstva. Tato vrstva je nezbytná pro vznik kvalitního pájeného spoje, ovšem jen pokud má správnou tloušťku. Pokud má vrstva příliš velkou tloušťku, ovlivní to negativně kvalitu pájeného spoje, a to především pevnost, křehkost a elektrické vlastnosti spoje. V krajních případech může vést příliš vleká tloušťka intermetalické vrstvy až k nefunkčnosti spoje. Výsledná tloušťka spoje je podmíněna více faktory, jako jsou použité materiály pájky a pájecí plošky, teplota a doba přetavení nebo tepelným namáháním spoje při provozu. [5]

Vzhledem k tomu, že k malé difúzi dochází i za normálních teplot, roste tloušťka intermetalické vrstvy i po zapájení. Tím se časem mění parametry pájeného spoje a dochází k jeho stárnutí. Rychlost růstu je však za normálních okolních podmínek velmi malá; ovšem pokud je vrstva pájky velmi tenká, pak může být spoj zcela nahrazen intermetalickou vrstvou. [5]



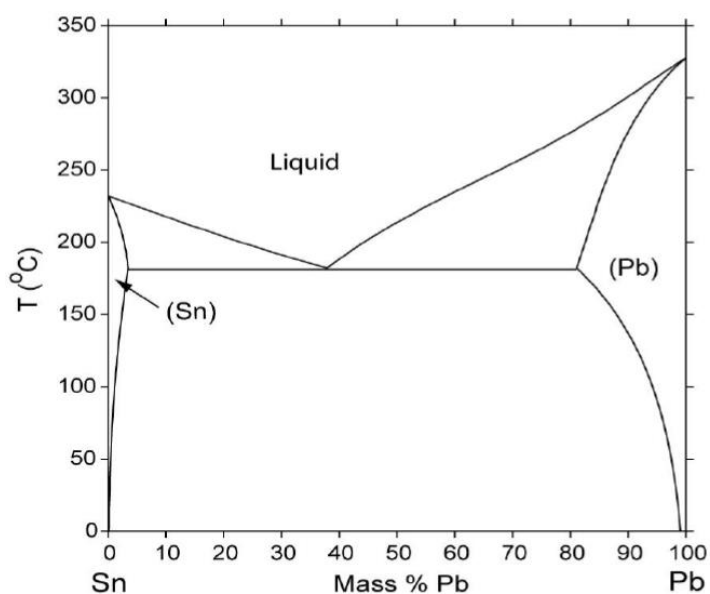
Obrázek 4. Intermetalická vrstva [11]

2.1.6 Oxidace povrchu

Před zapájením pájecí plošky dochází vlivem vzdušného kyslíku k oxidaci povrchu jejího materiálu. Vrstva oxidů má za následek zhoršení smáčivosti povrchu, proto se před pájením musí odstranit. K tomu účelu slouží tavidla, která odstraní vrstvu oxidů z povrchu plošky a zároveň by měla zabránit následné reoxidaci. Náchylnost pájecí plošky na oxidaci je dána i použitou povrchovou úpravou pájecích padů, např. imerzní cín je na oxidaci velmi náchylný, naopak např. ENIG je proti oxidaci poměrně dobře odolný díky nanesení tenké vrstvy zlata na povrchu. [5]

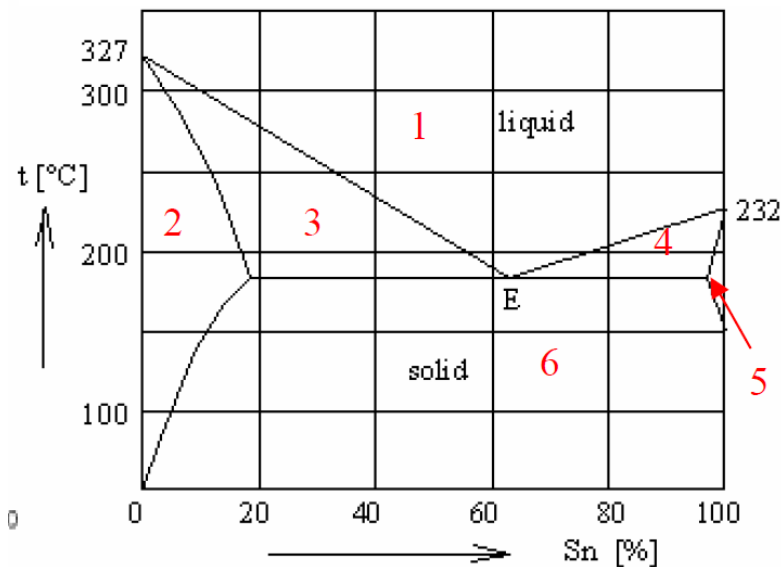
2.1.7 Fázový diagram

Fázový diagram vyjadřuje fázi (tj. skupenství) látek v závislosti na teplotě. U eutektických slitin, jako je například pájka SnPb, má fázorový diagram tvar písmene V, kde nejnižší bod odpovídá eutektickému bodu (tj. nejnižší možná teplota tání sloučeniny).



Graf 1. Fázorový diagram pájecí slitiny SnPb [9]

Fázorový diagram můžeme rozdělit do šesti oblastí, dle následujícího obrázku a tabulky:



Obrázek 5. Oblasti fázorového diagramu pájky SnPb [11]

Tabulka 2. Oblasti fázorového diagramu [11]

Číslo oblasti	Popis oblasti
1	V této oblasti je slitina v kapalném skupenství
2	Oblast, kde jsou atomy olova rozpuštěny v krystalické mřížce cínu
3	Slitina v kapalném stavu, ve které se tvoří pevné krystalky roztoku olova v cínu
4	Slitina v kapalném stavu, ve které se tvoří pevné krystalky roztoku cínu v olovu
5	Oblast, kde jsou atomy cínu rozpuštěny v krystalické mřížce olova
6	Obě látky jsou v pevném skupenství

2.2 Nejčastější druhy pájecích slitin

Výběr vhodné pájecí slitiny je jedním ze základních aspektů nutných pro kvalitní pájený spoj. Po zapájení má pájka vícero funkcí, jako je například mechanická fixace součástky, elektrické propojení, odvod ztrátového tepla nebo ochranu před oxidací. [5]

Dříve se v drtivé většině případů používala pájka Sn63Pb37, která měla výborné mechanické i elektrické parametry, a navíc i nízkou teplotu tání. Zlom přišel se zavedením směrnice EU RoHS, která zakazuje (až na výjimky) používání olova v elektrotechnice. Musely se tedy začít používat bezolovnaté pájky, které ovšem neměly tak dobré vlastnosti jako SnPb pájka a ve většině případů i vyšší teplotu tání. Bezolovnaté pájky mají navíc i vyšší pořizovací náklady, protože olovo se musí nahrazovat jinými drahými prvky, jako jsou stříbro, nikl a bismut. Na druhou stranu vhodná kombinace přídavných prvků může zlepšit kvalitu spoje či snížit teplotu tání. [5]

Tabulka 3. Vlastnosti přídavných materiálů [11]

Prvek	Vlastnosti
Stříbro (Ag)	Snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost a pevnost
Bismut (Bi)	Snižuje bod tání, zlepšuje smáčivost
Měď (Cu)	Zvyšuje pevnost
Zinek (Zn)	Snižuje bod tání, má nízkou cenu
Antimon (Sb)	Zvyšuje pevnost, snižuje povrchové napětí Používá se pro lepší roztékavost a menší pravděpodobnost tombstoningu
Indium (In)	Snižuje bod tání
Nikl (Ni)	Zabraňuje odsmáčení

2.2.1 Sn63Pb37

Pájecí slitina složená z 63 % z cínu a ze 37 % z olova je nejpoužívanější olověnou pájkou. Teplota tání je pouhých 183 °C, což je dáno eutektickým bodem slitiny. Pájka má k tomu dobrou tekutost, výbornou smáčivost a výsledný spoj je hladký, lesklý a mechanicky odolný. Další výhodou je nízká cena pájky. [5]

2.2.2 SC pájky

SC pájky jsou tvořeny slitinou cínu a mědi. Nejčastěji využívaným zástupcem této skupiny je slitina při složení z 99,3 % z cínu a z 0,7 % z mědi. Teplota tavení je 227 °C; nevýhodou je i vznik intermetalických sloučenin Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . Zlepšení vlastností této pájky můžeme dosáhnout, pokud do slitiny přidáme určité množství niklu (cca 0,01 - 0,05 %) anebo germania (cca 0,005 %). Vhodnou kombinací těchto prvků můžeme docílit snížení teploty tání i zvýšení smáčivosti. Protože se jedná pouze o malé množství prvků, zpravidla se počítají do skupiny SC pájek. [11]

2.2.3 SAC pájky

SAC pájky jsou tvořeny slitinou cínu, stříbra a mědi. Nejčastěji se používá slitina SAC 305, která se skládá z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Eutektická teplota tavení se pohybuje v rozmezí 216-217 °C, což je o 10 °C nižší teplota tání, než je tomu u SC pájek. Je to způsobeno právě přidáním stříbra do slitiny. Existence stříbra v pastě se dá ovšem považovat zároveň za nevýhodu, protože stříbro je vhodný prvek pro elektrochemickou migraci a zvyšuje tak pravděpodobnost růstu dendritů na zapájené DPS. Zároveň se stříbro podílí na tvorbě intermetalických vrstev, konkrétně na vzniku slitiny Ag_3Sn . Kromě této slitiny se také při pájení SAC pasty vyskytují intermetalické sloučeniny Cu_6Sn_5 a Cu_3Sn . Poměrem jednotlivých složek SAC pasty pak můžeme měnit mechanické vlastnosti spoje. [11]

2.2.4 SA pájky

SA pájky jsou slitiny cínu a stříbra, nejčastěji se používají při 96 % cínu a 4 % stříbra. Teplota tavení SA slitin je 221 °C. Stejně jako u SAC pájek, i zde stříbro podporuje možnou elektrochemickou migraci a podílí se na tvorbě intermetalické sloučeniny Ag₃Sn. [11]

2.2.5 SB pájky

SB pájky jsou tvořeny slitinou cínu a bizmutu. Díky bizmutu se teplota tání SB pájek pohybuje pod 180 °C, navíc jsou SB pájky levnější než předchozí typy bezolovnatých pájek. Velkou nevýhodou jsou ovšem horší mechanické vlastnosti, z toho důvodu se SB pájky využívají především při pájení spotřební elektroniky.

Při 57 % cínu a 43 % bizmutu dostaneme eutektickou slitinu, jejíž teplota tavení je 139 °C. [11]

2.3 Technologie pájení

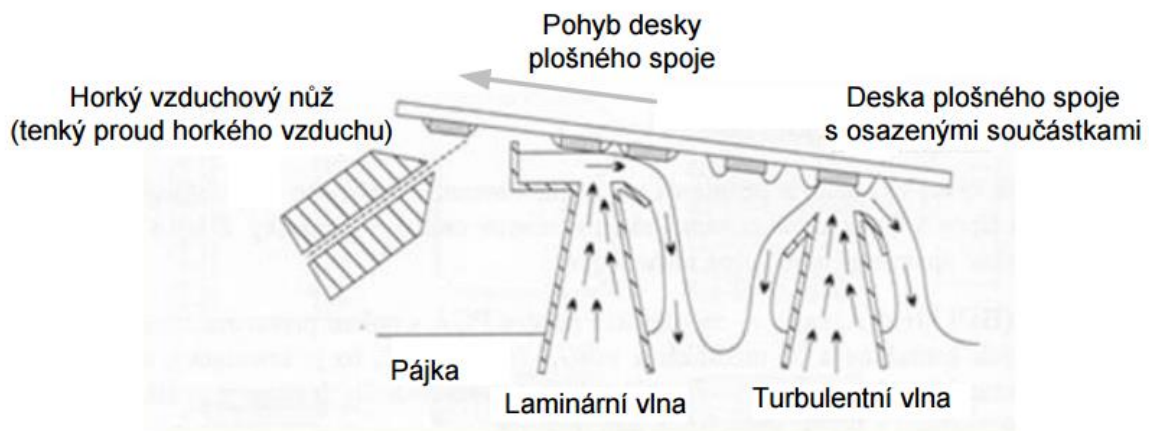
Existuje mnoho možností a metod, které můžeme využít pro zapájení spoje. V dnešní době nejpoužívanějšími metodami jsou pájení vlnou a pájení přetavením, které umožňují kvalitní přetavení více spojů najednou, což je vhodné při sériové výrobě. Naopak ruční pájení se používá pouze u malovýrob, prototypů či při drobných opravách.

2.3.1 Pájení vlnou

Při pájení vlnou prochází osazená DPS s předem naneseným tavidlem nad kontejnerem s roztavenou pájecí slitinou. V kontejneru jsou uměle vytvořeny vlny, které smáčí spodní stranu desky. Tím se na pájecí plochy dostane pájka; plochy, kam se pájka dostat nemá, jsou zpravidla pokryty ochrannou nepájevou maskou. Je nutné si uvědomit, že součástky osazené na desce budou během pájení po dobu několika vteřin ponořeny do roztavené pájky o vysoké teplotě, což by u některých součástek (např. polovodiče, elektrolytické kondenzátory apod.) mohlo vést k jejich poškození až zničení. Proto se některé součástky doosazují až po zapájení vlnou. [14]

Při pájení vlnou se většinou využívá dvou typů vln. První vlnou je vlna turbulentní, která má za úkol podpořit funkci tavidla a zdokonalit tak očištění pájených povrchů. Druhá vlnou je vlna laminární, která má za úkol vytvoření kvalitního pájeného spoje. Na konci lázně prochází deska nad horkým nožem, tedy nad proudem vzduchu o teplotě 380 °C, který odstraní přebytečnou pájku. [14]

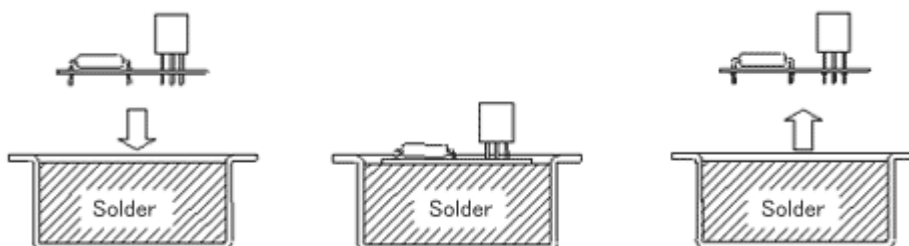
Dalším typem vlny je Omega vlna, která je ve dvou vibračních zónách rozkmitávána na frekvenci 50 Hz. Omega vlna urychluje odchod molekul plynu, čímž podporuje pájitelnost spojovaných materiálů. [14]



Obrázek 6. Pájení vlnou [14]

2.3.2 Pájení ponorem

Pájení ponorem je podobné pájení vlnou, rozdíl je pouze v automatizovanosti procesu. Zatímco u pájení vlnou se jedná o plně automatizovaný proces vhodný pro velkosériové výroby, pájení ponorem je proces ruční, který se používá pouze u pájení malého množství desek. Deska osazená součástkami se na dobu 2 až 12 sekund ponoří do lázně s roztavenou pájkou, která se dostane na místa nepokryté ochrannou nepájevou maskou. Držák obrobku má úhel v rozmezí 3° - 5°, což zajistí volný odtok pájky vedoucí k hladkému povrchu spojů. [8]



Obrázek 7. Pájení ponorem [16]

2.3.3 Pájení vlečením

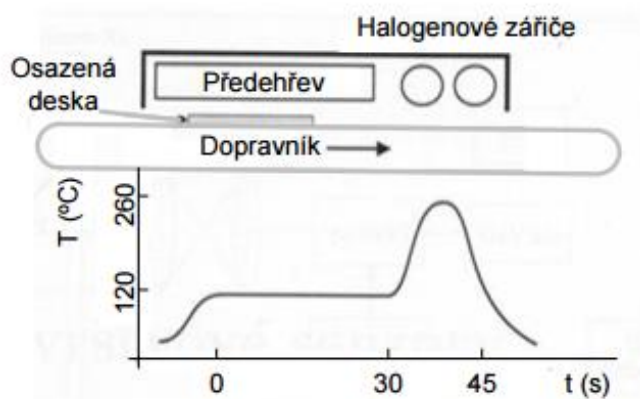
V první fázi se na DPS nanese tavidlo – nátěrem štětcem, nástřikem apod. Dále se DPS upevní do vozíku, který se upevní do vodící dráhy a pomalu spolu s DPS projede přes lázeň tvořenou roztavenou pájkou. Na přední straně vozíku je umístěna stěrka, která z povrchu lázně setře vrstvu oxidů (strusku). Do lázně je vnořena pouze vrchní strana DPS, pájka sama vyvzlíná po vývodech vložených do otvorů pro součástky. Po vychladnutí se deska sejme z vozíku a v případě potřeby se omytím zbaví nečistot a zbytků nezreagovaného tavidla. [15]

2.3.4 Pájení přetavením

Metoda pájení přetavením se dá rozdělit do několika etap. V první etapě se nanáší pájecí pasta na pájecí plošky, na které chceme připájet součástky. Nejčastěji se nános pasty realizuje pomocí šablonového tisku (někdy se používá tisk přes síto), kdy přes připravenou šablonu (síto) protlačíme těrkou vhodné množství pájecí pasty. Možné je také použít dispenzer, tedy vytlačení vhodného množství pasty dutým hrotem. Po nanesení pasty se pady osadí součástkami, je možné osazovat ručně nebo využít osazovací automat. Osazená DPS se zahřeje, kdy nejprve dochází k aktivaci tavidla, které je součástí použité pájecí pasty. Následně pak dochází k přetavení pasty. K přetavení pájecí pasty je možné použít některý z následujících způsobů. [8]

Pájení ohřevem infračervenými zářiči

Při ohřevu se využívá zářičů infračerveného vlnění, které dopadá na pájená místa a prohřívá je. Nevýhodou této metody je nerovnoměrný ohřev pasty. To je dáno tím, že koeficient odrazu a pohltivosti je závislý na mnoha faktorech, jako jsou např. barva a drsnost povrchu, směr dopadajícího záření apod. Důsledkem pak může být různá kvalita pájených spojů a také mechanické napětí, které vznikne v důsledku rozdílných roztažností. [14]



Obrázek 8. Princip ohřevu IR zářiči [14]

Pájení laserem

K ohřevu se využívá laserového svazku, který se zaměří na každý jednotlivý spoj a ohřívá pastu na danou teplotu. Proces přetavení jednotlivých spojů je krátký (cca 0,2 sekundy), nicméně pájení většího množství spojů, například při sériové výrobě, by bylo neefektivní z časových, ale i finančních důvodů. Pájení laserem se tak využívá pouze pro zapájení součástek, které není možné připájet vlnou či jiným způsobem přetavení. [14]

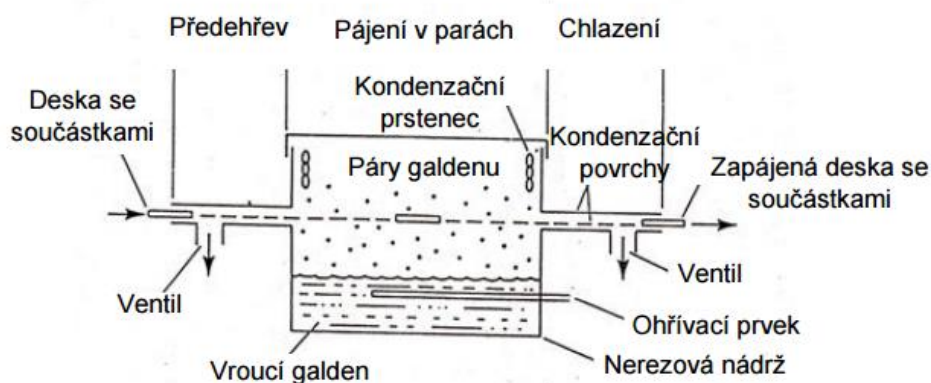
Pájení ohřevem horkým plynem

Ohřev horkým plynem je jednou z nejpoužívanějších metod. Využívá se u tunelových pecí. Ty jsou rozděleny na více částí, jednotlivé zóny jsou ohřívány odporovým vinutím a sáláním a konvekcí je vzniklé teplo dodávané do spojů. V každé zóně je jiná teplota a dochází v ní k jiné etapě pájecího procesu.

