

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra *elektrotechnologie*

# ***VLIV TAVIDLA NA KVALITU POVRCHOVÉ MONTÁŽE***

**Disertační práce**

***Ing. Petr Veselý***

*Praha, prosinec, 2021*

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika (P2612)

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

**Školitel:** *doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.*

**Školitel specialista:** *dr. Oliver Krammer, Ph.D.*



## Anotace

Tato dizertační práce se věnuje problematice tavidel. Tavidla obsažená v pájecích pastách totiž hrají neoddiskutovatelně podstatnou roli v procesu pájení přetavením. Mohou však být i příčinou snížení kvality povrchové montáže. Práce se skládá ze čtyř dílčích částí: části teoretické, která shrnuje aktuální stav poznání z hlediska obecných principů vzniku pájeného spoje, materiálů a procesů, dále rešeršní části, která se zabývá přehledem aktuálních problémů, které se vyskytují v procesu pájení přetavením, a dvou částí praktických, které se experimentálně věnují vlivu tavidel na kvalitu povrchové montáže.

V teoretické části byla provedena rešerše na aktuální stav poznání v oblasti vzniku pájeného spoje, růstu intermetalických sloučenin na rozhraní mezi pájkou a pájeným substrátem, používaných materiálů včetně pájek, tavidel i desek plošných spojů, procesu pájení přetavení a diagnostiky vlastností pájených spojů. Tato část uvádí čtenáře do dané problematiky, zároveň naznačuje možné nedostatky dostupné odborné literatury především z hlediska experimentálních studií, které ne vždy zohledňují tavidlo jako vstupní faktor. Rešeršní část se pak zabývá přehledem vad, které se vyskytují v procesu povrchové montáže. Zvláštní kapitola je věnována vadám, jejichž vznik je způsoben či spojován s tavidly.

V první praktické části je popsán problém související s tavidlem, jehož potřeba řešení vyvstala přímo z průmyslové praxe. Tavidlo se během procesu pájení stává aktivním a některé jeho složky se mohou náhle a masivně vypařovat, což vede k rozstříku tavidla do okolí pájecí plošky. Tento jev následně způsobuje chyby v povrchové montáži – tavidlové zbytky mohou podporovat korozní procesy a dále, díky jejich izolačnímu charakteru, mohou ohrozit například funkci konektorů vytvořených přímo motivem desky plošného spoje. Zbytky také mohou ulpět na testovacích ploškách a způsobit tak falešně negativní výsledek in-circuit testu. Cílem experimentů provedených v této části práce bylo definovat vliv procesních a materiálových parametrů na rozstřík tavidla a nalezení takových podmínek, při kterých je možné tento jev minimalizovat.

Dalším aspektem práce v druhé praktické části je hlubší pochopení vlivu tavidla a jeho aktivace během fáze předehřevu na tvorbu pájeného spoje, respektive intermetalických sloučenin na rozhraní pájka-pájený substrát. Tyto sloučeniny zásadním způsobem ovlivňují vlastnosti pájeného spoje. V experimentech byl teplotní profil pájecího procesu různě modifikován, a to jak v oblasti předehřevu, tak v oblasti přetavení. Dílčím úkolem tak bylo potvrdit či vyvrátit, zda je popis teplotního profilu pomocí hodnoty Heating Faktoru z hlediska vlivu na spolehlivost a stabilitu pájených spojů dostatečný. Pájené spoje byly podrobeny dlouhodobým klimatickým zkouškám – vlhkým teplem a teplotními šoky. Kromě růstu intermetalických sloučenin byly sledovány další vlastnosti – mechanická pevnost ve střihu a elektrický odpor, které byly dány v diskuzi do korelace s růstem intermetalických vrstev.

## Annotation

This dissertation thesis deals with the problematics of soldering fluxes. Fluxes contained in solder pastes play an indisputably important role in the reflow soldering process. However, they can also be the reason for the decrease in the quality of surface mounting. The thesis consisted of four parts: a theoretical part, which summarizes the actual state of knowledge from the point of basic principles of soldering, materials, and processes, further a research part that deals with actual issues occurring in the reflow process, and two practical parts, which deal with the influence of the flux on the quality of surface mounting experimentally.

In the theoretical part, research work was conducted on the actual state of knowledge in the field of solder joint creation, intermetallic compounds growth between solder and soldered substrate, used materials including solder, flux, or printed circuit boards, the process of reflow soldering, and diagnostics of solder joint properties. This part introduces the reader to the topic; concurrently, it implies possible drawbacks of available professional literature from the point of experimental studies, which do not always take the flux as an input factor into account. The research part brings a summary of issues occurring in the process of surface mount technology. A special chapter is devoted to the issues caused or connected to the solder flux.

In the first practical part, an issue related to flux, whose need for solution emerged directly from industry practice, is described. The flux became active during the soldering process, and some of its compounds can suddenly and massively vaporize, leading to flux spattering in the surrounding a soldering pad. This phenomenon subsequently causes issues in surface mounting – the flux residues could support corrosion processes and further, due to their insulating character, could threaten a function of connectors made directly on a printed circuit board. The residues may also adhere to testing pads and cause a false negative result of an in-circuit test. The experiment performed in this part of the work aimed to define the influence of the process and material parameters on the flux spattering and find conditions to reduce this phenomenon.

Another aspect of this work is to more deeply understand the influence of the flux and its activation during the pre-heating phase on the solder joint creation, respectively, intermetallic compounds at the border between solder and soldered substrate. These compounds significantly influence the properties of the solder joint. In the experiments conducted in the second practical part, the temperature profile of the soldering process was variously modified in both the pre-heat phase and the reflow phase. The partial goal was to confirm or refute whether the description of temperature profile by Heating Factor is sufficient for solder joint reliability prediction. The solder joints were exposed to long-term climatic tests – temperature-humidity and temperature shock tests. Besides the intermetallic layers growth, other properties of solder joints were

examined – mechanical shear strength and electrical resistance, which were correlated with the intermetallics growth in the discussion part.

## Klíčová slova

pájení přetavením, kvalita povrchové montáže, rozstřík tavidla, tavidlové zbytky, intermetalické sloučeniny, teplotní profil

## Keywords

reflow soldering, quality of surface mount technology, flux spattering, flux residues, intermetallic compounds, temperature profile



## Čestné prohlášení

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

V Praze dne

Petr Veselý





## Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mne během mého post-graduálního studia podporovali a přispěli tak nemalým dílem k realizaci této disertační práce. Jmenovitě mému vedoucímu práce Karlu Duškovi za odborné vedení a pomoc, neuvěřitelnou vstřícnost a více než přátelský přístup, mému školiteli-specialistovi Oliveru Krammerovi za konzultace a cenné rady, dále pak kolegům z Katedry elektrotechnologie a to především těm, kteří se společně se mnou podílejí na výzkumu v oblasti technologie pájení a na vzniku společných odborných publikací, které mají rok od roku vyšší a vyšší úroveň i vědecký impakt. Děkuji také svým studentkám a studentům za jejich nadšení a píli, byli pro mne během doktorského studia velkou inspirací. Děkuji Ivě Králové za velmi pečlivou kontrolu této práce a za trefné poznámky ke zpracování. A závěr mého poděkování patří samozřejmě mé ženě Daniele Veselé, která mne trpělivě podporuje po celou dobu mých studií – lepší rodinné zázemí si pro zpracování vědecké práce nedokážu představit.



# OBSAH

<b>1 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE</b>	<b>13</b>
<b>2 ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>3 ÚVODNÍ TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Fyzikální podstata pájení</b>	<b>17</b>
3.1.1 Dělení pájení	17
3.1.2 Kvalita pájeného spoje	18
3.1.3 Klíčové parametry pájení	19
3.1.3.1 <i>Problematika smáčení</i>	19
3.1.4 Intermetalické sloučeniny	22
<b>3.2 Používané materiály pro spojování v povrchové montáži</b>	<b>25</b>
3.2.1 Legislativní aspekty bezolovnatého pájení v Evropě	25
3.2.2 Bezolovnaté pájecí slitiny	26
3.2.2.1 <i>Slitiny SAC</i>	27
3.2.2.2 <i>Slitiny Sn-Zn</i>	29
3.2.2.3 <i>Slitiny Sn-Bi a Sn-In – nízko-teplotní slitiny</i>	29
3.2.3 Olovnaté slitiny Sn-Pb	31
3.2.4 Formy pájecí slitiny	32
3.2.5 Tavidla	32
3.2.5.1 <i>Chemické složení tavidel</i>	33
3.2.5.2 <i>Dělení tavidel</i>	34
3.2.5.3 <i>Bezoplachová (no-clean) tavidla</i>	36
3.2.6 Materiály desek plošných spojů	37
3.2.6.1 <i>Povrchové úpravy pájecích plošek</i>	38
3.2.6.2 <i>Nepájivá maska</i>	40
<b>3.3 Povrchová montáž a pájení přetavením</b>	<b>41</b>
3.3.1 Charakteristika procesu	41
3.3.2 Používané technologie ohřevu	43
3.3.3 Teplotní profil	44
3.3.3.1 <i>Heating faktor</i>	46
3.3.3.2 <i>Vliv teplotního profilu na vlastnosti pájených spojů</i>	47
<b>3.4 Diagnostika pájených spojů</b>	<b>50</b>
3.4.1 Měření elektrických vlastností pájeného spoje	51
3.4.2 Měření mechanických vlastností pájeného spoje	52
3.4.3 Analýza metalografických výbrusů pájených spojů	53
<b>4 CHYBY V POVRCHOVÉ MONTÁŽI – REŠERŠNÍ PŘEHLED</b>	<b>55</b>
<b>4.1 Chyby detekovatelné po procesu pájení</b>	<b>55</b>
4.1.1 Vznik otevřených spojení	55
4.1.2 Efekt náhrobního kamene	55
4.1.3 Vznik můstků	57
4.1.4 Warpage efekt	57
4.1.5 Head in Pillow efekt	58
4.1.6 Popcorn efekt	59
4.1.7 Black Pad efekt	59
<b>4.2 Chyby dlouhodobého charakteru</b>	<b>60</b>

4.2.1 Růst whiskerů	60
4.2.2 Růst dendritů	61
4.3 Chyby způsobené tavidly	63
4.3.1 Nesmáčení povrchu pájkou	63
4.3.2 Korozní procesy	63
4.3.3 Dutiny ve spoji – voidy	64
4.3.4 Rozstřík tavidla	66
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 1 – ROZSTŘÍK TAVIDLA BĚHEM PÁJECÍHO PROCESU</b>	<b>69</b>
5.1 Motivace experimentu s rozstříkem tavidla	69
5.2 Experiment 1	72
5.2.1 Materiály v experimentu 1	72
5.2.2 Metody v experimentu 1	74
5.2.3 Výsledky experimentu 1 a diskuze	75
5.2.3.1 Výsledky měření drsnosti nepájitvých masek v experimentu 1	75
5.2.3.2 Vyhodnocení roztekavosti tavidla v experimentu 1	76
5.2.3.3 Vyhodnocení rozstříku tavidla v experimentu 1	77
5.2.4 Závěry experimentu 1	81
5.3 Experiment 2	81
5.3.1 Materiály v experimentu 2	82
5.3.2 Metody v experimentu 2	85
5.3.3 Výsledky experimentu 2 a diskuze	89
5.3.3.1 Analýza povrchu vzorků	89
5.3.3.2 Vyhodnocení roztekavosti tavidla v experimentu 2	94
5.3.3.3 Vyhodnocení rozstříku tavidla v experimentu 2	95
5.3.4 Závěry experimentu 2	99
5.4 Závěry experimentů na rozstřík tavidla během pájecího procesu	100
5.5 Plánovaná experimentální činnost	100
<b>6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 2 – VLV TAVIDLA NA KINETIKU INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN A VLASTNOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ</b>	<b>102</b>
6.1 Motivace experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin	102
6.2 Materiály a metody v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin	102
6.2.1 Příprava testovacích vzorků	102
6.2.2 Proces přetavení	104
6.2.3 Zrychlené stárnutí pájených spojů	105
6.2.4 Analýza intermetalických vrstev	106
6.2.5 Měření odporu pájených spojů	106
6.2.6 Mechanická zkouška pájených spojů	107
6.3 Výsledky a diskuze experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin	107
6.3.1 Teplotně-vlhkostní namáhání	107
6.3.1.1 Růst intermetalických vrstev během teplotně-vlhkostního namáhání	107
6.3.1.2 Měření elektrického odporu pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání	111
6.3.1.3 Měření mechanických vlastností pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání	112
6.3.2 Namáhání teplotními šoky	114
6.3.2.1 Růst intermetalických vrstev během namáhání teplotními šoky	114
6.3.2.2 Měření elektrického odporu pájených spojů během namáhání teplotními šoky	116
6.3.2.3 Měření mechanických vlastností pájených spojů během namáhání teplotními šoky	117

---

<b>6.4 Závěr experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin</b>	<b>119</b>
<b>7 ZÁVĚR</b>	<b>121</b>
<b>8 SEZNAM PUBLIKACÍ DISERTANTA</b>	<b>124</b>
8.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce	124
8.1.1 Publikace v impaktovaných časopisech	124
8.1.2 Publikace – ostatní	127
8.2 Ostatní publikace nevztahující se k tématu disertační práce	128
8.2.1 Publikace v impaktovaných časopisech	128
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>132</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>135</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK</b>	<b>136</b>
<b>REFERENCE</b>	<b>137</b>



# 1 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem této disertační práce je prohloubení znalostí o vlivu tavidla, které je součástí pájecích past, na kvalitu, spolehlivost a životnost pájených spojů vytvořených pájením přetavením a v konečném důsledku tedy celého elektronického zařízení. Konkrétně se práce nejvíce věnuje problematice rozstříku tavidla do okolí pájeného spoje během procesu přetavení. Zde jsou dílčími cíli práce vyvinout spolehlivou a opakovatelnou metodiku použitelnou pro různé materiálové kombinace a s její pomocí nalézt faktory, které rozstřík tavidla nejvíce ovlivňují, a jejich vhodnou změnou jev minimalizovat. To může v průmyslové praxi podstatně snížit zmetkovitost produkce a ušetřit tak vynaložené náklady. V další části se práce věnuje vlivu tavidla na růst intermetalických sloučenin na rozhraní pájený povrch-pájka, které zásadním způsobem ovlivňují vlastnosti pájeného spoje. Práce by měla vést k hlubšímu pochopení vztahu mezi typem a množstvím tavidla, nastavením teplotního profilu ovlivňující aktivaci tavidla, tloušťkou intermetalických vrstev a kinetiky jejich růstu během zrychlených teplotních zkoušek. Tyto poznatky pak lze využít v praxi k optimalizaci výběru materiálové základny a nastavení pájecího procesu s ohledem na spolehlivost pájených spojů.

## 2 ÚVOD

Elektrotechnika je obor, který je unikátní nejen využitím elektřiny jako zdroje energie a hybatele moderního světa, ale také využitím velmi široké škály materiálů. Vlastně najdeme jen velmi málo příkladů materiálů, které se v elektrotechnice nepoužívají. Pro konstrukci elektrických obvodů jsou potřeba vodiče přenášející elektrický proud, v drtivé většině kovy a jejich slitiny, ale také například kompozitní materiály s příměsí uhlíku nebo vodivé polymery. K funkci výpočetní a mnohé další techniky jsou zapotřebí polovodiče, tvořené často polokovy či sloučeninami, ale také polovodivými polymery. Velké točivé i netočivé elektrické stroje a funkce mnoha přístrojů je závislá na magnetických materiálech, většinou tedy opět kovech či jejich slitinách a sloučeninách. Výčet pak doplňují materiály izolační a dielektrické, které oddělují jednotlivé elektrické cesty, případně plní funkci zásobníků energie. Zde najdeme například různé druhy plastů, papír nebo keramiku, ale také plynné a kapalné látky, například izolační média jako je plyn SF<sub>6</sub> či různé druhy olejů. Do této kategorie můžeme koneckonců zařadit i vzduch, který dýcháme.

Je patrné, že elektrotechnická výroba, která má za úkol spojit výše uvedené materiály v jeden funkční celek, není v žádném případě triviální záležitostí. A to, jaký konkrétní technologický postup ve výrobě využijeme a jakou kombinaci materiálů zvolíme, může ve výsledku ovlivnit nejen samotnou funkci zařízení, ale také jeho kvalitu, spolehlivost a životnost. V elektronických zařízeních, kde je stěžejní část tvořena obvodem realizovaným na desce plošného spoje (DPS, angl. PCB - *printed circuit board*), hrají velkou roli v otázce spolehlivosti spoje, které drží jednotlivé součástky na desce. Mají dva hlavní úkoly – přenášet dobře elektrický proud a poskytovat součástkám dostatečně odolnou mechanickou oporu, a to po co nejdelší možnou dobu.

Dominantní technologií pro připojování součástek na desky plošných spojů (označováno také jako pouzdření druhé úrovně) je pájení. Dlouhá léta, dokonce dlouhé desítky let, se pro pájení využívala v hojné míře olovnatá pájka na bázi cínu a olova, nejčastěji ve své eutektické podobě 63Sn-37Pb, případně o něco levnější variantě 60Sn-40Pb. Z pohledu spolehlivosti pájených spojů má tato binární slitina vynikající vlastnosti. Lidstvo však není charakteristické tím, že by žilo v naprostém souladu s přírodou, a tak se před 15 lety rozhodlo na území Evropské unie o zákazu používání některých nebezpečných látek, které často končily na skládkách či jiných místech a negativně ovlivňovaly životní prostředí. Na seznamu se mezi těmito látkami, kromě například toxického kadmia či rtuti, objevilo právě olovo.

Dá se samozřejmě polemizovat o škodlivosti olova v pájkách vzhledem k jeho minimálnímu hmotnostnímu množství vůči celému zařízení. Zvlášť pokud uvážíme, že v některých aplikacích, ve kterých je mnohem větší množství olova, je stále jeho použití víceméně nenahraditelné, a tudíž



nelze jednoduše zakázat (například v olovených akumulátorech). Každopádně se výrobci většiny elektronických zařízení museli přizpůsobit době, a tak byly olovnaté slitiny nahrazeny bezolovnatými. Ty se vyznačují většinou vyšší teplotou tání, matným vzhledem a horší smáčivostí. Abychom jim však úplně nekřivdili, díky intenzivnímu výzkumu v oblasti nových pájecích slitin se prakticky podařilo dosáhnout stejně dobrých mechanických i elektrických vlastností, jako mají slitiny olovnaté. Ovšem za cenu náročnějšího pájecího procesu a důkladné výstupní kontroly. Dlouhodobá stabilita bezolovnatých spojů je však stále ve hvězdách, protože oproti těm olovnatým je zatím používáme relativně krátkou dobu na to, abychom mohli dělat seriózní závěry.

Kvůli horší smáčivosti bezolovnatých pájek ve srovnání s těmi olovnatými je třeba použít při procesu pájení agresivnější tavidla, čímž nabývají tavidla v celém procesu na významu a hrají tak podstatnou roli v otázce kvality pájeného spoje. Začínají se však také více projevovat doprovodné chyby v povrchové montáži. Typickým příkladem je nadměrný vznik dutin, tzv. voidů, který je způsoben uzavřením odpařujících se složek tavidla uvnitř spoje. Tavidlo ale také způsobuje problémy v okolí pájeného spoje. Zbytky, které ulpí na desce plošného spoje díky prskání tavidla během ohřevu, mohou působit korozivně, pakliže se zanedbá mycí proces desky po pájení a nejedná se o bezoplachová tavidla (ale i ta, podle některých studií, nejsou zcela inertní). Jak však vyplynulo z průmyslové praxe, tyto tavidlové zbytky jsou příčinou i dalších problémů, například při vyhodnocování kvalitativních testů zapájených desek plošných spojů. Ty jsou založené na testování pomocí elektrod (jehlová pole), které kontaktují speciální testovací plošky na DPS. Pokud je však taková ploška kontaminována a pokryta zbytkem tavidla, které má obecně izolační charakter, nedojde ke správnému vodivému kontaktu a zapájená DPS je vyhodnocena jako nevyhovující, přestože je funkčně i spolehlivostně zcela v pořádku. Rozstřík tavidla do okolí může také kontaminovat plochy výstupních konektorů tvořených motivem na desce. V tomto případě přímo ohrožují funkci zařízení. Redukce efektu prskání tavidla během procesu přetavení je přáním mnoha technologů, cesta k tomu je však velmi složitá, protože zde působí velká řada faktorů a tavidla určená pro bezolovnaté pájení to zkrátka mají ve své povaze. Stěžejní část této práce se proto věnuje právě tomuto fenoménu a v rámci provedených experimentů se snaží podchytit vliv především materiálových parametrů desky plošného spoje, jako je typ nepájivé masky, typ povrchové úpravy pájecích plošek nebo jejich design, které ovlivňují chování tavidla během procesu pájení, především jeho roztékavost do okolí pájecí plošky. To může hrát při prskání významnou roli.

Tavidlo se samozřejmě nejvíce uplatňuje při samotné tvorbě pájeného spoje. Zajímavé však je, že jen málokterá studie, která se zabývá pájecími slitinami a procesem tvorby pájeného spoje, zahrnuje do evaluace právě tavidlo, případně jeho aktivní účast v rámci pájecího procesu – tím je myšlena ta část teplotního profilu, kde dochází k tzv. přehřevu (uvažujeme-li o procesu pájení

přetavením s využitím pájecí pasty, které je v průmyslové praxi jasně dominantní technologií). Většinou se tyto studie omezují pouze na vliv fáze přetavení, která se počítá od momentu a teploty, kdy dojde k roztavení pájecí slitiny po moment a teplotu, kdy dojde k opětovnému ztuhnutí slitiny ve výsledný pájený spoj. Tento fakt je zřejmě také ovlivněn tím, že výrobce tavidla, případně pájecí pasty zřídka kdy zveřejňuje úplné informace o složení těchto látek. Většinou se omezí pouze na označení pomocí některé mezinárodně uznávané normy.

Jak ukazuje laboratorní, a především průmyslová praxe, tavidlo se stejným standardizovaným označením, ale od jiných výrobců, se může chovat se stejnou slitinou různě. Není tedy jednoduché podchytit a zobecnit závěry studií, které se zabývají právě vlivem tavidla. Je však podstatné se touto problematikou zabývat, neb se ukazuje, že změnou tavidla, případně změnou teploty v předehřívací fázi, jsme schopni zcela zásadním způsobem ovlivnit jak smáčení, tak růst intermetalických vrstev mezi pájkou a pájeným substrátem, které ve své podstatě každý pájený spoj definují. To ostatně ukazují i výsledky experimentů, které byly provedeny v rámci druhé praktické části této práce. Je možné, že právě díky těmto a dalším, navazujícím studiím, dojde ke zvýšení zájmu o tuto problematiku z hlediska celkové spolehlivosti pájených spojů ze strany výrobců elektroniky, což by následně mohlo vést k uvolnění některých informací ze strany výrobců tavidel. V obecném měřítku se tedy může jednat o zvýšení spolehlivosti elektrotechnické výroby.

## 3 ÚVODNÍ TEORETICKÁ ČÁST

V následujících kapitolách bude shrnut stav současného poznání a mé teoretické úvahy o procesu pájení, včetně pojednání o fyzikální podstatě pájení, vzniku intermetalických sloučenin na rozhraní pájka-pájený substrát, používaných pájecích slitin a tavidel, možnostech kvalitativní evaluace pájených spojů a technologie povrchové montáže. Toto seznámení nezbytným způsobem doplňuje dále uvedenou rešeršní část o chybách v povrchové montáži a praktické experimenty.

### 3.1 Fyzikální podstata pájení

Pájení je způsob, jak metalurgicky spojit kovové (či pokovené) součásti pomocí přidaného roztaveného kovu či slitiny (pájky, angl. *solder*), přičemž při procesu nedochází k tavení spojovaných součástí. Důležitým předpokladem je *smáčivost* spojovaných součástí roztavenou pájkou a teplota tání pájky, která je nižší než teplota tání spojovaných součástí. Během smáčení povrchu roztavenou pájkou dochází ke vzájemnému rozpouštění a difúzi atomů pájky a pájeného kovu. Reakcí mezi pájkou a pájeným kovem vznikají na rozhraní *intermetalické sloučeniny*. Po ztuhnutí pájky je vytvořen pájený spoj – pevné elektromechanické spojení mezi dvěma kovovými nebo pokovenými částmi [1], [2].

Pro zajištění dobré smáčivosti pájených povrchů se do spoje přivádí během pájecího procesu ještě jedna látka, která se obecně nazývá *tavidlo*. To má za úkol ještě před samotným smáčením vyčistit pájené povrchy (a také povrch roztavené pájky) od všudypřítomných oxidů, sulfidů a jiných nečistot, které mohou smáčení zhoršovat či přímo znemožňovat. Pokud pájka nebude smáčet pájené povrchy, nedojde k reakci kovů mezi sebou a pájený spoj tak nemůže vzniknout. Potřeba tavidla vzniká při pájení prakticky vždy, protože každý kov si na svém povrchu nese tenkou vrstvičku oxidů, jakkoli se zdá naprosto čistý [3].

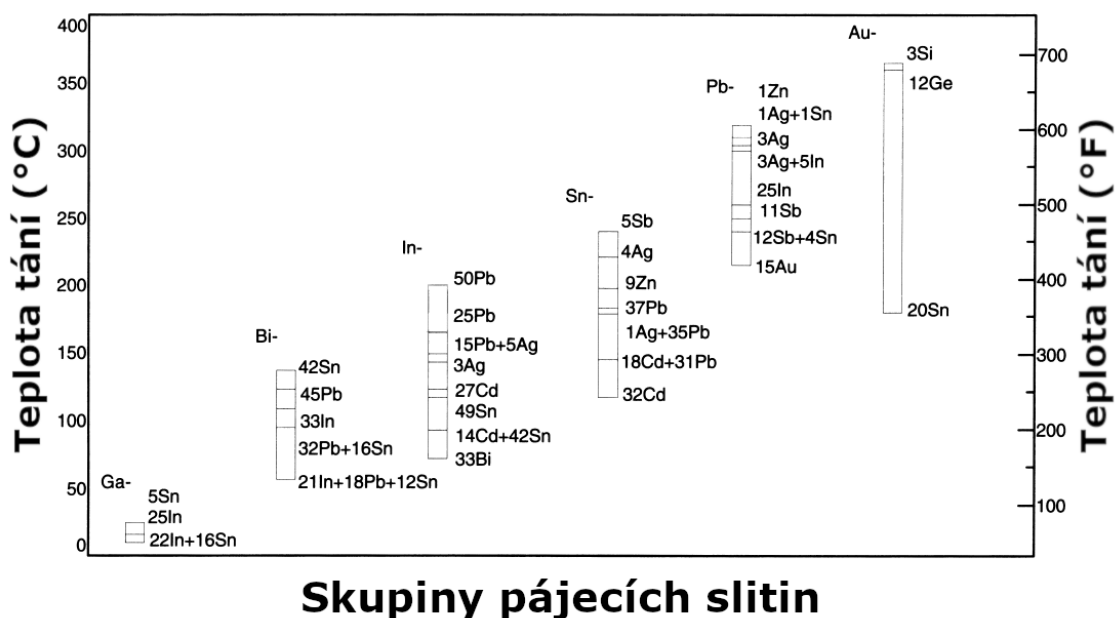
Pokud to shrneme, k vytvoření pájeného spoje jsou klíčové následující tři faktory:

- tavidlo, které dostatečně vyčistí pájené povrchy, aby byly smáčitelné pájkou,
- pájka
- a teplo, které dodáme pájce k jejímu roztavení a následnému smáčení pájených povrchů.

#### 3.1.1 Dělení pájení

Podle teploty tání pájky můžeme dělit pájení na měkké (do 450 °C, angl. *soldering*) a tvrdé (nad 450 °C, angl. *brazing*). Společně se svařováním patří pájení mezi technologie metalurgického spojování. V dalším textu bude uvažováno pouze pájení měkké, které se využívá

pro elektromechanické spojování v elektronice a elektrotechnice. Zde se nejvíce uplatňují slitiny cínu, bismutu, india a olova [2]. Na obrázku 1 jsou znázorněny využívané skupiny pájek a jejich rozsah teplot tání. O konkrétních slitinách aktuálně používaných v průmyslu pojednávají kapitoly 3.2.2 *Bezolovnaté pájecí slitiny* a 3.2.3 *Olovnaté slitiny Sn-Pb*.



Obrázek 1. Skupiny pájecích slitin a jejich teploty tání (převzato z [2])

### 3.1.2 Kvalita pájeného spoje

Vzniknuvší pájený spoj musí mít, pokud chceme hovořit o dobrém a kvalitním spoji, určité vlastnosti. Mezi ty patří:

- dobré mechanické vlastnosti,
- vysoká elektrická vodivost,
- stálost mechanických a elektrických vlastností v čase (odolnost vůči klimatickým degračním vlivům),
- chemická odolnost.

V průmyslové praxi se dále hodnotí další parametry, které s výše uvedenými vlastnostmi úzce souvisí:

- pokrytí pájených povrchů pájkou,
- povrch pájky,
- smáčecí (kontaktní) úhel,

- výskyt dutin ve spoji,
- výskyt otevřených spojů,
- výskyt můstků,
- výskyt tavidlových zbytků.

O vlastnostech pájeného spoje a jejich evaluaci pojednává dále kapitola 3.4 *Diagnostika pájených spojů*.

### 3.1.3 Klíčové parametry pájení

Pájení je velice komplexní proces, v němž figuruje velká spousta parametrů, které ovlivňují výslednou kvalitu pájeného spoje. Záleží na materiálu pájených součástí včetně jejich povrchové úpravy (angl. *coating* či *surface finish*) a drsnosti povrchu, složení pájky a metalurgických reakcích mezi pájkou a pájenými povrchy, složení tavidla, chemických reakcích mezi tavidlem, pájkou a pájenými povrchy a samozřejmě na procesních podmínkách. Záleží tedy také na způsobu, jakým přivedeme do pájeného spoje teplo potřebné k aktivaci tavidla a roztavení pájecí slitiny, i na způsobu, jakým pájený spoj následně chladíme. Podstatná je i okolní atmosféra během procesu a nemalým dílem se na celkové kvalitě podílí i procesy těsně předcházející pájení: skladování vstupních komponent (pájek, respektive pájecích past, součástek a desek plošných spojů), čištění pájecích plošek, nanášení pájecí pasty (v případě pájení přetavením, viz dále), osazování součástek, případně jejich lepení atp. I procesy, které chronologicky následují po pájení, jako je čištění desek od tavidlových zbytků, lakování, skladování, montáž finálního výrobku, mohou způsobit chyby související s pájenými spoji. Pokud se například dostane vlhkost na povrch již zapájené desky a následně proběhne proces lakování, vznikají pod naneseným lakem podmínky umožňující elektrochemickou migraci mezi zapájenými vývody a hrozí vznik zkratů.

Díky složitosti pájecího procesu je většina dosavadních znalostí a zkušeností o tvorbě kvalitního pájeného spoje získána empiricky, v průmyslové praxi, pomocí metody pokus-omyl. Ukazuje se totiž, že stačí i malá změna například v návrhu motivu desky plošného spoje pro výraznou změnu podmínek pro šíření tepla, což může v konečném důsledku vést k chybám jako je efekt náhrobního kamene, chybějící pájka ve spoji, otevřený spoj aj.

#### 3.1.3.1 Problematika smáčení

Jak již bylo uvedeno výše, smáčení pájených povrchů roztavenou pájkou a obecně roztékavost pájky po povrchu je pro vznik pájeného spoje klíčová a je ovlivněna uvedenými parametry. Teoreticky lze smáčení pájky popsat obecně jako smáčení kapaliny na pevném substrátu. Do hry vstupují tři povrchová napětí ( $\text{Nm}^{-1}$ ):

- mezi pevnou a kapalnou fází (angl. *solid-liquid*,  $\gamma_{SL}$ ),
- mezi pevnou a plynnou fází (angl. *solid-gas*,  $\gamma_{SG}$ ),
- mezi kapalnou a plynnou fází (angl. *liquid-gas*,  $\gamma_{LG}$ ),

kteřá lze v případě rovnováhy zapsat Youngovou rovnicí [4]:

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SG} - \gamma_{LG} \cos \alpha \quad (1)$$

ze které lze vyjádřit kontaktní úhel  $\alpha$ . Je zřejmé, že pro případ  $\alpha < 90^\circ$  platí, že povrchové napětí mezi pevnou a plynnou fází ( $\gamma_{SG}$ ) je větší než mezi pevnou a kapalnou fází ( $\gamma_{SL}$ ). Tato nerovnováha vytváří „hnací“ sílu pro roztékání kapaliny po povrchu. Pokud bude kontaktní úhel v rozmezí  $90^\circ$  až  $180^\circ$ , určité smáčení se objeví, ale kapalina se nebude po povrchu roztékat [2].



**Obrázek 2.** Rovnovážný stav povrchových napětí

Kontaktní úhel je, jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1.2, jedním z ukazatelů kvalitně provedeného pájeného spoje, respektive kvantifikuje míru smáčení. Dle publikace [1] je závislost kvality smáčení definována kontaktním úhlem  $\alpha$  následovně:

- $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ : výborné až dokonalé smáčení
- $20^\circ < \alpha < 40^\circ$ : dobré až velmi dobré smáčení
- $40^\circ < \alpha < 55^\circ$ : dostatečné smáčení
- $55^\circ < \alpha < 90^\circ$ : špatné smáčení
- $90^\circ < \alpha$ : nesmáčení

Prostředkem k dosažení cíle co nejlepší možné smáčivosti je tedy zmenšení kontaktního úhlu  $\alpha$ , respektive zvětšení výrazu  $\cos(\alpha)$ . Pokud si rovnici (1) přepíšeme do vhodného tvaru:

$$\cos \alpha = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (2)$$

vidíme, že je možné dosáhnout zvýšení výrazu  $\cos(\alpha)$  třemi možnými způsoby: zvýšením povrchového napětí  $\gamma_{SG}$  nebo snížením povrchových napětí  $\gamma_{SL}$  a  $\gamma_{LG}$ .

Povrchové napětí mezi pevnou a plynnou fází můžeme zvýšit vyčištěním povrchu daného kovu. Jakákoliv adsorbovaná látka na povrchu kovu, například vodní pára, prach či jiné organické nebo anorganické vrstvy, významně snižuje toto povrchové napětí, zvyšuje smáčecí úhel a brání roztékání pájky po povrchu [2]. Z tohoto důvodu je zřejmé, že vliv tavidel, které pájené povrchy čistí, je naprosto zásadní.

Povrchové napětí mezi pevnou a kapalnou fází je konstantní pro danou teplotu a materiálovou kombinaci. Materiálovou kombinaci, tedy složení pájky a pájených povrchů, není většinou jednoduché změnit, protože materiálová kombinace musí plnit i další požadavky, a to především poté, co je proces pájení ukončen. Je však možné měnit pracovní teplotu, a tedy roztékání pájky pomocí teploty jednoduše ovlivňovat. S rostoucí teplotou hodnota povrchového napětí  $\gamma_{SL}$  klesá [5]–[7].

Povrchové napětí mezi kapalnou a plynnou fází je opět konstantní pro danou fixní teplotu a pro konkrétní kombinaci pájky a okolní atmosféry. Ta je ovšem charakterizována i tlakem, a stejně jako na teplotě je zde určitá závislost povrchového napětí na tlaku. S klesajícím tlakem klesá hodnota  $\gamma_{LG}$  a zlepšuje se tedy smáčení povrchu pájkou. To je důvod, proč se v některých případech používá pájení ve vakuu. Další možností je změna pracovní atmosféry; v praxi je využíváno například pájení pod dusíkem, který zároveň brání vytváření oxidů na pájených površích a zvyšuje tak zároveň hodnotu  $\gamma_{SG}$  [2], [7].

Je také vhodné doplnit korekci původní Youngovy rovnice (1), protože ta předpokládá dokonale hladký substrát, nicméně každý reálný substrát má nějakou drsnost, která ovlivňuje smáčecí úhel. Tato korekce se dá vyjádřit následovně [8]:

$$\cos\alpha_w = r \cdot \cos\alpha \quad (3)$$

kde  $\alpha_w$  (°) je smáčecí úhel po korekci a  $r$  (-) je tzv. faktor drsnosti (angl. *roughness factor*). Ten je definován jako poměr skutečné plochy povrchu ku ploše dokonale hladkého povrchu, vyjadřuje tedy zvětšení plochy povrchu vlivem drsnosti. Platí, že  $r$  je větší než 1 pro jakýkoliv skutečný (drsňý) povrch a  $r$  je rovno jedné pro dokonale hladký povrch. Z toho vyplývá, že pro dokonale hladký povrch platí  $\cos(\alpha_w)$  se rovná  $\cos(\alpha)$  a tedy  $\alpha$  je smáčecí úhel na dokonale hladkém povrchu [9].

Faktor drsnosti  $r$  se dá získat následujícím výpočtem [10]:

$$r = 1 + \frac{R_{Lo}}{100} \quad (4)$$

kde  $R_{Lo}$  (%) je jedním z povrchových parametrů drsnosti a vyjadřuje délku profilu jako procentuální zvětšení oproti profilu dokonale hladkého povrchu. Je možné jej získat z měření pomocí kontaktního či bezkontaktního profilometru. Častějším parametrem drsnosti je však  $R_a$ , udávaným obvykle v  $\mu\text{m}$ , který vyjadřuje průměrnou výšku profilu [11]. Jak ukazují výsledky ze studie prof. Kubiaka [10], závislost kontaktního úhlu na  $R_a$  není jednoznačná a pro velkou část povrchů platí, že kontaktní úhel je větší pro malé hodnoty  $R_a$ , s rostoucím  $R_a$  se zmenšuje do svého minima a pak opět roste. Tato studie byla provedena s destilovanou vodou jakožto kapalnou fází, ale dá se předpokládat, že tato poučka bude v nějaké míře platit obecně pro kapaliny na tuhém povrchu.

Chování tavidla během procesu pájení lze popsat stejným způsobem, protože tavidlo se buď již při pokojové teplotě nachází v kapalném stavu, nebo do tohoto stavu přechází při zahřátí během procesu pájení. Roztékání tavidla po substrátu (pájecí plošce a potažmo v jejím okolí, které je většinou tvořeno nepájevou maskou) může mít také zásadní vliv na tvorbu pájeného spoje. V případě větší roztékavosti tavidla do okolí pájecí plošky dochází k „odplavení“ tavidla mimo pájecí plošku a během fáze smáčení pájeného povrchu pájkou je tedy ve spoji přítomno menší množství. Jak bude dále ukázáno v praktické části práce, právě míra roztékání tavidla může významně ovlivnit nechtěný rozstřík tavidla po pájené desce, způsobující následné kvalitativní problémy, a může ovlivnit dokonce růst intermetalických sloučenin.

### 3.1.4 Intermetalické sloučeniny

Projevem a důsledkem difúze prvků (z pájeného povrchu do pájky a opačně) během smáčení pájeného povrchu roztavenou pájkou je vznik tenké vrstvičky mezi pájeným povrchem a pájkou (angl. *intermetallic layer*, IML). Ta je tvořena intermetalickými sloučeninami (angl. *intermetallic compounds*, IMC) a je nutné ji chápat jako podstatu spojení mezi těmito kovy. Nevznikne-li během pájení intermetalická vrstva (jedná-li se o klasické cínové pájky a měděné, niklové či stříbrné pájené povrchy), nelze hovořit o pájeném spoji. Na druhou stranu, nadměrný růst této vrstvy – který může být způsoben vícero faktory, jak bude ukázáno dále – může mít za následek mechanické oslabení pájeného spoje. Vznikající sloučeniny se totiž uspořádávají do odlišné krystalické mřížky než původní kovy a mají jiné fyzikální vlastnosti, především vyšší tvrdost, křehkost, ale i rozdílnou elektrickou vodivost nebo teplotní roztažnost [12]–[16]. Jedná se tedy o ukazatel kvality pájeného spoje.

Většina dnes používaných slitin pro měkké pájení v elektronice je založena na cínu (například bezolovnaté slitiny typu SAC obsahují více než 90 hm.% cínu); pájeným povrchem je často měď s případnou povrchovou úpravou (viz další kapitoly o používaných materiálech). V tom případě se na rozhraní tvoří převážně tyto 4 intermetalické sloučeniny v závislosti na povrchu pájecí plošky [17]:



- $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
- $\text{Cu}_3\text{Sn}$
- $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$
- $(\text{Cu, Ni})_6\text{Sn}_5$

Sloučenina  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , která vzniká prakticky vždy, uvažujeme-li materiály zmíněné v předchozím odstavci, je uspořádána do hexagonální mřížky [18]. Ta se vyznačuje vyšší atomovou zaplněností elementární buňky než v případě cínu, který tvoří tetragonální uspořádání [19]. Jsou zde také silnější vazby mezi jednotlivými atomy. Proto je tato intermetalická vrstva tvrdší, zároveň křehká a méně plastická než samotná pájka [1].

V okamžiku, kdy roztavená pájka začne smáčet pájený povrch, dojde k masivní chemické reakci a vytvoří se zárodek intermetalické vrstvy. Následný růst je ovlivněn dobou, ve které setrvává pájka v roztaveném stavu, a zároveň dosaženou teplotou. Záleží také na vzájemné rozpustnosti prvků pájky a pájeného povrchu. Obecně se tvoří vrstva s poměrně nepravidelnou morfologií. Po zchlazení a ztuhnutí spoje je počáteční, intenzivní růst vrstvy ukončen, nicméně difúze atomů pokračuje i v tuhém stavu. Vrstva, která se vytvořila během pájení, sice utváří difúzní bariéru a růst velmi omezuje; atomy však pronikají úzkými kanálky v nepravidelné struktuře vrstvy. Tento růst je ovlivněn okolní teplotou: při vyšší teplotě se růst intermetalických vrstev značně zrychluje [1], [20].

Rychlost růstu intermetalické vrstvy v čase, respektive její výsledná tloušťka může být vyjádřena pomocí zjednodušeného modelu [21]:

$$L = L_0 + (Dt)^n \quad (5)$$

Kde  $L$  ( $\mu\text{m}$ ) je tloušťka intermetalické vrstvy v čase  $t$  (s),  $L_0$  ( $\mu\text{m}$ ) je počáteční tloušťka intermetalické vrstvy (například po pájení),  $D$  ( $\mu\text{m}^{(1/n)}/\text{s}$ ) představuje difúzní koeficient charakterizující růst intermetalické vrstvy a  $n$  (-) je časový exponent. Pro případ stárnutí za zvýšené konstantní teploty lze položit  $n = 1/2$ , předpokládáme-li uplatnění především difúzního mechanismu růstu vrstvy [22]. Tím se nám rovnice zjednoduší do následujícího tvaru:

$$L = L_0 + \sqrt{Dt} \quad (6)$$

Z toho plyne, že difúzní koeficient  $D$  má základní jednotku  $\text{m}^2/\text{s}$ , respektive  $\mu\text{m}^2/\text{s}$  (s ohledem na rozměry skutečné intermetalické vrstvy).

Difúzní koeficient pro stárnutí pájeného spoje za konstantní teploty je závislý právě na této teplotě. Se zvyšující se teplotou zároveň roste difúzní koeficient. Pro další účely definujeme koeficient  $k$ :

$$k = \sqrt{D} \quad (7)$$

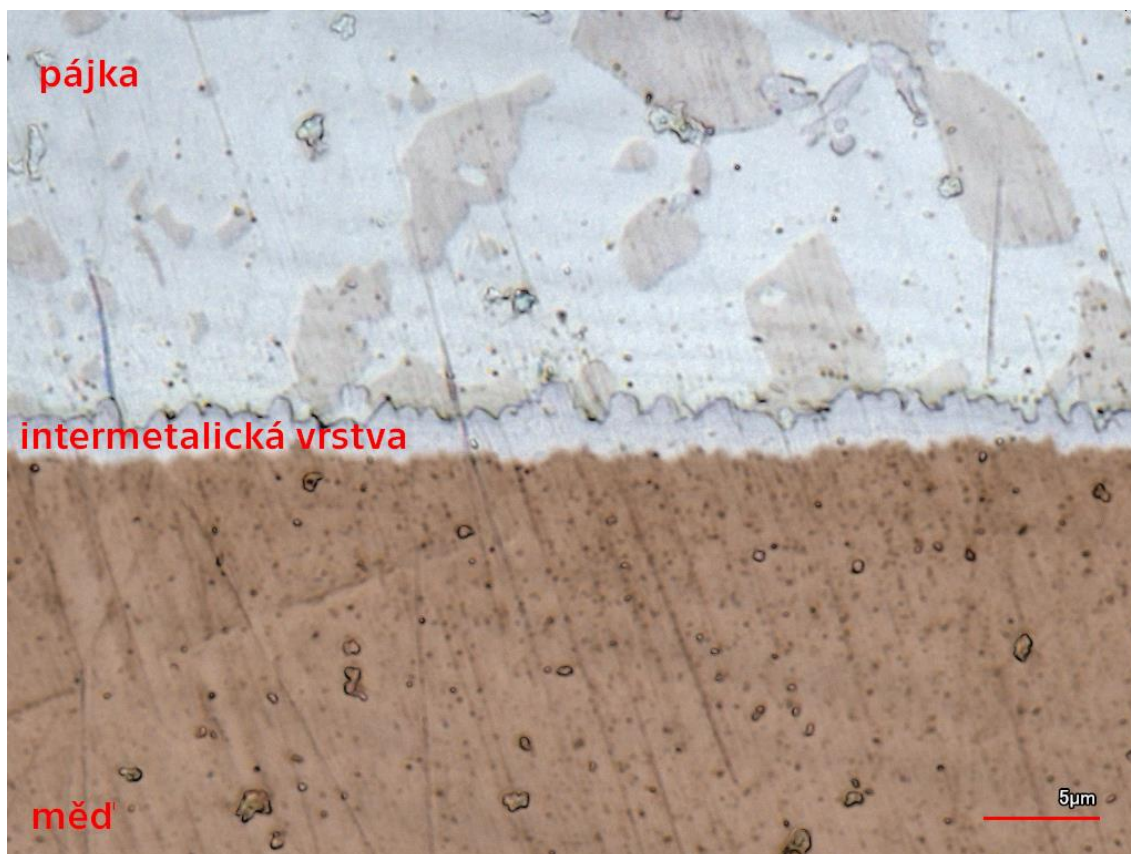
Pak můžeme za předpokladu, že platí Arrheniova rovnice pro rychlost chemické reakce, vyjádřit koeficient  $k$  následovně:

$$k = k_0 e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} \quad (8)$$

Kde  $k_0$  je pre-exponenciální faktor,  $Q$  je aktivační energie ( $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $R$  je molární plynová konstanta ( $8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$  [23]) a  $T$  je teplota (K). Právě hodnota aktivační energie je často uváděným parametrem při výzkumu růstu intermetalických sloučenin. Pro její získání je potřeba provést stárnutí pájeného spoje za různých teplot. V následujících kapitolách popisujících používané materiály v povrchové montáži budou uvedeny hodnoty aktivační energie pro různé materiálové kombinace z dostupné literatury.

Růst intermetalických vrstev v čase je zvláště problematický s ohledem na miniaturizaci elektroniky a neustále se zmenšující pájené spoje, které mohou být co do velikosti srovnatelné s vrstvou, která uvnitř nich roste; ta se pohybuje od desetin po jednotky  $\mu\text{m}$  (obrázek 3) – v extrémních případech až nižší desítky  $\mu\text{m}$ . Citelně se tak například snižuje mechanická odolnost spoje vyjádřená pomocí velikosti smykové síly potřebné pro odtržení spoje [20].

Aby došlo k chemické reakci mezi pájeným kovem a pájkou, je zapotřebí odstranit veškeré případné difúzní bariéry na površích ve formě oxidů, sulfidů, nečistot atp., což má na starosti tavidlo. To se tak sice nepodílí přímo na difúzním procesu, má však na něj velmi významný vliv a je zřejmé, že změnou složení a množství tavidla je možné ovlivnit růst intermetalických vrstev. Čistící schopnost tavidla je také závislá na teplotě; dá se proto předpokládat, že kromě maximální teploty, při které pájka smáčí pájený povrch, bude mít významný vliv na růst intermetalické vrstvy i teplota přehřevu, při kterém dochází k aktivaci tavidla. Právě tuto otázku dále otevírá druhá praktická část práce.



Obrázek 3. Intermetalická vrstva mezi BiSn pájkou a mědi (snímek pájeného spoje v řezu)

## 3.2 Používané materiály pro spojování v povrchové montáži

V této podkapitole budou popsány materiály aktuálně používané v technologii povrchové montáže, jakožto nejrozšířenější technologie v oblasti výroby elektronických obvodů a zařízení. Zejména se jedná o pájecí slitiny, tavidla, desky plošných spojů včetně povrchových úprav pájecích plošek a nepájevých masek a materiály používané u vývodů elektronických součástek. Znalost těchto materiálových kombinací je důležitá, neboť z ní vyplývají zákonitosti ohledně vzniku pájeného spoje, jak jsme si ukázali v předchozích kapitolách.

