

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie

VOIDY V PÁJENÝCH SPOJÍCH

Disertační práce

Ing. Martin Kozák

Praha

Leden 2024

Doktorský studijní program: *Elektrotechnika a informatika (P2612)*

Studijní obor: *Elektrotechnologie a materiály (2602V009)*

Školitel: *prof. Ing. Bc. Karel Dušek, Ph.D.*

Školitel specialista: *Ing. Petr Veselý, Ph.D.*

Abstrakt

Tato disertační práce popisuje problematiku tvorby dutin v pájených spojích. Dutiny (voidy) negativně ovlivňují elektrické, mechanické a tepelné vlastnosti pájených spojů, což vede ke snížení spolehlivosti celého zařízení. Disertační práce se skládá z teoretické a experimentální části. Teoretická část se věnuje obecné teorii pájení, používaným materiálům, montážním technologiím, metodám pájení a vybraným chybám vznikajícím při povrchové montáži. V kapitole věnující se chybám, které vznikají při pájení je kladen důraz na popis voidů a jejich známých příčin vzniku. Experimentální část je věnována dvěma experimentům, které zkoumají nové možnosti eliminace voidů. V prvním experimentu je zvolen přístup zajištění co největšího úniku tavidla a plyných látek z pájeného spoje při přetavení pájecí pasty. Konkrétně je zkoumán parametr drsnosti povrchu v okolí pájecích plošek. Tato změna drsnosti byla zajištěna pomocí použití různých nepájivých masek. Druhým zkoumaným parametrem v tomto experimentu bylo nanesení stejného množství pájecí pasty pomocí šablon s různou tloušťkou a velikostí otvorů. Voidy byly charakterizovány rentgenováním vytvořených vzorků a následným zpracováním snímků pomocí jasové analýzy. Bylo zjištěno, že oba tyto parametry mají vliv na tvorbu voidů. Při použití drsnějšího povrchu dojde k lepšímu roztečení tavidla do okolí pájecích plošek, což vede ke snížení výskytu dutin. Tento fakt platí pouze při použití šablony kopírující tvar pájecí plošky. V případě použití modifikovaných šablon (tvar otvorů nekopíroval tvar pájecí plošky) došlo ke snížení voidovitosti nezávisle na drsnosti povrchu okolí pájecích plošek. V druhém experimentu byl zkoumán vliv teplotního profilu a chemického složení pájecích past. Teplotní profil byl typu RTS (angl. Ramp to Spike) a byly testovány různé teplotní gradienty ohřevu se stejnou dobou setrvání na vrcholové teplotě a také se stejným teplotním gradientem chlazení. Chemické složení tavidel pájecích past, bylo charakterizováno plynovým chromatografem kombinovaným s hmotnostním spektrometrem (GC-MS) a termogravimetrickou analýzou (TGA). Dutiny byly opět charakterizovány pomocí rentgenového snímkování vzorků s jejich následnou jasovou analýzou. Výsledky ukazují, že použití nižšího teplotního gradientu má za následek snížení výskytu voidů ve spojích. Chemická analýza ukázala, že některé látky, jako butylovaný hydroxytoluen způsobují oproti jiným zvýšený výskyt dutin ve spoji, proto je lepší se použití těchto látek v tavidle vyhnout. Výsledky rentgenové analýzy také korelují s výsledky TGA. Vzorky, které obsahovaly tavidlo s větším množstvím zbytků při vrcholové teplotě, vykazovaly větší voidovitost.

Abstract

This dissertation thesis describes the problem of voids formation in solder joints. Voids negatively affect the electrical, mechanical, and thermal properties of solder joints, causing a reduction in the reliability of the whole device. The dissertation thesis consists of theoretical and experimental parts. The theoretical part deals with soldering theory, materials used, assembly technologies, soldering methods, and selected errors occurring during surface mount assembly. The chapter dealing with soldering errors focuses on the description of voids and their known causes. The experimental part of the thesis focuses on two experiments that investigate new possibilities for void elimination. In the first described experiment, the approach taken is to ensure the maximum possible leakage of flux and gaseous substances from the solder joint during the reflow of the solder paste. Specifically, the surface roughness parameter around the solder pads is investigated. This roughness variation was ensured by using different solder masks. The second parameter investigated in this experiment was applying the same amount of solder paste using stencils with different thicknesses and apertures sizes. The voids were characterized by X-raying the samples and then image processing using brightness analysis. Both of these parameters were found to affect void formation. When a rougher surface is used, better flux spreading into the area around the solder pads occurs. It causes voids reduction. This applies only when using a template that follows the shape of the solder pad. In the case of using modified templates (the shape of the apertures did not copy the shape of the solder pad), the voids were reduced independently of the surface roughness around the solder pads. The second experiment investigated the influence of the temperature profile and the solder pastes' chemical composition. The temperature profile was of the Ramp to Spike (RTS) type, and different heating temperature gradients with the same duration at peak temperature and the same cooling temperature gradient were tested. The chemical composition of the solder paste fluxes was characterized by gas chromatography combined with mass spectrometry (GC-MS) and thermogravimetric analysis (TGA). The voids were again characterized by X-ray imaging, followed by brightness analysis. The results show that the use of a lower temperature gradient causes a reduction in the occurrence of voids in the joints. Chemical analysis showed that some substances, such as butylated hydroxytoluene, cause increased voids in the joint compared to others, following that it is better to avoid using these substances in the flux. The results of the X-ray analysis also correlate with the TGA results. Samples that contained flux with more residue at the peak temperature showed more significant void occurrence.

Klíčová slova

Pájení, pájení přetavením, chyby vznikající při povrchové montáži, teplotní profil, tavidlo, voidy.

Keywords

Soldering, reflow soldering, errors during surface mount technology, temperature profile, flux, voids.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou disertační práci vypracoval samostatně a v předložené práci jsem důsledně citoval použitou literaturu.

V Praze dne

Martin Kozák

Poděkování

Rád bych touto formou poděkoval všem, kteří mě během studia podporovali. Velké díky patří mému školiteli prof. Ing. Bc. Karlu Duškovi, Ph.D., který mě odborně vedl během celého mého studia na vysoké škole a byl vždy velmi vstřícný a přátelský. Díky patří také mému školiteli specialistovi Ing. Petru Veselému, Ph.D. za konzultace a odborné rady a kolegům z katedry elektrotechnologie. Obrovské poděkování patří ovšem mé manželce, která pro mě byla obrovskou oporou v průběhu studia.

Obsah

CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....	15
ÚVOD.....	17
I. TEORETICKÁ ČÁST.....	18
1. Teorie pájení.....	18
1.1. Dělení pájení.....	18
1.2. Pájený spoj	19
1.3. Pájitelnost	19
1.3.1. Smáčení povrchu	19
1.3.2. Nesmáčení povrchu	20
1.3.3. Odsmačení povrchu	20
1.3.4. Povrchové napětí pájeného spoje	20
2. Materiály používané při povrchové montáži	23
2.1. Formy pájek.....	23
2.1.1. Pájecí pasty.....	23
2.2. Pájecí slitiny	24
2.2.1. Olovnaté pájecí slitiny	24
2.2.2. Bezolovnaté pájecí slitiny	25
2.3. Tavidla.....	28
2.3.1. Chemické složení tavidel.....	29
2.3.2. Dělení tavidel	29
2.3.3. Hodnocení kvality tavidel	33
2.4. Desky plošných spojů.....	33
2.4.1. Nepájjivá maska	34
2.4.2. Povrchové úpravy pájecích plošek	36
3. Montážní technologie	40
4. Metody pájení.....	41

4.1. Ruční pájení.....	41
4.2. Tekuté pájení	41
4.2.1. Pájení vlnou	41
4.2.2. Pájení vlečením a ponorem	43
4.3. Pájení přetavením	43
4.3.1. Nanášení pájecí pasty	43
4.3.2. Osazení součástek.....	45
4.3.3. Přetavení pájecí pasty	45
4.3.4. Kontrola a diagnostika pájených spojů	48
5. Vybrané chyby vznikající při povrchové montáži.....	50
5.1. Efekt náhrobního kamene.....	50
5.2. Black Pad efekt.....	51
5.3. Vznik můstků a zkratů.....	52
5.4. Popcorn efekt.....	52
5.5. Whiskery	53
5.6. Dendrity	54
5.7. Dutiny (voidy).....	55
5.7.1. Planární mikrovoidy	57
5.7.2. Makrovoidy	58
5.7.3. Shrinkage voidy.....	62
5.7.4. Micro-via voidy	62
5.7.5. Kirkendallový (IMC) voidy.....	63
5.7.6. Pinhole voidy.....	64
II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	65
1. Experiment 1.....	65
1.1. Materiály použité v experimentu.....	66
1.2. Metody použité v experimentu.....	67

1.3.	Výsledky experimentu.....	70
1.4.	Diskuse k výsledkům experimentu.....	72
1.4.1.	Vliv změny tvaru šablony pro nanesení pájecí pasty	72
1.4.2.	Vliv použití nepáživé masky s různou drsností povrchu	74
1.4.3.	Vliv aktivity tavidla na vznik voidů	75
1.4.4.	Zastoupení makrovoidů a mikrovoidů v pájeném spoji	76
1.5.	Závěry experimentu.....	76
2.	Experiment 2.....	78
2.1.	Materiály použité v experimentu.....	78
2.2.	Metody použité v experimentu	79
2.3.	Výsledky experimentu.....	82
2.4.	Diskuse k výsledkům experimentu.....	86
2.4.1.	Chemická analýza.....	86
2.4.2.	Vliv použití tavidla s různými chemickými vlastnostmi.....	87
2.4.3.	Vliv teplotních gradientů na tvorbu voidů.....	88
2.4.4.	Výskyt makrovoidů v pájeném spoji.....	89
2.5.	Závěry experimentu.....	89
	Závěr	91
	Seznam publikací disertanta.....	93
	Publikace vztahující se k tématu disertační práce.....	93
	Publikace nevztahující se k tématu disertační práce	93
	Seznam tabulek	95
	Seznam obrázků	96
	Seznam grafů.....	98
	Seznam zkratk	99
	Reference	100

CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této disertační práce je prohloubení znalostí o vzniku dutin v pájených spojích. Tyto dutiny neboli voidy, mají velký vliv na spolehlivost pájeného spoje, a tím i na spolehlivost celého zařízení. Tato chyba vznikající při procesu pájení je úzce spjata s bezolovnatým pájením a metodou povrchové montáže. Má disertační práce se zaměřuje na odhalení a potlačení vlivů, které vznik těchto dutin způsobují.

Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. Teoretická část má za cíl shrnutí problematiky pájení včetně dosavadního stavu poznání, zejména v oblasti vzniku dutin v pájených spojích, kterým se tato práce primárně věnuje. Experimentální část práce si klade za cíl poukázat na doposud nezkoumané vlivy vedoucí ke snížení voidovitosti. Primárně je zde kladen důraz na únik látek z pájeného spoje během procesu přetavení, čímž chceme docílit snížení výskytu voidů. V první části je cílem zkoumání faktorů, díky kterým lze dosáhnout co největšího úniku plynných a kapalných látek z pájeného spoje během procesu přetavení. Druhá část této kapitoly je zaměřena na chemickou analýzu použitých pájecích past a úpravu parametrů teplotního profilu typu RTS (angl. Ramp to Spike).

Disertační práce tedy vede k porozumění a hlubšímu pochopení vztahu mezi voidy a gradientem ohřevu teplotního profilu, vlivu motivu šablony pro nanesení pájecí pasty, aktivity tavidla, chemického složení pájecí pasty a typu použité nepájivé masky. Celkově je poté možné optimalizovat pájecí proces pro výrazné snížení výskytu voidů, a tím zvýšit spolehlivost pájených spojů.

ÚVOD

Pájení je nezbytnou a nedílnou součástí elektrotechnické výroby, čímž má značný vliv na spolehlivost celého zařízení. Proto je nutné, aby pájené spoje vykazovaly co nejvyšší možnou kvalitu a tvořily tak spolehlivou část celku. Kromě elektrického propojení má pájený spoj za úkol také odvod ztrátového tepla a mechanickou fixaci součástky. Mechanická fixace se stala ještě důležitější při rozšíření využití povrchové montáže, kdy součástka není fixována vývody v desce plošných spojů jako v případě skrzděrové montáže. Dlouhá léta se pro pájení využívala cín-olovnatá pájecí slitina, nejčastěji v podobě 63Sn37Pb. Od roku 2006 došlo vzhledem ke škodlivosti k omezení používání některých látek. Za nebezpečný prvek bylo označeno také olovo. Vlivem tohoto nařízení bylo nutné hledat alternativní možnosti v podobě bezolovnatých pájecích slitin. Při jejich použití se ovšem potýkáme s rozšířením některých chyb, které je nutné řešit a eliminovat. Tyto chyby jsou obvykle způsobeny rozdílným chováním ve srovnání s olivnatými pájkami, jako je například horší smáčivost, která musí být kompenzována použitím agresivnějších tavidel, nebo jejich vyšší teplota přetavení atd.

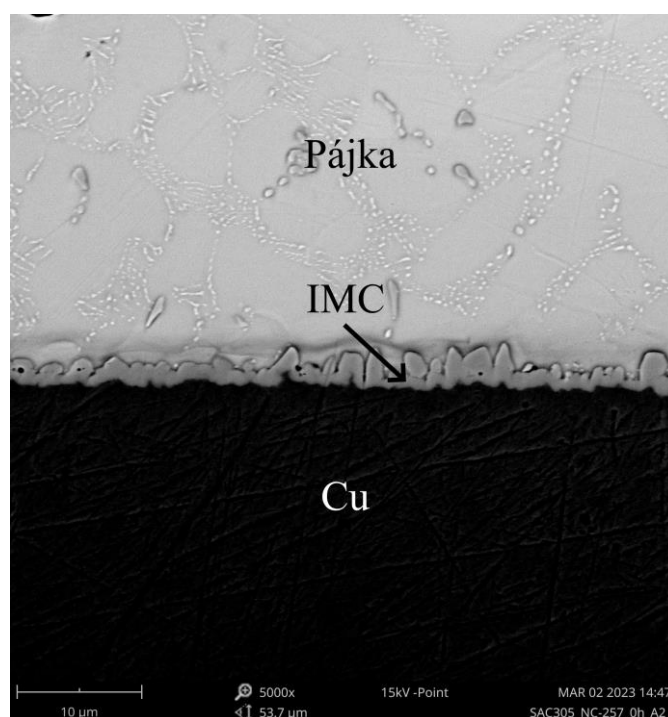
Jedna z chyb, která se u bezolovnatého pájení vyskytuje, je zvýšený výskyt voidů (dutin) v pájených spojích. Tyto dutiny zhoršují uvedené vlastnosti pájeného spoje, proto je nutná jejich maximální eliminace. Na jejich vznik mají vliv použité materiály i technologie a parametry pájecího procesu.

Disertační práce je zaměřena na optimalizaci standardních pájecích procesů a použití vhodné kombinace materiálů pro snížení výskytu voidů. Věnuje se studiu vlivu použitých materiálů, jako jsou typy tavidel v pájecí pastě a drsnosti nepáživé masky, ale také procesním parametrům, jako je tvar šablony pro nanesení pájecí pasty a parametry teplotního profilu. Cílem je tedy maximální možné snížení voidovitosti při použití standardních metod, které nezpůsobí velké finanční zatížení při změně procesu v praxi.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1. Teorie pájení

Pájení je proces, který lze definovat jako metalurgické spojování dvou nebo více kovových částí roztavenou pájecí slitinou. Při tomto procesu, oproti svařování, nedochází k tavení pájených součástí. Dochází ovšem k difuzi spojovaných kovů. Atomy pájeného kovu se nachází ve velké blízkosti atomů pájky. Zde již působí adhezní a kohezní síly (přilnavost a soudržnost). Během procesu pájení vznikají díky uvedeným faktorům také mezifázová rozhraní, tzv. intermetalické sloučeniny (angl. Inter-Metallic Compound, zkratka IMC). Po ochlazení pájecí slitina ztuhne a vytvoří pevný spoj, který má zajistit spolehlivé elektromechanické spojení [1–3].



Obrázek 1 – Pájený spoj s vyznačenou intermetalickou vrstvou.

1.1. Dělení pájení

Základní dělení pájení je na měkké a tvrdé. Jako teplota pro toto dělení se obvykle uvádí hranice 450 °C [1]. Tvrdé pájení je využíváno pro spojování materiálů s vysokou teplotou tání jako je ocel. Společně s měkkým pájením patří mezi technologie metalurgického spojování.

Vzhledem k zaměření této práce bude v textu dále uvažováno pouze měkké pájení. To se nejčastěji využívá pro spojování v elektrotechnice a elektronice. Standardně jsou využívány cínové slitiny s příměsemi jako je stříbro a měď [1].

1.2. Pájený spoj

Kvalitu pájeného spoje ovlivňuje několik faktorů. Těmi jsou pájecí plošky na DPS, vývody součástek, pájka, tavidlo a proces pájení. Abychom mohli klasifikovat pájený spoj jako kvalitní, musí splňovat základní vlastnosti [1]:

- vysoká elektrická vodivost,
- chemická odolnost (odolnost proti oxidaci a korozi),
- dobré mechanické vlastnosti (pevnost v tahu a smyku),
- odolnost vůči vnějším vlivům (stálost vlastností v čase),
- dobrá tepelná vodivost.

1.3. Pájitelnost

Pájitelnost je možné definovat jako schopnost kovového povrchu nechat se rovnoměrně po celé ploše a v daném čase smočit pájkou během procesu pájení. Parametry, které ovlivňují pájitelnost, jsou kvalita pájeného povrchu a chemické složení pájky [1]. Problémy s pájitelností obvykle nastávají při velkém výskytu nečistot a oxidů na povrchu desek plošných spojů během procesu pájení.

1.3.1. Smáčení povrchu

Smáčivost povrchu je obecně definována pájitelností, jedná se o schopnost roztékání pájky po pájeném povrchu. Povrch pájecí plošky má vyšší povrchovou energii než roztavená pájka. Díky této podmínce dojde ke smočení kovového povrchu, protože se vytvoří metalurgická vazba. Postupně dojde k vytvoření tenké mezikovové vrstvy, která tvoří základ spoje. Při dobrém smáčení povrchu se pájecí ploška celá pokryje pájkou, což vede k vytvoření kvalitního spoje. Pájený povrch musí být před procesem pájení zbaven nečistot. Na tento jev mají vliv parametry pájecího procesu a také použité tavidlo [1,2]. Obecně je pro vytvoření kvalitního pájeného spoje vyžadováno co nejlepší smáčení povrchu.

1.3.2. Nesmáčení povrchu

Nesmáčení povrchu je stav, kdy pájka dostatečně nepřilne k pájenému povrchu. Nedojde tedy ke správnému vytvoření metalurgické vazby. Důvodů tohoto jevu může být několik. Nejčastějším důvodem je přítomnost velkého množství oxidů na povrchu pájecích plošek. Tavidlo pak není schopno tyto oxidy odstranit, což může být způsobeno i chybnou volbou tavidla s nízkou aktivitou. Pokud se povrch dostatečně nesmočí, vede to ke vzniku nekvalitního, nestabilního a slabého pájeného spoje, který je náchylný k poruše při mechanickém namáhání. Výrazně se také zhorší elektrické a tepelné vlastnosti pájeného spoje. Abychom předešli nesmáčení, je nutné důkladně očistit povrch pájeného materiálu a zvolit vhodnou kombinaci materiálů [1,2].

1.3.3. Odsmačení povrchu

K odsmačení dochází, pokud mezikovové vrstvy, které obsahují velké množství cínových směsí, vyskytujících se na rozhraní, vytahují cín z pájky. Tím dojde k vytvoření nepravidelných shluků v pájeném spoji. Pájený povrch zůstane i nadále pokryt alespoň miniaturní vrstvou pájky. Odsmačení také může vznikat ve spodní části pájeného spoje, a to v případě použití povrchové úpravy pájecích plošek z drahých kovů, kdy dojde ke kompletnímu rozpuštění drahého kovu v pájce [1,2].

1.3.4. Povrchové napětí pájeného spoje

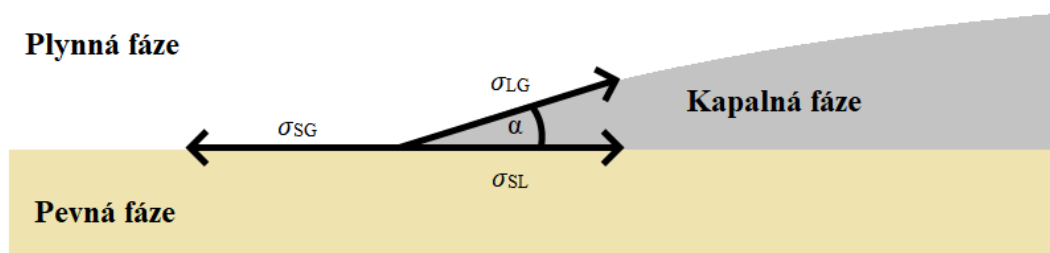
Povrchové napětí hraje v procesu pájení významnou roli pro vytvoření kvalitního spoje. Jedná se o jev, kdy se povrch kapaliny pájeného materiálu (v tomto případě roztavená pájka) snaží dosáhnout co nejmenší povrchové energie. S tím plně souvisí povrchové napětí (Nm^{-1}), které je definováno Young-Dupreho rovnicí [4]:

$$\sigma_{\text{SL}} = \sigma_{\text{SG}} - \sigma_{\text{LG}} \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

Kde se v rovnici vyskytují tři povrchová napětí:

- σ_{SL} – rozhraní mezi pevnou a kapalnou fází (angl. solid-liquid),
- σ_{SG} – rozhraní mezi pevnou a plynnou fází (angl. solid-gas),
- σ_{LG} – rozhraní mezi kapalnou a plynnou fází (angl. liquid-gas).

Poslední součástí rovnice je kontaktní úhel α . Funkce úhlu alfa se také označuje jako součinitel smáčení. Ideální situací vycházející z fyzikální podstaty je, pokud se velikost úhlu mezi pájeným povrchem a pájkou blíží nule (jako výborný výsledek smáčení se klasifikuje úhel do 20°). Jako projev dobrého smáčení mezi pájecí ploškou a pájenou součástí je přítomnost tzv. konkávního menisku. Ten vzniká v případě, pokud $\alpha < 90^\circ$. Pokud bude $\alpha > 90^\circ$, tak hovoříme o nesmáčení, kromě případu, kdy bylo nanášeno velké množství pájky, která se již přesunuje přes okraj pájecí plošky nebo se dotýká nepájecí masky [3].



Obrázek 2 – Stav rovnováhy povrchových napětí.

Podle popsaných parametrů a experimentu popsaném v [1] je možné klasifikovat závislost kvality smáčení na smáčecím úhlu takto:

- $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ – výborné smáčení,
- $20^\circ < \alpha < 40^\circ$ – dobré smáčení,
- $40^\circ < \alpha < 55^\circ$ – postačující smáčení,
- $55^\circ < \alpha < 90^\circ$ – špatné smáčení,
- $90^\circ < \alpha$ – nesmáčení.

Young-Dupreho rovnice ovšem platí pouze pro dokonale hladký povrch bez jakéhokoliv zdrsnění. Povrch materiálu je přirozeně vždy alespoň částečně drsný. To má za následek ovlivnění smáčecího úhlu. Proto je vhodné doplnit původní rovnici o korekci, kterou lze vyjádřit následovně [5]:

$$\cos\alpha_w = r \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

V této rovnici α_w ($^\circ$) reprezentuje kontaktní úhel po korekci a r (-) faktor drsnosti. Faktor drsnosti je definován jako zvětšení plochy vlivem zdrsnění dokonale hladkého povrchu. Vypočítá se jako poměr skutečné zdrsněné plochy ku ploše hladkého povrchu. Z toho vyplývá, že faktor drsnosti nabývá vždy hodnot větších než jedna pro jakýkoliv reálný povrch a je roven jedné pro dokonale hladký povrch. V případě, kdy se jedná o dokonale hladký povrch (r je rovno jedné) se $\cos\alpha_w = \cos\alpha$, z čehož vyplývá, že α vyjadřuje smáčecí úhel dokonale hladkého povrchu [6].

V praxi lze faktor drsnosti vypočítat z parametru R_{L0} (%), který získáme měřením pomocí profilometru. Tento parametr R_{L0} vyjadřuje procentuální zvětšení délky profilu oproti délce profilu, který je naměřen na dokonale hladkém povrchu. Výpočet je pak následující [7]:

$$r = 1 + \frac{R_{L0}}{100} \quad (3)$$

Jako další parametr pro vyjádření drsnosti povrchu se používá parametr R_a (μm), který vyjadřuje průměrnou výšku změřeného profilu [8]. R_a ovšem vzhledem ke kontaktnímu úhlu vykazuje nejednoznačnou závislost [7].

Parametr drsnosti povrchu je pro nás důležitý při procesu pájení pro roztékání tavidla. Tavidlo se během pájecího procesu roztéká po pájecí plošce a také do jejího okolí, tedy po povrchu nepájecí masky nebo substrátu. Čím drsnější je povrch okolí, tím více se tavidlo roztéká do okolí a odchází z pájeného spoje. V experimentální části této práce bude následně demonstrováno, že množství tavidla roztečeného do okolí pájecí plošky má vliv na vznik voidů v pájených spojích.

2. Materiály používané při povrchové montáži

2.1. Formy pájek

Pájky jsou dodávány v několika základních formách. První z nich je pájecí drát, který může uvnitř obsahovat tavidlo (v tomto případě je dutý). Obvykle se využívá pro ruční pájení nebo při použití pájecích robotů. Druhou formou jsou pájecí kuličky, které se používají pro opravu pouzder BGA. Třetí formou jsou tyče pájky, kterými se doplňují lázně pro pájení ponorem nebo vlnou. Poslední běžnou formou pájky je pájecí pasta. Ta je v současné době využívána pro montáž součástek na desku plošného spoje v elektrotechnické praxi nejvíce a vzhledem k zaměření této práce bude více rozebrána v následující kapitole [1,2].

2.1.1. Pájecí pasty

Pasta se skládá ze směsi kuliček pájecí slitiny, tavidla a přídavných složek. Tato směs musí mít potřebnou lepivost, viskozitu a také roztékavost, díky čemuž se s ní bude dobře pracovat a zajistí kvalitní přilnavost součástek před procesem přetavení. Zastoupení složek v pájecí pastě je obvykle 89 % podílu kuliček pájecí slitiny a 11 % tavidla spolu s ostatními příměsemi [1].

Kuličky pájecí slitiny mají nejběžněji složení na bázi SAC (SnAgCu). Důležitým parametrem je samotná velikost použitých kuliček [1]. Typ podle jejich velikosti je definovaný pomocí normy IPC J-STD-005A [9] a ukazuje nám ho Tabulka 1.

Tabulka 1 – Rozdělení pájecích past dle IPC J-STD-005A [9].

Typ	80 % částic [μm]	Max 10 % částic [μm]	Méně než 0,5 % částic [μm]	Max 10 % částic [μm]
1	150 – 75	menší než 75	větší než 160	160 – 150
2	75 – 45	menší než 45	větší než 80	80 – 75
3	45 – 25	menší než 25	větší než 60	60 – 45
4	38 – 20	menší než 20	větší než 50	50 – 38
5	25 – 15	menší než 15	větší než 40	40 – 25
6	5 – 15	menší než 5	větší než 25	25 – 15
7	11 – 2	menší než 2	větší než 15	15 – 11

Kde se jednotlivé typy hodí pro následující aplikace [9]:

- Typ 1 – běžné aplikace,
- Typ 2 – méně náročné aplikace (rozteč komponent 0,65 mm a větší),
- Typ 3 – velmi jemné rozteče součástek (rozteč 0,4 mm – 0,3 mm),
- Typ 4 – velmi jemné rozteče součástek (rozteč pod 0,3 mm),
- Typ 5, 6 a 7 – miniaturní rozteče součástek (rozteč pod 0,07 mm).

Velikost kuliček má mimo jiné zásadní vliv na vznik oxidů na jejich povrchu. Při použití menších kuliček pájky dojde při stejném množství pájecí pasty ke zvětšení povrchu, který je náchylný k oxidaci. To následně může vést k problémům s pájitelností. Proto se musí vždy přizpůsobit použitý typ a složení tavidla v pájecí pastě velikosti použitých kuliček pájecí slitiny. Oxidaci je možné zabránit způsobem výroby těchto kuliček. Pokud je realizována v ochranné dusíkové atmosféře, sníží se tím jejich zoxidování při výrobě. Metody jejich výroby jsou rozprašování roztaveného kovu (nejběžněji používaná metoda), mechanické zpracování kovu (způsobuje nepravidelný tvar částic), elektrolytickým vylučováním (částice nemají sférický tvar) nebo chemickou redukcí [1].

Pro výslednou vysokou kvalitu pájení je velmi důležité, aby byla velikost částic vhodně zvolena vzhledem k motivu na šabloně či sítu. Nejběžněji používané typy past vzhledem k velikosti částic v praxi jsou T3, T4 a T5 [10–12]. Před aplikací je nutné dbát na správnou manipulaci a zacházení s pastou, aby si zachovala své parametry. Vlivy, které její vlastnosti mění jsou vlhkost, vysoká teplota, nevhodné skladování, dlouhodobé otevření. Před aplikací je také nutné dodržet postupy a dostatečně pájecí pastu promíchat a nechat aklimatizovat.

2.2. Pájecí slitiny

Pájecí slitina je směs alespoň dvou kovů používaná při pájení. Poměr smíšených kovů následně určuje její parametry, jako je teplota tání, chemická odolnost, adheze apod. V následujících kapitolách budou popsány běžně používané pájecí slitiny.

2.2.1. Olovnaté pájecí slitiny

Olovnaté pájecí slitiny jsou od roku 2006 až na výjimky zakázané nebo omezené z důvodu negativních vlivů olova na lidské zdraví a životní prostředí. Toto nařízení vyšlo v platnost podle Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/95/ES o omezení používání

některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (angl. zkratka RoHS) a Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/96/ES o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (angl. zkratka WEEE). Výjimky tvoří zařízení určena pro odvětví medicíny, vojenská a letecká zařízení apod.

Nejběžněji využívaná olovnatá pájka ve výše uvedených povolených případech je 63Sn37Pb s teplotou tání 183 °C (dříve jedna z nejběžněji používaných pájecích slitin). Slitinu je možné obohatit o další kovy, jako je například bizmut, stříbro nebo měď, což vede k malému zlepšení některých vlastností (menší náchylnost k oxidaci, apod). Tyto kovy jsou zastoupeny ve výsledné slitině v jednotkách procent [1,2]. Olovnaté pájky mají také využití pro zařízení, která musí odolat vysokým okolním teplotám. Například při teplotě okolí 150 °C. Zde se využívají pájky s větším obsahem olova (např. 95Pb5Sn). Tato pájka je nahraditelná i bezolovnatými slitinami, ovšem nákladově je jejich použití mnohonásobně dražší [13].

2.2.2. Bezolovnaté pájecí slitiny

Z důvodů uvedených v předchozí kapitole bylo nutné vybrat adekvátní náhrady pro olovnaté pájecí slitiny. Jako alternativa je nejčastěji volena bezolovnatá pájecí slitina, ovšem v některých případech je také možné využití vodivých lepidel. Bezolovnaté pájecí slitiny, jako vhodné náhrady, je možné vyspecifikovat dle více úhlů pohledu. První možností je vybrat bezolovnatou pájku, na kterou je možné aplikovat zavedený technologický postup používaný pro olovnatou pájecí slitinu. Druhou možností je hledisko parametrů použitého materiálu, jako je teplota tavení, termomechanická odolnost, smáčivost, elektrická vodivost apod.

Obvykle bezolovnaté pájecí slitiny vyžadují vyšší teplotu pro tavení oproti olovnatým, což může mít za následek nutnost použití tepelně odolnějších pouzder součástí a v některých případech i substrátů. Pro výběr náhrad olova ve slitině byla stanovena kritéria jako je teplota tavení v rozmezí 150 °C – 250 °C, malá tepelná roztažnost, dobrá pájitelnost a smáčivost, dobré mechanické vlastnosti, nízká degradace, cena, toxicita, a jiné.

Vhodnými prvky, které byly vybrány pro přípravu bezolovnatých pájecích slitin jsou cín, stříbro, hliník, bizmut, zlato, chrom, měď, kadmium, zinek, nikl, molybden, platina, antimon, wolfram [1]. Vybrané eutektické slitiny jsou uvedené v Tabulce 2.

Tabulka 2 – Vybrané eutektické slitiny a porovnání s olovnatou pájkou [1].