Druhá možnost ohřevu horkým plynem se využívá při výměnách součástek či drobných opravách, pro sériovou výrobu je ovšem nevhodná. Na pájecí plošku se nanese pájecí pasta, osadí se součástkou a poté je spoj zahříván proudem horkého plynu z ohřívací hlavy, která je zakončena trubičkou o malém průměru (cca 1 mm). Tlak vycházejícího plynu musí být vhodně regulován, aby nedošlo k odfouknutí součástky. Jako médium se většinou využívá horkého vzduchu, v některých případech se využívá inertních plynů, aby nedocházelo k oxidaci spoje. [14]

Pájení v parách

Při pájení v parách se potřebné teplo přenáší na spoj pomocí horké páry. Nejčastěji se využívá galden, což je řada dielektrických kapalin, které mají bod varu v rozmezí 55 °C – 270 °C, nejsou chemicky agresivní a vyznačují se vysokou stabilitou v širokém rozsahu teplot. Galden v kapalné podobě se nachází ve spodní části aparatury, je zahříván a odpařuje se směrem k pájeným deskám. Pára na deskách zkondenzuje, čímž odevzdá teplo, a skapává zpět do dolní části zařízení. [14]



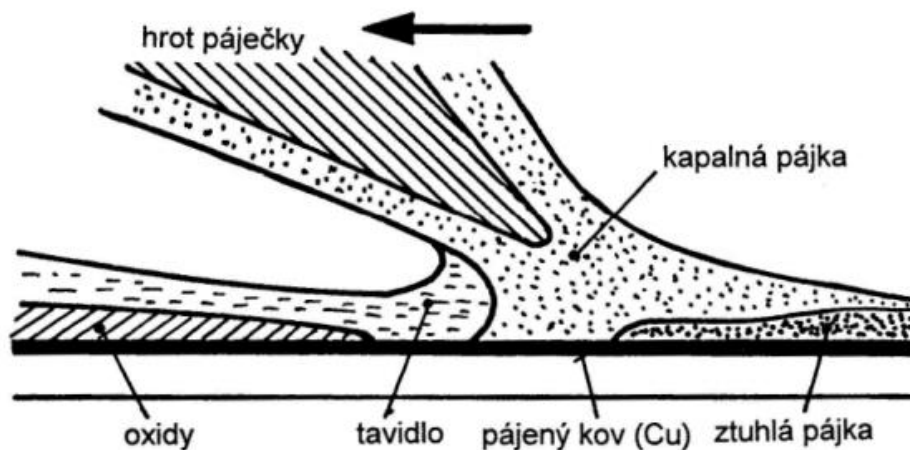
Obrázek 9. Pájení v parách [14]

2.3.5 Ruční pájení

Ruční pájení je relativně rozšířená pájecí metoda, která se využívá především k drobným opravám, výměnám součástek či k dodatečnému připojování součástek. Hlavními nevýhodami této metody je nemožnost paralelního pájení, a tedy nevhodnost pro sériovou výrobu a špatná

reprodukovatelnost spojů, protože při ručním pájení se projevuje lidský faktor a dochází pak k různým dobám přetavování, k různému množství použité pájky apod. [8] [13]

Při ručním pájení se tavidlo nanáší ještě před ohřevem spoje nebo je dodáváno přímo z pájky, která může mít formu duté trubičky vyplněné právě tavidlem. Po nanesení tavidla musíme zahřát hrot páječky na požadovanou teplotu přetavení a pokryjeme hrot páječky tenkou vrstvou pájky. Ta se na hrotu musí udržovat po celou dobu pájení, protože zaručuje dobrý přenos tepla do pájeného spoje. Spojované části musí být zahřáty na dostatečnou teplotu již před nanášením pájky, pájka se pak přidává do rozhraní pájecího hrotu a pájecí plochy. Po přidání dostatečného množství pájky do spoje oddálíme hrot páječky a spoj necháme vychladnout. Při jeho chladnutí musí být pájené součástky zafixované a nesmí dojít k jejich pohybu. [8] [11]



Obrázek 10. Ruční pájení [13]

2.4 Povrchové úpravy

Povrchová úprava může mít na tvorbu voidů vliv. Proto zde stručně popíšu jejich funkci a představím nejčastější typy povrchových úprav.

2.4.1 Funkce povrchových úprav

Povrchové úpravy DPS mají výrazný vliv na samotný proces pájení i na výslednou kvalitu spojů. Umožňují delší dobu skladování desek, brání oxidaci pájeného povrchu, čímž zamezují korozi, a brání vzniku nevhodných intermetalických sloučenin mezi pájkou a materiálem pájené plošky. [7]

Při volbě vhodné povrchové úpravy musíme vzít v potaz následující požadavky:

- Materiálová kompatibilita – např. chemicko-fyzikální kompatibilita materiálu použité povrchové úpravy s mědí pájecí plošky a s materiálem nepájivé masky
- Procesní kompatibilita – např. rovinnost výsledného povrchu, tloušťka vrstvy, snadné řízení procesu nebo malý teplotní šok substrátu
- Environmentální kompatibilita – např. splnění směrnice RoHS, netoxicity povrchové úpravy nebo ekologické zpracování odpadních vod [4]

2.4.2 HAL

HAL (Hot Air Levelling) je druh povrchové úpravy, při které se DPS svisle ponoří do roztavené pájky a následně se pomalu vytáhne. Přebytky pájky se pak odfouknou horkým nožem (tj. proud horkého vzduchu). Jako pájka se dříve používala slitina cínu a olova, dnes, s ohledem na směrnici RoHS, se obvykle používají bezolovnaté slitiny cínu (např. slitina Sn100C). Velkou nevýhodou této úpravy je její nerovnost. Tloušťka nanesené pájky se může vlivem gravitace pohybovat od 1 μm v místě, kde ploška vstupuje do horkého nože až do 20 μm v místě, kde ploška horký nůž opouští. Pro potlačení tohoto jevu byla vyvinuta metoda vodorovného vyrovnání pájky horkým nožem. Při této metodě jsou desky posouvány roztavenou pájkou na síťovém dopravníku, přičemž i horký nůž působí ve vodorovném směru a gravitace tak nyní působí ve směru vyrovnání rovinnosti vytvořené povrchové úpravy. Další nevýhodou HALu je teplotní šok, kterým si DPS musí při procesu projít, a který může způsobit deformaci DPS. [4]

2.4.3 ENIG

ENIG (Electroless Nickel Immersion Gold) je povrchová metoda skládající se ze dvou částí. V první etapě se nanese chemický nikl v tloušťce 3-6 μm . Samotný nikl ovšem velmi rychle oxiduje, a proto se překrývá vrstvou zlata o tloušťce 0,05-0,1 μm . Zlato má tedy především ochrannou funkci, čemuž napomáhá i to, že zlato na vzduchu neoxiduje. Samotné zlato by se ovšem velmi rychle rozpustilo do vrstvy mědi. [4] [5]

ENIG se prezentuje výbornou pájitelností a rovinností, navíc se jedná o bezolovnatou metodu. Problémem je dražší výroba a objevující se Black Pad – tj. chyba vznikající při výrobě, kdy se oddělí pájený spoj od vrstvy niklu. To je způsobené křehkou intermetalickou vrstvou na rozhraní nikl-cín. Další nevýhodou ENIG je difuze zlata do vznikajícího spoje a následný vznik intermetalických sloučenin AuSn_4 a AuSn_2 . To vede k menší pevnosti a horší kvalitě výsledného spoje. [4] [5]

2.4.4 OSP

OSP (Organic Solder Preservatives) je úprava, při které se chemickou metodou nanáší organické inhibitory oxidace mědi (používají se látky na bázi benzoimidazolů). Proces nanášení vrstvy OSP probíhá tak, že se DPS s odhalenou mědí ponoří do lázně, kde jsou absorbované efektivní složky organických inhibitorů drženy na povrchu Van der Waalsovými silami. [4] [7]

OSP se také používá jako ochranná vrstva u jiných povrchových úprav, které na vzduchu oxidují. Vrstva OSP má tloušťku okolo 0,1 μm , je vhodná pro všechny druhy kovů, je levná, má dobrou rovinnost povrchu a je relativně odolná proti otěru. Nevýhodou je rychlé stárnutí materiálu OSP, a tedy nepříliš dlouhá doba skladování. [4] [6]

2.4.5 Imerzní Sn

Povrchová úprava, při které se desky s obnaženou mědí ponoří do cínové lázně. Na měď se nanese vrstva o tloušťce cca 0,8 - 1 μm , která má vysokou rovinnost a je velmi dobře materiálově kompatibilní. Zároveň se jedná o levnou a technologicky nenáročnou metodu. Na druhou stranu se tato metoda vyznačuje vysokou citlivostí na nečistoty, které snižují smáčivost spoje, a je proto nutné pracovat v ochranných rukavicích a v čistém prostředí. Cín je navíc vhodný materiál pro tvorbu whiskerů, které mohou způsobit zkrat celého systému. Pro omezení růstu whiskerů se do cínu můžou přidávat anti-whiskerová aditiva. Další velkou nevýhodou je také vznik intermetalické vrstvy vzniklé difuzí cínu do mědi a naopak. Pro potlačení tohoto jevu vyvinula německá firma Ormecon metodu, kdy mezi vrstvu mědi a cínu přidá vrstvu organického kovu o tloušťce cca 0,08 μm , která zabraňuje difuzi. [4] [5]

Povrch naneseného cínu se někdy pokrývá tenkým organickým filmem, aby se zabránilo rychlé oxidaci cínu. [7]

2.5 Nepájivá maska

Nepájivá maska je tenký film, který se nanáší na povrch desky plošných spojů a slouží jako ochrana odhalených měděných vodičů. Rozlišujeme dva druhy nepájivých masek, a to snímatelnou a permanentní. [8]

2.5.1 Funkce nepájivé masky

Hlavní funkcí nepájivé masky je ochrana odhalených měděných vodičů před pokovením v pájecí lázni. Permanentní masky také slouží jako ochrana mědi před poškozením při provozu DPS. Použití nepájivé masky vede k eliminaci vzniku můstků a zkratů a snižuje množství

spotřebované pájky při pájení. Masky musí vydržet vysoké teploty a agresivní činidla pájecí lázně, musí být mechanicky a chemicky odolná, mít vysokou odolnost proti vlhkosti a prachu a mít dobré dielektrické vlastnosti. Vyrábí se z materiálů na bázi epoxidů, akrylátů nebo epoxidoakrylátů. [22]

2.5.2 Snímatelná nepájivá maska

Snímatelná nepájivá maska slouží jako přechodová ochranná vrstva. Její hlavní funkcí je ochrana pokovených otvorů a povrchů se speciálními povrchovými úpravami, jako jsou HAL, Au nebo Ag.

Na DPS se nanáší sítotiskem, popřípadě ručně. Po pokovení či zapájení se nepájivá maska odstraní sloupnutím nebo vodou o definované teplotě a tlaku. Poté se deska ručně doosadí mechanickými součástkami, které se dodatečně zapájí. [8]

2.5.3 Permanentní nepájivá maska

Permanentní nepájivá maska má ve většině případů zelenou barvu. Ochraňuje odhalené měděné vodiče před klimatickými vlivy okolí a před mechanickým poškozením, a navíc umožňuje snadnější optickou kontrolu desky. Její tloušťka se pohybuje od 12,5 μm do 100 μm. Podle typu nanesení rozlišujeme tekuté a tuhé nepájivé masky. [8] [22]

Tekutá permanentní nepájivá maska

- a. Sítotiskové – Masky se nanáší pomocí sítotisku s motivem; je to vhodné pro sériovou výrobu. Nevýhodou může být menší přesnost natisknuté masky, která je ovlivněna technologií tisku, protažením síta a sesazením síta s deskou plošných spojů. [22] [8]
- b. Fotocitlivé – Masky se získávají naexponováním, vyvoláním a následným vytvrzením nanesené vrstvy. Nanáší se elektrostaticky nebo navalováním. Přesnost motivu je dána především sesazením filmové matrice z desky. [22] [8]

Tuhá permanentní nepájivá maska

Tuhé permanentní masky jsou dražší než tekuté masky. Nanášejí se laminováním ve vakuovém laminátoru, což zabraňuje vzniku vzduchových kapes. [22]

2.6 Tavidla

Tavidla jsou látky, které jsou nedílnou součástí pájecích past (cca 10-15 % hmotnosti), při ručním pájení je buď součástí pájky nebo se přidává zvlášť. Součástí tavidel nesmí být žádné

látky nebezpečné zdraví či životnímu prostředí, tavidlo musí splnit požadavky na minimální dobu skladovatelnosti, musí být chemicky stálé a musí mít lehce odstranitelné zbytky. [8]

Jako vhodná tavidla se uvádí tzv. VOC-free (volatile organic compounds-free, tj. tavidla bez nestálé organické složky) tavidla neobsahující organické složky, které se vypařují při nízkých teplotách a unikají do atmosféry. VOC-free tavidla jsou nehořlavá, méně nebezpečná než alkohol a málo se odpařují. Nevýhodou VOC-free tavidel je, že obsahují vodu, která může v nevhodných podmínkách zmrznout a také mají větší povrchové napětí. Velikost povrchového napětí se dá zlepšit přidáním vhodného aditiva. [8] [23]

2.6.1 Funkce tavidla

Primární funkcí tavidla je odstranění nečistot a oxidů z povrchu pájeného kovu a také zabránění reoxidaci v průběhu pájení. Tavidlo také zlepšuje přenos tepla od zdroje k pájenému spoji a jeho rovnoměrné rozložení po celé pájecí ploše, snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a zvyšuje povrchové napětí povrchu, takže pájka se pak může snadno roztékat. Kromě toho má tavidlo vliv i na vlastnosti pájecí pasty, například na její lepivost a viskozitu. [8] [23]

2.6.2 Typy tavidel

Rozlišujeme tři typy tavidel – tavidla organická, anorganická a kalafunová.

Organická tavidla

Organická tavidla se dodávají ve formě pasty nebo kapaliny. Zbytky organických tavidel se dají rozpustit pomocí rozpouštědel na bázi vody a jsou tedy snadno odstranitelná. Organická tavidla mají lepší vlastnosti než kalafunová a využívají se především při pájení vlnou. [8] [9]

Anorganická tavidla

Anorganická tavidla se dodávají ve formě past nebo roztoků, příliš se ale nepoužívají, protože mají vysoký obsah soli a jejich zbytky jsou tak chemicky aktivní a vysoce korozivní. Jejich hlavní využití spočívá v neelektrických aplikacích. [8] [9]

Kalafunová tavidla

Kalafunová tavidla jsou založena na bázi pryskyřice; ta je většinou rozpuštěna v roztoku na alkoholové bázi. Aktivační teplota se pohybuje kolem 170 °C, což je ideální pro olovnaté pájení. Využití ovšem našla i u bezolovnatého pájení, kdy se k tavidlu přidávají vhodné aktivátory, které posunou aktivační teplotu k vyšším hodnotám. [8]

2.6.3 Složky tavidla

Složky tavidla můžeme dle funkce rozdělit do dvou typů – aktivátory a rozpouštědla. Kromě těchto základních složek se někdy přidávají další, které mají za úkol vhodně přiblížit vlastnosti použitého tavidla k dané aplikaci. Tyto přídatné složky nazýváme aditiva.

Aktivátory

Aktivátory jsou složky tavidla, jejichž funkce spočívá v narušení a odstranění oxidů z pájeného povrchu. Důsledkem použití aktivátorů je nezoxidovaný a snadno smáčitelný povrch vhodný pro pájení. Aktivátory můžeme rozdělit na méně agresivní, jako jsou např. kyselina chlorovodíková nebo kyselina fosforečná, a více agresivní, jako jsou např. kyselina olejová nebo sloučeniny kyseliny karboxylové. Méně agresivní aktivátory mají vyšší aktivační teplotu, na druhou stranu agresivnější aktivátory zanechávají korozivní zbytky, které je nutno odstranit. [24]

Rozpouštědla

Rozpouštědla jsou složky tavidla, které mají za úkol usnadnit proces nanášení tavidla. K odpaření složek rozpouštědla dochází již během předehřevu DPS, tedy před samotným pájecím procesem. Pokud ovšem nedojde k úplnému odpaření během předehřevu, pak se rozpouštědla odpařují během pájení, což vede k nežádoucímu rozstříkávání pájky či pájecí pasty. [24]

Aditiva

Aditiva jsou přídatné látky, která upravují vlastnosti tavidla. Používají se např. barviva, tenzidy pro snížení povrchového napětí, antishlukovací činidla pro pájení vlnou či stabilizátory pěny také pro pájení vlnou. [24]

2.7 Kvalita výsledného spoje

Pájený spoj je při provozu namáhán elektrickými i mechanickými silami a také tepelně. Je proto nutné dbát na jeho vysokou kvalitu a spolehlivost. Na kvalitu výsledného spoje má vliv velké množství faktorů, od použitého materiálu, přes druh použitého tavidla, vybraný proces pájení až po provozní podmínky. V této kapitole popíšu faktory, které mohou ovlivnit výslednou spolehlivost spoje; chyby, které mohou nastat ještě před samotným procesem pájení; chyby, objevující se vlivem nesprávně provedeného pájení a nakonec chyby, které vznikají v časově dlouhodobém horizontu a na které nemá vliv správnost provedení spoje.

2.7.1 Faktory ovlivňující výslednou kvalitu spoje

Pájka a její složení

Materiálové složení pájky (popř. pájecí pasty) definuje teplotu tání a tuhnutí, viskozitu a také smáčivost pájky. Dalším faktorem, který musíme vzít při volbě správného složení pájecí slitiny v potaz je různé množství nečistot a oxidů, které se z pájky uvolňují a které pak mohou snižovat povrchový odpor desky plošného spoje. Výběr vhodné pájecí pasty je tak jednou z nejdůležitějších otázek při plánování pájecího procesu. [9]

Použití tavidla

Tavidlo je běžnou součástí pájecích past, při ručním pájení se přidává manuálně, případně je obsaženo v pájce, pokud má pájka formu dutých trubiček. Různá tavidla mají různou aktivační teplotu a je tedy vhodné přiřadit dle této teploty správné tavidlo k použité pájce. Správně použité tavidlo pak očišťuje pájený povrch od nežádoucích oxidů, odstraňuje nečistoty a tím zlepšuje smáčivost povrchu. Nevýhodami tavidla je delší nutná doba pájení a voidy, které vznikají při špatném odpařování tavidla. [9]

Zvolená metoda a průběh pájení

Nejen špatně zvolený materiál pájecí pasty a tavidla, ale i zvolená metoda pájení, nastavená teplota přetavení či špatně nastavený teplotní profil pece výrazně ovlivňují výslednou kvalitu pájeného spoje. Důsledkem špatné volby zmíněných faktorů pak může být vznik chyb, jako např. zvýšená četnost voidů, tombstoning, nedostatečné přetavení pájky, kulička pájky vedle pájecí plošky, rozstříkávání tavidla nebo pájecí pasty apod. [9]

Podmínky skladování

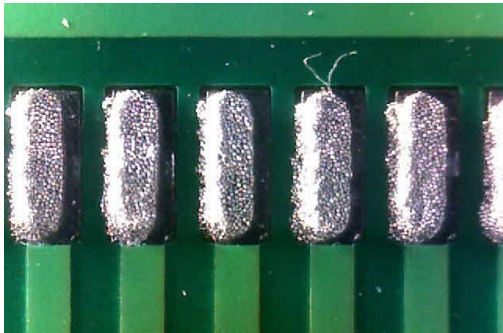
Nevhodné skladovací podmínky desek plošných spojů mohou mít za následek existenci velkého množství nečistot na povrchu DPS, delaminaci desek vlivem vlhkosti apod.

2.7.2 Chyby vzniklé při procesu pájení

Nejvíce chyb (až 65 % všech chyb objevujících se v procesu elektrotechnické montáže [10]) ovlivňující kvalitu spoje vzniká při samotném pájecím procesu. Proto by se celý proces měl pečlivě monitorovat a kontrolovat, abychom včas odhalili chyby a zamezili tak jejich dalším vlivům na funkčnost a spolehlivost celého systému. V této kapitole tedy uvedu nejčastější chyby, které se při pájení objevují.