### 3.2.1 Legislativní aspekty bezolovnatého pájení v Evropě

Před uvedením používaných materiálů je třeba se v krátkosti zastavit u legislativních aspektů, které mají na materiálovou základnu zcela zásadní vliv. Konkrétně je zde řeč o *bezolovnatém pájení*, které v posledních letech muselo nahradit pájení pájkou na bázi cínu a olova, která se používala pro své výborné vlastnosti po celé dekády.

V Evropě vychází původně zákaz olova nejen v pájecích slitinách ze dvou direktiv, které začaly platit v roce 2003:

- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/95/ES ze dne 27. ledna 2003 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (angl. *Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*, RoHS)
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/96/ES ze dne 27. ledna 2003 o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ; angl. *waste electrical and electronic equipment*, WEEE)

Obě tyto direktivy identifikují olovo jako potenciálně nebezpečnou látku pro životní prostředí a lidské zdraví. Hlavním cílem bylo eliminovat olovo v odpadu elektronických zařízení, nicméně nejlépe proveditelnou cestou je zredukovat olovo v rámci výrobního procesu. V rámci direktivy RoHS jsou zakázané, respektive omezené i některé další látky – rtuť, kadmium, šestimocný chrom, polybromované bifenylly a polybromované difenyl ethery. Od roku 2006 není dovoleno jejich použití v elektronických zařízeních nad specifikované limity uvedené v této direktivě. Výjimkou byla zařízení v oblasti medicíny, průmyslových řídicích systémů atp.

Směrnice RoHS 2002/95/ES byla později nahrazena směrnicí 2011/65/EU, která se též nazývá RoHS 2. Ve srovnání s předchozí směrnicí, platnost této byla rozšířena na více zařízení, včetně těch používaných v oblastech patřících dříve mezi výjimky. Výjimku z tohoto zákazu tak mají pouze specificky uvedená zařízení. Omezení vyplývající z této směrnice jsou platné od 22. července 2019.

V roce 2015 byla směrnice RoHS, respektive RoHS 2, rozšířena směrnicí 2015/863. Další čtyři látky byly přidány na seznam omezující jejich použití – bis (2-ethylhexyl) phthalát, butyl benzyl phthalát, dibutyl phthalát, a diisobutyl phthalát. Omezení těchto látek je platné od 22. července 2021.

### 3.2.2 Bezolovnaté pájecí slitiny

Z hlediska bezolovnatých slitin nahrazujících ty olovnaté jsou podle publikace profesora Suganuma [24] nejvíce slibné následující:

- Sn-Ag-Cu (slitiny označované jako SAC)
- Sn-Zn
- Sn-Bi

Kromě slitin založených na těchto prvcích, existuje mnoho dalších slitin obsahujících mimo jiné indium, galium, antimon či zlato.

Ačkoli například slitiny SAC mají výborné mechanické vlastnosti a splňují průmyslové požadavky [24], stále zatím nedosahují kvalit a spolehlivosti dříve používaných pájek na základě

cínu a olova. Vývoj nových slitin proto neustále pokračuje, jak ostatně také uvádí profesor Lee [25]. Ten také rozděluje používané pájecí slitiny podle jejich bodu tání ( $T_m$ ) na:

- nízko-teplotní slitiny ( $T_m < 183$  °C)
- středně-teplotní slitiny ( $183$  °C  $< T_m < 233$  °C)
- vysoko-teplotní slitiny ( $T_m > 233$  °C)

### 3.2.2.1 Slitiny SAC

Ternární slitiny založené na bázi cínu, stříbra a mědi s obecným označením SAC jsou nejvíce používanými slitinami v elektronickém průmyslu díky jejich vlastnostem velmi podobným olovnatým slitinám. Ve srovnání s ostatními bezolovnatými pájkami, které byly v praxi zkoušeny, mají tyto slitiny poměrně nízký bod tání. Slitiny blízko eutektického bodu se složením 3-4 hm. % stříbra a 0,5-1 hm. % mědi tají okolo 216-217 °C, spadají tedy do druhé kategorie pájek (středně-teplotní). Přítomnost mědi ve slitině zpomaluje rozpouštění mědi z pájeného substrátu, snižuje bod tání, zvyšuje mechanickou a tepelnou stabilitu a také podporuje smáčení; ve slitině tvoří částice intermetalické sloučeniny  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , které jsou společně s částicemi  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  zodpovědné za výrazné zvýšení meze únavy materiálu, až 4x oproti eutektické cín-olovnaté slitině. Jejich nevýhodou je nutnost použití agresivnějších tavidel, protože výrazně hůře smáčejí měděný substrát [26]–[28].

Pájecích slitin SAC je obecně velké množství. Tabulka 1 uvádí příklady těchto slitin a jejich vlastnosti.

*Tabulka 1. Vybrané pájecí slitiny SAC a jejich vlastnosti [25]*

<b>Pájecí slitina</b>	<b>Teplota tání/tuhnutí (°C)</b>	<b>Youngův modul (GPa)</b>	<b>Pevnost v tahu (MPa)</b>
Sn-3.0Ag-0.5Cu	220/217	37	43
Sn-3.5Ag-0.7Cu	220/217	-	47
Sn-3.8Ag-0.7Cu	220/217	44	40
Sn-4.0Ag-0.5Cu	225/217	40	-
Sn-37Pb	183/183	27	47

Ze slitin SAC je jedna z nejvyžívanějších ta s označením SAC305 obsahující 3 hm. % stříbra a 0,5 hm. % mědi. Velkou zásluhu na tom má nižší zastoupení stříbra, což má za následek zároveň nižší cenu této slitiny. Zároveň vykazuje nejlepší smáčení z této „rodiny“ pájek a je kompatibilní s velkou škálou různých tavidel. Používá se jak pro pájení vlnou, tak pro pájení přetavením ve formě pájecích past. Optimální pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 235-245 °C [29].

Co se týká růstu intermetalických vrstev a stárnutí pájených spojů na bázi SAC slitin, výsledky dohledaných předchozích studií jsou shrnuty v tabulce 2 výše. Na rozhraní s měděným substrátem vzniká intermetalická sloučenina  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  a  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , stejně jako v případě olovnaté slitiny, přičemž

nejprve vzniká na rozhraní vrstva  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  díky nižší aktivační energii, a následně teprve vrstva  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , která vznikne mezi měděným substrátem a vrstvou první intermetalické sloučeniny, kterou nahrazuje [30]. Aktivační energie, kterou uvádí tabulka 2 náleží souhrnně oběma intermetalickým sloučeninám. Nutno opět dodat, že žádná z uvedených studií nebrala v potaz použité tavidlo (a v některých případech ani nekonstatovala použitý typ). Většinou není uveden ani kompletní pájecí profil. Z uvedených značně se lišících hodnot pro stejný typ slitiny (například pro SAC305) vyplývá, že bude v případě termálního stárnutí záležet na iniciačním stavu intermetalické vrstvy, která je ovlivněna pájecím procesem a použitým tavidlem (což lze s přihlédnutím k tématice této práce obzvláště podtrhnout).

*Tabulka 2. Kinetika intermetalických sloučenin pro slitiny SAC – rešeršní přehled*

Pájecí slitina	Pájený substrát	Použité tavidlo	Způsob vytvoření pájeného spoje	Aktivační energie intermetalické sloučeniny, Q (kJ/mol)	Zdroj
Sn-3,0Ag-0,5Cu	Cu	RMA*	Ponor do roztavené lázně	61,5	[31]
		Vodou rozpustné tavidlo bez halidů	Ponor do roztavené lázně	79,8	[32]
		Není uvedeno	Přetavení v peci	46,2	[33]
Sn-3,8Ag-0,7Cu	Cu	RMA	Přetavení v peci	75,1	[34]
		Není uvedeno	Přetavení v peci	73,5	[35]
		Cu/UBM**	Přetavení v peci	92,6	[36]
	Cu	Není uvedeno	Přetavení vzduchem	96,8	[37]
Sn-0,3Ag-0,7Cu	Cu	RMA	Ponoření do roztavené lázně	80,7	[38]

\*RMA – středně aktivované pryskyřicové tavidlo, \*\*UBM – metalizace tenkou kovovou vrstvou

Za zmínku také stojí vývoj speciálních SAC slitin, které jsou obohaceny o malé, stopové množství prvků jako nikl, kobalt, mangan, bismut, antimon nebo germanium. Tyto slitiny mohou zvýšit spolehlivost pájených spojů zvláště v aplikacích, kde se používá kuličkových vývodů (například pouzdra typu BGA – angl. *ball grid array*), pro které byly vyvíjeny. Na druhou stranu, vztah mezi mikrostrukturou pájeného spoje, respektive pájky, a spolehlivostí není dosud zcela pochopen [26]. Studie zabývající se SAC slitinami s příměsí bismutu a antimonu dokonce ukázaly, že vlastnosti těchto obohacených slitin (angl. *micro-alloyed*) se od klasických SAC příliš neliší [39], [40]. Mohou však snížit například výskyt tzv. Tombstone efektu (viz kapitola 4.1.2 *Efekt náhrobního kamene*) v případě pájení v parách [39]. Slitiny obohacené o bismut, antimon a

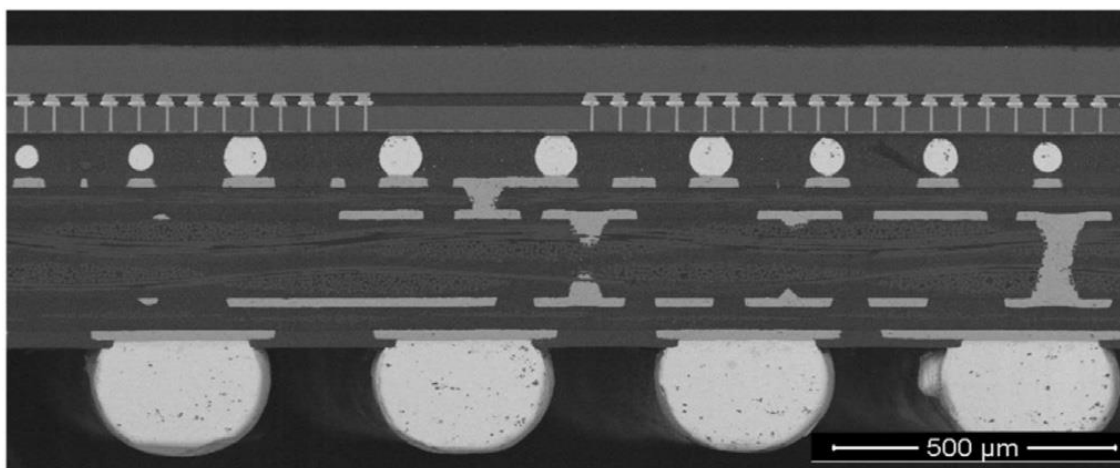
nikl (označované také jako Innolot slitiny) zase mají oproti klasickým SAC vyšší hodnotu aktivační energie intermetalických sloučenin a rostou tedy rychleji [41].

### 3.2.2.2 Slitiny Sn-Zn

Slitiny na bázi cínu a zinku mají bod tání okolo 190 °C, tedy přibližně stejně jako klasické olovnaté pájky. Na první pohled se tedy zdají být dobrými kandidáty pro bezolovnaté pájení. Dokonce mají velmi nízkou toxicitu a obecně dopad na životní prostředí, jsou proto často označované jako ekologicky šetrné (angl. *eco-friendly*) [42]. Nicméně, zinek je velmi náchylný k oxidaci, cín-zinkové pájky tedy vyžadují použití velmi agresivních tavidel. Často také z tohoto důvodu obsahují tyto slitiny další prvky jako bismut nebo indium, které upravují jejich vlastnosti a podporují smáčení. Na druhou stranu, přidané prvky celkem pochopitelně zvyšují cenu pájky, což je jedním z důvodů, proč nemají tyto slitiny takový potenciál být rozšířené v praxi jako slitiny SAC [25].

### 3.2.2.3 Slitiny Sn-Bi a Sn-In – nízko-teplotní slitiny

Cínové slitiny, které obsahují bismut nebo indium, jsou označované jako nízko-teplotní, protože se jejich bod tání pohybuje pod 180 °C. Význam těchto slitin v praxi je zřejmý. Lze je s výhodou použít pro pájení teplotně citlivých součástek, pro které je pracovní teplota klasických bezolovnatých pájek příliš vysoká a mohlo by dojít k jejich zničení. Dále se používají v oblasti oprav elektroniky, kde je rovněž vyžadována nižší pracovní teplota, aby nedošlo k poškození součástek a pájených spojů v okolí opravovaného spoje.



**Obrázek 4.** Ukázka čipu využívající vnitřní propojení pomocí pájky (převzato z [43])

Objevují se také pouzdra, která pro vnitřní spoje využívají pájené spoje (označují se jako 3D pouzdra, angl. *solder-based 3D packaging*, viz například obrázek 4). Zde je samozřejmě nezbytné použít pro připojení takového pouzdra k desce plošných spojů pájku s nižší teplotou tání, než mají

vnitřní spoje, jinak by došlo k jejich poškození [25], [43]. Zmíněné aplikace a mnohé další pohánějí výzkum v této oblasti neustále vpřed.

Příklady slitin spadajících do této kategorie a vybrané vlastnosti je možné nalézt v následující tabulce.

**Tabulka 3.** Vybrané nízko-teplotní slitiny na bázi Sn-Bi a Sn-In a jejich vlastnosti [25], [44]–[48]

Pájecí slitina	Teplota tání/tuhnutí (°C)	Youngův modul (GPa)	Pevnost v tahu (MPa)
Bi-42Sn	138/138	12	60
Bi-42Sn-0,4Ag	142/137	39	67
In-48Sn	118/118	-	12
Sn-50In	125/118	-	20

Jak je vidno, bizmutové pájky mají dokonce lepší mechanické vlastnosti než klasické olovnaté pájky, vykazují též dobré smáčení a jejich cena je srovnatelná se slitinami SAC. Nicméně je nutné zmínit určité nevýhody těchto pájek. Dostupnost bismutu je omezená a získává se mimo jiné jako vedlejší produkt při těžbě olova, proto slitiny cínu a bismutu nejsou zrovna nejvhodnější alternativa olovnatých pájek s přihlédnutím na relativně vysoký negativní environmentální dopad [42]. Další potenciální problém může nastat, pokud měděný substrát desky plošného spoje obsahuje olovo (například při použití povrchové úpravy HASL – viz kapitola 3.2.6.1 – na základě cínu-olovnaté pájky). V takovém případě tvoří slitina Bi-42Sn společně s olovem ternární systém tající při 96 °C, což může citelně ohrozit spolehlivost pájených spojů [49]. Cín-bizmutové pájky jsou také náchylné na vznik prasklin, pokud jsou vystaveny tepelnému či mechanickému cyklickému zatížení. Z toho důvodu se do eutektické slitiny přidává malé množství stříbra (okolo 0,5-1 hm. %), které zlepšuje mechanickou odolnost pájky [50]. Přes tyto nevýhody jsou v kategorii nízko-teplotních pájek cín-bizmutové pájky v praxi nejrozšířenější.

Společnost Intel (přední světový výrobce čipů a procesorů) dokonce představila myšlenku náhrady klasických SAC pájek za cín-bizmutové při připojování BGA čipů na desky plošných spojů s cílem snížit teplotu procesu a tím negativní dopad na životní prostředí. Při procesu pájení by došlo ke vzniku tzv. hybridního spoje, kdy by se roztavila pouze bizmutová pájecí pasta, která by smočila pájecí plošku a neroztavené kuličkové SAC vývody. Energetická úspora by mohla být až o 40 %, zároveň se během zkušebních testů neukázal pokles ve spolehlivosti [51].

Co se týče růstu intermetalických sloučenin těchto slitin během tepelného stárnutí, vybrané výsledky z předchozích výzkumů shrnuje tabulka 4. Vědeckých publikací, které by se komplexně věnovaly růstu intermetalických sloučenin bizmutových pájek včetně determinace aktivační energie, není mnoho, navíc jsou opět patrné rozdíly mezi jednotlivými výsledky. Ty mohou být dané procesem přípravy vzorku, stárnutím pájených spojů nebo právě použitým tavidlem.



**Tabulka 4.** Kinetika intermetalických sloučenin pro slitiny Sn-Bi – rešeršní přehled

Pájecí slitina	Pájený substrát	Použité tavidlo	Způsob vytvoření pájeného spoje	Aktivační energie intermetalické sloučeniny, Q (kJ/mol)	Zdroj
Bi-42Sn	Cu	Vodou rozpustné organické tavidlo	Ponoření do roztavené lázně	55	[52]
	Cu	Není specifikováno	Přetavení v peci	128	[53]
	Ni	Není specifikováno	Přetavení v peci	82	[53]
	Ni	RMA	Ponoření do roztavené lázně	90	[54]

Slitiny cínu a india jsou relativně drahé kvůli vysokému procentnímu zastoupení india ve slitině, jehož dostupnost je také poměrně omezená. Není zde proto předpoklad, že by se staly vhodnou alternativou v oblasti bezolovnatého nízko-teplotního pájení [42]. Na druhou stranu, indium může být výhodné jako aditivum (v malém procentuálním zastoupení) v moderních pájkách založených na cínu, zinku a bizmutu (slitiny Sn-Zn-Bi-In). Přítomnost india (0,5-2 hm. %) zlepšuje smáčení pájky. Dokonce, teplota tání slitiny Sn-8Zn-3Bi-1,5In je okolo 186 °C, což je velmi blízko eutektické olovnaté slitině, má tedy potenciál stát se vhodnou alternativou [55].

### 3.2.3 Olovnaté slitiny Sn-Pb

Ačkoli v současné době středně-teplotní olovnaté slitiny mizí z trhu ve velkém, pájky s olovem mají přes to stále své místo v průmyslu. Jedná se především o pájky s vysokým obsahem olova, které patří do skupiny vysoko-teplotních pájek s teplotou tání okolo 300 °C. Ty jsou nezbytné například v aplikacích, kde se uvažuje o maximální pracovní teplotě okolo 150 °C. Tento požadavek splňují i jiné slitiny, například Sn-Au, ta je ovšem příliš drahá na praktickou využitelnost. Dobrých výsledků bylo dosaženo s pájkami Zn-Sn, Bi-Sn-Cu (s vysokým procentuálním zastoupením bismutu, například Bi-2Sn-3Cu), které společně s Sn-Au tvoří tři nejlepší kandidáty na alternativu vysokoteplotního olovnatého pájení. Další možností je také využití vodivých lepidel [56]. Nicméně zatím prakticky jedinou vhodnou slitinou pro vysoko-teplotní pájení i nadále zůstává 95Pb-5Sn [25].

Stejně jako jiné pájecí slitiny s obsahem cínu, i 95Pb-5Sn tvoří s měděným substrátem intermetalické sloučeniny na bázi mědi a cínu, podle literatury především  $Cu_3Sn$ . Aktivační energie této sloučeniny se pohybuje okolo 54 kJ/mol [57], [58].

### 3.2.4 Formy pájecí slitiny

Pájecí slitina se pro praktickou aplikaci dodává v několika formách podle použité technologie:

- pájecí drát (plný, či dutý s obsahem tavidla pro ruční pájení či strojní pájení pomocí pájecích robotů),
- tyče (pro účely doplňování slitiny do roztavených lázní při pájení vlnou či ponorem),
- pájecí kuličky (pro účely oprav pouzder typu BGA, tzv. překuličkování – angl. *reballing*),
- pájecí pasta.

Z hlediska praxe je dnes nejvýznamnější používanou formou pájecí pasta, která se používá v technologii povrchové montáže u pájení přetavením. I v dalších kapitolách bude řeč pouze o pájce v této formě. Pájecí pasta se skládá z několika složek:

- kuliček pájecí slitiny,
- tavidla,
- složky upravující lepivost a viskozitu
- a rozpouštědla.

Kuličky pájecí slitiny obsažené v pájecí pastě mívají obvykle průměr mezi 10 a 50  $\mu\text{m}$ , v některých případech i jednotky, případně stovky  $\mu\text{m}$ . Na základě velikosti kuliček se pájecí pasty dělí dle mezinárodního standardu IPC J-STD-005A na 7 skupin. V praxi jsou nejpoužívanější následující [59], [60]:

- T3 (velikost min. 80 % kuliček 25-45  $\mu\text{m}$ ),
- T4 (velikost min. 80 % kuliček 20-38  $\mu\text{m}$ )
- a T5 (velikost min. 80 % kuliček 15-25  $\mu\text{m}$ ).

Tavidla, která jsou obsažena v (především bezolovnatých) pájecích pastách jsou popsána v následující kapitole 3.2.5. Důležitou složkou pájecí pasty je rozpouštědlo (solvent), které slouží jako nosný materiál. Při nevhodné volbě solventu s nízkou teplotou varu může docházet k prskání a tím k ulpívání residuí pájecí pasty (především tavidla) na desce plošného spoje (viz kapitola 4.3.4) [61].

### 3.2.5 Tavidla

Jak již bylo řečeno v kapitole 3.1, tavidlo je zásadní látkou ovlivňující proces smáčení tekuté pájky, a tedy ve svém důsledku ovlivňuje vznik pájeného spoje. Jeho úkolem je před roztavením pájky a v momentě roztavení zbavovat povrchy (pájený substrát a pájku) nečistot a oxidů. V závislosti na typu slitiny je třeba použít vhodné tavidlo s určitou mírou chemické agresivity – některé pájky smáčejí substrát velmi dobře i za použití minimálního množství chemicky slabých

tavidel (typicky dnes již prakticky nepoužívaná olovnatá pájka 63Sn-37Pb), jiné pájky je třeba při procesu smáčení podpořit podstatně více (většina bezolovnatých pájek).

### 3.2.5.1 Chemické složení tavidel

Tavidlo je homogenní směs chemických sloučenin, které se liší podle typu tavidla. Obecně lze ale říci, že se skládá z následujících složek [1], [3], [61]:

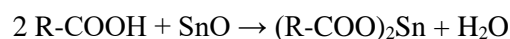
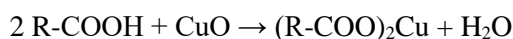
- tavidlového nosiče,
- aktivátoru,
- aditiv,
- a rozpouštědla.

Zde je nutné podotknout, že se jedná o obecný popis tavidla. V případě použití tavidla v pájecí pastě se aditiva a rozpouštědla rovnají těm, které byly popsány v předchozí kapitole jakožto součást pájecí pasty.

Tavidlový nosič je základní látka, která je schopna základní funkce tavidla, tedy redukce oxidů a nečistot. Často tím bývá pryskyřice, a to buď jako přírodní látka (angl. *rosin*) nebo synteticky připravená (angl. *resin*). Přírodní pryskyřice je chemicky složena z organických kyselin jako je kyselina abietová, neoabietová, pimarová a podobné. Získává se z mízy borovic a její kvalita silně závisí na místě původu i ročním období. To zároveň zvyšuje její cenu na trhu. Z tohoto důvodu se začaly používat synteticky připravované pryskyřice, jejichž základem jsou také organické kyseliny [2], [3], [62], [63].

Pryskyřicová tavidla, respektive zbytky těchto tavidel na desce plošného spoje po procesu pájení, jsou chemicky inertní, tuhé, a dokonce chrání desku před vlivy prachu a vlhkosti. Ovšem již při teplotě 50 °C se stávají lepkavými a prach na nich naopak začne ulpívat. Při teplotě 80 °C přecházejí do tekutého stavu a jsou opět chemicky aktivní a plní funkci tavidla [3].

Chemická reakce redukce kovových oxidů (u cínových pájek a měděných substrátů jde především o oxidy CuO a SnO) se dá vyjádřit následovně [62]:



R zde reprezentuje karboxylový zbytek, v případě kyseliny abietové se jedná o C<sub>19</sub>H<sub>29</sub>. Vzniklé soli jsou rozpustné v roztaveném tavidle.

Kromě pryskyřicových tavidel existuje i celá řada tavidel, u nichž funkci tavidlového nosiče (a obvykle i aktivátoru) plní jiná chemická látka, příkladem může být chlorid zinečnatý nebo

kyselina chlorovodíková. Tyto látky mohou mít obecně organický i anorganický charakter, ať se jedná o soli, kyseliny nebo jejich kombinaci [1]–[3], [64], [65].

Pryskyřicová tavidla nejsou především pro moderní bezolovnaté pájky dostatečně aktivní, a proto se do tavidla přidává látka, která se označuje jako aktivátor. Ten podporuje jejich funkci. Obecně to jsou polární, vysokomolekulární organické sloučeniny. Podle toho, zda obsahují atomy některého halogenového prvku, se dělí na halidy (obsahující především chloridy nebo bromidy) a aktivátory bez halogenových prvků (angl. *halogen-free*). Aktivátor sám o sobě je vlastně tavidlem, a to o dost chemicky agresivnější než pryskyřice. Důležitým požadavkem na aktivátory je jejich plná rozpustnost v pryskyřici i rozpouštědle, aby byly tyto látky bezpečně uzavřeny v objemu tavidlového zbytku a nemohly zvyšovat vodivost či vytvářet lokální korozivní ohniska [3].

Aditiva opět upravují vlastnosti tavidla, především jeho reologické vlastnosti. Jako rozpouštědlo může být použit isopropyl-alkohol. Ten však spadá do kategorie těkavých organických látek (angl. *volatile organic compounds* – VOC), u kterých je snaha o jejich omezení, proto se používají i další, nižší alkoholy, případně voda (v tomto případě se nejedná o pryskyřicová tavidla, protože pryskyřice není rozpustná ve vodě) [3].

### 3.2.5.2 Dělení tavidel

Tavidla můžeme obecně dělit na [1], [61], [66]:

- pryskyřicová (běžně označovaná jako R),
- aktivovaná pryskyřicová (běžně označovaná RMA – angl. *rosin mildly activated*, případně RA – angl. *rosin activated*),
- organická (neobsahující pryskyřici)
- a anorganická.

Speciálními kategoriemi tavidel jsou vodou-rozpustná (angl. *water-soluble*) a bezoplachová tavidla (angl. *no-clean*). Cílem vývoje těchto tavidel je především zjednodušit či zcela eliminovat mycí a čistící procesy po pájení a tím snížit náklady na výrobu. Zvlášť bezoplachová tavidla jsou velmi běžná v moderních pájecích pastách (a jsou také předmětem studií popsaných v této práci), na trhu mají podíl přibližně 40 % [67], proto se jim věnuje i celá následující podkapitola.

Tavidla jsou kategorizována podle mezinárodně uznávaných norem. V praxi k používaným patří mezinárodní normy MIL-F-14256F [68] (tabulka 5, v dnešní době již neplatná), IPC-J-STD-004B [69] (

tabulka 6), EN ISO 9454-1 (tabulka 7), a česká harmonizovaná norma ČSN EN 61190-1-1 [70], která přebírá značení ze zmiňované IPC normy.

Tabulka 5. Rozdělení tavidel podle normy MIL-F-14256F [68]

Označení tavidla	Popis
R	Pryskyřičné tavidlo bez dodatečných aktivátorů
RMA	Mírně aktivované pryskyřičné tavidlo
RA	Aktivované pryskyřičné tavidlo
WSF-0	Vodou rozpustné organické tavidlo bez obsahu polyglykolu
WSF-1	Všechna ostatní vodou rozpustná organická tavidla
LR	Tavidla s nízkým obsahem sušiny pro minimalizaci tavidlových zbytků po pájení

Tabulka 6. Rozdělení tavidel podle normy IPC-J-STD-004B [69]

Základ tavidla	Aktivita tavidla	Zastoupení halidů (hm. %)	Označení
Přírodní pryskyřice	Nízká	<0,05	ROL0
		<0,5	ROL1
	Střední	<0,05	ROM0
		0,5-2,0	ROM1
	Vysoká	<0,05	ROH0
		>2,0	ROH1
Syntetická pryskyřice	Nízká	<0,05	REL0
		<0,5	REL1
	Střední	<0,05	REM0
		0,5-2,0	REM1
	Vysoká	<0,05	REH0
		>2,0	REH1
Organické sloučeniny	Nízká	<0,05	ORL0
		<0,5	ORL1
	Střední	<0,05	ORM0
		0,5-2,0	ORM1
	Vysoká	<0,05	ORH0
		>2,0	ORH1
Anorganické sloučeniny	Nízká	<0,05	INL0
		<0,5	INL1
	Střední	<0,05	INM0
		0,5-2,0	INM1
	Vysoká	<0,05	INH0
		>2,0	INH1

Tabulka 7. Rozdělení tavidel podle normy ISO 9454-1:2016 [71]

Základní typ tavidla	Tavidlový nosič	Aktivátor	Obsah halidů
1 – pryskyřicové	1 – přírodní pryskyřice 2 – syntetická pryskyřice	1 – bez aktivátoru 2 – halogenidy 3 – bez halogenů	
2 – organické	1 – rozpustný ve vodě 2 – nerozpustný ve vodě	1 – bez aktivátoru 2 – halogenidy 3 – bez halogenů	< 0,01 %
3 – anorganické	1 – soli ve vodném roztoku 2 – soli v organickém složení 3 – kyseliny 4 – zásady	1 – NH <sub>4</sub> Cl (chlorid amonný) 2 – bez NH <sub>4</sub> Cl 1 – kyselina fosforečná 2 – jiné kyseliny 1 – aminy nebo amoniak	< 0,15 % 0,15 až 0,2 % > 0,2 %

### 3.2.5.3 Bezoplachová (no-clean) tavidla

Tavidla, která se označují jako bezoplachová, zanechávají (nebo by minimálně měla zanechávat) inertní, nekorozivní zbytky po pájení, které se nemusí dále omývat. Tyto zbytky by neměly nijak ohrožovat spolehlivost a životnost zařízení. Důvodem k vývoji těchto tavidel je ušetření nákladů za mycí procesy desek plošných spojů po pájení a také omezení používání rozpouštědel na bázi chlor-fluorovaných uhlovodíků (angl. *chlorofluorocarbons* – CFCs) právě na omývání tavidlových zbytků [72].

Tato tavidla bývají založena na pryskyřici a aktivátorech na bázi slabých organických kyselin (angl. *weak organic acid* – WOA), nejčastěji karboxylové kyseliny. Jako rozpouštědlo buď látky spadající do kategorie VOC (typicky alkoholy), případně VOC-free, které jsou založené na vodě. Typickou vlastností těchto tavidel je, že obsahují oproti klasickým tavidlům velmi nízký obsah sušiny (tedy pryskyřice, případně halidů), okolo dvou až tří hmotnostních procent. Tím se zamezí nadměrnému vzniku tavidlových zbytků po pájení. Z toho ale také vyplývá, že jsou o něco méně aktivní než běžná tavidla [2], [66], [73]–[76]. Podle přehledové studie Wakeel et al. [74] obsahují bezoplachová tavidla také aditiva ve formě aminů, která slouží nejen k podpoře aktivátorů, ale i k rozpustnosti těchto tavidel v epoxidové hmotě, kterou se podlepují čipy (angl. *underfill*). Zastoupení jednotlivých složek (v případě bezoplachových tavidel bez obsahu pryskyřice) je v rozmezí 0,1-15 hm. % aktivátoru, 60-99 hm. % rozpouštědla a 0,2-25 hm. % aditiv [74].

I přes uvedené výhody bezoplachových tavidel se však mnoho studií (například [75]–[79]) seriózně zabývá vlivem jejich zbytků na korozivní procesy, případně i na problém elektrochemické migrace (viz kapitola 4.2.2 *Růst dendritů*).

### 3.2.6 Materiály desek plošných spojů

Deska plošných spojů (DPS) má dva základní úkoly – slouží jako nosný podklad a mechanicky fixuje součástky a zároveň součástky funkčně vodivě propojuje v elektrický obvod. Je to zároveň nejčastější aplikace pájených spojů v elektronické montáži. DPS se skládá ze dvou základních materiálů nutně se diametrálně odlišujících ve svých elektrických vlastnostech:

- substrátu z vhodného izolantu
- a z vhodného vodiče pro vytvoření elektrického obvodu.

Izolační substrát musí splňovat celou řadu požadavků, například vysokou hodnotu povrchového odporu, nízkou permitivitu, teplotní odolnost nebo trvanlivost. S výhodou se využívá materiálů na bázi epoxidových pryskyřic, nejčastěji ve spojení se skelnou tkaninou. Tento kompozitní materiál má označení FR4 (z anglického *flame-retardant*, to odkazuje na přítomnost látek zabraňující vznícení) a v elektronické montáži jde o jeden vůbec z nejrozšířenějších izolačních substrátů [66], [80]–[82]. Výroba takového substrátu probíhá impregnací jednotlivých skelných tkanin částečně vytvrzenou epoxidovou pryskyřicí (takovéto fólie se nazývají *prepregy*) a jejich následným skládáním na sebe (podle požadované výsledné tloušťky laminátu) a zalisováním při vysoké teplotě a tlaku [82]. Výrobní postup má významný vliv na míru vytvrzení obsažených pryskyřic a výsledné termomechanické vlastnosti substrátů, což může ovlivnit kvalitu pájených spojů už při pájecím procesu, ale i z hlediska dlouhodobé stability (delaminace, kroucení substrátu atp.) [83].

Kromě laminátu FR4 se v menší míře používají další substráty podle požadované aplikace – fenolické pryskyřice s bavlněným či buničitým papírem (s označením FR2) jako levnější náhrada FR4, termoplastické materiály jako polyimid, polyester či LCP (angl. *Liquid Crystal Polymer*) pro flexibilní substráty, substráty na bázi teflonu nebo keramiky pro vysokoteplotní aplikace atp. [81], [82].

Elektrovodným materiálem tvořící obrazec elektrického obvodu na povrchu izolačního substrátu je v drtivé většině aplikací měď, která je používána kvůli dostupnosti, zpracovatelnosti a elektrické vodivosti. V procesu výroby je měď ve formě tenké fólie nanášena na základní nosný substrát laminováním, lepením či kombinací, případně může být měděná vrstva vytvořena elektro-depozicí [66], [81]. Vodivý obrazec pak vznikne fotochemickým procesem (fotolitografií), při kterém jsou využívány krycí vrstvy reagující na UV záření a leptadla pro odleptání nezakrytých měděných ploch [80].

Ve většině případů se však DPS nedodávají s pájecími ploškami pro vznik pájených spojů bez povrchové úpravy, protože měď velmi snadno reaguje s okolním prostředím a vytváří na povrchu vrstvu oxidů, které mohou znemožňovat pájení. Proto se používají povrchové úpravy pro

dočasnou ochranu mědi před samotným pájením, které jsou popsány v následující podkapitole 3.2.6.1; mohou mít zcela zásadní vliv na pájené spoje ve smyslu vzniku intermetalických sloučenin a reakcí použitého tavidla. Dalším důležitým materiálem (dielektrickým) je tzv. *nepájivá maska*, která slouží především k zakrytí měděných cest okolo pájecích plošek, které by neměly být smočeny roztavenou pájkou – té je věnována podkapitola 3.2.6.2. Nepájivá maska tvoří povrch DPS okolo pájecích plošek a tím může ovlivňovat roztékání tavidla do okolí, ale například i teplotní distribuci na DPS během pájecího procesu.

### 3.2.6.1 Povrchové úpravy pájecích plošek

Mezi základní a zároveň nejpoužívanější povrchové úpravy pájecích plošek na DPS patří [1], [80], [81]:

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

Povrchová úprava HASL (též je možné použít zkrácené označení HAL, angl. *hot-air leveling*) se vytváří ponorem DPS do roztavené lázně pájecí slitiny. V dnešní době se v drtivé většině jedná o bezolovnaté slitiny (SAC, SnCu, SnCuNi, SnCuNiGe). Při vynořování DPS z lázně je přebytečná pájka odstraněna proudem horkého vzduchu (tzv. horkovzdušnými noži). Tímto se vytvoří povlak o tloušťce přibližně 2-20  $\mu\text{m}$ . Tato povrchová úprava je procesně poměrně jednoduchá, což se podepisuje i na nízké finální ceně této povrchové úpravy oproti jiným. Je poměrně dlouho trvanlivá, vhodná pro THT montáž a jednodušší SMT montáž. Nikoliv však pro velmi jemnou SMT montáž, například pro pájení BGA čipů, protože povrch této úpravy je značně nehomogenní a nerovný. Další nevýhodou je velký teplotní šok, který dostane DPS během procesu tvorby této povrchové úpravy. Tento šok může vést ke změnám termomechanických vlastností základního substrátu, ke kroucení, delaminaci atp. U povrchové úpravy může být také problematická pre-existence intermetalické vrstvy mezi mědí a pájkou, která tvoří úpravu HASL. Výsledná tloušťka intermetalické vrstvy může být po procesu pájení větší než u ostatních povrchových úprav a může mechanicky oslabit pájený spoj. Vyšší procentuální zastoupení cínu ve slitinách aktuálně používaných pro HASL úpravu oproti dřívějším olovnatým má také za následek vyšší riziko růstu whiskerů (viz kapitola 4.2.1 Růst whiskerů) [80], [81], [84].

Povrchová úprava OSP je tvořena organickým povlakem (tedy jako jediná z výše uvedeného výčtu není tvořena kovovou vrstvou). Chemicky se jedná o ne úplně jednoduchou látku složenou z imidazolu, benzotriazolu nebo benzimidazolu rozpuštěného ve vodě a organické kyselině. Procesně je však nanášení tohoto povlaku velmi jednoduchou záležitostí (nanáší se většinou

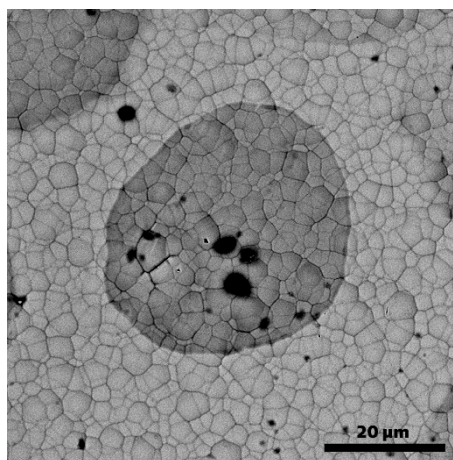


ponorem DPS do chemické lázně), a tak se OSP řadí mezi nejlevnější povrchové úpravy. Povrch této úpravy je poměrně rovnoměrný a vhodný pro jemnou montáž; jeho tloušťka se pohybuje v řádu desetin mikrometru (přibližně 0,1-0,6  $\mu\text{m}$ ). Jeho nevýhodou je však omezené použití in-circuit a dalších elektrických testů, a také jeho degradace (ať už časem – doba použitelnosti je přibližně půl roku – nebo vícenásobným pájecím cyklem), je tedy vhodný spíše pro nenáročné aplikace [80], [81], [85], [86].

ENIG je povrchová úprava vytvořená chemickým pokovováním, a to nejprve spodní vrstvou niklu, nanesenou bezproudovou depozicí o tloušťce přibližně 3-5  $\mu\text{m}$ , a dále vrchní vrstvičkou zlata, která se nanáší chemickou depozicí. Ta má tloušťku přibližně 0,05-0,15  $\mu\text{m}$ . Tato úprava se vyznačuje velice hladkým a rovným povrchem, je tedy vhodná i pro ty nejnáročnější aplikace (například pro pájení pouzder typu BGA). Zároveň má velmi dlouhou dobu skladovatelnosti, protože zlato odolává oxidaci a dalším vnějším vlivům. Během pájení se zlato okamžitě rozpouští v roztavené pájce a ta následně výborně smáčí obnažený nikl, se kterým poté tvoří intermetalické sloučeniny. Tato povrchová úprava je však dražší a trpí i některými dalšími neduhy. Nejznámějším je tzv. black-pad efekt, jedná se o korozi niklu během ponoru ve zlaté lázni a souvisí s vyšším obsahem fosforu v niklové vrstvě (viz kapitola 4.1.7). Pájené spoje mohou být také mechanicky oslabeny díky křehčí intermetalické sloučenině ( $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$ ) [80], [81].

Vysoká porozita zlaté vrstvičky úpravy ENIG může také vést k částečnému obnažení niklu, který následně začne oxidovat. Důsledkem toho je i změna barvy povrchu, ale především zhoršení pájitelnosti [87]. Pórovitost povrchu ENIG znázorňuje obrázek 5, který byl pořízen během řešení tohoto problému na Katedře elektrotechnologie s průmyslovým partnerem. Z důvodu problémů s oxidací niklu v případě nekvalitní zlaté vrstvy dělají někteří výrobci DPS galvanické pokovování niklem/zlatem, které na rozdíl od chemického procesu vytváří velmi homogenní vrstvu.

Alternativou k povrchové úpravě ENIG je ENEPIG (angl. *electroless nickel-electroless palladium-immersion gold*), která byla vytvořena také za účelem snížení problémů s nežádoucí oxidací niklu a black-pad efektem. Mezi vrstvami niklu a zlata je vytvořena ještě vrstva paladia o tloušťce 100-200 nm. Ta částečně blokuje růst intermetalických vrstev a zajišťuje tak delší životnost pájeného spoje, také se hodí více na bezolovnaté pájení. Ve srovnání s ENIG vykazují pájené spoje na ENEPIG lepší mechanické



**Obrázek 5.** Povrch pájecí plošky s úpravou ENIG – snímek z elektronového mikroskopu; tmavší místa odpovídají oxidové vrstvičce niklu

vlastnosti. Nevýhodou je vyšší náchylnost k elektrochemické migraci oproti ostatním povrchovým úpravám [88], [89].

Intermetalické sloučeniny, které vznikají mezi pájkou a měděnými ploškami opatřenými niklovými povrchovými úpravami, mají kromě jiných mechanických vlastností i rozdílnou kinetiku růstu než sloučeniny CuSn, při tepelném stárnutí spojů rostou významně pomaleji. Pro srovnání, aktivační energie SAC305 na ENIGu je přibližně 100 kJ/mol [90], což je až dvakrát více než pro stejnou pájku na měděném substrátu (viz tabulka 2).

Imerzní cín (ImSn) patří stejně jako ENIG k povrchovým úpravám, které jsou tvořeny chemickým pokovováním. Jedná se o tenkou vrstvu čistého cínu o tloušťce přibližně 1  $\mu\text{m}$ . Povrch je pak velmi rovinný a vhodný na pájení jemných SMD součástek. Nicméně ImSn má velmi krátkou životnost (přibližně 6 měsíců), a to především kvůli intermetalickým vrstvám mezi mědí a cínem, které poměrně brzy prorostou, případně zcela nahradí cínovou vrstvu a povrch se tak stává nepájitelným. Zároveň je tato povrchová úprava velmi náchylná na růst cínových whiskerů [84], [88], [91].

Imerzní stříbro (ImAg) je posledním z výše uvedeného výčtu a jedná se také o chemické pokovování. Vrstva stříbra má pak tloušťku přibližně 100-200 nm. Je to levnější varianta než ENIG, zároveň s lepšími vlastnostmi a trvanlivostí než ImSn. Nevýhodou je pak v delším časovém horizontu koroze stříbra na nezapájených plochách a větší náchylnost k elektrochemické migraci [88], [92].

### 3.2.6.2 Nepájitvá maska

Nepájitvá maska (angl. *solder mask* nebo také *solder resist*) je aplikována na povrch DPS kromě pájecích plošek (a dalších míst, kde má zůstat obnažený kov). Chrání ostatní části DPS před smočením tekutou pájkou (a možnému vzniku můstků – zkratů), zajišťuje také ochranu vodivého měděného motivu proti pronikání vlhkosti a prachu, zlepšuje izolační vlastnosti. Snižuje riziko elektrochemické migrace. Bývá založena na epoxidových materiálech, které jsou vytvrditelné UV světlem nebo teplem. Podle toho se také dělí na fotocitlivou nepájitvou masku a přímo nanášenou nepájitvou masku [80], [81], [93].

Fotocitlivá nepájitvá maska se vytváří pomocí fotolitografického procesu, do nějž vstupuje buď v tekuté formě (pak se na DPS nanáší například sítotiskem, licí clonou, sprejováním atp.) nebo ve formě tenkého suchého filmu. Tyto materiály jsou vytvrditelné UV světlem. Jedná se o nejčastější způsob vytváření nepájitvých masek [80]; dále v textu budou tedy označovány jako „klasické“.

Přímo nanášená maska může být vytvořena opět sítotiskem, ovšem přes krycí motiv – na DPS se tak nanese již finální motiv. Maska je pak následně vytvrzena teplem. Jedná se o historicky

starší způsob [80]. V dnešní době se do výroby DPS přímé nanášení nepájivé masky vrací – jedná se však o tisk pomocí tiskařského, plně automatického zařízení [94].

Výsledná nepájivá maska musí splňovat určité požadavky – teplotní odolnost, chemická stálost a kompatibilita s RoHS, minimální degradace a další vlastnosti. Nejpoužívanějším standardem pro charakterizaci vlastností nepájivé masky je mezinárodní norma IPC-SM-840E. Ta definuje čtyři třídy nepájivých masek podle použití:

- T – *Telecommunication* (nepájivé masky pro běžnou elektroniku, telekomunikační zařízení, počítače atp.)
- H – *High Reliability/Military* (nepájivé masky pro elektroniku s vyššími spolehlivostními nároky, vojenská technika)
- FT – *Flexible Printed Board Applications (Telecommunications)* (nepájivé masky pro použití s flexibilními DPS pro běžnou elektroniku)
- FH – *Flexible Printed Board Applications (High Reliability/Military)* (nepájivé masky pro použití s flexibilními DPS pro elektroniku s vyššími spolehlivostními nároky)

Nepájivá maska může být také charakterizována různou drsností povrchu, a tedy schopností různě odrážet dopadající světlo, podle toho se obvykle rozděluje na lesklé, pololesklé/polomatné, matné. Jedná se především o estetickou záležitost, případně požadavek z hlediska optické kontroly elektronické montáže [80]. Jak bude ukázáno dále v experimentální části, drsnost povrchu nepájivé masky ale zároveň ovlivňuje například roztékání tekutého tavidla po jejím povrchu.

Nepájivou masku nelze nanést s nulovým odstupem od pájecí plošky díky konečné přesnosti zařízení pro nanášení/osvit nepájivé masky z hlediska sesouhlasení motivu vodivých cest a motivu nepájivé masky. Nabízí se tedy dvě řešení [95]:

- nepájivá maska má od pájecí plošky odstup (podle možností výrobce)
- nepájivá maska přesahuje přes okraje měděné plošky

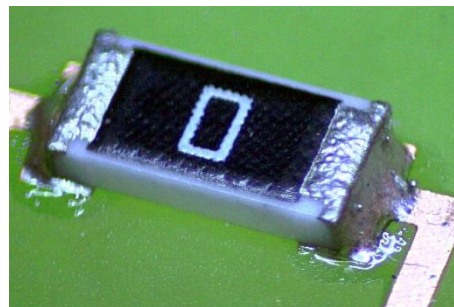
Tyto dvě alternativní možnosti designu pájecí plošky jsou detailněji popsány v kapitole 5.1, kde je také diskutován vliv designu na roztékavost tavidla.

### 3.3 Povrchová montáž a pájení přetavením

#### 3.3.1 Charakteristika procesu

Technologický proces pájení je v dnešní době charakterizován dominantním využitím povrchové montáže (angl. *surface mount technology* – SMT). Součástky pro povrchovou montáž (angl. *surface mount device* – SMD) jsou na DPS osazovány ze stejné strany, jako je strana vodivého motivu. Vývody těchto součástek mohou mít různý tvar – typicky se používají vývody

typu „rací křídlo“ (angl. *gull wing legs*), vývody typu „J“ (angl. *J-legs*) nebo vývody ve tvaru kuliček pro součástky integrovaných obvodů; pasivní či aktivní dvou-vývodové součástky (rezistory, kondenzátory, LED) bývají v provedení tzv. „bezvývodovém“ (pájecí plošky jsou vytvořeny přímo na těle součástky, viz obrázek 6) [3], [66]. Využitím těchto součástek dochází ve srovnání s dříve dominující technologií



**Obrázek 6.** Ukázka povrchové montáže – pasivní dvou-vývodová SMD součástka

THT (angl. *through hole technology*, montáž skrz díru) především ke značné miniaturizaci (menší součástky, možnost oboustranné montáže), což je obecný trend a cíl v elektronické montáži.

Z hlediska samotného pájení (způsobu dodání pájky, typu ohřevu) se v drtivé většině využívá pájení přetavením, v malé míře přetrvává i pájení vlnou (spíše než s klasickými pájecími vlnami se ale ve výrobě můžeme setkat s tzv. selektivními vlnami, které slouží k zapájení větších THT součástek, typicky konektorů).

Celý technologický proces povrchové montáže s využitím pájení přetavením vypadá obecně následujícím způsobem [1]–[3], [25], [29], [66]:

1. nanesení pájecí pasty na DPS,
2. osazení součástek na DPS,
3. přetavení pájecí pasty v pájecí peci,
4. čištění DPS, kontrola.