Slitina	Eutektická teplota [°C]	Složení (hm%)
Sn-Cu	227	0,7
Sn-Ag	221	3,5
Sn-Au	217	10
Sn-Zn	198,5	9
Sn-Bi	139	57
Sn-In	120	51
Sn-Pb	183	38,1

Teploty tavení slitin jsou ovlivněné podílem jednotlivých prvků ve slitině a také jejich chemickým složením [1]:

- Teplotu tavení v rozmezí 140 °C – 200 °C vykazuje Sn zkombinovaný s Bi, Zn, a In. Tyto slitiny ovšem nemají požadované vlastnosti, aby se mohly používat ve standardním průmyslovém procesu.
- Teplotu tavení v rozmezí 200 °C – 230 °C mají slitiny Sn v kombinaci s Cu, Ag, Ni, Sb, Zn a Bi. Tato skupina je nejpoužívanější (nejobvyklejší používaná slitina je typu SnAgCu).
- Teplotní tavení v rozmezí 230 °C – 280 °C vykazují slitiny Sn, Au a Sb a jsou obvykle nanášeny až po prvotním pájení pájkou s nižší teplotou přetavení.

2.2.2.1. Slitiny SnAgCu (SAC)

Slitina typu SAC se hodí pro všeobecné použití a jedná se o nejpoužívanější typ pájecí slitiny v elektrotechnice, který je vhodný pro všechny využívané metody pájení. Oproti SnPb vyžaduje vyšší teplotu pro tavení, ovšem ostatní vlastnosti má velmi podobné. V případě přítomnosti 0,5 – 0,7 hm% mědi a 1 – 4 hm% stříbra, taje SAC přibližně při teplotě 217 °C – 227 °C.

Nejpopulárnější pájecí slitina tohoto typu je 96,5Sn3Ag0,5Cu (SAC305). Oproti ostatním slitinám má mnoho výhod, jako je nižší náchylnost na tvorbu intermetalických sloučenin, velmi dobrá smáčivost a kompatibilita s různými tavidly, nižší cena vlivem menšího obsahu Ag, a jiné. Standardně se SAC305 používá ve formě pájecí pasty při pájení přetavením.

Je ale také vhodná pro pájení vlnou [1,14]. Porovnání vybraných pájecích slitin s teplotami tání a tuhnutí zobrazuje Tabulka 3.

Tabulka 3 – Teploty tání a tuhnutí standardně používaných pájecích slitin SAC a porovnání s olovnatou pájecí slitinou [13].

Pájecí slitina	Teplota tuhnutí/tání (°C)
Sn1Ag0,5Cu	215/227
Sn3Ag0,5Cu	217/220
Sn3,8Ag0,7Cu	217/220
Sn3,9Ag0,6Cu	217/220
Sn4Ag0,5Cu	217/225
Sn37Pb	183/183

2.2.2.2. Slitiny SnAg

Slitiny SnAg jsou podobně jako SAC velmi rozšířené v průmyslu. Vykazují velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivost, odolnost proti korozi a stárnutí, vysokou pevnost spoje a stabilní mechanické vlastnosti. Typické složení této pájecí slitiny je 96,5Sn3,5Ag s teplotou tavení 221 °C. Prakticky se využívají například pro pájení flip chip [1,15].

2.2.2.3. Slitiny SnCu

Pájecí slitiny SnCu jsou obvykle tvořeny převážně cínem, např. 99Sn1Cu. Mají mnoho pozitivních vlastností, jako je dobrá smáčitelnost, vysoká mechanická pevnost a odolnost spoje. Velkou výhodou je jejich příznivá cena, takže je často využívána např. při pájení vlnou. Opět je tento typ vhodný pro pájení flip chip [1,15].

2.2.2.4. Slitiny SnZn

Tyto pájecí slitiny se jeví vhodnou alternativou v případě potřeby pájení při nižší teplotě. Slitiny na bázi SnZn mají obvykle teplotu tání okolo 199 °C. Vykazují dobré mechanické i elektrické parametry a kompatibilitu s velkou škálou materiálů, ovšem na povrchu jsou náchylné na oxidaci (povrch je často pokryt oxidem zinečnatým). Jejich cena je téměř srovnatelná s SnPb a mají velmi malý negativní dopad na životní prostředí [1,15,16].

2.2.2.5. Nízkoteplotní pájecí slitiny

Nízkoteplotní pájecí slitiny mají teplotu tání nižší než standardně používané pájky typu SAC a obvykle i než olovnaté pájky. Tím se dá zajistit minimální tepelné zatížení náchylných součástí a materiálů, a tím předejít jejich zničení během procesu pájení. Vlivem použití nižší teploty vede jejich použití také ke snížení spotřeby elektrické energie [1,15].

Mezi typické a nejrozšířenější zástupce patří bizmutové slitiny, např. 42Sn58Bi. Některé vlastnosti bizmutových pájek jsou mnohem lepší než vlastnosti pájek typu SAC. Například mechanická odolnost. Ovšem bismut se získává jako vedlejší produkt při těžbě olova, proto není z hlediska jeho náhrad příliš vhodný. Dále jsou pájené spoje náchylné na praskliny při opakovaném tepelném zatížení a jedná se o poměrně drahou látku [15–17].

Dalším zástupcem této skupiny jsou slitiny cínu a india. Jejich složení může být v rozmezí 52 – 97 %hm Sn a 3 – 48 %hm In. Tyto pájecí slitiny vykazují velmi dobré vlastnosti pájených spojů. Vzhledem k vyšší ceně india a jeho nižšímu výskytu v přírodě ovšem nejsou příliš používané a indium se spíše používá jako aditivum pro zlepšení smáčivosti a snížení teploty tání [16,18].

2.3. Tavidla

Tavidlo má zásadní vliv při vytváření pájeného spoje, konkrétně velmi výrazně ovlivňuje smáčivost pájeného povrchu, jak již bylo zmíněno v kapitole 1.3.1. Smáčení povrchu. Standardně se vyskytuje v tekutém, tuhém stavu nebo ve formě past. Základní funkcí tavidla je odstranění oxidů a nečistot z pájených povrchů a zabránění jejich další oxidace a reoxidace. S ohledem na míru oxidace a typ pájecí slitiny je nutné vhodně zvolit adekvátně agresivní tavidlo pro aktivaci povrchu. Zde opět narážíme na náhradu olovnatých pájek, které nevyžadovaly pro správně smáčení příliš aktivní tavidlo oproti bezolovnatým. Díky tavidlu také dochází k lepšímu přenosu tepla během procesu pájení. Po jeho zahřátí nejen odstraní nečistoty a oxidy, ale způsobí také rovnoměrnější rozložení tepla na celém povrchu pájecí plošky, což zlepšuje smáčivost.

Způsob aplikace tavidla se liší dle použité pájecí metody. Při pájení přetavením je tavidlo obsaženo v pájecí pastě, kde tvoří zhruba 11 hm% pasty. Pro zlepšení aktivity se pájecí pasta obohacuje o vhodné příměsi. Tavidlo v pájecí pastě mimo svou hlavní funkci slouží rovněž k vytvoření vhodně viskózní směsi. Vysoce viskózní pájecí pasta by se špatně nanášela

a tekutá by se příliš roztékala. Jiný způsob nanášení je použit například u pájení vlnou. V tomto případě je možné nanášení vlnou, nástřikem nebo napěněním [1,2].

2.3.1. Chemické složení tavidel

Tavidlo se skládá ze čtyř základních složek. Jedná se o tavidlový nosič, aktivátor, rozpouštědla a aditiva [3,19,20].

Tavidlový nosič je základní látka tavidla. Jejím úkolem je redukce oxidů na pájených plochách a odstranění nečistot. Obvykle se jedná o přírodní nebo syntetickou pryskyřici. Syntetické pryskyřice se vyrábí z organických kyselin, přírodní pryskyřice jsou organické kyseliny získávané z pryskyřic stromů. Tlak na používání syntetické pryskyřice plyne z negativních vlastností přírodních pryskyřic, jako je klimatický vliv na stálost složení pryskyřice ze získávaných stromů a jiné [2,3,21].

Další složkou tavidla je aktivátor, který musí být z hlediska rozpustnosti zcela kompatibilní s použitým tavidlem. Jedná se o vysoce agresivní tavidlo, které se smíchá s pryskyřicí pro zvýšení účinku odstranění oxidů z pájených povrchů. Typ aktivátoru rozlišujeme podle toho, jestli obsahuje halogeny (využívají se bromidy nebo chloridy) nebo ne (využívají se dibazické organické kyseliny nebo kyselina adipová) [21].

Aditiva slouží převážně pro řízení fyzikálního chování pájecí pasty při jejím skladování, manipulaci s ní, i při samotném přetavení. Jako rozpouštědla se používají alkoholy a glykoly nebo voda (v případě použití tavidel rozpustných ve vodě) [21].

2.3.2. Dělení tavidel

Tavidlo by mělo v ideálním případě vykazovat minimální aktivitu za běžných teplot a být adekvátně aktivní při procesu pájení. První parametr je důležitý primárně z důvodu následné nečinnosti zbytků tavidla po procesu pájení. V případě, že jsou zbytky tavidla agresivní, je nutné je po procesu pájení odstranit. Zástupci těchto tavidel se dělí na tavidla rozpustná ve vodě a tavidla rozpustná v rozpouštědle. Tavidla rozpustná ve vodě jsou obvykle aktivnější a jejich složení je na bázi organických kyselin. Jak již název napovídá, tak po procesu pájení se z povrchu oplachují demineralizovanou vodou. Tavidla rozpustná v rozpouštědle jsou typicky založena svým složením na bázi kalafuny (přírodní pryskyřice), případně se jedná o syntetická tavidla získaná z organických sloučenin, jak již bylo zmíněno v přechozí kapitole. Pro správné odstranění zbytků musí být rozpouštědlo vždy vhodně zvoleno vzhledem k použitému tavidlu.

Abychom se nemuseli zabývat odstraňováním tavidlových zbytků, tak se jako vhodné řešení jeví použití bezoplachových tavidel (angl. no-clean). Tím docílíme značného zjednodušení procesu, čímž dojde také k úspoře nákladů na pořízení oplachového zařízení a jeho provoz. Proces čištění by v některých případech také mohl zvýšit pravděpodobnost poruchy (např. při použití součástek s velmi jemnými roztečemi vývodů). U tohoto typu tavidel je výrazně snížen obsah pevných látek (z původních až 40 %hm je snížen obsah na maximálně 5 %hm). Jako aktivátory jsou obvykle použity kyselina karbonová nebo dikarbonová místo používaných halogenidů. Ty se odpaří během procesu pájení. Bezoplachové tavidlo musí splňovat několik podmínek. Nesmí zanechávat lepivé a korozivní zbytky, musí umožnit vnitro obvodové testování desky a jiné. Další úhel pohledu je estetičnost zanechaných zbytků. Pro některé případy není přípustné zbytky na DPS ponechat, aby nedošlo k odmítnutí při přejímce DPS.

Jako vhodný kandidát bezoplachového tavidla se jeví typ VOC-free (Volatile Organic Compounds – free). Jedná se o tavidla, které obsahují pevné složky v řádu jednotek %hm. Tímto malým zastoupením pevných složek se zamezí výskytu velkého množství zbytků na DPS po procesu pájení. Jako aktivátory tohoto typu se obvykle používají živice [1,2,22].

Klasifikace tavidel je určena mezinárodními normami. Konkrétně se jedná o normy IPC-J-STD-004 v aktuální revizi C [23], česká harmonizovaná norma ČSN EN 61190-1-1 [24] vycházející značením z IPC normy, EN ISO 9454-1:2016 [25] a dnes již neplatná vojenská norma MIL-F-14256 v poslední revizi F [26] (zmíněna z důvodu stálého využívání jejího značení). Kategorizace tavidel podle těchto norem ukazují následující tabulky.

Tabulka 4 – Klasifikace tavidel podle normy IPC-J-STD-004C [23].

Základní složka	Aktivita tavidla	Obsah halogenidů (%hm)	Typ	Označení
Přírodní pryskyřice (Rosin-RO)	nízká	<0,05	L0	ROL0
	nízká	<0,5	L1	ROL1
	střední	<0,05	M0	ROM0
	střední	0,5 – 2,0	M1	ROM1
	vysoká	<0,05	H0	ROH0
	vysoká	>2	H1	ROH1
Syntetická pryskyřice (Resin-RE)	nízká	<0,05	L0	REL0
	nízká	<0,5	L1	REL1
	střední	<0,05	M0	REM0
	střední	0,5 – 2,0	M1	REM1
	vysoká	<0,05	H0	REH0
	vysoká	>2	H1	REH1
Organické sloučeniny (Organic-OR)	nízká	<0,05	L0	ORL0
	nízká	<0,5	L1	ORL1
	střední	<0,05	M0	ORM0
	střední	0,5 – 2,0	M1	ORM1
	vysoká	<0,05	H0	ORH0
	vysoká	>2	H1	ORH1
Anorganické sloučeniny (Inorganic-IN)	nízká	<0,05	L0	INL0
	nízká	<0,5	L1	INL1
	střední	<0,05	M0	INM0
	střední	0,5 – 2,0	M1	INM1
	vysoká	<0,05	H0	INH0
	vysoká	>2	H1	INH1

V případě, že je v Tabulce 4 uveden obsah halogenidů menší, než 0,05 %hm, se tavidlo označuje jako bezhalogenidové.

Tabulka 5 – Klasifikace tavidel podle normy ISO 9454-1:2016 [25].

Typ tavidla	Základ	Aktivátor	Obsah halidů
1. Pryskyřičná	1. Přírodní pryskyřice 2. Syntetická pryskyřice	1. Bez aktivátorů 2. Halogeny 3. Bez halogenu	< 0,01 % < 0,15 % 0,15 – 0,2 % > 0,2 %
2. Organická	1. Vodou rozpustná 2. Vodou nerozpustná	1. Bez aktivátorů 2. Halogeny 3. Bez halogenu	
3. Anorganická	1. Soli ve vodném roztoku 2. Soli v organickém roztoku	1. S chloridem amonným 2. Bez chloridu amonného	
	3. Kyseliny	1. Kyselina fosforečná 2. Jiná kyselina	
	4. Zásady	1. Aminy nebo amoniak	

Tabulka 6 – Klasifikace tavidel podle normy MIL-F-14256F [26].

Označení tavidla	Popis
R	Tavidlo na bázi pryskyřice bez přidaných aktivátorů
RMA	Tavidlo na bázi pryskyřice s obsahem mírných aktivátorů
RA	Tavidlo na bázi pryskyřice s aktivátory
WSF-0	Vodou rozpustné organické tavidlo bez polyglykolu
WSF-1	Ostatní vodou rozpustná organická tavidla
LR	Tavidla s minimálním obsahem sušiny pro minimalizaci zbytků po procesu pájení

Obecně bychom tedy mohli říci, že tavidlo volíme vzhledem ke způsobu nanášení, zvolené metodě pájení, pájitelnosti povrchů (potřebné agresivitě tavidla), způsobu a složitosti odstranění zbytků po procesu pájení (v případě, že zbytky odstraňujeme) a v případě ponechání zbytků tavidla na DPS vzhledem k jejich stabilitě.

2.3.3. Hodnocení kvality tavidel

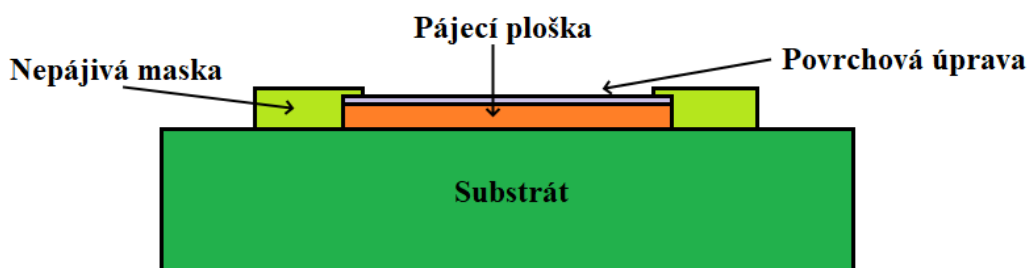
Kvalitu tavidel je možné klasifikovat podle několika ukazatelů. Jsou to jejich korozivní vlastnosti, schopnost smáčení v kombinaci s pájkou, vodivost tavidla a jeho zbytků po procesu pájení na DPS. Hodnocení lze provést měřením smáčecích úhlů, sledováním smáčivosti pájky a měřením smáčecích charakteristik pomocí metody smáčecích vah [27].

Existuje několik možných testů vycházejících z norem [27]:

- korozní test,
- test elektromigrace,
- test na měděné zrcátko,
- test na ionizovatelné nečistoty,
- test na obsah halogenidů,
- test povrchového izolačního odporu,
- atd.

2.4. Desky plošných spojů

Desky plošných spojů (neboli DPS, angl. Printed Circuit Board - PCB) mají několik základních funkcí. První funkce je mechanická podpora a fixace součástek, dále zajištění správného elektrického propojení (pomocí vhodného vodivého motivu) a zabezpečení přenosu a odvodu ztrátového tepla součástek. Na povrch desek se také pro lepší přehlednost umísťuje označení součástek a vývodů. Již z tohoto popisu je zřejmé, že se desky plošných spojů skládají vždy ze dvou základních materiálů, což je vodivý motiv (slouží jako vodič) a substrát (slouží jako izolant) [28].



Obrázek 3 – Deska plošných spojů.

Nejpoužívanějším materiálem, který se na DPS používá jako vodič je měď. Ta je obvykle ve formě tenké fólie, která se při procesu nanášení laminuje, či přilepí na základní

substrát. Následně získáme přesný požadovaný vodivý motiv, nejčastěji pomocí fotolitografického procesu. Při tomto procesu nanese se na měď fotorezist, který reaguje na UV záření přes požadovaný motiv. Poté zbytek fotorezistu odstraníme a nekryté části mědi odleptáme (jedná se o subtraktivní metodu). Další ze subtraktivních metod je například využití laseru nebo plazmy. V některých případech lze také využít aditivní technologie, jako je elektrodepozice, napařování nebo napařování mědi přes požadovanou šablonu přímo na substrát [28,29].

Substráty jsou základní nosnou částí desek plošných spojů. Jedná se o izolanty, které mají specifické vlastnosti jako je velký povrchový odpor, vysoká mechanická odolnost, stálost při teplotních změnách atd. Substráty se skládají z výztuže a vhodného dielektrika. Jako výztuž může být použita skelná tkanina, bavlněný papír, buničitý papír, PTFE tkanina, a jiné. Jako dielektrikum se používají epoxydové pryskyřice, fenolické pryskyřice, polyimidy, polyestery atd. [28].

Nejběžněji používaným substrátem je FR4 (angl. Flame-Retardant), který vyhovuje svými vlastnostmi standardním požadavkům a je dostupný za přijatelnou cenu [22,28]. FR4 se skládá z epoxydové pryskyřice a skelné tkaniny. Při výrobě se skelná tkanina impregnuje pryskyřicí, což je následováno válcováním na požadovanou tloušťku. Sušením tohoto materiálu vzniká tzv. prepreg. Prepreg se suší natolik, aby nebyl lepkavý, ale bylo ho možné opět teplem změkčit. Následně se prepregy skládají na sebe do požadované tloušťky výsledného laminátu, vloží se do lisu s ohříváním a za požadovaných podmínek (teplota a tlak) se nechají vytvrdit.

Další používaný substrát je např. FR2, který se někdy používá jako ekonomicky přívětivější varianta FR4. Jedná se o substrát složený z fenolické pryskyřice a buničitého nebo bavlněného papíru. Ten je ovšem oproti FR4 náchylnější na navlhání.

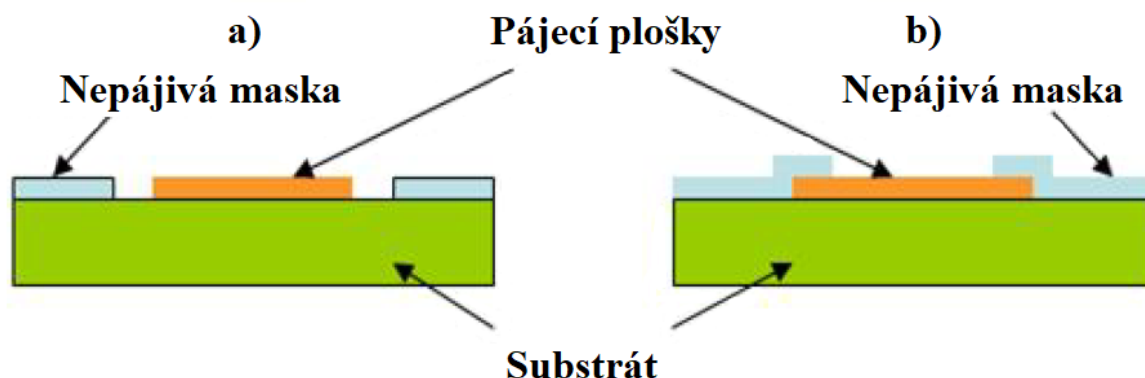
Pro specifické aplikace je možné využít také několik speciálních typů substrátů. Pro vysokoteplotní aplikace se používají substráty keramické, které jsou ovšem dražší a méně mechanicky odolné. V případě potřeby použití ohebného substrátu se používá například polyesterová pryskyřice bez výztuže atd. [28,30].

2.4.1. Nepájivá maska

Nepájivá maska se obvykle skládá z epoxidových pryskyřic a na DPS má několik funkcí. Používá se k ochraně vytvořeného měděného motivu proti vnějším vlivům, jako je například vlhkost, prach a mechanické poškození. Dále slouží jako bariéra proti nechtěnému

smočení vodičů pájkou během procesu pájení, což by mohlo vést k nežádoucím propojením a následným zkratům. Nanáší se na povrch DPS na všechna místa kromě těch, která mají být využita ke kontaktování, či pájení součástek. Podle způsobu nanášení masky rozlišujeme dva základní druhy. První, a nejběžněji používaná, je nepájivá maska, která se nanáší pomocí fotolitografického procesu. Může být buďto ve formě fólie (nános na desku vakuovou laminací) nebo ve více používané tekuté formě (nános na desku sprejováním, atd.). Po nanesení na DPS přes šablonu vytvrdíme požadovaný motiv pomocí UV světla a zbytek odstraníme. Druhou možností je nános nepájivé masky pomocí šablonového tisku (nebo sítotisku) a následné vytvrzení v peci [22,28,31].

Jak již bylo řečeno, jedním z účelů nepájivé masky je předcházet nechtěnému propojení pájecích plošek (vznik můstků) při procesu pájení. Existují dvě možnosti, jak tomuto jevu zabránit. První z nich je vytvoření prázdného místa mezi pájecí ploškou a nepájivou maskou (angl. Non Solder Mask Defined Pad). U této varianty vznikne okolo pájecí plošky prázdné místo, které má zamezit nechtěnému propojení více pájecích plošek v případě nanesení velkého množství pájky. Druhá varianta funguje na zcela opačném principu. Nepájivá maska se nanese přes hranice pájecí plošky (angl. Solder Mask Defined Pad). Velikost plošky v tomto případě definuje přesah nepájivé masky. Tento princip se používá v případech, kdy jsou použity velmi jemné rozteče vývodů, a tedy málo místa okolo pájecích plošek [32,33].



Obrázek 4 – Varianty provedení nepájivé masky: a) Non Solder Mask Defined Pad, b) Solder Mask Defined Pad [32].

Nepájivá maska má z hlediska experimentální části této disertační práce také další důležitou vlastnost, a to drsnost povrchu. Z hlediska různé drsnosti povrchu se dělí na matné, polomatné (pololesklé) a lesklé. Obvykle se jedná pouze o estetickou záležitost [22]. Součástí

experimentální části práce bude ovšem prokázání vlivu tohoto parametru na roztékavost tavidla po povrchu DPS, což má za následek vliv na tvorbu dutin v pájeném spoji.

2.4.2. Povrchové úpravy pájecích plošek

Povrchové úpravy pájecích plošek mají zásadní funkci pro zlepšení pájitelnosti. V případě, že by nebyla použita povrchová úprava, by došlo v krátkém časovém úseku vlivem okolního prostředí k oxidaci plošky. To má za následek, jak již bylo zmíněno, zhoršení pájitelnosti. Povrchové úpravy tvoří funkční rozhraní a primárně slouží k ochraně pájecí plošky nejen při pájení, ale také při jiných kontaktovacích technologiích. Díky této ochraně je možné mnohem delší skladování DPS, což je výhodné z hlediska ekonomické stránky. Typ povrchové úpravy má také značný vliv na vznik intermetalických sloučenin a na reakci s použitým tavidlem [1,22].

Nejběžněji používanými povrchovými úpravami pájecích plošek jsou [1,29,34]:

- OSP (angl. organic solderability preservative),
- HASL (angl. hot-air solder leveling),
- ENIG (angl. electroless nickel immersion gold),
- ImAg (angl. immersion silver),
- ImSn (angl. immersion tin).

Pro správnou volbu povrchové úpravy jsou kladeny požadavky na procesní kompatibilitu (adekvátní tloušťka povrchu, rovinnost povrchu, atd.), materiálovou kompatibilitu (kompatibilita s nepájivou maskou, chemicko-fyzikální kompatibilita s měděnou ploškou, atd.) a environmentální kompatibilitu (použití netoxických materiálů, atd.) [27].

2.4.2.1. OSP

Povrchová úprava OSP je organický povlak, který je obvykle tvořen imidazolem, benzotriazolem nebo benzimidazolem. Nanáší se ponorem do připravené lázně (o teplotě zhruba 50 °C) z uvedených látek rozpuštěnými v organické kyselině a ve vodě. Po ponoření jsou pomocí Van der Waalsových sil absorbované efektivní složky drženy na povrchu mědi. Tím se na pájecí plošce vytvoří tenký, rovnoměrný a průhledný ochranný film. Tloušťka této povrchové úpravy je obvykle 0,2 – 0,6 μm. Primárním účelem OSP je chránit měděnou plošku před oxidací během skladování a při následném procesu pájení. Tím můžeme docílit možnosti uskladnění až 1 rok. Není příliš vhodná pro dlouhodobé skladování kvůli degradaci (dochází ke stárnutí povrchové úpravy). Výhodou oproti ostatním povrchovým úpravám je ovšem nízká

cena, snadná aplikovatelnost, otěruvzdornost, rovinnost povrchu a je také vhodná pro montáž součástek s jemnou roztečí vývodů. Při procesu pájení se doporučuje použití méně aktivních tavidel, nižší teploty přetavení a snížení prodlevy mezi operacemi při procesu pájení. Opticky tato povrchová úprava příliš nezmění vzhled pájecí plošky. Ta po její aplikaci vypadá velmi podobně, jako kdyby nebyla povrchová úprava vůbec použita [1,29,35].

2.4.2.2. HASL

Tato povrchová úprava je tvořena pájecí slitinou. Proces nánosu funguje na principu ponoření DPS do roztavené pájky. Po vytáhnutí DPS z lázně je přebytečná pájecí slitina odstraněna horkovzdušnými noži (proud horkého vzduchu). Jedná se o velmi efektivní metodu, pomocí které je možné vytvořit ochrannou vrstvu, která má tloušťku cca 5 – 45 μm . Pájecí slitiny jsou v dnešní době převážně bezolovnaté a mohou být typu SAC, SnAg a jiné. Vzhledem k aplikaci je tato povrchová úprava cenově velmi příznivá a umožňuje dlouhodobější skladování. HASL také umožňuje vícenásobné přetavení a má velmi dobrou smáčivost. Hodí se pro pájení THD i SMD součástek. Protože ale není povrch dostatečně rovný, problém nastává u jemných roztečí SMD součástek. Dalším problémem je vznik intermetalických sloučenin na rozhraní mezi mědí a pájkou, která tvoří povrchovou úpravu. Po finálním procesu pájení může díky tomu vznikat větší intermetalická vrstva, což má za následek snížení spolehlivosti pájeného spoje. Nevýhodou je také již zmíněný ponor do pokovovací lázně, kterým vzniká tepelné namáhání DPS, což není pro některé typy substrátů vhodné [1,22,27,29].

2.4.2.3. ENIG

Povrchová úprava ENIG je tvořena chemicky naneseným niklem s tloušťkou cca 4 – 6 μm , který se následně pokryje vrstvičkou zlata o tloušťce 0,05 – 0,2 μm . Nikl zajistí vytvoření velmi kvalitního spoje, protože po procesu pájení zabraňuje difúzi mědi do pájky, a tedy vzniku intermetalických sloučenin na bázi Sn a Cu. Pokud je čistý, je také velmi dobře pájitelný. K zajištění tohoto parametru slouží miniaturní vrstva zlata, která je odolná proti oxidaci, což zajišťuje možnost dlouhodobého skladování DPS. Důležité je, aby vrstva zlata byla kvalitně nanesená, jinak dojde k oxidaci niklu. To má za následek výrazné zhoršení pájitelnosti. Pokud bychom chtěli docílit nejvyšší kvality nanesených vrstev, je možné využít pro jejich aplikaci náročnější galvanický proces. Metody nanesení této povrchové úpravy zajišťují dokonalou rovinnost a hladkost povrchu, což vyhovuje i vysokým požadavkům pro náročné aplikace. ENIG také umožňuje vícenásobné pájení. Nevýhodou je vyšší cena i vzhledem k náročnosti procesu nanášení. Dále může vzniknout při procesu vytváření této povrchové

úpravy chyba, která se nazývá black-pad efekt související s obsahem fosforu v niklu při nanášení zlata. V podstatě dojde ke korozi niklu [1,22,29]. Tato chyba bude více rozebrána v kapitole 5.2. Black pad efekt. Pro řešení tohoto problému je možné využít místo povrchové úpravy ENIG alternativu ENEPIG. Při této variantě se mezi vrstvu zlata a niklu přidá ještě vrstva paladia o tloušťce zhruba 0,1 – 0,2 μm . Tato úprava zajistí také lepší mechanické vlastnosti, ovšem vzhledem k přidání další fáze do procesu je dražší. ENEPIG je také náchylnější k elektrochemické migraci [36].

2.4.2.4. ImAg

Povrchová úprava imerzního stříbra je tvořena chemickým pokovením pájecí plošky v lázni o teplotě zhruba 50 °C. Vykazuje velmi dobrou smáčivost, opakovatelnost pájení a díky způsobu nanášení precizní rovinnost. Tloušťka vrstvy se obvykle pohybuje mezi 0,15 – 0,3 μm . Může se používat při pájení součástek s jemnou roztečí vývodů. Nevýhodou je náchylnost na oxidaci (primárně v atmosféře obsahující chlór a síru), proto není vhodná na dlouhodobé skladování. Jako prevence proti tvorbě oxidů se často používají organické povlaky, které čas skladování prodlouží na několik měsíců [1,22,37,38].

2.4.2.5. ImSn

Imerzní cín je další běžně používaná povrchová úprava, která se nanáší pomocí chemického pokovení v lázni s teplotou okolo 55 °C. Tloušťka vrstvy se pohybuje zhruba v rozmezí 0,6 – 1,2 μm a opět je při standardních podmínkách vysoce rovinná. Nevýhoda ovšem je, že po prvním procesu pájení se snižuje její pájitelnost (zhoršují se vlastnosti umožňující opakovatelné pájení). Cín je velmi náchylný na vznik intermetalických vrstev, které vzhledem k malé tloušťce mohou časem úplně nahradit původní vrstvu cínu (znemožní pájení). Proto je u této povrchové úpravy velmi krátká doba skladovatelnosti, maximálně několik měsíců. Další negativní vlastností je náchylnost na tvorbu cínových whiskerů, které vznikají při tepelném, mechanickém nebo elektrickém namáhání [1,22,34].

2.4.2.6. Porovnání vlastností uvedených povrchových úprav

V této kapitole jsou v Tabulce 7 uvedeny základní parametry uvedených povrchových úprav pro porovnání:

Tabulka 7 – Porovnání vlastností povrchových úprav [1,22,27].

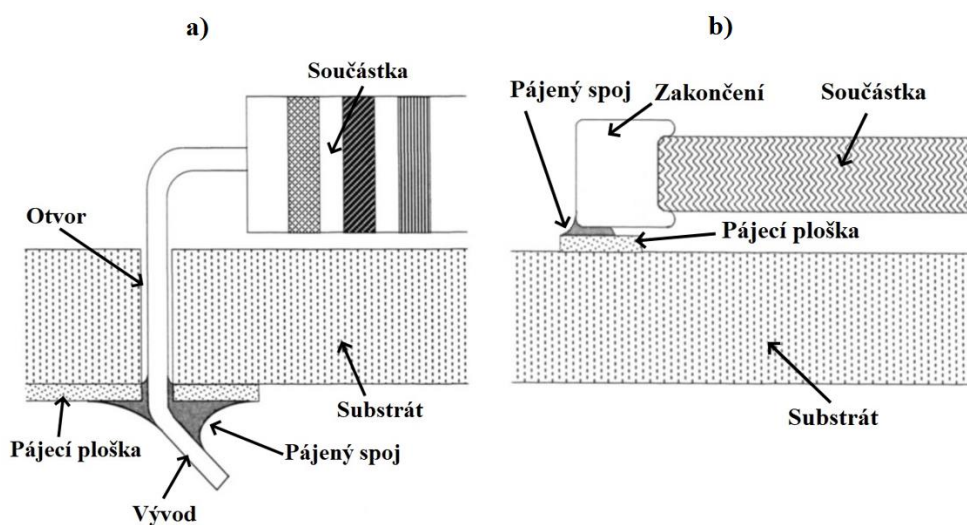
Vlastnosti	OSP	HASL	ENIG	ImAg	ImSn
Tloušťka vrstvy [μm]	0,5	1 – 20	5	0,16	0,1
Teplota zpracování [$^{\circ}\text{C}$]	40	240-260	80	50	70
Vícenásobný teplotní cyklus	Probl.	Ano	Ano	Ano	Ano
Počet cyklů přetavení	2	6	6	6	2 – 3
Rovinný a jemný povrch	Ano	Ne	Ano	Ano	Ano
Kontaktování	Ne	Ne	Ano	Ano	Ne
Fine Pitch aplikace	Ano	Probl.	Ano	Ano	Ano
Teplotní stres na 65°C	Ne	Ano	Ne	Ne	Ne
Údržba lázně	Snadná	Obtížná	Snadná	Snadná	Snadná
Řízení procesu	Snadné	Střední	Obtížné	Snadné	Snadné
Náklady	Nízké	Střední	Vysoké	Střední	Nízké
Ekologické aspekty	Dobré	Špatné	Dobré	Dobré	Dobré
Bezolovnatá pájka SnAgCu	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje	Vyhovuje
Doba skladování [měsíce]	6	18	24	12	6

3. Montážní technologie

Montážní technologie lze rozdělit na dva základní typy. Jedná se o povrchovou montáž (angl. Surface Mount Technology – SMT) a montáž do připravených děr v DPS (angl. Through Hole Technology – THT).