Nedostatečné přetavení

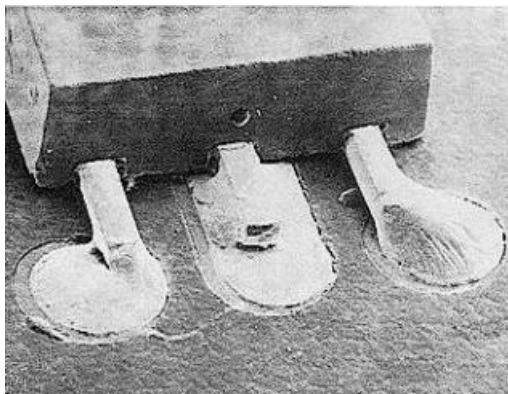
Zvolíme-li nedostatečnou maximální teplotu přetavení či špatně nastavíme celý teplotní profil pájení, pak nedojde ke správnému přetavení pájecí pasty. [7]



Obrázek 11. Nedostatečné přetavení [7]

Otevřené či chybějící spoje

Při této chybě zůstává výsledný spoj nekvalitně spojený či otevřený, což vede k výraznému zvýšení přechodového odporu, v krajních případech až k odpojení součástky. Příčinami této chyby je nedostatečná smáčivost, vysušení pájecí pasty, částečně ucpaná šablona, špatně nastavená teplota a doba předehřevu, kdy nedojde k plné aktivaci tavidla či nevhodně zvolený typ tavidla. [9]



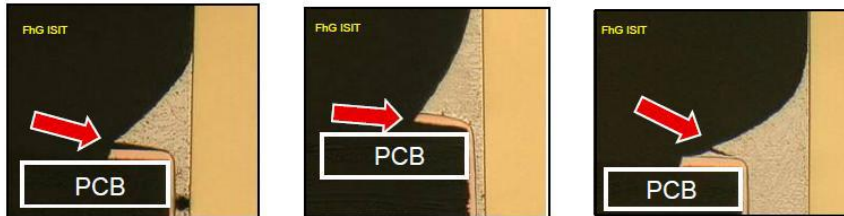
Obrázek 12. Chybějící spoj [8]

Špatné umístění součástky

Chyba vyskytující se převážně u ručního pájení, kdy dojde k nepřesnému osazení součástky na pájecí plošky. Ve většině případů se chyba napraví sama díky povrchovému napětí, kdy dojde k narovnání součástky do správné pozice. [9]

Zvedání menisku

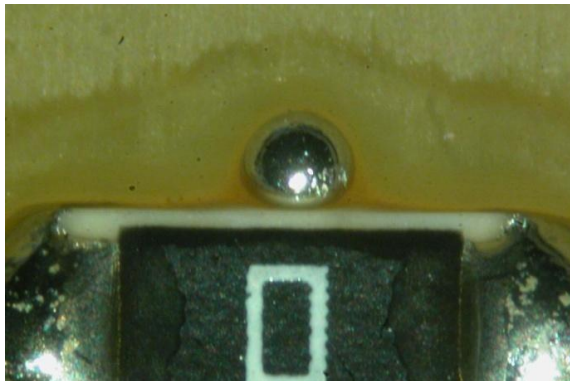
Zvedání menisku je chyba, která vzniká vlivem chladnutí pájky. Vlivem klesající teploty dochází ke zmenšování objemu pájky, což může mít za následek částečné prasknutí menisku, zvednutí pájky z pájecí plošky či zvedání pájecí plošky z desky plošných spojů. [10]



Obrázek 13. Zvedání menisku [10]

Kulička pájky vedle součástky

Pokud se při nanášení pasty dostane její část mimo pájecí plošku a přetavíme ji, vytvoří se na desce kulička pájky. Většinou je tato chyba způsobena nadměrným množstvím nanesené pájecí pasty, která je pak vytlačena osazovanou součástkou. [8]



Obrázek 14. Kulička pájky vedle součástky [10]

Thombstoning

Thombstoning, u nás zvaný efekt náhrobního kamene, je chyba, kdy se součástka po zapájení postaví na jednu svoji stranu a na druhé straně tak vzniká otevřený spoj. Důvodem, proč k tomuto efektu dochází, je nerovnoměrné množství pájecí pasty nanesené na padech, rozdílná plocha padů, rozdílnou tepelnou kapacitou padů nebo nerovnoměrnou distribucí tepla při přepájení. Jedna či více těchto chyb vedou k rozdílnému povrchovému napětí na padech. Působící povrchové napětí pak může osazenou součástku postavit na jednu stranu. [7] [9]



Obrázek 15. Thombstoning [8]

Mústek

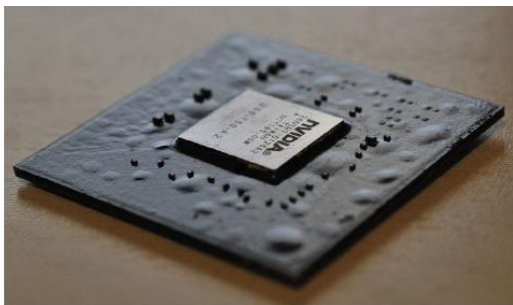
Mústek je chyba, kdy dojde k propojení dvou sousedních pájecích plošek, což vytvoří v podstatě zkrat a může vést k selhání celého systému. Protože se jedná o celkem častou chybu, jejíž počet s miniaturizací, a tedy snižováním vzdáleností mezi pady roste, je vhodné po zapájení použít vhodnou optickou kontrolu, např. SPI. K mústku dochází vlivem špatně navržené šablony, nevhodným tlakem na stěrku či nadměrným množstvím nanesené pájecí pasty. [8]



Obrázek 16. Mústek [9]

Popcorn efekt

Pokud je zapouzdřená součástka uskladněna v nevhodných podmínkách, může absorbovat vlhkost. Ta se při přetavování vlivem vysoké teploty začne rozpínat a vytvoří charakteristické boule, které mohou poškodit pouzdro. Mimo zapouzdřené součástky se tato chyba samozřejmě nevyskytuje. [9]



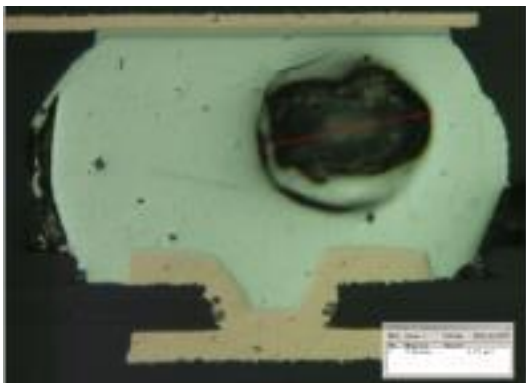
Obrázek 17. Popcorn efekt [9]

Voidy

Voidy jsou dutinky vzniklé v objemu pájeného spoje (popř. praskliny na povrchu spoje), které jsou vyplněny plynem, nekovovými materiály či vakuem. Při jejich velkém množství (v normě IPC-A-610D se uvádí 25 % z celkového objemu spoje) se významně snižuje spolehlivost spoje, jeho odolnost proti mechanickému namáhání, snižuje se plocha vodivé cesty, zvyšuje se elektrický odpor. Voidy mohou vznikat například během odpařování plynů tavidla nebo při příliš rychlém tuhnutí pájky, nicméně podrobnější proces vzniku voidů je stále předmětem výzkumů. [7] [8]

Podle tvaru, umístění a velikosti voidů rozlišujeme mikrovoidy, makrovoidy, micro-via voidy, shrinkage voidy, Kirkendallov voidy a pinhole voidy. [7]

Vzhledem k tomu, že jsou voidy zásadním tématem této diplomové práce, se jim budu více věnovat v kapitole 3.



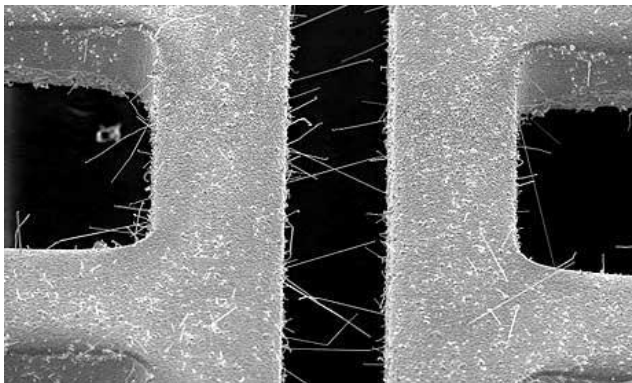
Obrázek 18. Typický příklad voidu [3]

2.7.3 Chyby vzniklé po procesu pájení

Některé chyby objevující se na deskách plošných spojů nevznikají při pájecím procesu, ale objevují se až v po určité časové prodlevě. Problém je, že ačkoliv jsou známy některé faktory, které tyto chyby ovlivňují, nedá se na deskách plošných spojů před uvedením do provozu poznat, zda se na ní daná chyba v budoucnu vyskytne.

Whiskery

Whiskery jsou spontánně rostoucí, elektricky vodivé, kovové krystalové struktury vláskovitého tvaru, které rostou z povrchu pájeného spoje. Délka whiskerů je většinou do 1 mm, ale vzácně se vyskytují i delší; průměr whiskerů se pohybuje okolo 1 μm . Průměr jednoho whiskeru většinou není dostatečný pro vytvoření zkratu, nicméně whiskery převážně vznikají ve větším množství. Frekvence výskytu této chyby značně vzrostla se zavedením bezolovnatého pájení, protože cín je typickým materiálem, ze kterého jsou whiskery tvořeny. Dalším faktorem, který výrazně ovlivňuje četnost výskytu whiskerů, je snížení vzdálenosti mezi pájenými spoji. Princip vzniku whiskerů není stále zcela jasný a na toto téma se vedou výzkumy. Jedna z nejpřesvědčivějších teorií tvrdí, že působením tlakové síly na cín začnou krystalová zrna podél jejich hranic klouzat a v krystalové mřížce se vytvoří volná místa, které jsou následně zaplněna atomy ze sousedních krystalových zrn. [7]



Obrázek 19. Whiskery [9]

Dendrity

Dendrity jsou kovové struktury stromovitěho tvaru. Dendrity mohou propojit sousedící pájecí plošky, pokud jsou na různých potenciálech, a tak způsobit zkrat až kolaps celého systému. Mezi faktory, které mají vliv na růst dendritické struktury, můžeme počítat teplotu a vlhkost okolí, typ použité povrchové úpravy pájecích ploch či materiál vodičů, použití ochranné nepájjivé masky či vzdálenost mezi elektrodami (tj. vodiče či pájecí plošky) s rozdílným potenciálem. Vzhledem k pokračujícímu trendu miniaturizace desek plošných spojů, a tedy menším vzdálenostem mezi pady, je růst dendritů stále více zkoumán. [8]



Obrázek 20. Dendrity [8]

2.7.4 Stárnutí materiálů

Stárnutí materiálu pájeného spoje je dáno především vlastnostmi intermetalické vrstvy. Protože k difuzi dochází i po ukončení pájecího procesu, ačkoliv v mnohem menší míře, dochází i ke zvyšování tloušťky intermetalické vrstvy. To vede ke zhoršení mechanických i elektrických vlastností spoje. Růst vrstvy je závislý na teplotě, s rostoucí teplotou dochází ke značnější difuzi. Závislost rychlosti růstu vrstvy na teplotě lze popsat rovnicí:

$$w(t) = w_0 + A \cdot t^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (2.4)$$

kde $w(t)$ – výsledná tloušťka intermetalické vrstvy po době t [μm]

w_0 – počáteční tloušťka [μm]

A – konstanta [ms^{-1}]

n – časový exponent rychlosti růstu [–]

Q – aktivační energie pro růst intermetalické vrstvy [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$]

R – univerzální plynová konstanta $8,314$ [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$]

T – termodynamická teplota [K]

[23]

2.7.5 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání způsobuje zhoršení mechanických vlastností spoje, může dojít až k mechanickému zničení celého spoje. Podle působení na spoj můžeme rozdělit mechanické namáhání na interní a externí. Interní namáhání je důsledkem vnitřních změn, například tepelným namáháním spoje a rozdílnou délkovou roztažností materiálů. Externí namáhání je namáhání vnějšími silami, např. vibrace, ohyb apod. [23]

2.7.6 Tepelné namáhání

Tepelné namáhání způsobuje nevratné děje (změny struktury, difuze) i vratné děje (změny rozměrů, ohyb). Spoj může teplo přijímat z okolí či může vznikat přímo v pájeném spoji jako ztrátové teplo protékajícího elektrického proudu. [23]

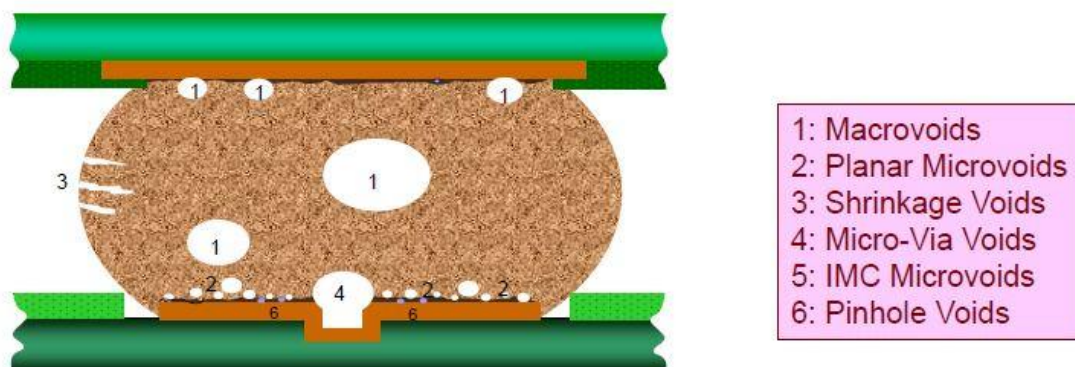
2.7.7 Proudové namáhání

Většina důsledků elektrického namáhání vzniká v důsledku vzniklého ztrátového tepla. V určitých případech, kdy je ve spoji extrémně vysoká proudová hustota (tj. více než 10^4 A cm^{-2}), může dojít k degradaci spoje vlivem srážek elektronů. [23]

3. Voidy

Voidy jsou dutiny, které vznikají uvnitř objemu pájeného spoje, obsahující vakuum, plyny, tekuté nekovové materiály nebo zbytky přírodních látek a tavidel. V důsledku výskytu voidů dochází ke zhoršování mechanické a tepelné odolnosti, což je problémové především u vysokovýkonových zařízení, u kterých protékají obvody vysoké proudy a vznikají tedy vysoké teploty. Protože voidy snižují objem vodivé cesty, zhoršuje se i elektrická vodivost spoje. Pokud objem voidů tvoří 25 % a více z celkového objemu spoje, pak je tento spoj kvalifikován jako vadný. Výskyt voidů je spjatý s přechodem na bezolovnaté pájení, bylo totiž vyzorováno, že bezolovnaté pájky způsobují jejich větší výskyt. Nejvíce vznikají při pájení přetavením. Mezi faktory, které mají na vznik voidů největší význam, patří tvar teplotního profilu při přetavování pájecí pasty, použitá povrchová úprava DPS, složení pájecí pasty a typ tavidla, geometrie pájeného spoje, tloušťka nanesené pasty při šablonotisku a další. Přesný vznik voidů je ovšem stále předmětem výzkumů. [6] [7]

Voidy lze obecně rozdělit do několika kategorií – makrovoidy, planární mikrovoidy, mikro-via voidy, shrinkage voidy, kirkendallové (IMC) voidy a pinhole voidy.



Obrázek 21. Typické umístění všech druhů voidů v objemu pájeného spoje [3]

3.1 Makrovoidy

Jedná se o voidy generované vypařováním nestálých složek tavidla a pájecí pasty. Nacházejí se v celém objemu spoje, a to i na rozhraní pájky a pájecího padu. V průměru mají cca 100 μm – 300 μm , nejvíce se vyskytují při užívání SAC, SnPb a SnBiX past. Také se nazývají procesní voidy, protože vznikají při samotném procesu pájení, při přetavování pájecí pasty. Jedná se o voidy s nejvyšší koncentrací výskytu. [3,6]



Obrázek 22. Makrovoidy v pájeném spoji [3]

Příčinou vzniku makrovoidů jsou uvězněné plyny ve spoji, které neměly dostatečný čas na opuštění pájky během přetavovacího procesu ve chvíli, kdy je pájka roztavená. Zdrojem těchto plynů mohou být:

- chemické ingredience, které se uvolňují během přetavovacího procesu, když je teplota těchto ingrediencí nad bodem varu
- absorbovaná vlhkost v laminacích DPS, která se uvolní při 100 °C
- vodní pára, způsobená redukcí oxidů na povrchu vývodů pájených součástek; tyto oxidy jsou redukovány organickými složkami tavidla [3]

Pokud chceme dosáhnout minimalizace generace makrovoidů, je nutné kontrolovat kritické parametry v těchto oblastech:

- pájecí pasta
- přetavovací proces
- DPS
- součástky
- další [3]

Kritické parametry pájecí pasty

- rozpouštědlo – množství, teplota odpařování a nestálost určují množství generovaných makrovoidů; pro omezení vzniku makrovoidů by se většina rozpouštědel v pájecí pastě měla vypařit při teplotách nižších, než je teplota přetavení pasty
- objem pasty na pájecím padu – větší objem pájecí pasty vede k většímu objemu přítomných rozpouštědel, a tedy k vyššímu výskytu makrovoidů
- charakteristika zrn pájecí pasty – více zoxidovaná zrna vedou ke zvýšení generace makrovoidů

- tavidlo – větší aktivita a množství vede k rychlejší, dokonalejší redukci oxidů pasty, což způsobí menší výskyt makrovoidů, protože výpary vzniklé při oxidaci mají více času na opuštění roztavené pasty [3]

Kritické parametry přetavovacího procesu

- teplotní profil:
 - maximální teplota profilu – vyšší teplota snižuje povrchové napětí na povrchu pájky a tím umožní větší mobilitu pro makrovoidy, což může vést k jejich úniku ze spoje
 - doba trvání zkapalněné pájky – delší doba vede ke zvýšení pravděpodobnosti úniku makrovoidů z pájky
 - doba aktivace tavidla – většina nestálých chemických sloučenin se uvolňuje během této doby, proto musí být dostatečně dlouhá
- okolní atmosféra při přetavení – atmosféra s menším obsahem kyslíku produkuje méně oxidů na povrchu pájky během přetavovacího procesu, a to vede k nižší generaci makrovoidů, protože dochází k absenci oxidové kůry na povrchu pájky při tavení; tato oxidová kůra může bránit úniku voidů z roztavené pájky [3]

Kritické parametry DPS a součástek

- povrchová úprava – nadeponované nestálé organické sloučeniny povrchové úpravy způsobují větší výskyt voidů
- velikost a geometrie pájecích padů
- koncentrace oxidů na pájeném povrchu – vyšší koncentrace oxidů, většinou oxidů mědi, vede ke zvýšení počtu makrovoidů
- znečištění povrchu padů – znečištění může způsobit navýšení koncentrace makrovoidů:
 - vytvořením nepáživého povrchu, na kterém se pak mohou makrovoidy uchytit
 - generováním těkavých plynů při pájecí teplotě [3]

Obecné kritické parametry

- okolní teplota a vlhkost – nadměrná teplota a vlhkost způsobují oxidaci pájecí pasty
- znečištění padů vzniklé během výroby DPS – vede k vytvoření nesmáčitelných ploch na povrchu DPS, na kterých se pak makrovoidy zachytávají [3]

3.2 Planární mikrovoidy

Planární mikrovoidy jsou voidy, které mají v průměru méně než 25 μm a vyskytují se vždy na rozhraní pájecího padu a povrchové úpravy. Jejich výskyt je spjat s použitou povrchovou úpravou, nejčastěji se vyskytují u povrchové úpravy imerzním stříbrem, ale byly zpozorovány i u jiných typů povrchových úprav (např. OSP, ENIG). Více se vyskytují na DPS s nepájivou maskou, ale v menší míře jsou i na DPS bez ní. Nezpůsobují zhoršení elektrických vlastností spoje, ale výrazně snižují jeho mechanickou pevnost. [3]



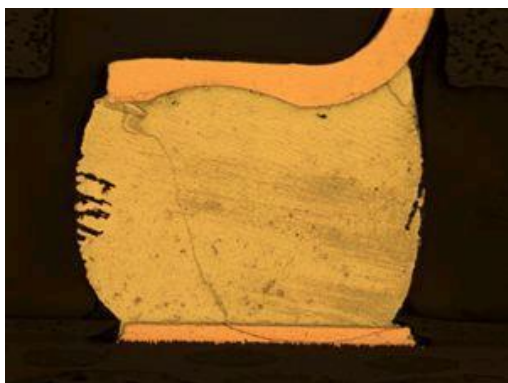
Obrázek 23. Planární mikrovoidy [3]

Příčinou vzniku planárních mikrovoidů jsou tzv. Cu jeskyně, které vznikají galvanickou korozi při nanášení materiálu povrchové úpravy. Galvanická koroze je závislá na stavu mědi na povrchu pájecího padu a na geometrii DPS, proto je pro minimalizaci vzniku planárních mikrovoidů nutná přísná kontrola kritických hodnot při výrobě DPS a při aplikování povrchové úpravy. [3]

Postup vzniku planárních makrovoidů se dá vztáhnout k teplotě při přetavování pasty. Před samotným započítím přetavování je teplota stejná, jako teplota okolí, pájecí plošky jsou pokryty pastou a osazeny součástkami, na padech existují Cu jeskyně. Po započítí pájecího procesu začne teplota růst. Při teplotě nižší, než je teplota přetavení, se aktivuje tavidlo a redukuje oxidy stříbra na povrchu povrchové úpravy z imerzního stříbra. Při teplotě přetavení se taví pájecí pasta a imerzní stříbro se rozpouští, roztavená pájka reaguje s mědí a začíná se tvořit intermetalická vrstva. Při teplotě nad teplotou přetavení (ale stále před bodem maximální teploty) začnou být oxidy mědi z Cu jeskyní redukovány tavidlem a tím se vytváří planární mikrovoidy. Některé ze vzniklých mikrovoidů stihnou opustit pájku ještě v době, kdy je pájka roztavená, ale při snižování teploty začne pájka tuhnout a mikrovoidy jsou tím uvězněné. [3]

3.3 Shrinkage voidy

Shrinkage voidy, také zvané Sink Holes nebo Hot Tears, jsou podlouhlé voidy dendritické struktury, které vznikají při tuhnutí pájky (nejčastěji se jedná o SAC pájky). Nejedná se ovšem o klasické praskliny na povrchu spoje, protože shrinkage voidy se již dále nezvětšují při nadměrném tepelném a mechanickém namáhání. Kritickým momentem pro vznik shrinkage voidů je tuhnutí spoje, kdy při pomalém chlazení dochází k nadměrnému srážení pájky v roztaveném stavu, proto jakékoliv narušování a namáhání spoje při chladnutí vede ke zvýšení koncentrace a velikosti vzniklých shrinkage voidů. Tyto voidy nicméně nesnižují výrazně mechanickou odolnost. Lze je odstranit řízeným ochlazováním spoje. [3,6]



Obrázek 24. Shrinkage voidy [3]

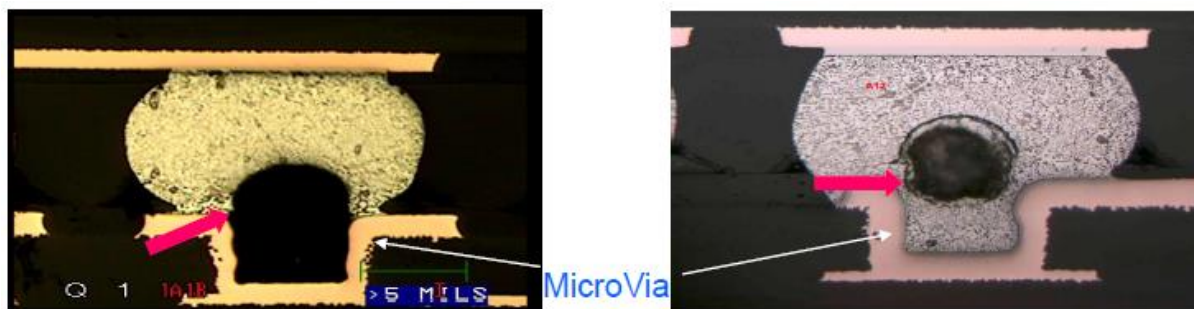
3.4 Mikro-via voidy

Tyto voidy se vyskytují pouze u tzv. mikro-via spojů, které se používají u vícevrstvých DPS, kde slouží jako vodivé propojení mezi jednotlivými vrstvami. V průměru mají více než 100 μm , záleží ovšem na velikost i a typu mikro-via. Vznikají také při procesu přetavování, kdy se v oblasti mikro-via rozpínají plyny:

- vzduch z oblasti mikro-via
- vodní pára vzniklá při redukci oxidů pájky
- nestálé složky pájecí pasty
- organické chemikálie obsažené v materiálu povrchové úpravy mikro-via

Tyto plyny jsou v oblasti mikro-via uvězněny a nemají kudy uniknout, čímž vznikají voidy.