Tento výčet je samozřejmě velmi zjednodušující, v praxi, a především v sériové výrobě čítající i tisíce kusů osazených DPS za hodinu, jsou nutné další mezioperační kontroly (kontrola pájecí pasty po nanesení, kontrola osazených součástek, elektrické testy po zapájení atd.), případně čistící procesy. Jednotlivé kroky se navíc mohou lišit pro různé technologie ohřevu u pájení přetavením.

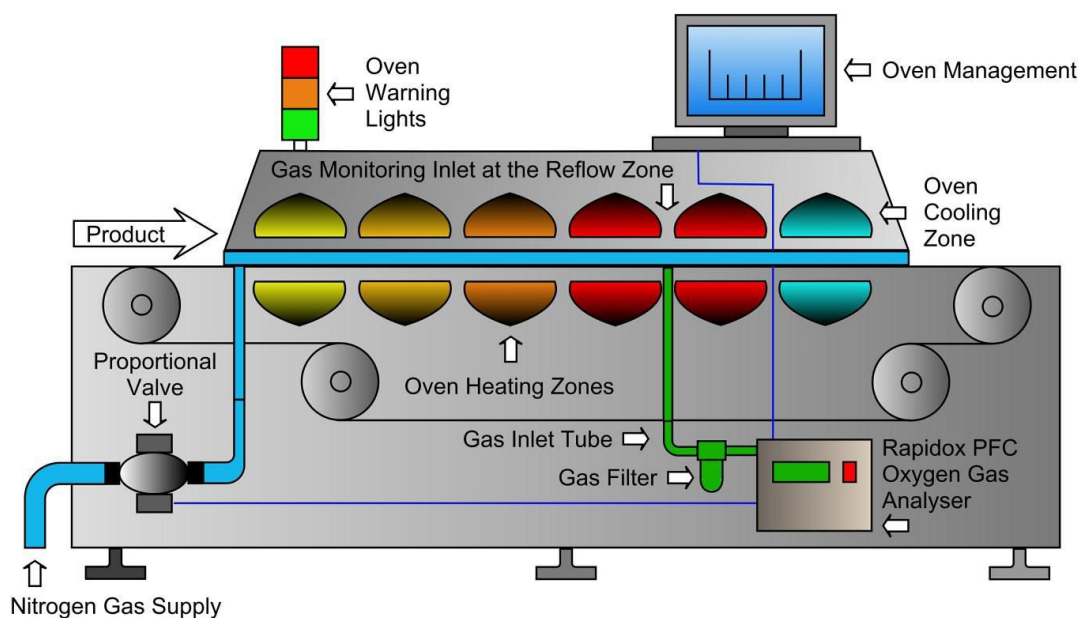
Z hlediska kvality a spolehlivosti pájení přetavením je procesní krok nanášení pájecí pasty na DPS velmi kritickým – podle studie [96] se dokonce až 60 % chyb v pájecím procesu dá vysledovat právě k nanášení pájecí pasty. Nanášení probíhá většinou pomocí šablonového tisku využívající laserem řezané/leptané ocelové šablony o tloušťce typicky 100-200  $\mu\text{m}$ ; využívá se také sítotisku a pro nenáročné aplikace, malosériovou či prototypovou výrobu lze využít některou ze selektivních metod nanášení pomocí dávkovačů pájecí pasty. Na výslednou kvalitu a mechanické vlastnosti pájených spojů má vliv například množství pasty nanesené při šablonovém tisku [97], [98]. S miniaturizací součástek a rozšířením pouzder s vývody o malých rozměrech a s malou roztečí (například QFN – angl. *Quad Flat No-Lead* nebo  $\mu\text{BGA}$  – angl. *Micro Ball Grid Array*) se stává kvalita nanášení pasty ještě více kritickou [99]. Klíčovými parametry při

šablonovém tisku ovlivňující jeho kvalitu jsou především úhel a tlak těrky, velikost, tvar a rozteč otvorů šablony či přesnost sesouhlasení šablony s motivem DPS a vzdálenost šablony od DPS [100], [101].

Osazování součástek je procesním krokem, který v řetězci zabere nejvíce času v závislosti na složitosti DPS, celkovém počtu a počtu typů součástek. Optimalizací tohoto kroku se tedy dá nejefektivněji zrychlit celý proces povrchové montáže [102]. V průmyslové sféře se v dnešní době využívá zcela automatických osazovacích strojů s vícero osazovacími hlavami, který proces výrazně urychlují oproti strojům s jedinou osazovací hlavou [103]. Součástky jsou osazovacími hlavami s podtlakovými nástavci odebírány ze zásobníků a následně pomocí kamerového systému umístěny na příslušné místo DPS podle dat, které jsou generovány společně s návrhem DPS [104].

### 3.3.2 Používané technologie ohřevu

Pro přivedení tepla potřebného k roztavení kuliček obsažených v pájecí pastě se v praxi využívá několik technologií. Jednou z nejrozšířenějších jsou průběžné konvekční pece, dále pak infračervený ohřev a ohřev pomocí kondenzace par speciální pájecí kapaliny (tzv. pájení v parách, angl. *vapor phase soldering*, VPS) [105]. V malé míře se pak pro speciální aplikace používá například impulzně-odporové pájení, pájení vedením (DPS je přímo v kontaktu s vyhřívaným dopravníkem/plotnou) [1], nebo pájení laserem [106].



**Obrázek 7.** Schéma průběžné konvekční pájecí pece s dusíkovou atmosférou (převzato z [107])

Horkovzdušné, případně infračervené průmyslové dopravníkové pece obsahují několik nezávislých teplotních zón, jejichž nastavením se dá vytvořit požadovaný tzv. teplotní profil (viz

další kapitola) podle specifikací výrobce pájecí pasty. Pece bývají integrovány do pájecí linky a spojeny pomocí podavačů a dopravníků s osazovacími automaty a optickou kontrolou na vstupu a sběrnou stanicí zapájených desek a výstupní optickou kontrolou na výstupu. Příklad takové pájecí pece ilustruje obrázek 7.

Horkovzdušné pájecí pece používají jako tepelné přenosové médium vzduch, případně dusík, který zabraňuje oxidaci povrchů a není tedy nutné používat tak agresivní tavidla. V poslední době se také objevují systémy uzavřené v komorách se sníženým tlakem (vakuové pájení), které má za úkol především eliminovat výskyt dutin v pájeném spoji (viz kapitola 4.3.3 *Dutiny ve spoji – voidy*) [108].

Kromě konvekčních pájecích pecí se jako vhodná alternativní metoda pro pájení přetavením jeví pájení v parách [109]. Zařízení pro pájení v parách obsahuje nádobu s pájecí kapalinou (obchodní označení Galden), která má teplotu varu vyšší než teplota tání použité pájky (typicky 230 °C při použití bezolovnatých pájecích slitin SAC, SnCu atp.). DPS s osazenými součástkami v pájecí pastě se nachází v prostoru nad nádobou s pájecí kapalinou. Během procesu pájení dojde k zahřívání a odpařování pájecí kapaliny, jejíž páry kondenzují na povrchu DPS a předávají pájecí pastě kondenzační teplo. To má za následek její roztavení a vytvoření pájených spojů. Velkou výhodou této metody je homogenní rozložení teploty v pájecím prostoru a nemožnost překročit teplotu vypařování pájecí kapaliny. Nevznikají zde tedy problémy s lokálním přehříváním a termomechanickým pnutím, které by mohlo vést k defektům součástek nebo DPS. Díky atmosféře tvořené párami pájecí kapaliny je také redukována nežádoucí oxidace povrchů během pájení. Nevýhodou je – v případě menších zařízení (menších pecí) – poměrně složitá až nemožná regulace přesného teplotního profilu. Ten se dá řídit částečně tepelným výkonem přiváděným do lázně pájecí kapaliny, či polohou dopravníku s DPS nad pájecí kapalinou [110]. Složitější je také začlenění těchto systémů do velkých pájecích linek, proto se používají spíše pro malosériovou či prototypovou výrobu.

### 3.3.3 Teplotní profil

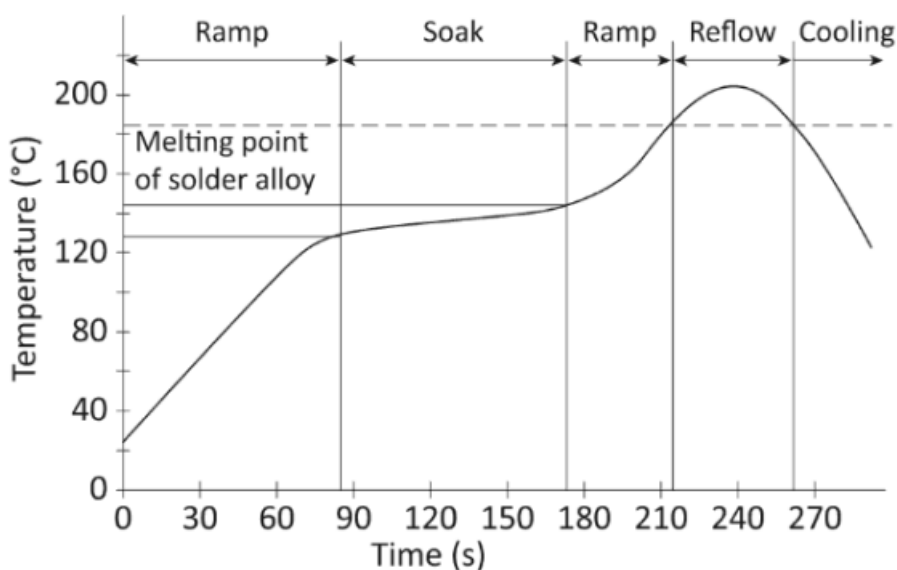
Pájecí pece využívané v průmyslových pájecích linkách mají možnost přesné regulace teploty a tím dosahují vysoké opakovatelnosti výroby, tedy tvorby pájených spojů za neustále stejných podmínek. Díky tomu se dá hlídat jejich spolehlivost. Přesným nastavením teploty v jednotlivých zónách průběžné pece vzniká tzv. teplotní profil, tedy závislost teploty na čase, která se měří na DPS během průchodu pecí. Tento průběh teploty v čase musí odpovídat specifikacím výrobce pájecí pasty a zároveň musí respektovat maximální přípustnou teplotu součástek. Měření teplotního profilu jsou nejčastěji prováděna pomocí několika termočlánků, které jsou fixovány pomocí pájky s vysokou teplotou tání, teplotně odolným lepidlem/silikonem či kaptonovou páskou na plošky DPS, pro kterou je profilování prováděno. Termočlánky jsou připojeny do

profilometru, který sbírá jejich signály a připojuje k nim časovou značku, pracuje tedy jako datalogger. Profilometr musí vydržet vysoké teploty, protože v případě velkých průmyslových průběžných pecí putuje společně s termočládky skrz pec; v případě malých pecí a dostatečně dlouhých přívodů termočládků může být umístěn mimo pec [1].

Teplotní profil je rozdělen na několik fází [105], [111]:

- fáze nahřívání (angl. *preheating* nebo *ramp*)
- fáze předeřevu (angl. *soak* nebo *soaking*)
- fáze přetavení (angl. *reflow*)
- fáze chlazení (angl. *cooling*)

Teplotní profil ilustruje obrázek 8 včetně uvedených fází. Je nutné podotknout že fáze nahřívání a předeřevu (*preheating* a *soaking*) se někdy souhrnně označuje jako předeřev (*preheating*). Tato fáze slouží k rovnoměrnému ohřevu celé DPS a eliminaci teplotních šoků (proto je zde hlídán parametr rychlosti ohřevu, který je obvykle mezi 1-4 °C/s); také zde dochází k aktivaci tavidla. Pro bezolovnaté pájky bývá teplota během této fáze 140-190 °C po čas 60-120 s [25], [105], [112], [113].

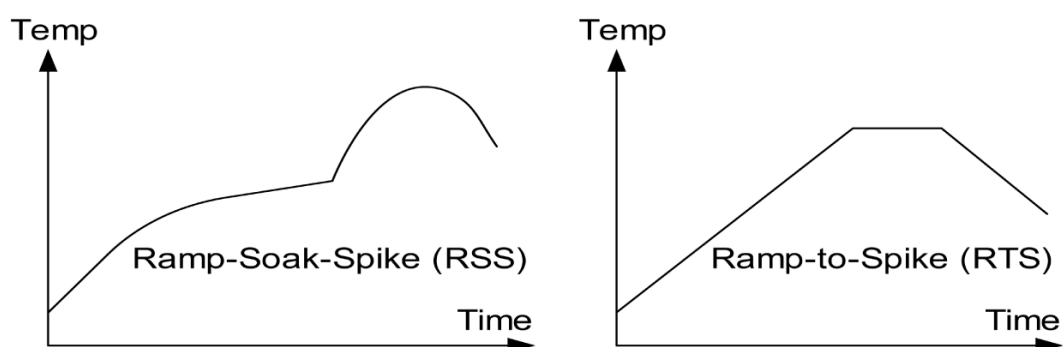


**Obrázek 8.** Typický teplotní profil pro pájení přetavením (převzato z [105])

Po fázi předeřevu nastává fáze přetavení, kdy dojde k překročení teploty tání pájecí slitiny. Maximální teplota přitom dosahuje hodnoty obvykle o 20-30 °C více. Kromě maximální teploty je tato fáze charakterizována i časem nad bodem tání (angl. *time above liquidus*, TAL), který také bývá mezi 60-90 s [105], [114]. Často se tyto dva parametry slučují do tzv. heating factoru (viz další podkapitola). Po fázi přetavení nastává chlazení DPS, které je charakterizováno rychlostí

poklesu teploty v čase. To by mělo být z hlediska tvorby intermetalických sloučenin a mikrostruktury poměrně rychlé, ale v praxi naráží na omezení vyplývající z termomechanických vlastností DPS, u kterých dochází při prudkých zchlazeních k ohýbání a dalším defektům. Obvykle to tedy bývá 2-4 °C/s [105], [113].

Takto popsaný profil se obvykle označuje jako RSS (angl. *ramp-soak-spike*). V případě, že DPS obsahuje součástky s větší tepelnou kapacitou, je nutné prodloužit čas ohřevu ve fázi přetavení, aby vůbec došlo u těchto součástek k roztavení pájecí pasty. Jako nejlepší řešení se však v tomto případě ukazuje použití lineárního teplotního profilu typu RTS (angl. *ramp-to-spike*) [113]. Rozdíly mezi teplotními profily RSS a RTS ilustruje obrázek 9.



**Obrázek 9.** Teplotní profily pro pájení přetavením – RSS a RTS (převzato z [113])

Teplotní profil závisí především na doporučení výrobce pájecí pasty, který obvykle uvádí teplotní meze jednotlivých fází profilu, ale samozřejmě také na použité technologii ohřevu. Jen těžko se totiž dá docílit stejného teplotního profilu s různými způsoby přenosu tepla (už jen z důvodu nehomogenity rozložení teploty u některých metod).

### 3.3.3.1 Heating faktor

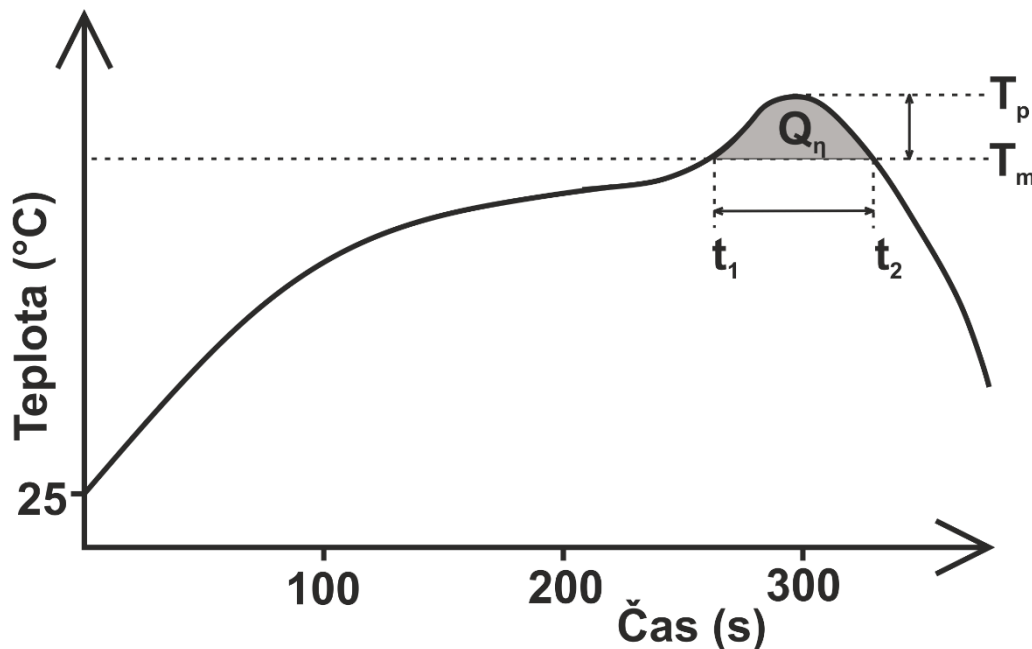
Pro zjednodušení popisu teplotního profilu (namísto časů a teplot jednotlivých fází) byl zaveden tzv. Heating faktor s označením  $Q_\eta$  [115]. Je vyjádřen jako integrál teploty podle času v časovém rozmezí přetavení (kdy se nachází pájecí slitina v roztaveném stavu, tedy nad teplotou tání):

$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_m) dt \quad (9)$$

Kde  $t_1$  a  $t_2$  (s) jsou časy začátku a konce fáze přetavení (kdy se slitina nachází v roztaveném stavu) a  $T_m$  (°C) je teplota tání dané slitiny. Jednotka heating faktoru je s·°C, či častěji uváděná s·K. Obrázek 10 ukazuje heating faktor v grafickém vyjádření. Jak uvádí Gang Gao [115], [116], při optimalizaci teplotního profilu je nutné uvažovat nerovnoměrnou distribuci tepla na DPS a volit tedy spodní limit heating faktoru ( $Q_\eta^l$ ), který reprezentuje minimální hodnotu pro dosažení



kvalitního spoje, a horní limit ( $Q_{\eta}^u$ ), který vyjadřuje maximum doporučené výrobcem pájecí pasty. Skutečný rozdíl mezi nejteplejším bodem na DPS ( $Q_{\eta}^{max}$ ) a nejstudenějším ( $Q_{\eta}^{min}$ ) by měl být menší než rozdíl mezi  $Q_{\eta}^u$  a  $Q_{\eta}^l$ . Doporučuje se sledovat především  $Q_{\eta}^{min}$ , který by měl být hodnotě  $Q_{\eta}^l$  co nejbližší.



**Obrázek 10.** Grafické vyjádření heating factoru v rámci teplotního profilu

Optimální hodnota heating faktoru závisí na typu pájecí slitiny a materiálů připojovacích plošek. Například pro klasickou olovnatou pájku 63Sn-37Pb a niklový povrch se uvádí hodnota 200-700 s·K [116].

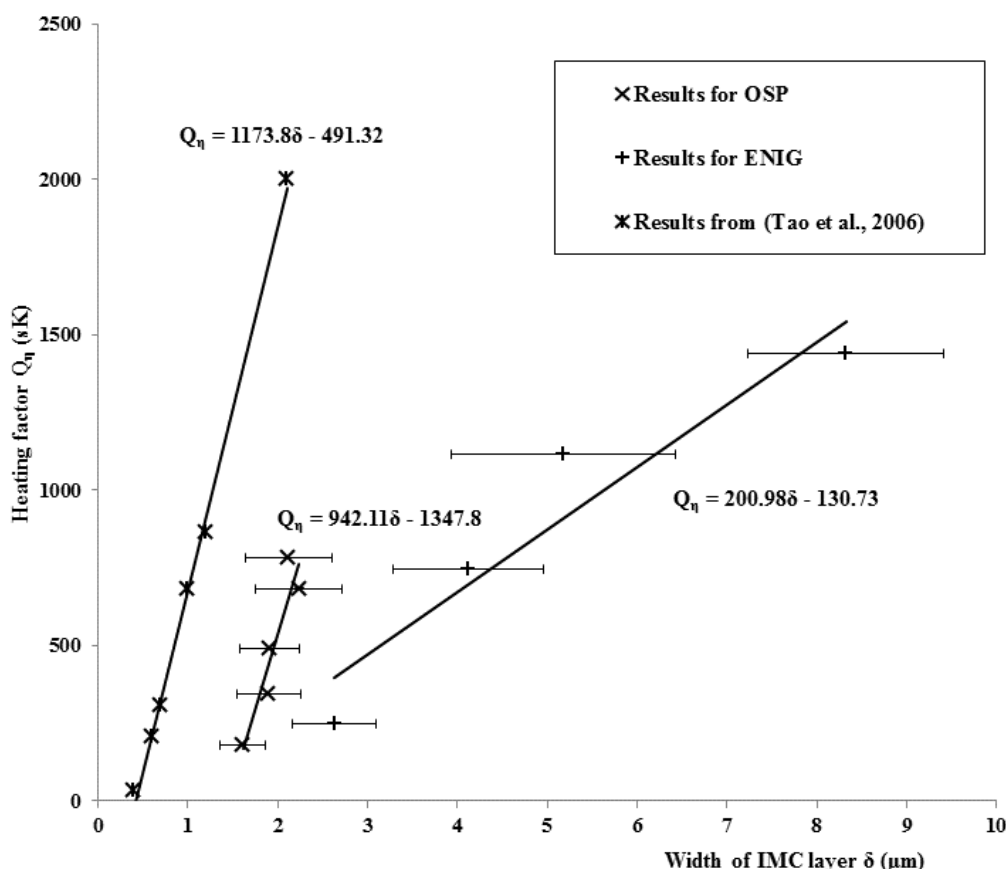
### 3.3.3.2 Vliv teplotního profilu na vlastnosti pájených spojů

Mnoho vědeckých studií se zabývalo vlivem teplotního profilu na mikrostrukturu a potažmo vlastnosti pájených spojů [112], [113], [115], [117]–[125]. Ning-Cheng Lee [112] poukazuje ve své studii na celou řadu defektů pájených spojů, které mohou vzniknout nesprávným nastavením teplotního profilu – například praskání různých částí DPS, delaminace, tombstoning, rozstřík pájecí pasty/tavidla, vznik můstků, vznik otevřených spojů, špatné smáčení, vznik „studených spojů“, nadměrný růst intermetalických vrstev atp. Jako optimální pro eliminaci většiny těchto defektů uvádí Lee použití pomalého náběhu teploty na začátku teplotního profilu, následně kratší přehřívací (soaking) fázi a nižší teploty ve fázi přetavení.

Z hlediska růstu intermetalických sloučenin se zdá být optimální volit spíše nižší maximální teplotu, kratší TAL a rychlejší chlazení [113], [117], [123]. Dle studie [122] má pak teplotní profil mnohem větší vliv na intermetalické sloučeniny mezi povrchem vývodu součástky (úprava Sn či Sn/Pb) a pájecí slitinou než mezi substrátem (Cu či Ni/Au) a pájecí slitinou; zde se výsledná

tloušťka IMC může lišit v závislosti na teplotním profilu až o 10  $\mu\text{m}$ . Nejvýznamnějšími faktory, které ovlivňují vznik a podobu intermetalických vrstev, jsou podle studie [113] TAL a teplota přehřevu (soaking fáze), což poukazuje na vliv tavidla. Teplotní profil také ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti spojů, podle studie [118] se u dvou-terminálových čipových součástek zvýší hodnota síly ve smyku s vyšší teplotou v zóně přetavení a delším TAL.

Další studie vztahují růst IMC a další vlastnosti pájených spojů přímo k hodnotě heating faktoru. Dle studie [119] je v případě SnPb pájky a měděného povrchu závislost tloušťky IMC na heating faktoru lineární. Z této studie také částečně vycházel náš vlastní výzkum, který jsme publikovali jako odborný článek s názvem „Solder joint quality evaluation based on heating factor“ v impaktovaném periodiku *Circuit World* (viz kapitola 8 *Seznam publikací disertanta*). Zde jsme podobnou závislost zjistili pro bezolovnatou pájku SAC305. Obrázek 11 ukazuje naše změřená data v porovnání se studií [119] – osy jsou zde prohozené pro konzistenci s touto studií.

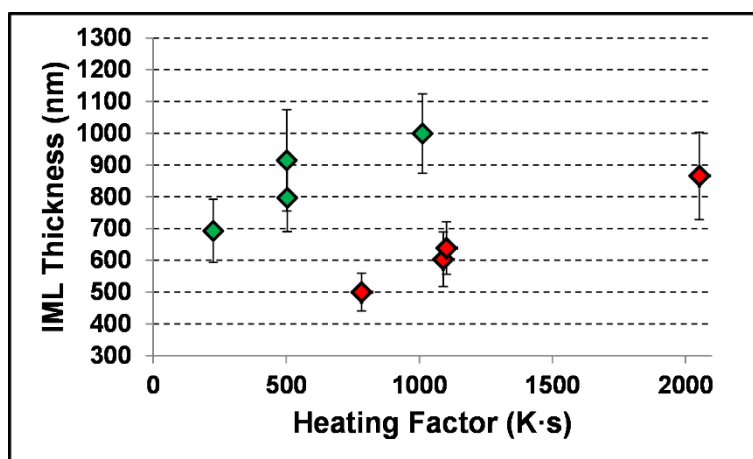


**Obrázek 11.** Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na heating faktoru – pájka typu SAC305 a povrchové úpravy mědi OSP a ENIG a dále výsledky ze studie [119]

Existuje také souvislost mezi heating faktorem (a tedy tloušťkou intermetalické vrstvy) a středním časem do poruchy (angl. *mean time to failure*, MTTF). Pomocí vibračních mechanických testů pájených spojů  $\mu\text{BGA}$  čipů bylo prokázáno, že MTTF je větší v případě

pájení s větší hodnotou heating faktoru, a to do hodnoty přibližně  $500 \text{ s} \cdot \text{K}$  a následně MTTF klesá [120]. Dle další studie [124] lze podobný trend vysledovat i u mechanických zkoušek ve smyku – ta pro pájené spoje na bázi SnBiAg na měděném substrátu vykazuje nárůst do přibližně  $3000 \text{ s} \cdot \text{K}$  a pak klesá, což částečně koresponduje s výsledky naší výše zmíněné studie, kde síla ve smyku pro pájené spoje BiSn na substrátu s imerzním cínem také vykazuje maximum okolo  $800 \text{ s} \cdot \text{K}$  a dále klesá. Z hlediska mechanických vlastností tedy existuje optimální hodnota heating faktoru (avšak specifická pro různé kombinace pájecích slitin a substrátů, pravděpodobně i způsob ohřevu), pod a nad níž je spoj mechanicky slabší. U spojů BiSn se také ukazuje závislost výskytu voidů (dutin ve spoji) na heating faktoru – se zvyšující se hodnotou klesá objem těchto dutin [125].

Nicméně popis teplotního profilu pomocí hodnoty heating faktoru podle mého názoru není dostačující, protože se zde naprosto ztrácí informace o tvaru teplotního profilu, a to jak ve fázi přehřevu (ta následně není ve výzkumných pracích zmíněna či popsána vůbec, či jen jako průměrná/maximální hodnota teploty), tak ve fázi přetavení – není tedy jasné, jak se ke konkrétní hodnotě heating faktoru dospělo (delší čas, nižší teplota či naopak) – přičemž i různý tvar fáze přetavení může vyústit v jinou výslednou mikrostrukturu spoje.



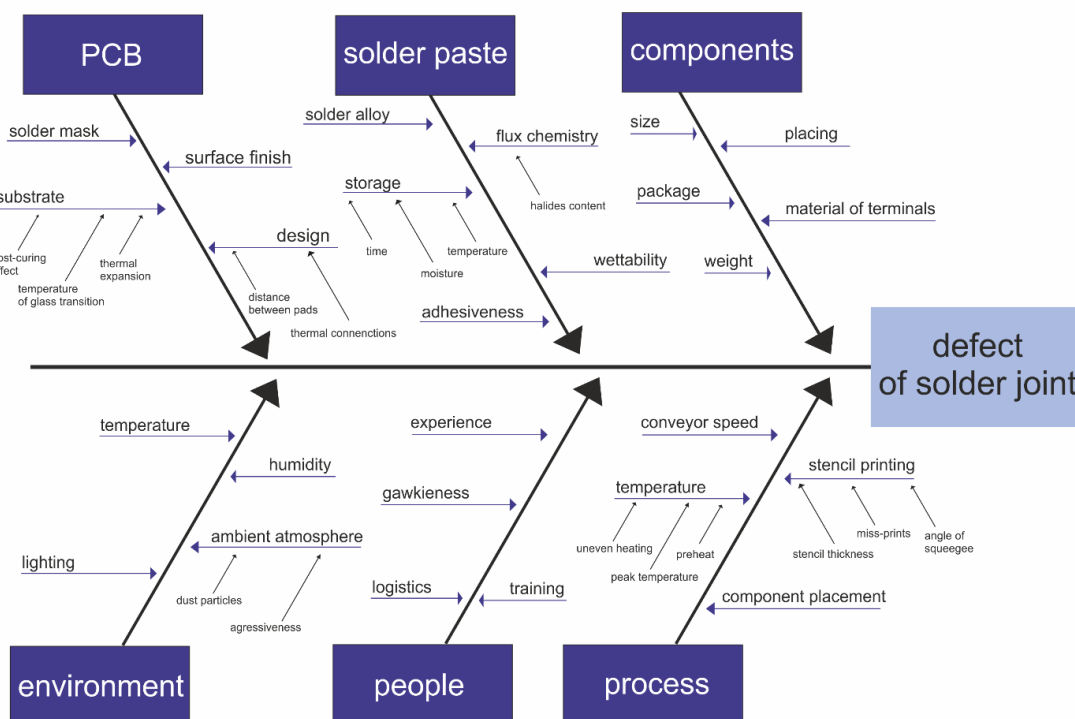
**Obrázek 12.** Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na heating faktoru – pájka typu Bi/Sn, výsledky vlastní studie [126]

Tato úvaha vedla k mé další studii, prezentované jako příspěvek s názvem „Evaluation of Bismuth/Tin Solder Intermetallic Layers Based on Heating Factor“ na mezinárodní odborné konferenci International Spring Seminar on Electronics 2019 ve Wroclavi (viz kapitola 8 *Seznam publikací disertanta*). Zde bylo provedeno poměrně precizní profilování pájecího procesu a následně byly hodnoceny parametry pájeného spoje (elektrický odpor, mechanická pevnost ve smyku a tloušťka intermetalické vrstvy) v závislosti na tvaru teplotního profilu. Experimenty byly provedeny s eutektickou, nízko-tavitelnou pájkou BiSn (použity přitom byly dvě pájecí pasty od dvou různých výrobců a s různým obsahem tavidla). Z výsledků experimentu vyplynulo, že

tloušťka IMC není závislá na tvaru teplotního profilu ve fázi přetavení (je tedy jedno, zda se k stejné hodnotě heating faktoru dojde delším TAL a nižší maximální teplotou či naopak), pokud se ovšem nemění fáze přehřevu. V případě, že se zkrátí čas fáze přehřevu (soaking fáze), došlo zároveň k statisticky významně menšímu nárůstu intermetalické vrstvy. Zároveň se závislost tloušťky IMC na heating faktoru významně lišila pro obě použité pájecí pasty. Obojí opět poukazuje na vliv tavidla a jeho aktivace během fáze přehřevu, což bylo motivací pro navazující experiment popsany dále v experimentální části této práce v kapitole 6 *Experimentální část 2 – vliv tavidla na kinetiku intermetalických sloučenin a vlastnosti pájených spojů*. Změřené závislosti ilustruje obrázek 12.

### 3.4 Diagnostika pájených spojů

Jak bylo řečeno výše, pájený spoj musí splňovat určité kvalitativní požadavky na své vlastnosti – především dobrou mechanickou pevnost a nízký přechodový odpor. Vlivy, které ovlivňují kvalitu a spolehlivost pájených spojů a jejich vlastnosti, jsou často hodnoceny pomocí nástrojů managementu rizik – například tzv. Ishakawa diagramem, nazývaným také diagram rybí kosti (angl. fish-bone diagram). Ten vzniká na základě brainstormingu nad daným problémem a je velmi častou metodou hodnocení kvality v průmyslu [127]. Příklad takového diagramu pro defekt pájeného spoje ukazuje obrázek 13.



Obrázek 13. Ishakawa diagram pro obecný defekt pájeného spoje (vlastní zpracování)

Pro hodnocení parametrů pájených spojů, a tedy jejich kvality nebo kvality celé osazené DPS se v praxi využívá následujících metod [1], [80], [128], [129]:

- funkční testy,
- elektrické testy (angl. *in-circuit testing*):
  - testování pomocí pohybujících se elektrod (angl. *flying probe testing*),
  - testování pomocí elektrodoých (jehlových) polí (angl. *bed of nails*),
- automatická optická kontrola (angl. *automatic optical inspection*, AOI);
- vizuální kontrola,
- diagnostika pomocí rentgenového záření,
- měření elektrických vlastností pájených spojů,
- měření mechanických vlastností pájených spojů,
- diagnostika metalografických výbrusů pájených spojů:
  - měření tloušťky intermetalických vrstev,
  - trhliny, dutiny,
  - smáčecí úhel.

V následujících praktických částech této práce bude využito především hodnocení pájených spojů pomocí měření elektrického odporu, mechanických zkoušek a analýzy metalografických výbrusů, proto těmto metodám jsou věnovány následující podkapitoly.

### 3.4.1 Měření elektrických vlastností pájeného spoje

Z hlediska elektrických vlastností je možné u pájeného spoje provést následující zkoušky:

- čtyřbodové měření elektrického odporu (Kelvinova metoda)
- měření nelinearity voltampérové charakteristiky
- měření proudového šumu



Obrázek 14. Přípravek pro měření malých odporů

Elektrický odpor pájeného spoje je velmi malý, řádově okolo  $10^{-5} \Omega$ . V takovém případě nelze použít jednoduchou dvou vodičovou metodu měření odporu, protože odpor přírodních vodičů je srovnatelný s měřeným odporem a vnáší tedy do měření velkou nepřesnost. Z toho důvodu se využívá tzv. Kelvinova (čtyřbodová/čtyřvodičová) metoda měření, kde vnější elektrody slouží k přivedení konstantního měřicího proudu a vnitřní snímají úbytek napětí [1], [129].

Pro účely měření v experimentálních studiích prováděných na Katedře elektrotechnologie včetně druhé praktické části této práce jsem vyvinul speciální elektrodotový systém sestávající z plastové konstrukční části vyrobené pomocí 3D tisku a kontaktních odpružených jehel (obrázek 14).

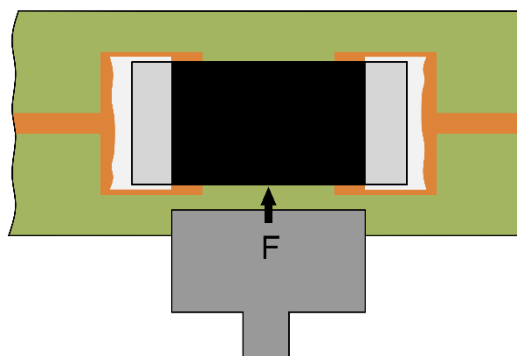
### 3.4.2 Měření mechanických vlastností pájeného spoje

Kromě malého přechodového odporu musí mít pájené spoje také dobré mechanické vlastnosti, aby nedošlo během používání zařízení k poruše pájeného spoje, především v případech, kdy je zařízení vystaveno nějakému typu mechanického zatěžování či vibracím. Mechanické vlastnosti jsou závislé na mikrostruktuře spoje – pájky a intermetalických vrstev na rozhraní pájka-pájený substrát a pájka-vývod součástky. Záleží na složení pájecí slitiny, pájecím procesu či termomechanickém stresu během používání zařízení.

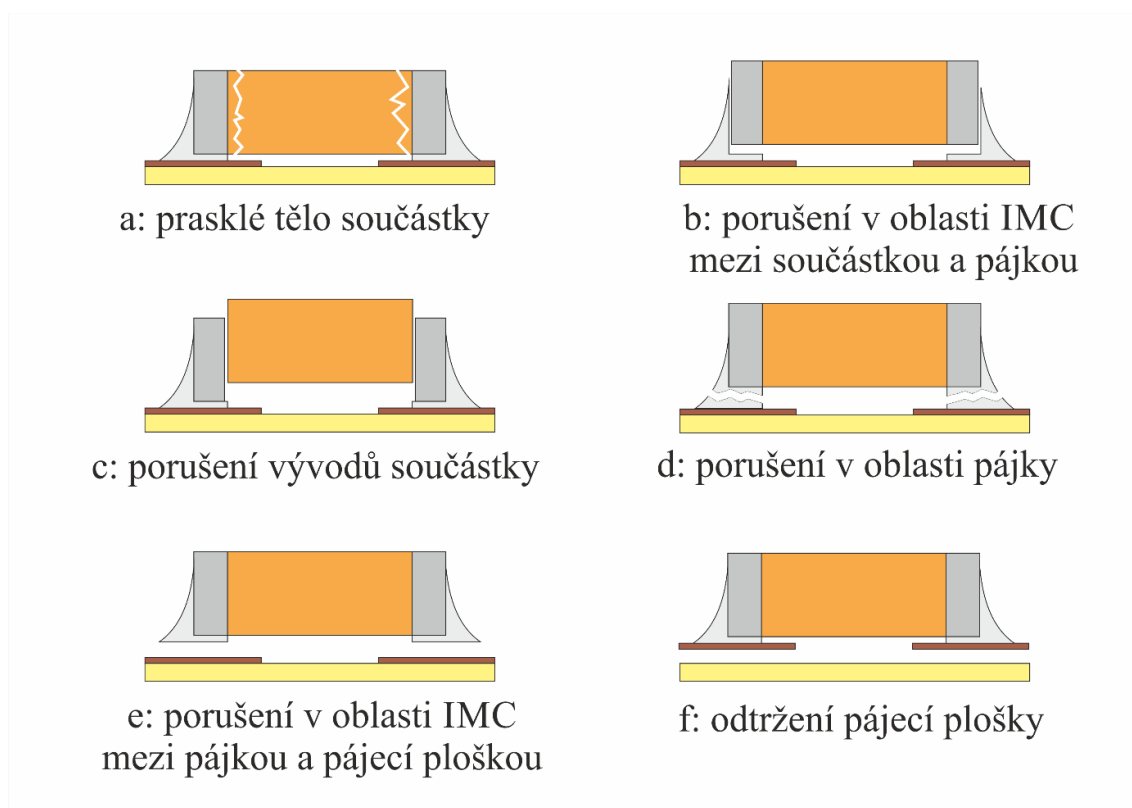
Existuje několik metod pro mechanické destruktivní testování pájených spojů (s ohledem na citovanou literaturu) [1], [129]:

- mechanická zkouška ve smyku pro zapájenou součástku
- mechanická zkouška tahem pro zapájenou součástku
- mechanická zkouška ve smyku pro kuličku pájky
- mechanická zkouška studeným tahem kuličky pájky
- mechanická zkouška horkým tahem kuličky pájky
- cyklické namáhání pájených spojů ohybem DPS

V praktické části byla využita mechanická zkouška ve smyku pro zapájenou dvou-terminálovou součástku. Schématicky ji nanznačuje obrázek 15. Na součástku působí testovací trn s konstantní rychlostí posuvu (většinou 1 mm/min), dokud nedojde k utržení součástky. Trn musí působit rovnoměrně na oba dva pájené spoje testované dvou-terminálové součástky. Během zkoušky se zaznamenává maximální dosažená síla a místo porušení pájeného spoje, jak ukazuje obrázek 16. Tato zkouška je specifikována například v normě JEITA ET-7409/103 [130].



**Obrázek 15.** Mechanická zkouška ve smyku pro dvou-terminálové součástky



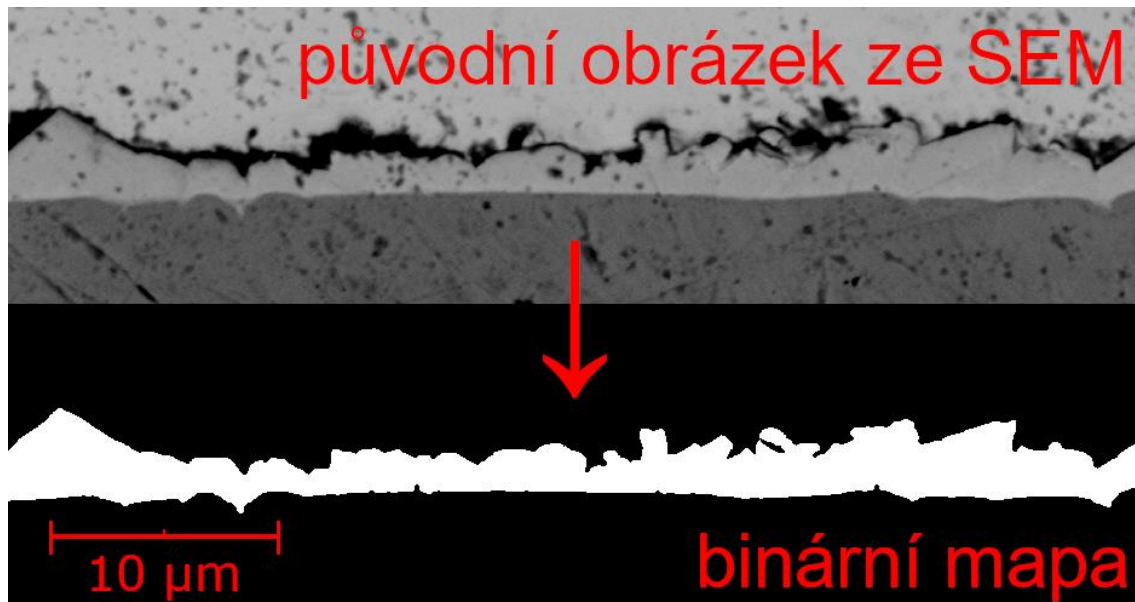
**Obrázek 16.** Možné výsledky mechanické zkoušky ve stříhu pro dvou-terminálové součástky podle standardu JEITA ET-7409/103 [130]

### 3.4.3 Analýza metalografických výbrusů pájených spojů

Někdy je potřeba analyzovat mikrostrukturu pájeného spoje za účelem nalezení příčiny mechanického oslabení, což může být například přílišná tloušťka intermetalické vrstvy nebo výskyt dutin a trhlin. Z tohoto důvodu se využívá metalografických výbrusů. Pájený spoj, který je potřeba analyzovat, je vyříznut z DPS, následně fixován a zalit zalévací hmotou (nejčastěji na bázi dvou-složkových epoxidových materiálů). Následuje řezání, broušení, leštění a případně leptání, aby vynikla požadovaná struktura. Takto připravený vzorek může být prozkoumán klasickou optickou mikroskopií nebo pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (angl. *scanning electron microscope*, SEM), který v případě, že je vybaven energiově-disperzní spektroskopií (angl. *energy dispersive spectroscopy*, EDS) umožňuje zároveň provést prvkovou analýzu. Ačkoli se jedná o metodu destruktivní, často dokáže odhalit lépe a spolehlivěji příčinu poruchy než metody nedestruktivní jako optická či rentgenová analýza [131], [132].

Jak bylo řečeno již mnohokrát výše v textu, důležitým faktorem u hodnocení kvality pájeného spoje je tloušťka intermetalické vrstvy. Ze snímku metalografického výbrusu je možné získat tuto hodnotu na základě obrazové analýzy, která podle rozdílu jasu pixelů (v případě snímku z elektronového mikroskopu, který je tvořen pouze odstíny šedi) označí oblast intermetalické vrstvy a vytvoří tzv. binární mapu, kde bílá plocha označuje intermetalickou vrstvu a černá vše

ostatní (měděný substrát, pájku; viz obrázek 17). Následně je možné pomocí nějakého softwarového nástroje (např. Matlab) vypočítat sloupec po sloupci vzdálenosti mezi černými oblastmi (šířku bílé oblasti) a zjistit průměr pro celý obrázek. Tato hodnota v pixelech se následně převede pomocí kalibračního koeficientu dle měřítka, které bývá automaticky uvedené na SEM snímcích. Tato metoda měření je o mnoho přesnější, než jednoduché měření tloušťky IMC v několika málo bodech či podle středních čar.



*Obrázek 17. Obrazové zpracování SEM snímku intermetalické vrstvy*



## 4 CHYBY V POVRCHOVÉ MONTÁŽI – REŠERŠNÍ PŘEHLED

Výraznou změnou v procesu pájení byl přechod na bezolovnaté pájení, se kterým souvisí změna celé materiálové základny od pájecích slitin, tavidel, povrchových úprav pájecích plošek na DPS a vývodů součástek a také změna procesu především z pohledu teploty [29]. Společně s trendem miniaturizace elektroniky, kdy se na trhu objevují čím dál menší pouzdra součástek s menšími vývody a kratšími roztečemi, se stává proces hromadného pájení a povrchové montáže velmi komplexní disciplínou, kde na výslednou kvalitu pájených spojů, a tedy spolehlivost celého zařízení má vliv celá řada faktorů.

Chyby v povrchové montáži mohou být způsobeny z mnoha příčin. Většinou to bývá nesprávně nastavený proces, nekompatibilní materiálová kombinace nebo nesprávný návrh motivu DPS. V následujících kapitolách jsou chyby rozděleny podle doby vzniku (přímo při procesu pájení nebo po určitém čase používání zařízení), zvláště jsou vyčleněny chyby, které souvisí (mohou souviset) s použitými tavidly.

### 4.1 Chyby detekovatelné po procesu pájení

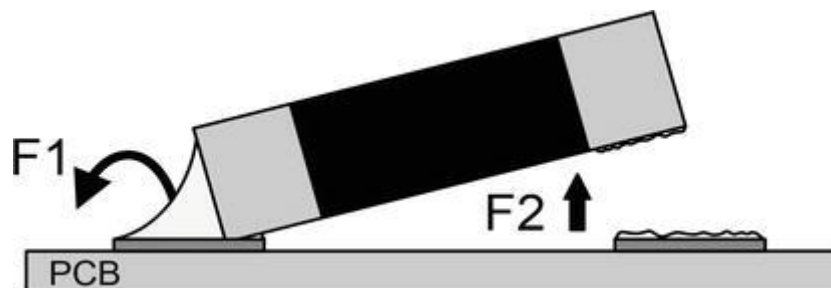
#### 4.1.1 Vznik otevřených spojení

Jedná se o stav, kdy mezi připojovací ploškou na DPS a vývodem součástky nedojde ke vzniku vodivého spojení a elektrický obvod se stane otevřeným. Příčinou může být nedostatečné množství pájecí pasty (například kvůli nedostatečnému čištění šablony během šablonového tisku či nevhodnému návrhu šablony), deformovaný vývod součástky při nevhodné manipulaci během osazování nebo nedostatečná rovinnost substrátu. Problém také může souviset s rozdílem teplotního koeficientu délkové/objemové roztažnosti (angl. *coefficient of thermal expansion*, CTE) mezi pouzdrům součástky a základním substrátem DPS, kdy dojde k prohnutí či kroucení substrátu/pouzdra (viz dále warpage efekt) a tedy nadzvednutí pájeného vývodu [1].

#### 4.1.2 Efekt náhrobního kamene

Jedná se o specifický případ vzniku otevřeného spojení, který se objevuje u dvou-vývodových (dvou-terminálových) čipových součástek, typicky rezistorů, keramických kondenzátorů či LED, častěji v menších (tedy lehčích) pouzdrech s označením 0402 nebo 0603 (součástky s rozměry 1×0,5, respektive 1,6×0,8 mm), občas i u součástek v pouzdrech větších rozměrů. Projevuje se nadzvednutím součástky nad jednu z pájecích plošek, postavením součástky – v krajním případě až do plně vzpřímené polohy, od tohoto plyne označení této poruchy efekt náhrobního kamene (angl. *tombstone effect* nebo *tombstoning*). Základní příčinou je rozdíl časového okamžiku, po

který je pájecí slitina v roztaveném stavu, mezi terminály součástky – na jedné straně dojde k roztavení a smočení terminálu pájkou o kousek dříve, a síly vyvolané povrchovým napětím a snahou tekuté pájky přejít do stavu s minimální energií nadzvednou součástku nad druhý terminál, který zatím nebyl smočen tekutou pájkou [133]–[136]. Schematicky tuto nerovnováhu ilustruje obrázek 18.



**Obrázek 18.** Tombstone efekt – princip (převzato z [137])

Důvodů k této nerovnováze může být několik: nerovnoměrný ohřev DPS (týká se především pájení pomocí IR ohřevu, kde může docházet k zakrývání vývodů většími součástkami), různá velikost připojovacích plošek (a tedy různá tepelná kapacita a rychlost ohřevu na jednotlivých stranách součástky), různá velikost připojovacích vodivých cest (a tedy různý odvod tepla a rozdílný ohřev pájecí plošky; problém nastává především v případě, že jedna z pájecích plošek je připojena k zemnicí měděné ploše), chyba během šablonového tisku (méně pasty na jedné straně, či pasta úplně chybí), různá smáčivost pájecích plošek (například vlivem kontaminace, nedostatečného čištění DPS před pájecím procesem) nebo špatně osazená součástka [134], [138]. Ukazuje se také, že vznik efektu náhrobního kamene je pravděpodobnější v případě pájení v parách, kde pájecí kapalina (Galden) významně ovlivňuje povrchová napětí [138], [139].