Technologie THT je historicky starší metodou, kdy vývody součástek před procesem pájení prostrkáváme předvrtanými dírami skrz DPS. Vývody musí být tvarovatelné a také mít dostatečnou délku. Po procesu pájení následuje krácení přebytečných částí vývodů. Vzhledem k nutnosti vrtání děr tento typ montáže neumožňuje pájet součástky THD (angl. Through Hole device) s pouzdry s jemnými roztečemi [1,21]. Sobolewsky [39] ve své studii popisuje, že typ součástek THD je výhodnější v případě potřeby vyšší spolehlivosti propojení, která je dána mechanickým ohnutím vývodů součástky. To zajistí v kombinaci s pájeným spojem lepší fixaci.

Součástky typu SMD (angl. Surface Mount Device) se osazují na pájecí plošky na povrchu DPS. Součástka a pájený spoj jsou tedy na stejné straně. To poskytuje lepší využití prostoru na desce a také pájení s velmi jemnými roztečemi. Díky uvedeným parametrům tento typ montáže umožňuje poměrně vysokou hustotu osazení součástek. Značnou výhodou je také využití působení povrchového napětí roztavené pájky na vystředění umístěných součástek na pájecích ploškách [1,21,28]. Vzhledem k experimentální části práce se nadále budu věnovat převážně tématům vztahujícím se k povrchové montáži (SMT). Porovnání THT a SMT technologie popisuje Obrázek 5.



Obrázek 5 – Porovnání THT (a) a SMT (b) technologie [40].

4. Metody pájení

Metody pájení, které v oblasti elektroniky používáme, je možné rozdělit na ruční pájení, tekuté pájení (angl. flow) a pájení přetavením (angl. reflow) [1].

4.1. Ruční pájení

Značnou nevýhodou této metody pájení je vysoká časová náročnost, a také obtížná reprodukovatelnost. Proto se ruční pájení v dnešní době využívá převážně pro realizaci oprav zařízení nebo při montáži součástek se speciálním pouzdrem, které není možné osadit strojově. Pájka se obvykle do spoje dodává rozehřátím drátu přes nahřátý hrot nebo rozehřátím pájecí pasty [1,2]. Využívají se tyto typy ručního pájení [1,2]:

- pájení kovovým hrotem,
- pájení proudem horkého vzduchu,
- vysokofrekvenční pájení.

4.2. Tekuté pájení

Při tekutém pájení je pájka dodávána do spoje přímým kontaktem s roztavenou slitinou. To znamená, že součástky a DPS jsou vystaveny poměrně vysoké teplotě. Není tedy možné tímto způsobem pájet komponenty, které jsou náchylné na vysokou teplotu, protože by došlo k jejich poškození [22]. Tento typ pájení se typicky používá pro součástky THD, ale je možné ho použít také pro součástky typu SMD, pokud součástky před procesem přilepíme k DPS. Existuje několik metod tekutého pájení. Jedná se o pájení vlnou, pájení ponorem a pájení vlečením [1]. Pape [41] uvádí, že při přechodu na bezolovnaté pájení došlo ke změnám chování tekuté pájky, čemuž musel být přizpůsoben pájecí proces (a také používaná zařízení). Jedná se o zvýšení povrchového napětí, snížení viskozity, kontaminace lázně dalšími látkami, změna parametrů pájení (jako je zvýšení teploty lázně), vysoký obsah cínu v lázni a další.

4.2.1. Pájení vlnou

Tato metoda využívá čerpadlem vytvořenou vlnu roztavené pájky, kterou prochází osazená DPS. Při průchodu smočí pájka odkryté kovové oblasti na DPS, které nejsou chráněné maskou. Jedná se o nejvíce využívanou metodu tekutého pájení. Při velmi hustém osazení součástek roste nebezpečí vzniku chyb během procesu, jako jsou mosty, nedostatečné smočení a jiné [1,21].

Proces pájení má tři etapy:

- 1) aktivace povrchu,
- 2) předeheřev,
- 3) pájení vlnou.

Aktivace povrchu může být provedena chemickou cestou, která se dělá pomocí tavidel. Tavidlo se nanáší pomocí dávkovačů zvolenou technologií navazující na ostatní části pájecího stroje (pěnový dávkovač, sprejový dávkovač atd.). Další možností je aktivace povrchu pomocí plazmy, ultrazvuku [1,21], nebo lze také využít další beztavidlovou metodu ROSE (angl. Resistivity of Solvent Extract), kde se oxidy odstraní pomocí elektrochemického procesu [42]. Všechny uvedené metody slouží k odstranění oxidů a nečistot a k přípravě povrchu pro smočení pájkou.

Dalším krokem je předeheřev. Touto částí procesu předcházíme tepelnému šoku DPS a v případě použití tavidla dochází k jeho aktivaci. Předeheřev musí mít pevně definované vlastnosti podle použitých materiálů. Nesmí být proveden skokově, ale náběh teploty musí být pozvolný a přesně navazující na proces pájení vlnou. Pro jeho realizaci se používá horký vzduch, výhřevné desky nebo sálání.

Posledním krokem je pájení vlnou, kdy se DPS pohybuje proti směru proudění pájky pod nájezdovým úhlem $2^\circ - 7^\circ$. Proces musí být optimalizovaný, aby nedocházelo k chybám [1,21].

Existuje několik typů používaných vln. Prvním je jednoduchá vlna. Tento typ je ze všech nejrozšířenější. Problém ovšem nastává, pokud jsou DPS hustě osazeny. V takovém případě nemusí dojít ke smočení celé DPS, čímž vznikají tzv. suché spoje. Proto se doporučuje její použití pouze při řídkém osazení součástkami. Dalším typem je dvojitá vlna. Ta se skládá ze dvou vln, a to z turbulentní, která má za úkol smočit povrch a z druhé laminární, která zajistí odstranění přebytečné pájky. Tento princip vede ke snížení poruch. K lepší eliminaci přebytečné pájky se také doporučuje používat horkovzdušný nůž, umístěný za druhou vlnou. Dvojitá vlna zajišťuje kvalitnější tvorbu pájených spojů než vlna jednoduchá. Posledním využívaným typem je dutá vlna. U ní platí důležité pravidlo, že rychlost dopravníku DPS musí být stejná jako rychlost vlny. Během smáčení součástek je využit Bernoulliho zákon, takže v místě pájené součástky je vyšší rychlost a klesá statický tlak, čímž je pájka více tlačena z okolí na součástku [1,21,43].

Pájení vlnou je první metoda, která se začala využívat pro hromadnou výrobu, což vedlo ke zvýšení přesnosti a množství vyráběných DPS. Velkou roli zde hraje také rozvoj automatizace, která proces zrychluje a vylepšuje.

4.2.2. Pájení vlečením a ponorem

Při pájení vlečením je osazená DPS vlečena po ustálené hladině roztavené pájky. U metody pájení ponorem je osazená DPS ponořena do rozžhavené pájky na definovaný časový úsek. Pro odstranění přebytečné pájky se opět využívá horkovzdušný nůž. Oba tyto způsoby jsou velmi ojedinělé, proto není třeba zacházet do hlubších detailů [1,44,45].

4.3. Pájení přetavením

Pájení přetavením je významná metoda využívaná u povrchové montáže, protože umožňuje husté osazení součástek typu SMD na desky plošných spojů. Tím lze docílit značné zmenšení DPS, které je v dnešní době jedním z klíčových parametrů. Proto je tato metoda aktuálně nejvyužívanější. Technologicky je pájení přetavením zcela odlišné od popsané metody tekutého pájení a proces lze rozdělit do několika dílčích kroků [1,3,14,21]:

- 1) nanesení pájecí pasty na pájecí plošky DPS,
- 2) osazení součástek,
- 3) přetavení pájecí pasty,
- 4) kontrola a diagnostika pájených spojů.

4.3.1. Nanášení pájecí pasty

Pájecí pastu lze na pájecí plošky DPS nanést několika způsoby. První možností je nanášení dispenzerem. Využití dispenzeru pro dávkování pájecí pasty není využíváno pro standardní výrobu, ale pouze pro realizaci oprav, pro případné výměny jednotlivých kusů součástek na DPS nebo při kusové výrobě. Množství a tvar nanášeného materiálu se odvíjí od viskozity pájecí pasty, průměru dávkovacího hrotu a vzdálenosti hrotu od desky plošných spojů. Pro zvýšení přesnosti nebo požadavku na nános pájecí pasty na více míst, lze využít automatizovaného 3D manipulátoru, kterým docílíme přesné polohování hrotu na požadované místo.

Další možností, která se však v průmyslové praxi příliš nevyužívá, je sítotisk. Síto je tvořeno z nylonových, polyesterových nebo kovových vláken, která mají na povrchu fotocitlivý materiál. Tloušťka vláken udává množství nanesené pasty. Aby bylo síto vhodné pro nános

pájecí pasty, jeho oka musí mít minimálně 2,5krát větší velikost, než je zrnitost kuliček pájecí slitiny. Před procesem nanášení ozáříme síto UV zářením přes požadovaný motiv, aby došlo k nánosu na správná místa vzhledem k motivu na DPS a přebytečné části chemicky odstraníme. Síto následně umístíme do pohyblivého rámu ve vhodné výšce nad desku (obvyklá vzdálenost 1 cm) a pomocí stěrky protlačujeme pastu přes motiv v sítu. Tím dochází k jeho prohýbání a nanášení pájecí pasty na DPS [1,2,28].

Poslední a nejrozšířenější metodou používanou při sériové automatizované výrobě je využití šablonového tisku. Při dodržení všech postupů je při této metodě zaručena precizní aplikace pájecí pasty s homogenní tloušťkou i při velmi hustém požadovaném motivu pro aplikaci na pájecí plošky. Šablony jsou převážně vyrobeny z kovu. Při procesu nanášení pájecí pasty nejprve šablonu umístíme do rámu s ohledem na správnou aplikaci pasty dle motivu na DPS. Poté šablonu přitiskneme k DPS a pomocí třerky nanášíme pájecí pastu skrz otvory. Šablony mohou mít volitelnou tloušťku, obvykle 100 μm – 300 μm . Jejich tloušťkou volíme množství nanášené vrstvy, proto musí být otvory vyrobeny s velkou přesností [1,21,22]. Množství nanášené pájecí pasty má také vliv na výslednou kvalitu pájeného spoje [46].

Motiv šablony je možné vytvořit chemickým leptáním, laserem nebo elektrolyzou. První metodou je chemické leptání, které při výrobě využívá fotolitografii a následné leptání. Nevýhodou této metody je nerovnoměrné vyleptání otvorů. Takto vyrobené typy šablon mají největší toleranci rozměrů otvorů a při menším rozestupu otvorů (méně než 0,5 mm) není tento typ vhodný. Během nanášení totiž dochází k přilnutí pájecí pasty v záhybech. Mnohem přesnější metodou je řezání šablony laserem. Oproti ostatním metodám je zde také umožněno dodatečné zasahování do motivu (vyříznutí dalších částí). Jedinou nevýhodou je, že při řezání dochází k velkému zdrsňení okrajů na otvorech, což může způsobit zachytávání pájecí pasty. Vzhledem k tomu není doporučeno tento typ šablon používat při rozestupech otvorů menších než 0,4 mm. Obě vyjmenované metody byly subtraktivní. Posledním a nejdražším používaným způsobem je využití elektrolytického formování. Tato metoda je jako jediná aditivní. Pomocí fotolitografie vytvoříme požadovaný motiv na podkladový kovový materiál a galvanicky naneseeme nikl v požadované tloušťce. V posledním kroku odstraníme podkladový materiál a fotorezist. Tento typ šablony má zhruba o 3 μm menší přesnost než šablona řezaná laserem. Má ovšem dokonale hladké otvory, které zajistí, že se pájecí pasta nezachytává v otvorech, proto je vhodná i pro velmi jemné rozestupy otvorů. [1,28].

Pro nános pasty přes šablonu se používá těrka. Pro dosažení dokonalé přesnosti při nánosu je nutné, aby byla čepel co nejtvrdější. Dále záleží na přítlaku, rychlosti pohybu a úhlu náklonu čepele (obvykle 60°). Všechny tyto parametry se musí zvolit optimálně vzhledem k motivu a vlastnostem pájecí pasty [1,47].

4.3.2. Osazení součástek

Osazení součástek probíhá v průmyslu zcela automatizovaně na osazovacích automatech. Časová náročnost procesu vždy záleží na složitosti DPS a počtu osazovaných součástek. Obvykle jsou využívány osazovací hlavy s podtlakovým systémem, které odebírají součástky ze zásobníků a následně za pomoci kamer umisťují součástky na přesnou pozici danou programem, který vychází z výrobních dat. V případě potřeby zrychlení tohoto procesu je možné umístit více osazovacích hlav nebo zvýšit takt linky [21,48,49].

4.3.3. Přetavení pájecí pasty

Přetavení je jeden z klíčových procesů, který ovlivňuje vlastnosti pájeného spoje. Přetavení pájecí pasty je určeno nastaveným teplotním profilem v pájecí peci, tedy závislostí teploty na čase [1,22].

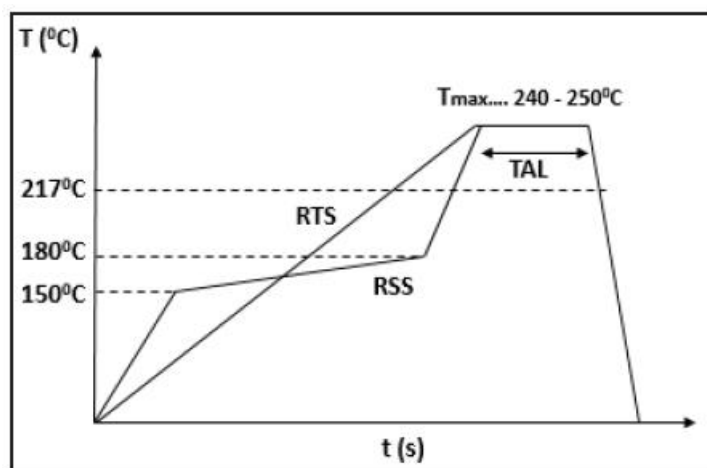
4.3.3.1. Teplotní profil

Doporučený teplotní profil je vždy specifikován výrobcem pájecí pasty. Technologicky musíme dbát na to, aby nebyla překročena maximální teplota pro použité součástky a substrát. Proto je často nutná optimalizace profilu podle aktuálních požadavků. Komplexně má na jeho parametry vliv typ tavidla, použitá pájecí slitina, rozměry DPS, typ součástek a hustota jejich osazení, typ použité pece atd. [1,22,50].

Teplotní profily rozlišujeme dvojího typu [1,51]:

- RSS (angl. Ramp Soak Spike) – profil se setrváním ve fázi smáčení,
- RTS (angl. Ramp to Spike) – profil s postupným nárůstem teploty.

Rozdíl ve tvaru těchto teplotních profilů je patrný na Obrázku 6.



Obrázek 6 – Rozdíl ve tvaru teplotních profilů RSS a RTS [52].

Teplotní profil typu RSS se skládá z několika fází (typické například pro slitiny typu SAC) [1,22]:

- 1) předehřev (angl. preheating),
- 2) smáčení (angl. soak),
- 3) přetavení (angl. reflow),
- 4) chlazení (angl. cooling).

V první fázi předehřevu dochází k postupnému zahřátí DPS, aby nedošlo k teplotnímu šoku. Tavidlo se aktivuje, čímž začíná redukovat oxidy na pájecích ploškách a použítá rozpouštědla se z něho odpařují. Teplota se v této fázi pohybuje obvykle do 150 °C a její nárůst by neměl být větší než 1 °C/s – 4 °C/s [1,22,51].

Ve druhé fázi se teplota postupně zvyšuje až na teplotu zhruba 200 °C. Účelem této fáze je dosažení kvalitního a rovnoměrného prohřátí všech částí DPS (minimalizace rozdílu minimální a maximální teploty na DPS v určitém čase). Rovnoměrné prohřátí DPS je důležité sledovat hlavně v případech, kdy je deska velmi hustě osazena součástkami nebo při použití součástek s velkou tepelnou kapacitou (velmi objemné součástky). Pokud by nebyla DPS dostatečně prohřátá, mohlo by to vést k nedostatečnému přetavení pájecí pasty na chladnějším místech. Tavidlo je v tomto kroku plně aktivováno a redukuje zbývající oxidy na pájecích ploškách. Tato fáze je důležitá pro kvalitní přípravu fáze přetavení [1,22,53].

Ve třetí fázi dochází k tavení pájecí slitiny, což vede k roztavení pájecí slitiny a smáčení pájecích plošek. Pro vytvoření kvalitního spoje je důležité, aby byla teplota v této fázi zhruba o 20 °C vyšší, než je samotná teplota tání slitiny, a také aby byla tato teplota držena

po dostatečně dlouhou dobu. Tím eliminujeme deficit tepla, který může vznikat při předávání tepla do okolí pájeného spoje. Standardně je čas této fáze dlouhý 60 s – 90 s (angl. time above liquidus – TAL). V některých případech slučujeme parametr nastavené teploty a času do parametru, který se nazývá heating faktor. Aktivátory v tavidle v této fázi zabraňují vzniku nových oxidů [1,22,51,54].

V poslední čtvrté fázi dochází ke chlazení. Tato fáze musí mít kromě doporučeného tvaru od výrobce také parametry respektující vlastnosti použitých součástek, aby nedošlo k jejich poškození vlivem teplotní roztažnosti [22,51].

Teplotní profil typu RTS má dva základní parametry. Je to teplotní gradient, který udává nárůst teploty za čas a vrcholová teplota, tedy teplota, které chceme dosáhnout. Vyznačuje se postupným (téměř lineárním) nárůstem teploty až do dosažení vrcholové teploty. Tento typ profilu se doporučuje použít při méně hustém osazení DPS a také při použití součástek s nižší tepelnou kapacitou [1,51].

Profil typu RTS má tři fáze [1,55]:

- 1) počáteční fáze s nárůstem teploty (angl. preheating),
- 2) přetavení (angl. reflow),
- 3) chlazení (angl. cooling).

Během počáteční fáze narůstá teplota. Rychlost nárůstu udává teplotní gradient a obvykle se pohybuje mezi 0,5 °C/s – 2 °C/s. Během toho dochází k přehřevu, odpaření rozpouštědel a aktivaci tavidla. Tato fáze trvá zhruba 2/3 času pájecího procesu.

K přetavení dochází v oblasti před dosažením vrcholové teploty. Vrcholová teplota musí být opět vhodně zvolena, aby došlo k dobrému tavení pájecí slitiny a musí na ní být setrváno po dostatečně dlouhou dobu.

Fáze chlazení je obdobná jako u předchozího popisovaného typu teplotního profilu. Proto není nutné ji dále komentovat [1,51,55].

4.3.3.2. Tepelné zdroje a technologie ohřevu

Jako tepelný zdroj je při pájení přetavením možné využít několik technologií. Jedná se o průběžné pece s infračerveným zářením, konvekční (horkovzdušné) pece, využití technologie kondenzace nasycených par, laserové pájení, pájení horkým plynem, vedením tepla nebo impulzně – odporové pájení [1,21,22,56].

Jednou z možných využívaných technologií je použití průběžných pecí s infračerveným tepelným zdrojem nebo pece s horkým vzduchem. Tyto pece bývají v průmyslu často přímo technologicky navázány mezi osazovací linku a výstupní kontrolu. Průběžné pece mají minimálně 3 nezávislé topné zóny, které umožňují s kombinací nastavení rychlosti posunu dopravníku vytvoření teplotního profilu dle požadavků. Ke kontrole správně nastavených parametrů teplotního profilu pro ideální přetavení pájecí pasty je nutné změření teplotního profilu uvnitř pájecí pece. K tomu se využívá měřící zařízení (profilometr), které je odolné proti vysokým teplotám. Měření se provádí pomocí připojených termočlánků, které se polyimidovou páskou lepí na testovací DPS. Rozmístění termočlánků na DPS je velmi důležité pro správné měření teplot. Nejčastěji se umísťují na místa, kde se předpokládá nevyšší a nejnižší teplota na DPS během ohřevu (tedy místa, která nejlépe a nejhůře absorbují teplo). Takto připravená testovací DPS se společně s měřícím zařízením umístí na dopravník a projede pecí. Z naměřených dat porovnáваме vhodnost nastavení jednotlivých zón průběžné pece a případně upravíme nevhodné nastavení. Jako médium je v peci obvykle použit dusík nebo vzduch. Využití dusíku má za následek snížení oxidace a lepší smáčení slitiny na pájecích ploškách. Další alternativou je vakuové pájení [1,21,22,57,58].

Jinou variantou ohřevu je použití technologie pájení v parách. DPS vložíme do zařízení nad nádobu s pájecí kapalinou, kterou přivedeme k varu. Teplota varu musí být vyšší, než je teplota přetavení použité pájecí slitiny v pastě (ale ne příliš velká, aby došlo ke zničení pájených komponentů). Během procesu dochází ke kondenzaci pájecí kapaliny na povrchu DPS, čímž dojde k předání latentního tepla. To způsobuje rovnoměrnější prohřátí celé DPS. Oproti ostatním metodám snižuje pájení v parách riziko přehřátí DPS, protože maximální možná dosažitelná teplota je teplota varu kapaliny, což vede k menší zátěži součástek i desky jako takové [1,59,60].

Ostatní metody jsou určeny spíše pro selektivní pájení, nebo jejich nevýhody převažují nad výhodami a využívají se primárně pro účely oprav.

4.3.4. Kontrola a diagnostika pájených spojů

Jak již bylo řečeno, pájený spoj slouží jako elektrické, mechanické a tepelné spojení mezi DPS a součástkou. Proto je nutné, aby všechny parametry týkající se těchto spojení byly co nejlepší. Z toho důvodu je nutná kontrola parametrů pájených spojů a také komplexně parametrů DPS. K tomu se využívá velké množství testů, které je možné rozdělit do několika kategorií [1,2,22]:

- optické testy,
- elektrické testy,
- funkční testy,
- mechanické testy,
- klimatické testy.

Mezi optické testy a kontroly patří i jednoduchá kontrola lidským zrakem, kde hraje největší roli zkušenost technika, který test provádí. V průmyslovém prostředí se nejčastěji využívá automatická optická kontrola, která je prováděna pomocí kamer a je součástí výrobní linky. Ta obvykle porovnává ideální vzor s testovanou DPS, čímž může odhalit vady jako chybějící součástky, nezapájené vývody a jiné. V případě, že se chceme nedestruktivním způsobem podívat na vnitřní strukturu pájeného spoje, využívá se rentgenová analýza, pomocí které můžeme vidět například dutiny ve spojích. V experimentální části disertační práce byly pro zkoumání chyb v pájených spojích primárně použity optické metody [1,2,61,62].

K elektrickým testům je možné využít jehlového pole, které slouží k připojení měřícího zařízení k osazené desce. Pomocí něho jsme následně schopni ověřit elektrická propojení a také parametry součástek a spojů. [1,2,63].

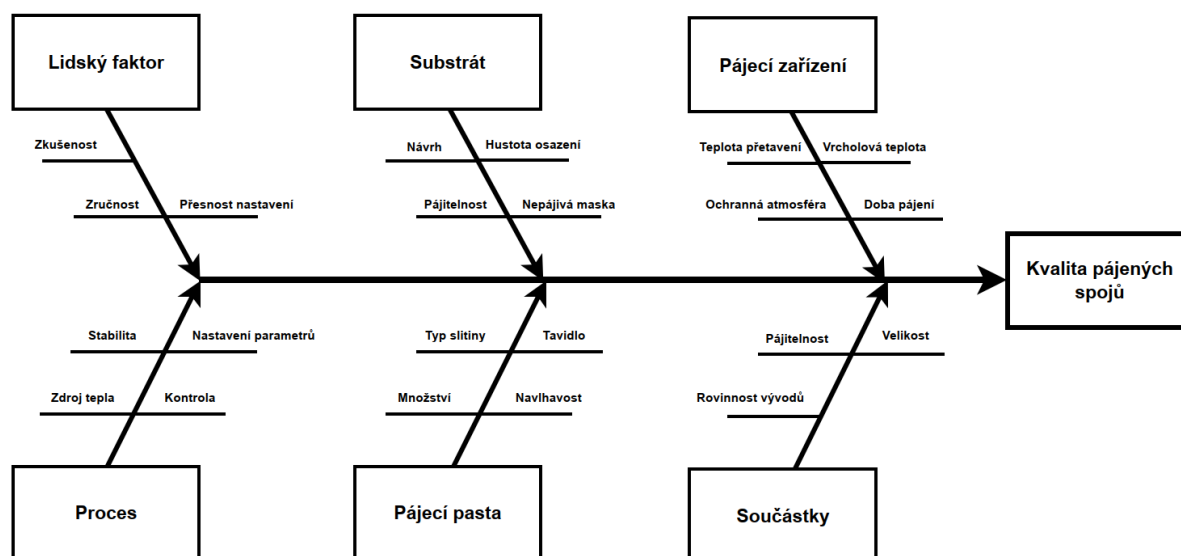
Funkční test se využívá k testování reálného chování zařízení po připojení na napájecí napětí. Testujeme všechny signály, jako kdyby bylo zařízení v reálném provozu. Tím se dá velmi dobře vyzkoušet jeho funkce, ale v případě chyb se závady poměrně složitě hledají, proto je nutné případně aplikovat jiné typy testů [2].

Mechanické testy mohou být destruktivní nebo nedestruktivní. Mezi nedestruktivní testy patří například zkoušky vibracemi, otřesy a jiné. Mezi destruktivní patří zkouška ve smyku pro zapájenou součástku, zkouška ve smyku pro kuličku pájky, zkoušky tahem, cyklické namáhání ohybem celé DPS atd. [1,63].

Klimatické testování se provádí hlavně z důvodu testování odolnosti na vnější prostředí, ve kterém bude zařízení provozováno. Jedná se primárně o testování odolnosti na požadovanou teplotu okolí a vlhkost včetně zrychleného stárnutí v těchto podmínkách [1,2,64].

5. Vybrané chyby vznikající při povrchové montáži

Složitost a náročnost procesů hromadného pájení často vede ke vzniku vad a chyb, které ovlivňují kvalitu a spolehlivost výsledných pájených spojů. Pro jejich shrnutí je vhodný Ishikawa diagram. Jeho příklad se vstupními faktory ovlivňujícími kvalitu spoje ukazuje Obrázek 7.



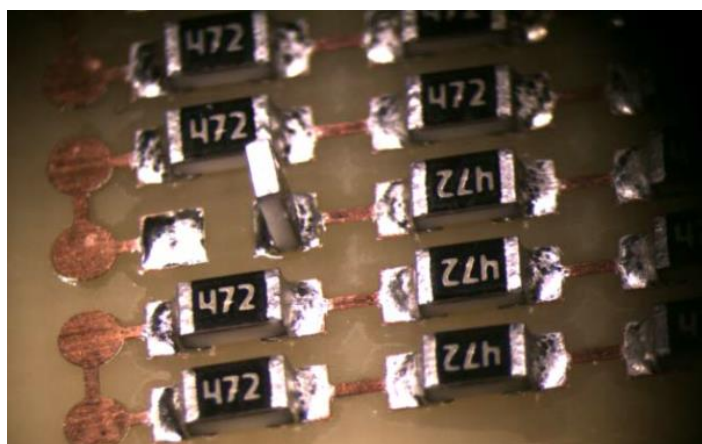
Obrázek 7 – Ishikawa diagram pro kvalitu pájeného spoje [1].

Přechodem na bezolovnaté pájení se značně změnila parametry pájecích past, konkrétně typ pájecí slitiny, což vedlo ke změně teploty přetavení (obvykle vyšší než u olovnatých) a také tavidla (více agresivní) [2]. Dalším faktorem je tlak na miniaturizaci zařízení, tedy DPS i součástek. Z toho vyplývá pájení součástek s menšími roztečemi vývodů. Všechny uvedené faktory hrají roli v chybách, které se vyskytují u povrchové montáže. Chyby mohou být způsobeny špatně zvolenými kombinacemi materiálů, nevhodně nastaveným procesem nebo kombinací obojího. V této kapitole budou shrnuty vybrané chyby při povrchové montáži s detailnějším zaměřením na hlavní téma této disertační práce, tedy voidy.

5.1. Efekt náhrobního kamene

Effekt náhrobního kamene je typický pro dvouvývodové součástky v malých SMD pouzdrech, jako jsou pouzdra s označením 0201, 0402 a další. Tato chyba se projevuje během procesu pájení nadzvednutím součástky nad jednu z pájecích plošek. Součástka může být nadzvednuta až do téměř vzpřímené polohy. Příčina této chyby je nerovnováha smáčecích sil během přetavení [65]. Pájecí pasta na jedné z pájecích plošek je přetavena dříve než na druhé.

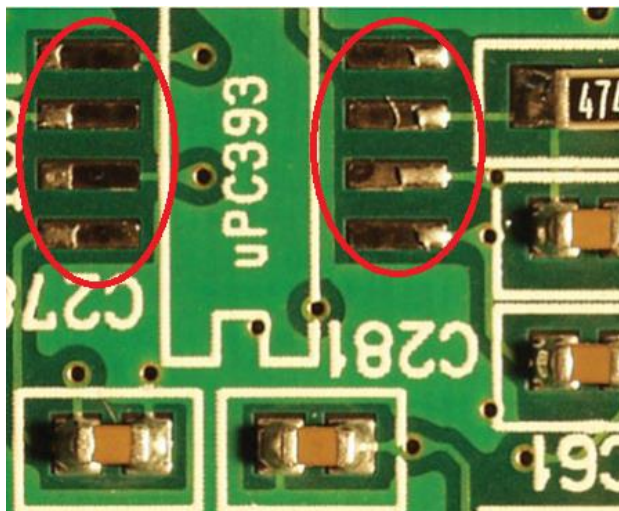
To způsobí, že povrchové napětí roztavené pájky má snahu přejít do stavu s nejmenší energií, což nadzvedne součástku, protože pasta na druhé pájecí plošce ještě nepřešla do tekuté fáze [66–68]. To může způsobit několik faktorů, a to nerovnoměrné množství nanesené pájecí pasty, nevhodně umístěná součástka na pájecí plošce (excentricky), nerovnoměrné prohřátí DPS, tlak výparů z tavidla směrem vzhůru a další [69]. Výzkumy také ukazují, že častěji se tento efekt projeví při pájení v parách [70,71].



Obrázek 8 – Efekt náhrobního kamene [70].

5.2. Black Pad efekt

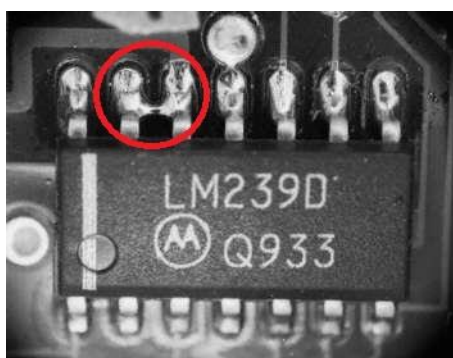
Black Pad efekt je typický pro povrchovou úpravu pájecích plošek ENIG, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.4.2.3. ENIG. Po procesu bezproudového nanášení niklu na pájecí plošku se na nikl v chemické lázni nanáší vrstvička zlata, která slouží jako antikorozi ochrana. Tato chemická lázeň je poměrně agresivní a může způsobit korozi niklu (vznik částic Ni_3P). To se může projevit zčernáním pájecí plošky, což vede ke zhoršení smáčivosti povrchu. Pokud i tak dojde k zapájení součástky na takto částečně poškozenou pájecí plošku, může časem dojít, vlivem oslabení spoje, k přerušení vodivého propojení. V takovémto případě je velmi složité závadu odhalit [72–74]. V dnešní době je tento problém již výrobcům DPS velmi dobře známý, proto jsou chemické procesy dostatečně vhodně upravené tak, aby k němu příliš nedocházelo [75].