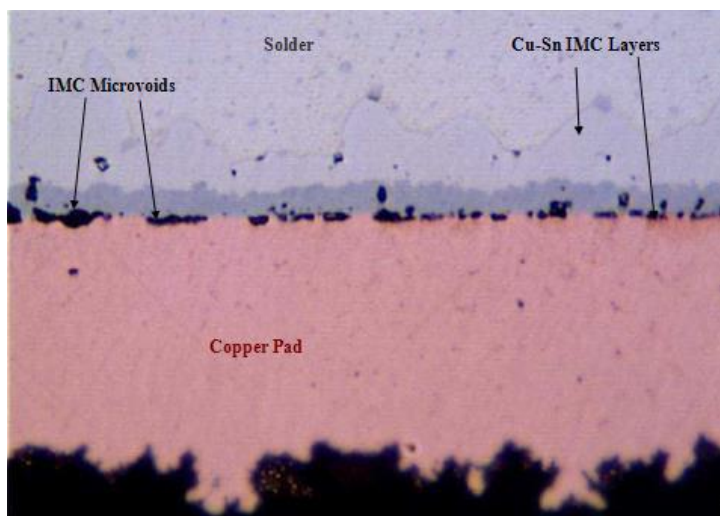
Pro minimalizaci mikro-via voidů je vhodné vícenásobné nanášení pasty nebo použití pasty s menšími zrny, oboje umožní lepší vyplnění oblasti mikro-via, případně je vhodné při výrobě DPS částečné nebo úplné pokovení mikro-via otvoru mědí, čímž se sníží nebo úplně eliminuje prostor pro zachycení plynů. [3,7]



Obrázek 25. Mikro-via voidy [3]

3.5 Kirkendallové voidy

Kirkendallové voidy, také nazývané IMC voidy, se nachází na rozhraní mezi intermetalickou vrstvou a mědí nebo přímo v intermetalické vrstvě. Vznikají poté, co jsou spoje vystaveny vysoké teplotě (cca nad 100 °C) po dlouhou dobu (nad 48 hodin). Jejich přesný vznik je stále předmětem výzkumu, předpokládá se ovšem, že by je mohly způsobovat organické nečistoty obsažené v mědi, které se do mědi dostanou během nanášení mědi při výrobě DPS. IMC voidy jsou nezávislé na typu použité povrchové úpravy a mají nezanedbatelný vliv na mechanickou pevnost a spolehlivost spoje. [3]

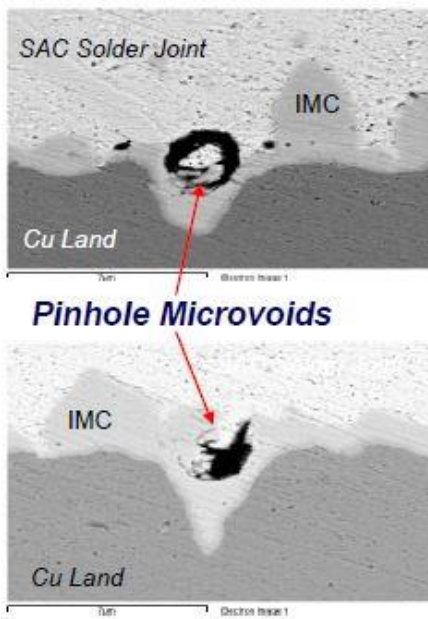


Obrázek 26. Kirkendallové (IMC) voidy [3]

3.6 Pinhole voidy

Pinhole voidy mají v průměru 1-3 μm a nacházejí se uvnitř intermetalické vrstvy, těsně nad IMC vrstvou nebo na rozhraní IMC vrstvy a mědi pájecí plošky. Byly zpozorovány u pájecích past SnPb a SAC. Mají přímou spojitost s tzv. pinholes, což jsou malé prasklinky ve vrstvě mědi pájecí padů, které vznikají při nesprávně výrobě DPS. Ačkoliv mají relativně malé rozměry, pokládají se za významný risk pro mechanickou spolehlivost spoje, právě proto, že se vyskytují

v oblasti IMC vrstvy nebo na ní, což je oblast, ve které vznikají trhlinky při nadměrném tepelném a mechanickém namáhání, přičemž tyto trhlinky se mohou snadněji uzavírat a šířit právě pomocí pinhole voidů. [3]



Obrázek 27. Pinhole voidy [3]

4. Průběh experimentální části

První fáze experimentální části spočívala v realizaci samotných vzorků, která začala určením zkoumaných podmínek, návrhem a objednáním DPS. Dále bylo nutné tyto desky osadit součástkami a přetavit pájecí pastu v přetavovací peci. Následně se hotové vzorky zrentgenovaly a na výsledných snímcích jsem vyznačil vzniklé voidy pomocí programu NIS-Elements, který mi jako výsledek vygeneruje plochu a průměr označených voidů, tedy data, která následně použiji k analýze voidů a vyvození závěrů.

4.1 Použité přístroje a programy

SMT Manipulator



Obrázek 28. SMT Manipulator M01

SMT manipulator M01 slouží ke zjednodušení osazování DPS drobnými součástkami. Pracuje na principu podtlaku, který se vytváří na osazovací hlavě a který slouží k přidržení součástky. Hlava přístroje je pohyblivá v osách x, y i z, a navíc je možné se součástkou otáčet, což umožňuje snadné umístění na pájecí pady. Po usazení součástky do pájecí slitiny je součástka z hlavy uvolněna díky tomu, že adhezní síla mezi součástkou a pájecí pastou je vyšší než síla držící součástku na hlavě.

Přetavovací tunelová pec



Obrázek 29. Přetavovací tunelová pec Mistral 260 [32]

Pro přetavení DPS s nanesenou pájecí pastou jsem použil třízónovou tunelovou pec Mistral 260. Pec je vybavena dotykovým displejem pro nastavení pájecího procesu, tj. nastavení teploty jednotlivých zón, rychlost dopravníku apod. Na horní straně pece je dvojitě, tepelně izolující sklo, přes které se dá sledovat celý proces přetavení. [25]

Rentgenový systém



Obrázek 30. Rentgenový systém GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T [31]

Pro získání RTG snímků jsem využil přístroje GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T, který umožňuje rentgenování většího množství vzorků najednou pomocí nastavitelného maticového algoritmu. Tato možnost ušetří velké množství času, jen je nutné vložit do stroje vzorky v maticové struktuře, kterou je nutné jasně definovat, aby poté nemohlo dojít k záměně výsledných snímků. Výsledkem jsou poté RTG snímky dle nastavení, v tomto konkrétním případě se jednalo o snímky celé DPS a každé jednotlivé součástky.

Binokulární lupa



Obrázek 31. Binokulární lupa HAWK DUO QC-5000 [32]

Binokulární lupa od společnosti Vision Engineering pochází ze série HAWK a je dodávána společně s programem QC-5000, pomocí kterého je možné zobrazovat zkoumaný objekt na počítači. Lupa má vyměnitelné čočky, díky kterým je možné dosáhnout desetinásobného až tisícinásobného zvětšení. Tuto binokulární lupou jsem využil při zkoumání roztékavosti tavidel. [32]

Konfokální mikroskop



Obrázek 32. Konfokální mikroskop VK-X1000 [34]

Laserový konfokální mikroskop VK-X1000 od společnosti Keyence umožňuje bezkontaktní a plně automatizované měření profilu, drsnosti a tloušťky zkoumaného objektu, a to s rozlišením v řádech desítek nanometrů. Zkoumaným objektem může být těleso

jakéhokoliv tvaru či materiálu. Výsledný profil je mikroskop přes dodávaný software schopen zobrazit na 3D mapě. [34]

4.2 Použité pájecí pasty

Na vzorky jsem použil dva typy pájecích past, které se liší jen v typu použitého tavidla. Důvodem k tomu je, že v rámci experimentální části diplomové práce chci zkoumat mj. zda má na vznik dutinek ve spojích vliv i použité tavidlo. Použitou pastou byla SAC305 M8, resp. SAC305 NC257-2, které obsahují 3 % stříbra, 0,5 % mědi a zbytek pasty je tvořen cínem. [26] [27]

Tabulka 4. Charakteristika použitých past [7]

Výrobce	AIM	AIM
Typ	Bezolovnatá	Bezolovnatá
Složení	SAC 305	SAC 305
Označení	M8	NC257-2
Obsah kovových částic	88,5 %	88,5 %
Typ tavidla	Přírodní pryskyřice – ROL1	Přírodní pryskyřice – ROL0
Teplota přetavení	230 °C – 245 °C	230 °C – 245 °C
Viskozita	500 – 1000 Kcps	500 – 1000 Kcps

Tavidlo typu ROL0 znamená, že materiál tavidla je rosin, zbytky tavidla jsou chemicky neaktivní, nekorozivní, nevodivé a neobsahují žádné halogenidy. Většinou se tedy nechávají na povrchu DPS, pokud je nutné je odstranit, pak je potřeba použít vhodné rozpouštědlo, protože tavidlové zbytky nejsou rozpustitelné ve vodě. Tavidlo typu ROL1 se takřka neodlišuje od typu ROL0, rozdíl je pouze v existenci halogenidů v tavidle, je jich tam ovšem maximálně 0,15 % váhy pájky. Přesné složení tavidel není zjistitelné, protože se jedná o výrobní tajemství. [7] [28] [33]

4.3 Postup přípravy vzorků

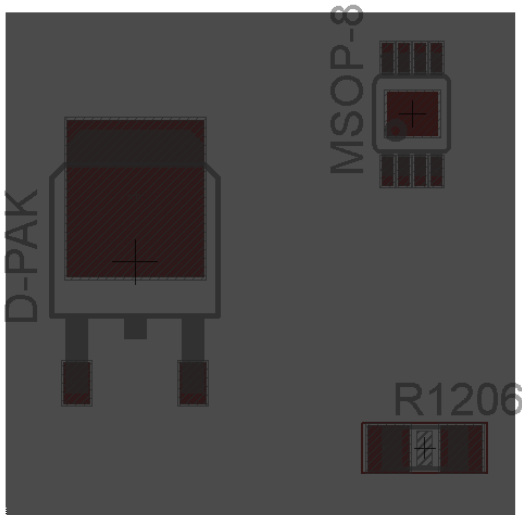
Nejprve jsem si musel sepsat kombinační tabulku vlivů, které budu v rámci diplomové práce zkoumat, aby se mohl objednat správný počet vzorků. Zkoumané vlivy jsou: Povrchová úprava (ENIG, HAL), nepájivá maska (bez masky a tři druhy masek s různou drsností), pájecí pasta (SAC 305 M8, SAC 305 NC257-2), tloušťka šablony (dvě různé tloušťky) a plocha vývodu součástek. Pro každou kombinaci jsem potřeboval objednat 10 ks desek – 8 ks na analýzu voidů a 2 ks na analýzu roztékavosti tavidla. Celkově bylo tedy potřeba objednat 320 ks desek plošných spojů. Dále bylo potřeba objednat součástky, kterými budu desky osazovat. Nakonec jsem vybral

3 typy součástek – odpor R1206, součástku s pouzdrém MSOP8 a součástku s pouzdrém DPAK, které všechny mají poměrně velkou pájecí plochu.

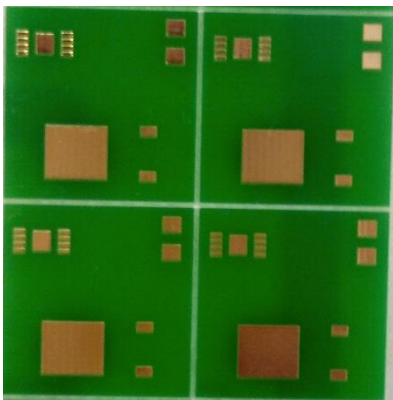
Tabulka 5. Kombinační tabulka zkoumaných vlivů

Číslo kombinace	Povrchová úprava	Maska	Pájecí pasta	Tloušťka šablony d [μm]
1	ENIG	ZELENÁ	SAC305 NC257-2	150
2	ENIG	ZELENÁ	SAC305 NC257-2	100
3	ENIG	ZELENÁ	SAC305 M8	150
4	ENIG	ZELENÁ	SAC305 M8	100
5	ENIG	BEZ MASKY	SAC305 NC257-2	150
6	ENIG	BEZ MASKY	SAC305 NC257-2	100
7	ENIG	BEZ MASKY	SAC305 M8	150
8	ENIG	BEZ MASKY	SAC305 M8	100
9	HAL	ZELENÁ	SAC305 NC257-2	150
10	HAL	ZELENÁ	SAC305 NC257-2	100
11	HAL	ZELENÁ	SAC305 M8	150
12	HAL	ZELENÁ	SAC305 M8	100
13	HAL	BEZ MASKY	SAC305 NC257-2	150
14	HAL	BEZ MASKY	SAC305 NC257-2	100
15	HAL	BEZ MASKY	SAC305 M8	150
16	HAL	BEZ MASKY	SAC305 M8	100
17	ENIG	ČERNÁ	SAC305 NC257-2	150
18	ENIG	ČERNÁ	SAC305 NC257-2	100
19	ENIG	ČERNÁ	SAC305 M8	150
20	ENIG	ČERNÁ	SAC305 M8	100
21	ENIG	BÍLÁ	SAC305 NC257-2	150
22	ENIG	BÍLÁ	SAC305 NC257-2	100
23	ENIG	BÍLÁ	SAC305 M8	150
24	ENIG	BÍLÁ	SAC305 M8	100
25	HAL	ČERNÁ	SAC305 NC257-2	150
26	HAL	ČERNÁ	SAC305 NC257-2	100
27	HAL	ČERNÁ	SAC305 M8	150
28	HAL	ČERNÁ	SAC305 M8	100
29	HAL	BÍLÁ	SAC305 NC257-2	150
30	HAL	BÍLÁ	SAC305 NC257-2	100
31	HAL	BÍLÁ	SAC305 M8	150
32	HAL	BÍLÁ	SAC305 M8	100

DPS jsem navrhoval v programu Eagle 6.5.0. Návrh jsem vytvořil za pomoci layoutů součástek.

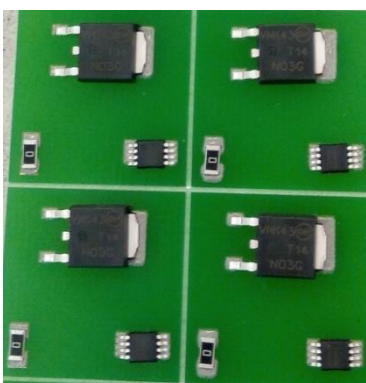


Obrázek 33. Layout DPS v programu Eagle



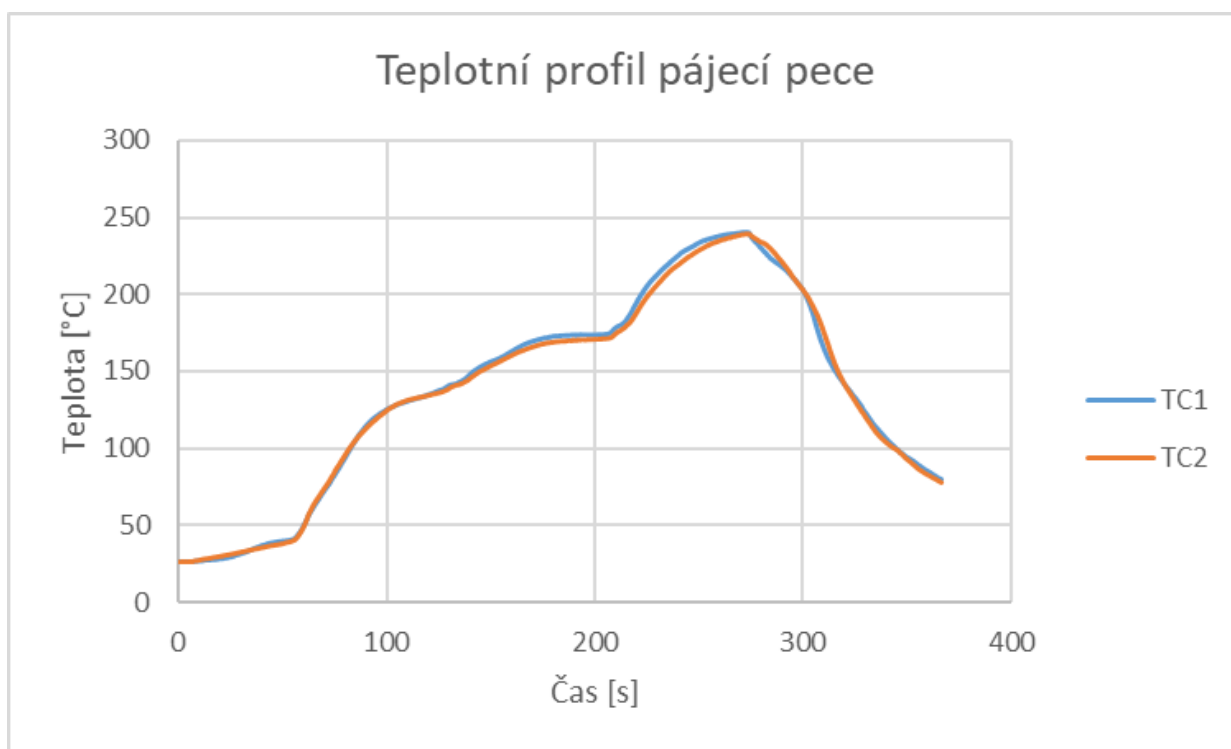
Obrázek 34. Vyrobené DPS (zde ENIG s nepájivou maskou)

Nejprve jsem na desky musel nanést pájecí pastu. To jsem udělal pomocí šablonového tisku, a to pomocí dvou šablon o různých tloušťkách. Následně jsem většinu desek osadil pomocí SMT manipulátoru a následně nechal přetavit pájecí pastu v tunelové peci Mistral 260.



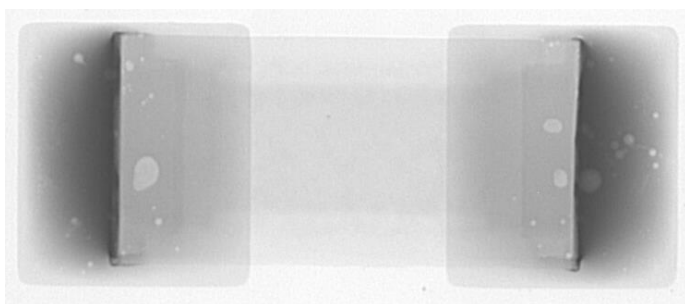
Obrázek 35. Desky osazené součástkami pomocí SMT manipulátoru

Přetavovací teplota pájecích past SAC305 se pohybuje v rozmezí 217-219 °C, čemuž bylo nutné přizpůsobit teplotní profil třízónové pece. Teplotní profil byl změřen pomocí dvou různých teplotních čidel (TC1 a TC2).



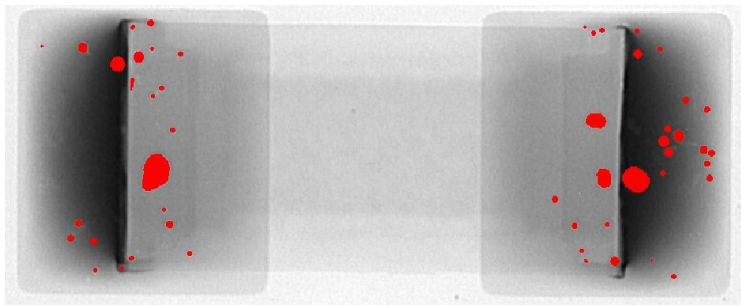
Graf 2. Teplotní profil pájecí pece

Osazené a přetavené součástky poté prošly rentgenovým systémem GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T, kde jsem jako výsledek dostal RTG snímky všech DPS a zároveň detailnější snímky všech součástek na každé desce. Světlá místa na snímcích vyznačují voidy v pájeném spoji.