Předejít tomuto efektu se dá vhodným návrhem motivu DPS (stejná tepelná kapacita pájecích plošek, rozměry pájecích plošek, orientace součástek kolmo ke směru posunu dopravníku), důkladnou kontrolou procesu šablonového tisku a řádným čištěním DPS před pájením [1], [134], [138], [140]. Podle analytického modelu ve studii [140] se dá redukce tohoto efektu docílit větší šířkou terminálů součástek, menší výškou součástky a použitím menšího objemu pasty. Dle studie [136] lze omezit efekt náhrobního kamene použitím pájek s „dvojitým peakem“ (podle křivky získané z diferenciální skenovací kalorimetrie), v případě olovnatých pájek se jedná o slitiny Sn-Ag-Sb-Pb.



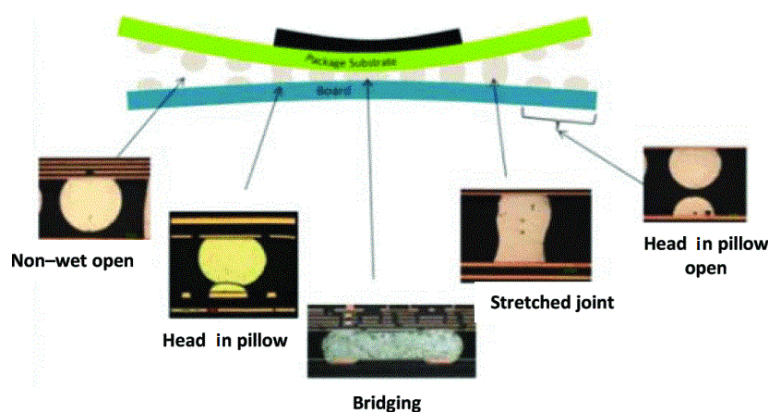
**Obrázek 19.** Ukázka efektu náhrobního kamene u reálného výrobku (vlastní dokumentace)

### 4.1.3 Vznik můstků

Můstky jsou nechtěná vodivá propojení mezi sousedními vývody/piny součástek, které vzniknou slitím tekuté pájky. Na DPS je tedy přítomen elektrický zkrat, který v závislosti na místě výskytu může způsobit i fatální selhání funkce zařízení. Můstky (angl. *bridges* nebo *bridging*) se mohou vyskytnout mezi sousedními piny pouzder BGA (slitím dvou či více kuliček). Za příliš vysoké teploty budou mít kuličky tendenci klesnout a spojovat se vlivem snížení povrchového napětí [141], [142]. Můstky ale také vznikají i mezi vývody ostatních pouzder integrovaných obvodů, mezi vývody sousedních dvou-terminálových součástek či dokonce mezi terminály jedné dvou-terminálové součástky. Příčin může být opět několik – nesprávný návrh DPS (pájecí plošky jsou zbytečně blízko u sebe), DPS nemá nepájivou masku, nesprávný návrh šablony, přetisky během šablonového nanášení pájecí pasty, příliš velké množství pájecí pasty, nevhodný teplotní profil, nesmáčení vývodů součástky atd. Obecně je tato vada velmi komplexního charakteru; při řešení tohoto problému je dobré začít s revizí návrhu DPS/šablony a nastavením vhodného teplotního profilu podle doporučení výrobce pájecí pasty [1], [143].

### 4.1.4 Warpage efekt

Problémy s prohýbáním pouzder integrovaných obvodů (především pouzdra typu BGA, ale i další, které mají relativně velkou plochu), případně základního substrátu, jsou spojeny především s rozdílným koeficientem teplotní roztažnosti (CTE) materiálů, které se v povrchové montáži vyskytují (viz tabulka 8). Defekt dobře ilustruje obrázek 20. Prohýbání pouzder může vést ke vzniku otevřených spojení, můstků nebo tzv. Head in Pillow efektu (viz další kapitola), ale také ke vzniku prasklin uvnitř pájeného pouzdra či DPS [144]. S rozšířením pouzder typu PoP (angl. *package on package*), kde se nad sebe vrství více (i různých) substrátů, získává tento fenomén na ještě větší důležitosti [142], [145], [146]. Zvláště kritická je pak situace, kdy se vrchní pouzdro prohne konvexně a pouzdro dolní konkávně [142]. Dle studie [146] jsou také na warpage efekt náchylnější rozměrnější a zároveň tenčí pouzdra.



**Obrázek 20.** Ilustrace warpage efektu – možné důsledky (převzato z [142])

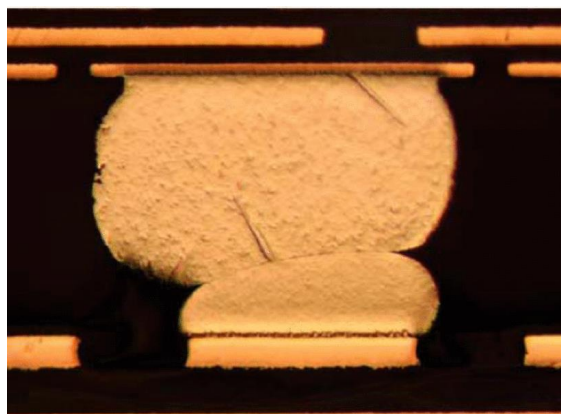
**Tabulka 8.** Koeficient teplotní roztažnosti pro materiály využívané v povrchové montáži

<b>Materiál</b>	<b>Teplota měření (°C)</b>	<b>Koeficient teplotní roztažnosti, CTE (10<sup>-6</sup>/K)</b>	<b>Zdroj</b>
FR4 (epoxidová pryskyřice plněná skelnou tkaninou)	$T < T_g$	80-90 (v ose z) / 15,8 (v ose x, y)	[147]
Měď	20	16,7	[148]
Nikl	20	13,4	[148]
Pájecí slitina SAC305	20	15	[149]
Křemíkový substrát čipu	27	2,62	[150]
Underfill	25	33	[150]

Řešení warpage efektu není ničím jednoduchým, vzhledem k omezenému výběru materiálů v rámci jednotlivých částí DPS a pouzder. Nicméně i tak je třeba při návrhu dbát na CTE jednotlivých materiálů a nevolit materiály s příliš odlišným CTE; dále volit vhodný materiál podlepení (underfill; jedná-li se o warpage vznikající vlivem teplotního cyklování výrobku) [151], vhodně navrhnout měděný motiv [152] a snížit teplotní nárůst během procesu [153].

#### 4.1.5 Head in Pillow efekt

Head in Pillow („hlava v polštáři“) je efekt vznikající v důsledku warpage. Připojovací kulička BGA pouzdra (buď na kraji pouzdra, nebo uprostřed, záleží na typu warpage – konkávní/konvexní) je během pájecího procesu nadzvednuta a nemá kontakt s pájecí pastou nanesenou na pájecí plošku. Ve fázi přetavení dojde k roztavení jak kuličky, tak pájecí pasty a na jejich površích se vytvoří oxidová vrstvička. Jak pouzdro začíná



**Obrázek 21.** Head in Pillow efekt (převzato z [150])

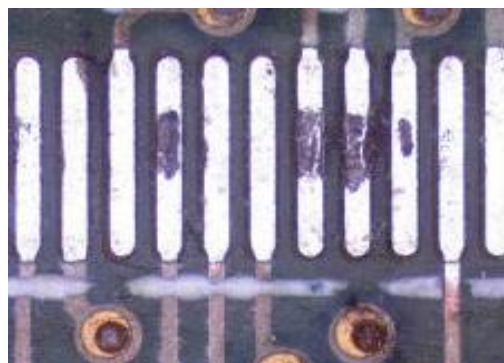
chladnout, prohýbá se do původní polohy, ale i když se kulička s pájkou na připojovací plošce dotknou ještě v roztaveném stavu, již nedojde k jejich dokonalému slnutí díky vrstvičce oxidů; případně se kulička s pájkou dotknou v již tuhém stavu. Výsledný spoj je sice elektricky vodivý (tato chyba není detekována na in-circuit testech), ale mechanicky velmi slabý, což výrazně ovlivňuje jeho spolehlivost. K Head in Pillow efektu může také dojít vlivem nesmáčení BGA kuličky roztavenou pájecí pastou (díky nevhodnému profilu, nevhodnému skladování BGA pouzder, kdy dojde k oxidaci kuliček, nevhodné pájecí pastě s nedostatečně aktivním tavidlem atp.) [154]–[158]. Jako efektivní řešení se zdá být použití inertní (například dusíkové) atmosféry během pájení a použití dostatečně aktivního tavidla [155], [157].

#### 4.1.6 Popcorn efekt

Plastová pouzdra součástek, především integrovaných obvodů, mohou být náchylná na absorpci vlhkosti, pokud jsou skladována v nevhodných podmínkách. Tato absorbovaná vlhkost může spustit degradační procesy vrstev a spojů uvnitř pouzdra [159]. Zároveň, během procesu pájení dochází k ohřátí celé součástky a k vypařování uzavřené vlhkosti, která vytváří v pouzdru vnitřní pnutí. Toto pnutí může v krajním případě vést k jeho popraskání, což může samozřejmě dále způsobovat defekty vnitřních vrstev a spojů v rámci součástky i pájených spojů [160]–[162]. Pro eliminaci defektů spojených s absorpcí vlhkosti je zapotřebí součástky vhodně skladovat a nejlépe před použitím vysušit. Analýza tohoto jevu je možná buď klasickou cestou metalografických výbrusů, rentgenovou analýzou nebo analýzou pomocí skenovacího akustického mikroskopu (angl. *scannig acoustic microscopy*) v konfokálním módu [162], který využívá místo optického záření ultrazvukové vlny a skenuje vzorek v určené hloubce [163].

#### 4.1.7 Black Pad efekt

Tzv. Black Pad efekt je doménou povrchové úpravy ENIG, tedy bezproudového nanášení niklu (během kterého se nanáší i fosfor) a chemického nanášení zlata. Během těchto chemických procesů (respektive v pozlacovací lázni, která je chemicky velmi agresivní) dochází ke korozi niklové vrstvy – povrch pod zlatou vrstvou obsahuje větší množství fosforu kvůli částicím  $\text{Ni}_3\text{P}$  [164]. Vizualně se pak může povrch plošek jevit jako



Obrázek 22. Black Pad efekt (převzato z [161])

černý, především však potom dochází ke zhoršení smáčivosti, protože pájka smáčí částice niklu, ale nikoli  $\text{Ni}_3\text{P}$ . Sice dojde k vytvoření pájeného spoje, ten je však značně mechanicky oslaben, a to i kvůli zároveň vznikajícím tzv. Kirkendallovým voidům (viz kapitola 4.3.3 *Dutiny ve spoji – voidy*). Základní příčina tohoto problému netkví ani tak v množství fosforu, který je nanesen v niklové lázni (zvýšené množství fosforu je pouze indikátorem), jako spíše v kvalitě chemických procesů, jejich čistotě a tloušťce nanášených vrstev [165]–[167]. Podle studie [165] je dobré dodržet tloušťku niklu  $> 4 \mu\text{m}$  a zlata mezi  $0,08\text{--}0,09 \mu\text{m}$  (právě větší tloušťka zlata může vést ke zvýšenému výskytu Black Pad efektu kvůli delší době expozice niklové vrstvy v pozlacovací lázni).

Nicméně podle George Milada [168] je v dnešní době výrobcům DPS, díky velkému zastoupení povrchové úpravy ENIG v rámci elektronické montáže, mechanismus Black Pad efektu dobře znám a jsou schopni produkovat DPS v dobré kvalitě. Na druhou stranu, jak ukazují i mé osobní zkušenosti v rámci spolupráci s průmyslovými subjekty, s nižší tloušťkou zlaté

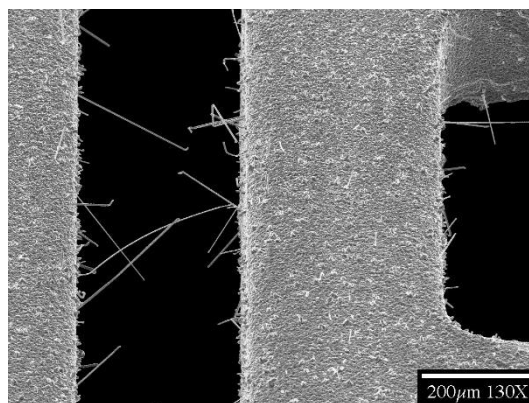
vrstvičky (která sice vede ke snížení rizika Black Pad efektu) může docházet k oxidaci niklu kvůli pórovitému povrchu (viz kapitola 3.2.6.1 *Povrchové úpravy pájecích plošek*).

## 4.2 Chyby dlouhodobého charakteru

Jedná se o chyby, které se projeví nikoli během nebo po procesu pájení, ale až po určité době používání zařízení a které mohou být spojeny s vlivem vnějších klimatických podmínek. Kromě dendritických struktur a whiskerů, které jsou popsány v následujících dvou podkapitolách, může jít i o problémy spojené s korozí povrchů, ať už připojovacích plošek na DPS, pájených spojů, připojovacích plošek součástek atp. Dále pak nejruznější praskání spojů v důsledku uvolňování vnitřního pnutí, mechanické namáhání, vibrace, tepelné namáhání – to může souviset s růstem intermetalických fází ať už na rozhraní substrát-pájka, ale i v objemu pájky, čímž se pájený spoj stává v čase křehčím a tedy náchylnějším na mechanické poškození.

### 4.2.1 Růst whiskerů

Whiskery jsou tenké, většinou monokrystalické struktury ve formě vlásků či fousků (odtud jejich anglický název), které mohou vyrůst do prostoru z povrchu kovu. V případě elektronické montáže se v drtivé většině jedná o cínové whiskery vyrůstající z povrchů s vysokým obsahem cínu (bezolovnaté pájky, bezolovnatý HASL, chemicky pocínovaný povrch pájecích plošek, vývody součástek), nicméně růst těchto struktur byl zaznamenán u celé řady dalších kovů,



**Obrázek 23.** Cínové whiskery na vývodovém rámu součástek typu SOIC po třech letech uskladnění v normálních podmínkách (převzato z [166])

především kadmia, bismutu, zinku, v menší míře také u stříbra, zlata, hliníku, niklu a mnohých dalších [169]. Průměr cínového whiskeru se pohybuje v jednotkách až menších desítkách mikrometrů, ale mohou dorůst do délky od stovky mikrometrů až do několika milimetrů [169]–[172]. To může vést jednoduše ke zkratu například mezi sousedními vývody součástek, jak ukazuje například obrázek 23. S miniaturizací elektroniky samozřejmě nabývá tento fenomén ještě na větším významu. Potýká se s tím velká řada zařízení, včetně těch určených do vojenských či medicínských aplikací, dále třeba průmyslové výkonové systémy [169]. S růstem whiskerů se také potýkala a potýká americká společnost NASA, která tento problém zaznamenala například u svých satelitů. Výzkum uvedený na jejich stránkách [170] je z hlediska této problematiky velmi komplexní.

Tento fenomén je znám a zkoumán již od 40. let 20. století [173], nicméně stále není přesná podstata růstu whiskerů definována. Obecně se předpokládá a ukazuje, že pro růst jsou nezbytné

tři podmínky: mechanický tlakový stres (vnitřní pnutí), povrch pokrytý oxidovou vrstvičkou a možnost rychlé atomické difúze [174]. Proces růstu může probíhat za normálních (pokojevých) teplot a běžné úrovní relativní vlhkosti, není potřeba klimaticky náročných podmínek; nicméně jak uvádí přehledová studie [175], vysoce korozivní prostředí může růst whiskerů podpořit díky extensivní oxidaci.

Potlačení tohoto jevu se dá dosáhnout použitím olovnaté pájky místo bezolovnaté, což ovšem není v dnešní době pro většinu komerčních zařízení průchozí cesta; dále například tepelným žíháním poměrně vysokou teplotou (okolo 150 °C), aplikací ochranných difúzních bariér (vrstev), omezení růstu intermetalických vrstev (opět difúzní bariéry, vhodný teplotní profil), přidání dalších prvků do slitiny (bismut či indium) nebo rekrytalizačními/relaxačními procesy, které pozmění mikrostrukturu spoje (tvar zrn) [171], [172], [174], přičemž poslední dvě se zdají být jako nejefektivnější [174]. Obecně by se snahy o potlačení měly ubírat směrem eliminace vnitřních pnutí, které jsou považovány za hlavní příčinu růstu whiskerů.

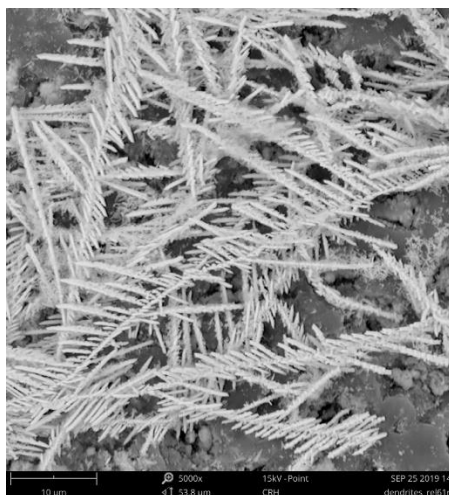
#### 4.2.2 Růst dendritů

Podobně jako whiskery, dendrity jsou také krystalické struktury vyrůstající z povrchu kovů a mohou způsobit zkrat. Na rozdíl od nich ale nerostou do prostoru, nýbrž se šíří po povrchu, a to za specifických dvou podmínek: za podmínky napěťového potenciálu mezi místy, kde se budou dendrity šířit (mezi dvěma vodivými cestami, vývody součástek, pájenými spoji), a přítomnosti elektrolytu pro pohyb iontů. Dendritický růst je totiž založen na principu tzv. elektromigrace. Kov je na straně anody rozpouštěn do elektrolytu, vznikají kovové ionty; tyto ionty jsou elektrickým polem hnány směrem ke katodě, kde dochází k jejich usazování (redukci). Ionty se přitom usazují v místech s největší proudovou hustotou a proto vzniká typická fraktálová (stromečková) struktura (viz obrázek 24 a obrázek 25) [176].

Jako elektrolyt poslouží i zkondenzovaná vlhkost mezi elektrodami, pokud vytvoří souvislý film, ať už viditelný, či nikoli (pak hovoříme o adsorbované vlhkosti). Nepříznivě však vznik elektrochemické migrace mohou ovlivnit i zbytky tavidel, a to i bezoplachových tavidel [75], [78], [177], přičemž podle studie [78] jsou odolnější vůči růstu dendritů tavidla založená na vodě oproti těm založeným na pryskyřici.

Pro eliminaci problémů spojených s elektrochemickou migrací je proto vhodné zařazovat do výrobního procesu i mytí osazených a zapájených DPS. Jakékoli iontové znečištění může vést ke snadnějšímu vytvoření tenkého filmu elektrolytu a dále podpořit migraci. Vliv mají i prvky obsažené v pájecí slitině. V závislosti na typu vytvořeného elektrolytu mohou náchylnost k růstu dendritů zvyšovat či snižovat – například obsah olova ve slitině zvyšuje riziko elektrochemické migrace v destilované vodě [178], ale naopak snižuje, pokud je jako elektrolyt přítomen vodný

roztok  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  [179]. Další možností je poměrně logicky zvýšení vzdálenosti mezi kritickými body s odlišným potenciálem, případně tento potenciál (respektive napětí mezi kritickými body) snížit, pokud je to samozřejmě možné z hlediska funkčnosti zařízení. Ukazuje se, že při použití pulsního či střídavého napětí dochází také k eliminaci či úplné redukci tohoto efektu. Dále je možné použít tzv. inhibitory, pro omezení cínové migrace například citrátové ionty, cetyltrimethylammonium bromid nebo  $\text{Na}_2\text{S}$ , které jsou přítomné v elektrolytické vrstvičce [176].

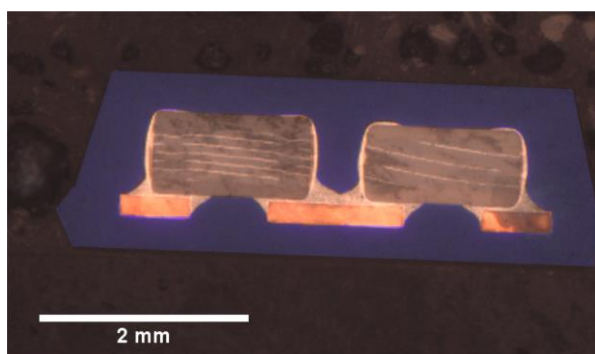


**Obrázek 24.** Dendritická struktura (obrázek z elektronového mikroskopu)

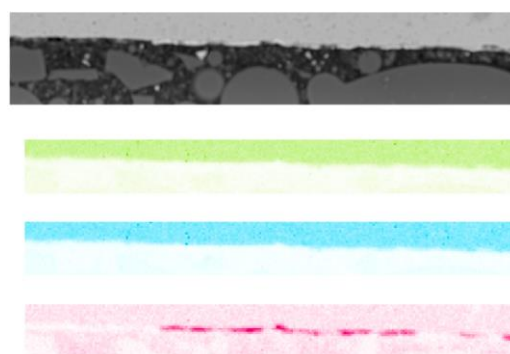


**Obrázek 25.** Elektrochemická migrace na standardním testovacím motivu (migrace mědi)

Elektrochemická migrace nemusí nutně probíhat pouze na povrchu DPS, ale může se objevit i v zdánlivě hermeticky uzavřených systémech, například pod lakem mezi vývody keramického kondenzátoru nebo dokonce uvnitř plastového pouzdra čipu. S oběma příklady jsem se setkal během působení na Katedře elektrotechnologie v rámci řešených zakázek pro průmyslové partnery.



**Obrázek 26.** Analýza elektrochemické migrace – keramické kondenzátory v plastovém pouzdru – řez



**Obrázek 27.** EDX analýza oblasti mezi vývody keramického kondenzátoru: Ba (zelená), Ti (modrá) a Ag (růžová)



Druhý příklad byl dokonce následně zpracován do odborného článku „Analysis of a failure in a molded package caused by electrochemical migration“, který vyšel v impaktovaném periodiku *Engineering Failure Analysis* (viz kapitola 8.2 *Ostatní publikace nevztahující se k tématu disertační práce*). V tomto případě docházelo k iontové migraci stříbra mezi vývody keramických kondenzátorů, které byly k substrátu pouzdra připojeny pomocí elektricky vodivého lepidla obsahujícího stříbrné částice. Problémem byl pravděpodobně proces zastříknutí čipu plastem – mezi kondenzátory a zalévací hmotou vznikaly mezery, kam pronikala vlhkost vytvářející podmínky pro vznik elektrochemické migrace. Problém ilustruje obrázek 26 a obrázek 27.

### 4.3 Chyby způsobené tavidly

Tato podkapitola je věnovaná chybám povrchové montáže, které mohou být primárně způsobeny tavidlem, ať už jeho volbou z hlediska složení a chemické agresivity, jeho množstvím nebo i teplotním profilem během pájení přetavením, který ovlivňuje jeho chování a aktivitu.

#### 4.3.1 Nesmáčení povrchu pájkou

Nesmáčení pájeného povrchu (pájecí plošky, vývodu součástky) roztavenou pájkou má většinou příčinu v přítomnosti oxidové vrstvy, která smáčení brání. Podle studie [180] je kritická tloušťka oxidové vrstvy, aby došlo k nesmáčení bezolovnaté pájky na měděném substrátu, pouhých 18 nm. Vrstva tedy nebyla v dostatečné míře odstraněna použitým tavidlem, které bylo nevhodně zvoleno z hlediska jeho chemické agresivity či malého množství v pájecí pastě. Může se také jednat o nedostatečné prohřátí DPS, kdy nedojde k úplné aktivaci tavidla [181]. Do hry samozřejmě může vstupovat i čistota povrchů z hlediska různých dalších kontaminantů, například z předcházejících technologických procesů [182].

Pro eliminaci této chyby je dobré dbát na čistotu vstupních materiálů, tj. DPS a součástek (optimálně zařadit do výrobního procesu čištění před aplikací pájecí pasty), dále vhodný výběr tavidla, respektive pájecí pasty a dodržení teplotního profilu podle doporučení výrobce především z hlediska přehřevu.

#### 4.3.2 Korozní procesy

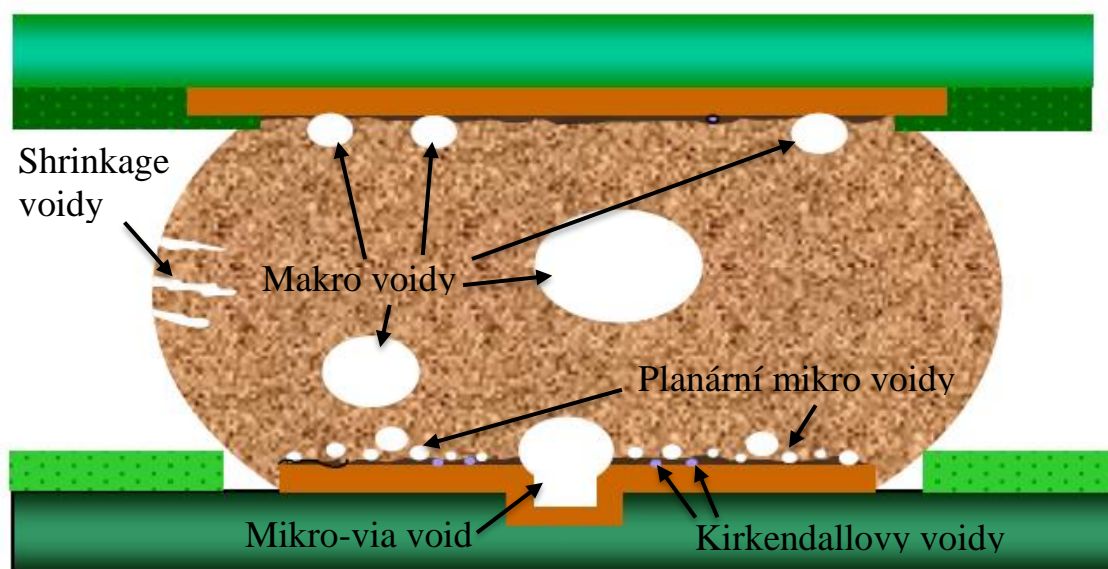
Růst dendritů (elektrochemická migrace), o kterých byla řeč v kapitole 4.2.2, patří obecně do korozních procesů, které způsobují degradaci kovových povrchů. Jak bylo řečeno, i elektrochemickou migraci mohou podpořit či iniciovat právě tavidlové zbytky po pájení, a to i v případě, že se jedná o bezolovnatá tavidla. Nemusí však vždy nutně dojít k růstu dendritických struktur (tedy migraci), ale k degradaci povrchu pájecích plošek či vývodů součástek, ať už elektrochemickou či čistě chemickou korozí, a tedy k mechanickému oslabení napadených částí [183].

### 4.3.3 Dutiny ve spoji – voidy

Vznik dutin ve spoji (tzv. voidů) je velkým tématem a problémem v průmyslové praxi. Obecně nemusí být jejich vznik spojován přímo s tavidlem, může se jednat například o unikání plynných složek z polymerních substrátů DPS, uzavřenou vlhkost, důsledky kontaminace povrchu či výskytu Black Pad efektu; nicméně většina druhů voidů souvisí právě s tavídky. Dutina je většinou prázdná (tvořená vzduchem), případně může obsahovat tavidlové zbytky [184].

Často vznikají voidy na rozhraní pájka-pájený substrát. Dle studie [185] se princip jejich vzniku dá vysvětlit následovně: v momentě, kdy pájka dosáhne bodu tání, vytvoří homogenní matici roztaveného kovu, ve které mohou být uvězněny zbytky tavidel a plynné složky, nicméně díky rozdílu v hustotě jsou vytlačeny mimo roztavený kov. Jiná situace nastává, pokud na nějakém místě substrátu nebude pájka smáčet a budou zde ulpívat zbytky tavidel, které kvůli zvýšené teplotě budou dále generovat plynné složky.

Takto vznikají tzv. *makro voidy* (tedy dutiny s poměrně velkým průměrem vzhledem k velikosti pájeného spoje, přibližně 100-300  $\mu\text{m}$  v případě kuličkových pájených spojů BGA pouzder o velikosti cca 1 mm [184]). Mohou vzniknout i v objemu pájky, nikoli pouze na rozhraní. Protože příčina jejich tvorby vzniká přímo během procesu pájení, také se jim říká procesní voidy. Existují však i další typy voidů, které ukazuje obrázek 28 a jsou dále popsány v textu.



Obrázek 28. Typy dutin v pájeném spoji (převzato z [184])

Makro voidy mohou negativně a zároveň významně ovlivnit spolehlivost pájeného spoje. Studie [186] ukazuje pomocí mechanických testů, že voidy zabírající 50 a více procent objemu pájeného spoje sníží životnost pájeného spoje až na polovinu. Zároveň je však důležitá poloha

voidu v rámci pájeného spoje: v některých případech mohou voidy trhliny ve spoji podporovat či iniciovat, v některých případech mohou naopak propagaci trhlín zastavit a zvýšit tak životnost spoje. Přítomnost voidů ve spoji také může negativně ovlivnit tepelnou vodivost spoje [187].

Na vznik procesních (makro) voidů má vliv především pájecí pasta a její vlastnosti (velikost kuliček, typ a množství tavidla, přítomnost oxidů – tedy i zda je pasta po době její expirace, nanesené množství atp.) a proces pájení (teplotní profil). Cesta ke snížení výskytu voidů je například pomocí zvýšení teploty pájení (pokud se jedná o pájení v inertní atmosféře), aby došlo ke snížení povrchového napětí, které brání plynným složkám v úniku z objemu pájky, čištění DPS před procesem pájení, použití agresivnějšího tavidla nebo použití pájení bez přítomnosti kyslíku [125], [184], [188]. Velmi efektivní, avšak poměrně drahou metodou je také pájení ve vakuu, případně také naopak pájení pod vysokým tlakem [189].

Dalším typem dutin jsou *planární mikro voidy*, které vznikají v jedné rovině nad intermetalickou vrstvou mezi pájeným substrátem a pájkou. Jsou malé (v průměru méně než 50  $\mu\text{m}$ ), ale svým umístěním a množstvím mohou představovat významné spolehlivostní riziko, především u BGA čipů. Ačkoliv byly pozorovány i u jiných povrchových úprav, nejčastěji se objevují u DPS opatřených vrstvou imerzního stříbra a jsou spojovány s dutinami pod touto stříbrnou vrstvou, které vznikají při procesu výroby DPS [184], [190].

*Shrinkage voidy* vznikají na okrajích pájeného spoje a na první pohled vypadají jako trhliny. Nicméně na rozdíl od nich, tyto voidy většinou nepředstavují spolehlivostní riziko, protože dále nenarůstají ani při termomechanickém namáhání. Obecně se má za to, že shrinkage voidy vznikají během chlazení typicky bezolovnatých SAC pájek [184], [191].

*Mikro-via voidy* jsou dutiny, které vznikají typicky u vývodů BGA pouzder, které jsou připojeny k plošce obsahující pokovený otvor (angl. *micro-vias*). Zde dochází k tomu, že roztavená pájka nesmočí vnitřní stěny tohoto pokoveného otvoru a následně se uvolňují plynné složky přítomné v tomto otvoru, ať už se jedná o uzavřený vzduch, tavidlové zbytky nebo organické sloučeniny, které se uvolňují ze substrátu nebo přímo z pokoveného povrchu, pokud nebyl v procesu výroby řádně očištěn. Pro eliminaci těchto typů voidů, které zásadním způsobem ovlivňují mechanické vlastnosti spoje, je třeba vhodně upravit design DPS tak, aby pokovené otvory nebyly přímo pod pájeným spojem [192].

*Pinhole voidy* jsou také velmi malé, v průměru 1-3  $\mu\text{m}$ . Objevují se v rámci intermetalické vrstvy, případně mezi ní a pájeným substrátem. Jejich vznik je spojován s procesem plátování mědi během výroby DPS, protože jsou tyto voidy zřetelné na pájecích ploškách ještě před procesem pájení [184].

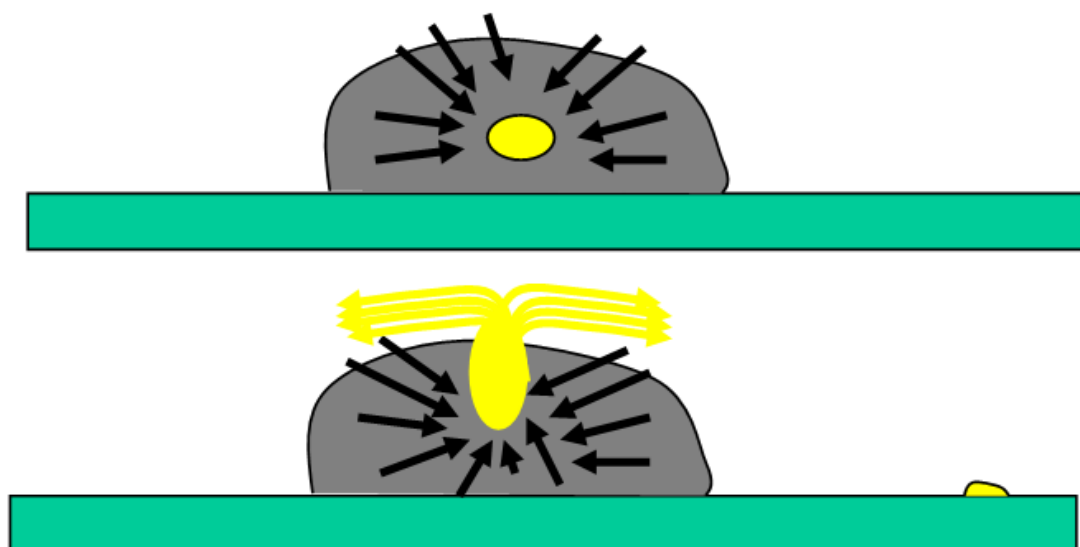
*Kirkendallov* voidy jsou přítomné v intermetalické vrstvě, respektive mezi intermetalickou vrstvou a mědí (pájeným substrátem). Objevují se nikoliv ihned po pájení, ale po vystavení pájeného spoje teplotnímu namáhání (v momentě, kdy se na rozhraní objeví intermetalická sloučenina  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ). Jsou způsobeny rozdílnou difúzí atomů cínu a mědi, případně také nečistotami, které ulpějí na povrchu mědi během procesu plátování [184], [193], [194].

#### 4.3.4 Rozstřík tavidla

Kvůli těkavým a snadno se vypařujícím složkám, které jsou obsažené v tavidlech, dochází během procesu pájení k bublání, prskání a následnému rozstříku tavidla po ploše DPS, a tedy kontaminaci tavidlovými zbytky. Ty se mohou následně rozpouštět ve vrstvičce zkondenzované vody (například ve vlhkém prostředí), zvyšovat vodivost a následně podporovat korozní a elektrochemické procesy, jak bylo popsáno v kapitole 4.2.2. Nicméně, a to se týká především bezoplachových tavidel, které zanechávají poměrně inertní, tuhé zbytky, mohou způsobit i další problémy z důvodu jejich izolačního charakteru – mohou negativně ovlivnit například in-circuit testování hotových DPS, kde může dojít k falešně negativnímu výsledku, pokud je testovací ploška zakryta tavidlovým zbytkem, nebo ovlivnit funkčnost zlatých konektorů, které jsou tvořeny pozlacenými ploškami na DPS [195], [196]. Do většího detailu jsou tyto problémy diskutovány v následující kapitole, kde je také ukázka tohoto problému na snímcích výrobku od průmyslového partnera.

Snad i kvůli rozmanitosti dostupných pájecích past, a především tavidel v nich obsažených, systematických studií, které by se věnovaly eliminaci rozstříku tavidla během pájecího procesu, není mnoho. Kromě předchozích výzkumů provedených na Katedře elektrotechnologie [197], [198] (které jsou také rozebrány v následující kapitole, protože výzkumu v této práci těsně předcházejí), existují pouze tři takové studie publikované v odborných časopisech.

Studie B. Berntsona a dalších [195] je první z nich, publikovaná v roce 2000. Studie je velmi komplexní, nicméně se zabývá pouze olovnatými slitinami ( $63\text{Sn}-37\text{Pb}$  a  $62\text{Sn}-36\text{Pb}-2\text{Ag}$ ). Vyslovuje zde dvě teorie příčiny rozstříku tavidla. Tzv. teorie vyloučení solventu (angl. *solvent expulsion theory*) předpokládá, že rozstřík tavidla souvisí především s masivním vypařováním rozpouštědla a dalších těkavých složek při prudkém zahřátí. Naproti tomu tzv. teorie koalescence (angl. *coalescence theory*) říká, že na tavidlo uzavřené v objemu roztavené pájky působí síly vyvolané povrchovým napětím. V případě prudkého ohřevu (například v momentu nárůstu teploty v zóně přetavení) jsou tyto vyvolané síly dostatečně velké k tomu, aby prudce vytlačily uzavřené tavidlo směrem k povrchu (schematicky to zobrazuje obrázek 29). Ve studii se na základě výsledku experimentu přiklonili k druhé teorii; samotné tavidlo, které bylo zahříváno, totiž nevykazovalo prskání na rozdíl od pájecí pasty. Tato teorie by zároveň nahrávala tomu, že prskání tavidla bude úzce souviset i se vznikem voidů.



**Obrázek 29.** Prskání tavidla – teorie koalescence (převzato z [195])

Na druhou stranu, při zahřívání pouze tavidla nekladou vypařujícímu se solventu odpor pájecí kuličky, a jejich unikání z objemu tavidla se tak může obejít bez prskání. Dále ve studii uvádí, že k redukcí/eliminaci tohoto efektu došlo při zvýšení předehřevu (času i teploty) a při použití určitých typů tavidel (dohromady testovali 5 typů). To podle mého názoru nahrává vlivu solventu (typ, množství). Ve výsledku tak budou pravděpodobně hrát roli obě teorie. Autoři studie dále doporučují použití RSS teplotního profilu místo RTS.

Studie D. Manjunatha a dalších [196] z roku 2006 se věnuje již bezolovnatým pastám na bázi SAC, a to hned se čtyřmi typy tavidel (označení tavidel ale bohužel není uvedeno, pravděpodobně z důvodu, že šlo o testování v rámci komerční produkce a jedná se o firemní tajemství). Zároveň byly prozkoumány různé teplotní profily (typu RSS i RTS) lišící se dobou předehřevu a gradientem teploty. Z výsledků této studie plyne, že pro redukcí kontaminace zlatých konektorů na použitých DPS je vhodné použít RSS profil s dobou trvání předehřevu 60-90 sekund; nicméně výskyt tavidlových zbytků silně závisel na typu tavidla.

Studie Y.W. Leeho a dalších [199] se primárně věnuje vlivu tzv. mikro-via prokovů, tedy malých pokovených otvorů, které jsou umístěny přímo v pájecí plošce a propojují vývod součástky s vrstvou uvnitř více-vrstvého plošného spoje, na prskání tavidla (a vznik voidů). Z jejich závěrů plyne, že čím menší bude prokov v pájecí plošce umístěný, tím větší je pravděpodobnost výskytu tavidlových zbytků v okolí spoje kvůli prskání; pokud tedy musí být ploška vodivě propojena s jinou vrstvou mědi, je vhodnější použít větší průměr prokovu. Zároveň také testovali dva typy teplotního profilu, z čehož vyšel lépe z hlediska prskání teplotní profil s menším teplotním gradientem na počátku předehřevu.

Dále se některé studie věnovaly výskytu pájecích kuliček mimo pájený spoj, což je také prakticky spjato s prskáním tavidla (hrají zde roli samozřejmě i další vlivy jako oxidace pájecích kuliček v pastě atp.). Studie M.Y. Tana [200] se z tohoto hlediska zabývala bizmutovými pájecími pastami a došla k závěru, že pravděpodobnost výskytu kuliček roste s narůstajícím gradientem teploty ve fázi přetavení. Studie Ch. Chansa-ngvaje a J. Kasemsomporna [201] je pak v souladu s předchozí studií Y.W. Leeho [199], protože potvrzuje významný vliv teplotního gradientu a přehřevu na výskyt kuliček pájky kvůli rozstříku tavidla – z jejich výsledků je opět patrné, že čím je větší teplotní nárůst na začátku přehřevu, tím je také větší pravděpodobnost tohoto jevu.

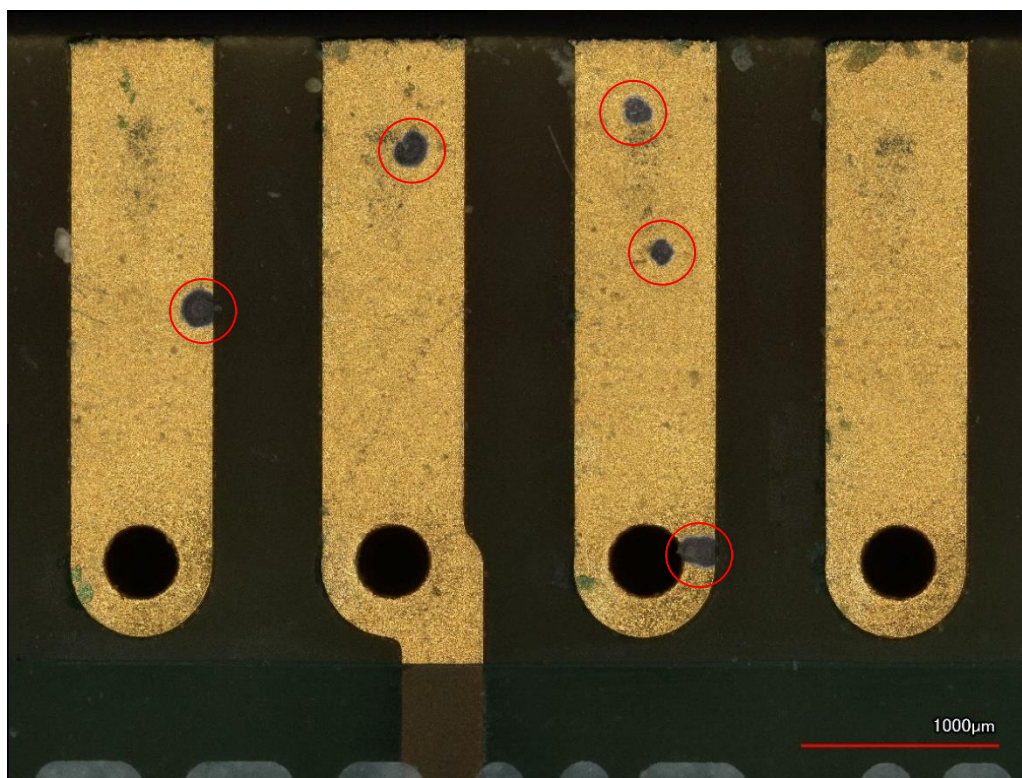
Pakliže je přijat předpoklad, že rozstřík tavidla bude způsoben jak působením povrchových napětí roztavené pájky na uzavřené tavidlo, tak masivním odpařením těžkých složek (solventu) obsažených v tavidle, je možné uvažovat, že k rozstříku bude docházet nejen z oblasti samotného spoje, ale také z oblasti okolo pájecí plošky, kam se při procesu pájení přebytečné tavidlo vyplaví. Pak by totiž mohlo záležet na tom, kolik tavidla se okolo pájecí plošky uvolní. Z tohoto hlediska zatím nebyla publikována žádná práce, přitom se zde ale otevírají možnosti, jak eliminovat či redukovat tento poměrně rozšířený problém v elektronické montáži jinak, než úpravou teplotního profilu (což může vést k jiným spolehlivostním problémům, viz kapitola 3.3.3.2 *Vliv teplotního profilu na vlastnosti pájených spojů*) nebo změnou složení tavidla v pájecí pastě (což je v případě některých ověřených výrobních procesů např. v automobilovém průmyslu procedura, která z hlediska schválení může trvat i roky).

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 1 – ROZSTŘÍK TAVIDLA BĚHEM PÁJECÍHO PROCESU

V této části práce jsou představeny dva experimenty zabývající se problematikou rozstříku tavidla z pájecí pasty během pájecího procesu. Výsledky prvního z nich (zde označený jako Experiment 1) byly publikovány v roce 2020 v impaktovaném článku „Analysis of no-clean flux spatter during the soldering proces“, který vyšel v časopise *Journal of Materials Processing Technology* (viz kapitola 8 *Seznam publikací disertanta*). Druhý experiment, který z toho prvního vychází a rozšiřuje ho především o vylepšenou metodiku měření a další aspekty, které mohou, co se týče rozstříku tavidla, vstupovat do hry, je v plánu sepsat do podoby článku a publikovat v obdobném časopise do konce roku 2021.

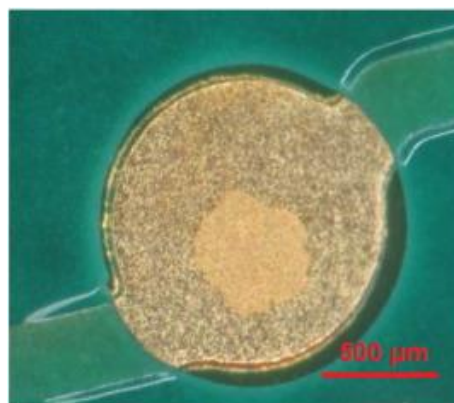
### 5.1 Motivace experimentu s rozstříkem tavidla

Motivací pro vytvoření komplexní studie na téma rozstříku tavidla z pájecí pasty během pájecího procesu byla jednak průmyslová praxe, jednak předchozí drobnější práce kolegů z našeho vědeckého týmu, které naznačovaly určitou závislost výskytu toho efektu na volbě materiálů desky plošného spoje – povrchové úpravy pájecích plošek a (především) nepájjivé masky [197], [198]. Zároveň výše uvedený rešeršní přehled dokládá, že jsou v této oblasti uvedené směry zatím neprozkoumány a nepublikovány.



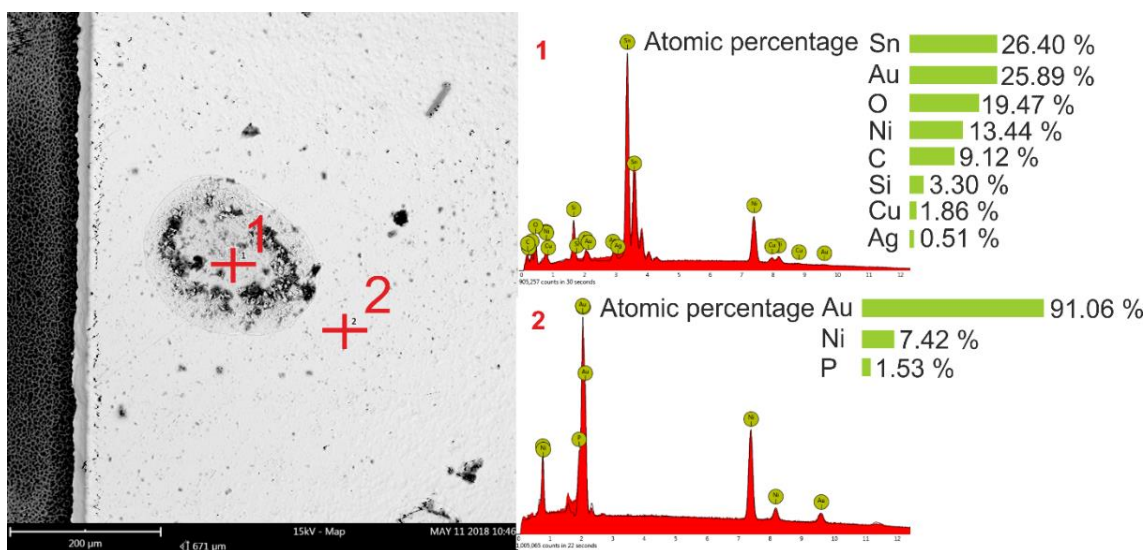
*Obrázek 30. Kontaminace zlatého konektoru tavidlovými zbytky – příklad z praxe*

Podle zkušeností nabytých během doktorského studia a působení na katedře, problém s prskáním tavidla a ulpíváním tavidlových zbytků na deskách plošných spojů je i v dnešní době stále velmi rozšířený a způsobuje zvýšení výskytu zmetků ve výrobě, tedy i nákladů s nimi spojenými. Problém je se zbytky, které ulpívají na testovacích ploškách a ovlivňují vyhodnocení in-circuit testů, a které ulpívají na ploškách tvořící připojovací konektory. Příklad výskytu tavidlových zbytků převzatý přímo od společnosti z průmyslové praxe ukazuje obrázek 30 a obrázek 31.