Obrázek 9 – Black pad efekt [74].

5.3. Vznik můstků a zkratů

Jedná se o vznik elektricky vodivých propojení na nežádoucích místech. Obvykle vznikají mezi vývody součástek nebo mezi blízko umístěnými pájecími ploškami. Příčin těchto propojení je mnoho. Jednou z variant je i problém s návrhem samotné DPS, kde mohou být pájecí plošky blízko u sebe, nebo povrchová úprava pájecích plošek nemá dostatečnou rovinnost. Problém může způsobovat kromě DPS také chybný návrh šablony pro nanášení pájecí pasty. Druhým faktorem je chybný proces pájení. Šablona při nanášení pájecí pasty nemusí být vhodně umístěná na motiv na DPS nebo je pájecí pasty příliš mnoho vzhledem ke vzdálenosti pájecích plošek. Dále má na tuto chybu vliv teplotní profil přetavení [76,77].



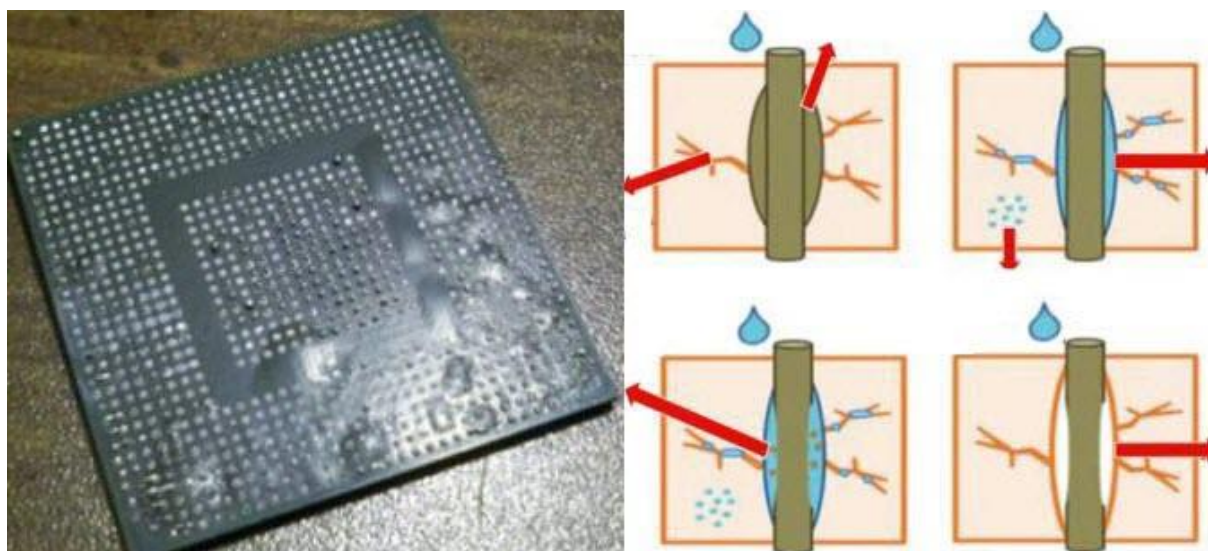
Obrázek 10 – Vznik můstku na integrovaném obvodu [77].

5.4. Popcorn efekt

Používaná plastová pouzdra integrovaných obvodů mají tendenci do sebe absorbovat vlhkost. Absorpce probíhá už během výroby samotné a pokračuje při skladování [78]. Proto je

nutné před osazením a pájením součástky vysušit nebo je vhodně skladovat na suchém místě. V opačném případě by mohlo dojít k tomuto defektu.

Princip popcorn efektu se projevuje během procesu pájení v pájecí peci, kdy dochází k nárůstu teploty. To v případě navlhle součástky vede k vypařování vlhkosti uzavřené v pouzdře. Tento jev způsobí zvýšení tlaku, což vede k pnutí, které může mít za následek prasknutí pouzdra [78–80]. Tato vada je více spjata s bezolovnatým pájením z důvodu zvýšení teploty potřebné pro přetavení pájecí slitiny [81].

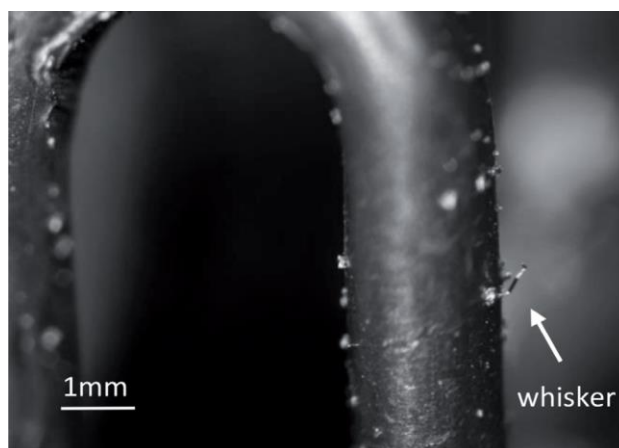


Obrázek 11 – Ukázka a princip vzniku popcorn efektu [82].

5.5. Whiskery

Whiskery jsou krystaly kovů, které samovolně rostou z povrchu pájeného spoje, koncovek součástek nebo povrchových úprav. Jejich tvar vypadá podobně jako vousky, a protože jsou vytvořeny z vodivého materiálu, mohou způsobit zkrat na DPS. Průměry těchto vousků jsou jednotky mikrometrů, ovšem délka může být i několik milimetrů. Nejčastěji je tato chyba spjata s cínem, proto je vzhledem k bezolovnatému pájení a používání pájecích slitin s vysokým obsahem cínu aktuální. Stejně tak je k tvorbě whiskerů náchylná povrchová úprava pájecích plošek HASL nebo ImSn [83–87]. Ačkoliv je problematika whiskerů dlouhodobě známa, neexistuje sjednocená teorie o jejich vzniku. Existují základní čtyři teorie, a to Teorie dislokací, Teorie dynamické rekrystalizace, Teorie intermetalických slitin a Teorie The End Game [85,88]. Růst whiskerů podporuje několik faktorů. Je to vnitřní tlakové napětí, vnější tlakové namáhání, elektrické pole, teplota okolí, okolní tlak, tloušťka kovové vrstvy a oxidace spojená s vlhkostí a hrubostí povrchu [89–94]. K omezení jejich tvorby slouží vytvoření

povlaků, používání žíhání, použití mezivrstev z jiného kovu (vytvoření bariéry), zajištění minimálního tlakového napětí, vyhnutí se provozním teplotám mezi 25 °C (bráno jako standardní teplota okolí) a 75 °C [1,85,90].



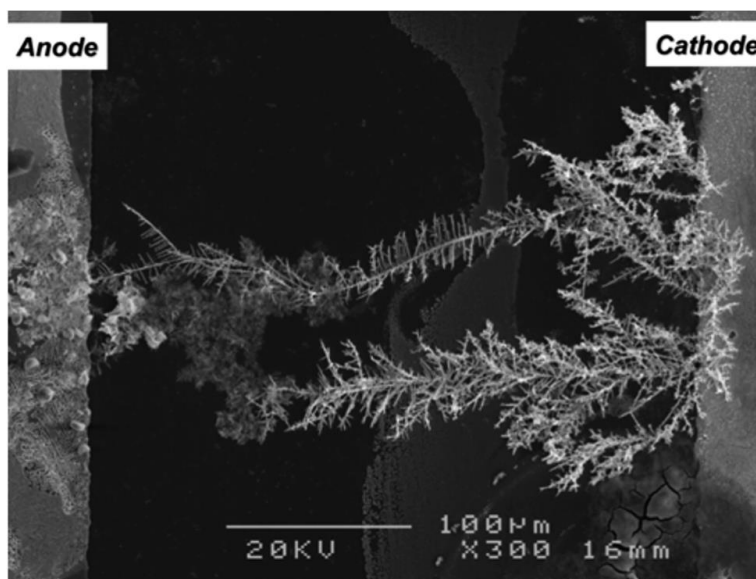
Obrázek 12 – Cínový whisker [95].

V naší studii [90], která se vznikem whiskerů zabývala bylo prokázáno, že mechanické namáhání a teplota má na jejich vznik značný vliv. Rostoucí teplota ovšem jejich tvorbu podporuje jen do určité hranice. Při jejím překročení jejich výskyt opět klesá. Nejmenší výskyt byl prokázán u 20 °C. Oproti tomu jejich nejvyšší zastoupení bylo u teploty 50 °C a o 40 % menší výskyt byl pozorován u teploty 80 °C. Z pohledu mechanického namáhání byla přítomnost whiskerů u vzorků, které byly ohnuté před pokovením pájecí slitinou, 3x nižší než u těch, které se ohýbaly až po pokovení. To potvrzuje tvrzení, že mechanické namáhání má za následek zvýšenou tvorbu whiskerů.

5.6. Dendrity

Dendrity vznikají vlivem elektrochemické migrace na povrchu DPS. Jedná se o krystalické struktury, které rostou z povrchu kovů, což podobně jako u whiskerů může způsobovat zkraty. Název dendrity vychází z tvarů, které na DPS elektrochemická migrace vytváří. Podobají se jehličkám nebo stromům. Zmíněná elektrochemická migrace může nastat pouze, pokud jsou splněny dvě základní podmínky. Mezi dvěma místy je různý napěťový potenciál a na DPS se nachází elektrolyt, který umožní pohyb iontů. Pokud jsou tyto podmínky splněny, kov na straně kladně nabitých elektrod (anody) migruje do elektrolytu a vznikají ionty, které vlivem elektrického pole migrují k záporně nabitým elektrodám (katodě). K růstu dochází v místech s největší proudovou hustotou, proto mají dendrity takto specifický stromčkový tvar [96,97]. Doba potřebná k vytvoření dendritů je závislá na několika faktorech. Jedná se

o vzdálenost vodičů, relativní vlhkost okolí, teplotu okolí, materiál vodičů, velikost rozdílu napětí a množství a typ kontaminace na DPS [98,99]. Jako elektrolyt obvykle slouží kondenzovaná voda na desce plošných spojů, do které se rozpustí zbytky tavidla. Proto se doporučuje DPS po procesu pájení důkladně očistit. Jako další z možností pro snížení této chyby je oddálení vodičů s různým potenciálem. Vzhledem k tlaku na zmenšování DPS je to ovšem složité [95]. Případně je možné k jejich eliminaci využít (v případě, že to je technologicky možné) střídavé nebo pulzní napětí.



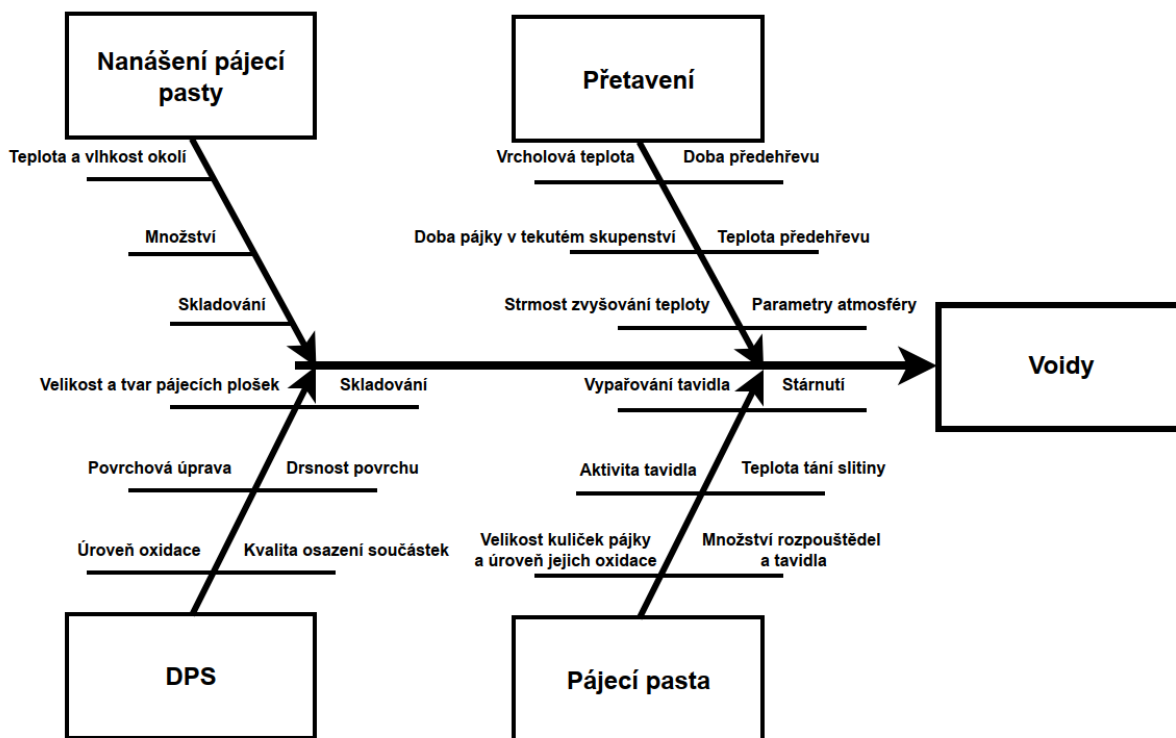
Obrázek 13 – Dendrit [96].

5.7. Dutiny (voidy)

Voidy v pájeném spoji lze popsat jako nevodivé dutiny obsahující plyny (obvykle vzduch nebo plynné zbytky tavidel, reologických přísad či rozpouštědel), nekovové materiály nebo jiné nečistoty [100]. Jejich výskyt při vyšším procentuálním zastoupení výrazně zhoršuje elektrické, mechanické i tepelné vlastnosti pájeného spoje. To je důležité primárně v obvodech, kde je požadována velká proudová zatížitelnost [57]. Studie Steinera [101] prokázala, že čím je větší zastoupení voidů v pájeném spoji, tím více klesá jeho mechanická odolnost. Zhu [102] potvrzuje, že pro tepelné vlastnosti spoje platí stejné pravidlo. Zúžení vodivé cesty, které voidy způsobí má za následek také zvýšení elektrického odporu [103]. Podle normy IPC-A-610 v aktuální revizi H z roku 2020 nesmí být z hlediska zhoršení uvedených parametrů jejich výskyt v pájeném spoji větší než 30 % (starší revize uváděly 25 %) [104]. Vznik dutin je obvykle primárně spojován s procesy pájení přetavením, při němž se používá pájecí pasta a technologie povrchové montáže [105]. Voidy se ovšem vyskytují také u montáže THT [39].

Experimentální část této práce je zaměřena na voidy vznikající při povrchové montáži, proto nebude jejich výskyt při použití skrzděrové montáže dále komentován.

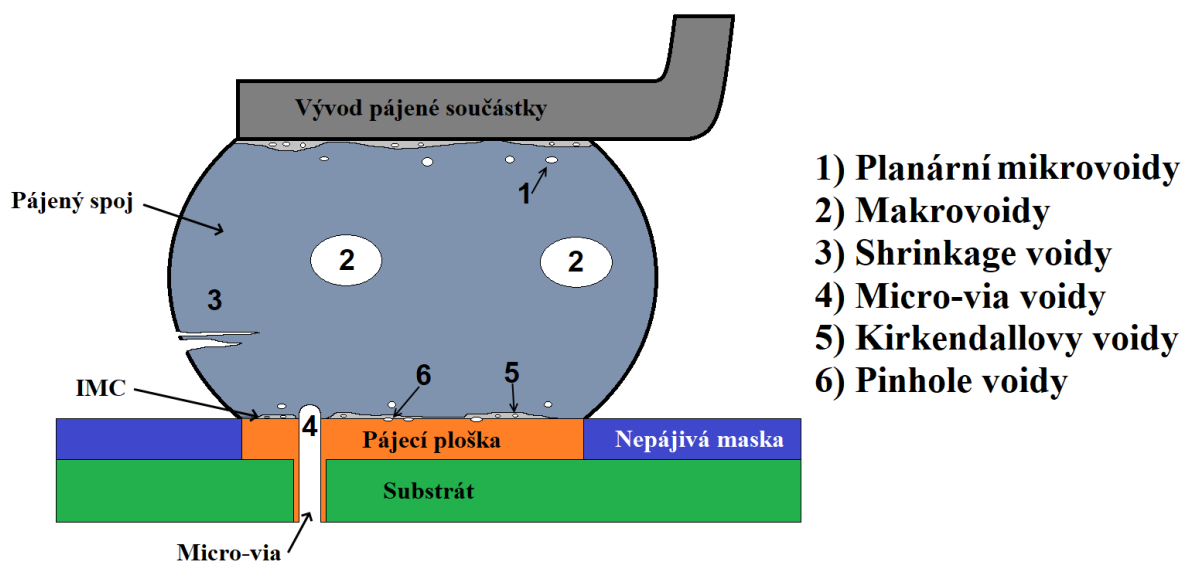
Dutiny v pájeném spoji vznikají působením několika faktorů. Vliv na jejich tvorbu má složení pájecí pasty a její vlastnosti, proces nánosu pájecí pasty, materiál na povrchu DPS a součástek, osazení součástek a parametry přetavení [106]. Shrnutí těchto parametrů ukazuje následující Ishikawa diagram na Obrázku 14.



Obrázek 14 – Ishikawa diagram pro vznik voidů v pájených spojkách [106].

Jelikož se dutiny nachází uvnitř pájeného spoje, detekce jejich výskytu je komplikovanější. Po procesu pájení nejsou vidět optickými zařízeními používanými u standardních metod pro sledování kvality. I z tohoto důvodu je důležité optimalizovat proces tak, abychom jejich výskyt omezili v nejvyšší možné míře. Pro detekci voidů se nejčastěji používá rentgenové snímkování s následnou obrazovou analýzou. Druhou variantou, která je ovšem destruktivní, je vytvoření výbrusu pájeného spoje a jeho následná analýza.

Voidy rozdělujeme na základě jejich tvaru, umístění a velikosti do několika kategorií [100]. Jejich označení, typický tvar a umístění jsou patrné na Obrázku 15.



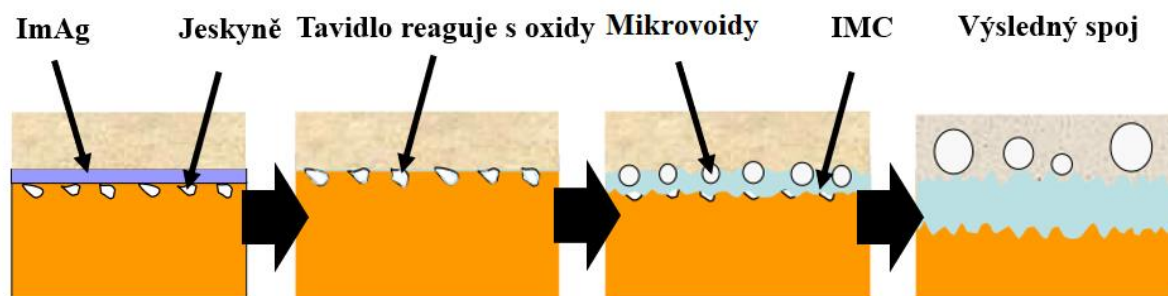
Obrázek 15 – Umístění a kategorie voidů v pájeném spoji.

Jediným typem voidů, který nemá typický kruhový tvar jsou Shrinkage voidy. Jejich popis a příčiny vzniku budou popsány v samostatné kapitole níže. Ostatní voidy mají typický kulovitý tvar. Tvar a velikost dutin udává rovnováha mezi tlakem plynu a povrchovým napětím roztavené pájky [106].

5.7.1. Planární mikrovoidy

Planární mikrovoidy (někdy také nazývané champagne voidy) jsou miniaturní dutiny, které mají průměr menší než 50 μm . Jejich poloha je velmi specifická. Nachází se v jedné rovině nad intermetalickou vrstvou. Výskyt těchto mikrovoidů je spjatý převážně s povrchovou úpravou ImSn. Není ovšem neobvyklé je najít také při použití povrchových úprav ENIG a OSP [100,107,108].

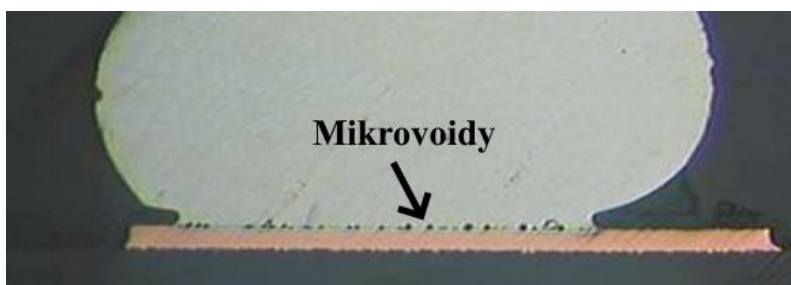
Existuje více teorií o vzniku planárních mikrovoidů. První a nejpravděpodobnější z nich je teorie Měděných jeskyní (angl. Copper Caves). Tato teorie tvrdí, že pod povrchovou úpravou ImAg se nachází uzavřené měděné jeskyně, jejichž povrch je pokryt oxidy mědi. Během procesu pájení dojde k rozpuštění stříbra do pájky, čímž se tavítko dostane do jeskyní a začne reagovat s oxidy mědi. Tím dojde k vytvoření bublin plynů, které mají tendenci stoupat. Jelikož nemá plyn dostatek času na to, aby opustil pájený spoj, zůstane uvnitř ve formě dutin v jedné rovině [107,109]. Tento proces nám ukazuje Obrázek 16.



Obrázek 16 – Proces vzniku mikrovoidů pomocí teorie Měděných jeskyní [107].

Dále existují dvě další teorie. Jedná se o Teorii organických reziduí (angl. Organic Residue) [110] a Teorii perfektní bouře (angl. Perfect Storm). Teorie perfektní bouře tvrdí, že vliv na tvorbu mikrovoidů má typ tavidla, příliš velká tloušťka stříbrné vrstvy, nízká teplota nastavená při procesu přetavení a hrubá vrstva mědi [111].

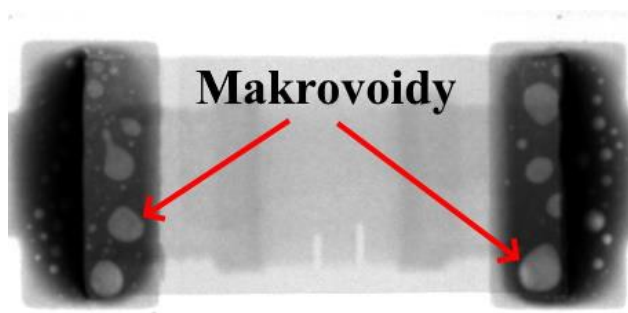
Díky své velikosti při nízkém výskytu nepředstavují velké riziko. Pokud ovšem nastane situace, že se jich v pájeném spoji vytvoří velké množství, tak vzhledem k tomu, že se nachází v jedné rovině, hrozí razantní snížení mechanické odolnosti [107].



Obrázek 17 – Výskyt mikrovoidů v pájeném spoji [100].

5.7.2. Makrovoidy

Dutiny s průměrem větším, než 100 μm (s obvyklým průměrem 100 μm – 300 μm) značíme jako makrovoidy [100]. Jedná se o nejčastěji vyskytující se typ dutin v pájených spojkách [95]. Kromě jejich velikosti, je důležitý také jejich počet a umístění (mohou se nacházet kdekoli v pájeném spoji). Lokace makrovoidů je jedním z důležitých parametrů, který je nutný sledovat. Ze studie [103] dokonce vyplývá, že umístění makrovoidů je stejně důležité jako jejich plocha. Nejkritičtější je umístění na rozhraní pájecí slitiny a pájecí plošky nebo na okraji pájeného spoje. To vede ke vzniku nebo podpoře šíření trhlin. Problematice pozice dutin v pájeném spoji se věnuje také část normy IPC-7095D [112].

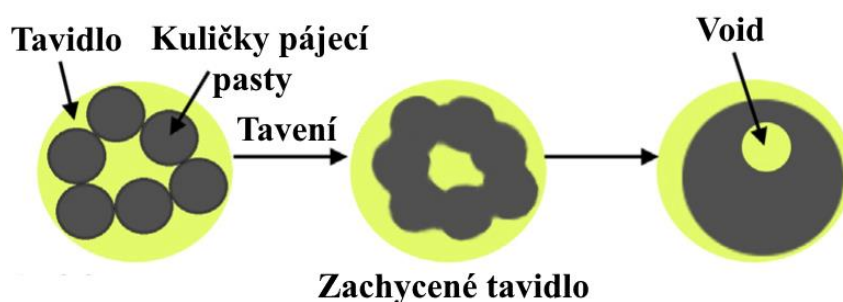


Obrázek 18 – Makrovoidy v pájeném spoji.

Vznik makrovoidů, které se někdy nazývají také jako procesní voidy, je přisuzován úniku plynů, které nemají dostatek času opustit pájený spoj během procesu přetavení. Tyto plyny vznikají z několika zdrojů [100,106]:

- chemické složky tavidel a přídavných látek v pájecí pastě (s rostoucí teplotou přechází do plynného stavu),
- vodní pára vznikající z absorbované vlhkosti do substrátu (uvolňuje se nad 100 °C),
- chemické látky vznikající při redukci oxidů na pájecích ploškách a kuličkách pájky vlivem působení aktivovaného tavidla.

Princip vzniku makrovoidů ze zachycených odpařených zbytků tavidla ukazuje Obrázek 19.



Obrázek 19 – Princip vzniku makrovoidů [113].

Vznik makrovoidů ovlivňují parametry pájecího procesu, ale také použité materiály. Konkrétní vlivy obou uvedených faktorů budou popsány v následujících odstavcích.

Co se týká procesu, jsou nejpodstatnější následující parametry:

- aplikace pájecí pasty,
- umístění součástek na DPS,
- teplotní profil,
- okolní atmosféra v pájecí peci.

Pájecí pasta je obvykle nanášena šablonovým tiskem. Tento proces obsahuje velmi mnoho proměnných, jako je geometrie otvorů pro aplikaci pasty, reologické vlastnosti pájecí pasty, nanášecí úhel stěry, rychlost stěrky a jiné [114]. Všechny uvedené parametry mohou mít přímý vliv na následný vznik dutin [115]. Vliv geometrie otvorů na vznik makrovoidů byl jedním z bodů výzkumu v naší publikaci [116]. V ní bylo prokázáno, že tento parametr má na vznik makrovoidů velký vliv.

Umístění součástek obvykle obstarává plně automatizované osazovací pracoviště. Při správně zvolené síle pro umístění součástek v ose Z lze zajistit snížení výskytu dutin, které jsou v pájecí pastě a vznikly při procesu jejího nanášení [116].

Nastavení teplotního profilu je jedním z klíčových faktorů pro vznik dutin. Vypařování chemických látek začíná již ve fázi předehřevu, kdy dochází k aktivaci tavidla. Tato doba musí být dostatečně dlouhá, aby látky mohly přejít do plynné fáze a opustit pájený spoj. Dalším důležitým parametrem je nastavená vrcholová teplota a doba, při které se pájecí slitina nachází v kapalně fázi. Vyšší vrcholová teplota vede ke snížení povrchového napětí pájky, což má za následek zlepšení úniku plynů ze spoje, a tedy snížení množství dutin v pájeném spoji. Stejně tak delší doba v tekuté fázi pájky zvyšuje jejich šanci na opuštění spoje. Tyto parametry musí být ovšem vhodně nastavené vzhledem k použitému tavidlu a pájecí slitině. Vysoká vrcholová teplota může mít degradační vliv na pájené součástky nebo DPS. Proto je nutné volit vždy optimální nastavení teplotního profilu [100,117].

Ve studii [57] bylo potvrzeno, že okolní atmosféra během přetavení má také velký vliv na eliminaci makrovoidů. V této publikaci je popsáno pájení vakuovým procesem a také pájení za zvýšeného tlaku. Obě metody vedou ke značnému snížení voidovitosti. Výhodu pájení za přítomnosti vakua, zejména při pájení velkých ploch, potvrzuje také [106]. Nevýhodou těchto metod je ovšem použití speciálního a drahého vybavení.

Jak již bylo zmíněno, na vznik makrovoidů má vliv nejen proces, ale také parametry použitých materiálů. Konkrétně se jedná o:

- použitou pájecí pastu,
- povrchové úpravy pájecích plošek a úroveň jejich oxidace a znečištění,
- použití nepájecí masky,
- a jiné.

Pájecí pasta má několik parametrů, které ovlivňují vznik makrovoidů. Prvním parametrem je typ použitého tavidla. Tavidlo musí mít dostatečnou aktivitu, aby bylo schopno odstranit přítomné oxidy. Čím aktivnější tavidlo je, tím lépe a dříve oxidy zredukuje a výpary vznikající při tomto procesu mohou opustit pájený spoj. Bušek se ve své publikaci [113] věnuje přidávání různě aktivního tavidla do pájecí pasty a jeho vlivu na voidy. Publikace ukazuje, že přidání aktivnějšího tavidla má velký vliv na redukci voidů. V naší studii [118] jsme se věnovali mimo jiné vlivu velikosti částic pájecí slitiny v pájecí pastě na vznik voidů. Bylo zjištěno, že použití větších částic pájecí slitiny snižuje výskyt voidů v pájeném spoji. Důvodem je jejich oxidace. Čím jsou částice menší, tím je v pájecí pastě při stejné hmotnosti částic přítomno více oxidů, které je nutné redukovat. Proto se doporučuje (pokud je to technologicky možné) použití větších částic v pájecí pastě.

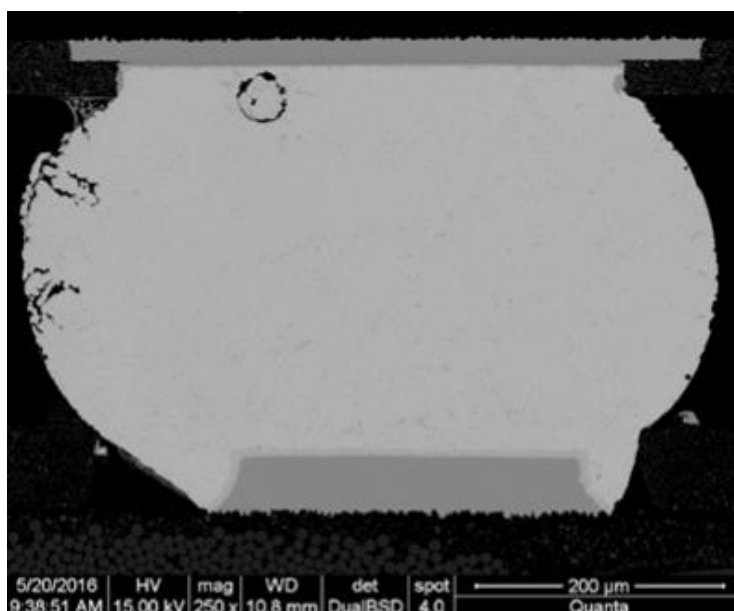
Vlivu povrchových úprav na vznik voidů jsem se věnoval ve své diplomové práci [119]. Bylo zjištěno, že povrchové úpravy vznik voidů výrazně ovlivňují. Nejlepší výsledky vykazovala povrchová úprava HASL, nejhorší povrchová úprava OSP. Dále bylo prokázáno, že se nedoporučuje použití pájecích plošek bez povrchové úpravy. Výsledky těchto vzorků ukázaly výrazně horší výsledky. To je způsobeno oxidací povrchu, kterou je nutné redukovat při procesu přetavení.

Podle zdroje [100] kromě oxidace hraje roli také znečištění povrchu pájecí plošky (v případě kontaminace může dojít k odpařování dalších plynů při procesu přetavení) nebo typ použité nepájecí masky (vytvoření prázdného místa mezi pájecí ploškou a nepájecí maskou nebo nanesení nepájecí masky přes hranice pájecí plošky). Dále záleží na kvalitě a velikosti pájených součástek. Součástky s větší plochou vývodů (a tedy pájené na větší pájecí plošku) jsou náchylnější ke vzniku makrovoidů, což potvrzuje [106]. Samozřejmě má vliv také oxidace vývodů součástek, podobně jako u pájecích plošek.

5.7.3. Shrinkage voidy

Shrinkage voidy jsou atypickým zástupcem dutin, protože se nenachází uvnitř pájeného spoje. Mají specifický stromečkový tvar (připomínají trhliny) a táhnou se z povrchu spoje dovnitř [100]. Vznik těchto dutin je typický pro pájecí slitiny typu SAC a na jejich vytvoření má vliv poslední část teplotního profilu, kdy dochází ke chlazení spoje při procesu přetavení. Během ochlazování dochází k objemovému smršťování a vytvoření tahového napětí, což má za následek vytvoření těchto voidů [120].

Shrinkage voidy oproti ostatním nepředstavují velké riziko pro spolehlivost pájeného spoje vzhledem k jejich stabilitě i dlouhém časovém horizontu. Jejich výskyt je možné eliminovat úpravou teplotního profilu (v oblasti chlazení) [121].