Obrázek 36. RTG snímek odporu R1206 (zde vzorek č. 1 z kombinace č. 29)

Rentgenové snímky jsem poté vyhodnotil pomocí programu NIS-Elements 3.10 SP3. Tento program umožňuje provést analýzu snímku a na základě rozdílu barev označit světlá místa, reprezentující voidy. Jako výsledek tento program vygeneruje námi požadované plochy a počet takto označených míst. Kvůli nepřesnostem programu ovšem bylo nutné každý snímek ručně dokorigovat.



Obrázek 37. RTG snímek odporu R1206 s vyznačenými voidy pomocí programu NIS-Elements (zde vzorek č. 1 z kombinace č. 29)

5. Vyhodnocení experimentální části

V této kapitole se zaměřím na vyhodnocení dat získaných z experimentální části, tj. počet a plocha mikrovoidů a makrovoidů vzniklých na zkoumaných vzorcích a pokusím se vyvodit závěry, jaký vliv mají na voidovitost zkoumané parametry, tedy typ povrchové úpravy, tavidlo pájecí pasty, typ nepájivé masky, tloušťka šablony a plocha vývodu součástky.

5.1 Tabulka naměřených hodnot

Nejprve bylo potřeba rozdělit naměřené voidy na mikrovoidy a makrovoidy, k tomu jsem určil jako maximální průměr mikrovoidu $100\ \mu\text{m}$. Dále jsem pro každou kombinaci určil ze všech vzorků průměrné plochy mikrovoidů a makrovoidů a průměrný počet mikrovoidů a makrovoidů vztažených na $1\ \text{mm}^2$.

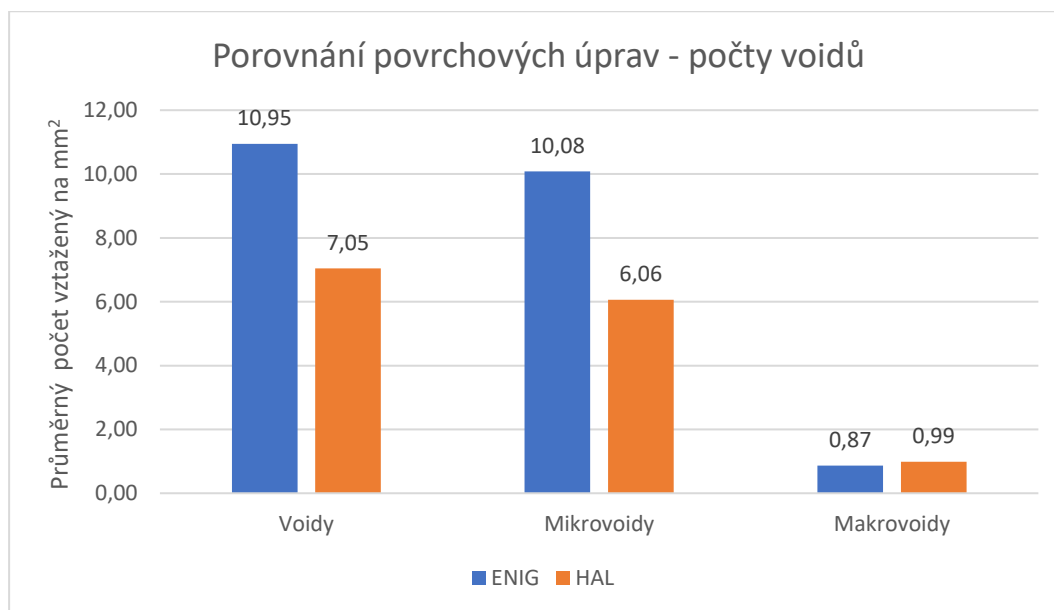
Tabulka 6. Tabulka naměřených průměrných ploch voidů a průměrného počtu voidů na mm²

Číslo kombinace	Průměrná plocha mikrovoidů [μm ²]	Průměrná plocha makrovoidů [μm ²]	Průměrný počet mikrovoidů na mm ²	Průměrný počet makrovoidů na mm ²
1	2411,95	78536,21	10,256	0,918
2	2596,89	77333,23	9,548	0,808
3	2310,68	155049,27	11,547	0,808
4	2551,63	116040,87	10,286	1,069
5	2165,43	103545,53	10,583	0,680
6	2351,89	109022,53	9,793	0,551
7	2432,44	145607,05	8,690	0,814
8	2441,89	136975,78	10,000	0,728
9	2769,09	107502,65	7,112	1,003
10	2926,58	105028,37	7,075	1,199
11	2794,61	133047,88	6,373	1,210
12	2854,39	150835,89	6,102	0,940
13	2853,90	71607,38	6,848	1,124
14	2848,70	87624,09	5,958	0,943
15	2921,94	164318,69	5,100	1,185
16	2822,25	83608,68	6,531	1,075
17	2764,54	35821,03	9,006	1,623
18	2387,30	94769,06	8,510	0,753
19	2252,82	110417,43	12,074	0,859
20	2186,78	121570,41	10,482	0,919
21	2694,70	41484,04	8,402	0,894
22	2397,03	74114,01	9,311	0,704
23	2289,34	105154,95	11,232	0,831
24	2134,68	127703,19	11,613	0,908
25	2816,80	83261,15	6,166	0,880
26	2759,56	76194,49	5,690	0,910
27	2772,90	91366,04	6,275	0,994
28	2571,07	78608,93	5,785	1,006
29	2777,45	56841,95	5,553	0,966
30	2914,08	77716,53	5,119	0,741
31	2733,16	99270,25	5,706	0,806
32	2598,74	79865,54	5,533	0,857

5.2 Vyhodnocení vlivu typu povrchové úpravy

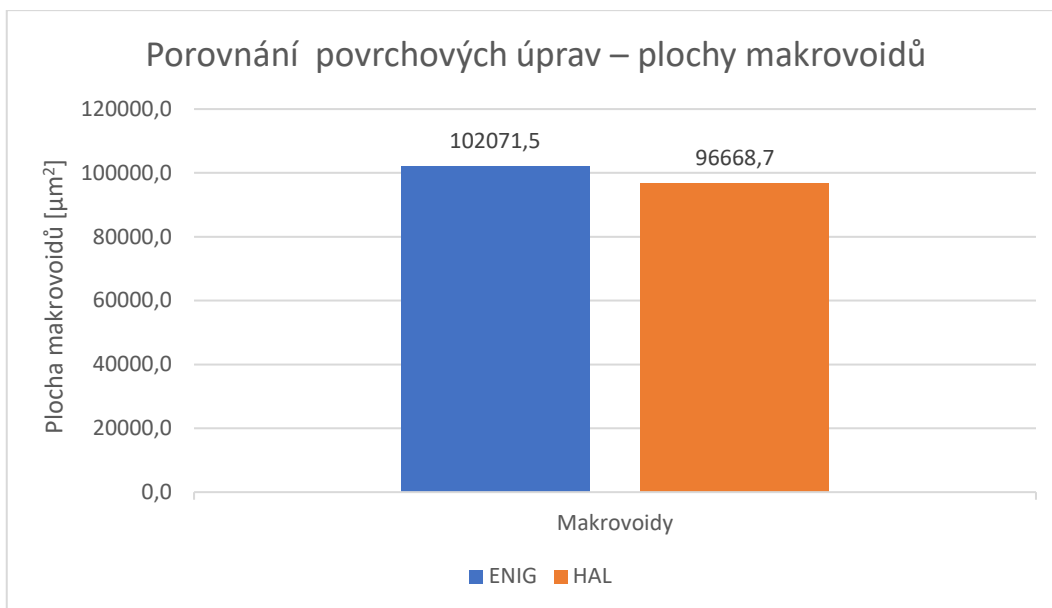
Jedním z faktorů, jejichž vliv na vznik voidů jsem zkoumal, byl typ použité povrchové úpravy. Z toho důvodu byla polovina vzorků vyrobena s povrchovou úpravou ENIG a druhá polovina s povrchovou úpravou HAL. Mohlo by se namítnout, že zkoumání vlivu u pouhých dvou typů povrchových úprav mnoho osvětlení do problematiky nevnese, avšak cílem bylo spíše posoudit, zda použitá povrchová úprava vůbec může mít na voidovitost spoje vliv.

Pro zjištění vlivu jsem z naměřených dat sestrojil sloupcové grafy, ve kterém jsou přímo porovnávány voidy na DPS s úpravou ENIG a HAL. Na prvním grafu jsou vždy zaneseny průměrné počty voidů, makrovoidů a mikrovoidů, vztažené na 1 mm². Důvodem vztažení na 1 mm² bylo, že jsem na DPS měl osazeno více druhů součástek a každá měla jiné rozměry. Na druhém grafu jsou zaneseny k porovnání průměrné plochy makrovoidů na posledním grafu jsou zaneseny průměrné plochy mikrovoidů.



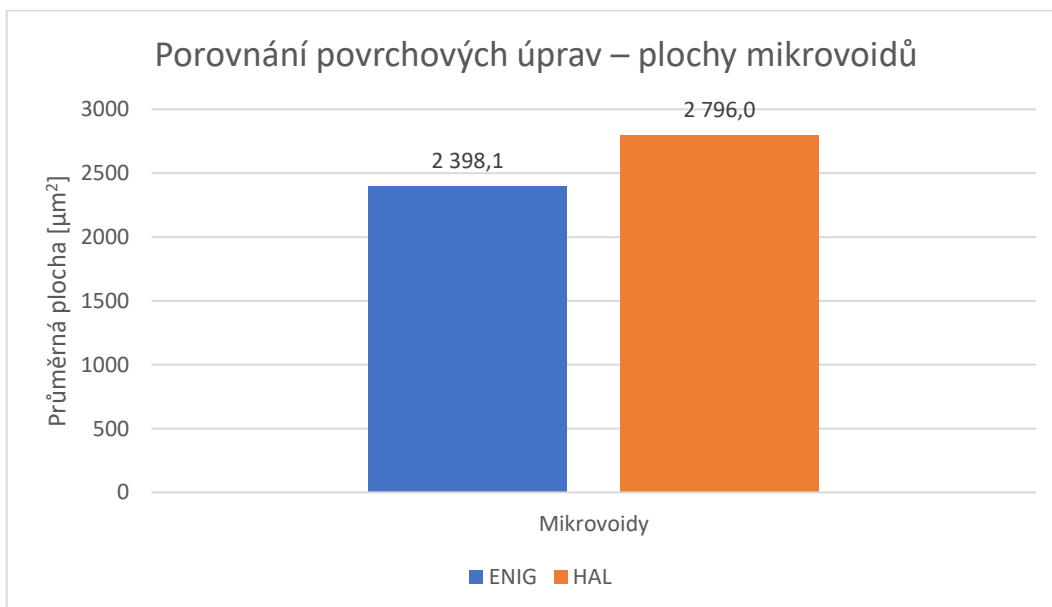
Graf 3. Porovnání povrchových úprav – počty voidů

Z grafu č. 4 jasně vyplývá, že použitá povrchová úprava má na voidovitost výsledného spoje výrazný vliv. Zatímco u povrchové úpravy HAL vzniklo v průměru pouze 7,05 voidů na mm², u úpravy ENIG vzniklo v průměru 10,95 voidů na mm², rozdíl mezi nimi činí 3,9 voidů na mm², tj. cca 35,6 %. Pokud voidy rozdělíme na mikrovoidy a makrovoidy, pak zjistíme, že tento vliv je daleko více znatelný u mikrovoidů, kde u úpravy HAL vzniklo v průměru 6,06 voidů na mm², zatímco u úpravy ENIG 10,08 voidů na mm² (rozdíl 4,02 voidů na mm², tedy zaokrouhleně 39,9 %). Naopak u makrovoidů je rozdíl výrazně menší. Je pravda, že vzhledem k tomu, že makrovoidy mají výrazně větší plochu než mikrovoidy, tak je jejich průměrný počet vztažený na 1 mm² značně menší, než je tomu u mikrovoidů, a tedy i rozdíly mezi různými faktory budou u makrovoidů menší. Nicméně rozdíl mezi úpravou HAL a ENIG v případě průměrného počtu makrovoidů na mm² je pouze 0,12 makrovoidů na mm² (tj. cca 12,1 %), z čehož se dá usuzovat, že povrchová úprava má vliv pravděpodobně na vznik mikrovoidů i makrovoidů, nicméně u makrovoidů je tento vliv velmi malý.



Graf 4. Porovnání povrchových úprav – plochy makrovoidů

Na grafu č. 5 je zanesena k porovnání průměrná plocha makrovoidů u úpravy ENIG a HAL. U pájených spojů s povrchovou úpravou ENIG vznikly makrovoidy s vyšší plochou, a to v průměru o 5402,8 μm², tedy zhruba o 5,3 %. Vzhledem k tomu, že růst voidů je dán mnoha faktory, není toto procento dostatečně velké na to, abych mohl určit, zda se jedná o vliv použité povrchové úpravy či zda je tento rozdíl dán jinými faktory. Jako hranici rozpoznatelnosti vlivu jsem si určil hodnotu 10 %.



Graf 5. Porovnání povrchových úprav – plochy mikrovoidů

Na grafu č. 6 je viditelné, že u průměrné plochy mikrovoidů je rozdíl znatelnější, než je tomu u plochy makrovoidů, konkrétně je mezi úpravou ENIG a HAL rozdíl $397,9 \mu\text{m}^2$, tedy zhruba 14,2 %. Dá se tedy předpokládat, že typ povrchové úpravy má vliv na plochu mikrovoidů.

5.3 Vyhodnocení vlivu typu nepájivé masky

Vzhledem k tomu, že nepájivá maska se nanáší pouze mimo pájecí plošky, tak by na voidovitost pájky neměla mít přímý vliv. Pravdou ale je, že různé typy nepájivých masek mají různé drsnosti povrchů, což vede k různé roztékavosti tavidla pájecí pasty. Dá se uvažovat, že čím větší bude drsnost povrchu, tím více se tavidlo rozteče a tím méně tavidla zbyde v pájecí pastě, kde se poté podílí na vzniku voidů. K potvrzení této domněnky jsme provedli měření drsnosti všech použitých typů nepájivé masky a také měření roztékavosti tavidla na všech kombinacích.

5.3.1 Měření drsností a roztékavostí tavidel

Měření drsnosti bylo provedeno pomocí konfokálního mikroskopu VK-X1000 od společnosti Keyence, který umožňuje měřit drsnost hned v několika řezech najednou, čímž zpřesňuje výsledné hodnoty a omezuje možnost náhody.

Naměřili jsme tyto hodnoty:

Tabulka 7. Naměřené drsnosti nepájivých masek

Typ nepájivé masky	Drsnost povrchu Ra [μm]
Bez masky	1,185
Černá maska	0,861
Bílá maska	0,281
Zelená maska	0,138

Největší drsnost tedy měla deska bez nepájivé masky, kde se měřila drsnost samotné DPS. Za ní následovala deska s černou maskou a s velkým odstupem dále deska s bílou maskou. Nejmenší drsnost byla naměřena na deskách se zelenou maskou.

Měření roztékavosti jsem provedl pomocí binokulární lupy a softwaru NIS-Elements, kde jsem na binokulární lupě vyfotil vždy stejnou pájecí plošku (konkrétně se jednalo o pájecí plošku pro pravou spodní nožičku pouzdra DPAK) na každé DPS a následně v programu NIS-Elements označil plochu rozteklého tavidla. Od každé kombinace jsem měl na analýzu roztékavosti tavidla určeny dvě DPS, hodnoty z obou desek jsem zprůměroval a od této plochy jsem odečetl velikost plochy pájecí plošky a převedl na mm^2 .

Výsledné naměřené hodnoty jsou:

Tabulka 8. Tabulka naměřených ploch rozteklého tavidla

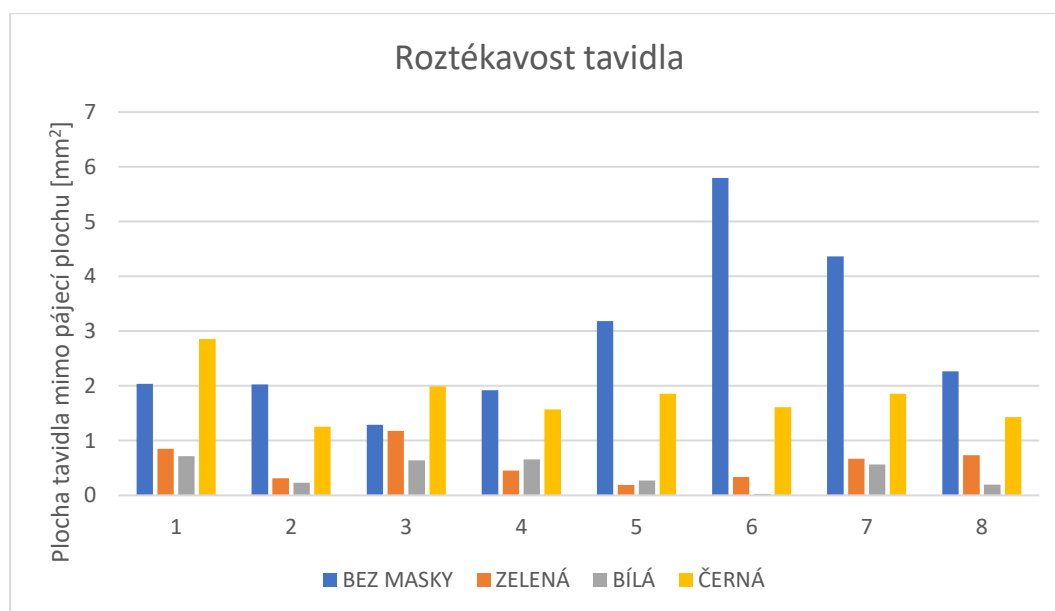
Číslo kombinace	Celková plocha tavidla [μm^2]	Plocha tavidla bez padu [mm^2]
1	2549148,6	0,849
2	2013955,2	0,314
3	2876656,0	1,177
4	2152486,9	0,452
5	3736679,2	2,037
6	3727082,2	2,027
7	2986170,4	1,286
8	3619842,6	1,920
9	1888583,7	0,189
10	2033376,6	0,333
11	2368420,8	0,668
12	2431459,8	0,731
13	4884287,7	3,184
14	7498991,8	5,799
15	6065147,9	4,365
16	3964069,3	2,264
17	4555184,3	2,855
18	2951858,6	1,252
19	3692206,3	1,992
20	3271982,3	1,572
21	2415999,7	0,716
22	1932522,8	0,233
23	2342332,6	0,642
24	2359703,7	0,660
25	3554152,1	1,854
26	3309707,8	1,610
27	3553722,1	1,854
28	3130652,1	1,431
29	1973728,2	0,274
30	1723382,5	0,023
31	2262154,6	0,562
32	1892847,8	0,193

Samozřejmě nejenom typ nepájivé masky má vliv na roztékavost tavidla. Stejně tak povrchová úprava, typ pájecí pasty (potažmo tavidla) a tloušťka šablony mají na roztékavost vliv. Abych mohl zkoumat pouze vliv nepájivé masky, vygeneroval jsem z naměřených hodnot přehledný graf, kde jsou mezi sebou porovnávány vždy hodnoty naměřené pro jednu konkrétní

kombinaci zkoumaných faktorů. Kombinace faktorů jsou uvedené v tabulce 9 spolu s porovnáním těchto faktorů viz graf 7.