**Obrázek 31.** Tavidlový zbytek na plošce pro in-circuit test (převzato z [193])

Pro ověření, zda se jedná o skutečně tavidlová rezidua, byla provedena analýza pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (Phenom ProX od společnosti ThermoFisher Scientific, USA). Tato analýza byla součástí diagnostiky problému na výše vyobrazeném konektoru (obrázek 30). Výsledek analýzy ilustruje obrázek 32. Byly provedeny dvě bodové prvkové analýzy, v bodě 1 šlo o oblast rezidua, v bodě 2 pro srovnání o oblast mimo reziduum. Prvkové složení pro bod 1 poukazuje na tavidlový zbytek, protože se zde nacházejí prvky uhlík a kyslík, které mohou náležet organickým sloučeninám, které jsou obsažené v tavidle, a dále cín, měď a stříbro, které odpovídají použité pájecí slitině. Křemík, který je zde také vyznačen, může pocházet ze skelných vláken, které jsou součástí substrátu desky plošného spoje. Na povrch tavidlového zbytku se mohl dostat během řezání a úpravy vzorku pro elektronovou mikroskopii. Naproti tomu bod 2 ukazuje pouze prvky, které jsou součástí použité povrchové úpravy (zlato, nikl, fosfor).

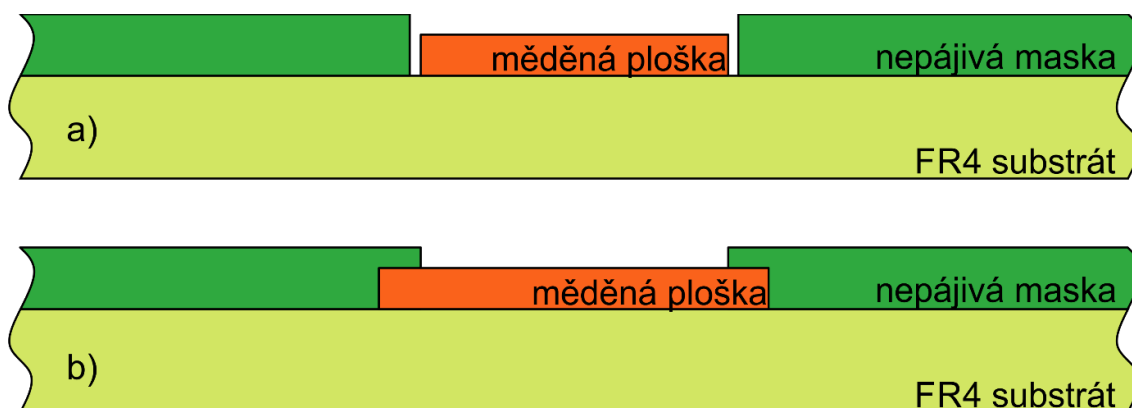


**Obrázek 32.** SEM a EDX analýza tavidlového zbytku (bod 1) a jeho okolí (bod 2) na reálném komerčním produktu



Podobná analýza byla provedena i v rámci předchozí studie od kolegů Duška a Buška [198], zde se zároveň objevila myšlenka, že výskyt rozstříku tavidla je možné ovlivnit úpravou rovnováhy povrchových napětí, neboli mírou roztečení tavidla do okolí pájecí plošky. Podle výsledků došlo změnou nepájivé masky z lesklé na matnou k významnému snížení podílu desek, které byly diagnostikovány in-circuit testem jako vadné kvůli tavidlovým zbytkům (test tedy byl falešně negativní). Závěr autorů je takový, že v případě matné nepájivé masky dojde k většímu roztečení tavidla do okolí pájecí plošky, výsledný film je tenčí a dává možnost těkavým složkám lépe unikát a vypařovat se. Nicméně zde vidím slabinu v tom, že nikde nejsou nepájivé masky konkrétně specifikovány a měřeny z hlediska drsnosti jejich povrchu, pouze jsou označovány jako lesklá a matná. Navíc jak vyplývá z kapitoly 3.1.3.1 *Problematika smáčení*, kontaktní úhel, respektive i roztekání kapaliny po povrchu se nemusí vždy nutně snižovat, respektive zvětšovat se zvětšujícím se parametrem  $R_a$ . Tedy předpoklad autorů, že dojde na matných deskách k většímu roztečení tavidla, nemusí být nutně správný (tento předpoklad v práci není nikde prokázán měřením ani fotografiemi pájecích plošek).

Z výše uvedených důvodů byly navrženy níže představené experimenty, v nichž byly použity také různé typy nepájivých masek, tentokrát však již řádně analyzovaných pomocí profilometru. Zároveň byly vždy použity i dvě různé pájecí pasty obsahující identickou pájecí slitinu (v obou experimentech se jednalo o bezolovnatou slitinu s označením SAC305), ale různé tavidlo. Co se týče chemického složení, to samozřejmě není výrobcem specifikováno konkrétně, byla vybrána ale taková tavidla, aby podle normy J-STD-004B spadala do dvou různých kategorií (konkrétně se vždy jednalo o ROL0 a ROL1). V prvním experimentu byly zároveň použity pájecí plošky s různou povrchovou úpravou.



**Obrázek 33.** Různý design pájecí plošky - copper-defined (a), solder mask-defined (b)

Přijmeme-li předpoklad, že rozstřík tavidla bude nějakým způsobem ovlivněn roztečením tavidla do okolí pájecí plošky, je nutné vzít také do úvahy, co vše toto roztečení ovlivňuje. Pravděpodobně to nebude pouze drsnost a materiál nepájivé masky, ale také rozhraní pájecí plošky a nepájivé masky. To může podle designu plošky vypadat různým způsobem. V případě

plošek definovaných měděnou vrstvou (angl. *copper-defined pad*) nezasahuje nepájivá maska až k samotné měděné plošce, ale obklopuje ji s mezerou definovanou třídou přesnosti a technologickými možnostmi výrobce (viz obrázek 33a). Z hlediska roztékání se tedy na rozhraní nachází „dolík“, který může roztékání bránit. Druhou možností jsou pájecí plošky definované nepájivou maskou (angl. *solder mask-defined pad*) – zde je měděná ploška o něco větší než výsledná ploška určená k pokrytí pájkou (viz obrázek 33b). Ta je určena hranicí nepájivé masky, která přesahuje okraj měděné plošky. Z hlediska roztékání je tedy rozhraní tvořeno „schodem“ o výšce tloušťky nepájivé masky na pájecí plošce.

V průmyslové praxi je také samotná diagnostika tohoto problému a jeho kvantifikace velmi náročná. Tavidlové zbytky, zvláště těch s označením no-clean, jsou transparentní a není jednoduché je pozorovat, případně dále zpracovávat zaznamenané obrazy (počet, velikost reziduí atp.). Vzhledem k malým rozměrům pájecích plošek jsou malé i výsledné „kapky“ – nicméně stejně malé jsou i rozměry testovacích plošek, které mívají v průměru okolo 1 mm [198], [202]. Povrchy těchto testovacích plošek, případně zlatých přípojovacích kontaktů, mají pod větším zvětšením mikroskopu výraznou texturu a tavidlové zbytky nemusí být zřetelné. Z tohoto důvodu bylo dílčím cílem těchto experimentů také navrhnout spolehlivou a opakovatelnou metodu pro testování tohoto fenoménu například pro různé pájecí pasty, pájecí profily atp.

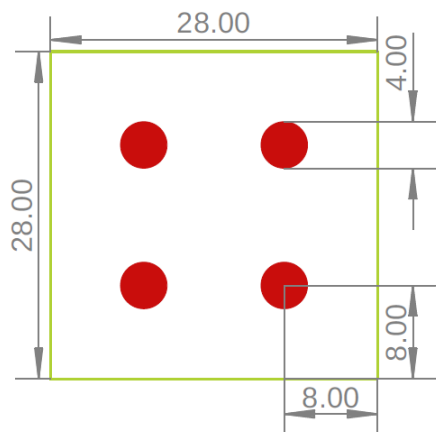
Výsledky těchto experimentů mohou výrobcům elektroniky naznačit, jakým způsobem upravit materiálovou základnu, případně design pájecích plošek tak, aby došlo k redukci výskytu tavidlových zbytků na desce. Dále mohou převzít zde uvedenou metodu testování včetně návrhu testovací desky a z tohoto hlediska analyzovat jak různé materiálové kombinace nepájivé masky/povrchová úprava pájecí plošky, tak i různé pájecí pasty nebo teplotní profily a jaký mají vliv na rozstříkávání tavidla.

## 5.2 Experiment 1

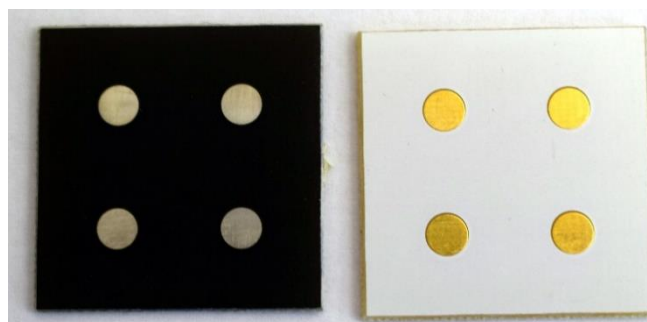
### 5.2.1 Materiály v experimentu 1

V rámci experimentu byla navržena testovací DPS o rozměrech 28 x 28 mm se čtyřmi kruhovými pájecími ploškami (obrázek 34). Jednalo se o plošky definované měděnou vrstvou. Dohromady bylo použito 96 desek (12 pro každou kombinaci povrchové úpravy pájecí plošky, nepájivé masky a tavidla).

Desky byly vyrobeny se dvěma druhy nepájivé masky, které se lišily drsností povrchu (matná, černá varianta a lesklá, bílá varianta), a dvěma druhy povrchové úpravy pájecích plošek – HASL a ENIG (viz obrázek 35). Testovací DPS byly vyrobeny a dodány společností Semach (Česká republika).



**Obrázek 34.** Design testovací DPS v experimentu 1 (kótováno v mm)



**Obrázek 35.** Ilustrace testovacích DPS – HASL/černá maska (nalevo), ENIG/bílá maska (napravo)

Pro experiment byly vybrány dvě pájecí pasty s identickým složením pájecí slitiny – Sn-3Ag-0,5Cu (obecné označení SAC305). Lišily se chemickým složením tavidla – podle normy J-STD-004B se jednalo o tavidlo ROL0 a ROL1. Obsahovaly tedy rozdílné množství aktivátorů ve formě halidů. Pasty byly dodány firmou Shenmao (Taiwan). Detailnější informace o použitých pastách poskytuje tabulka 9.

**Tabulka 9.** Pájecí pasty použité v experimentu 1

Označení pasty	Pájecí slitina	Velikost kuliček	Typ tavidla	Množství tavidla	Výrobce
PF606-P30	Sn-3Ag-0,5Cu	20-40 $\mu\text{m}$	ROL0	11 hm. %	Shenmao
PF606-P			ROL1		

Značení vzorků uvádí tabulka 10, zvoleno bylo podle následující legendy – povrchová úprava pájecí plošky HASL/ENIG, nepájjivá maska Matt/Glossy (matná/lesklá) a typ tavidla ROL0/ROL1. Tedy deska s označením *Hm0* má povrchovou úpravu pájecí plošky HASL, matnou masku a pájecí pastu s tavidlem ROL0.

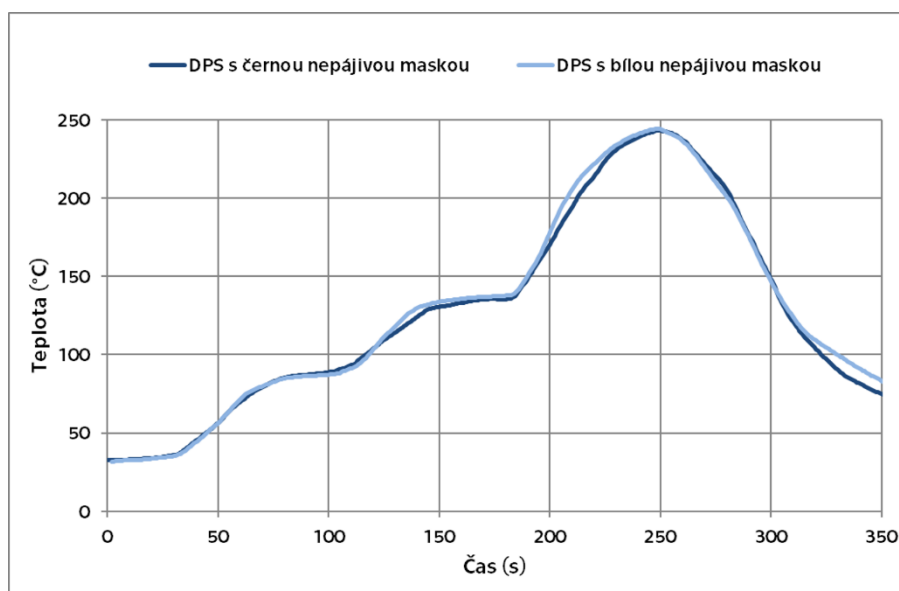
**Tabulka 10.** Značení vzorků v experimentu 1

Označení vzorku	Povrchová úprava pájecí plošky	Typ nepájjivé masky	Tavidlo obsažené v pájecí pastě
Hm0	HASL	matná	ROL0
Hm1	HASL	matná	ROL1
Em0	ENIG	matná	ROL0
Em1	ENIG	matná	ROL1
Hg0	HASL	lesklá	ROL0
Hg1	HASL	lesklá	ROL1
Eg0	ENIG	lesklá	ROL0
Eg1	ENIG	lesklá	ROL1

### 5.2.2 Metody v experimentu 1

Drsnost povrchu nepájivých masek byla měřena pomocí kontaktního profilometru s diamantovým hrotem (zařízení Form Talysurf Intra, Taylor Hobson, Velká Británie). Z naměřeného liniového profilu byly pomocí vyhodnocovacího softwaru TalyProfile Gold určeny parametry  $R_a$  a  $R_{Lo}$  a následně bylo z parametru  $R_{Lo}$  dopočteno  $r$ .

Tisk pasty na pájecí plošky byl realizován pomocí speciální ocelové šablony o tloušťce 0,5 mm (místo standardních 0,1-0,2 mm). Tím se na pájecí plošky nanoslo větší množství tavidla – což podle mých předchozích pozorování zvyšuje pravděpodobnost prskání a zvýší se tím tedy i přesnost vyhodnocení experimentu díky většímu množství tavidlových zbytků. Frézované otvory v šabloně odpovídaly průměrem pájecím ploškám – 4 mm. Tisk probíhal na zařízení pro šablonový tisk SAB 06 od společnosti ELPRO (Slovensko), které zajistilo přesné zarovnání šablony s DPS s chybou menší než 0,1 mm.

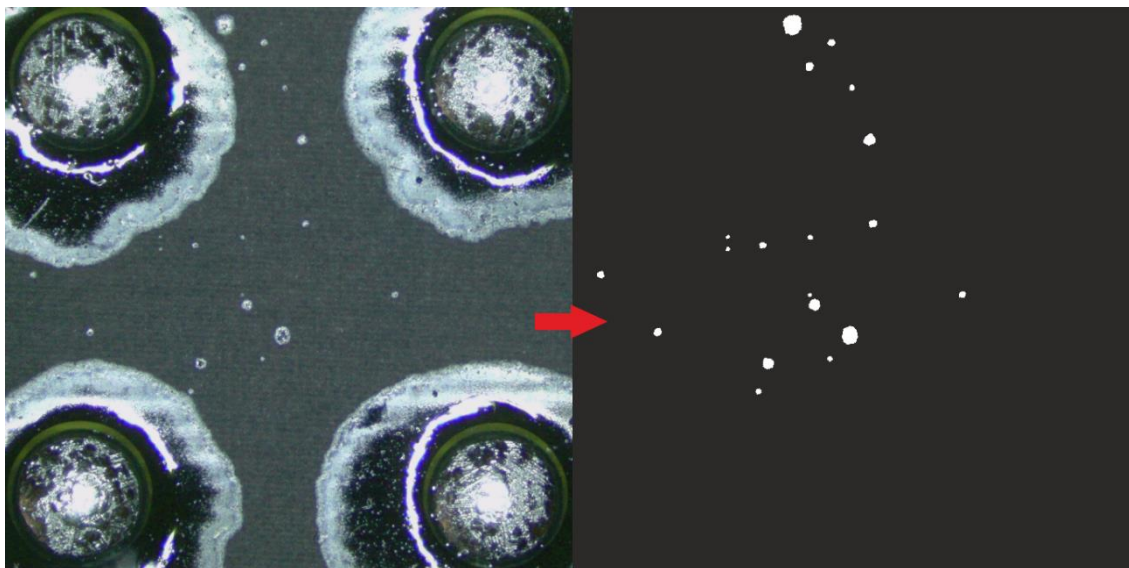


**Obrázek 36.** Teplotní profil měřený na pájecích ploškách během průchodu peci v experimentu 1

Po tisku pájecí pasty byly testovací desky vystaveny procesu přetavení v horkovzdušné průběžné peci se třemi nastavitelnými teplotními zónami (Mistral 260 od společnosti Spidé, Nizozemsko) – dvě pro nastavení předehřevu, jedna pro nastavení oblasti přetavení. Nastavení těchto tří zón bylo pečlivě vybráno k dosažení strmějšího teplotního profilu a tím i větší pravděpodobnosti prskání tavidla. Teplotní profil (viz obrázek 36) byl měřen pomocí termočlánku nakontaktovaného na plošku testovací DPS, a to pro obě varianty nepájivé masky, aby se vyloučil vliv barvy masky na průběh teplotního profilu.

Následně byly pomocí digitálního mikroskopu pořízeny snímky přetavených DPS, které byly dále zpracovány obrazovou analýzou v programu NIS Elements. Na základě rozdílu v jasů byly označeny jednotlivé tavidlové zbytky v oblasti o ploše 256 mm<sup>2</sup>, která byla umístěna mezi

pájecími ploškami, a ze které byly vynechány oblasti samotných plošek a rozteklého tavidla okolo nich (viz Obrázek 37). Vyhodnocovány byly pouze tavidlové zbytky větší než  $0,005 \text{ mm}^2$ .



*Obrázek 37. Příklad obrazového zpracování snímku hodnoceného vzorku (nalevo – původní snímek, napravo – výsledek zpracování)*

### 5.2.3 Výsledky experimentu 1 a diskuze

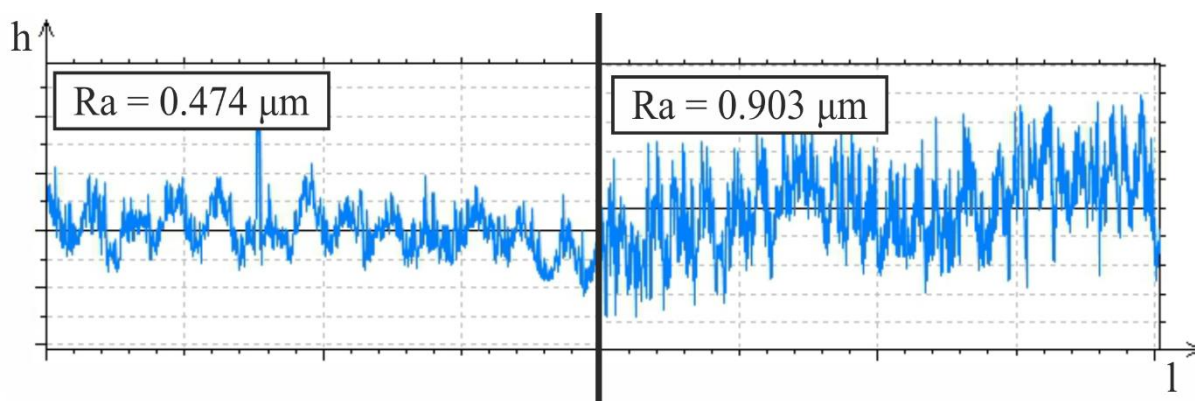
V následujících podkapitolách jsou prezentovány výsledky experimentu: ověření rozdílu mezi nepájivými maskami v jejich drsnosti, průměrný počet tavidlových zbytků na vyznačené ploše, průměrná velikost tavidlového zbytku, průměrná celková plocha kontaminovaná tavidlovými zbytky a plocha rozteklého tavidla okolo pájecí plošky. Data byla statisticky zpracována a testována pomocí Studentova t-testu se standardní mezí statistické významnosti 0,05.

#### 5.2.3.1 Výsledky měření drsnosti nepájivých masek v experimentu 1

Tabulka 11 uvádí průměrné hodnoty parametrů  $R_a$  a  $R_{L0}$  z celkem deseti měření pro každou nepájivou masku. Je vidět, že  $R_a$  je přibližně dvakrát větší pro matnou (černou) nepájivou masku v porovnání s lesklou (bílou) maskou, stejně tak parametr  $r$  je větší pro matnou variantu. Obrázek 38 ilustruje rozdíly pomocí naměřených profilů.

*Tabulka 11. Výsledky měření drsnosti povrchu nepájivých masek v experimentu 1*

Typ masky	nepájivé	Barva	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{L0}$ (%)	$r$ (-)
lesklá		bílá	$0,474 \pm 0,06$	$35 \pm 4$	$1,35 \pm 0,04$
matná		černá	$0,903 \pm 0,07$	$109 \pm 9$	$2,09 \pm 0,09$

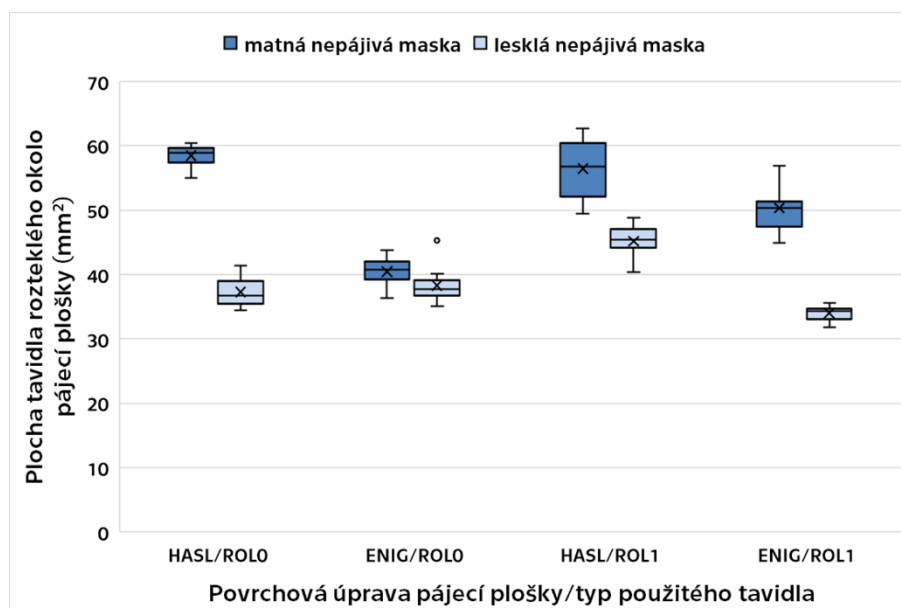


**Obrázek 38.** Příklad profilů naměřených kontaktním profilometrem pro lesklou masku (nalevo) a matnou masku (napravo)

### 5.2.3.2 Vyhodnocení roztékavosti tavidla v experimentu 1

Výsledky analýzy roztékavosti tavidla po ploše nepájivé masky poměrně jasně ukazují, že výsledná plocha tavidla okolo pájecí plošky je až 1,5krát větší v případě matné nepájivé masky oproti lesklé masce (obrázek 39). Toto souhlasí s teoretickými předpoklady uvedenými v kapitole 3.1.3.1 *Problematika smáčení* – s vyšším číslem  $r$  se zároveň zmenšuje smáčecí úhel a podporuje se tak roztékání tavidla po povrchu nepájivé masky. Podle statistického testu je nevýznamný pouze rozdíl mezi vzorky s označením  $Em0$  a  $Eg0$  ( $p = 0,0845$ ).

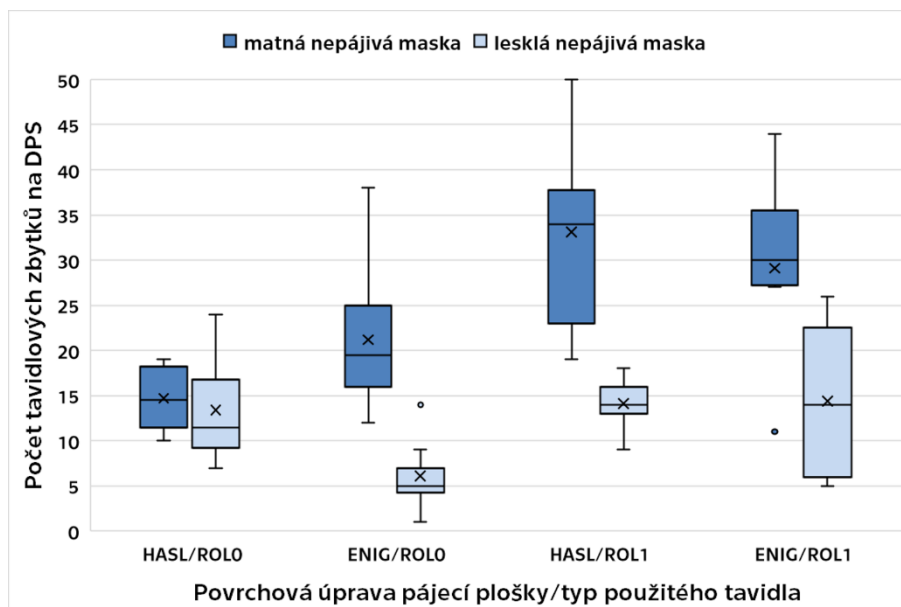
Změna povrchové úpravy či tavidla ovlivnila roztékání tavidla pouze v malé, statisticky nevýznamné míře, případně jsou tyto závislosti nejednoznačné (například pro vzorky s matnou nepájivou maskou vychází, že s povrchovou úpravou HASL se více rozteče tavidlo ROL1, ale s povrchovou úpravou ENIG se naopak více rozteče tavidlo ROL0).



**Obrázek 39.** Závislost plochy tavidla rozteklého okolo pájecí plošky na povrchové úpravě, typu použitého tavidla a typu nepájivé masky

## 5.2.3.3 Vyhodnocení rozstříku tavidla v experimentu 1

Celkový počet tavidlových zbytků na ploše DPS, která byla vyhodnocována, dobře koresponduje s výsledky vyhodnocení roztékavosti tavidla. Na povrchu s vyšším číslem  $R_a$  (matná nepájivá maska) se objevilo také větší množství tavidlových zbytků, a to ve všech kombinacích povrchové úpravy a typu tavidla (viz obrázek 40), ačkoli pro vzorky s označením  $Hm0$  a  $Hg0$  není tento trend statisticky významný. Celkově se dá říct, že při použití matné nepájivé masky byl počet tavidlových zbytků na DPS přibližně dvojnásobný oproti deskám s lesklou nepájivou maskou. Jestliže se tedy tavidlo více rozteče okolo pájecí plošky, je zde větší pravděpodobnost výskytu prskání – odpařované složky během procesu pájení se mohou uvolňovat z větší plochy a celkově tedy dávají vzniknout většímu množství tavidlových zbytků mimo původní objem tavidla okolo pájecí plošky. To je samozřejmě v rozporu se závěry původní publikované práce našeho týmu na tuto problematiku [198], která jako prokazatelně lepší variantu uvádí matnou nepájivou masku. Nicméně jak jsem psal výše, nepájivé masky použité v předchozí studii nebyly nijak dále měřeny (z hlediska drsnosti tak mohly být v přesně opačném poměru, případně se zde tavidlo z hlediska roztékání chovalo přesně opačně, než je v publikaci předpokládáno), navíc se nejednalo o systematickou studii uvažující vícero vstupních parametrů jako v mém případě a tavidlové zbytky nebyly vyhodnocovány přímo, ale vyhodnocovány byly pouze výsledky z in-circuit testování.



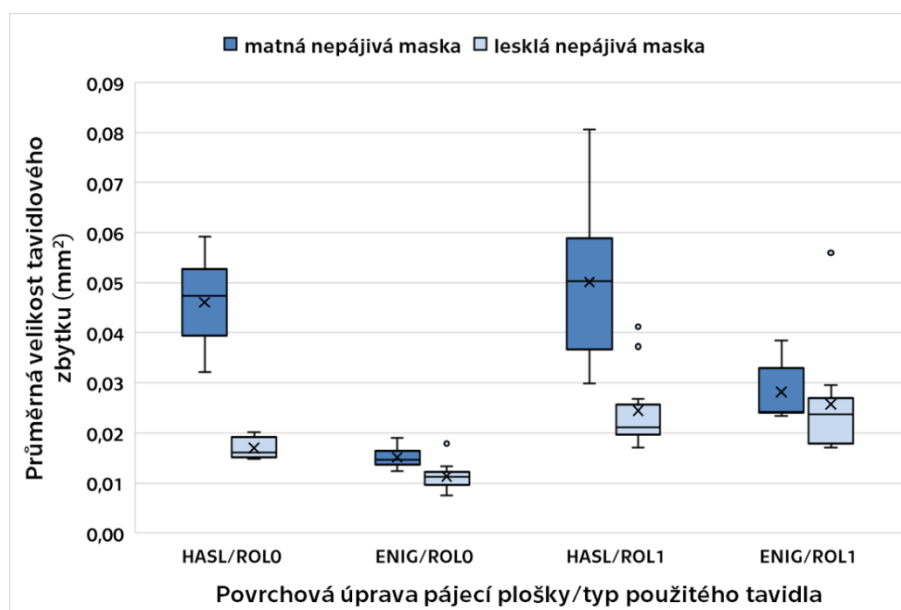
**Obrázek 40.** Celkový počet tavidlových zbytků na vyhodnocované ploše DPS v závislosti na povrchové úpravě pájecí plošky, typu tavidla a typu nepájivé masky

Z hlediska povrchové úpravy pájecí plošky nebyly zaznamenány prakticky žádné statisticky významné rozdíly v počtu tavidlových zbytků (jediný statisticky významný rozdíl ze všech osmi kombinací byl nalezen mezi vzorky  $Hg0$  a  $Eg0$ ). Předpoklad, že se tedy výskyt prskání tavidla dá

částečně omezit změnou povrchové úpravy, který byl vysloven v další předchozí publikaci na toto téma [197], nebyl potvrzen. Zde se však z mého pohledu nejedná o nic překvapivého. V publikaci byly použity vzorky tvořené DPS plně pokrytou danou povrchovou úpravou (pasivovaná měď/HASL/imerzní cín/ENIG) bez jasně označených pájecích plošek, tavidlo se tedy roztékalo po ploše právě dané povrchové úpravy. V mém případě pokryla pájka z pájecí pasty prakticky beze zbytku pájecí plošku (nedocházelo k nesmáčení či odsmáčení) a tavidlo se roztékalo pouze po ploše nepájecí masky. Nicméně, v této předchozí publikaci byla vyslovena myšlenka o vlivu roztékání tavidla do okolí pájeného spoje (tedy rozteklé ploše) na jeho prskání, která koresponduje s mojí výše uvedenou diskuzí.

Typ tavidla také ovlivnil výskyt tavidlových zbytků – jejich počet se na vyhodnocované ploše zvýšil použitím tavidla s označením ROL1, které obsahuje více aktivátorů ve formě halidů a je tedy z hlediska redukce oxidů agresivnější. Výsledné chemické složení tavidla, především obsah solí, které vznikají chemickou reakcí tavidla a kovových oxidů, je během a po procesu pájení jiný. Chování tavidla mohla ovlivnit i teplota během procesu (například teplota varu těkavých složek). Oproti tavidlu ROL0 způsobilo tavidlo ROL1 v průměru asi 50% nárůst počtu tavidlových zbytků. Tedy i vyhodnocení vlivu nepájecí masky bylo více průkazné pro tavidlo ROL1.

Kromě celkového počtu tavidlových zbytků byla vyhodnocena také průměrná velikost jednoho tavidlového zbytku. Ten totiž tvoří izolační bariéru. Celkový počet tavidlových zbytků tedy nemusí být určující, pokud jsou jednotlivé zbytky natolik malé, že neohroží funkci zařízení (je velmi malá pravděpodobnost, že se testovací elektroda trefoří do tavidlového zbytku, případně jsou tavidlové zbytky zároveň tak tenké, že neohroží ani funkci připojovacích zlatých konektorů).

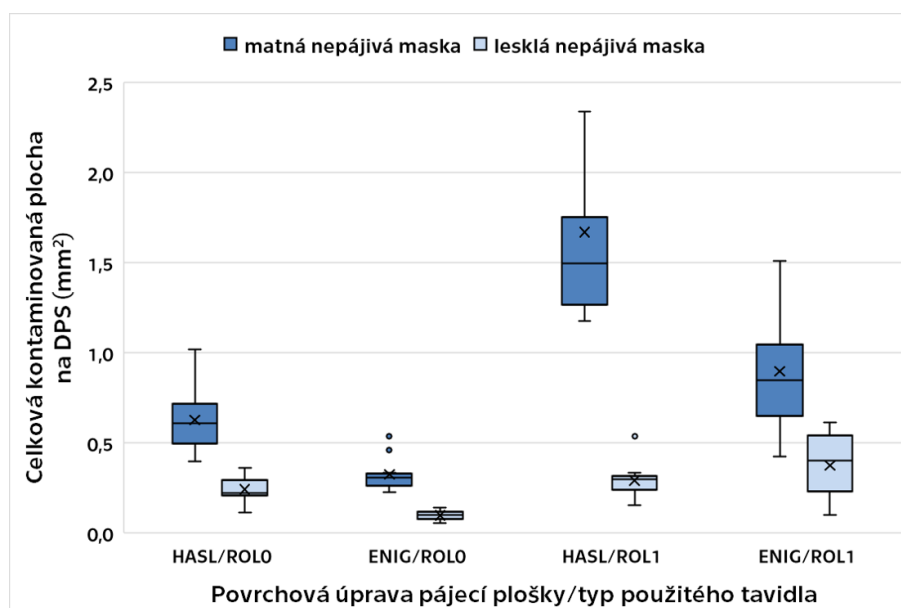


**Obrázek 41.** Průměrná velikost tavidlového zbytku na DPS v závislosti na povrchové úpravě pájecí plošky, typu tavidla a typu nepájecí masky



Jak je vidět na grafu (obrázek 41), z hlediska velikosti tavidlových zbytků již významně záleží i na povrchové úpravě pájecí plošky. To lze vysvětlit rozdílnou chemickou reakcí mezi tavidlem a pájeným povrchem (v případě úpravy HASL se jedná o oxidy cínu, v případě úpravy ENIG pak – pouze v malé míře, protože je povrch chráněn prakticky neoxidujícím zlatem – oxidy niklu). V tavidle jsou dále rozpuštěné rozdílné produkty redukční reakce, celkové složení tavidla bude rozdílné a bude se tedy chovat jinak z hlediska evaporace těkavých složek a prskání. Z výsledků vyplývá, že při použití povrchové úpravy ENIG dojde ke zmenšení velikosti tavidlových zbytků oproti povrchové úpravě HASL v průměru o 37 %. Ve všech případech se jednalo o statisticky věrohodný rozdíl ( $p < 0,05$ ) kromě vzorků *Hg1* a *Eg1*, mezi kterými podle t-testu významný rozdíl nebyl ( $p = 0,936$ ).

Posledním zkoumaným kritériem byla celková kontaminovaná plocha, tedy součet plochy všech residuí v hodnocené oblasti. Výsledky ukazuje obrázek 42. Z tohoto hlediska se zdá jako nevhodná kombinace povrchové úpravy pájecí plošky HASL, matné nepájivé masky a tavidla typu ROL1 (vzorek *Hm1*), u která byla zjištěna největší kontaminovaná plocha o hodnotě 1,5 mm<sup>2</sup>. Naopak při použití povrchové úpravy ENIG, lesklé nepájivé masky a tavidla typu ROL0 (vzorek *Eg0*) se celková plocha tavidlových zbytků na DPS sníží na pouhých 0,1 mm<sup>2</sup>.



**Obrázek 42.** Celková kontaminovaná plocha na DPS v závislosti na povrchové úpravě pájecí plošky, typu tavidla a typu nepájivé masky

Tabulka 12 shrnuje výsledky všech sledovaných kritérií – plocha roztečení tavidla okolo pájecí plošky, počet tavidlových zbytků na sledované ploše, jejich průměrná velikost a celková kontaminovaná plocha.

**Tabulka 12.** Průměrné hodnoty plochy roztečení tavidla okolo pájecí plošky, počtu tavidlových zbytků, velikosti jednoho tavidlového zbytku a celkové kontaminované plochy DPS v experimentu 1

Označení vzorku	Plocha tavidla rozteklého okolo pájecí plošky (mm <sup>2</sup> )	Počet tavidlových zbytků na DPS	Průměrná velikost tavidlového zbytku (mm <sup>2</sup> )	Celková kontaminovaná plocha (mm <sup>2</sup> )
Hm0	58,5 ± 1,7	15 ± 3	0,045 ± 0,008	0,58 ± 0,13
Hm1	56,4 ± 4,8	29 ± 8	0,047 ± 0,012	1,52 ± 0,37
Em0	40,5 ± 2,3	21 ± 8	0,015 ± 0,002	0,30 ± 0,07
Em1	50,4 ± 4,0	26 ± 10	0,027 ± 0,005	0,83 ± 0,27
Hg0	37,3 ± 2,4	13 ± 5	0,017 ± 0,002	0,23 ± 0,07
Hg1	45,2 ± 2,6	14 ± 2	0,023 ± 0,006	0,26 ± 0,07
Eg0	38,3 ± 2,9	6 ± 4	0,011 ± 0,002	0,09 ± 0,02
Eg1	34,0 ± 1,2	10 ± 7	0,022 ± 0,005	0,35 ± 0,18

Na základě vlastních pozorování i dalších odborných článků na tuto tematiku [196]–[199], [203] lze diskutovat, že kromě sledovaných parametrů mají na četnost tavidlových zbytků na DPS vliv parametry pájecího procesu jako například preciznost šablonového tisku pájecí pasty (nesprávné nastavení polohy šablony vůči DPS, nedostatečné čištění šablony a tedy ulpívání zbytků pájecí pasty na DPS mimo pájecí plošky, rozmazaná pájecí pasta atp.) a jiné parametry jako čistota povrchů DPS či typ pájecí pece a použitý teplotní profil. Samotné (nadměrné) roztékání tavidla může být problematické v blízkosti funkčních částí DPS (plošek pro kontaktování in-circuit testem, plošek zlatých konektorů). To je možné řešit vhodným návrhem vodivého motivu (neumísťovat plošky citlivé na znečištění blízko větších pájených spojů, ze kterých se roztéká větší množství tavidla; případně volit různé typy pájecích plošek – viz Experiment 2).

Důležitou roli hraje také rovnoměrný a dobře kontrolovaný ohřev během pájení, kterého může být dosaženo například pomocí technologie pájení v parách, kde jsou teplotní rozdíly na různých místech DPS minimalizovány (i když podle studie kolegů Geczy et al. [204] ne zcela kompletně). Můj teoretický předpoklad je také ten, že prskání tavidla by mohlo být právě touto technologií redukováno, protože se zde během pájení utváří na povrchu DPS tenký film pájecí kapaliny – galidenu – kondenzací jejich par. Ten by mohl chránit plošky DPS před kontaminací.

Výzkum vlivu technologie na znečištění tavidlovými zbytky byl plánován už v rámci této dizertační práce, nicméně zařízení vhodné pro tento výzkum (tedy pec na pájení v parách s možností regulace teplotního profilu) bylo pořízeno až v květnu 2021. S jeho využitím v rámci výzkumu této problematiky počítám do budoucna, například v rámci studentských (bakalářských/diplomových) prací s předpokladem publikace v nějakém impaktovaném periodiku, případně na odborné konferenci.

U technologie pájení v parách, jakkoli se zdá jako vhodné řešení pro eliminaci prskání tavidla, je každopádně nutné také počítat s určitými negativy, například se zvýšeným výskytem efektu náhrobního kamene či voidů [109], [138].

#### 5.2.4 Závěry experimentu 1

Provedený experiment poukazuje především na rozdíly v četnosti výskytu tavidlových zbytků na DPS pro matnou a lesklou nepájivou masku. Větší drsnost povrchu nepájivé masky způsobí větší roztékání tavidla okolo pájecí plošky a větší množství tavidlových zbytků, které ulpí na povrchu DPS. Ke snížení toho efektu je tedy doporučeno použít lesklou nepájivou masku, která ho eliminuje v průměru přibližně o 50 %.

V případě použití povrchové úpravy pájecí plošky ENIG namísto HASL dojde ke zmenšení velikosti tavidlových zbytků v průměru o 37 %. Tím může dojít ke zmenšení rizika ohrožení funkce zařízení kvůli kontaminovaným ploškám konektorů či in-circuit testovacích kontaktních bodů.

Ze zkoumaných je tedy preferována kombinace povrchové úpravy pájecí plošky ENIG a lesklé nepájivé masky, kde byla kontaminace povrchu DPS tavidlovými zbytky co do jejich počtu i výsledné kontaminované plochy nejmenší. Naproti tomu se u kombinace povrchové úpravy HASL a matné nepájivé masky objevilo velké množství tavidlových zbytků s největší celkovou kontaminovanou plochou DPS, tuto kombinaci tedy v souladu se závěry tohoto experimentu nelze z hlediska prskání tavidla doporučit.

Použití tavidla s nižším obsahem halidů (v mém případě tavidla s označením ROL0) místo aktivnějšího tavidla typu ROL1 je také preferováno z hlediska eliminace prskání, nicméně zde může být negativně ovlivněno smáčení pájecí slitiny (záleží na konkrétním typu slitiny a pájeného povrchu).

### 5.3 Experiment 2

Druhý experiment zabývající se problematikou rozstříku tavidla z pájecí pasty vycházel z předcházejícího a měl za cíl především následující:

- inovovat metodiku experimentu – tak, aby byla jednodušší, přesnější, aby vyhodnocení tavidlových zbytků bylo provedeno vždy na stejném podkladu (aby zde nevznikla možná systematická chyba daná rozdílným odrazem světla na různých typech povrchů, především nepájivých masek), aby se design testovací DPS více blížil reálnému motivu komerčních DPS (tzn. zmenšit pájecí plošky a využít šablonu o standardní tloušťce) a aby byla metodika dále využitelná například v průmyslovém prostředí pro kvalifikaci chování pájecí pasty z hlediska prskání tavidla, a to

v závislosti na různých dalších parametrech (pro různé typy pájecích past, pro různé teplotní profily atp.),

- zhodnotit vliv dalších parametrů, které ovlivňují roztečení tavidla do okolí, především vliv designu pájecí plošky (definované měděnou ploškou/definované nepájivou maskou) a dalších typů nepájivých masek,
- ověřit souvislost mezi roztečením tavidla do okolí pájecí plošky a prskáním; ověřit vliv množství halidů v tavidle na prskání tavidla pomocí pájecích past se stejným složením pájecí slitiny a stejným označením tavidel, avšak od jiného výrobce.

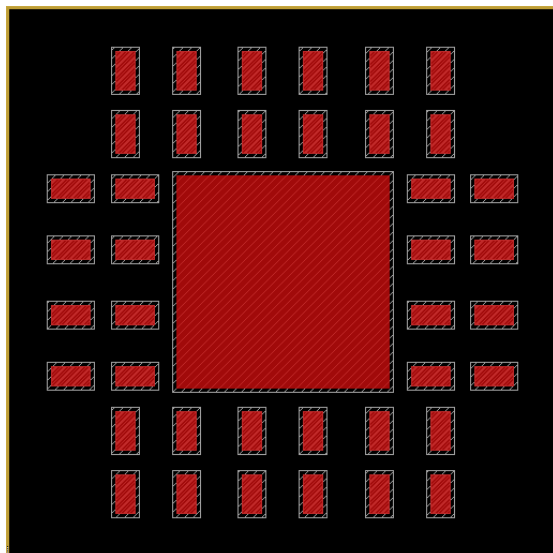
Z hlediska metodiky bylo nejdůležitější a nejtěžší vypořádat se s faktem, že tavidlové zbytky bezoplachových tavidel jsou transparentní. U předchozího experimentu byly tavidlové zbytky detekovány relativně jednoduše díky použitým maskám, nicméně i tak probíhalo vyhodnocení pro černou a bílou masku poněkud odlišně (pod kruhovým světlem mikroskopu měly tavidlové zbytky různý odstín). Navíc tím byla částečně ovlivněna i velikost tavidlových zbytků – na matné masce se kapka tavidla více rozteče a zabere tak větší plochu než na masce bílé. Bylo tedy zapotřebí inovovat metodiku tak, aby dopadová (vyhodnocovaná) plocha pro tavidlové zbytky měla vždy stejný povrch bez ohledu na další použité materiály a zároveň aby jednotlivé tavidlové zbytky byly snadněji a hlavně spolehlivěji detekovatelné operátorem (v součinnosti s automatickou detekcí, plně automatická detekce tavidlových zbytků z obrazu bez zásahu operátora je však zatím nemožná vzhledem k poměrně strukturovanému povrchu použitých „terčů“ a množství dalších nečistot přirozeně ulpívajících na jejich povrchu – byla by to však hezká úloha pro programování umělé inteligence).

### 5.3.1 Materiály v experimentu 2

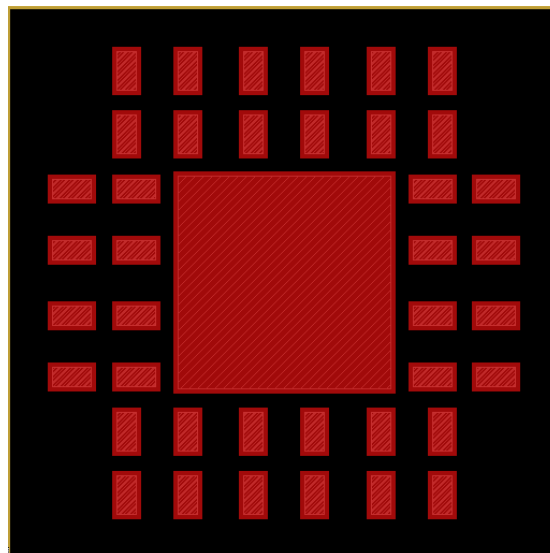
Pro experiment byl navržen nový design testovací DPS, který využívá pájecí plošky pro SMD rezistory/kapacitory v pouzdru o velikosti 1206 (celkem destička obsahuje 40 pájecích plošek pro montáž 20 součástek). Byly vytvořeny dvě varianty – s ploškami definovanými měděnou ploškou (copper-defined; obrázek 43) a s ploškami definovanými nepájivou maskou (solder-mask defined; obrázek 44).

Zároveň byly použity dvě různé nepájivé masky – klasická zelená nepájivá maska nanosená na DPS pomocí licí clony a fotolitografického procesu (více lesklý vzhled) a dále zelená nepájivá maska vytvořená inkoustovým tiskem na zařízení CraftPix CPT6151 (společnost Microcraft, Japonsko). Druhý způsob vytváření nepájivé masky je poměrně inovativní a dle slov výrobce těchto DPS (společnost Printed, Česká republika) je toto zařízení i první svého druhu v Evropě [94].

Celkem tedy byly v experimentu použity 4 různé varianty designu DPS lišící se typem pájecí plošky a nepájecí masky, označené Board 1-4 podle legendy uvedené v tabulce 13. Vyrobené vzorky ukazuje obrázek 45.