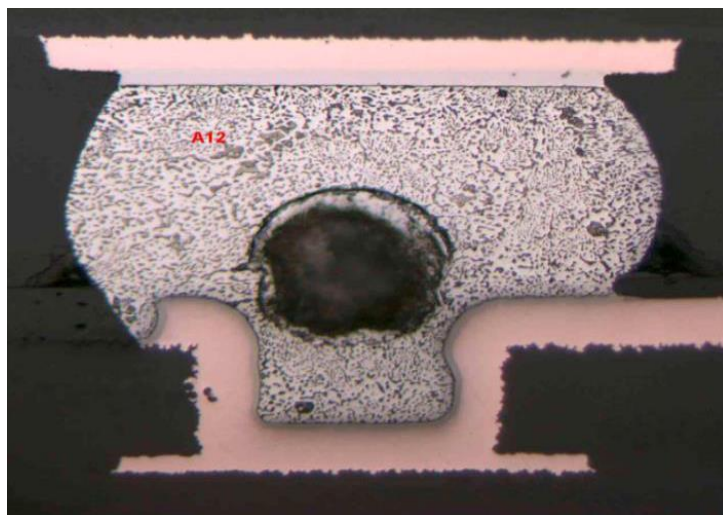


Obrázek 20 – Shrinkage voidy [121].

5.7.4. Micro-via voidy

Jak již název napovídá, vznik těchto voidů je podmíněn přítomností pokovených micro-vias propojů přímo na pájecí plošce. Tyto propoje se používají u vícevrstevných desek plošných spojů, kde slouží jako vodivé propojení mezi jednotlivými vrstvami. To je typické například při použití BGA pouzder. Pájka se během procesu přetavení nedostane do celého spoje (vlivem nedostatečné smáčivosti) a dojde k uvolnění plynů, které se nachází uvnitř propoje. Primárně se jedná o vzduch, který může být smíchaný s odpařeným tavidlem či jinými zbytky, které se v propoji nacházely. Velikost dutin závisí na typu a velikosti propoje [100,122].

Výskyt těchto voidů je značně problematický, protože má negativní vliv na vlastnosti spoje. Ideálním řešením je vytvoření micro-vias propojů mimo pájecí plošky, což ovšem technicky není vždy možné provést. Stafstrom [123] popisuje jako řešení pro značné snížení výskytu tohoto jevu naplnění propojů pájecí pastou. Tím byla docílena redukce micro-via voidů o 74 %.

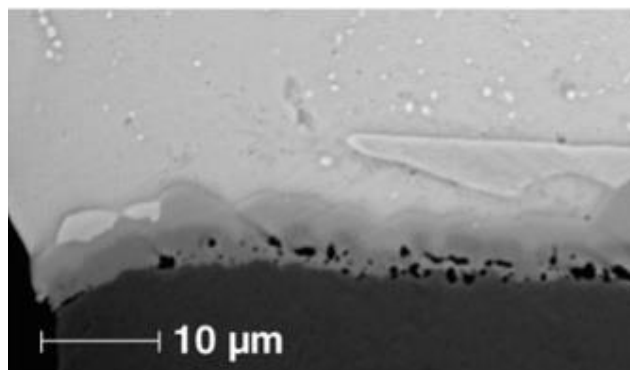


Obrázek 21 – Micro-via void [100].

5.7.5. Kirkendallový (IMC) voidy

Kirkendallové neboli IMC voidy se nachází na rozhraní mezi měděným povrchem pájecí plošky a intermetalickou vrstvou nebo přímo uvnitř IMC (tedy na rozhraní pájecí slitiny/měď). Oproti ostatním voidům tyto dutiny nevznikají během procesu pájení, ale až při provozu zařízení. Konkrétně po vystavení spoje teplotním namáháním. IMC voidy jsou důsledkem Kirkendallova efektu, který popisuje pohyb atomů dvou do sebe difundujících kovů, které ovšem mají rozdílnou rychlost difúze [121,124].

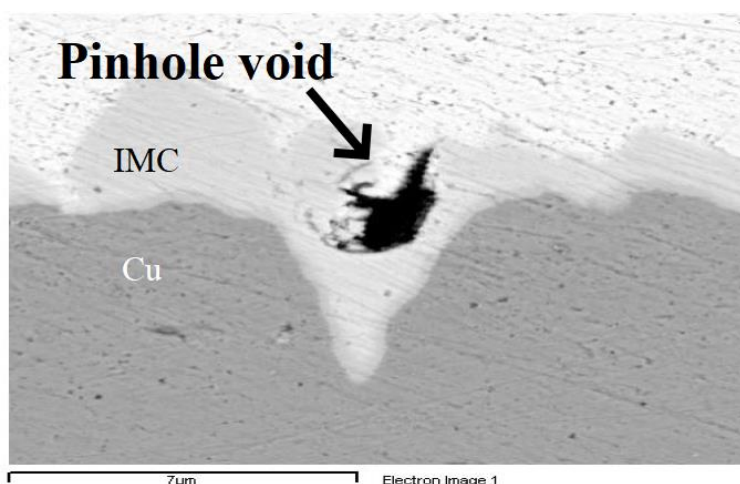
Existuje několik dalších hypotéz pro příčinu vzniku těchto voidů. První z nich je koalescence prázdných míst vzhledem k saturaci, dále přítomnost niklu nebo bismutu v pájce nebo na rozhraní pájka/pájecí ploška a jiné [100]. Borgsen a Yin [125] navrhli hypotézu, která tvrdí, že jsou tyto voidy zapříčiněny vlivem nečistot začleněných do mědi během galvanického pokovování substrátu. Pro omezení vzniku těchto dutin je proto vzhledem k tomuto tvrzení nutné dodržovat správné chemické postupy při pokovování mědi.



Obrázek 22 – Kirkendallové voidy [125].

5.7.6. Pinhole voidy

Pinhole voidy, někdy překládané jako dírkové, či špendlíkové voidy, vznikají na pájecích ploškách plátované mědi na DPS. Jejich velikost je velmi malá, v průměru měří 1 μm – 3 μm. Příčina vzniku těchto dutin je usazení chemických látek na měděné pájecí plošce. Po procesu přetavení dojde k jejich odpaření a vzniku malých dutin. Tyto dutiny se nacházejí na rozhraní intermetalických vrstev a pájecí plošky nebo přímo v intermetalických vrstvách. Anomálie vzniklé usazením chemických látek na měděných pájecích ploškách jsou v některých případech detekovatelné i přes povrchovou úpravu před nanesením pájecí pasty. Jelikož se tyto dutinky nacházejí v intermetalických vrstvách, jsou i přes jejich malý rozměr rizikem. Důvodem je náchylnost IMC vrstvy na vznik trhlin při mechanickém a tepelném namáhání, kterou mohou tyto voidy více podpořit [100,126].



Obrázek 23 – Pinhole void [100].

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Tato část disertační práce představí dva experimenty, které se zabývají snížením voidovitosti v pájených spojkách. Výsledky prvního z nich (značený jako Experiment 1) byly publikovány v impaktovaném časopise „Welding in the World“ pod názvem „Analysis of Solder Mask Roughness and Stencil Shape Influence on Void Formation in Solder Joints“ a zabývá se změnou materiálových a procesních parametrů, které vedou ke snížení výskytu dutin. Druhý experiment (značený jako Experiment 2) se kromě zmíněných parametrů zabývá také chemickým složením tavidel a vlivem jeho složek na vznik voidů. Tento experiment je taktéž sepsaný do publikace a aktuálně probíhá recenzní řízení v impaktovaném časopise.

1. Experiment 1

První experiment je zaměřen na zkoumání vlivu tvaru šablony, pomocí které se nanáší pájecí pasta na pájecí plošky, a drsnosti povrchu nepájecí masky na vznik voidů v pájeném spoji. Dále je zde také vyhodnocen vliv aktivity použitého tavidla na voidovitost.

Přístup úpravy šablony pro nanesení pájecí pasty vychází z myšlenky nanesení stejného množství pájecí pasty menšími otvory oproti standardnímu řešení nanášení pomocí otvoru, který kopíruje tvar pájecí plošky. Aby bylo zachováno nanesení stejného objemu pasty, je nutné zvětšit tloušťku modifikované šablony. Tato úprava by měla zajistit lepší vytlačení bublinek plynů při procesu přetavení během smáčení, protože navržená konstrukce šablony vytvoří kanálky, kterými mohou plyny efektivněji opustit pájený spoj.

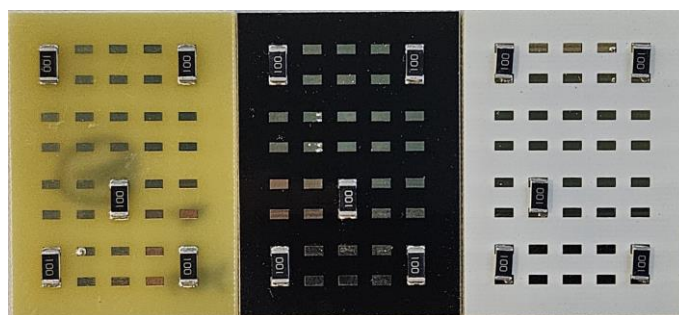
Druhá myšlenka vychází z předpokladu snížení voidovitosti se snížením množství tavidla v pájeném spoji. Tavidlo lépe opustí pájený spoj, pokud se změní rovnováha mezi tekutým tavidlem, vzduchem a povrchem nepájecí masky (viz kapitola 1.3.4. Povrchové napětí pájeného spoje). Smáčení a šíření kapaliny primárně závisí na vlastnostech kapaliny a podkladu, po kterém se kapalina roztéká. Proto se jako jedinou možností pro změnu jeví úprava drsnosti nepájecí masky. Ve studii [127] bylo prokázáno, že drsnost nepájecí masky přímo souvisí se šířením tavidla po povrchu DPS. V případě použití nepájecí masky s větší drsností, tavidlo lépe smáčí okolní povrch pájecí plošky a v průběhu procesu pájení se lépe rozteče do okolí (více se roztéká). To by mohlo vést ke snížení množství tavidla v objemu roztavené slitiny během procesu pájení, a tím ke snížení pravděpodobnosti zachycení tavidla ve výsledném spoji a následnému vzniku voidů.

1.1. Materiály použité v experimentu

Pro testování v rámci tohoto experimentu byla navržena DPS s rozměry 46 mm x 33 mm. Motiv na DPS byl navržen tak, aby bylo možné osadit desku 20 kusy rezistorů s velikostí pouzdra 2010. Navržený design je patrný na Obrázku 24. Jako substrát byl zvolen často využívaný typ FR4, tedy skelná tkanina s epoxidovou pryskyřicí. Povrchová úprava pájecích plošek byla zvolena ENIG, protože se jedná o standardní povrchovou úpravu používanou pro lepší aplikace. V tomto experimentu byly vyrobeny tři sady DPS s využitím dvou typů nepájivých masek (matná černá a lesklá bílá). Poslední sada byla bez nepájivé masky. Tím bylo zaručeno dosažení různé drsnosti povrchu pro všechny sady DPS. Rozdíl mezi nimi ukazuje Obrázek 25.



Obrázek 24 – Design testovacích DPS v Experimentu 1 a 2.



Obrázek 25 – Demontrace použitých nepájivých masek na DPS v Experimentu 1.

Pro pájení rezistorů na DPS byly použity dvě pájecí pasty se stejným složením pájecí slitiny $96,5\text{Sn}3\text{Ag}0,5\text{Cu}$ (typ SAC305), ovšem s odlišnou aktivitou tavidla. Podle klasifikace pomocí normy IPC-J-STD-004C se jednalo o aktivitu ROL0 a ROL1. ROL1 má oproti ROL0 vyšší obsah halogenidů, což způsobuje zvýšenou chemickou aktivitu s oxidy. Tím dochází k jejich optimálnější redukci na pájecích ploškách. Kompletní parametry použitých pájecích past jsou uvedeny v Tabulce 8, kde je pasta s aktivitou tavidla ROL1 označena jako Pasta A a s aktivitou ROL0 jako Pasta B.

Tabulka 8 – Parametry použitých pájecích past v Experimentu 1.

Označení v experimentu	Pasta A	Pasta B
Výrobce	AIM	AIM
Typ	Bezolovnatá	Bezolovnatá
Označení	M8	NC254
Složení	SAC305	SAC305
Obsah tavidla (hm%)	11,50%	11,50%
Tavidlo a jeho aktivita	Přírodní pryskyřice (R) – ROL1	Přírodní pryskyřice (R) – ROL0
Halogenidy	Br: 0,24%, Cl: 0,0%	Bezhalogenidová
Teplota přetavení	230 °C – 245 °C	230 °C – 245 °C
Viskozita	500 – 1000 Kcps	300 – 900 Kcps
Velikost kuliček pájky	T3: 45 μm – 25 μm	T3: 45 μm – 25 μm

Aby byly výsledky vypovídající, byly pro každou kombinaci zkoumaných faktorů vytvořeny a analyzovány 3 kusy DPS s 20 kusy připájených rezistorů (zkoumání 120 pájených spojů). Celkem tedy bylo vytvořeno 27 typů vzorků po 3 kusech DPS a zkoumáno bylo 3240 pájených spojů.

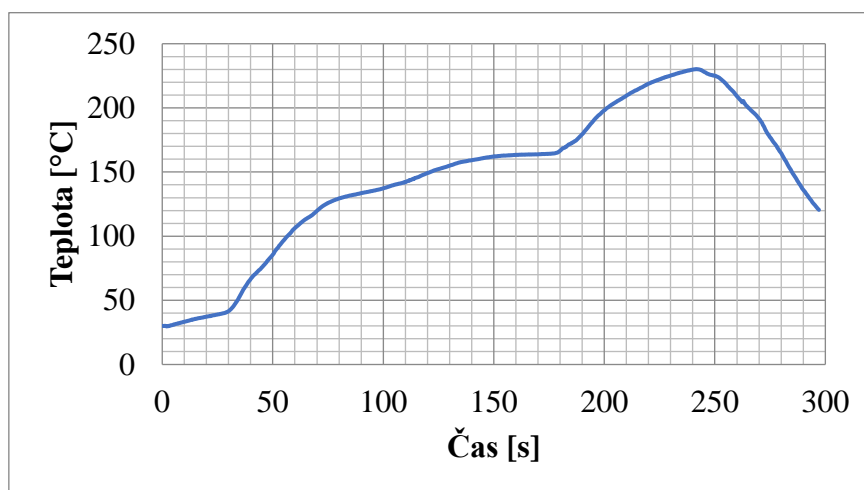
1.2. Metody použité v experimentu

Pro nanášení pájecí pasty byly v tomto experimentu navrženy tři typy ocelových, laserem řezaných šablon s různým motivem otvorů. Základní myšlenkou bylo nanesení vždy stejného objemu pájecí pasty na plošku, aby byly výsledky porovnatelné. Proto se kromě rozměrů otvorů také liší tloušťka šablon. Šablona se standardním motivem, který koresponduje s tvarem pájecí plošky se označuje jako Šablona 1 a má tloušťku 0,1 mm. Šablona 2 a Šablona 3 mají specificky navržené otvory a pro dosažení nánosu stejného objemu mají tloušťku 0,2 mm. Motiv všech tří šablon včetně označení ukazuje Obrázek 26. Samotný tisk byl proveden pomocí ručního šablonového tisku pájecí pasty SAB 06 (ELPRO s.r.o., Slovensko), který má chybu vyrovnaní menší než 0,1 mm. Na každou pájecí plošku bylo takto nanášeno 0,36 mm³ pájecí pasty.



Obrázek 26 – Motiv použitých šablon pro nános pájecích past v Experimentu 1.

Po nanesení pájecí pasty a osazení součástek byly DPS přetaveny v konvekční peci Mistral 260 (Spide-SMT, Holandsko). Tato pec umožňuje nastavení tří teplotních zón. Dvě teplotní zóny slouží k nastavení fáze přehřevu a poslední k roztavení pájecí slitiny. Rychlost dopravníku pece byla nastavena na 15 cm/min. Protože nebyly změny teplotního profilu součástí tohoto experimentu, teplotní profil byl nastaven dle doporučení výrobce pájecí pasty a byl stejný pro Pastu A i Pastu B. Použitý teplotní profil je zobrazen v Grafu 1 a byl naměřen pomocí termočlánku připevněného k pájecí plošce testované DPS.

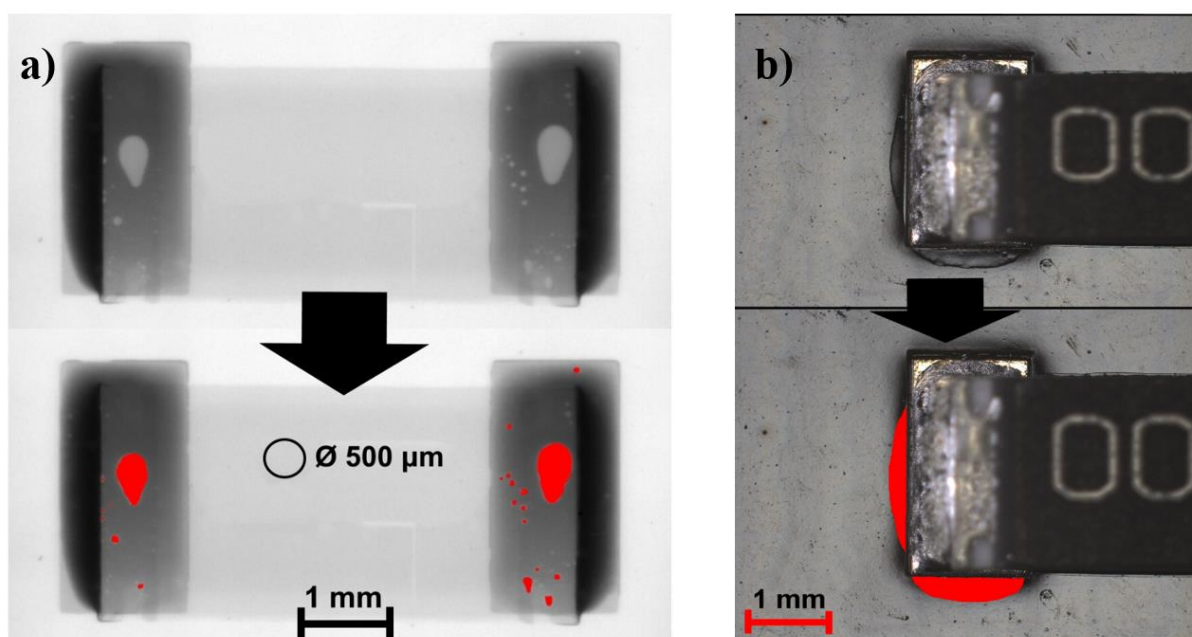


Graf 1 – Teplotní profil použitý v Experimentu 1.

Jelikož se voidy nachází uvnitř pájeného spoje, bylo nutné po procesu pájení vytvořené vzorky analyzovat na rentgenu Nanomex (Ge-Phoenix, USA). Každý pájený spoj byl skenován v kolmém směru na povrch desky plošných spojů. Na snímcích se voidy projevují jako světlé skvrny kruhového tvaru v pájeném spoji. Pro rozbor jejich výskytu byla provedena jasová analýza pomocí programu NIS Elements (Laboratory Imaging s.r.o., Česká republika), která umožňuje rozlišení světlých a tmavých míst na obrázku. Tento proces shrnuje Obrázek 27 – a). Po označení světlých míst, která reprezentují voidy, byl v programu následně vypočten jejich průměr a velikost plochy. Hodnota průměru dutin pro nás byla významná z důvodu rozlišení výskytu makrovoidů/mikrovoidů. V našem experimentu označujeme jako makrovoidy voidy

větší než $100\ \mu\text{m}$ v průměru, stejně jako například Aspandiar [100]. Rozlišení pořízených snímků nám umožnilo detekci voidů s průměrem větším než $5\ \mu\text{m}$. Plocha dutin byla měřena s chybou menší než $0,5\ \%$.

V tomto experimentu byl také testován vliv drsnosti nepájivé masky na vznik voidů. K měření dat vztahujících se k drsnosti povrchu byl použit digitální konfokální mikroskop VK-X1000 (Keyence, Japonsko). Z naměřených dat byly stanoveny parametry R_a (průměrná výška profilu povrchu), R_{L0} (rozvinutá délka profilu drsnosti vyjádřená v % rozšíření nad $100\ \%$ od hladkého profilu) a R_z (maximální výška profilu povrchu). Dále byla pomocí konfokálního mikroskopu naměřena roztékavost tavidla na DPS po procesu pájení. Po vytvoření snímků byla opět provedena jasová analýza v programu NIS Elements, obdobně jako při detekci voidů u rentgenových snímků. Obrázek 27 – b) ukazuje oblast šíření tavidla mimo pájený spoj a jeho následné označení pro analýzu.



Obrázek 27 – a) Snímek z rentgenu a analýza voidů v programu NIS Elements v Experimentu 1., b) Snímek z konfokálního mikroskopu a analýza oblasti šíření tavidla v programu NIS Elements v Experimentu 1.

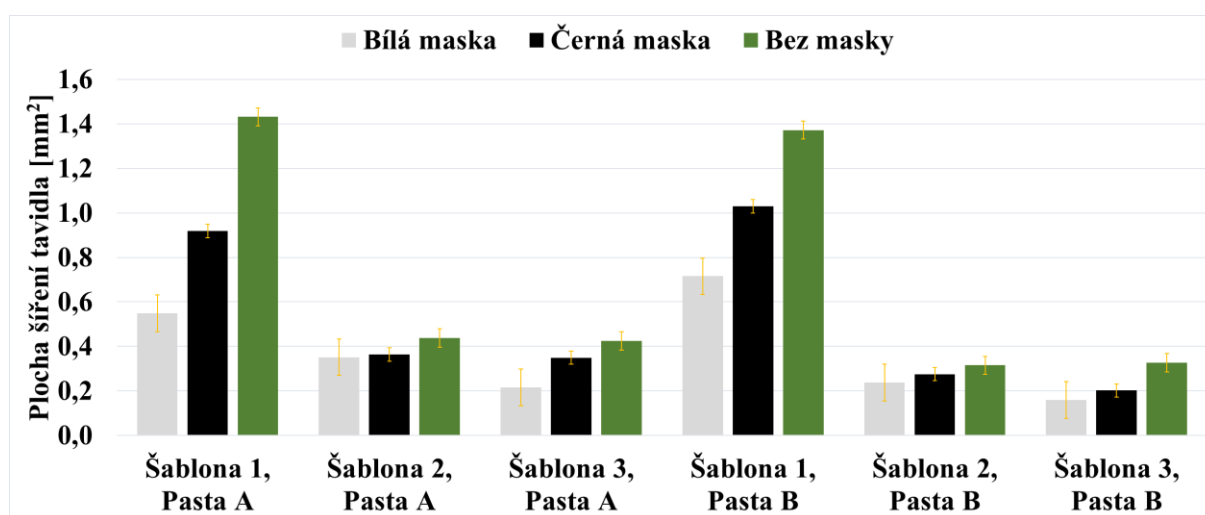
1.3. Výsledky experimentu

Získané výsledky z popsanych experimentů budou popsány v následujících tabulkách a grafech.

V Tabulce 9 jsou uvedeny parametry drsnosti povrchu DPS pro dva typy nepájivých masek a desku bez použité nepájivé masky. Následně bylo provedeno vyhodnocení oblasti roztečení tavidla na DPS v okolí pájecích plošek (viz Graf 2). Tavidlo se nejlépe roztékalo do okolí v případě vzorků bez nepájivé masky, tedy na povrchu s největší drsností. Vzhledem k našim předpokladům by zvýšená oblast šíření tavidla (větší roztékavost tavidla) okolo pájecí plošky měla znamenat snížení voidů v pájeném spoji.

Tabulka 9 – Parametry drsnosti povrchu u DPS bez nepájivé masky a s nepájivými maskami v Experimentu 1.

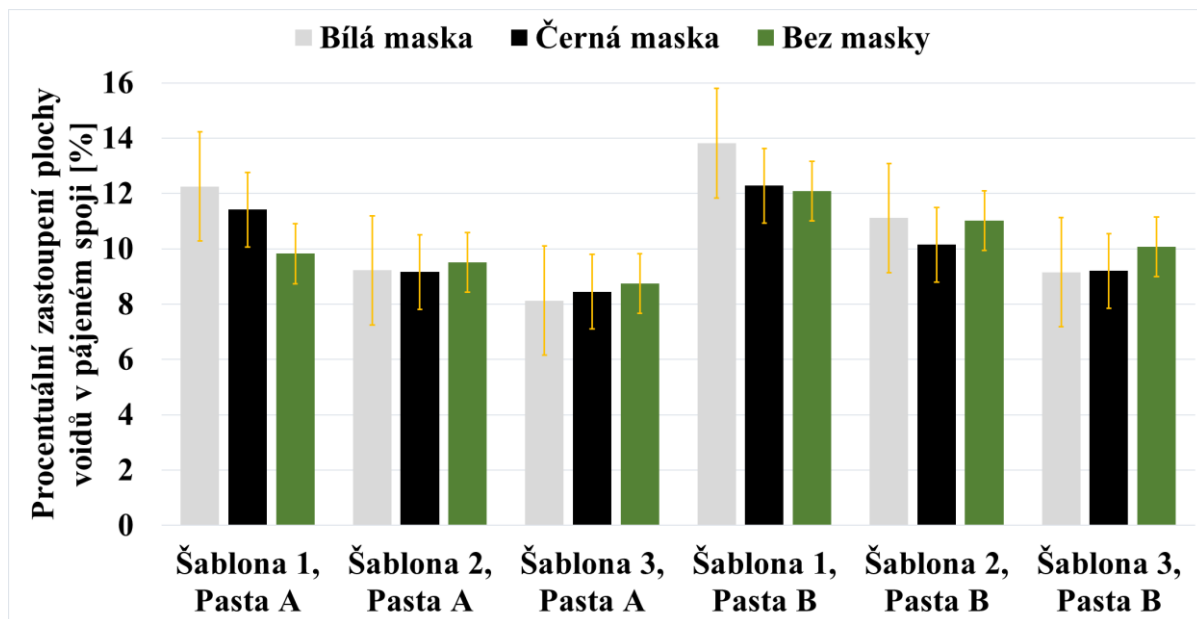
Úprava povrchu DPS	R_a (μm)	R_{LO} (%)	R_z (μm)
Bez masky	$1,176 \pm 0,031$	141 ± 12	$7,21 \pm 0,05$
Černá maska	$0,622 \pm 0,042$	68 ± 7	$1,49 \pm 0,05$
Bílá maska	$0,183 \pm 0,020$	21 ± 2	$0,73 \pm 0,03$



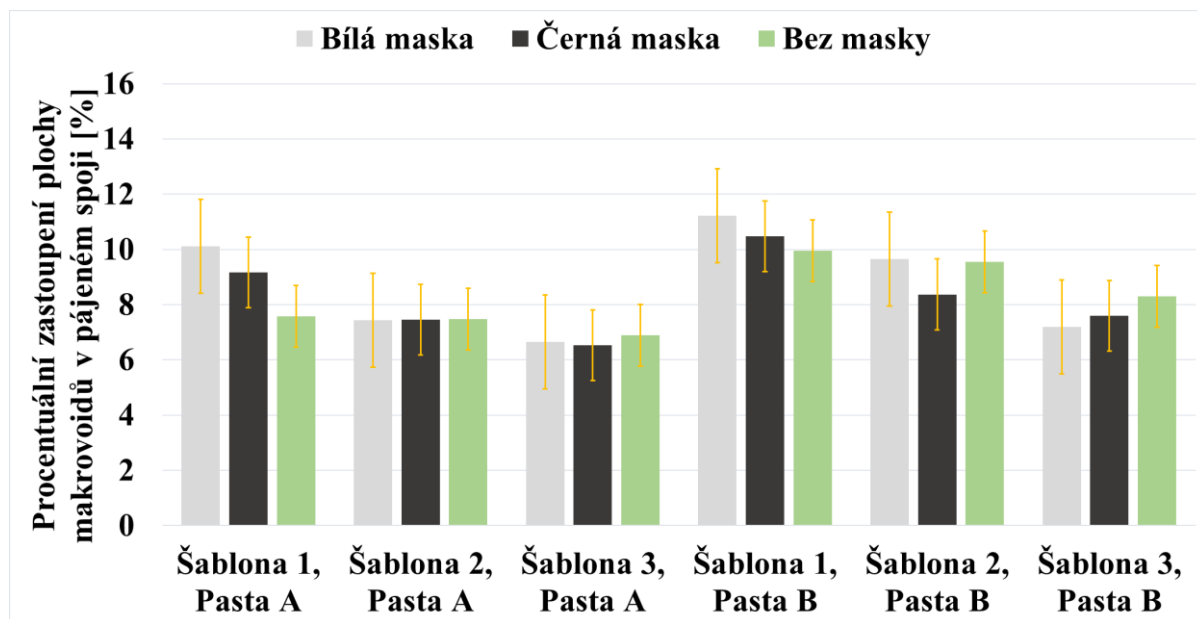
Graf 2 – Plocha šíření tavidla okolo pájecích plošek v Experimentu 1.

Poté byly vzorky zrentgenovány a byla provedena jasová analýza. Graf 3 nám ukazuje celkové výsledky výskytu voidů v pájených spojkách (jako procentuální zastoupení plochy pájecí plošky). Vyhodnocení zastoupení makrovoidů je patrné na Grafu 4 a mikrovoidů na Grafu 5. Pro lepší přehlednost jsou výsledky opět vyobrazeny jako poměr plochy voidů vzhledem

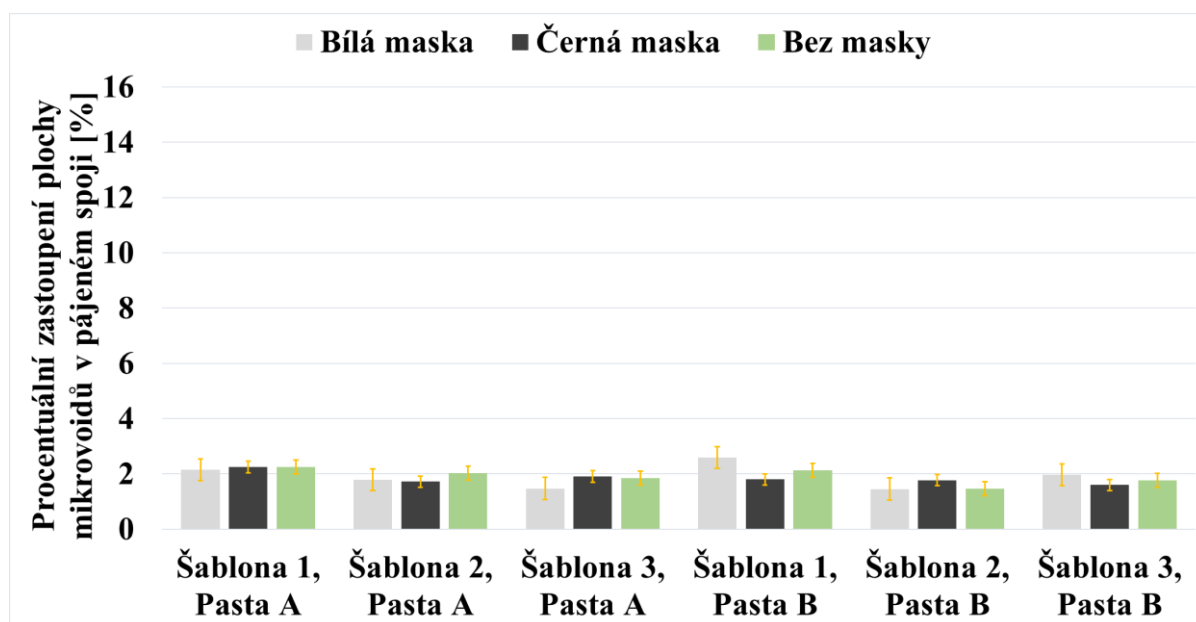
k ploše pájeného spoje. Z naměřených dat je patrné, že všechny zkoumané faktory v tomto experimentu mají vliv na vznik dutin v pájených spojích.



Graf 3 – Procentuální zastoupení plochy voidů v pájeném spoji v Experimentu 1.



Graf 4 – Procentuální zastoupení plochy makrovoidů v pájeném spoji v Experimentu 1.



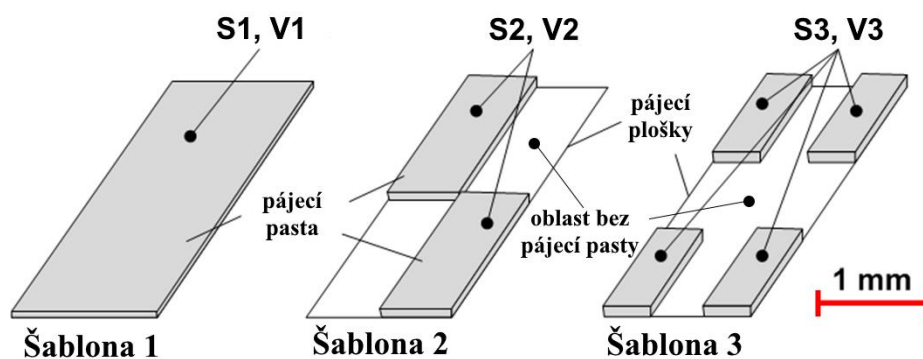
Graf 5 – Procentuální zastoupení plochy mikrovoidů v pájeném spoji v Experimentu 1.