Tabulka 9. Tabulka kombinací pro měření roztékavosti tavidla

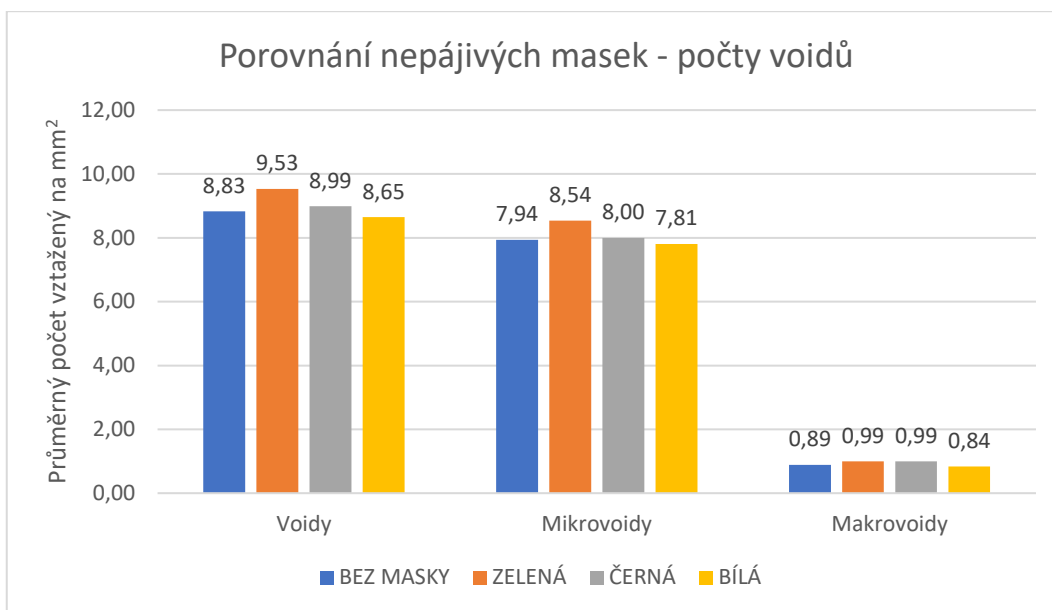
Číslo kombinace	Povrchová úprava	Pájecí pasta	Tloušťka šablony [μm]
1	ENIG	SAC305 NC257-2	150
2	ENIG	SAC305 NC257-2	100
3	ENIG	SAC305 M8	150
4	ENIG	SAC305 M8	100
5	HAL	SAC305 NC257-2	150
6	HAL	SAC305 NC257-2	100
7	HAL	SAC305 M8	150
8	HAL	SAC305 M8	100



Graf 6. Roztékavost tavidla

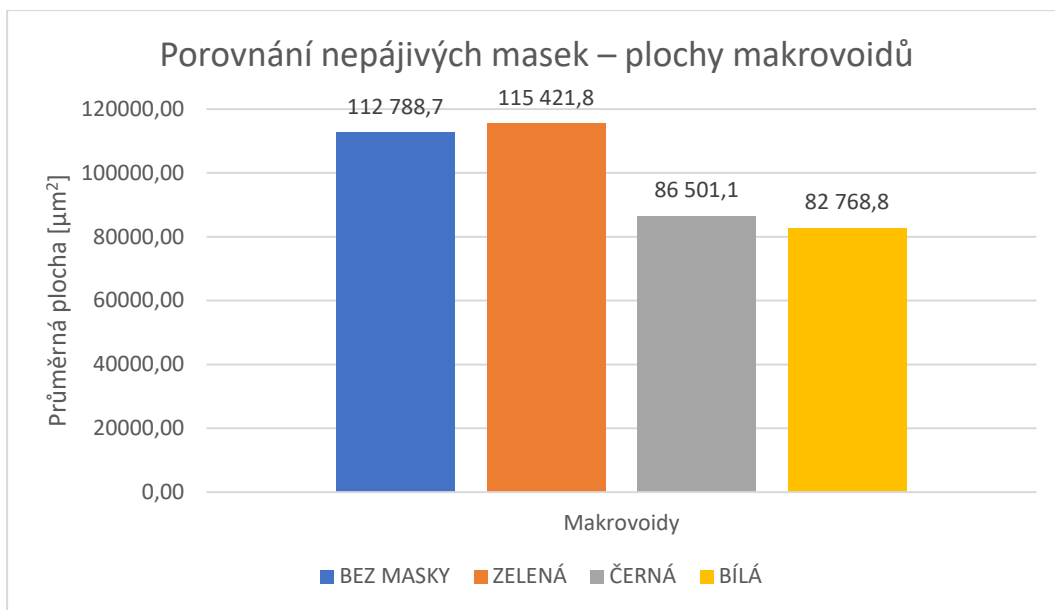
Porovnáme-li graf č. 7, znázorňující roztékavost tavidla na DPS, s tabulkou č. 7, kde jsou zapsány hodnoty naměřených drsností, dostaneme očekávanou závislost plochy rozteklého tavidla na drsnosti povrchu desky plošných spojů. Takřka ve všech případech (kromě kombinace č. 1 a č. 3) se tavidlo nejvíce rozteklo na deskách bez nepájivé masky, které mělo největší drsnost. Druhou největší plochu tavidla pak měly desky s černou nepájivou maskou. Stejně jako v případě naměřených hodnot drsností, i tady mají plochy rozteklého tavidla na deskách s bílou a se zelenou maskou velký odstup od prvních dvou zmiňovaných. Stejně tak platí, že až na výjimky (kombinace č. 4 a č. 5) měly tavidla na deskách se zelenou maskou větší roztékavost, než tomu bylo u desek s bílou maskou, čemuž odpovídají i hodnoty drsnosti povrchu.

5.3.2 Vyhodnocení vlivu typu nepájivé masky



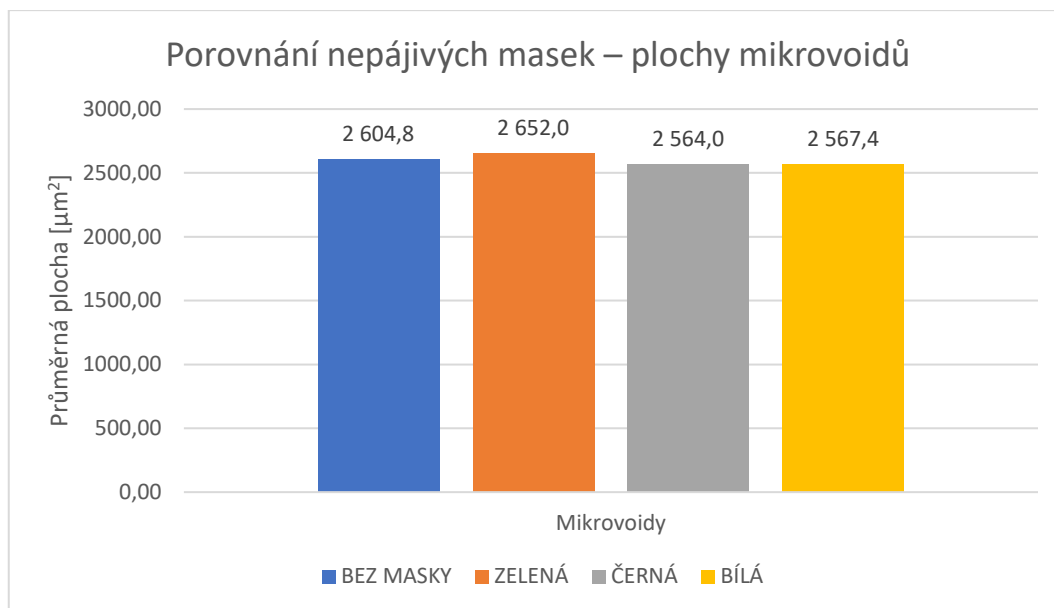
Graf 7. Porovnání nepájivých masek – počty voidů

U grafu č. 8 můžeme pozorovat, že jak u celkového počtu voidů, tak při rozdělení na makrovoidy a mikrovoidy se udržuje stále stejné pořadí – nejvíce voidů vzniklo na deskách se zelenou maskou, dále na deskách s černou maskou, méně jich vzniklo na deskách bez nepájivé masky a nejméně voidů vzniklo u desek s bílou maskou. Rozdíly mezi jednotlivými maskami jsou minimální, u celkového počtu voidů je rozdíl mezi deskami s bílou maskou a deskami se zelenou maskou (tedy nejvyšší možný rozdíl) 0,88 voidů/mm², což odpovídá zhruba 9,2 %. U mikrovoidů je nejvyšší možný rozdíl 0,73 voidů/mm², tj. cca 8,5 % a u makrovoidů 0,15 voidů/mm², tj. cca 15,2 %. Toto pořadí ovšem nekorresponduje s hodnotami naměřených drsností povrchů desek, potažmo s roztékavostí tavidel na deskách.



Graf 8. Porovnání nepájivých masek – plochy makrovoidů

Na grafu č. 9 vidíme zobrazené hodnoty průměrné plochy makrovoidů. Je patrný vliv použité nepájivé masky, kdy nejvyšší průměrnou plochu měly makrovoidy na deskách se zelenou maskou, dále makrovoidy na deskách bez nepájivé masky a dále s velkým odstupem makrovoidy na deskách s černou maskou a nejmenší makrovoidy vznikly na deskách s bílou maskou. Mezi hodnotami z desek bez masky a z desek se zelenou maskou není vysoký rozdíl (2663,1 µm², tj. cca 2,3 %), stejně je tomu tak mezi hodnotami z desek s černou a bílou maskou (3732,3 µm², tj. cca 4,3 %). Tyto rozdíly jsou relativně malé a dalo by se uvažovat, že typ nepájivé desky nemá na výslednou plochu makrovoidů vliv. Uvedeme-li ale nejvyšší možný rozdíl, tj. mezi průměrnými plochami makrovoidů na deskách se zelenou a bílou maskou, dostaneme rozdíl 32 653 µm², tedy zhruba 28,3 %, což již značí velký vliv typu použité nepájivé masky.

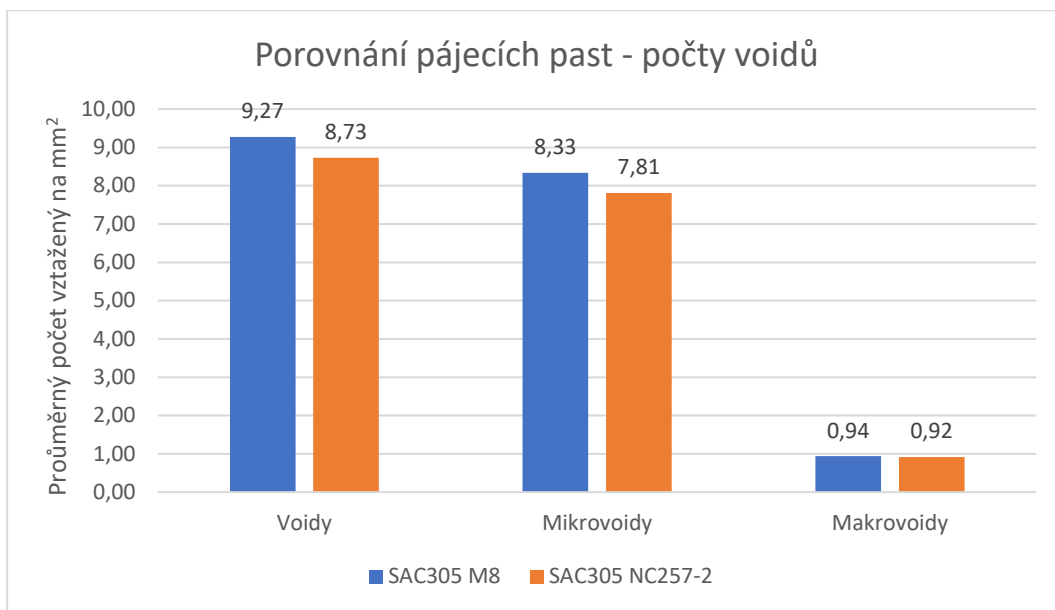


Graf 9. Porovnání nepájivých masek – plochy mikrovoidů

Z grafu č. 10 je patrné, že u průměrných ploch mikrovoidů se žádný vliv nepájivé masky neprojevuje. Nejvyšší možný rozdíl je mezi deskami se zelenou maskou a mezi deskami s černou maskou. Hodnota tohoto rozdílu je $88 \mu\text{m}^2$, což odpovídá zhruba 3,3 %.

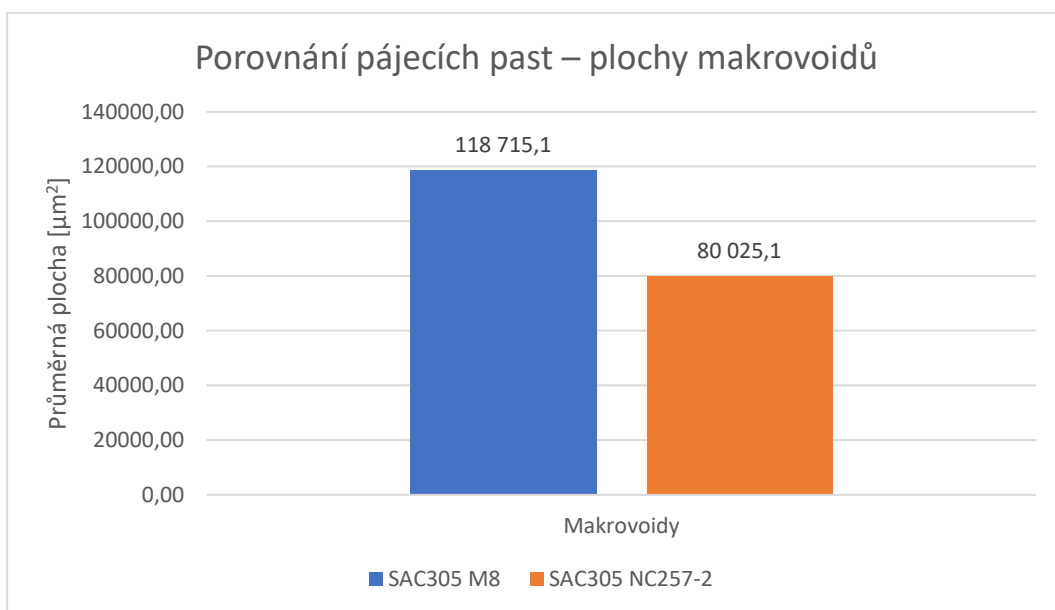
5.4 Vyhodnocení vlivu tavidla použité pájecí pasty

Typ použité pájecí pasty má potenciální vliv na tvorbu voidů hned kvůli několika různým faktorům, ať už se jedná o procentuální zastoupení kovových částí v pájecí pastě, viskozita, typ tavidla nebo teplota přetavení. Protože by bylo nemožné odlišit, jaký faktor hraje zrovna roli, rozhodl jsem se soustředit pouze na vliv typu tavidla, které je v pájce obsažené. Z toho důvodu jsem vybral dvě pájecí pasty, které se mezi sebou odlišují pouze tavidlem (viz. tabulka č. 4). Pájecí pasta SAC305 M8 obsahuje tavidlo s označením ROL1, pájecí pasta SAC305 NC257-2 obsahuje tavidlo s označením ROL0. Obě tavidla jsou tvořena přírodní pryskyřicí, ale jejich přesné složení není známo. Proto budu opět schopen zjistit pouze zda má typ tavidla vliv na tvorbu voidů ve spoji, nicméně příčiny tohoto vlivu už nikoliv.



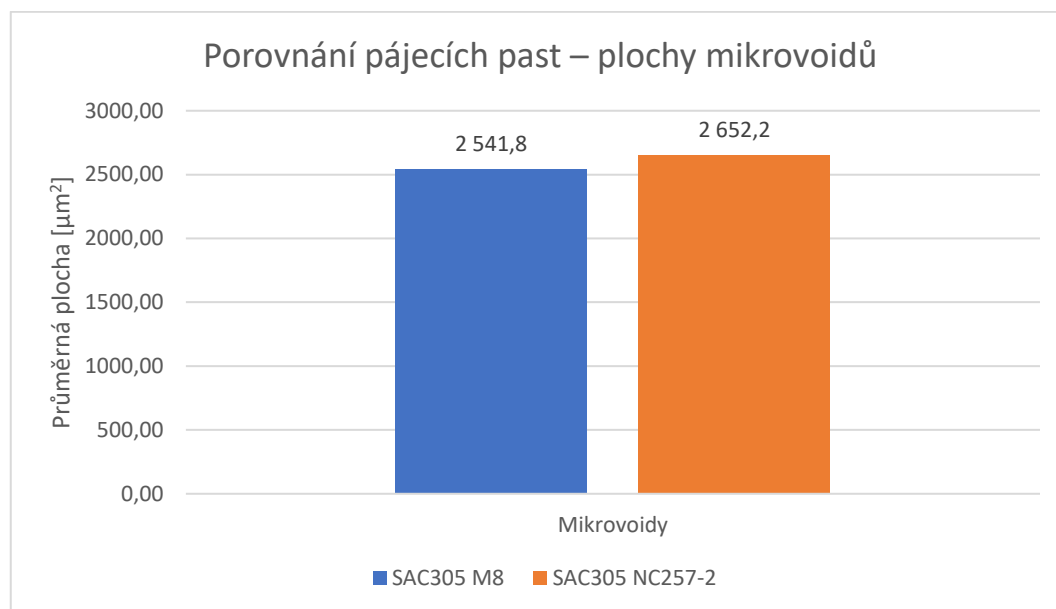
Graf 10. Porovnání pájecích past – počty voidů

Z grafu č. 11 je již na první pohled zřejmé, že typ tavidla použité pájecí pasty nemá výrazný vliv na počet vzniklých voidů. Vezmeme-li v úvahu počet veškerých vzniklých voidů, pak u pasty SAC305 M8 dostaneme hodnotu 9,27 voidů/mm², zatímco u pasty SAC305 NC257-2 dostaneme hodnotu 8,73 voidů/mm² (rozdíl 0,54 voidů/mm², tj. cca 5,8 %). Rozdělíme-li voidy na makrovoidy a mikrovoidy, pak u mikrovoidů vzniklo v průměru 8,33 voidů/mm² u pasty s označením M8 a 7,81 voidů/mm² u pasty s označením NC257-2 (rozdíl 0,52 voidů/mm², tedy zaokrouhleně 6,2 %). U makrovoidů vzniklo 0,94 voidů/mm² u pasty M8 a 0,92 voidů/mm² u pasty NC257-2 (rozdíl 0,02 voidů/mm², tedy 2,1 %).



Graf 11. Porovnání pájecích past – plochy makrovoidů

Na grafu č. 12 vidíme, že zde vliv na průměrnou plochu makrovoidů je velice významný. Zatímco makrovoidy vzniklé v pájce SAC305 M8 mají v průměru plochu 118 715,1 μm^2 , makrovoidy vyskytující se v pájce SAC305 NC27-2 měly v průměru výrazně nižší plochu 80 025,1 μm^2 . Rozdíl mezi plochami je 38 690 μm^2 , tedy zhruba 32,6 %.

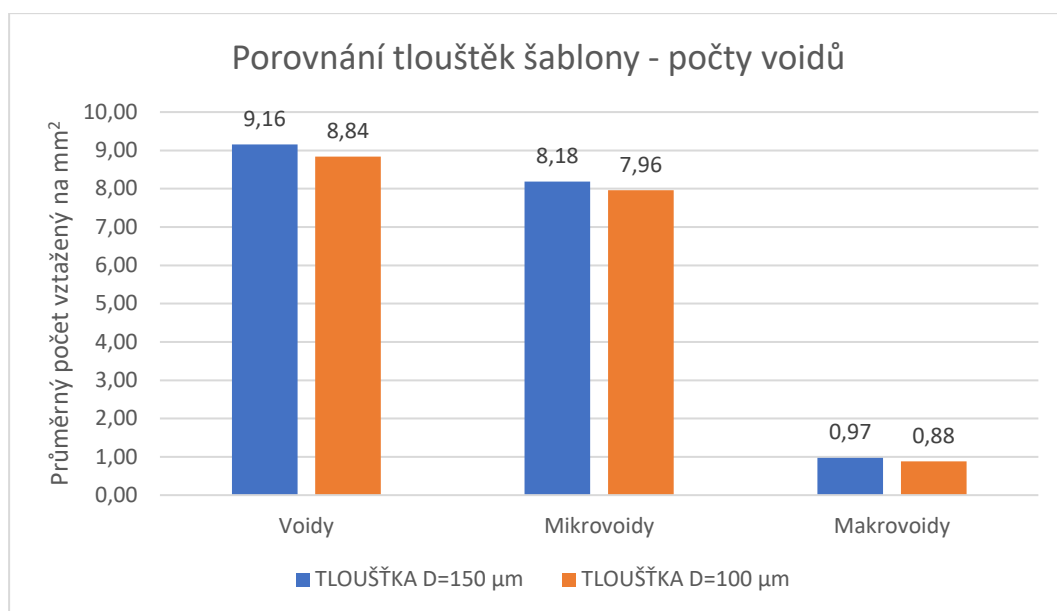


Graf 12. Porovnání pájecích past – plochy mikrovoidů

Oproti průměrným plochám makrovoidů není mezi průměrnými plochami vzniklých mikrovoidů výrazný rozdíl. U pasty nesoucí označení M8 měly mikrovoidy průměrnou plochu 2541,8 μm^2 , u pasty s označením NC257-2 pak byla tato plocha 2652,2 μm^2 . Rozdíl činí 110,4 μm^2 , tj. 4,2 %.