**Obrázek 43.** Původní design testovací DPS – plošky definované měděnou ploškou; odstup nepájecí masky od pájecí plošky je 200  $\mu\text{m}$



**Obrázek 44.** Původní design testovací DPS – plošky definované nepájecí maskou; překryv pájecí plošky maskou je 200  $\mu\text{m}$

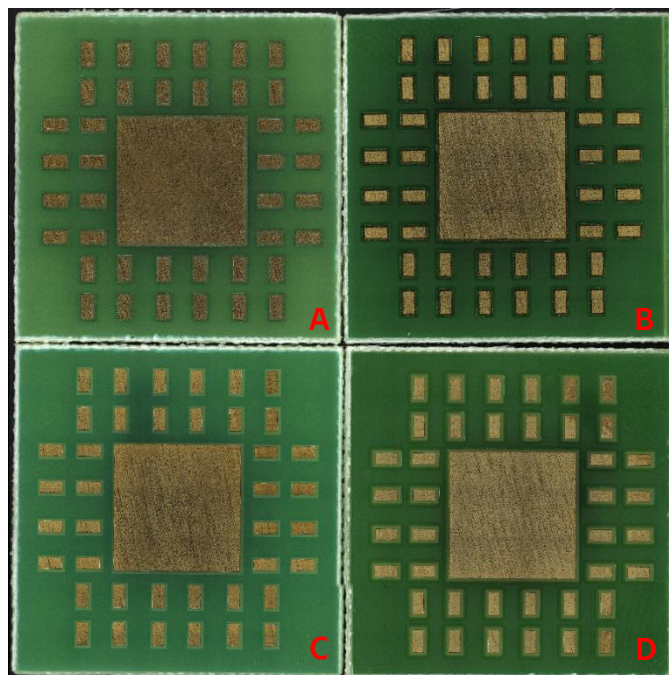
**Tabulka 13.** Značení vzorků v experimentu 2

Označení designu desky	Typ pájecí plošky	Typ nepájecí masky	Povrchová úprava pájecích plošek
Board 1	solder mask-defined	tištěná	galvanické
Board 2	solder mask-defined	fotolitografická	niklování/galvanické
Board 3	copper-defined	tištěná	zlacení
Board 4	copper defined	fotolitografická	

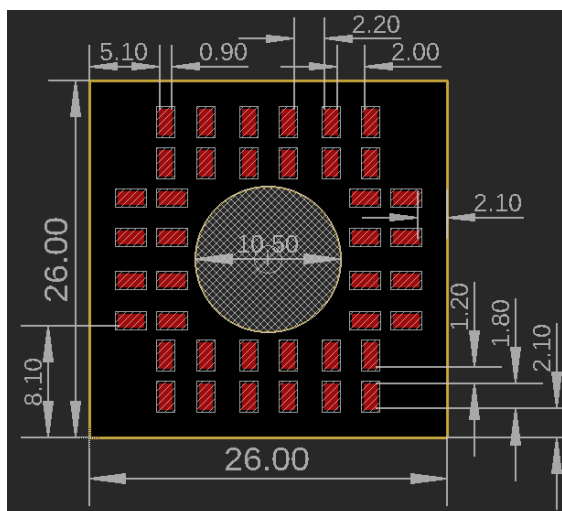
Design (obrázek 43 a obrázek 44) původně počítal s dopadovou plochou umístěnou uprostřed vzorku, vytvořenou z měděné plošky s povrchovou úpravou galvanického niklování/galvanického zlacení (obdoba úpravy ENIG). Nicméně jsem po několika pokusných vyhodnocení usoudil, že tato varianta není použitelná – povrch plošky měl výraznou texturu, která prakticky znemožňovala spolehlivě určit, zda vyhodnocované skvrny patří tavidlovým zbytkům či jiným nečistotám, případně prasklinám a defektům samotného povrchu. Povrch byl navíc velmi lesklý a ve značné míře odrážel dopadající světlo mikroskopu, menší tavidlové zbytky tedy nebylo možné kvůli jejich transparentnosti vůbec detekovat.

Doprostřed vzorku (v místě dopadové plošky) byl vyfrézován zaslepený otvor o průměru 10,5 mm (atypického průměru otvoru bylo dosaženo frézou o průměru 10 mm a následným zabroušením) do hloubky minimálně 0,15 mm, což odpovídá tloušťce mikroskopového krycího

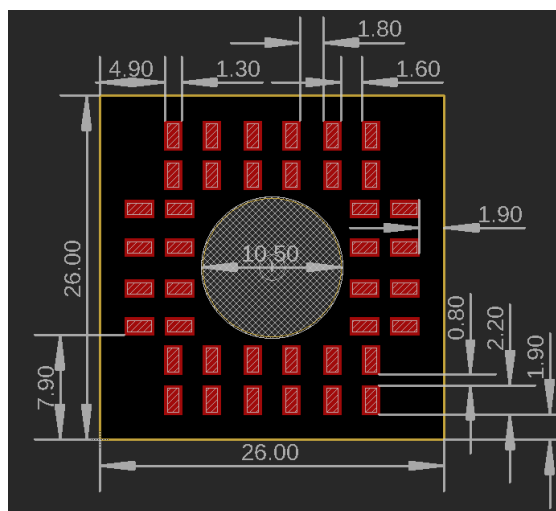
sklíčka (o průměru 10 mm), které bylo použito jako dopadová plocha pro tavidlové zbytky. Jednalo se o bor-silikátová sklíčka s vyšší teplotní odolností, aby mohla projít společně s DPS pájecím procesem. Sklíčka byla ještě z jedné strany opatřena fluorescenčním nátěrem pro zlepšení obrazu a zvýraznění tavidlových zbytků. Výsledný upravený design ukazuje obrázek 46 (copper-defined) a obrázek 47 (solder-mask defined).



**Obrázek 45.** Vyrobené testovací DPS: A – Board 1, B – Board 2, C – Board 3, D – Board 4



**Obrázek 46.** Výsledný design testovací DPS v experimentu 2 (kótováno v mm) – pájecí plošky definované měděnou ploškou; odstup nepájecí masky od pájecí plošky je 200  $\mu\text{m}$



**Obrázek 47.** Výsledný design testovací DPS v experimentu 2 (kótováno v mm) – pájecí plošky definované nepájecí maskou; přesah nepájecí masky je 200  $\mu\text{m}$

**Tabulka 14.** Informace o pájecích pastách použitých v experimentu 2

Označení pasty v experimentu	Obchodní označení	Pájecí slitina	Velikost kuliček	Množství tavidla (hm.)	Typ tavidla	Výrobce
Pasta A	SAC305 M8	Sn-3Ag-0,5Cu	20-38 $\mu\text{m}$	11,5 %	ROL1	AIM Solder, USA
Pasta B	SAC305 MC257-2				ROL0	

Pro experiment byly opět použity dvě pájecí pasty s identickým složením pájecí slitiny Sn-3Ag-0,5Cu (SAC305), ale rozdílným složením tavidlové složky. Pájecí pasta s označením SAC305 NC257-2 obsahuje tavidlo, které spadá podle normy J-STD-004 do kategorie ROL0; pasta s označením SAC305 M8 obsahuje tavidlo, které podle J-STD-004B spadá do kategorie ROL1 (ačkoli podle datasheetu dle druhé uváděné normy J-STD-004 – bez označení B, tedy stejně jako v předchozím případě – spadá do stejné kategorie ROL0; nicméně vzhledem k ostatním uváděným parametrům lze prohlásit, že tavidla jsou rozdílného složení – rozdílná je hodnota kyselosti a také obsah bromidů a chloridů) [205]. Pro zjednodušení jejich rozlišení proto budu dále uvažovat, že se jedná o tavidla ROL0 a ROL1. Další informace o použitých pastách uvádí tabulka 14.

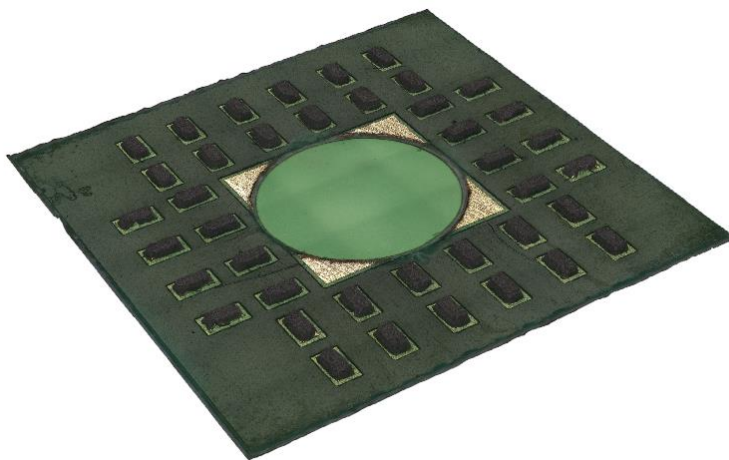
Celkově bylo podrobena analýze 80 vzorků, 10 pro každou kombinaci pájecí pasty, typu pájecí plošky a typu nepájivé masky.

### 5.3.2 Metody v experimentu 2

Drsnost a obecně charakterizace povrchu pájecích plošek a jejich okolí byla provedena pomocí laserového konfokálního mikroskopu VK-X1000 od společnosti Keyence (Japonsko), který umožňuje bezkontaktní měření povrchu jak pomocí liniového skenování, tak i měření drsnosti v ploše. Na zkoumaný vzorek dopadá kombinace bílého světla a laserového paprsku o vlnové délce 408 nm. Na základě změřených dat je pak možné rekonstruovat povrch vzorku. Vzorky byly skenovány pomocí objektivu Nikon MUL04501 se zvětšením 50x a pracovní vzdáleností 13,8 mm. Z měřených dat byly dále vyhodnocovány parametry  $R_a$ ,  $R_z$  (maximální výška profilu),  $R_{Lo}$  (liniové parametry drsnosti pro vertikální i horizontální směr měření) a dále  $S_a$  a  $S_z$  (plošné parametry drsnosti). Naskenovány byly také jednotlivé varianty designu pájecích plošek k ověření dle požadovaného návrhu.

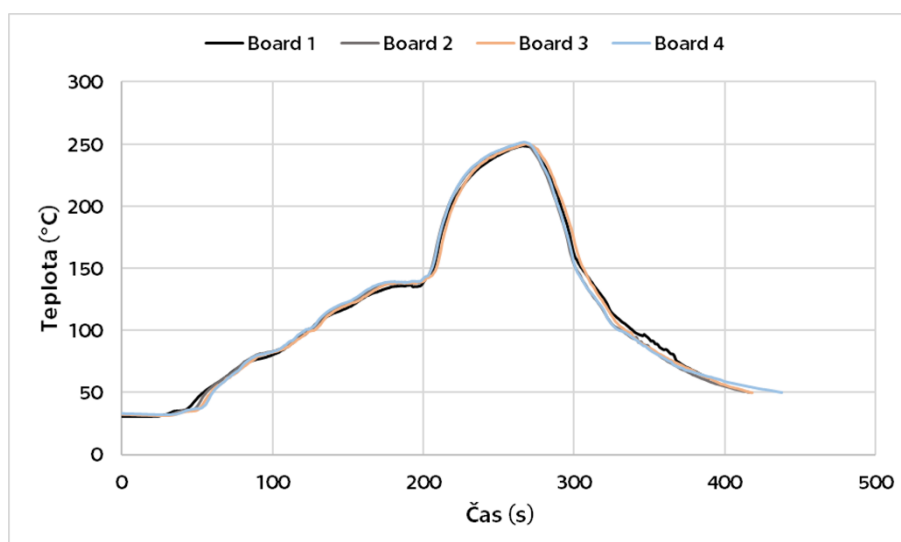
Tisk pájecí pasty byl realizován na šablonovém tisku SD240 od společnosti Spidé (Nizozemsko), který zaručil chybu zarovnání desky k šabloně menší než 0,1 mm. K tisku byla použita standardní, laserem řezaná ocelová šablona o tloušťce 200  $\mu\text{m}$ . Po tisku pájecí pasty byly do otvorů uprostřed testovacích DPS vloženy vyhodnocovací sklička (stranou s fluorescenčním

nátěrem dolů). Obrázek 48 ukazuje vzorek nasnímaný konfokálním mikroskopem po nanesení pájecí pasty a vložení vyhodnocovacího sklíčka.



**Obrázek 48.** Testovací DPS po nanesení pájecí pasty a vložení vyhodnocovacího sklíčka – snímek z konfokálního mikroskopu

Desky následně prošly pájecím procesem identickým s předchozím experimentem – zapájení v průběžné horkovzdušné peci Mistral 260 se stejným nastavením teplotních zón. Obrázek 49 ukazuje změřený teplotní profil pro všechny 4 typy designu DPS – průměr dvou termočlánků připevněných vysokoteplotní pájkou na dvě pájecí plošky (viz obrázek 50). Z naměřených teplotních profilů je zřejmé, že pájecí proces je totožný pro všechny vzorky (všechny 4 typy designu DPS) v experimentu.

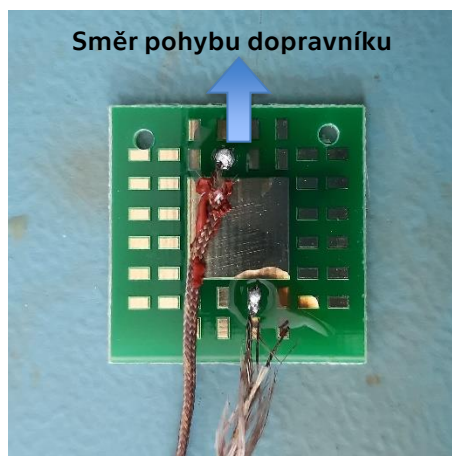


**Obrázek 49.** Teplotní profil procesu přetavení v experimentu 2

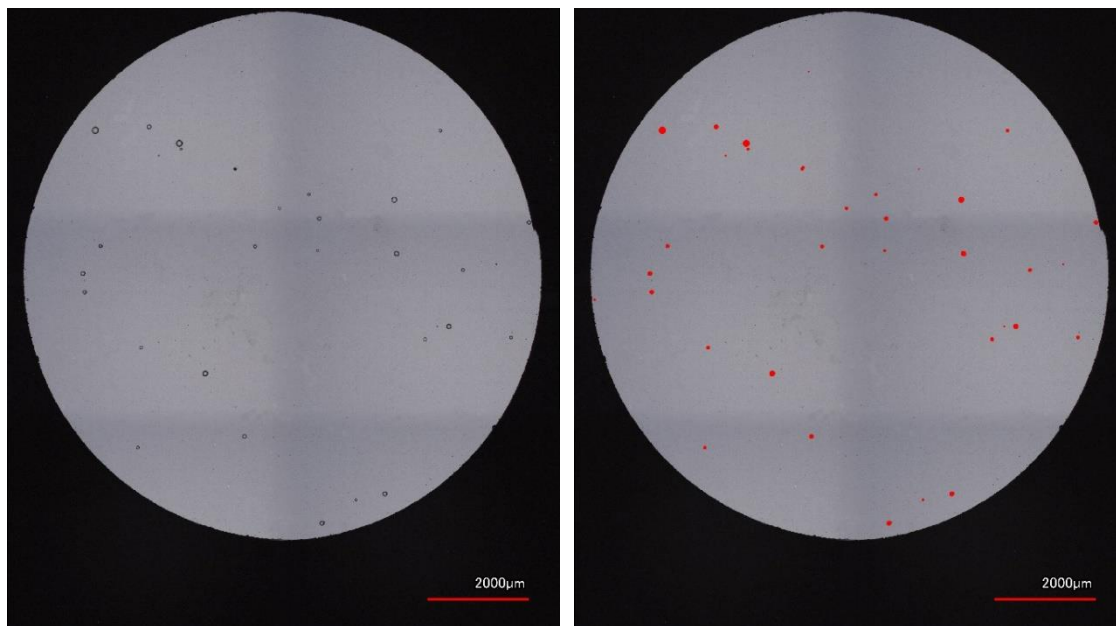
Kontaminovaná sklíčka byla následně nasníмана pomocí konfokálního mikroskopu (totožné zařízení jako v případě měření drsnosti) s využitím pouze bílého, koaxiálního světla a objektivu



Nikon MUL00031 se zvětšením 2,5x a pracovní vzdáleností 8,8mm. Vzhledem k velikosti vyhodnocované plochy byla použita funkce *Stitching*, která poskládala dohromady šest snímků. Během snímání se nakonec ukázalo, že nejdůležitějším parametrem ovlivňující kvalitu snímků a dobrou následnou rozpoznatelnost tavidlových zbytků je použité koaxiální, a nikoli kruhové osvětlení. Spodní fluorescenční nátěr nehrál v kvalitě snímků takovou roli (snímky čistých sklíček bez fluorescenčního nátěru byly stejně kvalitní) a je tak možné prohlásit, že se tato metoda obejde bez dodatečné úpravy sklíček, což v praxi znamená ušetření času na tuto analýzu.



**Obrázek 50.** DPS pro experiment 2 s nakontaktovanými termočlánky



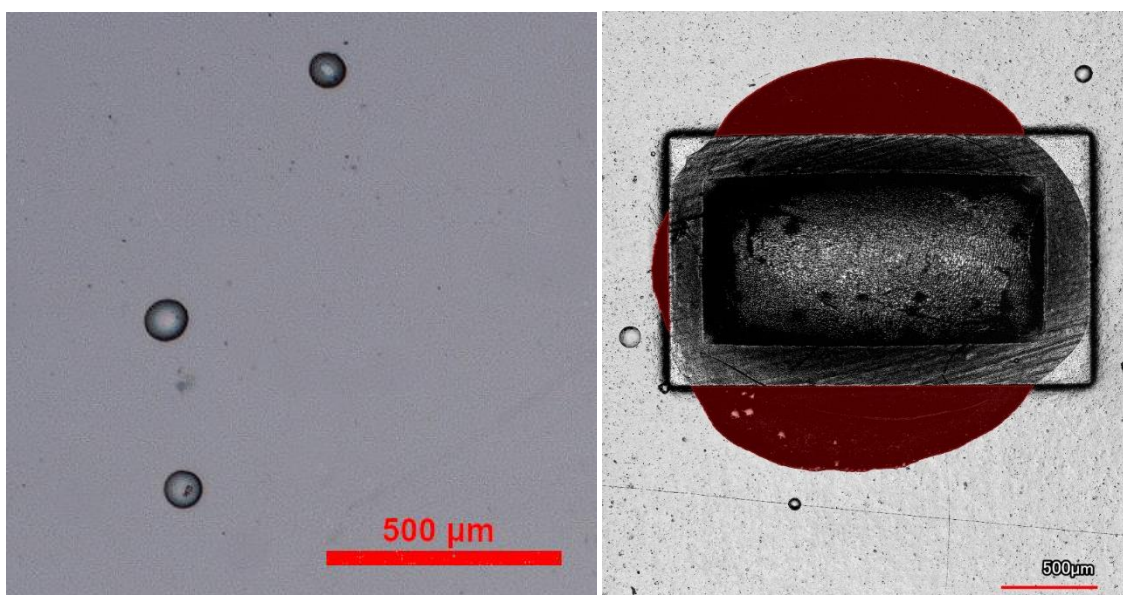
**Obrázek 51.** Původní snímek kontaminovaného sklíčka z konfokálního mikroskopu – příklad

**Obrázek 52.** Snímek kontaminovaného sklíčka s vyznačenými tavidlovými zbytky – příklad

Snímky byly dále zpracovány pomocí programu NIS Elements na zpracování obrazu stejným způsobem jako v předchozím experimentu. Hodnocenými kritérii byl opět počet tavidlových zbytků na ploše sklíčka, průměrná velikost tavidlových zbytků a celková kontaminovaná plocha, tedy součet ploch všech tavidlových zbytků na sklíčku. Příklad zpracování obrazu ilustruje obrázek 51 a obrázek 52. Vybírání tavidlových zbytků probíhalo ručně za pomoci funkce *Auto Detect*, která již následně sama podle rozdílu v jasu označila hranice tavidlového zbytku a vypočítala kontaminovanou plochu. Do výsledných dat byly zahrnuty pouze tavidlové zbytky

větší než  $1000 \mu\text{m}^2$ , čímž se eliminovaly nejasnosti při rozpoznávání menších tavidlových skvrn (na obrázku tato velikost odpovídá kapce o průměru 18 px, což je dle mého pozorování hranice pro bezpečné rozpoznání tavidlového zbytku od ostatních nečistot na vyhodnocovacím sklíčku).

Jak bylo řečeno výše, plně automatický proces výběru všech reziduí naráz by byla hezká úloha pro programování umělé inteligence, nicméně pomocí použitého softwaru možný není, protože se v tomto zobrazení nejedná o skvrny jedné barvy – kvůli koaxiálnímu osvětlení je typický tavidlový zbytek (kapka) uprostřed světlý a po stranách tmavší (detailní pohled na tavidlový zbytek ukazuje obrázek 53). Je tedy poměrně snadno rozpoznatelný, ne však pro automatické vyhodnocení v použitém programu – díky transparentnosti zbytků je barva uprostřed zbytků shodná s pozadím (sklíčkem) a naopak okraje zbytků jsou černé stejně jako drobné nečistoty na povrchu sklíčka. Možným řešením by bylo použití fluorescenční barvy/pigmentu vmícháním do pájecí pasty, tím by tavidlové zbytky získaly odlišnou barvu, která by pod UV světlem vynikla. V takovém případě by ale došlo k ovlivnění složení tavidla, a tedy i jeho chování během procesu pájení, proto jsem tuto možnost zavrhl.



**Obrázek 53.** Výřez ze snímku kontaminovaného sklíčka – detail tavidlových zbytků **Obrázek 54.** Pájecí ploška s červeně vyznačenou vyhodnocovanou plochou rozteklého tavidla

Pomocí konfokálního mikroskopu Keyence byly také nasnímány pájecí plošky po zapájení a byla určena plocha roztečení tavidla do okolí, tak jako v předcházejícím experimentu, aby bylo možné najít vztah mezi roztékáním tavidla a prskáním. Zde je však obtížnější definice samotného roztékání, protože rozhraní mezi nepáživou maskou a ploškou je v tomto případě různé. Z tohoto důvodu byla brána v úvahu pouze plocha tavidla, která se roztekla po samotné nepáživé masce, a to ve vzdálenosti  $200 \mu\text{m}$  od pájecí plošky (u plošek definovaných měděnou ploškou se jedná o

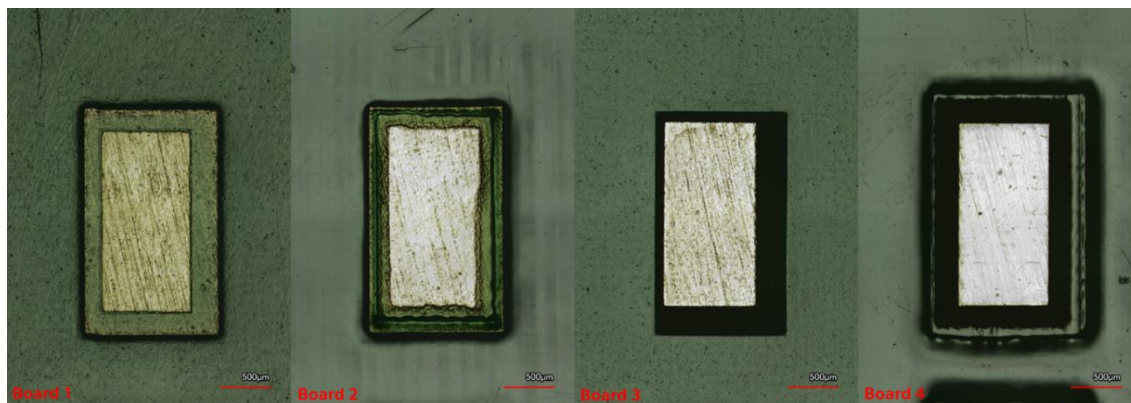
hranice nepájivé masky, u plošek definovaných maskou se jedná o hranice měděné plošky pod maskou) – viz obrázek 54.

### 5.3.3 Výsledky experimentu 2 a diskuze

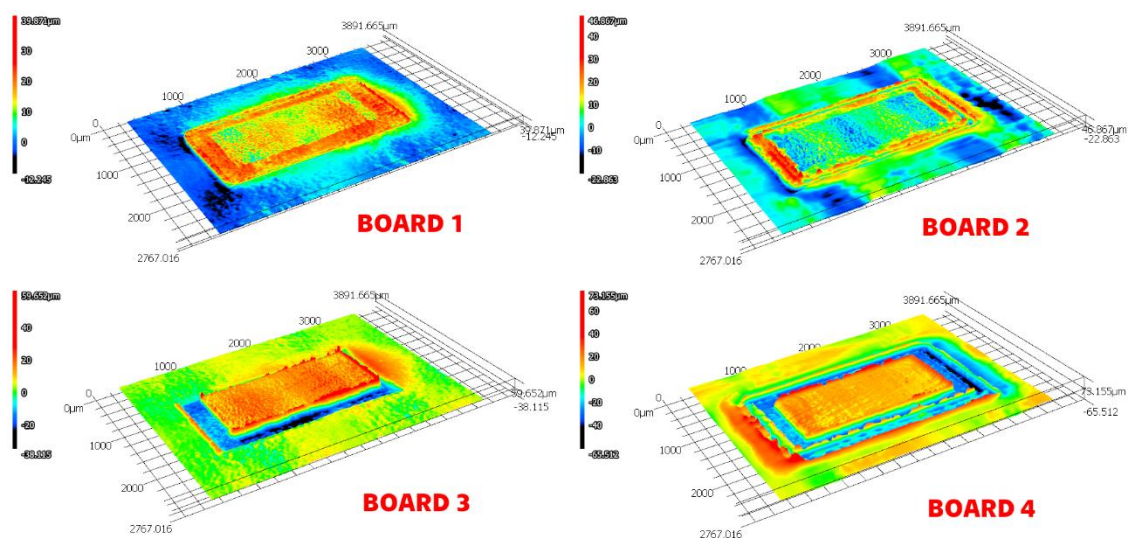
V následujících podkapitolách jsou prezentovány výsledky experimentu 2 – analýza povrchu nepájivých masek a pájecích plošek, měření roztékavosti tavidla po nepájivé masce a analýza rozstříku tavidla (celkový počet tavidlových zbytků na vyhodnocovacím sklíčku, průměrná velikost tavidlového zbytku a celková kontaminovaná plocha vyhodnocovacího sklíčka). Data byla ověřena statistickým t-testem se standardní hladinou významnosti 0,05.

#### 5.3.3.1 Analýza povrchu vzorků

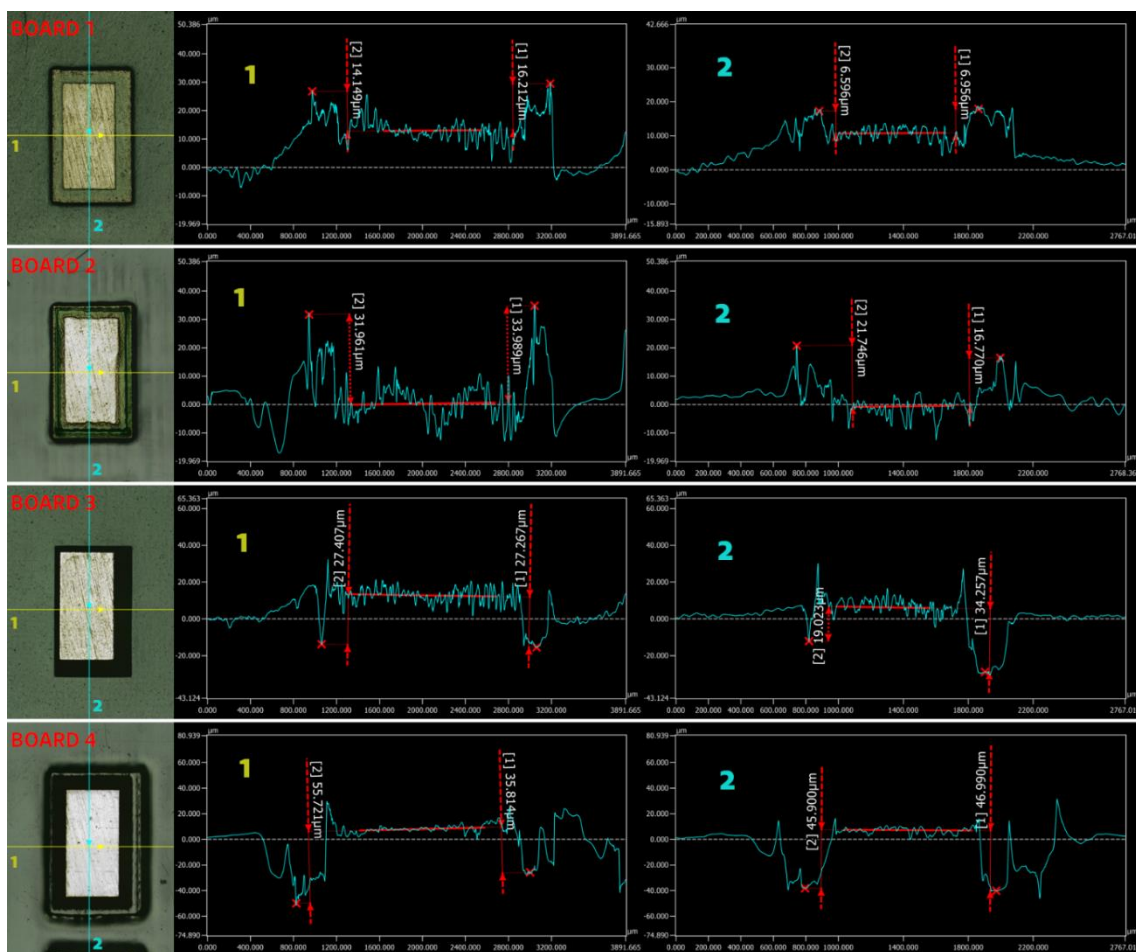
Následující obrázky ukazují jednotlivé varianty pájecích plošek. Jsou zde vidět snímky optické kombinované s laserovým skenem (obrázek 55) a výškové mapy (obrázek 56). Na každé z těchto plošek byly provedeny dva na sebe kolmé liniové skeny k charakterizaci přechodu z pájecí plošky na nepájivou masku (obrázek 57). Na profilech z těchto liniových skenů byla provedena měření tloušťky nepájivé masky (kterou musí tavidlo „překonat“ v případě vzorků Board 1 a Board 2), respektive hloubky mezery mezi pájecí ploškou a nepájivou maskou (v případě vzorků Board 3 a Board 4). Byla provedena i 2D měření k ověření skutečných rozměrů plošek. Výsledky z této analýzy shrnuje tabulka 15.



*Obrázek 55. Design pájecích plošek v experimentu 2 – kombinovaný optický a laserový snímek z konfokálního mikroskopu*



Obrázek 56. Design pájecích plošek v experimentu 2 – výškové mapy z dat laserového snímku z konfokálního mikroskopu



Obrázek 57. Liniové skeny povrchových profilů na pájecích ploškách v experimentu 2

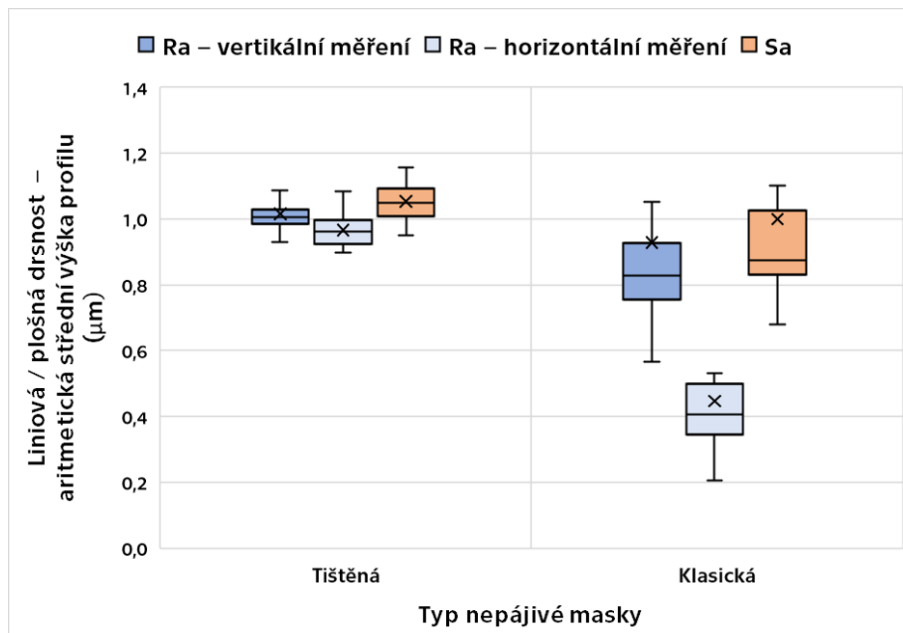
*Tabulka 15. Měření rozměrů pájecích plošek a rozhraní mezi ploškou a nepájivou maskou v experimentu*

Design DPS	Board	Board	Board	Board
	1	2	3	4
Výška nepájivé masky na rozhraní ( $\mu\text{m}$ ) – průměr	10,98	26,12	–	–
Hloubka mezery na rozhraní ( $\mu\text{m}$ ) – průměr	–	–	26,99	46,11
Pájecí ploška – kratší strana (mm)	0,870	0,865	0,882	0,878
Pájecí ploška – delší strana (mm)	1,760	1,747	1,786	1,766
Překryv nepájivé masky - 1. kratší strana (mm)	0,201	0,195	–	–
Překryv nepájivé masky - 2. kratší strana (mm)	0,221	0,248	–	–
Překryv nepájivé masky - 1. delší strana (mm)	0,157	0,197	–	–
Překryv nepájivé masky - 2. delší strana (mm)	0,262	0,230	–	–
Odstup nepájivé masky - 1. kratší strana (mm)	–	–	0,111	0,237
Odstup nepájivé masky - 2. kratší strana (mm)	–	–	0,297	0,237
Odstup nepájivé masky - 1. delší strana (mm)	–	–	0,098	0,236
Odstup nepájivé masky - 2. delší strana (mm)	–	–	0,309	0,237

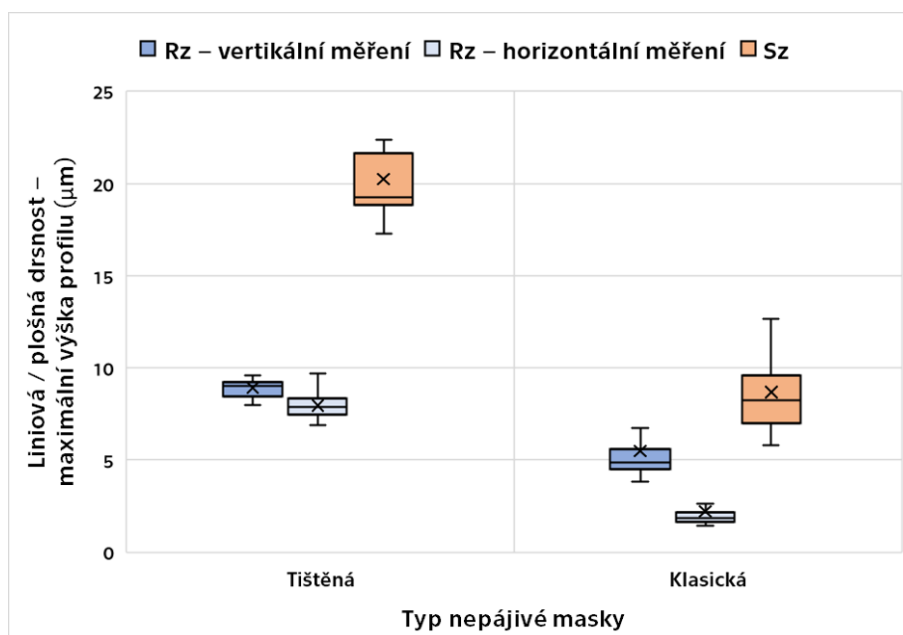
Z provedených skenů jsou patrné jasné rozdíly mezi jednotlivými variantami. DPS s tištěnou nepájivou maskou (Board 1, Board 3) mají poměrně jasně definovaný přechod (rozhraní) mezi pájecí ploškou a nepájivou maskou, na druhou stranu je zde větší tolerance (nižší přesnost) při sesouhlasení motivu vodivých cest a nepájivé masky (toto je nejvíce patrné u designu Board 3, kde se odstup masky od pájecí plošky liší až trojnásobně mezi sousedními stranami pájecí plošky). DPS s klasickou, fotolitograficky vytvořenou nepájivou maskou mají díky procesu rozpouštění nevytvrzených částí masky rozhraní nepájivé masky nejasně definované. U designu Board 4 je díky tomu mnohem větší prostor (mezera) okolo pájecí plošky (to je nejvíce patrné na obrázek 55). Jak je ukázáno dále, vede to k „uzavření“ rozteklého tavidla okolo pájecí plošky a k minimálnímu roztékání dále po nepájivé masce.

Z měření rozměrů samotných pájecích plošek je vidět, že ve všech případech byly pájecí plošky v poměrně dobré toleranci (v průměru je odchylka od zadaných hodnot menší než 3 %). Lze tedy prohlásit, že plocha smočená pájkou během procesu přetavení byla ve všech případech prakticky stejná a neovlivnila výsledky experimentu.

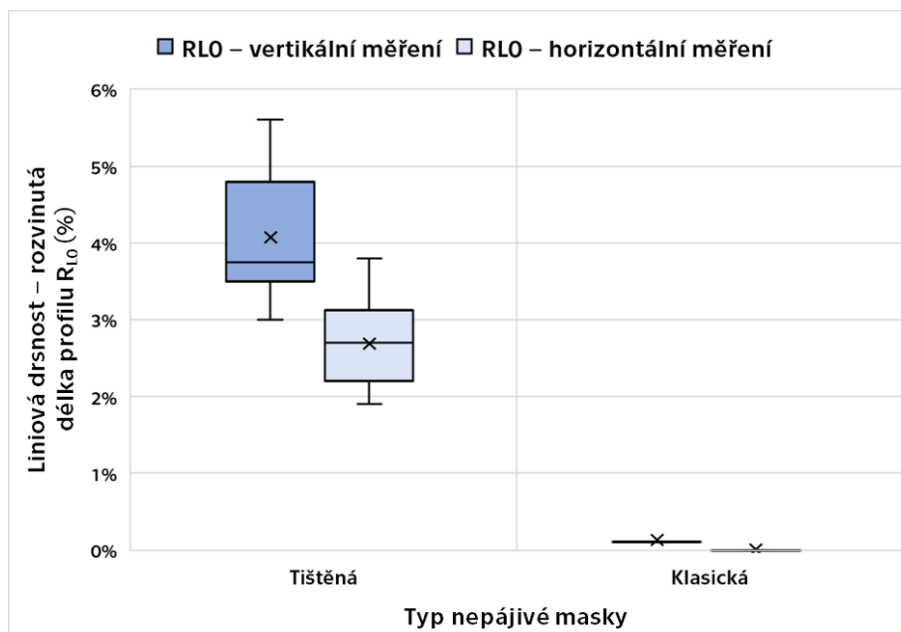
Dále byla analyzována drsnost nepájivých masek (tištěné / klasické) – parametry  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_{Lo}$  (liniovým měřením) a  $S_a$  a  $S_z$  (měřením v ploše). Výsledky jsou ilustrovány box-plotovými (obrázek 58, obrázek 59 a obrázek 60). Celkem bylo provedeno 20 měření na každé nepájivé masce (20 různých míst o velikosti cca  $1,4 \times 1,1$  mm – zvětšení odpovídající objektivu 50x). Souhrnně pak výsledky uvádí i tabulka 16.



Obrázek 58. Box-plotový graf parametru drsnosti  $R_a$  a  $S_a$  v závislosti na typu nepájivé masky v experimentu 2



Obrázek 59. Box-plotový graf parametru drsnosti  $R_z$  a  $S_z$  v závislosti na typu nepájivé masky v experimentu 2

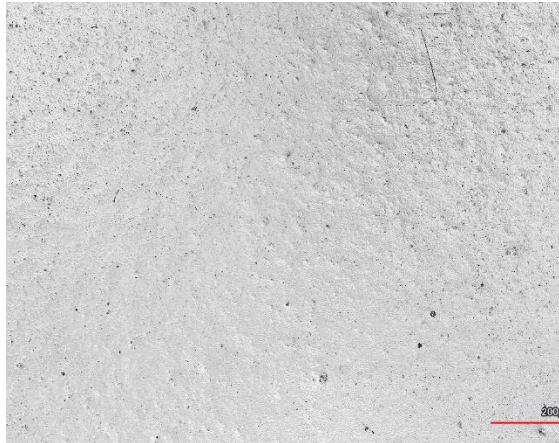


Obrázek 60. Box-plotový graf parametru drsnosti  $R_{L0}$  v závislosti na typu nepájivé masky v experimentu 2

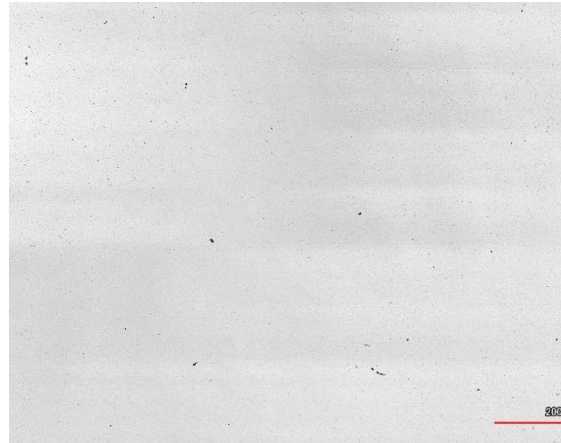
Z výsledků plyne několik věcí. Statisticky významně se liší liniová drsnost tištěné a klasické nepájivé masky. Všechny sledované parametry přitom vycházejí větší pro tištěnou nepájivou masku, je tedy drsnější. To je ostatně patrné i při pohledu na obrázek 61 a obrázek 62, kde jsou vyobrazeny jednotlivé nepájivé masky pod zvětšením, při kterém byla drsnost analyzována. Je zde také patrná závislost liniové drsnosti na směru měření u klasické nepájivé masky, kde se na povrchu vyskytují zřetelné vlny, což je důsledek výrobního procesu nanášení masky pomocí licí clony. Pro eliminaci tohoto efektu při měření se lze dívat na drsnost plošnou, tedy parametry  $S_a$  a  $S_z$ . V případě  $S_a$ , aritmetické střední výšky profilu, již není rozdíl mezi maskami tak markantní. Nicméně i tak se dá předpokládat, že zde může být nějaký rozdíl v roztékání kapaliny (tedy tekutého tavidla) po povrchu.

Tabulka 16. Výsledky měření drsnosti nepájivých masek v experimentu 2

Typ nepájivé masky	tištěná	klasická
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) – vertikální měření	$1,02 \pm 0,07$	$0,93 \pm 0,40$
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ ) – horizontální měření	$0,97 \pm 0,05$	$0,45 \pm 0,19$
$R_z$ ( $\mu\text{m}$ ) – vertikální měření	$8,92 \pm 0,59$	$5,49 \pm 2,00$
$R_z$ ( $\mu\text{m}$ ) – horizontální měření	$7,96 \pm 0,65$	$2,20 \pm 1,05$
$R_{L0}$ (%) – vertikální měření	$4,08 \pm 0,75$	$0,10 \pm 0,00$
$R_{L0}$ (%) – horizontální měření	$2,69 \pm 0,55$	$0,005 \pm 0,00$
$S_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$1,05 \pm 0,05$	$1,00 \pm 0,32$
$S_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$20,23 \pm 2,26$	$8,69 \pm 2,51$



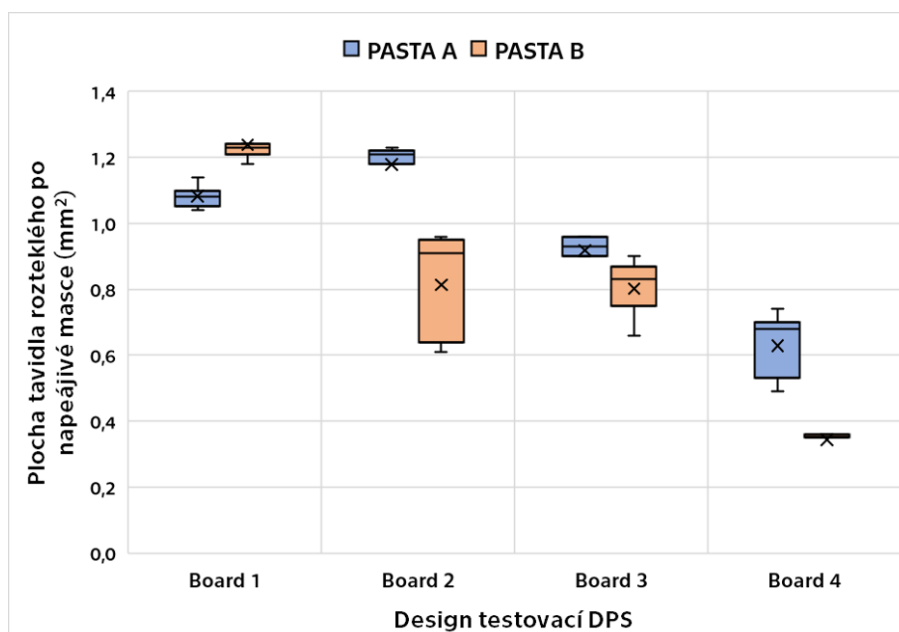
**Obrázek 61.** Laserový snímek z konfokálního mikroskopu – tištěná nepájivá maska se zvětšením 50x



**Obrázek 62.** Laserový snímek z konfokálního mikroskopu – klasická nepájivá maska se zvětšením 50x

### 5.3.3.2 Vyhodnocení roztékavosti tavidla v experimentu 2

Výsledky analýzy roztékání tavidla po povrchu nepájivé masky okolo pájecí plošky ilustruje následující box-plotový graf (jednotlivé boxy jsou výsledkem deseti měření) – obrázek 63. Rozdíly jsou jasně patrné a statisticky významné jak mezi pájecími pastami, tak jednotlivými designy – typem nepájivé masky a typem pájecí plošky.



**Obrázek 63.** Výsledky analýzy roztékání tavidla po povrchu nepájivé masky v závislosti na designu testovací DPS v experimentu 2



Největší míru roztečení tavidla do okolí vykazují varianty s pájecími ploškami definovanými nepájivou maskou (vzorky Board 1 a Board 2). Zde tavidlo musí „překonat“ pouze bariéru tvořenou výškou nepájivé masky, která ale přímo sousedí s pájecí ploškou. Naopak v případě vzorků Board 3 a Board 4 dochází k tomu, že se tavidlo částečně uzavře v mezeře mezi pájecí ploškou a nepájivou maskou, a tudíž se v takové míře již dále po nepájivé masce neroztéká – míra roztečení je v průměru o 39 % menší. Tento trend byl potvrzen ve všech čtyřech kombinacích pájecí pasty a nepájivé masky.

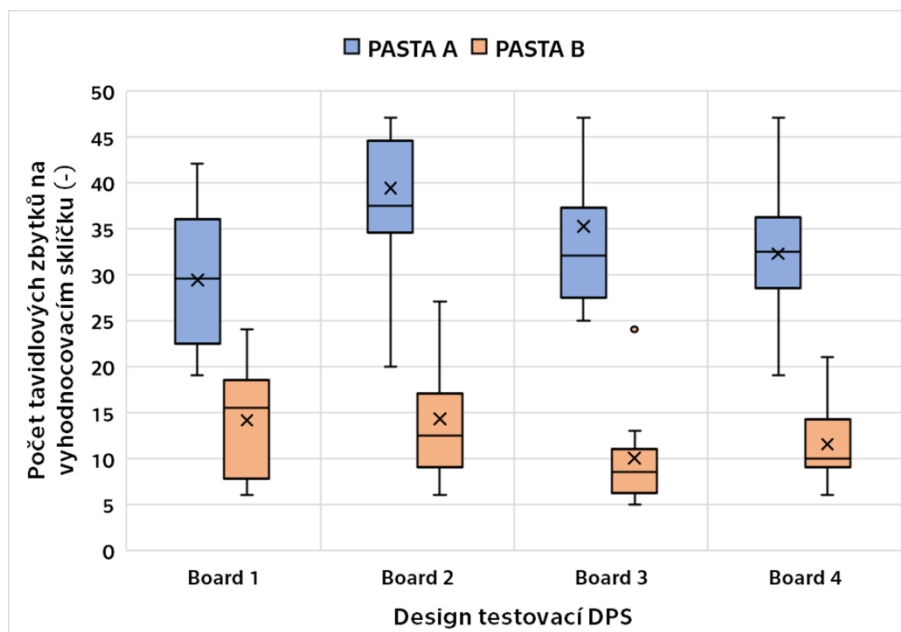
Z hlediska nepájivé masky, zde se také poměrně jasně projevuje vliv drsnosti, či obecně materiálu a technologie výroby masky. V případě klasické masky (méně drsné, lesklejší) došlo ke snížení roztékání tavidla do okolí, tavidlo má tendenci se více uzavírat kolem pájecí plošky. Svůj vliv na to jistě mají i nejasně definované a leptacím procesem poznamenané hrany nepájivé masky. U testovacích DPS s „matnou“ maskou, tedy tištěnou (Board 1 a 3), docházelo k větší míře roztékání tavidla, drsnější maska zde pro tavidlo s trochou nadsázky funguje podobně jako piják. Tento trend se potvrdil ve třech případech ze čtyř kombinací pájecí pasty a designu pájecí plošky, kde lesklá maska snížila míru roztékání tavidla v průměru o 41 %. Tyto výsledky jsou pak v relativním souladu s předchozím experimentem (viz kapitola 5.2.2.2 *Vyhodnocení roztékavosti tavidla v experimentu 1*) a jeho závěrem, že lesklá maska skutečně brání roztékání, jak bylo předpokládáno dle teorie uvedené v kapitole 3.1.3.1 *Problematika smáčení*.

Typ pájecí pasty (tedy chemické složení tavidla obsaženého v pájecí pastě) má samozřejmě také významný dopad na roztékavost a chování tavidla. Vzorky zapájené pastou B vykazovaly menší míru roztékavosti tavidla, a to ve třech případech ze čtyř, v průměru o 30 %.

Srovnají-li se však absolutní čísla s přecházejícím experimentem, je vidět, že tentokrát se jedná o mnoho menší plochu (přibližně 10krát), ze které tavidlo může prskat a následně kontaminovat okolí. Z toho důvodu je těchto plošek celkem na destičce 40. Za cenu přiblížení se k reálným rozměrům pájecích plošek na komerčních DPS se však díky právě vysokému počtu plošek může snížit závislost efektu prskání na nepájivé masce, případně designu plošek.