Všechna data byla statisticky testována pomocí Studentova T-testu se standardní hladinou významnosti $\alpha = 0,05$.

1.4. Diskuse k výsledkům experimentu

1.4.1. Vliv změny tvaru šablony pro nanesení pájecí pasty

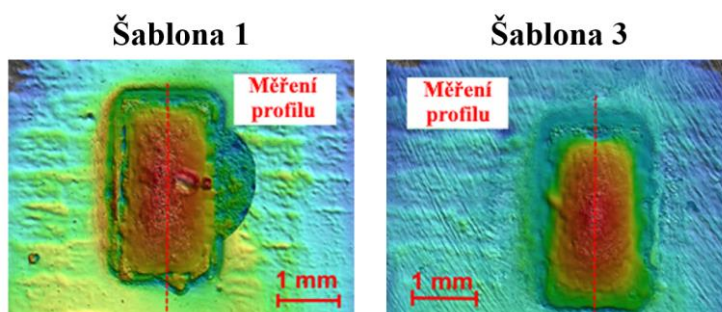
Výsledky uvedené v Grafu 3 ukazují, že v případě použití šablony se speciálně upravenými otvory pro nanášení pájecí pasty (tzn. Šablona 2 a Šablona 3), dosahujeme lepších výsledků z hlediska tvorby voidů, než v případě použití standardní šablony s tvarem kopírující pájecí plošky (Šablona 1). V případě použití upravené šablony měla roztavená pájecí slitina tendenci šířit se (smáčet) na prázdná místa na pájecí plošce (místa, kde nebyla vzhledem ke tvaru šablony původně pájecí pasta nanesená). Toto šíření nejspíše zapříčinilo lepší proces odplynění během procesu pájení, čímž se snížil výskyt voidů. Tento typ šíření po pájecí plošce je u vzorků připravených za pomoci Šablony 1 zanedbatelný, protože pájecí pasta pokryje celou plochu pájecí plošky. Pro lepší pochopení problematiky byl do práce přidán Obrázek 28. Z tohoto obrázku je zřejmé, že nanesený objem pájecí pasty byl zachován, ale pokrytá plocha pájecí plošky se u Šablony 2 a Šablony 3 zmenšila.



Obrázek 28 – Demonstrace nanesení stejného objemu pájecí pasty na pájecí plošky pomocí použitých šablon ($V1 = V2 = V3$), přičemž viditelná plocha (šedá) se liší $S1 > S2 > S3$.

Vlivem použití šablony se speciálními otvory se zabýval také Diehm a spol. [57]. V jejich studii ovšem neměnili šířku šablony, což vedlo ke snížení objemu nanášené pájecí pasty. To může vést ke konsekvencím jako je mechanické oslabení pájeného spoje. Dále se jejich experiment zabýval přetavením pouze ve vakuové pájecí peci. Námí provedený experiment byl tedy blíže standardním pájecím procesům a je lépe využitelný v praxi.

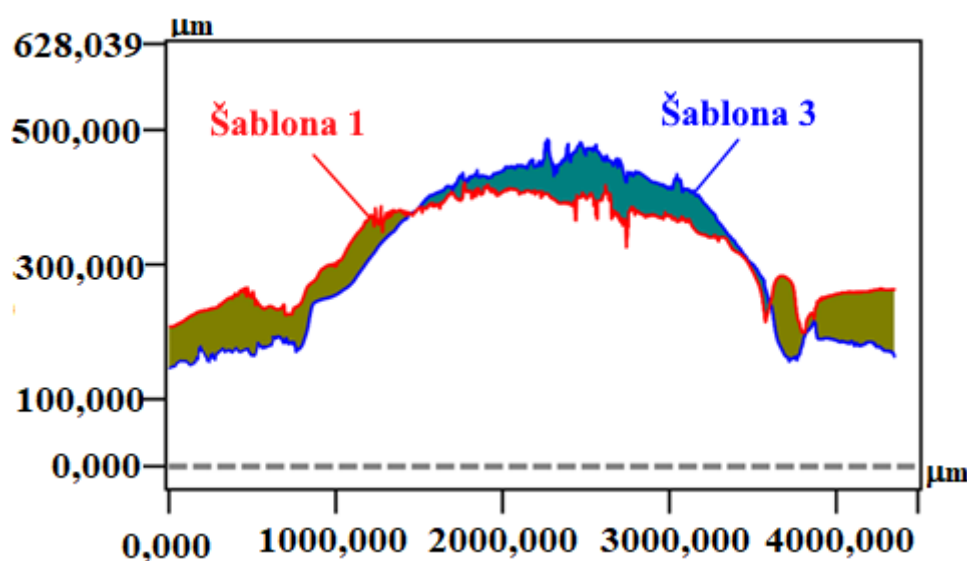
Z výsledků roztékavosti uvedených v Grafu 2 ovšem vyvstává otázka, kam se šíří tavidlo u vzorků se speciálním tvarem otvorů (tzn. Šablona 2 a 3). Obecně tedy, jaký je vztah mezi konstrukční změnou šablony a šířením tavidla do okolí. Je zřejmé, že u Šablony 1 se tavidlo roztéká do okolí pájecí plošky. Nanášený objem pájecí pasty je ovšem vzhledem ke konstrukci u všech typů šablon stejný. Abychom tento problém lépe analyzovali, bylo provedeno měření reliéfu již zapájených spojů na konfokálním mikroskopu. Princip měření ukazuje Obrázek 29.



Obrázek 29 – Princip měření reliéfu pájeného spoje v Experimentu 1.

Tímto měřením jsme získali rozměrové profily průřezů pájených spojů. Výsledky tohoto měření nám ukazuje Graf 6. Z výsledků je patrné, že u Šablony 3 dojde k usazení tavidlových zbytků na horní části pájeného spoje. Oproti tomu u Šablony 1 dojde k rozlití

do okolí pájecí plošky, jak bylo zřejmé také z Grafu 2. Tento výsledek bude pravděpodobně důsledkem rozdílného procesu smáčení v případě nánosu pájecí pasty na celou plošku (Šablona 1) a v případě nánosu pasty pouze na její část (Šablona 2 a 3). Z těchto výsledků vyplývá, že přístup redukce voidů v tomto případě příliš nesouvisí s roztékáním tavidla do okolí pájecí plošky, ale s vytvořením kanálek a vzduchových mezer, kterými mohou plynné látky při procesu pájení odejít z pájeného spoje. Výsledky v Grafu 6 dále poukazují na to, že během procesu pájení jsou u modifikovaných šablon kapalné látky vytlačovány do horní části pájeného spoje. Všechna tato zjištění vedou ke snížení voidovitosti vlivem opuštění kapalných a plynných látek z pájeného spoje.



Graf 6 – Naměřené rozměrové profily pájeného spoje při použití Šablony 1 a Šablony 3 v Experimentu 1.

Jak již bylo zmíněno, data byla statisticky testována. Studentův T-test ukázal, že pouze rozdíl mezi daty naměřenými u Šablony 1 a Šablony 2 nebyl statisticky významný, kde hodnota $p = 0,099$. I tak se ovšem nejedná o vysokou vypočtenou hodnotu p .

1.4.2. Vliv použití nepáživé masky s různou drsností povrchu

V případě nanášení pájecí pasty přes šablonu, která kopírovala tvar pájecích plošek měla drsnost povrchu dle výsledků z Grafu 3 značný význam na vznik voidů v pájeném spoji. Nejlepších výsledků (nejmenší voidovitosti) bylo dosaženo v případě nepoužití nepáživé masky. Tyto vzorky vykazovaly z hodnocených variant dle Tabulky 9 největší drsnost. Největší přítomnost dutin byla zaznamenána při použití bílé nepáživé masky, která měla nejmenší

drsnost povrchu. Zde došlo v porovnání se vzorky bez nepájjivé masky ke zvýšení voidovitosti zhruba o 20 % (relativní hodnota). Wenzel [5] a Veselý [128] ve svých studiích uvádějí, že s vyšší drsností povrchu se obecně zvyšuje smáčivost kapaliny. Naměřená plocha šíření tavidla v okolí pájecích plošek byla tedy vyšší v případě větší drsnosti povrchu DPS, což potvrzují také výsledky tohoto experimentu v Grafu 2. Získané výsledky jsou také v souladu se studií Hirmana a Steinera [46]. Ta uvádí, že v případě, že tavidlo neopustí pájený spoj je vyšší šance pro vznik voidů v pájeném spoji.

Při statistickém testování dat ukazují výsledky Studentova T-testu, že pouze při porovnání bílé a černé nepájjivé masky nebyl rozdíl statisticky významný ($p = 0,08$).

V případě použití Šablony 2 a Šablony 3 není vliv nepájjivé masky tak významný jako v případě Šablony 1. To je způsobeno menším rozptylem tavidla do okolí u Šablony 2 a Šablony 3, jak již bylo popsáno v kapitole 1.4.1. Vliv změny tvaru šablony pro nanesení pájecí pasty.

1.4.3. Vliv aktivity tavidla na vznik voidů

Pasta A obsahuje tavidlo s vyšší aktivitou ROL1 a Pasta B tavidlo s nižší aktivitou ROL0. Výsledky v Grafu 3 ukazují, že v případě aplikace Pasty A dojde ke snížení plochy voidů u všech vzorků v porovnání s Pastou B. Z hlediska porovnání všech vzorků došlo při použití Pasty A k relativnímu snížení voidovitosti o 20 %. Důvodem tohoto snížení je vyšší aktivita tavidla v pájecí pastě, které oproti Pastě B obsahuje halogenidy. Díky vyšší aktivitě dojde k lepší redukci oxidů z povrchu pájecí plošky. Dalším faktorem je, že látky obsažené v tavidle v Pastě A mohou být těkavější, což podpoří odpařování a lepší únik z pájeného spoje. Vlivem aktivity tavidla se zabýval například Bušek [113] a naše závěry jsou v souladu s jeho výzkumem.

Pokud se podíváme také na výsledky v Grafu 2, pak je vidět, že Pasta A má oproti Pastě B ve většině případů vyšší roztékavost tavidla do okolí pájecí plošky. To podporuje hypotézu, že roztékavost tavidla má vliv na voidovitost a je nutné ji zohlednit při vyhodnocení vzniku voidů.

Statistické testování pomocí Studentova T-testu u dat vztahujících se k Pastě A Pastě B ukázalo, že ve všech případech byl rozdíl statisticky významný.

1.4.4. Zastoupení makrovoidů a mikrovoidů v pájeném spoji

Z dat v Grafu 4 a Grafu 5 je patrné, že převážná část voidů v pájených spojích je tvořena makrovoidy, tedy dutinami s průměrem větším než 100 μm . Tento jev byl zaznamenán u všech typů vzorků. Mikrovoidy tvořily v průměru pouze 1,9 % plochy dutin, což je oproti makrovoidům velmi malá část. U žádného ze vzorků nedošlo k výrazné odchylce od tohoto průměru. Jejich výskyt byl téměř totožný. Tímto lze konstatovat, že námi testované faktory v Experimentu 1 ovlivňují především makrovoidy.

1.5. Závěry experimentu

Tento experiment poukazuje na rozdíl ve výskytu voidů v pájených spojích se zaměřením na několik faktorů. Prvním faktorem je použití modifikovaných šablon pro nános pájecí pasty, kde je zajištěno nanášení jejího stejného objemu pro všechny vzorky. Proměnnou je ovšem velikost plochy nanášení. Druhým faktorem je modifikace roztékavosti tavidla z pájecí pasty do okolí pájecích plošek, použitím různých druhů nepájivé masky (bílá, černá a vzorky bez nepájivé masky). Posledním z faktorů bylo použití tavidla s různou aktivitou (ROL0 a ROL1).

Výsledky ukazují, že tvorba voidů je značně ovlivněna použitím upravené šablony pro nanášení pájecí pasty. V případě použití modifikované šablony s menšími otvory umožnil proces smáčení lepší odplynění pomocí vytvořených kanálek, což vedlo ke snížení výskytu voidů v pájeném spoji. Z hodnocených přístupů se tento přístup jeví jako nejvhodnější a efektivnější pro eliminaci voidů.

V případě využití nepájivé masky s větší drsností dojde také ke značnému snížení výskytu voidů v pájeném spoji. Zvýšená drsnost povrchu způsobí lepší smáčení tavidlem, což zajistí odchod většího množství tavidla ze spoje. Pájecí pasta musí být ovšem nanesena pomocí standardní šablony, která respektuje velikost a tvar pájecích plošek. U modifikovaných variant šablony tento faktor nehraje roli.

Z hlediska aktivity použitého tavidla na vznik voidů je vhodnější použití aktivnějšího tavidla ROL1. Použití agresivnějšího tavidla vede k lepšímu odstranění oxidů, což má za následek snížení voidovitosti.

Z výsledků dále plyne, že zkoumané faktory mají vliv primárně na výskyt makrovoidů. Makrovoidy také zabírají mnohem větší plochu v pájeném spoji než ostatní voidy, proto je

jejich eliminace zásadní. Mikrovoidy ve zkoumaných vzorcích měly téměř shodné zastoupení bez ohledu na zkoumané vlivy.

Na základě podrobných výsledků je preferovanou kombinací typu tavidla, provedení šablony a typu nepájivé masky nejvhodnější agresivnější tavidlo (ROL1) v kombinaci se šablonou obsahující rozdělené čtyři menší otvory (Šablona 3) a DPS bez nepájivé masky (nejdrsnější povrch). V případě nemodifikované šablony (Šablona 1) je vhodnější variantou použití aktivnějšího tavidla ROL1 a DPS s drsnějším povrchem (bez nepájivé masky, případně s nepájivou maskou s drsnějším povrchem). Tyto kombinace výrazně omezují vznik dutin v pájených spojkách.

Uvedené postupy mají srovnatelný vliv na vznik voidů v pájeném spoji jako je úprava teplotního profilu nebo změna velikosti částic v pájecí pastě, kterou jsem se zabýval ve své publikaci „Study of Voids Inside Solder Joints Based on SAC305 Solder Paste with Different Properties“ [118]. Uvedené postupy a modifikace jsou ovšem poměrně snadno realizovatelné a nevyžadují velké dodatečné náklady.

2. Experiment 2

Druhý experiment je zaměřený na snížení voidovitosti vzhledem ke dvěma přístupům, kde jeden je zcela neprobádaný. První přístup je testování změny parametrů teplotního profilu a druhý je zkoumání chemického složení použitých tavidel v pájecích pastách.

U prvního přístupu je zvolen teplotní profil typu RTS. Vrcholová teplota a čas setrvání na ní je nastaven pro všechny zkoumané vzorky stejně. Testována je změna teplotního gradientu ve fázi ohřevu. Fáze chlazení je opět pro všechny zkoumané teplotní profily stejná. Myšlenka tohoto experimentu je, že při použití nižšího teplotního gradientu mají plynné látky delší čas na opuštění pájeného spoje, což by mělo zaručit snížení výskytu voidů.

U druhé části experimentu je zkoumáno chemické složení tavidel a zkoumání korelace přítomnosti některých chemických látek s výskytem voidů. Společně s touto analýzou je také provedena termogravimetrická analýza (TGA), které zkoumá hmotnostní úbytek a množství tavidlových reziduí při jeho odpařování. Kromě chemického složení by množství reziduí mělo také hrát významnou roli při tvorbě voidů.

2.1. Materiály použité v experimentu

Ve druhém experimentu byl použit stejný substrát a motiv na DPS jako u Experimentu 1 (FR4 a motiv viz Obrázek 24). Pájecí plošky byly zvoleny bez povrchové úpravy (čistá měď). To sice neodpovídá běžné situaci v praxi, protože by docházelo ke zvýšené oxidaci, a tedy ke snížení času pro skladování. V našem případě byla zvolena tato varianta pro svou jednoduchost. Měděné pájecí plošky jsou základním bodem, ze kterého lze vycházet v dalších experimentech. Na desky plošných spojů nebyla aplikována nepájkivá maska.

Pro pájení bylo použito pět pájecích past s pájecí slitinou SAC305 a velikostí částic T4. Tyto pasty byly dodány firmou AIM a dle našich požadavků se lišily chemickým složením tavidla. Konkrétní chemické složení bohužel nebylo výrobcem specifikováno vzhledem k výrobnímu tajemství. Všechny známé parametry pájecích past od výrobce jsou specifikovány v Tabulce 10. Pro provedení TGA a zkoumání chemického složení byla použita samotná tavidla, která jsou součástí pájecích past. Tavidla byla opět dodána výrobcem společně s pájecími pastami.

Tabulka 10 – Známé parametry použitých pájecích past v Experimentu 2.

Parametry	Pasta A	Pasta B	Pasta C	Pasta D	Pasta E
Označení tavidla v experimentu	Tavidlo A	Tavidlo B	Tavidlo C	Tavidlo D	Tavidlo E
Označení	NC-A	NC-B	NC-C	NC-D	WS-A
Typ	Bezolovnatá				
Pájecí slitina	96,5Sn3Ag0,5Cu (SAC305)				
Objem tavidla (hm%)	11,50 %				
Velikost částic	T4 (20 μm - 38 μm)				

Celkem bylo vyrobeno 40 desek plošných spojů, dvě desky pro každou kombinaci pájecí pasty a teplotního profilu. Analyzováno tedy bylo 800 pájených spojů.

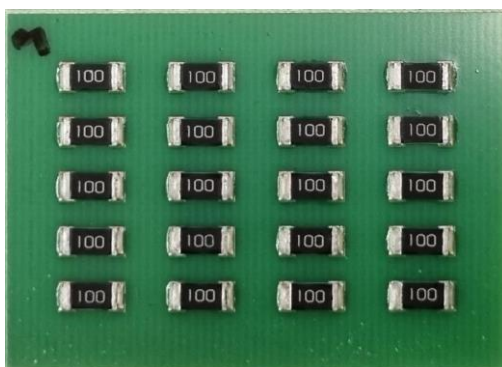
2.2. Metody použité v experimentu

Pro porovnání úbytku hmotnosti tavidla při různých teplotních gradientech a pro měření množství tavidlových zbytků při teplotách během procesu pájení byla použita termogravimetrická analýza. Termogravimetrické křivky byly měřeny v rozsahu 25 – 600 °C s gradientem 10 °C/min a 42 °C/min a průtokem vzduchu 40 ml/min (vzduch, technická třída, SIAD Czech s.r.o.) na přístroji TGA550 Auto Advanced (TA Instruments, USA).

Pro zkoumání chemického složení tavidel byl použit plynový chromatograf (GC) Thermo Trace 1310 spojený s hmotnostním spektrometrem (MS) ISQ 7000. Eluční teplota plynového chromatografu byla vypočtena podle normy ASTM 7169, aby se odhadla těkavost přítomných látek. Vzorky byly připraveny následujícím způsobem: 200 mg tavidla bylo zředěno 10 ml isopropanolu a přeneseno do 2 ml lahvíček, které jsou kompatibilní s automatickým dávkovačem. Vzorek byl zpracován pomocí automatického dávkovače TriPlus RSH a do chromatografu byl vstříknut 1 μl při teplotě 300 °C s rozdělením 1:300. Průtok mobilní fáze byl nastaven na konstantní hodnotu 1,2 ml/min. Separace probíhala od teploty 40 °C, která byla nastavena na dobu jedné minuty. Následně se teplota zvyšovala s teplotním gradientem 2 °C/min až do teploty 300 °C, která byla poté udržována 5 minut. Eluční sloučeniny byly ionizovány nárazem elektronů při 70 eV a ionty v rozsahu 35 – 500 m/z byly skenovány kvadrupólem s akviziční frekvencí 5 Hz. Identifikace sloučenin byla provedena spektrálními porovnáními s NIST17 a MassBank a následně ověřena pomocí retenčních indexů.

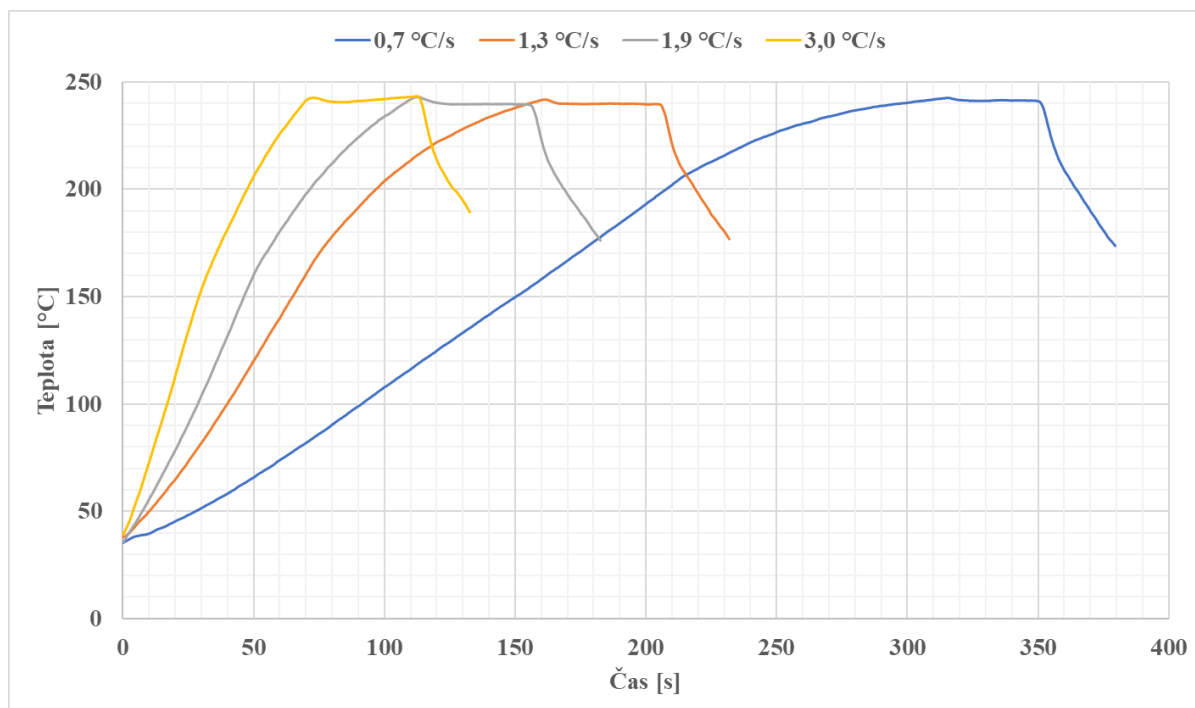
Uvedené metody použité pro TGA analýzu a chemické určení látek v tavidlech pomocí GC-MS analýzy byly podle popsané metodiky provedeny kolegy chemiky, kteří působí na naší katedře. Stejně tak provedli klasifikaci látek přítomných v tavidlech.

K nanesení pájecí pasty na pájecí plošky DPS byla použita laserem vyřezaná ocelová šablona s tloušťkou 0,15 mm. Šablona měla standardní tvar s rozměry otvorů, které kopírují velikost pájecích plošek. Na každou pájecí plošku bylo takto nanášeno $0,54 \text{ mm}^3$ pájecí pasty. Pájecí pasta byla na DPS natištěna pomocí poloautomatického šablonového tisku SPR-45 (DDM Novastar, USA), který zajistil přesné a precizní nanášení pájecí pasty na pájecí plošky.



Obrázek 30 – Osazená DPS rezistory v Experimentu 2.

Desky plošných spojů byly po osazení rezistory zapájeny horkým vzduchem pomocí opravárenského pracoviště ASSEMTECH BIP 7000 (AssemTech, Česká republika). Toto pracoviště umožňuje přesné nastavení teplotního profilu. Pro tento experiment byly použity čtyři teplotní profily typu RTS, které jsou zobrazeny v Grafu 7. Parametry těchto teplotních profilů jsou popsány v Tabulce 11. Jak již bylo zmíněno v úvodu popisu experimentu, teplotní profily se lišily teplotním gradientem ve fázi ohřevu, a tedy i dobou dosažení vrcholové teploty. Pro všechny vzorky následovalo setrvání při vrcholové teplotě $240 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 45 s a chlazení s ochlazovacím gradientem $2,2 \text{ }^\circ\text{C/s}$. Teplotní profily byly naměřeny pomocí termočlánku připojeného k testovací DPS.

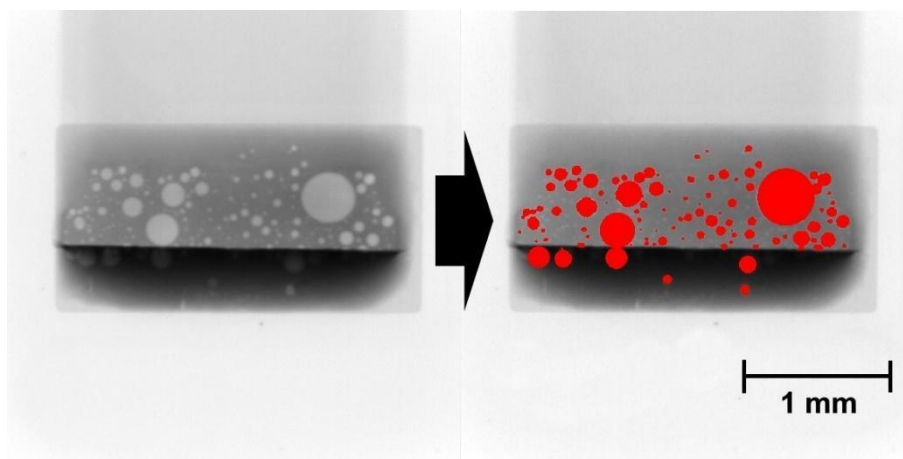


Graf 7 – Teplotní profily použité pro přetavení pájecí pasty s rozdílně nastavenými teplotními gradienty použité v Experimentu 2.

Tabulka 11 – Parametry použitých teplotních profilů v Experimentu 2.

Parametry	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4
Teplotní gradient ohřevu	0,7 °C/s	1,3 °C/s	1,9 °C/s	3,0 °C/s
Vrcholová teplota	240 °C			
Teplotní gradient chlazení	2,2 °C/s			

Pro vyhodnocení množství voidů v pájených spojích byla použita stejná metoda jako u Experimentu 1. Nejprve tedy byla provedena rentgenová analýza pomocí rentgenu Nanomex (Ge-Phoenix, USA), kde byl opět každý spoj skenován v kolmém směru na povrch DPS. Získané snímky byly zpracovány jasovou analýzou v programu NIS Elements (Laboratory Imaging s.r.o., Česká republika), kde byl zjištěn průměr dutin a velikost jejich plochy, viz Obrázek 31. Stejně jako v předchozím experimentu byly voidy s průměrem větším než 100 μm klasifikovány jako makrovoidy. Okrajové podmínky a přesnost byla také stejná jako u Experimentu 1, proto není nutné tento postup více rozepisovat.

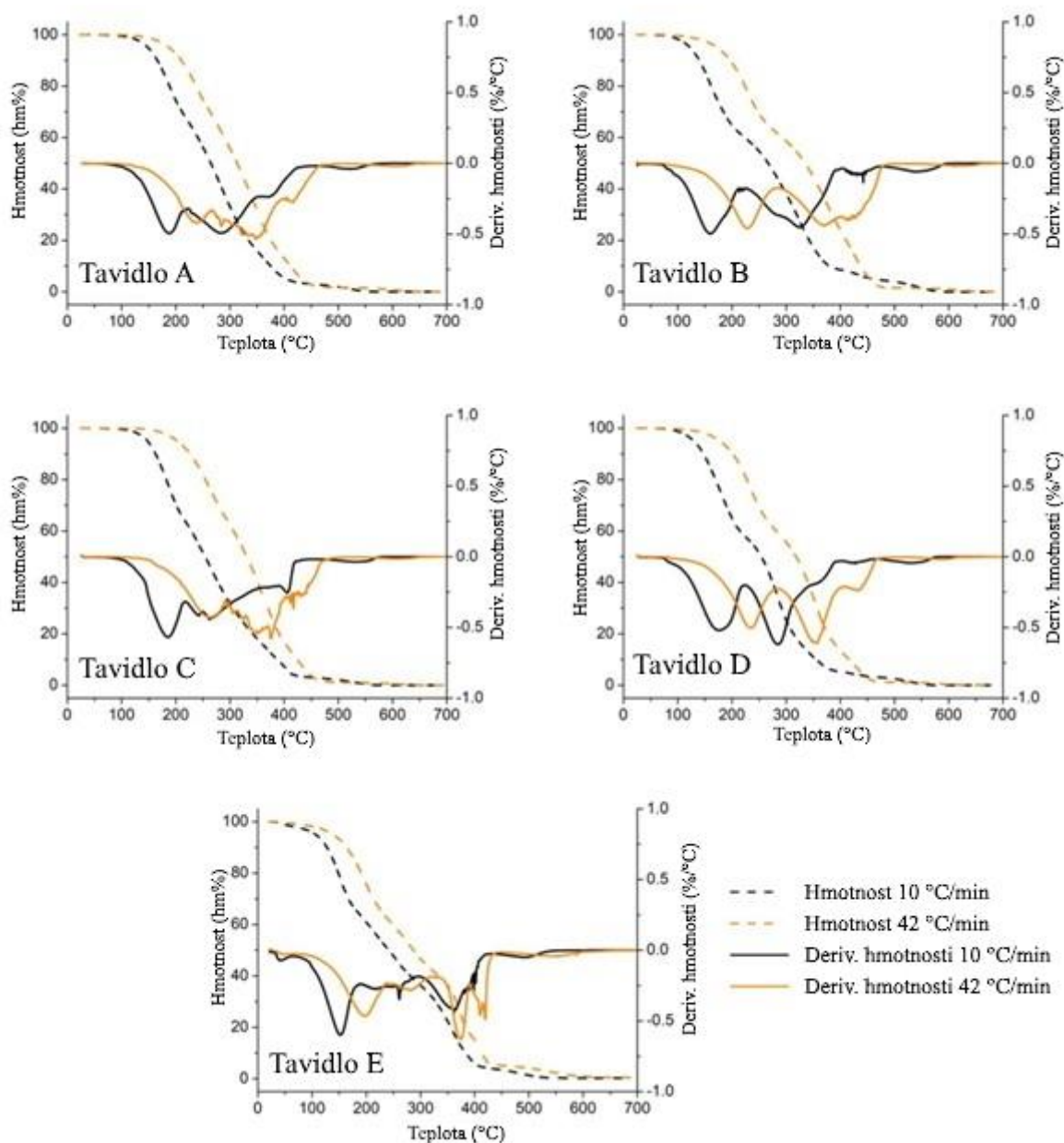


Obrázek 31 – Rentgenový snímek a analýza voidů v programu NIS Elements v Experimentu 2.

2.3. Výsledky experimentu

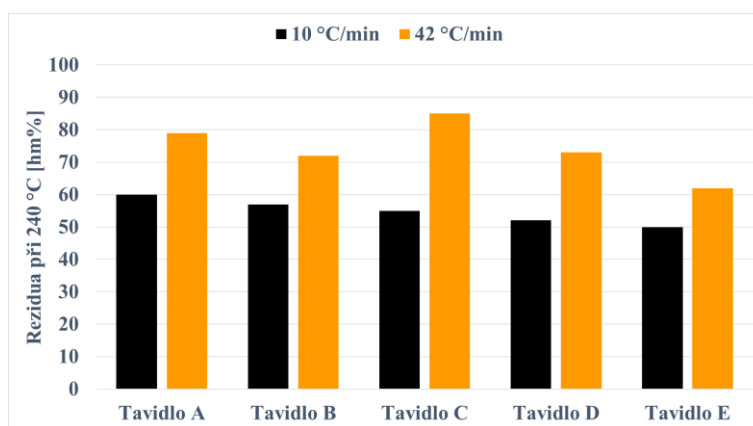
Získané výsledky z popsaných experimentů budou popsány v následujících tabulkách a grafech.

Provedená termogravimetrická analýza se dvěma teplotními gradienty (10 °C/min a 42 °C/min) ukazuje profil odpařování tavidla použitého v pájecích pastách. Křivky pro jednotlivá tavidla jsou uvedeny v Grafu 8. Z naměřených grafů je patrné, že všechna tavidla byla stabilní až do teploty 100 °C. K hlavnímu úbytku hmotnosti začalo docházet ve třech teplotních bodech, a to při 180 °C, 280 °C a 400 °C. Pro úplné odstranění reziduí bylo nutné zahřát tavidla až na teplotu 600 °C. Z naměřených křivek plyne, že vyšší teplotní gradient vede k vyšší tepelné stabilitě tavidla. To může být způsobeno tím, že odpařování a rozklad jsou termodynamické a kinetické procesy.



Graf 8 – Termogravimetrická analýza tavidel při teplotních gradientech 10 a 42 °C/min v Experimentu 2.