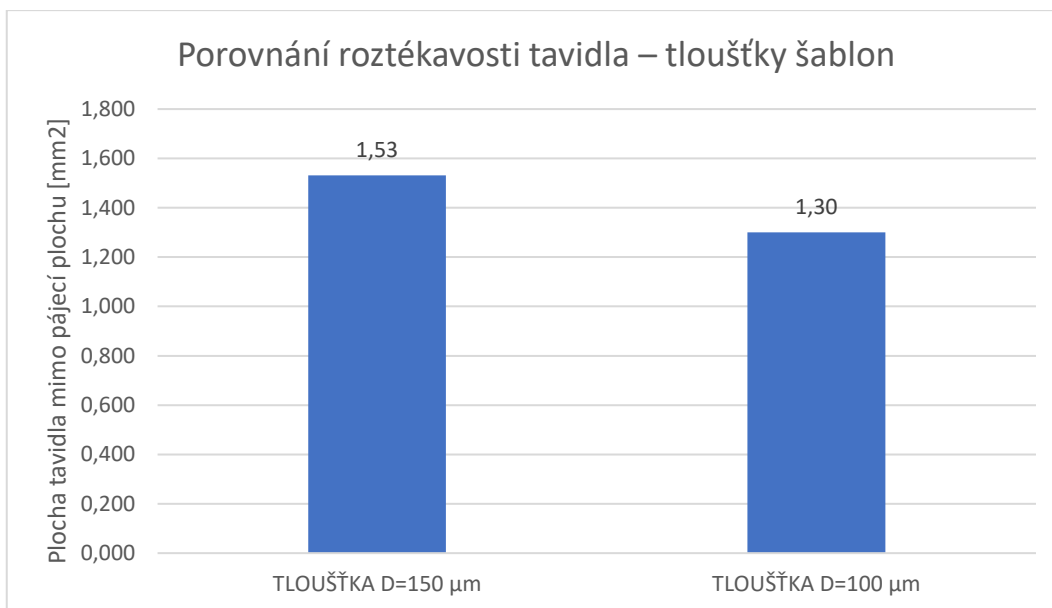
5.5 Vyhodnocení vlivu tloušťky šablony na šablonotisk

Větší tloušťka šablony vede k většímu množství použité pasty, a tedy i k většímu množství tavidla. Dá se tedy předpokládat, že tloušťka šablony použitá při šablonotisku by měla mít vliv na voidovitost výsledného pájeného spoje.



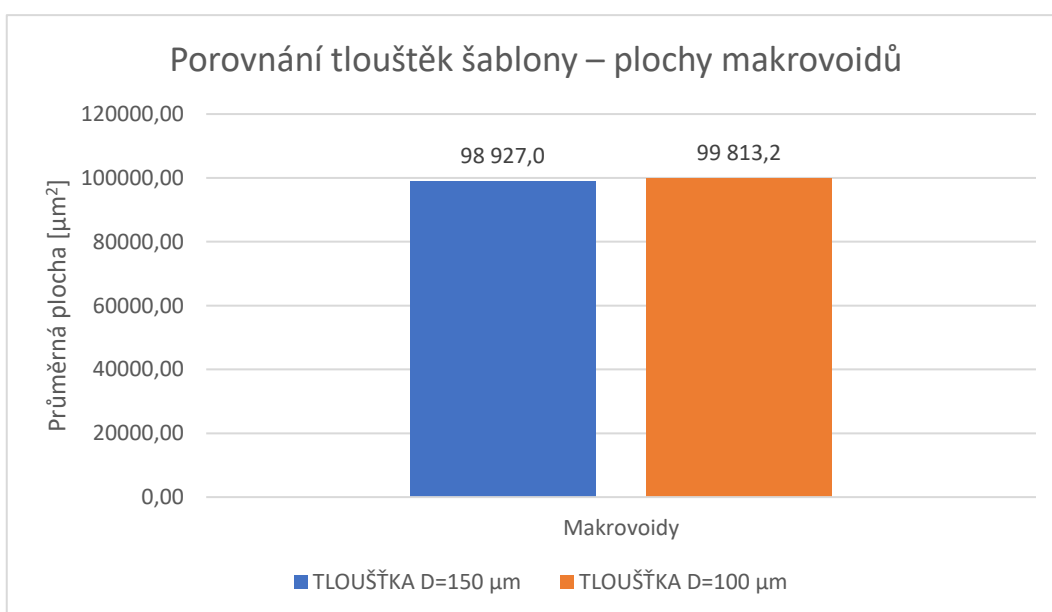
Graf 13. Porovnání tlouštěk šablony – počty voidů

Z grafu č. 14 vyplývá, že co se týče počtu voidů, tak je mezi dvěma použitými tloušťkami šablon minimální rozdíl. U celkového počtu voidů jsem naměřil průměrně 9,16 voidů/mm² při tloušťce šablony 150 µm a 8,84 voidů/mm² u tloušťky 100 µm (rozdíl 0,32 voidů/mm², tedy cca 3,5 %). U počtu mikrovoidů pak máme 8,18 voidů/mm² u tlustší šablony a 7,96 voidů/mm² u slabší šablony (rozdíl 0,22 voidů/mm², tedy cca 2,7 %). U počtu makrovoidů byla naměřena voidovitost 0,97 voidů/mm² u silnější šablony a 0,88 u slabší (rozdíl 0,09 voidů/mm², tedy 9,3 %). Ani jeden rozdíl tak nepřekročil požadovanou hodnotu 10 %, a nemohu tedy s jistotou určit, zda se jedná o vliv tloušťky použité šablony. Na druhou stranu u všech hodnot platí, že voidovitost je vždy menší u slabší šablony, což odpovídá teoretickým předpokladům a nahrává to domněnce, že tloušťka šablony má u voidovitosti spoje vliv, ačkoliv minimální. Příčinou toho, proč je tento vliv tak malý, můžeme nalézt při porovnání roztékavosti tavidla pro vzorky s tlustou a slabou šablonou.



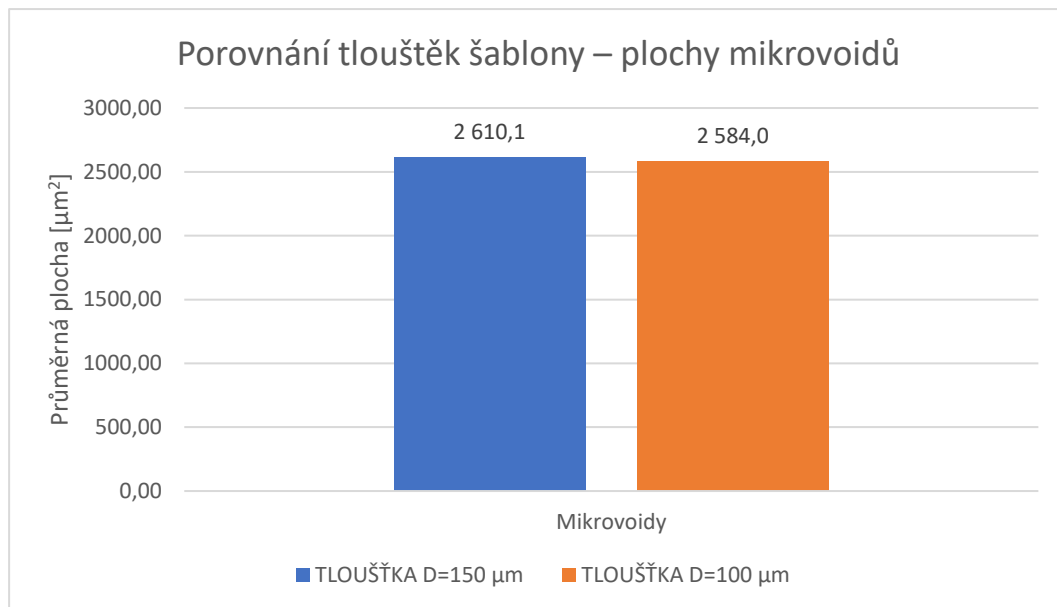
Graf 14. Porovnání roztékavosti tavidla – tloušťky šablon

Rozdíl mezi plochami rozteklého tavidla u vzorků s pastou nanesenou přes tlustší šablonu a slabší šablonu není na první pohled nijak významný. Konkrétně se jedná o hodnotu 0,23 mm², tedy cca 15 %, i přesto by to mohlo hrát roli. Můžeme tedy uvažovat, že při použití šablony s větší tloušťkou aplikujeme více pasty, a tedy i více tavidla, které se pak přímo podílí na tvorbě voidů, nicméně se toto tavidlo rozteče do větší plochy (a v pastě tedy zůstane menší množství). Předpokládám tedy, že tloušťka šablony by měla na voidovitost vliv, který je ale omezen právě jeho roztékavostí.



Graf 15. Porovnání tlouštěk šablony – plochy makrovoidů

U grafu č. 16 je na první pohled viditelné, že tloušťka šablony rozhodně nemá vliv na plochu makrovoidů. Rozdíl mezi oběma tloušťkami použitých šablon je pouhých 886,2 μm^2 , tj. zhruba 0,9 %.



Graf 16. Porovnání tlouštěk šablony – plochy mikrovoidů

Stejného závěru jako u ploch makrovoidů se dobereme i ploch mikrovoidů, zobrazené na grafu č. 17. Rozdíl mezi použitými šablonami je 26,1 μm^2 , tj. 1 %.

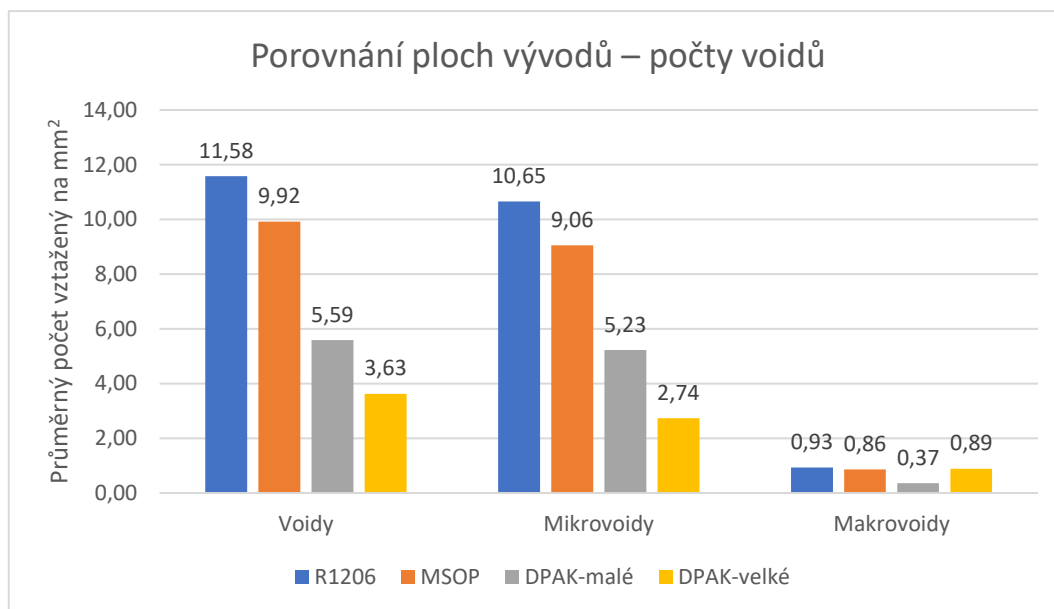
5.6 Vyhodnocení vlivu plochy vývodů součástek

Posledním zkoumaným faktorem byl vliv plochy a tvaru vývodů součástek. Ohledně vlivu tohoto faktoru se mi nepodařilo dohledat žádný výzkum a nemám tak žádné teoretické předpoklady, na základě kterých bych mohl odhadovat výsledky. Nejprve zde uvedu tabulku rozměrů vývodů a ploch vývodů součástek. U součástky R1206 jsou dva vývody o stejné ploše, u součástky s pouzdrém MSOP jsem pájel osm vývodů o stejných plochách, ale u součástky s pouzdrém DPAK jsou dva různé vývody, dva menší a jeden větší.

Tabulka 10. Rozměry a plochy vývodů součástek

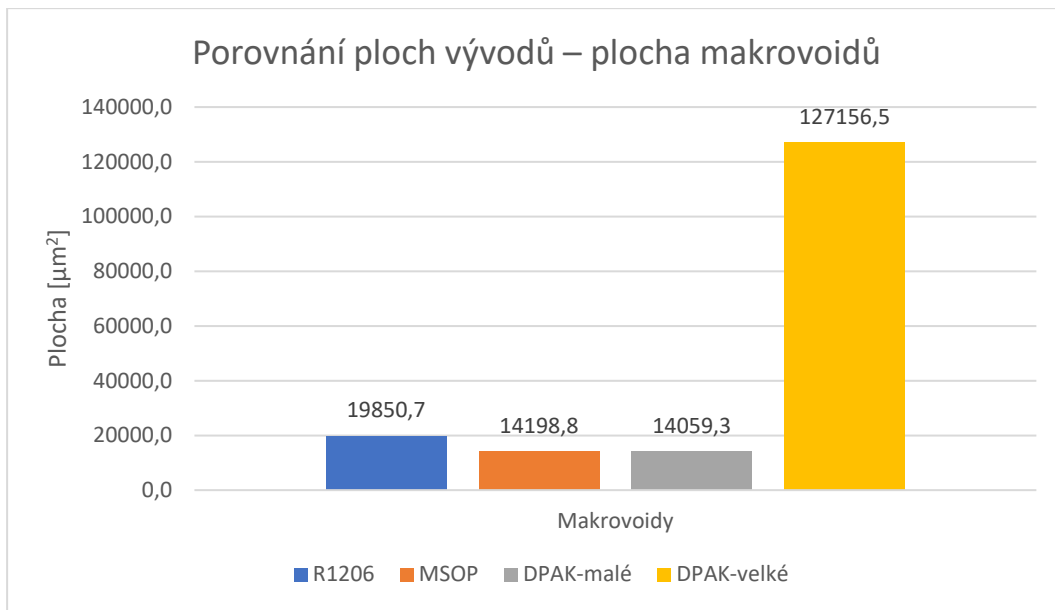
Typ součástky/pouzdra	Rozměry vývodu [mm]	Plocha vývodu [mm^2]
R1206	1,6 x 1,8	2,88
MSOP	1,1 x 0,4	0,44
DPAK – malý vývod	1,7 x 1	1,7
DPAK – velký vývod	5,5 x 6,1	33,55

Nejmenší plochu mají tedy vývody součástky s pouzdem MSOP, druhou nejmenší je menší vývod pouzdra DPAK, dále je vývod odporu R1206 a s velkým odstupem největší plochu má velký vývod pouzdra DPAK.



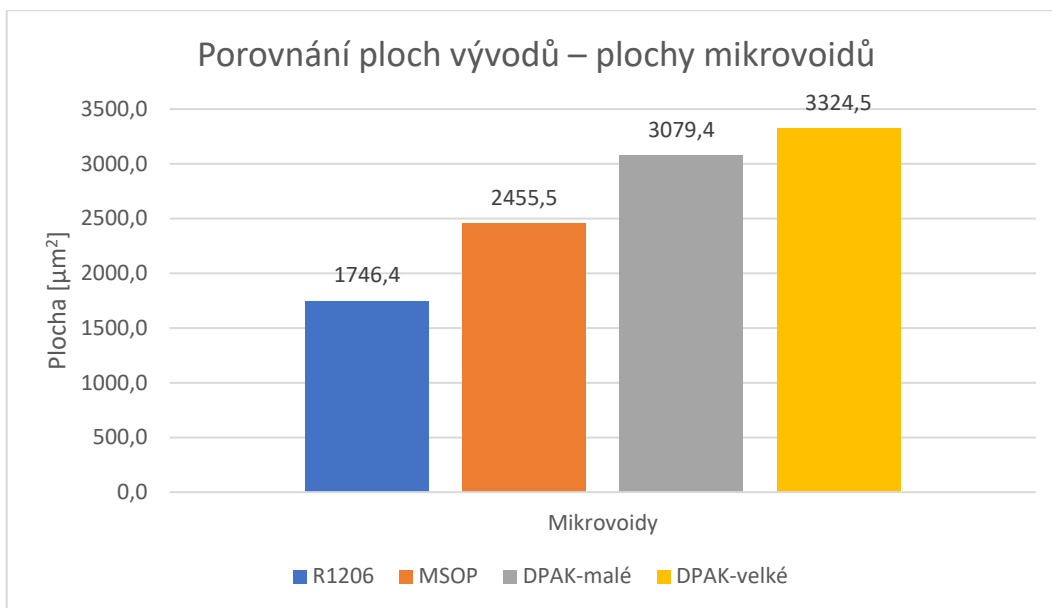
Graf 17. Porovnání ploch vývodů – počty voidů

Z grafu č. 18 je viditelná jasná závislost počtu vygenerovaných voidů na ploše vývodu. Nejvíce mikrovoidů se vytvořilo u součástky R1206, dále u pouzdra MSOP a poté s velkým odstupem malý vývod pouzdra DPAK a nejméně mikrovoidů bylo u velkého vývodu pouzdra DPAK. Rozdíl mezi R1206 a MSOP je 1,59 voidů/mm², tj. cca 14,9 %; rozdíl mezi R1206 a malým vývodem pouzdra DPAK je 5,42 voidů/mm², tj. cca 50,9 % a rozdíl mezi R1206 a velkým vývodem pouzdra DPAK je 7,91 voidů/mm², tj. zhruba 74,3 %. Makrovoidů se také vytvořilo nejvíce u součástky R1206, dále u velkého vývodu součástky v pouzdru DPAK a poté u vývodů MSOP. Výrazně nejméně vzniklo makrovoidů u malého vývodu součástky DPAK. Rozdíl mezi prvními třemi jmenovanými byl minimální, mezi vývody součástky R1206 a MSOP byl rozdíl 0,07 voidů/mm², tedy zhruba 7,5 %. Odstup z pohledu vzniklých makrovoidů posledního malého vývodu pouzdra DPAK je 0,56 voidů/mm², tedy cca 60,2 %. Vzhledem k tomu, že počty generovaných mikrovoidů nesledují ani vzestupnou, ani sestupnou tendenci ploch vývodů, nejsem schopen určit původ této závislosti.



Graf 18. Porovnání ploch vývodů – plocha makrovoidů

Z pohledu velikosti ploch vývodů součástek dostaneme nezajímavější výsledek při porovnání průměrné plochy makrovoidů (viz. graf č. 19). Na první pohled je viditelné, že zatímco u vývodů R1206, pouzdra DPAK a malého vývodu pouzdra DPAK se průměrná plocha vzniklých makrovoidů nijak výrazně neliší, u velkého vývodu pouzdra DPAK vznikaly makrovoidy s plochou relativně enormní. Vzhledem k tomu, že plocha velkého vývodu pouzdra DPAK byla také výrazně větší než ostatní vývody, je zde tato závislost jasně zřetelná. Rozdíl mezi průměrnou plochou makrovoidů u velkého vývodu pouzdra DPAK a v tomto pořadí druhé součástky R1206 je 107305,8 μm², tedy cca 84,4 %. Vzhledem k tomu, že u velkého vývodu pouzdra DPAK vznikal zároveň nejmenší počet makrovoidů, dá se usuzovat, že při pájení spoje docházelo ke spojování více makrovoidů do jednoho, čímž se snižoval jejich počet a zároveň rostl jejich objem, potažmo plocha. Napadlo mě ovšem jen jediné vysvětlení, proč by plocha vývodů, resp. součástky měla mít vliv na takovéto spojování voidů. Podle mého názoru je možné, že makrovoidy mohou při transportu skrz roztavenou pájku opustit pájku bočními stranami (z vrchní strany je únik voidů znemožněn součástkou). Samozřejmě že i u větších ploch mohou makrovoidy opouštět pájku bočními stěnami, nicméně voidy, které vznikají dále od stran, tuto možnost nemají. Voidy, které tedy nemohou opustit roztavenou pájku bokem, se „zaseknou“ pod součástkou, kde se k nim připojí další voidy a spojí se. Tím tedy makrovoidů ubývá co do počtu, nicméně rostou rozměrově.



Graf 19. Porovnání ploch vývodů – plochy mikrovoidů

Co se týče průměrné plochy mikrovoidů, i zde je na první pohled jasná závislost na celkové ploše vývodu součástky (viz. graf č. 20). V průměru nejmenší mikrovoidy vznikly u součástky R1206, dále na vývodech součástky v pouzdru MSOP a největší makrovoidy vznikaly u součástky v pouzdru DPAK. Menší plochu měly makrovoidy na menším vývodu a větší plochu měly makrovoidy na větším z vývodů. Ani zde bohužel pořadí velikosti průměrných ploch mikrovoidů nesleduje pořadí velikosti plochy vývodů.

6. Závěr

V diplomové práci jsem se zabíral problematikou možných chyb, které se mohou vyskytovat na deskách plošných spojů se zaměřením na voidy, tj. dutinky vznikající v objemu pájených spojů. V praktické části se pak zabírám vlivy různých faktorů na voidovitost výsledného pájeného spoje.

V teoretické části jsem nejprve zpracoval kapitolu o pájení, kde jsem vysvětlil princip pájení, základní pojmy z tohoto odvětví a nejpoužívanější technologie pájení. Dále jsem se v této části soustředil na faktory, jejichž vliv budu zkoumat, a sepsal jsem podkapitoly o nejčastějších druzích pájecích slitin, tavidlech, povrchových úpravách a nepájkivé masce. V poslední části kapitoly o pájení jsem zpracoval rešerši o kvalitě výsledného spoje, kde jsem sepsal chyby vznikající při procesu i po procesu pájení. Druhá kapitola teoretické části se zabývá samotnými voidy, jejich druhy a příčinami jejich vzniku.