#### 5.3.3.3 Vyhodnocení rozstříku tavidla v experimentu 2

Obrázek 64 ukazuje box-plotový graf výsledných dat z analýzy celkového počtu tavidlových zbytků po pájení na vyhodnocovací skličku, obrázek 65 potom průměrné velikosti tavidlového zbytku a obrázek 66 celkovou kontaminovanou plochu vyhodnocovacího sklička. Data také shrnuje tabulka 17 dohromady s měřením roztékavosti tavidla okolo pájecí plošky.

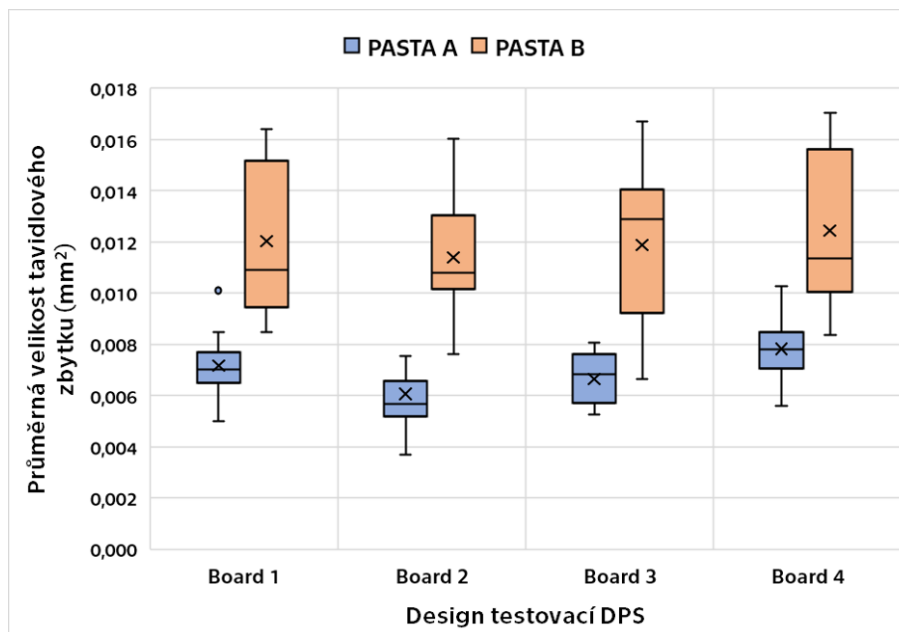


**Obrázek 64.** Celkový počet tavidlových zbytků na vyhodnocovacím sklíčku v závislosti na pájecí pastě a designu testovací DPS v experimentu 2

Na první pohled jde vidět jasný a statisticky signifikantní rozdíl mezi pájecími pastami, respektive použitými tavidly (což potvrzuje i fakt, že přes stejné označení podle normy J-STD-004 jako ROL0 se jedná o rozdílné chemické složení těchto tavidel). V případě pasty B (která obsahuje méně aktivní tavidlo s menším obsahem halidů) došlo oproti pastě A ke snížení výskytu tavidlových zbytků v průměru o 63 %, tedy velmi razantnímu poklesu. Zároveň je však patrný rozdíl v průměrné velikosti tavidlového zbytku (obrázek 65) – v případě pasty B byly tavidlové zbytky větší než u pasty A (rozdíl je ve všech případech statisticky významný). Teoreticky by tak mohla být pasta B větší hrozbou například v případě zakrytí testovacích plošek pro in-circuit testování. Nicméně celková kontaminovaná plocha (a tedy i množství tavidla, které se během procesu přetavení uvolnilo a vyprsklo do okolí pájecích plošek) je menší pro pájecí pastu B. Dá se tedy říct, že použitím pájecí pasty B obsahující méně aktivní tavidlo dojde k redukci efektu prskání, což je opět v souladu s výsledky předchozího experimentu. Tam ovšem nebyl rozdíl tak markantní. Evidentně se tedy jedná o odlišné chemické složení tavidel, která byla použita v experimentu 1 a 2.

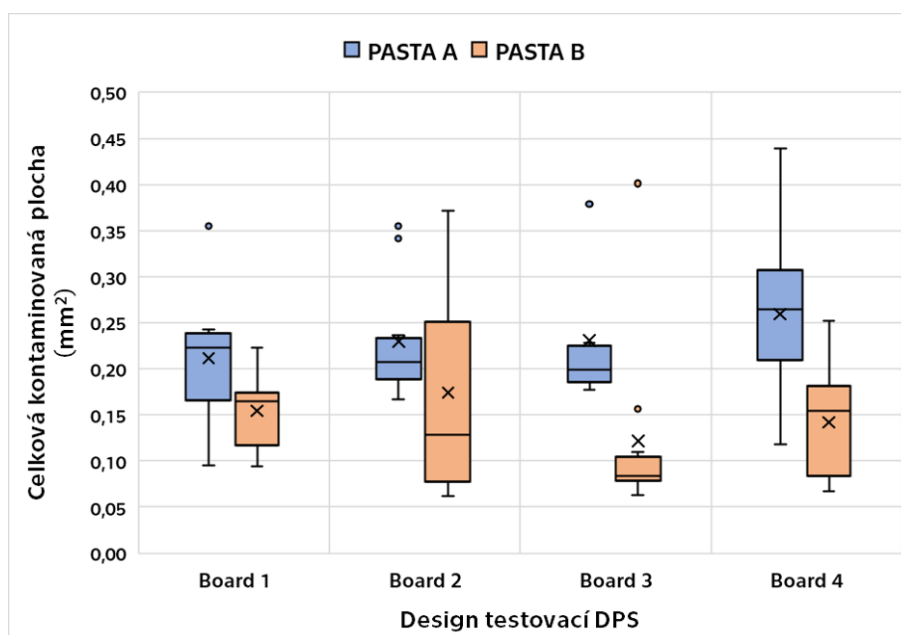
Vzhledem k tomu, že u prskání tavidla bude hrát dominantní roli použité rozpouštědlo jakožto těkavá složka, je pravděpodobné, že se právě to bude u jednotlivých tavidel lišit. Každé rozpouštědlo bude mít rozdílnou teplotu varu. Každopádně by bylo vhodné pomocí některé z chemických analytických metod (například pomocí GC-MS – plynové chromatografie s hmotnostním spektrometrem, angl. *gass chromatography-mass spektrometry*) určit alespoň

přibližné složení obou pájecích past a porovnat je mezi sebou. Tato analýza je v plánu jako doplněk do impaktované publikace, která bude shrnovat výsledky experimentu 2.



**Obrázek 65.** Průměrná velikost tavidlového zbytku na vyhodnocovacím sklíčku v závislosti na pájecí pastě a designu testovací DPS

Co se týká designu pájecí plošky (definované mědí/definované maskou), rozdíly v počtu tavidlových zbytků na vyhodnocovacím sklíčku nejsou tak markantní jako v případě různých pájecích past. Nicméně, ve třech případech ze čtyř došlo k mírnému snížení výskytu tavidlových zbytků použitím pájecích plošek definovaných mědí (vzorky Board 3 a Board 4) namísto plošek definovaných nepájivou maskou (vzorky Board 1 a 2; v průměru o 22 %). To je v souladu se závěry předchozího experimentu 1, kdy s větší rozteklou plochou tavidla okolo pájecí plošky zároveň vzrůstá počet tavidlových zbytků. Je nutné dodat, že v tomto případě není rozdíl významný z hlediska statistického testu –  $p$  hodnoty Studentova  $t$ -testu jsou rovny 0,14 pro vzorky Board 2 a Board 4 s pájecí pastou A, 0,14 pro vzorky Board 1 a Board 3 s pájecí pastou B a 0,16 pro vzorky Board 2 a Board 4 s pájecí pastou B. S přihlédnutím k faktu, že rozstřík tavidla je děj velmi náhodný až chaotický, považuji tyto hodnoty za poměrně dobré a minimálně „napovídající“, že zde nějaké trendy existují. Tyto trendy by bylo možné zvýraznit použitím vzorků s většími pájecími ploškami, ostatně to vyplývá z porovnání s experimentem 1. Na velikost tavidlových zbytků nemá typ pájecí plošky žádný vliv, žádný viditelný trend tu není patrný. Evidentně tedy souvisí spíše s chemickým složením tavidla. Celková kontaminovaná plocha, která se pak odvíjí od počtu a velikosti tavidlových zbytků, také není nijak zásadně ovlivněna typem pájecí plošky.



**Obrázek 66.** Celková kontaminovaná plocha na vyhodnocovacím sklíčku v závislosti na pájecí pastě a designu testovací DPS v experimentu 2

Z hlediska nepájivé masky jsou rozdíly ve frekvenci výskytu tavidlových zbytků ještě méně významné. To je především z důvodu malých rozměrů pájecích plošek, kvůli kterým nejsou rozdíly v roztékání tavidla tak veliké (ve srovnání s experimentem 1), významnější roli zde hraje evidentně rozhraní mezi pájecí ploškou a nepájivou maskou, viz předchozí odstavec.

**Tabulka 17.** Průměrné hodnoty plochy roztečení tavidla okolo pájecí plošky, počtu tavidlových zbytků, průměrné velikosti jednoho tavidlového zbytku a celkové kontaminované plochy na vyhodnocovacím sklíčku v experimentu 2

Design DPS	Pájecí pasta	Plocha tavidla rozteklého okolo pájecí plošky (mm <sup>2</sup> )	Počet tavidlových zbytků na DPS	Průměrná velikost tavidlového zbytku (mm <sup>2</sup> )	Celková kontaminovaná plocha (mm <sup>2</sup> )
Board 1	A	1,08 ± 0,04	29 ± 8	0,007 ± 0,001	0,211 ± 0,067
Board 2		1,18 ± 0,07	39 ± 10	0,006 ± 0,002	0,230 ± 0,062
Board 3		0,92 ± 0,15	35 ± 11	0,007 ± 0,001	0,231 ± 0,070
Board 4		0,63 ± 0,10	32 ± 8	0,008 ± 0,001	0,260 ± 0,096
Board 1	B	1,24 ± 0,05	14 ± 6	0,012 ± 0,003	0,154 ± 0,044
Board 2		0,81 ± 0,16	14 ± 7	0,011 ± 0,002	0,174 ± 0,113
Board 3		0,80 ± 0,08	10 ± 5	0,012 ± 0,003	0,122 ± 0,096
Board 4		0,34 ± 0,05	12 ± 4	0,012 ± 0,003	0,142 ± 0,058

Mezi tištěnou (matnou) a klasickou (lesklou) nepájivou maskou je rozdíl pouze v případě vzorků Board 1 a Board 2 s použitím pasty A. Je to však statisticky významný rozdíl ( $p = 0,03$ ) a koreluje s výsledky roztékání tavidla, čímž opět potvrzuje závěr vyslovený v experimentu 1.

Tento rozdíl mezi nepájivými maskami však spíše než různé drsnosti přisuzují jinému rozhraní mezi pájecí ploškou a nepájivou maskou.

### 5.3.4 Závěry experimentu 2

V této části byl popsán návrh a výsledky druhého experimentu, který měl ověřit vliv pájecí pasty a okolí pájecí plošky (nepájivé masky, designu pájecích plošek) na výskyt tavidlových zbytků na DPS.

Na základě zkušeností z prvního experimentu byla především upravena metodika tak, aby lépe odpovídala skutečným rozměrům pájených spojů v běžném elektronickém zařízení. Druhým cílem bylo unifikovat dopadovou plochu pro tavidlové zbytky, aby následná obrazová analýza po přetavení vzorků probíhala vždy naprosto stejným způsobem a to tak, aby bylo s co největší přesností možné označit transparentní kapky tavidla. Oba cíle byly dosaženy, výsledný design testovací DPS včetně metodiky analýzy tavidlových zbytků pomocí vyhodnocovacího sklíčka lze tak použít i na další experimenty spojené s hodnocením prskání tavidel, a to jak z hlediska materiálové kombinace samotné DPS, tak z hlediska různých pájecích past (což lze s výhodou využít ve firmách v momentě, kdy se do výroby má schválit nová pájecí pasta) nebo teplotního profilování. Teplotní profilování je na rozdíl od změny pájecích past pro mnohé výrobní firmy často schůdnější cesta k řešení problémů na SMT linkách. Jak navíc naznačují další vědecké práce [196], [199] (rozebírané v kapitole 4.3.4 *Rozstřík tavidla*), vhodným teplotním profilováním se dá významně snížit kontaminace DPS tavidlovými zbytky. To lze potvrdit i na základě mého pozorování během těchto experimentů při nastavování teplotního profilu. Nicméně prací, které by se zabývaly vlivem teplotního profilování na rozstřík tavidla z pájecí pasty, není mnoho, a proto by bylo vhodné experimenty provést s touto upravenou metodikou a s více typy různých tavidel.

Z výsledků experimentu 2 vyplývá, že největší vliv na prskání tavidla má samotný výběr tavidla a jeho chemické složení. V případě chemicky agresivnějšího tavidla (ROL1) obsaženého v pájecí pastě A došlo k větší kontaminaci vyhodnocovacích sklíček oproti tavidlu ROL0. Z tohoto hlediska je tedy vhodnější používat tavidla s nižším obsahem halidů. Pro detailnější výsledky a diskuzi bude dále v rámci impaktované publikace s výsledky tohoto experimentu provedena analýza složení tavidel pomocí metody GC-MS.

Výsledky experimentu dále naznačují, že míra kontaminace DPS tavidlovými zbytky se pro různé typy pájecích plošek liší, ačkoli zde byla překročena mez statistické věrohodnosti. Méně tavidlových zbytků bylo nalezeno na vyhodnocovacích sklíčkách vzorků, které obsahovaly pájecí plošky definované měděnou vrstvou. Na těchto vzorcích došlo zároveň k menšímu roztečení tavidla okolo pájecí plošky po povrchu nepájivé masky, což potvrzuje závěry z předešlého experimentu.

Z hlediska nepájitvých masek nebyl nalezen významný rozdíl v prskání tavidla mezi jednotlivými vzorky. Tento rozdíl by se mohl pravděpodobně projevit až s větší velikostí pájecích plošek; pro DPS s přibližně touto velikostí pájecích plošek je tedy možné použít obě varianty nepájitvé masky (a využít tak ostatních výhod, které nabízí tištěná nepájitvá maska oproti klasické, především z hlediska výrobce DPS).

## 5.4 Závěry experimentů na rozstřík tavidla během pájecího procesu

Shrnu-li výsledky obou provedených experimentů, nejdůležitější závěry z nich vyplývající jsou tyto:

- míra rozstříku tavidla je závislá na míře roztečení tavidla okolo pájecí plošky; čím více se tavidlo rozteče do okolí, tím vzniká větší plocha, odkud tavidlo může prskat, a výskyt tavidlových zbytků je častější;
- míra roztečení tavidla okolo pájecí plošky závisí na povrchu DPS okolo pájecí plošky – na drsnosti nepájitvé masky a rozhraní mezi pájecí ploškou a nepájitvou maskou, přičemž se z porovnání provedených experimentů zdá, že u větších pájecích plošek dominuje vliv drsnosti nepájitvé masky, zatímco u menších pájecích plošek rozhraní; nicméně tento závěr by bylo vhodné ověřit dalším experimentem, neboť provedené experimenty se navzájem lišily i v tloušťce použité šablony pro tisk pájecí pasty a tedy množstvím pájecí pasty, potažmo tavidla, které se roztékalo do okolí pájecí plošky, což je očividně významný faktor;
- kontaminace DPS tavidlovými zbytky závisí na typu tavidla, přičemž menší míra kontaminace byla v obou případech prokázána u tavidla s nižší chemickou agresivitou (menším podílem halidů v chemickém složení);
- metodika představená v experimentu 2 včetně návrhu DPS a postupu při analýze tavidlových zbytků lze dále využít pro další analýzy například pro různé pájecí pasty, různé teplotní profily, různé technologie pájení atp., protože jsou zde použity pájecí plošky typických rozměrů a způsob vyhodnocení tavidlových zbytků (obrazová analýza) je pro všechny varianty unifikován.

## 5.5 Plánovaná experimentální činnost

Jak již bylo řečeno výše, v rámci impaktované publikace, která bude připravena z výsledků experimentu 2, bude ještě doplněna analýza chemického složení tavidel, která by mohla rozšířit diskuzi o chování tavidel během pájecího procesu. V rámci dalších experimentů na problematiku tavidlových zbytků se budu zaměřovat také na vliv pájecí technologie, protože byla na školící pracoviště katedru elektrotechnologie pořízena nová pec na pájení v parách s možností regulace teplotního profilu. Bude tak možné srovnat pájení horkým vzduchem (případně dalších

technologií pájení) s pájením v parách, které je charakteristické velmi homogenním rozložením teploty a kondenzací tenké vrstvičky pájecí kapaliny (Galdenu) na povrchu DPS, což například podle studie [138] mění povrchové napětí tekuté pájky. Je zde tedy i předpoklad, že bude rozdílné povrchové napětí tekutého tavidla, což ovlivní jeho roztékání a potažmo i prskání.

## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 2 – VLIV TAVIDLA NA KINETIKU INTERMETALICKÝCH SLOUČENIN A VLASTNOSTI PÁJENÝCH SPOJŮ

V této kapitole je popsán experiment postihující vliv teplotního profilu, včetně nastavení pre-heat zóny, na vlastnosti pájených spojů, především růst intermetalických vrstev v čase, mechanické a elektrické vlastnosti. Tento experiment byl představen na konferenci International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE) v roce 2021 a publikován v indexovaném sborníku pod názvem „Evaluation of Long-term Stability of Bismuth-Tin Solder Joint Properties in Dependence on Reflow Conditions“. Tato práce patří do skupiny prací představovaných na této konferenci od roku 2019, které se zabývají vlastnostmi nízkotavitelných pájecích slitin na bázi bismutu a cínu (viz kapitola 8 *Seznam publikací disertanta*).

### 6.1 Motivace experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin

Již v teoretické části v kapitole 3.2.2 *Bezolovnaté pájecí slitiny* a dále v kapitole 3.3.3.2 *Vliv teplotního profilu na vlastnosti pájených spojů* bylo naznačeno, že tavidlo, respektive jeho aktivace v části teplotního profilu, kde probíhá přehřev, může mít vliv na tvorbu intermetalických vrstev v pájeném spoji během procesu přetavení. Výchozí tloušťka intermetalické vrstvy po zapájení může také ovlivnit její další růst během tepelného stárnutí. Kapitola 3.3.3.2 představuje mnoho studií o vlivu teplotního profilu na vlastnosti pájených spojů, nicméně velmi zřídka je v nich uvažován celý teplotní profil včetně oblasti přehřevu (často bývá uvedeno zjednodušení v podobě hodnoty Heating Faktoru nebo maximální teploty společně s hodnotou TAL).

Zároveň se v porovnání s „klasickými“ bezolovnatými slitinami typu SAC, které spadají do středně-teplotních pájek, méně objevují studie na pájky nízko-teplotní na bázi bismutu. Z tohoto důvodu se tato studie (a předchozí mé studie publikované na konferenci ISSE) věnuje právě jim, protože i nízko-teplotní pájecí slitiny hrají v průmyslové praxi důležitou roli (viz kapitola 3.2.2.3 *Slitiny Sn-Bi a Sn-In – nízko-teplotní slitiny*).

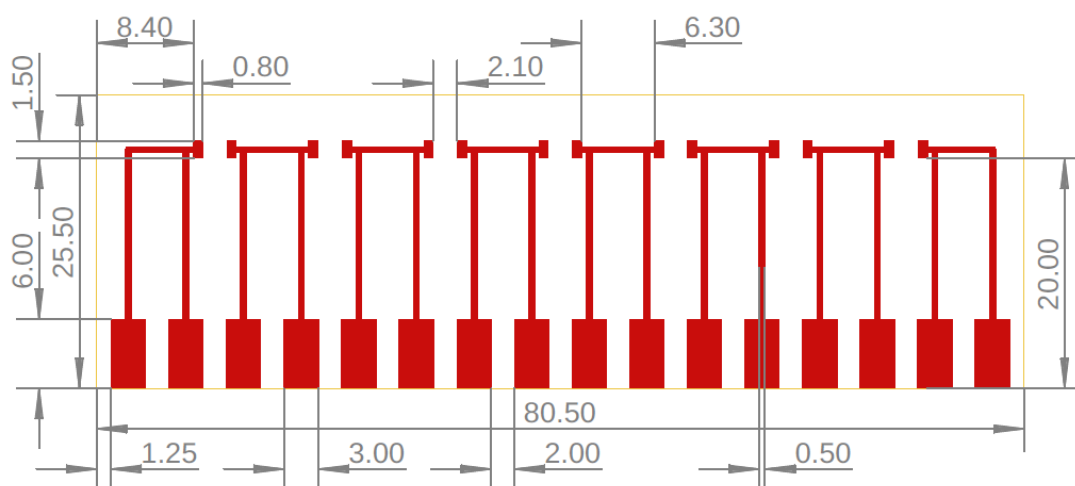
### 6.2 Materiály a metody v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin

#### 6.2.1 Příprava testovacích vzorků

Pro tento experiment bylo dohromady použito 96 testovacích DPS, jejichž design ukazuje obrázek 67. Každá DPS byla osazena sedmi rezistory v pouzdru 1206 (to odpovídá velikosti



$3,1 \times 1,6 \times 0,55$  mm). Návrh této DPS umožňuje měření elektrického odporu každého připájeného rezistoru čtyř-vodičovou metodou pomocí kontaktních plošek na okraji desky. DPS byla vyrobena ze substrátu typu FR4 o tloušťce 1,55 mm, tloušťka měděné vrstvy je 35  $\mu$ m a je pokryta ochrannou vrstvou typu HASL s využitím slitiny SN100CL (více než 99 hm. % Sn, dále cca 0,6 hm. % Cu, 0,05 hm. % Ni a zanedbatelné množství některých dalších kovových prvků). Tato úprava byla zvolena, protože reprezentuje jednu z nejrozšířenějších úprav DPS v průmyslu, především v low-cost elektronice. DPS není opatřena nepájivou maskou (vzhledem k povaze experimentu to není nikterak podstatné).

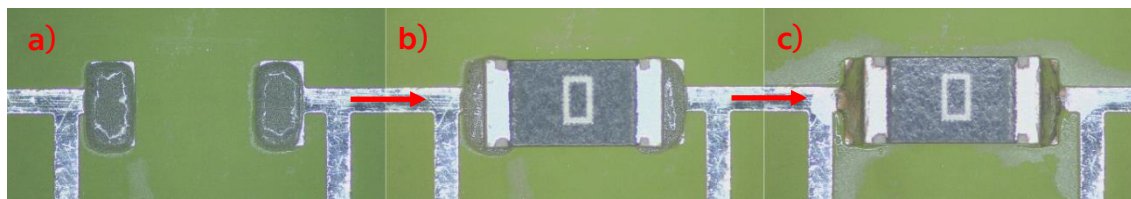


**Obrázek 67.** Design testovací DPS pro experiment na kinetiku intermetalických sloučenin (kótováno v mm)

Na pájecí plošky rezistorů byla nanášena pájecí pasta obsahující eutektickou slitinu 58Bi-42Sn. Detailní informace o pájecí pastě jsou uváděny v tabulce 18. Aplikace pasty byla provedena pomocí ručního šablonového tisku s využitím ocelové, laserem řezané šablony o tloušťce 150  $\mu$ m. Chyba sesouhlasení motivu DPS a šablony byla menší než 0,1 mm díky zařízení pro šablonový tisk SD240 od společnosti Spidé (Nizozemsko). Po depozici pájecí pasty byly na desku osazeny rezistory pomocí ručního manipulátoru. Obrázek 68 ukazuje detail DPS po nanášení pájecí pasty (a), po umístění součástek v pájecí pastě (b) a následně po přetavení v pájecí peci (c; viz další kapitola).

**Tabulka 18.** Informace o pájecí pastě použité v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin

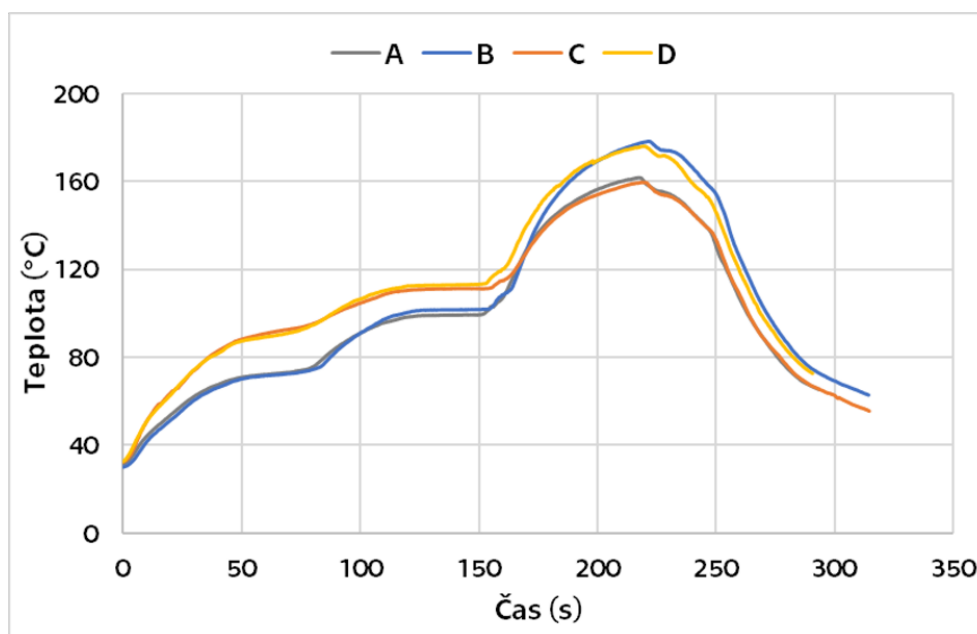
Obchodní označení pasty	Výrobce	Slitina	Teplota tání	Velikost kuliček	Typ tavidla	Množství tavidla
NC-31	AMTECH (USA)	58Bi-42Sn	138 °C	25-45 $\mu$ m	ROL1	10 hm. %



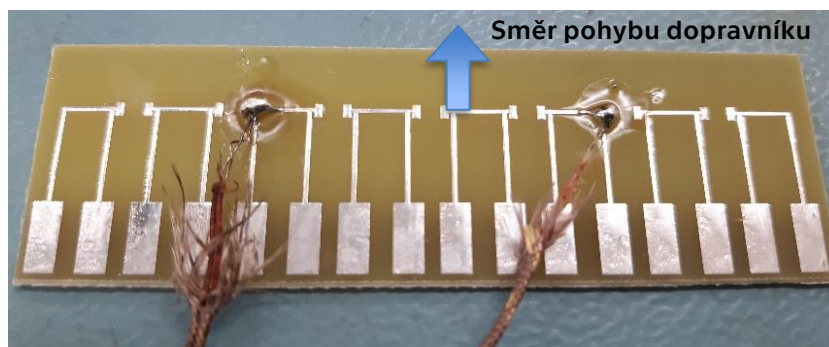
**Obrázek 68.** Proces montáže součástek na DPS: nanesená pájecí pasta (a), osazená součástka (b), přetavená pájecí pasta (c)

## 6.2.2 Proces přetavení

Přetavení testovacích DPS proběhlo v průběžné konvekční peci Mistral 260 od společnosti Spidé (Nizozemsko) s třemi tepelnými zónami, stejně jako v případě výše uvedených experimentů na rozstřík tavidla z pájecí pasty (viz kapitola 5.2.2 *Metody v experimentu 1*). Pec byla pečlivě profilována pomocí dvou termočlánků připevněných na testovací DPS pomocí vysokoteplotní pájky (viz obrázek 70) a profilometru KIC2000. Pro experimenty byly využity 4 teplotní profily značené A-D, viz obrázek 69 a tabulka 19 (teplota v první a v druhé zóně odpovídá maximální dosažené teplotě v dané zóně podle naměřených teplotních profilů). Tyto profily jsou zkombinovány ze dvou úrovní předehřevu a dvou úrovní zóny přetavení (dvě různé hodnoty Heating Faktoru), přičemž rychlost průchodu vzorku pecí byla pro všechny vzorky stejná (15 cm/min).



**Obrázek 69.** Teplotní profily (A-D) použité v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin



**Obrázek 70.** Umístění termočlánků při měření profilů v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin

**Tabulka 19.** Teplotní profily použité v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin – teploty předehřevu a vypočtený Heating Faktor

Označení teplotního profilu	Teplota v první zóně (°C)	Teplota ve druhé zóně (°C)	Maximální teplota (°C)	Heating Faktor (s·K)
A	70	100	160	1101
B	70	100	175	2390
C	90	110	160	1001
D	90	110	175	2307

### 6.2.3 Zrychlené stárnutí pájených spojů

DPS vyrobené výše uvedeným postupem byly dále uzavřeny do klimatických komor a za definovaných podmínek degradovány po stanovenou dobu. Pro experiment byly vybrány dvě metody degradace podle standardů JEDEC.

První polovina testovacích DPS (mimo desek, které byly odebrány ze souboru pro měření vlastností spojů ve stavu po zapájení, tedy v čase 0) byla uzavřena do teplotně-vlhkostní komory s nastavením 85 °C / 85 % relativní vlhkosti, což



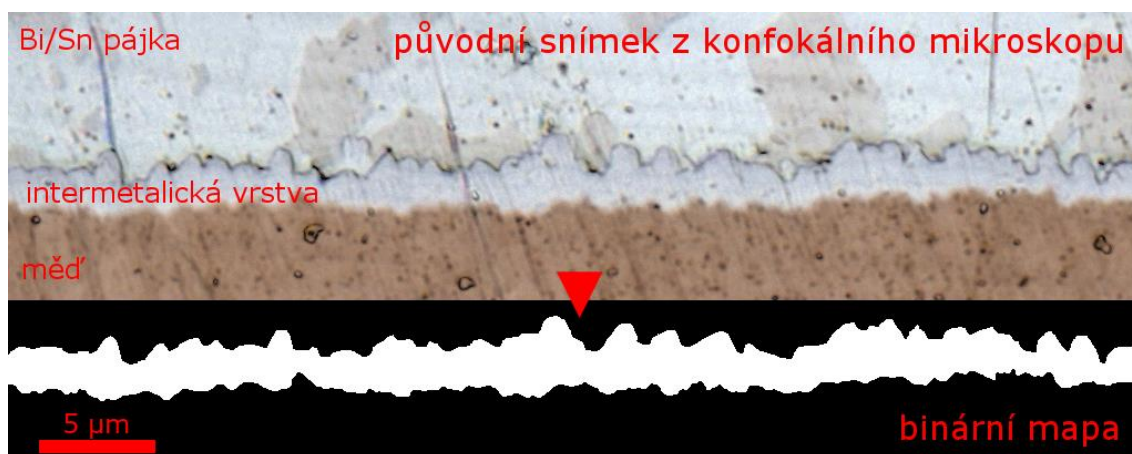
**Obrázek 71.** Klimatické komory použité pro experiment na kinetiku intermetalických sloučenin. Zleva šoková komora a teplotně-vlhkostní komora

odpovídá standardu JESD22-A101 [206]. Byla využita komora C-40/200 od společnosti CTS GmbH (Německo). Dohromady byly testovací DPS degradovány 1000 hodin, přičemž vlastnosti byly měřeny v čase 0, 333, 666 a 1000 hodin pro možnost sledování trendů.

Druhá polovina testovacích DPS byla vystavena teplotním šokům v klimatické komoře TSS 70/66 od společnosti CTS GmbH (Německo). Ta disponuje dvěma oddělenými prostory, mezi kterými přejíždí výtah se vzorky. Horní, teplý prostor byl nastaven na teplotu 125 °C; spodní, studený prostor byl nastaven na teplotu -40 °C. Čas setrvání vzorků v horním/dolním prostoru byl 15 minut, přejezd mezi nimi byl prakticky okamžitý (doba trvání cyklu je tedy 30 minut). Toto nastavení odpovídá standardu JESD22-A104 B [207] (zkouška G). Dohromady bylo provedeno 1000 cyklů, přičemž měření vlastností pájených spojů proběhlo po 0, 333, 666 a 1000 cyklech pro možnost sledování trendů.

#### 6.2.4 Analýza intermetalických vrstev

Z každé kombinace teplotního profilu, času a typu degradace byly vybrány dva zapájené rezistory, ze kterých byly vyrobeny metalografické výbrusy pájených spojů (k dispozici byly tedy čtyři pájené spoje na jednu sledovanou kombinaci). Na těchto čtyřech spojích bylo dohromady pořízeno deset snímků intermetalické vrstvy pro další obrazové zpracování, které je popsáno v kapitole 3.4.3. Pro snímkování byl využit konfokální mikroskop VK-X1000 od společnosti Keyence (Japonsko) s použitím objektivu Nikon CF Plan Apo Y040 se zvětšení 150x. Pro obrazovou analýzu byl využit software NIS Elements od společnosti Laboratory Imaging (Česká republika). Příklad zpracování intermetalických vrstev v tomto experimentu ukazuje obrázek 72. Deset hodnot tloušťky intermetalické vrstvy pak bylo zprůměrováno pro každou sledovanou kombinaci.



Obrázek 72. Analýza intermetalické vrstvy v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin

#### 6.2.5 Měření odporu pájených spojů

Jakožto doplňující měření bylo též prováděno měření elektrického odporu pájených spojů, respektive odporu kombinace dvou pájených spojů a samotného rezistoru. Měření bylo prováděno čtyř-vodičovou metodou za použití miliohmmetru Kust MM2030 od společnosti Kust Elektronik

GmbH (Německo) a elektrodového systému ukázaného v kapitole 3.4.1. Finální hodnota ( $R$ ) se z hodnoty měřené ( $R_m$ ) vypočítala podle následujícího vzorce:

$$R = \frac{R_m - R_r}{2} \text{ (m}\Omega\text{)} \quad (9)$$

Hodnota  $R_r$  odpovídá odporu samotného rezistoru, který má samozřejmě i přes jmenovitou hodnotu  $0 \Omega$  nějaký vnitřní odpor. Hodnota  $R_r$  byla určena měřením náhodného souboru 20 součástek, přičemž výsledná průměrná hodnota odpovídala odporu  $19,5 \text{ m}\Omega$ .

Elektrický odpor byl měřen vždy na 10 DPS, tedy pro každou kombinaci teplotního profilu a času/typu degradace bylo provedeno 70 měření.

### 6.2.6 Mechanická zkouška pájených spojů

Jako další doplňující měření byla zvolena mechanická stříhová zkouška zapájených čipových součástek, která je v souladu s popisem v kapitole 3.4.2. Jako testovací zařízení byl použit trhací stroj DEFORM 02 od společnosti PEMAR (Česká republika) a speciálně upravený testovací přípravek s trnem. Trn se pohyboval během zkoušky konstantní rychlostí  $1 \text{ mm/min}$ . Sledována byla maximální odtrhová síla a dále místo odtrhu (viz Obrázek 16 v kapitole 3.4.2). Zkouška a její vyhodnocení byly v souladu se standardem JEITA ET-7409/1 03.

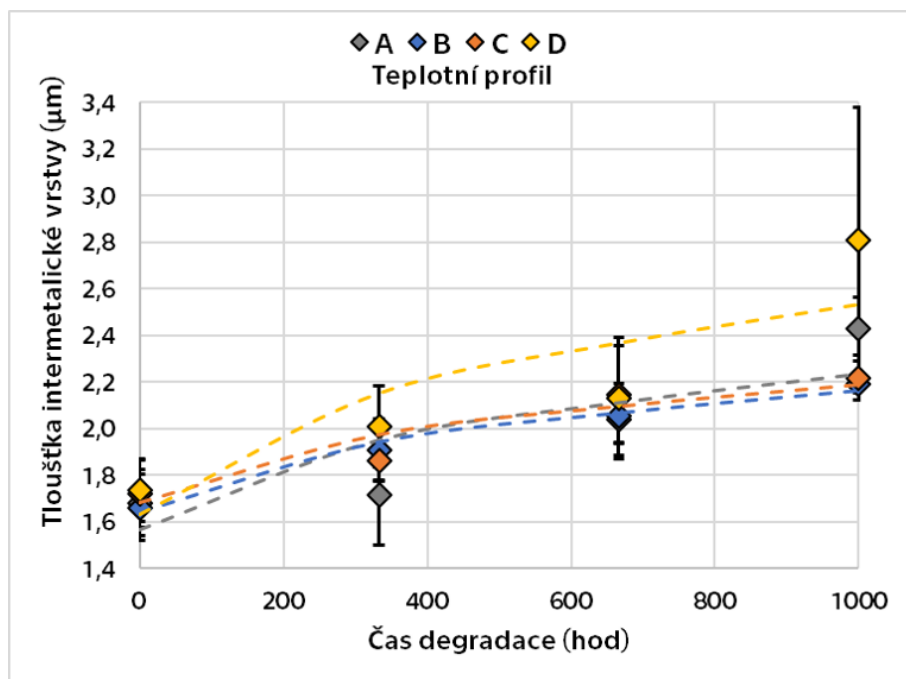
## 6.3 Výsledky a diskuze experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin

V této kapitole jsou prezentovány a diskutovány výsledky provedeného experimentu. Naměřená data byla statisticky zpracována (výpočet průměrné hodnoty, střední kvadratické odchylky a tvorba box-plotových grafů) a dále ověřena pomocí statistického Studentova t-testu se standardní mezí významnosti  $0,05$ . Výsledky jsou seskupeny do podkapitol podle druhu degradace pájených spojů.

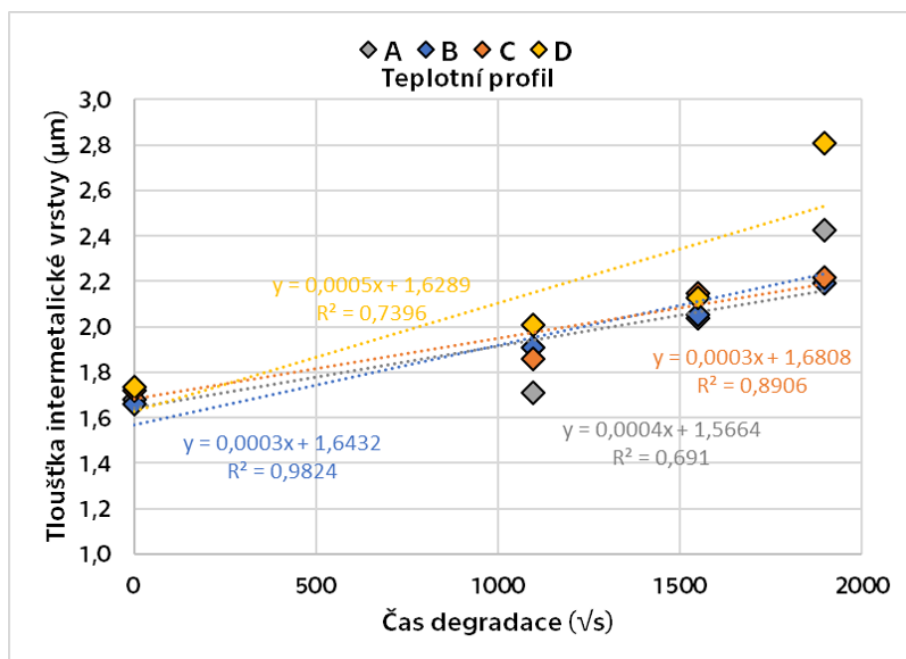
### 6.3.1 Teplotně-vlhkostní namáhání

#### 6.3.1.1 Růst intermetalických vrstev během teplotně-vlhkostního namáhání

Růst intermetalických vrstev v pájených spojkách, které byly vystaveny namáhání vlhkým teplem, znázorňuje obrázek 73, kde na ose  $x$  je vynesena čas stárnutí v hodinách a na ose  $y$  tloušťka intermetalické vrstvy v  $\mu\text{m}$ . Data jsou zde vynesena jako střední hodnoty, chybové úsečky označují střední kvadratickou odchylku.



Obrázek 73. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na čase degradace vlhkým teplem pro teplotní profily A-D



Obrázek 74. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na odmocnině z času degradace vlhkým teplem pro teplotní profily A-D

Data jsou proložena křivkou, která je určena dopočtenými difúzními koeficienty pro každou variantu teplotního profilu. K sestrojení této křivky a k dopočtení difúzních koeficientů byl sestrojen graf závislosti tloušťky intermetalické vrstvy, respektive střední hodnoty, na odmocnině z času vyjádřeného v sekundách (obrázek 74) – je zde využit předpoklad uvedený v kapitole 3.1.4

*Intermetalické sloučeniny*, tedy že exponent  $n$  v rovnici (5) je roven  $\frac{1}{2}$  a že při růstu intermetalických vrstev se většinou uplatňuje difúzní mechanismus. Takto graficky vyjádřená data byla proložena lineární regresí, přičemž koeficient  $a$  z předpisu této regrese ( $y = ax + b$ ) umocněný na druhou je roven difúznímu koeficientu (v jednotkách  $\mu\text{m}^2/\text{s}$ ). Vypočtené difúzní koeficienty pro všechny čtyři varianty pájených spojů pájených při teplotních profilech A-D uvádí tabulka 20.

**Tabulka 20.** Vypočtené difúzní koeficienty pro spoje pájené teplotními profily A-D namáhané vlhkým teplem

<b>Teplotní profil</b>	<b>Difúzní koeficient (<math>10^{-8} \mu\text{m}^2/\text{s}</math>)</b>
A	12,35
B	7,41
C	7,20
D	22,72

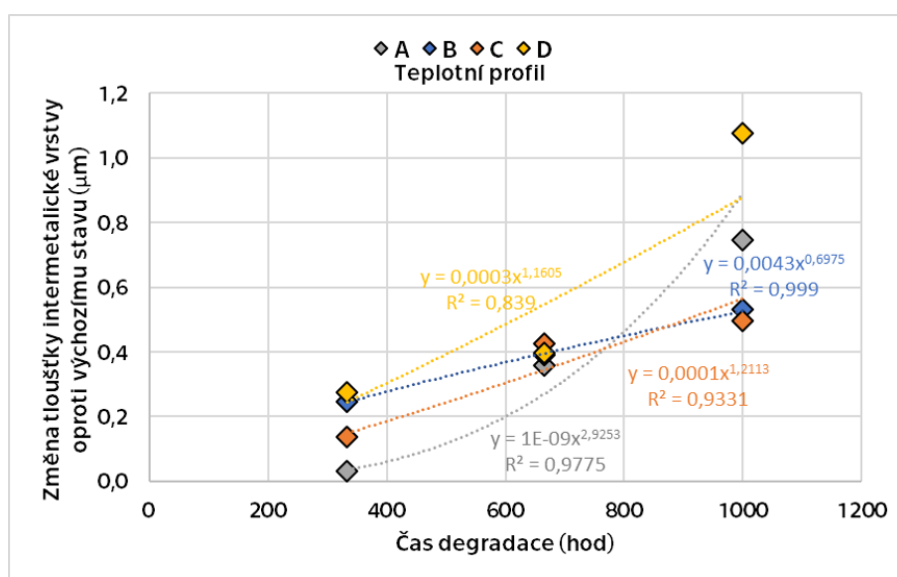
Z vyobrazených grafů je na první pohled vidět rozdíl mezi teplotním profilem D a ostatními profily A-C. Spoje pájené teplotním profilem D, tedy vysokou teplotou jak v oblasti přehřevu, tak v oblasti přetavení, vykazují v tomto experimentu největší nárůst intermetalické vrstvy v čase 1000 hodin. Tento rozdíl je podle Studentova t-testu a stanovené hladiny významnosti statisticky nevýznamný, nicméně vypočtené  $p$  hodnoty jsou poměrně malé ( $p = 0,21$  pro profily D a A,  $p = 0,07$  pro profily D a B,  $p = 0,08$  pro profily D a C). Pro profil D také vychází největší difúzní koeficient, který je až třikrát větší než pro ostatní teplotní profily.

Žádný výrazný trend není patrný z hlediska působení tavidla během přehřevu (ve fázi jeho aktivace) na další růst intermetalických vrstev v čase, i když se podle výsledků dá říci, že pro omezení tohoto růstu je lepší volit nižší teplotu v oblasti přehřevu. Tím by nemuselo docházet k tak masivnímu uvolňování těkavých složek z objemu tavidla, během kterého mohou zároveň unikat pryč z pájeného spoje aktivní složky tavidla, které by podporovaly redukci oxidů, smáčení a tvorbu pájeného spoje. Při vyšší teplotě přehřevu může tedy dojít k omezení růstu intermetalických sloučenin během procesu pájení, intermetalická vrstva může být více nehomogenní a mohou se tak vytvářet difúzní kanály, které umožní naopak větší nárůst intermetalické vrstvy dále v čase a v konečném důsledku by mohlo dojít ke snížení spolehlivosti pájeného spoje.

Je však nutné podotknout, že významnější rozdíl mezi profilem D a ostatními profily je vidět právě v čase 1000 hodin, v ostatních bodech křivky jsou jednotlivé varianty velmi podobné a statisticky se tloušťka intermetalické vrstvy neliší mezi pájenými spoji s různým teplotním profilem. Tedy i následný výpočet difúzního koeficientu je ovlivněn právě tímto posledním bodem měření. Ostatně, když se zaměřím na míru korelace dat s lineárním proložením (hodnota spolehlivosti  $R^2$ , obrázek 74), pro variantu D je tato hodnota rovna 0,74. To znamená, že

proložení získaných dat lineární regresí není příliš přesné. Je tedy otázka, zda poslední bod měření u varianty D není pouze chyba měření, která mohla vzniknout náhodným výběrem oblastí s větší tloušťkou intermetalické vrstvy, než jak je tomu ve zbytku pájeného spoje pro tuto variantu. Stejně tak vychází velmi nízká hodnota parametru  $R^2$  pro profil A.

Druhým možným vysvětlením je, že se zde uplatňují i jiné mechanismy růstu, a tedy předpoklad, že exponent  $n = 1/2$  nemusí nutně odpovídat skutečnému chování pájeného spoje. Z tohoto důvodu jsem následně ještě provedl mocninné proložení získaných dat vyneseno do grafu jako závislost přírůstku tloušťky intermetalické vrstvy (tedy  $L - L_0$ ) na čase degradace (obrázek 75). Přírůstek tloušťky (a nikoli výsledná tloušťka) je zde použit z toho důvodu, aby byl možný mocninný proklad dat. Vypočtený exponent  $n$ , difúzní koeficient  $D$  a hodnota spolehlivosti  $R^2$  přehledně uvádí tabulka 21. Je vidět, že pouze v případě teplotního profilu B (nízká teplota v zóně předehřevu, vysoká teplota v zóně přetavení) odpovídá růst intermetalické vrstvy (alespoň přibližně) původnímu předpokladu vyslovenému v kapitole 3.1.4 *Intermetalické sloučeniny*, který vychází z odborné literatury. V ostatních případech se zdá, že naopak s časem degradace v teplotně-vlhkostní klimatické komoře rychlost přírůstku intermetalické vrstvy v pájeném spoji narůstá ( $n > 1$ ).



**Obrázek 75.** Mocninné proložení dat z měření intermetalických vrstev v závislosti na čase degradace

**Tabulka 21.** Parametry prokladové mocninné funkce pro růst intermetalických vrstev během teplotně-vlhkostní degradace pro teplotní profily A-D

Teplotní profil	Vypočtený exponent $n$	Difúzní koeficient ( $10^{-7} \mu\text{m}^{(1/n)} / \text{s}$ )	Hodnota spolehlivosti $R^2$
A	2,93	2,67	0,978
B	0,70	1,11	0,999
C	1,21	1,73	0,933
D	1,16	2,48	0,839



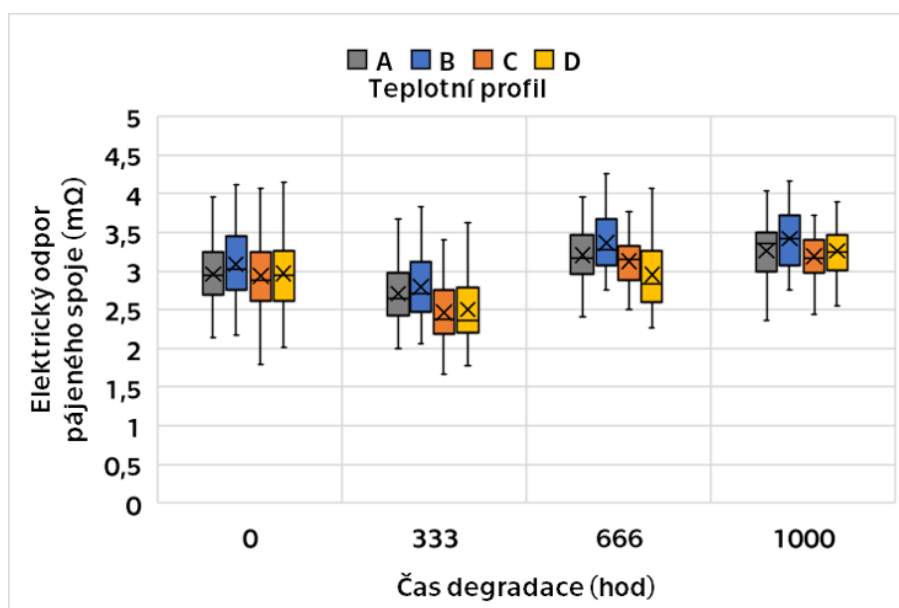
Čemu také zatím nebyla v diskuzi nad výsledky věnována pozornost, je fakt, že na pájené spoje působila během stárnutí v klimatické komoře také zvýšená vlhkost prostředí (85 % relativní vlhkosti). Tento faktor mohl rovněž ovlivnit mikrostrukturu pájeného spoje, protože zde ve větší míře probíhají oxidační a korozní procesy na povrchu. Zvýšená vlhkost má například vliv na výskyt růstu whiskerů, jak uvádí studie [208], přičemž růst whiskerů úzce souvisí s mikrostrukturou spoje a intermetalickými vrstvami [171]. Další studie [209] dává do korelace přímo zvýšenou vlhkost a rychlejší nárůst intermetalické vrstvy v čase právě díky zvýšené oxidaci povrchu pájky. Nicméně zase podle studie [210] není tento vliv nijak významný – mezi pájenými spoji degradovanými vlhkým teplem a suchým teplem nebyl zpozorován rozdíl. Je nutné však zmínit, že zmiňované studie se zabývaly pájkami typu SAC, jejichž mikrostruktura je diametrálně odlišná od slitiny BiSn; je tedy možné, že v mém případě může zvýšená vlhkost a degradační procesy na povrchu pájených spojů, skutečně vést k ovlivnění růstu intermetalických vrstev.