Vrcholová teplota ve všech našich testovaných teplotních profilech byla ovšem nastavena na 240 °C. Z tohoto důvodu je v Grafu 9 v tomto teplotním bodě porovnán hmotnostní zbytek reziduí tavidel. Z grafu jasně plyne, že zbytková hmotnost výrazně závisí na rychlosti ohřevu, tedy na velikosti teplotního gradientu.










Graf 9 – Rezidua (hmotnostní zbytek) tavidel při 240 °C změřené pomocí TGA v Experimentu 2.

Provedená GC-MS analýza odhalila několik sloučenin, které se vyskytují ve většině běžně používaných pájecích pastách, ale také velké rozdíly ve složení zkoumaných tavidel. Zjištěné složky jsou uvedeny v Tabulce 12. Je očividné, že každé tavidlo je zcela specifické svým složením a přítomnost některých složek může výrazně ovlivnit vznik dutin v pájených spojích. Dále byla zjištěna přítomnost velkého množství vedlejších stopových složek. Jedná se pravděpodobně o nečistoty z hlavních složek tavidla. Převážně se jedná o terpeny z kalafuny, monoaromatické a alifatické uhlovodíky, aldehydy, alkoholy apod. Tyto vedlejší stopové složky nejsou v tabulce uvedeny.

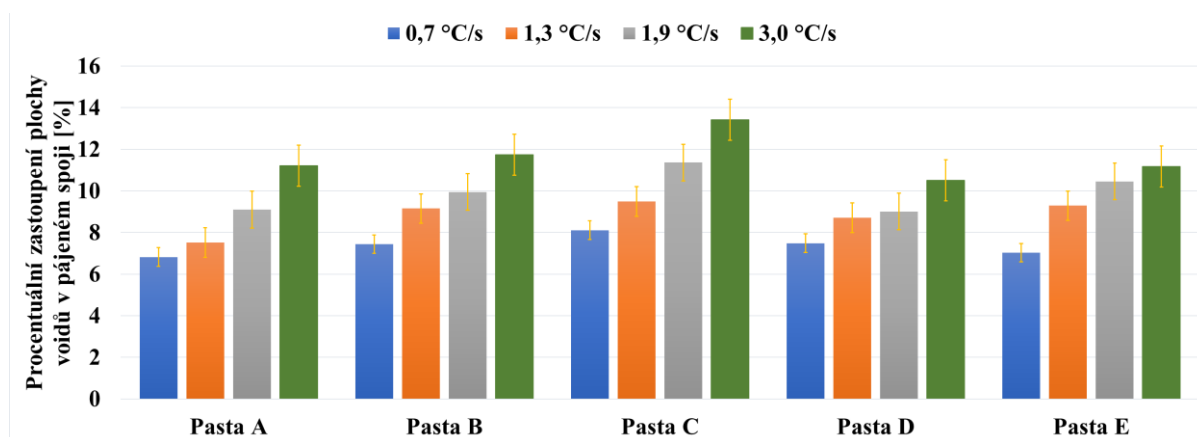
Tavidlo A bylo specifické ethyl imidazolem, který se běžně používá jako urychlovací složka pájecích past. Má také velmi nízkou teplotu varu. Mezi další hlavní složky patřilo několik izomerů tripropylen glykol butyl etheru. Tyto sloučeniny byly pozorovány téměř ve všech vzorcích s výjimkou Tavidla E. Posledními elučními sloučeninami byly abietanové diterpenoidy, včetně kyseliny abietové. Tavidlo B obsahovalo místo ethyl imidazolu složku tributylamin a tripropylen glykol butyl ether byl nahrazen podobným diethylen glykol dibutyl etherem. Ostatní složky byly podobné, s celkově nižším výskytem terpenů, což svědčí o menším množství kalafuny z borové mízy. Tavidlo C bylo založeno na tripropylen glykol butyl etheru a diethylen glykol dibutyl etheru, ale obsahovalo také butylovaný hydroxytoluen, který má antioxidační vlastnosti. Tato sloučenina je pro toto tavidlo specifická. Obsahovalo také nižší množství ethyl imidazolu ve srovnání s Tavidlem A. Složení Tavidla D bylo téměř totožné s Tavidlem B, s drobnými rozdíly v terpenovém profilu, pravděpodobně v důsledku odlišného původu kalafuny. Tavidlo E se od ostatních lišilo výrazně. Chyběly v něm abietanové diterpenoidy a terpeny nalezené v ostatních případech, což svědčí o plně syntetickém složení tavidla. Hlavními zjištěnými sloučeninami byly izomery tripropylen glykol butyl etheru

s vysokým bodem varu. Na druhé straně zde bylo identifikováno významné množství těkavého acetaldehydu. Stručný grafický přehled uvedených látek je uveden v Tabulce 12, kde označení <LOQ: znamená pod mezí stanovitelnosti.

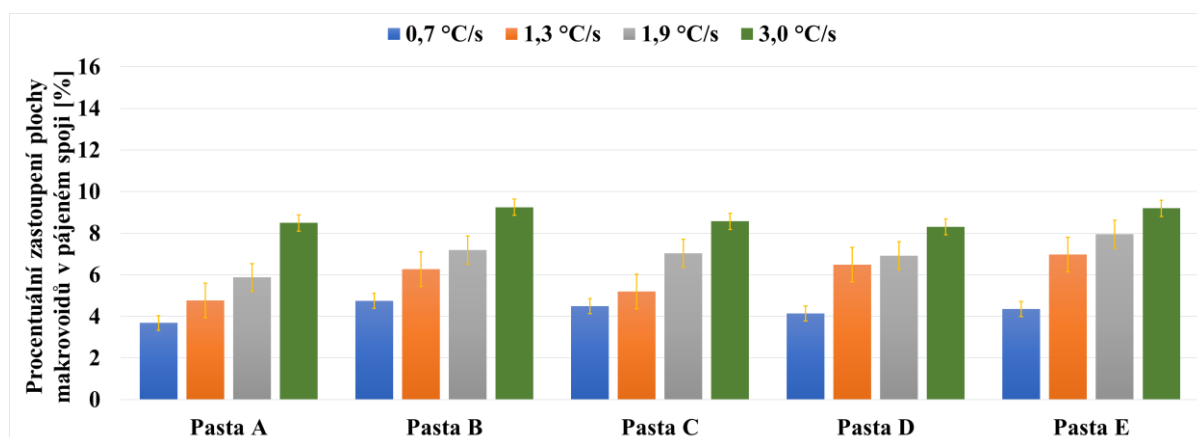
Tabulka 12 – Identifikace hlavních složek pomocí GC-MS, jejich fyzikální vlastnosti a semikvantitativní chromatografické plochy píků v Experimentu 2.

Složka	Struktura	CAS	Bod varu	Tlak páry (mmHg)	GC eluční teplota (°C)	Relativní plocha píku (%)				
						Tavidlo A	Tavidlo B	Tavidlo C	Tavidlo D	Tavidlo E
Acetaldehyd		75-07-0	21 °C	902 při 20 °C	37,2	<LOQ	<LOQ	<LOQ	<LOQ	6,07
Ethyl imidazol		1072-62-4	104 °C	0,3±0,4 při 25 °C	93,2	4,74	<LOQ	12,55	<LOQ	<LOQ
Tributylamin		102-82-9	207 °C	0,0934 při 25 °C	110,4	<LOQ	13,09	0,12	20,67	<LOQ
Diethylen glykol dibutyl ether		112-73-2	254 °C	<0,01 při 20 °C	144,2	<LOQ	48,99	21,29	46,52	5,46
Butylovaný hydroxytoluen		128-37-0	265 °C	0,00516 při 25 °C	151,9	<LOQ	<LOQ	17,49	<LOQ	<LOQ
Tripropylen glykol butyl ether		55934-93-5	276 °C	<0,01 při 20 °C	155,2	74,53	17,77	45,97	11,04	74,61
Abietanové diterpenoidy		19407-12-6	338 °C	0,0±0,3 při 25°C	201,0	0,15	0,11	0,10	0,08	<LOQ

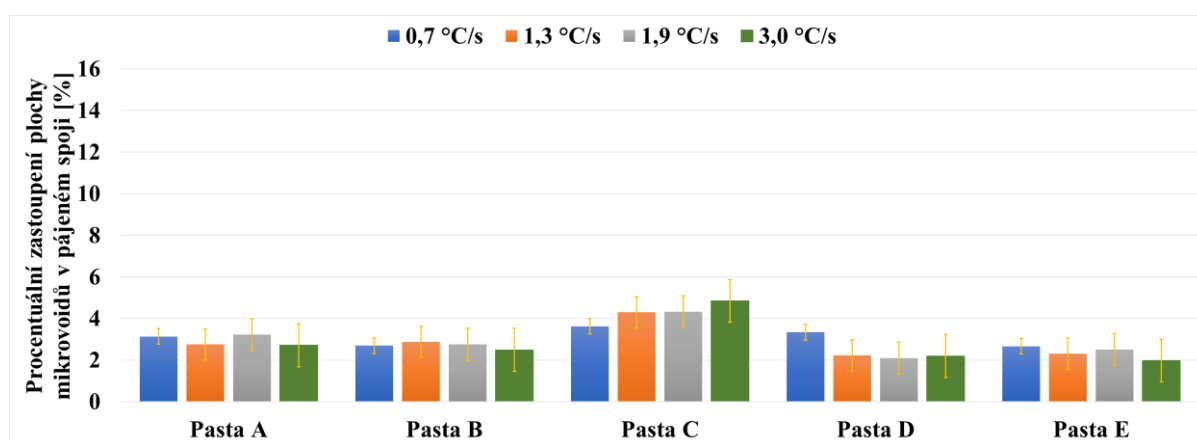
Výsledky analýzy voidů v pájených spojích jsou uvedeny na následujících grafech. Graf 10 ukazuje procentuální zastoupení všech voidů v pájených spojích, Graf 11 procentuální výskyt makrovoidů a Graf 12 mikrovoidů. Pro přehlednost a lepší vypovídající hodnotu byly hodnoty převedeny jako poměr plochy dutin vzhledem k ploše pájeného spoje stejně jako v Experimentu 1. Z grafů plyne, že s rostoucím teplotním gradientem se výrazně zvyšuje plocha voidů v pájeném spoji. Tento jev je patrný u všech zkoumaných pájecích past. V relativním měřítku je při použití nejmenšího teplotního gradientu v průměru o 36 % nižší výskyt voidů než u nejvyššího teplotního gradientu.



Graf 10 – Procentuální zastoupení plochy voidů v pájeném spoji v Experimentu 2.



Graf 11 – Procentuální zastoupení plochy makrovoidů v pájeném spoji v Experimentu 2.



Graf 12 – Procentuální zastoupení plochy mikrovoidů v pájeném spoji v Experimentu 2.

Všechna data byla opět statisticky testována pomocí Studentova T-testu se standardní hladinou významnosti $\alpha = 0,05$.

2.4. Diskuse k výsledkům experimentu

2.4.1. Chemická analýza

Pro lepší pochopení procesu tvorby voidů v pájeném spoji je důležitá znalost těkavosti složek pájecí pasty. Plyny vznikající odpařováním jsou jednou ze základních příčin jejich vzniku. Důležité je také pochopení k čemu dané složky tavidel v pájecí pastě slouží. Ethyl imidazol se používá jako urychlovací složka a tributylamin jako alkalický regulátor pH. Jako aktivátory se v moderních pájecích pastách používají diethylen glykol dibutyl ether a tripropylen glykol butyl ether. Butylovaný hydroxytoluen obecně slouží jako antioxidant. K tomuto účelu je také používán v pájecích pastách. Hlavní složkou tavidel v pájecí pastě je

kalafuna získávaná z mízy, která obsahuje látky jako abietanové diterpenoidy, včetně dehydro až tetrahydro kyseliny abietové s různými izomery [129–131].

V Tabulce 12 jsou uvedené body varu a tlak páry jednotlivých sloučenin, které je vhodné dát do korelace s výsledky analýzy TGA. První velký hmotnostní úbytek byl zaznamenán okolo 150 °C, kde se rychle odpařily látky jako ethyl imidazol a tributylamin. Další výrazný pokles hmotnosti byl při teplotě v rozmezí 250 °C – 300 °C. Ten byl způsoben odpařením glykolových etherů a butylovaného hydroxytoluenu. Na konci pájecího procesu dochází vlivem přítomnosti derivátů, které odpovídají adietanovým diterpenoidům, k nepravidelnému, oscilujícímu průběhu TGA. Rezidua jsou tvořena převážně kalafunovými složkami. Bylo by možné tvrdit, že v případě použití nekonečně pomalého ohřevu bychom byli schopni zajistit úplný rozklad a odpaření složek tavidla při dané teplotě. Vlivem delšího času by také měly všechny přítomné plyny dostatek času uniknout z pájeného spoje. Z těchto závěrů plyne, že pomalé ohřívání a delší setrvání na maximální (vrcholové) teplotě by mělo vést k zabránění nadměrnému vzniku voidů v pájených spojích.

2.4.2. Vliv použití tavidla s různými chemickými vlastnostmi

Pokud porovnáme výsledky v Grafu 10, tak nejmenší plochu voidů v pájeném spoji vykazovala Pasta A. Oproti tomu Pasta C měla voidovitost nejvyšší. Z výsledků GC-MS uvedených v Tabulce 12 je patrné, že tavidlo Pasty C jako jediné obsahovalo látku butylovaný hydroxytoluen. V případě porovnání TGA křivek Tavidlo C vykazuje vyšší množství reziduí při dosažení vrcholové teploty ve srovnání s ostatními tavidly v pájecích pastách. Tato fakta mohou mít přímou souvislost s vyšším výskytem voidů v pájeném spoji.

Tavidlo v Pastě A oproti ostatním testovaným naproti tomu obsahovalo menší zastoupení různých chemických látek. V jejím složení převažoval tripropylen glykol butyl ether, který je specifický vyšší teplotou odpařování oproti ostatním složkám. V tavidle Pasty A nebyl oproti ostatním tavidlům, nalezen diethylen glykol dibutyl ether.

Využití nižšího teplotního gradientu poskytuje dostatek času pro odpaření složek s nižším bodem varu, což vysvětluje nižší tvorbu voidů. Maximální teplota použitá v procesu přetavení pájecí pasty ovšem nepřesahuje bod varu kalafuny a glykol etherů. V průběhu přetavení se blíží bodu varu látka diethylen glykol dibutyl ether a průběžně se odpařuje vysokou rychlostí, což vede především ke tvorbě makrovoidů. Oproti tomu tripropylen glykol butyl ether a abietanové diterpenoidy mají teplotu varu výrazně vyšší, než byla nastavená vrcholová teplota v tomto experimentu, což vedlo k menší rychlosti odpařování těchto látek. To má za následek

vznik spíše menších dutin ve spojích (mikrovoidů). To se děje převážně u sady vzorků, kde byl použit nižší teplotní gradient při procesu pájení. Tento jev je možné pozorovat na Grafu 12 u Pasty A a Pasty E, kde bylo obsaženo největší množství tripropylen glykol butyl etheru. Plocha mikrovoidů se u těchto pájecích past snižovala s použitím vyššího teplotního gradientu.

V testovaných vzorcích se složením výrazně odlišovala Pasta E, která jako jediná obsahovala tavidlo rozpustné ve vodě (označeno WS). Ostatní tavidla byla typu „no-clean“, tedy bezoplachová. Z hlediska úrovně výskytu voidů v pájeném spoji bylo chování Pasty E srovnatelné s Pastou B. Samotné složení tavidla Pasty E se podle GC-MS analýzy výrazně odlišovalo od ostatních testovaných tavidel. Protože se nejednalo o tavidlo na bázi kalafuny, nebyly zde nalezeny žádné abietanové diterpenoidy. Místo toho tavidlo obsahovalo acetaldehyd. Nejvíce vyskytující se složka tohoto tavidla byla tripropylen glykol butyl ether a obecně bylo jeho množství v Tavidle E nejvyšší ze všech testovaných tavidel. Výsledky TGA analýzy ukázaly u tohoto tavidla nejmenší výskyt reziduí při teplotě 240 °C. Vzhledem k odlišnosti typu tohoto tavidla bylo jeho složení a báze zcela odlišné od ostatních testovaných vzorků. To pravděpodobně vedlo ke změně rovnováhy povrchového napětí mezi roztaveným kovem a tavidlem při procesu přetavení.

Naměřená data pro pájecí pasty byla statisticky testována. V tomto případě Studentův T-test ukázal, že statisticky významný nebyl pouze rozdíl mezi daty naměřenými u Pasty A a Pasty B, kde $p = 0,055$.

2.4.3. Vliv teplotních gradientů na tvorbu voidů

U všech testovaných pájecích past se projevil konzistentní vliv použitého teplotního gradientu na plochu voidů v pájeném spoji. V případě použití menšího teplotního gradientu se výskyt voidů výrazně snižoval oproti větším teplotním gradientům. Tento jev lze pozorovat v Grafu 10 a nejvýrazněji se projevil u Pasty C. Nejmenší testovaný teplotní gradient 0,7 °C/s zde vedl ke 40% snížení (relativní hodnota) výskytu dutin ve srovnání s největším, tedy 3,0 °C/s. U menších teplotních gradientů dochází k rovnoměrnějšímu zahřívání DPS, což je důsledek delší teplotní expozice. Plynné složky vznikající ohříváním pájecí pasty, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, mají pak větší šanci uniknout z pájeného spoje. Tato tvrzení také podporují výsledky TGA v Grafu 9, které potvrzují, že při teplotě 240 °C zůstává z tavidla ve spoji více reziduí při použití vyššího teplotního gradientu při procesu ohřevu.

Vliv parametrů teplotního profilu na tvorbu voidů v pájeném spoji testovali a potvrdili také Sweatman [106] a Mallik [132]. V obou případech se ovšem studie nezabývaly změnou

teplotního gradientu u teplotního profilu typu RTS. Mallik [132] se zabýval změnou parametrů teplotního profilu typu RSS, kde explicitně měnil časové intervaly ve čtyřech zónách ohřevu, ale neměnil nastavení jejich teplot. Sweatman [106] testoval dva typy teplotních profilů. První z nich měl krátký TAL (angl. Time Above Liquidus) a nízkou vrcholovou teplotu a druhý měl dlouhý TAL a vysokou vrcholovou teplotu.

Opět bylo provedeno statistické testování pomocí Studentova T-testu u dat všech testovaných teplotních gradientů a ve všech případech byl rozdíl statisticky signifikantní.

2.4.4. Výskyt makrovoidů v pájeném spoji

Výskyt makrovoidů ve spojích, tedy dutin s průměrem větším než 100 μm , je vyobrazen v Grafu 11. Z porovnání výsledků v Grafu 10 a v Grafu 11 je patrné, že vztah mezi plochou voidů ve spoji a použitým teplotním gradientem je v korelaci, jak pro celkovou plochu voidů, tak pro makrovoidy. Téměř žádný vliv pak nemá na mikrovoidy, jejichž výskyt je zobrazen v Grafu 12. Z toho plyne, že změna teplotního gradientu primárně ovlivňuje plochu makrovoidů v pájených spojích.

Z pohledu použití pájecích past s různým chemickým složením tavidla se výskyt makrovoidů liší od celkových výsledků voidů. Pokud bychom porovnávali výsledky pouze pro makrovoidy, tak by nejmenší výskyt dutin vykazovala Pasta A a největší výskyt Pasta B. Z toho plyne, že chemické složení tavidla hraje významnou roli při formování dutin z pohledu jejich velikosti. To lze vysvětlit rozdílným povrchovým napětím složek v tavidle v okamžiku jejich odpařování. Uvedené zjištění se shoduje s výsledky Buškovy studie [113], kde došlo po míchání pájecích past s dalšími tavidly, které měly různé chemické složení ke změně výskytu a poměru makrovoidů v pájených spojích. Z výsledků analýzy GC-MS a vyhodnocení výskytu voidů lze také usuzovat, že chemická látka butylovaný hydroxytoluen má vliv na výskyt mikrovoidů. Ten je obsažený pouze v Pastě C a v Grafu 12 je vidět dosažení vyšších výsledků výskytu mikrovoidů oproti ostatním pájecím pastám. To znamená, že tato látka může způsobovat vznik dutin s menším průměrem. Jejich počet se ovšem zvyšuje.

2.5. Závěry experimentu

Hlavním cílem tohoto experimentu bylo omezit vznik voidů v pájených spojích vhodným nastavením teplotního profilu při procesu pájení ve spojení s chemickou analýzou tavidel pájecích past s různým složením. Kombinace chemické analýzy pomocí GC-MS a termogravimetrické analýzy nám poskytla profil odpařování pro každou testovanou pájecí

pastu. K posouzení chování organických sloučenin během procesu pájení z hlediska výskytu voidů byla tedy použita jedinečná kombinace analytických technik.

Výsledky analýzy voidů z rentgenových snímků ukazují, že celková plocha voidů je značně ovlivněna teplotním gradientem ve fázi ohřevu u teplotního profilu RTS. Z hlediska tohoto faktoru nezáleží na složení pájecí pasty. Čím je rychlost ohřevu nižší (a tím delší doba pájení), tím více dochází k redukci voidů ve spoji. Výsledky plochy voidů také významně korelovaly s výsledky TGA. S rostoucí hmotností reziduí tavidla ve spoji při dosažení vrcholové teploty se zvyšuje i plocha dutin v pájených spojích. Z toho plyne, že pokud tavidlo zůstává uvnitř pájeného spoje, zapříčiňuje to zvýšený výskyt voidů.

Z hlediska hodnocení chemické analýzy byl největší výskyt voidů zjištěn u Pasty C, která obsahovala butylovaný hydroxytoluen. Tato látka slouží primárně jako antioxidant. U Pasty C byl také zjištěn mnohem větší výskyt mikrovoidů (dutiny s průměrem menším než 100 μm), než u ostatních testovaných past. Obsah různých chemických složek tavidla vede vlivem různých reakcí při procesu pájení ke vzniku různých velikostí a tvarů voidů ve spojích. Na druhou stranu nebyl zjištěn žádný významný rozdíl ve výskytu dutin při použití tavidla typu „no-clean“, tedy bezoplachového a tavidla rozpustného ve vodě (WC), přestože je jejich chemické složení diametrálně odlišné.

Výsledky tohoto experimentu přispívají k obecným poznatkům o chování tavidla při pájení. Tento experiment dává do souvislosti tvorbu voidů s chemickým složením tavidla a zabývá se návrhem úpravy teplotního profilu v případě vysokého výskytu voidů v pájených spojích. Proto může sloužit jako dobrý výchozí bod při řešení tohoto problému v průmyslové praxi.

Závěr

Voidy v pájených spojích jsou jednou ze zásadních chyb vznikajících při procesu pájení. Výrazně ovlivňují kvalitu a spolehlivost pájeného spoje, proto je jejich eliminace zcela zásadní pro vytvoření stabilního funkčního celku v elektronických zařízeních. K omezení výskytu voidů je publikováno několik vědeckých prací a obecně se jedná o velmi aktuální téma. Tyto publikace jsou ovšem obvykle zaměřeny na náročnější změny v procesu. Proto bylo mým cílem zabývat se metodami snadněji implementovatelnými do standardního průmyslového prostředí. Tyto metody jsou vhodně doplněny speciálními analýzami.

Teoretická část této disertační práce se od obecných témat problematiky pájení postupně věnovala chybám v procesu pájení přetavením. Je zde zmíněna základní teorie pájení, používané materiály pro pájení, jako jsou substráty, tavidla, pájecí slitiny a jiné. Dále jsou zde popsány metody pájení se zaměřením na metody určené pro povrchovou montáž. Poslední kapitola se věnuje chybám v pájení, jako je například vznik whiskerů nebo dendritů s konkrétním detailním zaměřením na voidy. Komplexně je pak tato část práce přehledem a přípravou pro následnou experimentální část.

Experimentální část práce je rozdělena do dvou experimentů, ve kterých byly zkoumány faktory ovlivňující vznik voidů v pájených spojích. První experiment byl zaměřený na modifikaci tvaru otvorů v šabloně, které slouží k nanášení pájecí pasty, modifikaci okolí pájecích plošek pomocí nepájivé masky a použití tavidla s různou aktivitou. Z výsledků plyne, že tvar otvorů v šabloně má na vznik voidů významný vliv, kde při použití modifikované šablony s menšími otvory (při zachování stejného objemu nanášené pájecí pasty) došlo ke snížení voidovitosti. To je způsobeno vytvořením odplyňovacích kanálků, díky kterým mohou plynné látky opustit pájený spoj, přičemž nedochází k zachycení plynů ve formě voidů v pájeném spoji. Dalším zkoumaným faktorem bylo zkoumání vlivu okolí pájecích plošek. Konkrétně jsme se zabývali drsností použité nepájivé masky. Zde z experimentu vychází, že při využití povrchu (nepájivé masky) s větší drsností dojde k lepšímu odchodu tavidla z pájeného spoje (v případě použití šablony s otvory shodným tvarem a velikostí pájecích plošek), což vede ke snížení výskytu voidů. Posledním zkoumaným faktorem byla aktivita použitého tavidla. Zde z výsledků plyne, že použití aktivnějšího tavidla způsobí lepší odstranění oxidů, což má za následek zmenšení plochy voidovitosti.

Ve druhém experimentu bylo zkoumáno vhodné nastavení teplotního profilu (konkrétně teplotní gradient ohřevu), výskyt reziduí tavidel na pájecích ploškách a také vliv jejich chemického složení. Výsledky ukazují, že použitím nižšího teplotního gradientu ohřevu lze dosáhnout výrazného snížení voidovitosti nezávisle na ostatních zkoumaných faktorech. Při delším čase ohřevu mají plynné látky více času opustit pájený spoj. TGA analýza ukazuje, že množství tavidlových zbytků také souvisí s výskytem voidů. S jejich vyšším hmotnostním zbytkem výrazně roste výskyt voidů. Chemickou analýzou tavidel bylo zjištěno, že některé chemické látky mají na výskyt dutin významný vliv, proto je vhodné zvážit jejich začlenění při výrobě tavidel. Bylo prokázáno, že určité látky podporují spíše vznik makrovoidů, jiné zase mají vliv na tvorbu mikrovoidů.

V obou experimentech byl zkoumán výskyt mikrovoidů a makrovoidů. Bylo zde prokázáno, že až na vliv chemického složení tavidel měly testované faktory převážně vliv na výskyt makrovoidů. To je pochopitelné, protože se obvykle jednalo o změnu v procesu, který má na makrovoidy největší vliv. Proto se makrovoidům někdy také říká „procesní voidy“.

Výsledky této disertační práce vedou k lepšímu poznání a pochopení vzniku voidů v pájených spojích a metodám, jak je eliminovat. Ačkoli existuje několik dalších technik pro redukci voidů, jako je pájení ve vakuu nebo v dusíkové atmosféře, většina výrobců používá konvenční přetavovací pece, které tyto techniky nepodporují. Proto je možné výsledky této práce využít jako výchozí bod pro řešení problémů s voidy v průmyslové praxi. Veškeré cíle této disertační práce byly dle zadání splněny.

Seznam publikací disertanta

Publikace vztahující se k tématu disertační práce

Publikace v impaktovaných časopisech

- KOZÁK, M., P. VESELÝ a K. DUŠEK. Analysis of solder mask roughness and stencil shape influence on void formation in solder joints. *Welding in the World*. 2023, 67(5), 1347-1355. ISSN 0043-2288. DOI 10.1007/s40194-023-01505-7.dd.
 - Podíly: Shodné pro všechny autory (33,33 %)
 - Bibliometrické údaje časopisu: JCR 2022 - IF 2,10, Q2

Publikace – ostatní

- Kozák, M.; Veselý, P. Study of Voids Inside Solder Joints Based on SAC305 Solder Paste with Different Properties. In: 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology, Demanovska Valley, 2020-05-14/2020-05-15. New York: IEEE Press, 2020. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-6773-2. DOI 10.1109/ISSE49702.2020.9120951.dd.

Publikace nevztahující se k tématu disertační práce

Publikace – ostatní

- Hruška, M.; Damec, V.; Kozák, M. Benefits of Using the New 1200V Si IGBT and SiC MOSFET Modules for E-Bus Application. In: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. PCIM Europe, Nuremberg, 2022-05-10/2022-05-12. Berlin: VDE Verlag, 2022. s. 1962-1967. ISSN 2191-3358. ISBN 978-3-8007-5822-7. DOI 10.30420/565822271.dd.
- Dušek, K.; Veselý, P.; Froš, D.; Kozák, M.; Sorokina, K.; Plachý, Z.; Bušek, D.; Dusek, J. et al. A Weakness of Wetting Balance Method during the Diagnostic of Connector Pins with Wetting Issue. In: 2022 45th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 45th International Spring Seminar on Electronics Technology, Vienna, 2022-05-11/2022-05-15. New York: IEEE Press, 2022. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-6654-6589-2. DOI 10.1109/ISSE54558.2022.9812772.dd.

- Kozák, M.; Dušek, K. Influence of Stress Factors on the Whiskers Growth on Sn-Cu Based Surfaces. In: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology, Bautzen, 2021-05-05/2021-05-09. New York: IEEE Press, 2021. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2528. ISBN 978-1-6654-1477-7. DOI 10.1109/ISSE51996.2021.9467629.
- Dušek, K.; Veselý, P.; Kozák, M.; Bušek, D.; Froš, D.; Sorokina, K.; Dušek, J.; Durst, P. Workplace for Demonstration of Electrochemical Migration Effect on Printed Circuit Boards. In: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology, Bautzen, 2021-05-05/2021-05-09. New York: IEEE Press, 2021. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2528. ISBN 978-1-6654-1477-7. DOI 10.1109/ISSE51996.2021.9467605.
- Veselý, P.; Kozák, M. Accelerated Aging of Bismuth-Tin Solder Joints on Various Substrates. In: 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology, Demanovska Valley, 2020-05-14/2020-05-15. New York: IEEE Press, 2020. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-6773-2. DOI 10.1109/ISSE49702.2020.9120870.dd.
- Podrapský, J.; Kozák, M. Virtual Commissioning / Digital Twin. In: XXXVI. Celostátní konference o elektrických pohonech. Plzeň, 2019-06-11/2019-06-12. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2019. s. 1-14. ISBN 978-80-02-02860-4.dd
- Dušek, K.; Bušek, D.; Petráč, A.; Plaček, M.; Kozák, M.; Molhanec, M.; Beshajová Pelikánová, I. Comparison of mechanical resistance of SnCu and SnBi of solder joints. In: 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). 40th International Spring Seminar on Electronics Technology, Sofia, 2017-05-10/2017-05-14. New York: IEEE, 2017. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-5386-0582-0. DOI 10.1109/ISSE.2017.8000924.dd.