V praktické části jsem měl za úkol připravit si vzorky, které podrobím analýze dutin a výsledky analýzy následně vyhodnotit. Cílem bylo zkoumání několika faktorů, které by mohly mít vliv na voidovitost spoje. Těmito zkoumanými faktory byly: typ použité povrchové úpravy, typ použité nepájkivé masky, tloušťka šablony použitá při šablonovém tisku, typ použité pájecí pasty, respektive tavidla v ní obsažené a plocha vývodů součástek. Pro dostatečné množství dat jsem si pro každou kombinaci připravil deset vzorků, z nichž dva vzorky sloužily k analýze roztékavosti tavidla, zbylých osm pak ke zkoumání vlivů daných faktorů. Pro posouzení vlivu jsem zpracoval data o průměrném počtu vzniklých voidů na 1 mm^2 , a to včetně rozdělení na mikrovoidy a makrovoidy a také data o průměrné ploše vzniklých makrovoidů a mikrovoidů. Makrovoidy a mikrovoidy jsem rozlišil určením hranice průměru $100 \mu\text{m}$. Pro posouzení, zda má daný faktor vliv na voidovitost, jsem si určil hranici 10 %. Pokud rozdíl mezi jednotlivými typy daného faktoru nepřesáhl tuto hranici, pak usuzuji, že faktor nemá na voidovitost vliv.

Prvním zkoumaným faktorem, jehož vliv na voidovitost spoje jsem zkoumal, byl typ použité povrchové úpravy. Na vzorcích jsem měl použité pouze dvě povrchové úpravy, a to ENIG a HAL a cílem tedy bylo spíše posoudit, zda povrchová úprava vůbec může hrát u vzniku voidů roli. Z naměřených dat se dá usuzovat, že použitá povrchová úprava má velký vliv na množství vzniklých mikrovoidů (rozdíl mezi průměrným počtem mikrovoidů u ENIGu a HALu činil zhruba 39,9 %). Dá se také usuzovat vliv na počet vzniklých makrovoidů, naměřený rozdíl byl 12,1 %, nicméně tento vliv je relativně velmi malý. Co se týče ploch vzniklých voidů, dostaneme podobný výsledek. Makrovoidy vzniklé u obou typů povrchových úprav měly téměř stejnou průměrnou plochu, nicméně plochy mikrovoidů u povrchové úpravy HAL byly o zhruba 14,2 % větší,

než tomu bylo u ENIGu. Tato analýza odpovídá teoretickým předpokladům, uvádí se, že na tvorbě makrovoidů se povrchová úprava neprojevuje, zatímco u tvorby mikrovoidů je zásadním faktorem. Z naměřených dat tedy vyplývá, že použití povrchové úpravy ENIG zapříčiní výrazně vyšší počet mikrovoidů, nicméně o menší ploše, než by tomu bylo v případě povrchové úpravy HAL.

Druhým zkoumaným faktorem byl typ použité nepájivé masky. K tomu jsem si připravil vzorky se třemi typy nepájivých masek, které se od sebe odlišují drsností povrchu; čtvrtým typem vzorků pak byly desky bez aplikované nepájivé masky. Nejprve jsem si analýzou roztékavosti tavidla ověřil, že s vyšší drsností povrchu se tavidlo pájecí pasty rozteče do větší plochy. Nejvyšší drsnost, a tedy nejvíce se roztékající tavidlo, byla naměřena na vzorcích bez masky. Zde k roztékavosti přispívá i geometrie desek, protože aplikací nepájivé masky vzniká v okolí pájecího padu bariéra, kterou musí tavidlo překonat. Druhou nejdrsnější nepájivou maskou byla černá maska, po ní následovala bílá a nejhladší povrch měly desky se zelenou nepájivou maskou. Můj odhad byl, že při větší roztékavosti tavidla se větší část tavidla dostane mimo pájku ještě před formováním voidů, nicméně výsledné hodnoty tento předpoklad nepotvrdily. Při zkoumání výsledného počtu vzniklých makrovoidů i mikrovoidů zjistíme, že v obou případech vzniklo nejvíce voidů v případě na deskách se zelenou maskou, dále vzorcích s černou maskou, poté na deskách bez nepájivé masky a nejméně voidů se vytvořilo na deskách s bílou maskou. Vzhledem k tomu, že pořadí výsledné voidovitosti nekoresponduje ani s vzestupným, ani se sestupným pořadím roztékavosti, se dá usuzovat, že drsnost povrchu nemá vliv na počet vzniklých voidů. Tomu nahrává i skutečnost, že nejvyšší rozdíly mezi počty mikrovoidů byly cca 8,5 % u mikrovoidů a 15,2 % u makrovoidů. U hodnot průměrných ploch mikrovoidů dostaneme podobné výsledky, protože maximální rozdíl činí zhruba 3,3 %. Zajímavější data dostaneme při porovnávání průměrných ploch makrovoidů, kdy vzorky bez masky a vzorky se zelenou maskou měly výrazně větší makrovoidy než vzorky s černou, potažmo s bílou maskou. Rozdíl průměrných ploch uvnitř těchto dvojic byl zanedbatelný, nicméně rozdíl mezi těmito skupinami činil zhruba 28,3 %. Vzhledem k tomu, že ale ve dvojici s vyšším průměrem makrovoidů figurují vzorky s největší a nejmenší drsností a ve druhé dvojici pak vzorky s druhou a třetí největší drsností, nejsem bohužel s to tento vliv vysvětlit.

Dalším zkoumaným faktorem byl typ tavidla použité pájecí pasty. Abych mohl eliminovat vliv ostatních možných faktorů pájecí pasty (viskozita pasty, teplota přetavení apod.), použil jsem naprosto stejné pájecí pasty, které se lišily pouze tavidlem. Teoretickým předpokladem bylo, že tavidlo by nemělo mít vliv na tvorbu mikrovoidů, ale mělo by se projevit při formování makrovoidů. Tento předpoklad se podařilo potvrdit; ačkoliv u množství vzniklých makrovoidů se žádný dopad použitého tavidla pozorovat nedá (rozdíl byl pouze zhruba 5,8 %), u průměrné

plochy makrovoidů je již znát výrazný vliv tavidla. U pasty s označením SAC305 NC257-2 (s tavidlem ROL0) byla průměrná plocha makrovoidů o cca 32,6 % nižší, než tomu bylo u pasty SAC305 M8 (s tavidlem ROL1). Vzhledem k tomu, že přesné složení tavidla je výrobním tajemstvím, není možné určit přesnou příčinu tohoto vlivu. Co se týče vlivu tavidla na mikrovoidy, tam se také potvrdily předpoklady, když rozdíl v počtu činil pouhých 2,1 % a rozdíl v průměrné ploše mikrovoidů 4,2 %.

Předposledním zkoumaným faktorem pak byla tloušťka šablony použité při šablonotisku. Větší tloušťka šablony vede k nanesení většího množství pasty a očekával jsem, že by to mělo mít dopad na vznik makrovoidů. Ani tento předpoklad se ovšem nepodařilo potvrdit. Je pravda, že při použití silnější šablony vzniklo více makrovoidů i mikrovoidů, ale rozdíl mezi šablonami byl jen 2,7 % u mikrovoidů, resp. 9,3 % u makrovoidů. Ani jeden rozdíl tedy nepřekonal požadovaných 10 %, a nemohu tedy s jistotou určit, zda se jedná o vliv tloušťky použité šablony. Na druhou stranu u všech hodnot platí, že voidovitost je vždy menší u slabší šablony, což odpovídá teoretickým předpokladům a nahrává to domněnce, že tloušťka šablony má u voidovitosti spoje vliv, ačkoliv minimální. To, že je tento vliv tak malý, se dá částečně vysvětlit díky roztékavosti tavidla. Při porovnání ploch rozteklého tavidla u vzorků s použitou tlustší šablonou se tavidlo rozteklo do větších ploch (v průměru byly tyto plochy větší o cca 15 %). Při použití silnější šablony tedy nanese větší množství pasty a tavidla, přičemž tavidlo se ale rozteče do větší plochy. V pastě tedy zůstane procentuálně menší množství tavidla než při použití slabší šablony (ačkoliv celkové množství tavidla je stále větší u vzorků s tlustší pastou). Rozdíl mezi těmito vzorky je pak menší. Co se týče naměřených průměrných ploch, ani tam se žádný vliv tloušťky šablony neprojevil, u plochy makrovoidů činil rozdíl pouze 0,9 % a v případě plochy mikrovoidů byl rozdíl 1 %.

Posledním zkoumaným faktorem byla plocha vývodů připájených součástek. Nejprve bylo nutné změřit plochy těchto vývodů u všech tří typů použitých součástek – jednalo se o odpor R1206, součástku v pouzdře MSOP a součástku v pouzdru DPAK. U odporu R1206 jsou dva vývody o stejných rozměrech a ploše 2,88 mm²; u pouzdra MSOP je osm vývodů o stejných rozměrech a ploše 0,44 mm²; u součástky s pouzdrém DPAK jsou dva typy vývodů, dva menší o ploše 1,7 mm² a jeden velký o ploše 33,55 mm². Při porovnání počtů vzniklých mikrovoidů ani při srovnání průměrných ploch vzniklých mikrovoidů se žádného závěru nedopracujeme. Je sice zajímavé, že čím více vzniklo u daného vývodu mikrovoidů, tím menší průměrnou plochu měly, nicméně toto pořadí (nejvíce mikrovoidů vzniklo u odporu R1206, dále u pouzdra MSOP, poté u menšího z vývodů pouzdra DPAK a nejméně na větším vývodu z pouzdra DPAK) se neshoduje vzestupně ani sestupně s plochou vývodů, a proto nejsem schopen určit, kde je příčina této závislosti. Zajímavější výsledky dostaneme při porovnávání makrovoidů. U vývodů odporu

R1206, pouzdra MSOP a menšího vývodu pouzdra DPAK vzniklo téměř stejné množství makrovoidů/mm² a zároveň měly tyto makrovoidy nepříliš odlišné průměrné hodnoty naměřených ploch. Na druhou stranu u většího vývodu pouzdra DPAK, který má také řádově větší plochu, vzniklo výrazně menší množství voidů/mm² (rozdíl činil cca 60,2 % oproti R1206) a zároveň měly tyto makrovoidy zřetelně větší průměrnou plochu (oproti v tomto pořadí druhý R1206 byl o 84,4 % menší). Dá se tedy usuzovat, že u velkých vývodů dochází ke spojování mikrovoidů. Jediné možné vysvětlení, které mě napadlo, je, že makrovoidy mohou opouštět roztavenou pájkou bočními stěnami pájky. Je to sice možné i u vývodů s větší plochou, ale u nich jsou více zastoupeny makrovoidy, které se vyskytují dále od krajů spoje. Nemohou tedy spoj opustit, zůstanou uvězněné pod vývodem součástky, kde se k nim dopraví další voidy a spojí se dohromady. Počet vzniklých makrovoidů tedy klesá, ale jejich rozměry rostou.

Na závěr bych rád uvedl, že hodnoty naměřených počtů mikrovoidů mohou být zavádějící. Je tomu proto, že RTG snímání jsme prováděli z vrchní strany, přičemž makrovoidy jsou v pájecím padu umístěny nad mikrovoidy a pokud nějaké mikrovoidy vznikly pod objemem makrovoidů (což je více než pravděpodobné), pak na vzniklých RTG snímcích nebyly vidět.

Doufám a věřím, že výsledky této práce by mohly přinést o něco více světla do problematiky voidů a přispět tak k dalšímu technickému pokroku a k řešení problémů s ním spojenými.

Zdroje

- [1] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [2] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej university v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2
- [3] ASPANDIAR, Raiyo. *Voides in solder joints* [online]. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: https://www.smta.org/chapters/files/Voides_in_Solder_Joints___Intermountain_SMTA_Chapter_March_2018.pdf
- [4] JIČÍNSKÝ, Jiří. *Enviromentální vlivy a pájitelnost povrchových úprav desek plošných spojů*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [5] MINÁŘ, Jan. *Smáčivost povrchových úprav DPS*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [6] KOZÁK, Martin. *Vliv povrchové úpravy na vznik voidů v pájených spojkách*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [7] KOZÁK, Martin. *Studie vlivu povrchových úprav pájecích plošek*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [8] KULHAVÝ, Jan. *Studie růstu dendritů na deskách plošných spojů*. Praha, 2017. Bakalářské práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [9] NOVÁK, Ondřej. *Pájené spoje, růst dendritů*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.

- [10] SLAVATA, Michal. *Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži*. Praha, 2014. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [11] PÍCHA, Jan. *Studium spolehlivosti bezolovnatého pájených spojů*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ivan Szendiuch.
- [12] DUŠEK, Karel. *Měření povrchového napětí* [online]. [cit.2018-08-25]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=2087>
- [13] KOBLÍŽEK, Vilém. *Měkké pájení v elektronice* [online]. [cit. 2018-08-25]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf
- [14] MACH, Pavel. *Pájení* [online]. [cit. 201-08-25]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/44479/mod_resource/content/1/Pájení.pdf
- [15] BESHAIJOVÁ-PELIKÁNOVÁ, Ivana. *Montáž SMT a THT – Pájení* [online]. [cit. 2018-08-25]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/pajeni.pdf>
- [16] Flow and Reflow. *HAKKU* [online]. [cit. 2018-08-25]. Dostupné z: <https://www.hakko.com/english/hikaru/pages/story9.html>
- [17] Pájení a způsoby pájení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2018-08-26]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pájení_a_způsoby_pájení
- [18] *Pájení v peci* [online]. [cit. 2018-08-26]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/metal-joining/furnace-brazing.aspx>
- [19] *Pájky, pájení, tvrdé pájení, měkké pájení, pájky elektrické, plynové pájky* [online]. [cit. 2018-08-26]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/pajky>
- [20] *Indukční pájení* [online]. [cit. 2018-08-26]. Dostupné z: <https://www.bodycote.com/cs/sluzby/spojovani-kovu/indukcni-pajeni/>

[21] *Indukční pájení* [online]. [cit. 2018-08-26]. Dostupné z: <https://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-pajeni/>

[22] RŮŽIČKA, Miroslav. *Hodnocení samozhášivých vlastností základních materiálů FR4*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.

[23] MACH, Ladislav. *Vliv množství pájky a izotermálního stárnutí na vodivost pájeného spoje*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří starý.

[24] TYLICH, Ondřej. *Elektromigrace tavivých zbytků na povrchu DPS*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.

[25] Mistral 260 [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: http://www.memtech.co.il/files/attach/Mistral_260.pdf

[26] M8 No clean solder paste data sheet [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://www.aimsolder.com/sites/default/files/m8_solder_paste_tds.pdf

[27] NC257 SAC305 [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://www.aimsolder.com/sites/default/files/nc257_sac305_solder_paste_tds.pdf

[28] Flux Type Selection. *Evertiq* [online]. 2010 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://evertiq.com/news/16783>

[29] Kolektiv autorů. *Když optická inspekce nestačí...* [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:3748/kdyz-opticka-inspekce-nestaci>

[30] Kolektiv autorů. *Možnosti využití RTG a CT diagnostiky (ne)jen v elektrotechnice – 2. část* [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:11952/moznosti-vyuziti-rtg-a-ct-diagnostiky-ne-jen-v-elektrotechnice-2-cast>

[31] Phoenix nanome|x High-Resolution Nanofocus X-Ray Inspection Systém [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.gemeasurement.com/taxonomy/term/631>

[32] *Non-contact measuring systems* [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <http://www.optimaxonline.com/pdf/Optimax%20Hawk%20Family%20Brochure.pdf>

[33] HARMAN, Dominik. *Testování aktivity tavidel pomocí testu roztékavosti*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Rendl.

[34] *3D laserový skenovací konfokální mikroskop VK-X1000* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.keyence.eu/landing/lpc/1807-vk-konfokalni-mikroskop.jsp?aw=gagooglekbczmiclkw013&gclid=CjwKCAjwYXmBRAOEiwAYSyl3JOI97D-3tLX2YtGD_AAX2SvEEYoH_XESNUGxeGciLunDGvonaoEXxoCrEgQAvD_BwE

Seznam obrázků

Obrázek 1. A) Difuze při pokojové teplotě B) Difuze při teplotě vyšší než bod tavení pájky [8].	17
Obrázek 2. Smáčecí úhel [11]	18
Obrázek 3. Síly uvnitř kapaliny tvořící povrchové napětí [12].....	18
Obrázek 4. Intermetalická vrstva [11]	20
Obrázek 5. Oblasti fázorového diagramu pájky SnPb [11].....	21
Obrázek 6. Pájení vlnou [14]	24
Obrázek 7. Pájení ponorem [16]	24
Obrázek 8. Princip ohřevu IR zářiči [14]	25
Obrázek 9. Pájení v parách [14].....	26
Obrázek 10. Ruční pájení [13]	27
Obrázek 11. Nedostatečné přetavení [7]	34
Obrázek 12. Chybějící spoj [8]	34
Obrázek 13. Zvedání menisku [10].....	35
Obrázek 14. Kulička pájky vedle součástky [10].....	35
Obrázek 15. Thombstoning [8].....	36
Obrázek 16. Můstek [9].....	36
Obrázek 17. Popcorn efekt [9]	37
Obrázek 18. Typický příklad voidu [3]	37
Obrázek 19. Whiskery [9]	38
Obrázek 20. Dendrity [8]	39
Obrázek 21. Typické umístění všech druhů voidů v objemu pájeného spoje [3].....	41
Obrázek 22. Makrovoidy v pájeném spoji [3].....	42
Obrázek 23. Planární mikrovoidy [3]	44
Obrázek 24. Shrinkage voidy [3].....	45
Obrázek 25. Mikro-via voidy [3]	46
Obrázek 26. Kirkendallový (IMC) voidy [3].....	46
Obrázek 37. Pinhole voidy [3]	47
Obrázek 28. SMT Manipulator M01	48
Obrázek 29. Přetavovací tunelová pec Mistral 260 [32]	49
Obrázek 30. Rentgenový systém GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T [31].....	49

Obrázek 31. Binokulární lupa HAWK DUO QC-5000 [32].....	50
Obrázek 32. Konfokální mikroskop VK-X1000 [34]	50
Obrázek 33. Layout DPS v programu Eagle	53
Obrázek 34. Vyrobené DPS (zde ENIG s nepájivou maskou).....	53
Obrázek 35. Desky osazené součástkami pomocí SMT manipulátoru.....	53
Obrázek 36. RTG snímek odporu R1206 (zde vzorek č. 1 z kombinace č. 29).....	54
Obrázek 37. RTG snímek odporu R1206 s vyznačenými voidy pomocí programu NIS-Elements (zde vzorek č. 1 z kombinace č. 29).....	55

Seznam tabulek

Tabulka 1. Klasifikace pájitelnosti a smáčecího úhlu [11]	18
Tabulka 2. Oblasti fázorového diagramu [11]	21
Tabulka 3. Vlastnosti přídavných materiálů [11].....	22
Tabulka 4. Charakteristika použitých past [7]	51
Tabulka 5. Kombinační tabulka zkoumaných vlivů.....	52
Tabulka 6. Tabulka naměřených průměrných ploch voidů a průměrného počtu voidů na mm ²	57
Tabulka 7. Naměřené drsnosti nepájitých masek.....	60
Tabulka 8. Tabulka naměřených ploch rozteklého tavidla.....	61
Tabulka 9. Tabulka kombinací proměření roztékavosti tavidla.....	62
Tabulka 10. Rozměry a plochy vývodů součástek	70

Seznam grafů

Graf 1. Fázorový diagram pájecí slitiny SnPb [9]	20
Graf 2. Teplotní profil pájecí pece	54
Graf 3. Porovnání povrchových úprav – počty voidů	58
Graf 4. Porovnání povrchových úprav – plochy makrovoidů	59
Graf 5. Porovnání povrchových úprav – plochy mikrovoidů	59
Graf 6. Roztékavost tavidla	62
Graf 7. Porovnání nepáživých masek – počty voidů	63
Graf 8. Porovnání nepáživých masek – plochy makrovoidů	64
Graf 9. Porovnání nepáživých masek – plochy mikrovoidů	65
Graf 10. Porovnání pájecích past – počty voidů	66
Graf 11. Porovnání pájecích past – plochy makrovoidů	66
Graf 12. Porovnání pájecích ploch – plochy mikrovoidů	67
Graf 13. Porovnání tlouštěk šablony – počty voidů	68
Graf 14. Porovnání roztékavosti tavidla – tloušťky šablon	69
Graf 15. Porovnání tlouštěk šablony – plochy makrovoidů	69
Graf 16. Porovnání tlouštěk šablony – plochy mikrovoidů	70
Graf 17. Porovnání ploch vývodů – počty voidů	71
Graf 18. Porovnání ploch vývodů – plocha makrovoidů	72
Graf 19. Porovnání ploch vývodů – plochy mikrovoidů	73

Seznam rovnic

(2.1) Závislost difúzního koeficientu na teplotě	17
(2.2) Definiční rovnice povrchového napětí.....	19
(2.3) Rovnice povrchového napětí pomocí energetického stavu na rozhraní	19
(2.4) Závislost rychlosti růstu IMC vrstvy na teplotě.....	39

Seznam použitých zkratk

DPS – Deska Plošných Spojů

EU – Evropská Unie

RoHS – Restriction of Hazardous Substances

SC pájky – Sn-Cu pájky

SAC pájky – Sn-Ag-Cu pájky

SA pájky – Sn-Ag pájky

SB pájky – Sn-Bi pájky

HAL – Hot Air Levelling

ENIG – Electroless Nickel Immersion Gold

OSP – Organic Solder Preservatives

SMD – Surface Mount Devices

SPI – Solder Paste Inspection

AOI – Automatická Optická Kontrola

RTG – Rentgen, rentgenové

IR – Infračervené (záření)

VOC-free – Volatile Organic Compounds-free, tj. tavidla bez unikající organické složky

IMC – intermetalická vrstva

CT – computed tomography