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Rozdělení pájecích past dle IPC J-STD-005A [9].	23
Tabulka 2 – Vybrané eutektické slitiny a porovnání s olovnatou pájkou [1].	26
Tabulka 3 – Teploty tání a tuhnutí standardně používaných pájecích slitin SAC a porovnání s olovnatou pájecí slitinou [13].	27
Tabulka 4 – Klasifikace tavidel podle normy IPC-J-STD-004C [23].	31
Tabulka 5 – Klasifikace tavidel podle normy ISO 9454-1:2016 [25].	32
Tabulka 6 – Klasifikace tavidel podle normy MIL-F-14256F [26].	32
Tabulka 7 – Porovnání vlastností povrchových úprav [1,22,27].	39
Tabulka 8 – Parametry použitých pájecích past v Experimentu 1.	67
Tabulka 9 – Parametry drsnosti povrchu u DPS bez nepájivé masky a s nepájivými maskami v Experimentu 1.	70
Tabulka 10 – Známé parametry použitých pájecích past v Experimentu 2.	79
Tabulka 11 – Parametry použitých teplotních profilů v Experimentu 2.	81
Tabulka 12 – Identifikace hlavních složek pomocí GC-MS, jejich fyzikální vlastnosti a semikvantitativní chromatografické plochy píků v Experimentu 2.	85

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Pájený spoj s vyznačenou intermetalickou vrstvou.	18
Obrázek 2 – Stav rovnováhy povrchových napětí.	21
Obrázek 3 – Deska plošných spojů.	33
Obrázek 4 – Varianty provedení nepájkivé masky: a) Non Solder Mask Defined Pad, b) Solder Mask Defined Pad [32].	35
Obrázek 5 – Porovnání THT (a) a SMT (b) technologie [40].	40
Obrázek 6 – Rozdíl ve tvaru teplotních profilů RSS a RTS [52].	46
Obrázek 7 – Ishikawa diagram pro kvalitu pájeného spoje [1].	50
Obrázek 8 – Efekt náhrobního kamene [70].	51
Obrázek 9 – Black pad efekt [74].	52
Obrázek 10 – Vznik můstku na integrovaném obvodu [77].	52
Obrázek 11 – Ukázka a princip vzniku popcorn efektu [82].	53
Obrázek 12 – Cínový whisker [95].	54
Obrázek 13 – Dendrit [96].	55
Obrázek 14 – Ishikawa diagram pro vznik voidů v pájených spojích [106].	56
Obrázek 15 – Umístění a kategorie voidů v pájeném spoji.	57
Obrázek 16 – Proces vzniku mikrovoidů pomocí teorie Měděných jeskyní [107].	58
Obrázek 17 – Výskyt mikrovoidů v pájeném spoji [100].	58
Obrázek 18 – Makrovoidy v pájeném spoji.	59
Obrázek 19 – Princip vzniku makrovoidů [113].	59
Obrázek 20 – Shrinkage voidy [121].	62
Obrázek 21 – Micro-via void [100].	63
Obrázek 22 – Kirkendallový voidy [125].	64

Obrázek 23 – Pinhole void [100].	64
Obrázek 24 – Design testovacích DPS v Experimentu 1 a 2.	66
Obrázek 25 – Demontrace použitých nepájivých masek na DPS v Experimentu 1.	66
Obrázek 26 – Motiv použitých šablon pro nános pájecích past v Experimentu 1.	68
Obrázek 27 – a) Snímek z rentgenu a analýza voidů v programu NIS Elements v Experimentu 1., b) Snímek z konfokálního mikroskopu a analýza oblasti šíření tavidla v programu NIS Elements v Experimentu 1.	69
Obrázek 28 – Demontrace nanesení stejného objemu pájecí pasty na pájecí plošky pomocí použitých šablon ($V1 = V2 = V3$), přičemž viditelná plocha (šedá) se liší $S1 > S2 > S3$	73
Obrázek 29 – Princip měření reliéfu pájeného spoje v Experimentu 1.	73
Obrázek 30 – Osazená DPS rezistory v Experimentu 2.	80
Obrázek 31 – Rentgenový snímek a analýza voidů v programu NIS Elements v Experimentu 2.	82

Seznam grafů

Graf 1 – Teplotní profil použitý v Experimentu 1.	68
Graf 2 – Plocha šíření tavidla okolo pájecích plošek v Experimentu 1.	70
Graf 3 – Procentuální zastoupení plochy voidů v pájeném spoji v Experimentu 1.	71
Graf 4 – Procentuální zastoupení plochy makrovoidů v pájeném spoji v Experimentu 1.	71
Graf 5 – Procentuální zastoupení plochy mikrovoidů v pájeném spoji v Experimentu 1.	72
Graf 6 – Naměřené rozměrové profily pájeného spoje při použití Šablony 1 a Šablony 3 v Experimentu 1.	74
Graf 7 – Teplotní profily použité pro přetavení pájecí pasty s rozdílně nastavenými teplotními gradienty použité v Experimentu 2.	81
Graf 8 – Termogravimetrická analýza tavidel při teplotních gradientech 10 a 42 °C/min v Experimentu 2.	83
Graf 9 – Rezidua (hmotnostní zbytek) tavidel při 240 °C změřené pomocí TGA v Experimentu 2.	84
Graf 10 – Procentuální zastoupení plochy voidů v pájeném spoji v Experimentu 2.	85
Graf 11 – Procentuální zastoupení plochy makrovoidů v pájeném spoji v Experimentu 2.	86
Graf 12 – Procentuální zastoupení plochy mikrovoidů v pájeném spoji v Experimentu 2.	86

Seznam zkratk

DPS – deska plošných spojů

ENEPIG –povrchová úprava desky plošných spojů založená na niklu, paladiu a zlatě

ENIG –povrchová úprava desky plošných spojů založená na niklu a zlatě

FR2 – papírový laminát pro výrobu desek plošných spojů

FR4 – sklotextitový laminát pro výrobu desek plošných spojů

GC-MS – plynová chromatografie s hmotnostním spektrometrem

HASL – povrchová úprava desky plošných spojů ponorem do cínové lázně

ImAg – povrchová úprava imerzní stříbro

IMC – intermetalické sloučeniny

ImSn – povrchová úprava imerzní cín

OSP – organická povrchová úprava desky plošných spojů

RSS – typ teplotního profilu ramp-soak-spike

RTG – rentgen

RTS – typ teplotního profilu ramp-to-spike

SAC – pájecí slitina založená na cínu, stříbru a mědi

SMD – součástka v pouzdru pro povrchovou montáž

SMT – technologie povrchové montáže

TAL – čas slitiny v roztaveném stavu během procesu pájení

TGA – termogravimetrická analýza

THD – součástka v pouzdru pro skrzděrovou montáž

THT – technologie montáže skrz díru

VOC – těkavé organické látky

Reference

- [1] A. Pietrikova, J. Dursin, P. Mach, Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, 1. vydanie, Košice, 2010.
- [2] M. Abel, V. Cimburek, Bezolovnaté pájené v legislativě i praxi, 1. vydání, ABE.TEC, s.r.o., Pardubice, 2005.
- [3] G. Humpston, D.M. Jacobson, Principles of Soldering, ASM International, 2004.
- [4] A.I. Timofeev, To the theory of wetting, Russ. J. Inorg. Chem. 58 (2013) 813–816. <https://doi.org/10.1134/S0036023613070231>.
- [5] R.N. Wenzel, Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water, Ind. Eng. Chem. 28 (1936) 988–994. <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>.
- [6] G. Whyman, E. Bormashenko, T. Stein, The rigorous derivation of Young, Cassie–Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon, Chemical Physics Letters. 450 (2008) 355–359. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2007.11.033>.
- [7] K.J. Kubiak, M.C.T. Wilson, T.G. Mathia, Ph. Carval, Wettability versus roughness of engineering surfaces, Wear. 271 (2011) 523–528. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.029>.
- [8] E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman, Roughness parameters, Journal of Materials Processing Technology. 123 (2002) 133–145. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00060-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00060-2).
- [9] IPC J-STD-005A, Requirements for Soldering Pastes, Association Connecting Electronics Industries, 2012.
- [10] Solder Paste: Type 3 vs. Type 4 vs. Type 5, (n.d.). <https://fct solder.com/solder-paste-type-3-vs-type-4-vs-type-5/> (accessed July 1, 2023).
- [11] Solder Paste Types and Powder Sizes for SMT and Dispensing, (n.d.). <https://blog.gotopac.com/2020/03/13/solder-paste-types-powder-sizes-for-smt-dispensing/> (accessed July 1, 2023).
- [12] D. Khramtsov, Types of solder pastes. Why do we need different sizes of balls? Which flux to choose in the paste?, (n.d.). <https://www.linkedin.com/pulse/types-solder-pastes-why-do-we-need-different-sizes-balls-khramtsov/> (accessed July 9, 2023).
- [13] T.-K. Lee, T.R. Bieler, C.-U. Kim, H. Ma, Fundamentals of Lead-Free Solder Interconnect Technology: From Microstructures to Reliability, Springer US, Boston, MA, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9266-5>.
- [14] K.J. Puttlitz, K.A. Stalter, Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies, CRC Press, 2004.
- [15] S. Cheng, C.-M. Huang, M. Pecht, A review of lead-free solders for electronics applications, Microelectronics Reliability. 75 (2017) 77–95. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.06.016>.
- [16] Y. Fukuda, S. Ganesan, Lead-free Alloys: Overview, in: S. Ganesan, M. Pecht (Eds.), Lead-Free Electronics, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2006: pp. 81–100. <https://doi.org/10.1002/047000780X.ch3>.
- [17] M. McCormack, H.S. Chen, G.W. Kammlott, S. Jin, Significantly Improved Mechanical Properties of Bi–Sn Solder Alloys by Ag–Doping, Journal of Elec Materi. 26 (1997) 954–958. <https://doi.org/10.1007/s11664-997-0281-7>.
- [18] J.-C. Liu, G. Zhang, Z.-H. Wang, J.-S. Ma, K. Suganuma, Thermal property, wettability and interfacial characterization of novel Sn–Zn–Bi–In alloys as low-temperature lead-free solders, Materials & Design. 84 (2015) 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.148>.

- [19] B. Bauer, R. Lathrop, An Introduction to Solder Materials, SMT. (1998). <https://smtnet.com/library/files/upload/Introduction-Solder-Materials.pdf>.
- [20] Solder Paste Flux, FCT Solder. (n.d.). <https://fct solder.com/solder-paste-flux/> (accessed July 9, 2023).
- [21] R. Strauss, R. Strauss, SMT soldering handbook, 2nd ed, Newnes, Oxford ; Boston, 1998.
- [22] C.F. Coombs, ed., Printed Circuits Handbook, 6th ed, McGraw-Hill, New York, 2008.
- [23] IPC-J-STD-004C, Requirements for Soldering Fluxes, Association Connecting Electronics Industries, 2022.
- [24] ČSN EN 61190-1-1 (359320), Připojovací materiály pro elektronickou montáž - Část 1-1: Požadavky na pájecí tavidla pro vysoce kvalitní propojování v elektronické montáži, 2003.
- [25] ISO 9454-1:2016, Soft soldering fluxes — Classification and requirements — Part 1: Classification, labelling and packaging, 2016.
- [26] MIL-F-14256F, FLUX, SOLDERING, LIQUID, PASTE FLUX, SOLDER PASTE AND SOLDER-PASTE FLUX, (FOR ELECTRONIC/ELECTRICAL USE), 1993.
- [27] J. Starý, P. Kahle, Plošné spoje a povrchová montáž, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2011.
- [28] P. Mach, V. Skočil, J. Urbánek, Montáž v elektronice, Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje, ČVUT, 2001.
- [29] G. Brist, G. Long, Advanced Print Circuit Board Materials, in: D. Lu, C.P. Wong (Eds.), Materials for Advanced Packaging, Springer US, Boston, MA, 2009: pp. 273–306. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78219-5_8.
- [30] B. Sood, M. Pecht, Printed Circuit Board Laminates, in: Wiley Encyclopedia of Composites, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2011: p. weoc197. <https://doi.org/10.1002/9781118097298.weoc197>.
- [31] X. He, M.H. Azarian, M.G. Pecht, Effects of Solder Mask on Electrochemical Migration of Tin-Lead and Lead-Free Boards, (n.d.).
- [32] C. Stubbles, Design Guidelines for Cypress Ball Grid Array (BGA) Packaged Devices, Document No. 001-79938 Rev. *E. (2017). [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN79938_Design_Guidelines_for_Infineon_Ball_Grid_Array_\(BGA\)_Packaged_Devices-ApplicationNotes-v06_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7cdc391c017d0724631748a5](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AN79938_Design_Guidelines_for_Infineon_Ball_Grid_Array_(BGA)_Packaged_Devices-ApplicationNotes-v06_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7cdc391c017d0724631748a5).
- [33] P. Johnston, Printed Circuit Board Design Guidelines for Ball Grid Array Packages, Soldering & Surface Mount Technology. 9 (1996).
- [34] G. Milad, Surface finishes in a lead-free world, Circuit World. 34 (2008) 4–7. <https://doi.org/10.1108/03056120810918051>.
- [35] D. Chang, F. Bai, Y.P. Wang, C.S. Hsiao, The study of OSP as reliable surface finish of BGA substrate, in: Proceedings of 6th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2004) (IEEE Cat. No.04EX971), IEEE, Singapore, 2004: pp. 149–153. <https://doi.org/10.1109/EPTC.2004.1396594>.
- [36] M. Ratzker, A. Pearl, M. Osterman, M. Pecht, G. Milad, Review of Capabilities of the ENEPIG Surface Finish, Journal of Elec Materi. 43 (2014) 3885–3897. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3322-z>.
- [37] Yilin Zhou, Pan Yang, Chengming Yuan, Yujia Huo, Electrochemical migration failure of the copper trace on printed circuit board driven by immersion silver finish, Chemical Engineering Transactions. 33 (2013) 559–564. <https://doi.org/10.3303/CET1333094>.
- [38] P. Gupta, Effect of intermetallic compounds on thermomechanical reliability of lead-free solder interconnects for flip-chips, (n.d.). <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/cead9cca-0c9c-4897-953b-91c95c35454d/content>.

- [39] M. Sobolewski, J. Wojewoda-Budka, Z. Huber, P. Zieba, A. Wierzbicka-Miernik, Solder joints reliability of through hole assemblies with various land and hole design, *Microelectronics Reliability*. 125 (2021) 114368. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114368>.
- [40] M. Judd, K. Brindley, *Soldering in Electronics Assembly*, 2. vydání, Newnes, 199AD.
- [41] U. Pape, J. Schulz, Characteristics of Lead-Free Solders During Flow Soldering (Selective and Wave Soldering), in: 2006 1st Electronic Systemintegration Technology Conference, IEEE, Dresden, Germany, 2006: pp. 139–144. <https://doi.org/10.1109/ESTC.2006.279991>.
- [42] D.M. Tench, J.T. White, D. Hillman, G.K. Lucey, T. Gher, B. Piekarski, Fluxless Wave Soldering, *Circuit World*. 21 (1995) 44–45. <https://doi.org/10.1108/eb046303>.
- [43] J.M. Morris, R. Szymanowski, M.O. Camdenton, Effect of Contact Time on Lead-Free Wave Soldering, *Dataweek–Electronics and Communications Technology*. (2009).
- [44] R.T. Winslow, G.R. Iyer, M.M. Cruz, G.S. Selvaduray, Hot Solder Dip and Minimizing Thermal Gradients, *IMAPS International Symposium Proceedings*. (2006).
- [45] G. Diepstraten, Making Selective Soldering Work for You, *Circuits Assembly*. (2002).
- [46] M. Hirman, F. Steiner, Optimization of solder paste quantity considering the properties of solder joints, *SSMT*. 29 (2017) 15–22. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0025>.
- [47] O. Krammer, L. Jakab, B. Illes, D. Bušek, I. Beshajová Pelikánová, Investigating the attack angle of squeegees with different geometries, *SSMT*. 30 (2018) 112–117. <https://doi.org/10.1108/SSMT-09-2017-0023>.
- [48] C.-J. Lin, C.-H. Lin, Component Placement Process Optimization for Multi-head Surface Mounting Machine Using a Hybrid Algorithm, *Sensors and Materials*. 33 (2021) 3529. <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3579>.
- [49] R. De Souza, W. Lijun, Intelligent optimization of component onsertion in multi-head concurrent operation PCBA machines, *J Intell Manuf*. 6 (1995) 235–243. <https://doi.org/10.1007/BF00128647>.
- [50] T.-N. Tsai, Thermal parameters optimization of a reflow soldering profile in printed circuit board assembly: A comparative study, *Applied Soft Computing*. 12 (2012) 2601–2613. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.03.066>.
- [51] B. Salam, C. Virseda, H. Da, N.N. Ekere, R. Durairaj, Reflow profile study of the Sn-Ag-Cu solder, *Soldering & Surface Mount Technology*. 16 (2004) 27–34. <https://doi.org/10.1108/09540910410517022>.
- [52] S. Suppiah, N.R. Ong, Z. Sauli, K. Sarukunaselan, J.B. Alcain, S.M. Visvanathan, V. Retnasamy, A review on solder reflow and flux application for flip chip, in: Krabi, Thailand, 2017: p. 020264. <https://doi.org/10.1063/1.5002458>.
- [53] N. Lee, Optimizing the reflow profile via defect mechanism analysis, *Soldering & Surface Mount Technology*. 11 (1999) 13–20. <https://doi.org/10.1108/09540919910254642>.
- [54] N.-C. Lee, Surface Mount Assembly Processes, in: *Reflow Soldering Processes*, Elsevier, 2001: pp. 57–89. <https://doi.org/10.1016/B978-075067218-4/50004-X>.
- [55] The Sierra Circuit Team, What is Thermal Profiling in PCB Assembly, *Sierra Circuits*. (n.d.). <https://www.protoexpress.com/blog/thermal-profiling-pcb-assembly-unsung-hero/> (accessed July 15, 2023).
- [56] N.T. Jaya, S.R.A. Idris, M. Ishak, A Review on Mechanical Properties of SnAgCu/Cu Joint Using Laser Soldering, in: M. Awang (Ed.), *The Advances in Joining Technology*, Springer Singapore, Singapore, 2019: pp. 97–107. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9041-7_8.
- [57] R. Diehm, M. Nowottnick, U. Pape, Reduction of Voids in Solder Joints an Alternative to Vacuum Soldering, *Proceedings of the IPC APEX EXPO*. 2012 (n.d.) 8.

- [58] L. Weicheng, The Void-free Reflow Soldering of BGA with Vacuum, 8th Int. Conf. Electron. Packag. Technol. 2007. 2007 (n.d.) 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2007.4441462>.
- [59] A. Pietrikova, L. Livovsky, J. Urbancik, R. Bucko, Optimisation of Lead Free Solders Reflow Profile, in: 2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology, IEEE, St. Marienthal, Germany, 2006: pp. 459–464. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2006.365149>.
- [60] B. Illés, A. Géczy, B. Medgyes, G. Harsányi, Vapour phase soldering (VPS) technology: a review, SSMT. 31 (2019) 146–156. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2018-0042>.
- [61] C.L.S.C. Fonseka, J.A.K.S. Jayasinghe, Implementation of an Automatic Optical Inspection System for Solder Quality Classification of THT Solder Joints, IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol. 9 (2019) 353–366. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2018.2864666>.
- [62] Ş. Öztürk, B. Akdemir, Detection of PCB Soldering Defects using Template Based Image Processing Method, International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering. (2017).
- [63] J.H. Lau, N.-C. Lee, Assembly and Reliability of Lead-Free Solder Joints, Springer Singapore, Singapore, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-3920-6>.
- [64] V. Venkatadri, L. Yin, Y. Xing, E. Cotts, K. Srihari, P. Borgesen, Accelerating the effects of aging on the reliability of lead free solder joints in a quantitative fashion, in: 2009 59th Electronic Components and Technology Conference, IEEE, San Diego, CA, USA, 2009: pp. 398–405. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2009.5074045>.
- [65] A. Hobby, Zero-defect printing shifts blame for poor-quality soldering, (n.d.). <http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnetid=7525> (accessed July 7, 2023).
- [66] Solder Joint Formation Simulation and Component Tombstoning Prediction During Reflow, Journal of Electronic Packaging. (n.d.).
- [67] A. Takaki, R. Kato, T. Taguchi, R.H. Suzuki, Protection of tombstone problems for small chip devices, in: 1999 Proceedings. 49th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No.99CH36299), IEEE, San Diego, CA, USA, 1999: pp. 1036–1041. <https://doi.org/10.1109/ECTC.1999.776314>.
- [68] Ip Kee Huit, B. Ralph, A study of the initiation of the tombstoning effect on leadless chips, International Journal of Machine Tools and Manufacture. 35 (1995) 1251–1268. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(94\)00110-6](https://doi.org/10.1016/0890-6955(94)00110-6).
- [69] D. Bao, How Reduce Tombstoning of Small Chip Components, Metallic Resources, Inc. (n.d.). https://www.circuitnet.com/news/uploads/2/Tombstoning_Explained.pdf (accessed July 7, 2023).
- [70] K. Dusek, V. Straka, M. Brejcha, I. Beshajova Pelikanova, Influence of type of reflow technology and type of surface finish on tomb stone effect, in: Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, IEEE, Alba Iulia, Romania, 2013: pp. 132–135. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2013.6648229>.
- [71] K. Dušek, D. Bušek, M. Plaček, A. Géczy, O. Krammer, B. Illés, Influence of vapor phase soldering fluid Galden on wetting forces (tombstone effect), Journal of Materials Processing Technology. 251 (2018) 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.006>.
- [72] P. Snugovsky, P. Arrowsmith, M. Romansky, Electroless Ni/Immersion Au interconnects: Investigation of black pad in wire bonds and solder joints, Journal of Elec Materi. 30 (2001) 1262–1270. <https://doi.org/10.1007/s11664-001-0159-z>.
- [73] R. Ramanauskas, A. Selskis, J. Juodkazyte, V. Jasulaitiene, PCB failure analysis related to the ENIG black pad problem, Circuit World. 39 (2013) 124–132. <https://doi.org/10.1108/CW-05-2013-0013>.

- [74] K. Suganuma, K.-S. Kim, The root causes of the “Black pad” phenomenon and avoidance tactics, *JOM*. 60 (2008) 61–65. <https://doi.org/10.1007/s11837-008-0074-3>.
- [75] G. Milad, Is “black pad” still an issue for ENIG?, *Circuit World*. 36 (2010) 10–13. <https://doi.org/10.1108/03056121011015040>.
- [76] Řešení problémů s Cookson Electronics – Cínové můstky, (n.d.). <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:6930/reseni-problemu-s-cookson-electronics-cinove-mustky> (accessed July 7, 2023).
- [77] Solder bridges on SMD/HMD components, (n.d.). <https://solderdict.technolab.de/smd-hmd/solder-bridges.php> (accessed July 7, 2023).
- [78] I. Fukuzawa, S. Ishiguro, S. Nanbu, MOISTURE RESISTANCE DEGRADATION OF PLASTIC LSIs BY REFLOW SOLDERING, 23rd International Reliability Physics Symposium. (1985). <https://doi.org/10.1109/IRPS.1985.362097>.
- [79] P. Alpern, K.C. Lee, R. Dudek, R. Tilgner, A simple model for the mode I popcorn effect for IC packages, *Microelectronics Reliability*. 40 (2000) 1503–1508. [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(00\)00116-5](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(00)00116-5).
- [80] Y. Chen, P. Li, The “popcorn effect” of plastic encapsulated microelectronic devices and the typical cases study, in: 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, IEEE, Xi’an, China, 2011: pp. 482–485. <https://doi.org/10.1109/ICQR2MSE.2011.5976658>.
- [81] L. Yang, J.B. Bernstein, K. Chung, The impact of lead-free soldering on electronics packages, *Microelectronics International*. 18 (2001) 20–26. <https://doi.org/10.1108/13565360110405848>.
- [82] PCB Online team, What is Popcorn Effect in PCBA Process, (n.d.). <https://www.pcbonline.com/blog/what-is-popcorn-effect-in-pcb-assembly.html> (accessed April 14, 2021).
- [83] P. Zhang, Y. Zhang, Z. Sun, Spontaneous Growth of Metal Whiskers on Surfaces of Solids: A Review, *Journal of Materials Science & Technology*. 31 (2015) 675–698. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.04.001>.
- [84] E. Chason, N. Jadhav, F. Pei, E. Buchovecky, A. Bower, Growth of whiskers from Sn surfaces: Driving forces and growth mechanisms, *Progress in Surface Science*. 88 (2013) 103–131. <https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2013.02.002>.
- [85] D. Busek, J. Vavra, K. Dusek, Whisker growth and its dependence on substrate type and applied stress, in: 2016 39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), IEEE, Pilsen, Czech Republic, 2016: pp. 263–266. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2016.7563202>.
- [86] A.N. Hashim, M.A.A.M. Salleh, Spontaneous Tin (Sn) Whisker Growth from Electroplated Tin and Lead-Free Tin Alloys Coatings: A Short Review, *SSP*. 280 (2018) 151–156. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.280.151>.
- [87] B. Horváth, B. Illés, T. Shinohara, G. Harsányi, Whisker growth on annealed and recrystallized tin platings, *Thin Solid Films*. 520 (2012) 5733–5740. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.03.130>.
- [88] J. Smetana, Theory of Tin Whisker Growth: “The End Game”, *IEEE Trans. Electron. Packag. Manufact.* 30 (2007) 11–22. <https://doi.org/10.1109/TEPM.2006.890645>.
- [89] B. Illés, B. Horváth, A. Géczy, O. Krammer, K. Dušek, Corrosion-induced tin whisker growth in electronic devices: a review, *SSMT*. 29 (2017) 59–68. <https://doi.org/10.1108/SSMT-10-2016-0023>.
- [90] M. Kozak, K. Dusek, Influence of Stress Factors on the Whiskers Growth on Sn-Cu Based Surfaces, in: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), IEEE, Bautzen, Germany, 2021: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISSE51996.2021.9467629>.

- [91] W.J. Choi, T.Y. Lee, K.N. Tu, N. Tamura, R.S. Celestre, A.A. Macdowell, Y.Y. Bong, L. Nguyen, G.T.T. Sheng, Structure and kinetics of Sn whisker growth on Pb-free solder finish, in: 52nd Electronic Components and Technology Conference 2002. (Cat. No.02CH37345), IEEE, San Diego, CA, USA, 2002: pp. 628–633. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2002.1008161>.
- [92] G.T. Galyon, L. Palmer, An integrated theory of whisker formation: the physical metallurgy of whisker formation and the role of internal stresses, *IEEE Trans. Electron. Packag. Manufact.* 28 (2005) 17–30. <https://doi.org/10.1109/TEPM.2005.847443>.
- [93] C.L. Rodekohr, G.T. Flowers, J.C. Suhling, M.J. Bozack, Influence of Substrate Surface Roughness on Tin Whisker Growth, in: 2008 Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, IEEE, Orlando, Florida, 2008: pp. 245–248. <https://doi.org/10.1109/HOLM.2008.ECP.51>.
- [94] M. Takeuchi, K. Kamiyama, K. Sukanuma, Suppression of tin whisker formation on fine pitch connectors by surface roughening, *Journal of Elec Materi.* 35 (2006) 1918–1925. <https://doi.org/10.1007/s11664-006-0294-7>.
- [95] K. Dušek, D. Bušek, P. Veselý, Overview of Selected Issues Related to Soldering, in: S. Crisóstomo Absi Alfaro, W. Borek, B. Tomiczek (Eds.), *Welding - Modern Topics*, IntechOpen, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91023>.
- [96] X. Zhong, L. Chen, B. Medgyes, Z. Zhang, S. Gao, L. Jakab, Electrochemical migration of Sn and Sn solder alloys: a review, *RSC Adv.* 7 (2017) 28186–28206. <https://doi.org/10.1039/C7RA04368F>.
- [97] W.J. Ready, L.J. Turbini, The effect of flux chemistry, applied voltage, conductor spacing, and temperature on conductive anodic filament formation, *J. Electron. Mater.* 31 (2002) 1208–1224. <https://doi.org/10.1007/s11664-002-0012-z>.
- [98] B. Medgyes, B. Horváth, B. Illés, T. Shinohara, A. Tahara, G. Harsányi, O. Krammer, Microstructure and elemental composition of electrochemically formed dendrites on lead-free micro-alloyed low Ag solder alloys used in electronics, *Corrosion Science.* 92 (2015) 43–47. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.11.004>.
- [99] F. Steiner, M. Hirman, K. Rendl, V. Wirth, Optimization of Soldering Process to Reduce Contamination and Related Consequences, in: 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), IEEE, Zlatibor, 2018: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2018.8443691>.
- [100] R. Aspandiar, Voids in Solder Joints, SMTA Boise Expo and Tech Forum. (2018).
- [101] F. Steiner, V. Wirth, M. Hirman, Relationship of Soldering Profile, Voids Formation and Strength of Soldered Joints, in: 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), IEEE, Wroclaw, Poland, 2019: pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2019.8810303>.
- [102] N. Zhu, Thermal impact of solder voids in the electronic packaging of power devices, in: Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (Cat. No.99CH36306), IEEE, San Diego, CA, USA, 1999: pp. 22–29. <https://doi.org/10.1109/STHERM.1999.762424>.
- [103] M. Yunus, A. Primavera, K. Srihari, J.M. Pitarresi, Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints, in: Twenty Sixth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium (Cat. No.00CH37146), IEEE, Santa Clara, CA, USA, 2000: pp. 207–213. <https://doi.org/10.1109/IEMT.2000.910730>.
- [104] IPC-A-610H, Acceptability of Electronic Assemblies, Association Connecting Electronics Industries, 2020.
- [105] V. Rawinski, Void reduction in reflow soldering processes by sweep stimulation of PCB substrate, in: 2018 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All

- Asia Conference (ICEP-IAAC), IEEE, Mie, Japan, 2018: pp. 313–316. <https://doi.org/10.23919/ICEP.2018.8374312>.
- [106] K. Sweatman, T. Nishimura, K. Sugimoto, A. Kita, Controlling Voiding Mechanisms in the Reflow Soldering Process, Proceedings of IPC APEX Expo. (2016) 11.
- [107] Y.-H. Yau, K. Wengenroth, J. Abys, A Study of Planar Microvoiding in Pb-free Solder Joints, Cookson Electronics. (2007).
- [108] Y.W. Wang, Y.W. Lin, C.R. Kao, Inhibiting the formation of microvoids in Cu3Sn by additions of Cu to solders, Journal of Alloys and Compounds. 493 (2010) 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.12.062>.
- [109] D. Cullen, W. Paw, J. Swanson, L. Toscano, Eliminating Microvoid Risk via an Optimized Surface Finish Process, Proceedings of the CMAP International Conference on Lead-Free Soldering. (2006).
- [110] S.-P. Yu, C. Tao-Chih, C. Chiao-Yun, Optimal Reflow Profile for Lead-free Server Board and Failure Analysis of Solder Joint after Temperature Cyclic Test, TPCA Forum. (2005).
- [111] D.P. Cullen, Characterization, Reproduction, and Resolution of Solder Joint Microvoiding, IPC APEX/EXPO. (2005).
- [112] IPC-7095D, Design and Assembly Process Implementation for Ball Grid Arrays (BGAs), Association Connecting Electronics Industries, 2018.
- [113] D. Bušek, K. Dušek, D. Růžička, M. Plaček, P. Mach, J. Urbánek, J. Starý, Flux effect on void quantity and size in soldered joints, Microelectronics Reliability. 60 (2016) 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.03.009>.
- [114] O. Krammer, B. Gyarmati, A. Szilágyi, B. Illés, D. Bušek, K. Dušek, The effect of solder paste particle size on the thixotropic behaviour during stencil printing, Journal of Materials Processing Technology. 262 (2018) 571–576. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.027>.
- [115] N.N. Ekere, E.K. Lo, New challenges in solder-paste printing, Journal of Electronics Manufacturing. 01 (1991) 29–40. <https://doi.org/10.1142/S0960313191000059>.
- [116] M. Kozak, P. Vesely, K. Dusek, Analysis of solder mask roughness and stencil shape influence on void formation in solder joints, Weld World. 67 (2023) 1347–1355. <https://doi.org/10.1007/s40194-023-01505-7>.
- [117] A.M. Previti, M. Holtzer, T. Hunsinger, Four ways to reduce voids in BGA/CSP package to substrate connections, SMTA. (2010) 8.
- [118] M. Kozak, P. Vesely, Study of Voids Inside Solder Joints Based on SAC305 Solder Paste with Different Properties, in: 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), IEEE, Demanovska Valley, Slovakia, 2020: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISSE49702.2020.9120951>.
- [119] M. Kozák, Studie vlivu povrchových úprav pájecích plošek na vznik dutin v pájených spojích, Diplomová práce. (2018).
- [120] O. Mokhtari, A review: Formation of voids in solder joint during the transient liquid phase bonding process - Causes and solutions, Microelectronics Reliability. 98 (2019) 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.04.024>.
- [121] M. Ribas, S. Sarkar, C. Bilgrien, Effect of Voids on Thermo-Mechanical Reliability of Solder Joints, Proceedings of SMTA International. (2017).
- [122] F. Grano, F. Bruno, D. Korf, E. O’Keeffe, S. Jose, C. Kelley, Impact of microvia-in-pad design on void formation, Proceedings of Surface Mount International. (2003).
- [123] E. Stafstrom, A. Singer, J. McLenaghan, K. Nishu, G. Echeverria, Reducing Solder Voids with Copper-Filled Microvias, Circuit Assembly. (2003).

- [124] D. Kim, J. Chang, J. Park, J.J. Pak, Formation and behavior of Kirkendall voids within intermetallic layers of solder joints, *J Mater Sci: Mater Electron.* 22 (2011) 703–716. <https://doi.org/10.1007/s10854-011-0357-2>.
- [125] L. Yin, P. Borgesen, On the root cause of Kirkendall voiding in Cu₃Sn, *J. Mater. Res.* 26 (2011) 455–466. <https://doi.org/10.1557/jmr.2010.47>.
- [126] C.-C. Chen, C.-H. Hsieh, Y.-W. Lee, C.-H. Yang, C.-E. Ho, Formation mechanism of pinholes in electroplated Cu films and its mitigation, *Thin Solid Films.* 596 (2015) 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.07.063>.
- [127] P. Veselý, D. Bušek, O. Krammer, K. Dušek, Analysis of no-clean flux spatter during the soldering process, *Journal of Materials Processing Technology.* 275 (2020) 116289. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116289>.
- [128] P. Vesely, K. Dušek, D. Froš, Toward reducing no-clean flux spatter during reflow soldering: Investigating the effect of flux type, solder mask, and solder pad design, *Journal of Manufacturing Processes.* 2022 (n.d.) 696–706. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.07.027>.
- [129] S. Wakeel, A.S.M.A. Haseeb, M.A. Afifi, S. Bingol, K.L. Hoon, Constituents and performance of no-clean flux for electronic solder, *Microelectronics Reliability.* 123 (2021) 114177. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2021.114177>.
- [130] Y. Zhu, L. Wang, X. Wang, S. He, J. Huang, Preparation and performance evaluation of Sn-Bi solder paste, in: 2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), IEEE, Dalian, China, 2022: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEPT56209.2022.9873299>.
- [131] H. Jiang, K. Moon, C.P. Wong, Recent advances of nanolead-free solder material for low processing temperature interconnect applications, *Microelectronics Reliability.* 53 (2013) 1968–1978. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.04.005>.
- [132] S. Mallik, J. Njoku, G. Takyi, Quantitative Evaluation of Voids in Lead Free Solder Joints, *AMM.* 772 (2015) 284–289. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.772.284>.