Pro ověření správnosti měření by bylo vhodné tento experiment zopakovat a získaná data ověřit. Nutno také podotknout, že celková doba stárnutí spoje, tedy 1000 hodin, sice odpovídá a stačí dle mnohých standardů, nicméně pro zjištění chování spoje v dlouhodobém měřítku nemusí být tato doba dostačující. Bylo by proto také vhodné navýšit dobu degradace pájených spojů, což si ovšem vyžádá větší počet vzorků a měření. Z tohoto důvodu jsou takové testy vzhledem k jejich časové náročnosti obtížně realizovatelné, a to nejen v průmyslové praxi.

#### *6.3.1.2 Měření elektrického odporu pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání*

Výsledky měření elektrického odporu pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání ukazuje obrázek 76. Pro všechny varianty teplotního profilu vykazovaly pájené spoje statisticky významný, ale velmi mírný nárůst elektrického odporu s časem degradace. Mezi jednotlivými variantami statisticky významný rozdíl prakticky není – nepatrně menší nárůst elektrického odporu vykazují spoje pájené profily C a D, tedy s vyšší teplotou předehřevu.

Zajímavým bodem měření byl čas 333 hodin, kdy došlo u všech variant naopak k poklesu elektrického odporu oproti výchozímu stavu, přičemž tento fenomén byl patrnější u teplotních profilů C a D. Může to souviset s růstem intermetalických vrstev, kdy do určité doby ovlivňují pájený spoj, respektive jeho elektrický odpor, pozitivně (nárůst intermetalické vrstvy zlepšuje spojení mezi pájkou a měděným substrátem), poté již negativně kvůli vyšší rezistivitě oproti mědi a samotné pájce [13]. Celkově jsou ale v tomto případě změny v elektrickém odporu pájených spojů natolik malé, že v praktickém měřítku nejsou nikterak podstatné.



**Obrázek 76.** Výsledky měření elektrického odporu pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání

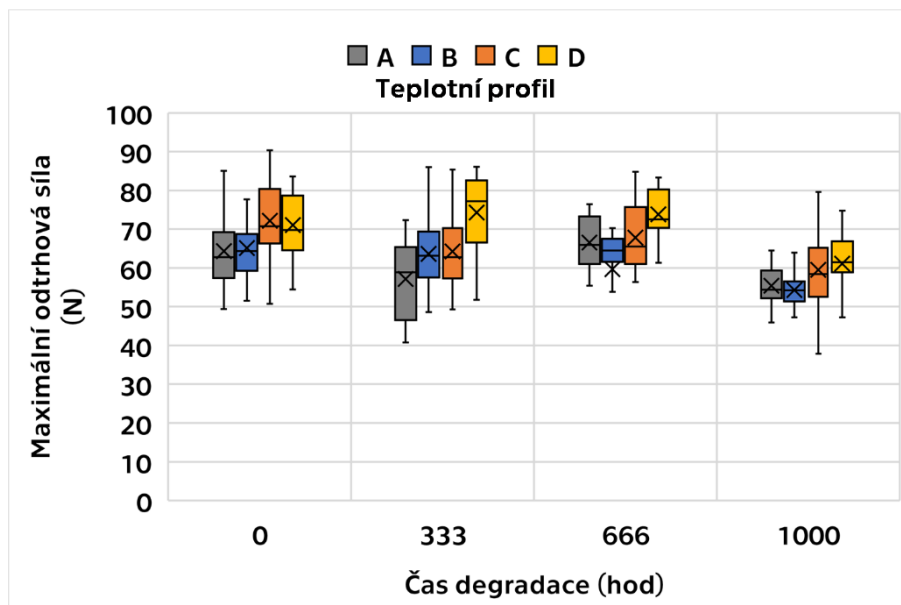
### 6.3.1.3 Měření mechanických vlastností pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání

Obrázek 77 graficky znázorňuje výsledky mechanických zkoušek pájených spojů ve stříhu, které byly prováděny během teplotně-vlhkostního namáhání. Jsou zde opět patrné rozdíly mezi skupinami profilů A, B (s nižší teplotou předehřevu) a C, D (s vyšší teplotou předehřevu), přičemž spoje pájené profily C a D vykazují lepší mechanické vlastnosti jak v okamžiku po zapájení, tedy v čase 0 hodin (se statistickou významností na základě parametru  $p < 0,0054$ ), tak i po degradaci po dobu 1000 hodin (zde je statisticky nevýznamný pouze rozdíl mezi profily B a C,  $p = 0,074$ , jinak se jedná také o statisticky významné rozdíly s hodnotou  $p < 0,02$ ). Spojy pájené profilem D dokonce vykazují v časech 333 a 666 hodin mírný nárůst v maximální odtrhové síle.

Dají-li se tyto výsledky do souvislosti s růstem intermetalických vrstev, vyplývá z toho, že v tomto případě větší nárůst intermetalické vrstvy naopak podpoří mechanickou pevnost pájeného spoje, alespoň do určitého momentu jeho stárnutí. To je zároveň v korelaci s naší předchozí studií zabývající se vlivem Heating Faktoru, která byla představena v kapitole 3.3.3.2 („Solder joint quality evaluation based on heating factor“, viz kapitola 8 *Seznam publikací disertanta*). Zde také došlo u spojů založených na BiSn pájce ke zvýšení síly potřebné k odtržení čipové součástky, a to po 200 hodinách stárnutí při 100 °C.

Na výsledky je však potřeba se koukat také s ohledem na fakt, že pájený spoj připojující součástku na DPS není tvořen pouze spojením (intermetalickou vrstvou) mezi pájkou a mědí, ale také mezi pájkou a vývodem součástky. Výsledky stříhové zkoušky tak odrážejí pevnost obou zmíněných vrstev. Intermetalická vrstva mezi pájkou a vývodem součástky nebyla předmětem

výzkumu v předchozí části experimentu, proto je potřeba brát korelaci mezi růstem intermetalických vrstev a stříhovou silou s určitou rezervou.



Obrázek 77. Výsledky mechanické zkoušky ve stříhu pro pájené spoje během teplotně-vlhkostního namáhání

Tabulka 22. Vyhodnocení místa odtrhu (viz obrázek 16) při stříhové zkoušce pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání

Teplotní profil	Čas degradace (hod)	Odtržení v místě b	Odtržení v místě c	Odtržení v místě d	Odtržení v místě e
A	0	71 %	0 %	29 %	0 %
	333	50 %	7 %	43 %	0 %
	666	50 %	7 %	43 %	0 %
	1000	76 %	0 %	24 %	0 %
B	0	82 %	0 %	18 %	0 %
	333	64 %	7 %	29 %	0 %
	666	50 %	14 %	36 %	0 %
	1000	33 %	5 %	62 %	0 %
C	0	57 %	11 %	32 %	0 %
	333	71 %	0 %	29 %	0 %
	666	36 %	7 %	57 %	0 %
	1000	62 %	0 %	38 %	0 %
D	0	57 %	7 %	32 %	4 %
	333	29 %	0 %	71 %	0 %
	666	50 %	0 %	50 %	0 %
	1000	76 %	0 %	24 %	0 %

Napovědět může také vyhodnocení místa odtrhu (porušení spoje), které je provedeno podle standardu JEITA ET-7409/1 03 (viz tabulka 22; místa a, f – prasknutí součástky a odtržení pájecí plošky – jsou z hodnocení vyjmuty, protože k odtržení v těchto místech nedošlo ani jednou).

Z tohoto vyhodnocení je patrné, že ve většině případů došlo k odtržení součástky díky prasklině v intermetalické vrstvě mezi vývody součástky a pájkou (b), případně v objemu pájky (d). V malém procentu případů došlo k utržení vývodů od těla součástky (c), a jen v jediném případě za celý experiment se spoj utřhl v intermetalické vrstvě mezi pájkou a mědí (e). V případné navazující studii by bylo tedy vhodné obrátit pozornost právě na kinetiku intermetalických vrstev mezi vývodem součástky a pájkou. Povrch vývodů součástek bývá často na bázi niklu, vznikající intermetalické sloučeniny můžou být z tohoto důvodu jiné ( $\text{Ni}_3\text{Sn}_4$  místo  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ ).

Jelikož tato zkouška odráží praktický dopad profilování pájecí pece, neboť stříhové testy mají silnou korelaci se spolehlivostí pájených spojů [211], z praktického hlediska se tedy dá usoudit, že je lepší volit vyšší teplotu ve fázi předehřevu pro dosažení kvalitnějších pájených spojů.

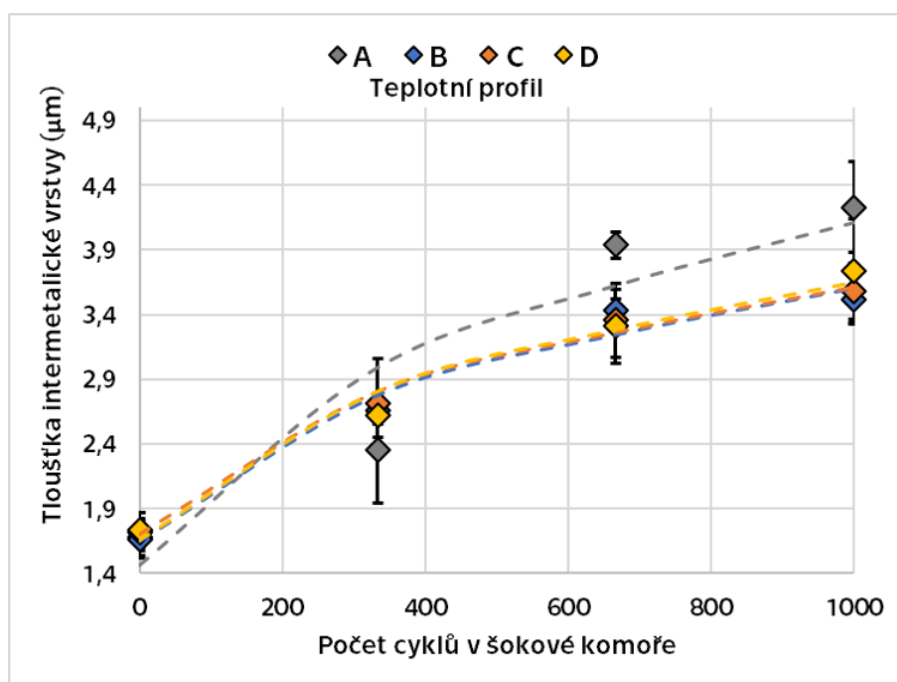
### 6.3.2 Namáhání teplotními šoky

#### 6.3.2.1 Růst intermetalických vrstev během namáhání teplotními šoky

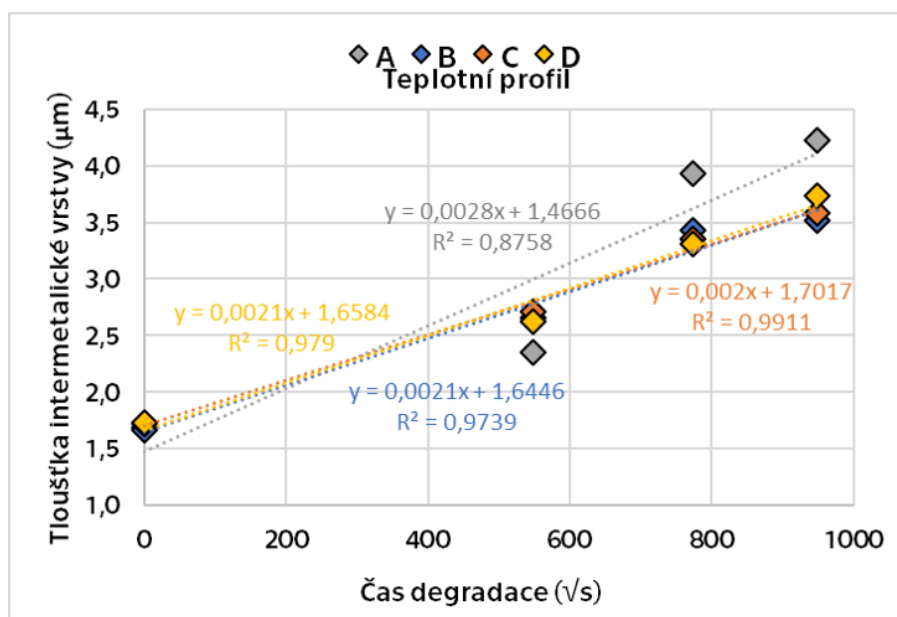
Obrázek 78 znázorňuje růst intermetalických vrstev během namáhání pájených spojů teplotními šoky. Stejně jako v případě výsledků z teplotně-vlhkostního namáhání, i zde byla data proložena funkcí podle rovnice (5) uvedené v kapitole 3.1.4 *Intermetalické sloučeniny* a byly dopočítány hodnoty difúzních koeficientů (totožným postupem). Dále zde byl přijat zjednodušující předpoklad, že růst intermetalické vrstvy probíhá pouze v „horké zóně“, tedy v momentě, kdy je pájený spoj v prostředí o teplotě 125 °C. V momentě, kdy se nachází v dolní komoře, která má -40 °C, růst intermetalických vrstev neprobíhá nebo je zanedbatelný. Tento předpoklad byl přijat na základě všeobecně známého faktu, že rychlost chemických reakcí je silně závislá právě na teplotě. Celkový čas tepelného stárnutí je tedy  $1000 \times 15$  minut. Pomocný graf závislosti tloušťky intermetalické vrstvy na odmocnině z času degradace (s) s provedenou lineární regresí ukazuje obrázek 79. Tabulka 23 uvádí hodnoty dopočtených difúzních koeficientů.

**Tabulka 23.** Vypočtené difúzní koeficienty pro spoje pájené teplotními profily A-D namáhané teplotními šoky

Teplotní profil	Difúzní koeficient ( $10^{-8} \mu\text{m}^2/\text{s}$ )
A	777,97
B	427,19
C	404,83
D	440,90



Obrázek 78. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na počtu cyklů v šokové komoře pro teplotní profily A-D



Obrázek 79. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na odmocnině z času degradace při namáhání teplotními šoky pro teplotní profily A-D

Již na první pohled jsou zřejmé dva podstatné rozdíly oproti výsledkům měření spojů, které byly degradovány vlhkým teplem – v tomto případě jsou difúzní koeficienty řádově vyšší (až o dva řády), což potvrzuje dominantní vliv teploty na stárnutí pájených spojů, a dále také proklad mocninnou funkcí s exponentem  $n = \frac{1}{2}$  je zde mnohem přesnější, viz hodnoty spolehlivosti  $R^2$  (obrázek 79). Nejmenší hodnota spolehlivosti se objevila u pájených spojů A, a to kvůli druhému

bodu měření (333 cyklů). Pokud by se tento druhý bod vynechal z vyhodnocení, hodnota spolehlivosti se rovná 0,995 při nepatrné změně difúzního koeficientu na hodnotu 759  $\mu\text{m}^2/\text{s}$ . Z toho důvodu nebylo nutné provádět další výpočty ke zpřesnění exponentu  $n$  a je tedy v tomto případě možné přijmout původní předpoklad o většinovém uplatnění difúzního mechanismu růstu intermetalických vrstev.

Spoje pájené teplotním profilem A se od těch ostatních významně liší (pouze mezi variantami A a D vychází podle statistického testu  $p = 0,073$ , v ostatních případech je  $p < 0,012$ ), což se promítá jednak ve velikosti difúzního koeficientu (hodnota je skoro dvojnásobná oproti ostatním profilům), a jednak také v konečné tloušťce intermetalické vrstvy (v průměru 4,2  $\mu\text{m}$  po 1000 cyklech v šokové komoře). Teplotní profil A se vyznačoval nízkou teplotou přehřevu i přetavení. Je tedy možné, že právě kvůli nižší teplotě bude intermetalická vrstva po zapájení více nehomogenní s více možnými difúzními kanály, které umožní další růst během teplotního namáhání. To je samozřejmě v přímém rozporu s diskuzí vedenou v předchozí podkapitole, nicméně zase to podporuje teorii, že stárnutí v teplém vlhku se řídí trochu odlišnými mechanismy než u čistě tepelného stárnutí (o které jde v tomto případě).

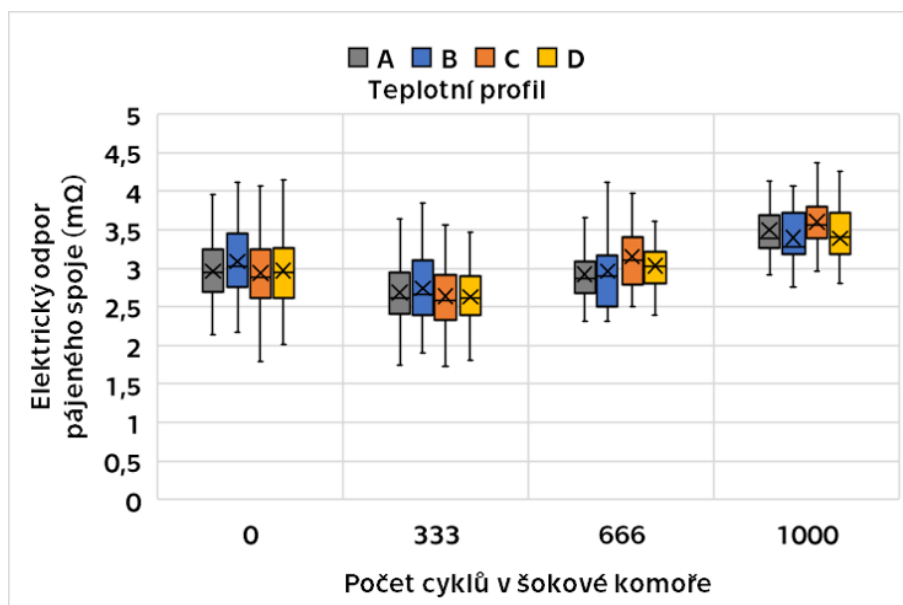
Mezi pájenými spoji, které byly připraveny při teplotních profilech B, C a D, nejsou žádné statisticky významné rozdíly. Opět se zde tedy nedá vysledovat žádný trend související s nastavením přehřevu, a tedy aktivací tavidla, i když vzhledem k výsledkům se dá říci, že pro omezení růstu intermetalických sloučenin během teplotního namáhání v čase je lepší volit spíše vyšší teplotu přehřevu. To je opět samozřejmě v rozporu s předchozí podkapitolou; je proto evidentně nezbytné brát v praxi do úvahy také typ zatěžování elektrického zařízení a v jakém prostředí bude používáno.

#### 6.3.2.2 Měření elektrického odporu pájených spojů během namáhání teplotními šoky

Výsledky měření elektrického odporu zobrazuje obrázek 80. Mezi jednotlivými variantami nebyl pozorován žádný statisticky významný rozdíl, všechny vykazovaly mírný nárůst elektrického odporu po 1000 cyklech v šokové komoře (přibližně o 16 %), který byl zároveň mírně větší, než v případě teplotně-vlhkostního namáhání. To by mohlo, zároveň vzhledem k většímu nárůstu intermetalických vrstev, indikovat korelaci právě mezi tloušťkou intermetalické vrstvy a elektrickým odporem.

Pro přesné určení závislosti elektrického odporu na tloušťce intermetalické vrstvy (ze které by se zase opačně dala určovat tloušťka intermetalické vrstvy pomocí měření elektrického odporu spojů, tedy nedestruktivní metodou) by však bylo nutné udělat optimálně pouze tepelné stárnutí spojů a nejlépe při různých teplotách, dále zaručit vždy naprosto stejnou geometrii spoje pomocí nepáživé masky (aby se pájka nemohla částečně, i když v minimální míře, roztékat i po přívodních cestách), pro kterou by tato závislost platila a zároveň definovat, pro které součástky (konkrétní

typ/výrobce) by závislost platila – případně se místo součástky může použít měděný kvádřík. Tyto myšlenky mohou být námětem pro další studie.

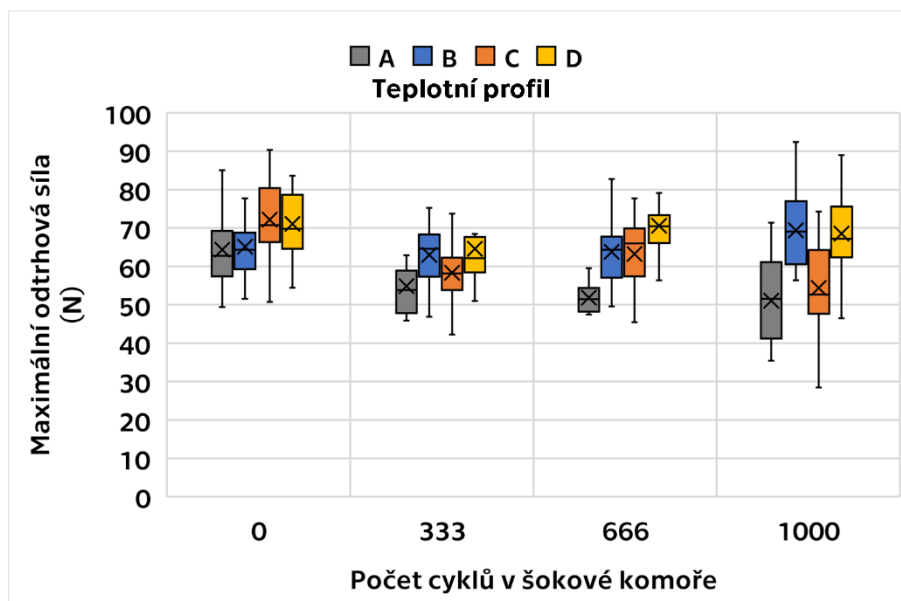


**Obrázek 80.** Výsledky měření elektrického odporu pájených spojů během namáhání teplotními šoky

Zajímavý je opět pokles elektrického odporu po 333 cyklech, který koresponduje s výsledky z teplotně-vlhkostního namáhání. Pravděpodobně se zde děje podobný jev, tedy s nárůstem intermetalické vrstvy se zlepšuje elektrické spojení mezi substrátem a pájkou, respektive mezi pájkou a vývodem součástky.

### 6.3.2.3 Měření mechanických vlastností pájených spojů během namáhání teplotními šoky

Obrázek 81 ilustruje výsledky z mechanické zkoušky stříhem pro pájené spoje degradované teplotními šoky. Zde je patrný významný rozdíl mezi variantami A, C a B, D. Spoje pájené teplotními profily B, D (tedy s vyšší teplotou v zóně přetavení) vykazovaly lepší mechanické vlastnosti a prakticky žádný výrazný pokles v maximální síle potřebné k odtržení součástky. Naopak, u varianty B byl zaznamenán mírný nárůst v maximální odtrhové síle o 6,5 %. Pro tyto dvě varianty se podle statistického testu odtrhová síla na konci stárnutí teplotními šoky neliší od hodnoty, která byla naměřena u spojů hned po zapájení ( $p > 0,10$ ).



**Obrázek 81.** Výsledky mechanické zkoušky ve stříhu pro pájené spoje během namáhání teplotními šoky

Z hlediska tavidla a jeho aktivace během fáze předehřevu je tedy nepodstatné nastavení teploty právě ve fázi předehřevu, protože zcela dominantní vliv zde má teplota v zóně přetavení. V tomto případě je tedy možné prohlásit, že Heating faktor může být dostatečným ukazatelem, respektive odhadním nástrojem pro určení dlouhodobé stability pájených spojů na bázi bizmutu a cínu.

**Tabulka 24.** Vyhodnocení místa odtrhu (viz obrázek 16) při stříhové zkoušce pájených spojů během namáhání teplotními šoky

Teplotní profil	Čas degradace (hod)	Odtržení v místě b	Odtržení v místě c	Odtržení v místě d	Odtržení v místě e
A	0	71 %	0 %	29 %	0 %
	333	57 %	0 %	43 %	0 %
	666	57 %	0 %	43 %	0 %
	1000	33 %	0 %	67 %	0 %
B	0	82 %	0 %	18 %	0 %
	333	57 %	0 %	43 %	0 %
	666	64 %	0 %	36 %	0 %
	1000	38 %	0 %	62 %	0 %
C	0	57 %	11 %	32 %	0 %
	333	86 %	0 %	14 %	0 %
	666	57 %	0 %	43 %	0 %
	1000	43 %	0 %	57 %	0 %
D	0	57 %	7 %	32 %	4 %
	333	64 %	0 %	36 %	0 %
	666	43 %	0 %	57 %	0 %
	1000	38 %	0 %	62 %	0 %



Výsledky částečně korelují s výsledky měření intermetalických vrstev, tedy alespoň v případě varianty A, která je po cyklické zkoušce teplem mechanicky nejslabší, což odpovídá největší tloušťce intermetalické vrstvy. Nicméně by podobná úměra měla platit i pro spoje varianty C – jejich intermetalická vrstva však byla výrazně menší. To napovídá tomu, že při těchto mechanických zkouškách hraje také roli intermetalická vrstva mezi vývodem součástky a pájkou, jak již bylo řečeno výše. Zároveň to dokládá i analýza místa praskliny (tabulka 24) – v místě intermetalické vrstvy mezi pájkou a mědí spoj nepraskl ani v jednom případě.

Zde opět nejsou vidět žádné zásadní trendy, respektive významné rozdíly mezi jednotlivými variantami. Zdá se, že po teplotním cyklování má tendenci spoj praskat více v místě d, tedy v oblasti samotné pájky (c), než v oblasti intermetalické vrstvy mezi vývodem součástky a pájkou (b). To by mohlo naznačovat, že se vlivem této degradace začne měnit mikrostruktura samotné pájky, může docházet k růstu intermetalických sloučenin uvnitř objemu pájky či zde může docházet k jiným, rekrystalizačním změnám, které způsobí vyšší křehkost pájky.

## 6.4 Závěr experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin

Na předchozích stránkách byl popsán experiment, který se zabýval vlivem nastavení teplotního profilu především na kinetiku růstu intermetalických sloučenin, přidruženě také na fyzikální vlastnosti pájeného spoje (elektrický odpor, mechanická pevnost ve stříhu), během teplotně-vlhkostního namáhání a namáhání teplotními šoky. Jednalo se o poměrně precizní studii, především z hlediska velmi přesného profilování pájecí pece, a také z hlediska množství zkoumaných vzorků i měřených parametrů.

Výsledky experimentu potvrzují, že Heating Faktor nemusí být vždy zcela dostatečným popisem pro predikci spolehlivosti pájených spojů. V případě teplotně-vlhkostního namáhání bylo zjištěno, že spoje pájené s teplotním profilem s vyšší teplotou v oblasti přehřevu vykazují lepší mechanické vlastnosti. Zároveň se liší také tloušťka intermetalické vrstvy a difúzní koeficient pro jednotlivé varianty, ačkoli se zde z naměřených dat nedá posoudit konkrétní trend. Zároveň základní rovnice pro kinetiku růstu intermetalických vrstev (5) téměř ve všech případech neplatí zcela přesně, respektive provedené proklady dat naznačují, že pro teplotně-vlhkostní namáhání se uplatňuje poněkud odlišný mechanismus růstu než v případě teplotní degradace za normální, tedy nezvýšené relativní vlhkosti.

Predikci pomocí hodnoty Heating Faktoru je možné podle výsledků experimentu uplatnit pro případ stárnutí spojů pomocí teplotních šoků. Čím větší je hodnota Heating Faktoru, tedy v případě tohoto experimentu vyšší teplota v oblasti přetavení, tím je pájený spoj spolehlivější – v čase nedochází k poklesu síly potřebné k odtrhu součástky. Zde jsou také proklady dat víceméně v souladu s původní rovnicí (5) pro popis růstu intermetalických vrstev.

Přínos tohoto experimentu je dále také v tom, že se zabývá dlouhodobou spolehlivostí pájených spojů realizovaných nízko-tavitelnou pájkou na bázi bismutu a cínu. Ta se v průmyslové praxi používá poměrně běžně pro teplotně-senzitivní součástky nebo pro opravárenské činnosti, nicméně dlouhodobá stabilita těchto spojů (v reálných geometriích, které jsou dané praktickým použitím pro připojení součástek) není v odborné literatuře dostatečně dobře popsána. Ještě méně se pak literatura zabývá vlivem teploty během procesu pájení právě na tento typ pájek. Výsledky mého experimentu mohou tedy zároveň sloužit jako dobrý odrazový můstek pro práci s nízko-tavitelnými pájecími pastami především s ohledem na jejich chování v čase.

Pro detailnější vysvětlení některých výsledků, tedy zejména významný rozdíl v difúzním koeficientu pro profil D v případě teplotně-vlhkostního namáhání, respektive pro profil A v případě namáhání teplotními šoky, by bylo vhodné provést další sérii experimentů s proměnnou teplotou stárnutí pro potvrzení těchto trendů a pro výpočet hodnoty aktivační energie intermetalické sloučeniny. Pro další podchycení vlivu tavidla na růst intermetalických sloučenin by bylo vhodné také provést experimenty pro pájecí pasty s různým obsahem tavidlové složky.

## 7 ZÁVĚR

Tavidlo, jeho typ a množství, je jedním ze základních faktorů, které vstupují do pájecího procesu. Má zcela zásadní vliv na vznik pájeného spoje, jeho kvalitu a spolehlivost. Na tom se obecně shodují všichni experti v oboru povrchové montáže, nicméně i přes to velká řada publikovaných vědeckých studií, které se zabývají pájenými spoji a jejich dlouhodobým chováním, většinou vliv tavidla opomíjejí – experimenty jsou prováděny s jediným typem tavidla a v některých případech není ani typ tavidla zmíněn. Tento poznatek vyplynul z první teoretické části, která pojednává obecně o pájeném spoji a procesu pájení, a byl (a stále je) hnacím motorem pro mé výzkumné aktivity nejen v rámci této dizertační práce.

Rešeršní část této práce se věnovala obecně chybám v procesu pájení přetavením, blíže pak chybám, které jsou způsobeny právě tavidly. Samotný rozsah této rešerše napovídá, že s rostoucí miniaturizací a stále ještě probíhající proměnou procesu z olovnatého na bezolovnatý (vzhledem k délce využívání slitiny SnPb v praxi oproti bezolovnatým) narůstá množství i výskyt těchto chyb. Velmi rozšířené vady, které se řeší napříč průmyslovou praxí, jako například výskyt dutin a kontaminace DPS tavidlovými zbytky kvůli nadměrnému rozstříku během pájecího procesu, jsou způsobeny právě tavidly – ať už jejich nevhodnou volbou vzhledem k pájecí slitině, množstvím nebo nevhodným nastavením teplotního profilu (jehož předehřívací fáze má respektovat právě použité tavidlo). Poznatky z dostupných vědeckých publikací v této rešeršní části jsou pak doplněny vlastními poznatky přímo z průmyslové praxe. Tato část tak tvoří poměrně komplexní a zároveň, vzhledem k dostupné odborné literatuře, jedinečný souhrn problematiky a stavu současného poznání (v českém jazyce obzvlášť).

V první experimentální části byly představeny výsledky dvou experimentů, které se věnovaly fenoménu rozstříku tavidla z pájecí pasty během pájení přetavením. Z těchto výsledků vyplývá, že kontaminace okolí pájených spojů tavidlovými zbytky se dá redukovat vhodnou volbou nepájjivé masky – v případě použití lesklé masky namísto matné došlo ke snížení výskytu zbytků až o 50 %. Povrch nepájjivé masky totiž upravuje povrchová napětí tekutého tavidla, a to se pak různě roztéká okolo pájecí plošky. Čím více se tavidlo rozteče do okolí, tím větší má tendenci prskat a kontaminovat své okolí. Míra roztečení se u menších pájecích plošek dá ovlivnit také typem pájecí plošky – ploška definovaná mědí nebo ploška definovaná nepájjivou maskou, přičemž první zmíněná varianta má větší tendenci bránit tavidlu roztékat se. Důležitý je vliv samotného tavidla, zejména jeho složení – rozdíly jsou zde také markantní, přičemž se ukazuje, že tavidla s větším obsahem halidů (alespoň dle značení standardu J-STD-004) jsou k rozstříku náchylnější.

Tyto experimenty jsou tématikou, způsobem testování a volbou vstupních parametrů s ohledem na dostupné, dosud publikované práce poměrně jedinečné a mohou být dobrým vodítkem či odrazovým můstkem při řešení problémů s kontaminací desek v SMT výrobě. Ne vždy je totiž vhodné či dokonce možné měnit teplotní profil pájecího procesu (neboť ten má podle již publikovaných výsledků i mých osobních zkušeností velmi významný vliv právě na rozstřík tavidla) s ohledem na nepřetržitost výroby – pečlivé profilování průmyslových průběžných pecí je časově náročné a po tu dobu samozřejmě nemůže probíhat výroba, což má na firmu negativní ekonomický dopad. Změna pájecí pasty, a tedy tavidla, je vzhledem ke zdoluhavým schvalovacím procesům a interním podnikovým normám prakticky nemožná, tím spíše, pokud by se jednalo o změnu pro pouze část výrobků (tam, kde se vyskytuje daná chyba). Co se naopak dá, a možná překvapivě, měnit poměrně snadno, je úprava vstupních materiálů DPS, tedy zmíněné nepájivé masky, nebo úprava samotného designu DPS (při kterém se zároveň nemění design šablony pro tisk pájecí pasty). Vhodnou kombinací těchto vstupních proměnných tak lze docílit redukce zmetků a ušetřit nezanedbatelné výrobní náklady.

K testování pájecí pasty s ohledem na kontaminaci okolí lze využít metodiku představenou v kapitole 5.3, včetně návrhu testovací DPS, který respektuje reálné rozměry součástek v povrchové montáži a zároveň samotné vyhodnocení míry kontaminace probíhá vždy stejně, ať už je DPS vyrobena s jakoukoli povrchovou úpravou či nepájivou maskou. To může být například přínosné v momentě, kdy firma uvažuje o změně pájecí pasty pro celý výrobní závod.

Ve druhé experimentální části této práce byl ukázán vliv nastavení teplotního profilu v oblasti předehřevu, tedy v oblasti, kde se aktivuje tavidlová složka pájecí pasty, na růst intermetalických sloučenin, a především na změnu mechanických vlastností pájeného spoje během teplotně-vlhkostního namáhání. Spoje pájené s vyšší teplotou předehřevu vykazovaly v čase menší pokles mechanické pevnosti ve stříhu. Vedlejším, ale důležitým poznatkem je zde také fakt, že podle naměřených dat růst intermetalické vrstvy neodpovídá předpokladu pro izotermální stárnutí. Mechanismus růstu může být tedy ovlivněn zvýšenou vlhkostí. Toto by mohlo být předmětem dalších studií, protože dostupná literatura se o kinetice intermetalických vrstev pájených spojů za zvýšené vlhkosti v dostatečně podrobné míře a dostatečném rozsahu nezmiňuje.

Druhá experimentální část se také zabývala vlivem teplotního profilu na degradaci pájených spojů teplotními šoky. Zde se však změna teplotního profilu v oblasti předehřevu nijak významně nepodepsala na změně vlastností pájených spojů, naopak se zde projevuje vliv oblasti přetavení (tedy hodnoty Heating Faktoru, či zjednodušeně maximální teploty pájení) na mechanické vlastnosti i růst intermetalických vrstev.

Na základě výsledků experimentů, sumarizace rešeršního přehledu i dalších vlastních pozorování lze konstatovat, že tavidlo skutečně hraje v procesu pájení velmi podstatnou roli a

může mít vliv nejen na vznik vad evidentně patrných ihned po procesu pájení, ale také na dlouhodobou stabilitu pájeného spoje. Zvláště přihlédneme-li k aktuálním trendům v povrchové montáži, tedy miniaturizaci a nahrazování olovnatých systémů těmi bezolovnatými ve stále více zařízeních včetně těch, na kterých mohou záviset lidské životy, je podstatné se zabývat i nadále právě takovými studiemi, které přinesou větší přehled o vzájemné interakci pájka-tavidlo a její významnosti z hlediska vzniku vad a spolehlivosti pájených spojů.

## 8 SEZNAM PUBLIKACÍ DISERTANTA

### 8.1 Publikace vztahující se k tématu disertační práce

#### 8.1.1 Publikace v impaktovaných časopisech

- Veselý, P.; Bušek, D.; Krammer, O.; Dušek, K.: *Analysis of no-clean flux spatter during the soldering proces*. Journal of Materials Processing Technology. 2020, 275 ISSN 0924-0136.
  - Podíly: shodně 25 %
  - Bibliometrické indikátory časopisu: JCR 2019 - IF 4,67
    - ENGINEERING, INDUSTRIAL: Q1
    - ENGINEERING, MANUFACTURING: Q1
    - MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY: Q2
  - Citace: 7
    - Wakeel, S.; Meng, D. K. P.; Chin, S. W. W.; Philipsen, J.; Gommers, P.; Joosten, A.: *Effect of plasma and staging time on the underfill voids in fine pitch flip-chip package*. 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2021. ISBN 978-1-6654-1391-6.
    - Syarfa, N. S.; Najib, A. M.: *Heat Level Mode in Vapour Phase Soldering Using Lead-Free Solder Paste for Surface Mount Technology: A Review*. Intelligent Manufacturing and Mechatronics, pp. 673 - 690, 2021. ISBN 978-981-16-0866-7.
    - Wakeel, S.; Haseeb, A. S. M. A.; Afifi, M. A.; Bingol, S.; Hoon, K.: *Constituents and performance of no-clean flux for electronic solder*. MICROELECTRONICS RELIABILITY, vol. 123, 2021. ISSN 0026-2714.
    - Mantis, I.; Li, F.; Jellesen, M.; Ambat, R.: *Effect of intrinsic PCB parameters on the performance of fluoropolymer coating under condensing humidity conditions*. MICROELECTRONICS RELIABILITY, vol. 122, 2021. ISSN 0026-2714.
    - Shukalov, A V; Zharinov, I O; Zharinov, O O: *Green cyber-production of semiconductor electronic*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 548, 2020. ISSN 1755-1315.
    - He, S.; Gao, R.; Li, J.; Shen, Y.; Nishikawa, H.: *In-situ observation of fluxless soldering of Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu under a formic acid atmosphere*. MATERIALS CHEMISTRY AND PHYSICS, vol. 239, 2020. ISSN 0254-0584.
    - Geczy, A.; Szalmasi, D.; Straubinger, D.; Illes, B.: *Investigating shadowing and possible tombstoning caused by large SMD components during vapour phase reflow soldering*. 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and

Technology in Electronic Packaging (SIITME 2019), pp. 343 - 346, 2019. ISSN 2641-287X.

- Veselý, P.; Horynová, E.; Starý, J.; Bušek, D.; Dušek, K.; Zahradník, V.; Plaček, M.; Mach, P. et al.: *Solder joint quality evaluation based on heating factor*. Circuit World. 2018, 44(1), 37-44. ISSN 0305-6120.
  - Podíly: shodně 9,09 %
  - Bibliometrické indikátory časopisu: JCR 2019 - IF 1,04
    - ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC: Q4
    - MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY: Q4
  - Citace: **19** (bez autocitací)
    - Kim, M.; Lee, J.: *Die sinter bonding in air using Cu@Ag particulate preform and rapid formation of near-full density bondline*. JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH AND TECHNOLOGY-JMR&T, vol. 14, pp. 1724 - 1738, 2021. ISSN 2238-7854.
    - Syarfa, N. S.; Najib, A. M.: *Heat Level Mode in Vapour Phase Soldering Using Lead-Free Solder Paste for Surface Mount Technology: A Review*. Intelligent Manufacturing and Mechatronics, pp. 673, 2021. ISBN 978-981-16-0866-7.
    - Sezer, A.; Altan, A.: *Optimization of Deep Learning Model Parameters in Classification of Solder Paste Defects*. 2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), 2021. ISBN 978-1-6654-4058-5.
    - Xu, Y.; Liu, Yu; Zhang, L.: *Effects of the Solder Phase Transformation on the Optimization of Reflow Soldering Parameters and Temperature Profiles*. DISCRETE DYNAMICS IN NATURE AND SOCIETY, vol. 2021, 2021. ISSN 1026-0226.
    - Alaya, M.; Gal, L.; Geczy, A.: *Applicability of gage type pressure sensors in vapour phase soldering for process evaluation*. 2020 43RD INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2020. ISSN 2161-2536.
    - Illes, B.; Batorfi, R.; Hurtony, T.; Krammer, O.; Harsanyi, G.; Pietrikova, A.; Skwarek, A.; Witek, K.: *Whisker Development from SAC0307-Mn07 Solder Alloy*. 2020 43RD INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2020. ISSN 2161-2536.
    - Krammer, O.; Szilagyi, R.; Geczy, A.: *Investigating the Component Shift during Reflow Soldering at Large Scale Capacitors*. 2019 IEEE 25TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR DESIGN AND TECHNOLOGY IN

ELECTRONIC PACKAGING (SIITME 2019), pp. 38 - 42, 2019. ISSN 2641-287X.

- Geczy, A.; Szalmasi, D.; Straubinger, D.; Illes, B.: *Investigating shadowing and possible tombstoning caused by large SMD components during vapour phase reflow soldering*. 2019 IEEE 25TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR DESIGN AND TECHNOLOGY IN ELECTRONIC PACKAGING (SIITME 2019), pp. 343 - 346, 2019. ISSN 2641-287X.
- Hurtony, T.; Krammer, O.; Illes, B.; Gordon, P.: *Investigation of the Microstructure of Mn-doped Tin-Silver-Copper Solder Alloys Solidified with Different Cooling Rates*. 2019 22ND EUROPEAN MICROELECTRONICS AND PACKAGING CONFERENCE & EXHIBITION (EMPC), 2019. ISSN 2165-2341.
- Geczy, A.; Hajdu, I.; Gal, L.; Barna, C.; Kovacs, M.; Harsanyi, G.: *Challenges of SMT assembling on biodegradable PCB substrates*. 2019 22ND EUROPEAN MICROELECTRONICS AND PACKAGING CONFERENCE & EXHIBITION (EMPC), 2019. ISSN 2165-2341.
- Krammer, O.; Al-Ma'aiteh, T.; Martinek, P.: *Investigating the Effect of Viscosity Models on the Stencil Printing by Numerical Modelling*. 2019 42ND INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2019. ISSN 2161-2536.
- Straubinger, D.; Bozsoki, I.; Illes, B.; Geczy, A.: *Analytical Solution of Heat Distribution Inside a Printed Circuit Board During Vapour Phase Soldering*. 2019 42ND INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2019. ISSN 2161-2536.
- Geczy, A.; Kiss, B.; Alaya, A.; Illyefalvi-Vitez, Z.: *Refined Approach on Controlling Heat Transfer in a Vapour Phase Soldering Oven*. 2019 42ND INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2019. ISSN 2161-2536.
- Alaya, M.; Geczy, A.: *Effect of PCB Thickness and Height Position During Heat Level Type Vapour Phase Reflow Soldering*. 2019 42ND INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2019. ISSN 2161-2536.
- Alaya, M.; Gal, L.; Hurtony, T.; Medgyes, B.; Straubinger, D.; Tareq, A.; Illes, B.; Geczy, A.: *Wetting of different lead free solder alloys during vapour phase soldering*. 2019 42ND INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2019. ISSN 2161-2536.



- Al-Ma'aiteh, T.; Krammer, O.: *Particle Level Modelling of Solder Pastes Rheological Behaviour in Viscosity Measurement*. 2019 42ND INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2019. ISSN 2161-2536.
- Beshajova, I.; Molhanec, M.: *The Relationship Between the Parameters of Vacuum Evaporation Process*. 2018 41ST INTERNATIONAL SPRING SEMINAR ON ELECTRONICS TECHNOLOGY (ISSE), 2018. ISBN 978-3-319-73847-5. ISSN 2161-2536.
- Otahal, A.; Szendiuch, I.: *Influence of heat flow direction on solder ball interfacial layer*. JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING-ELEKTROTECHNICKY CASOPIS, vol. 69, no. 4, pp. 305 - 310, 2018. ISSN 1335-3632.

### 8.1.2 Publikace – ostatní

- Veselý, P.; Froš, D.: *Evaluation of Long-term Stability of Bismuth-Tin Solder Joint Properties in Dependence on Reflow Conditions*. In: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2021. p. 1-7. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-6654-1477-7.
  - Podíly: shodně 50 %
- Dušek, K.; Bušek, D.; Veselý, P.: *Overview of Selected Issues Related to Soldering*. In: *Welding - Modern Topics*. London: IntechOpen Limited, 2020. ISBN 978-1-83881-896-8.
  - Podíly: shodně 33,33 %
  - Citace: **2**
    - Wakeel, S.; Haseeb, A. S. M. A.; Afifi, M. A.; Bingol, S.; Hoon, K. L.: *Constituents and performance of no-clean flux for electronic solder*. *Microelectronics Reliability*, 2021. ISSN 0026-2714.
    - Otáhal, A.; Skácel, J.; Szendiuch, I.: *Investigation of Metallographic Etchants Selectivity for Tin Solder Alloys*. 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 2020. ISBN 978-1-7281-6773-2. ISSN 2161-2536.
- Veselý, P.; Dušek, K.; Staňková, A.: *Evaluation of Bismuth/Tin Solder Intermetallic Layers Based on Heating Factor*. In: 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2019. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-1874-1.
  - Podíly: Veselý 50 %, Dušek 40 %, Staňková 10 %
  - Citace: **1**

- Xu, Y.; Liu, Y.; Zhang, L.: *Effects of the Solder Phase Transformation on the Optimization of Reflow Soldering Parameters and Temperature Profiles*. Discrete Dynamics in Nature and Society, vol. 2021, 2021. ISSN 1026-0226.

## 8.2 Ostatní publikace nevztahující se k tématu disertační práce

### 8.2.1 Publikace v impaktovaných časopisech

- Froš, D.; Dušek, K.; Veselý, P.: *Investigation of Impacts on Printed Circuit Board Laminated Composites Caused by Surface Finish Application*. *Polymers*. 2021, 13(19), ISSN 2073-4360.
  - Podíly: Froš 50 %, Dušek 40 %, Veselý 40 %
  - Bibliometrické indikátory časopisu: JCR 2019 - IF 3,43
    - POLYMER SCIENCE: Q1
- Dušek, K.; Bušek, D.; Veselý, P.; Plaček, M.; Reichl, T.; Sedláček, J.; Mach, P.: *Analysis of a failure in a molded package caused by electrochemical migration*. *Engineering Failure Analysis*. 2021, 121 1-8. ISSN 1350-6307.
  - Podíly: Dušek 20 %, Bušek 20 %, Veselý 20 %, Plaček 10 %, Reichl 10 %, Sedláček 10 %, Mach 10 %
  - Bibliometrické indikátory časopisu: JCR 2019 - IF 2,90
    - MATERIALS SCIENCE, CHARACTERIZATION & TESTING: Q1
    - ENGINEERING, MECHANICAL: Q2
- Stancu, C.; Horák, M.; Notingher, P.; Dušek, K.; Mach, P.; Veselý, P.; Setnescu, R.; Lungulescu E. M.: *Thermal Lifetime Calculation of Capacitor Insulation Using the Activation Energy Method*. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2020, 10(10), 1647-1656. ISSN 2156-3950.
  - Podíly: shodně 12,5 %
  - Bibliometrické indikátory časopisu: JCR 2019 - IF 1,89
    - ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC: Q3
    - ENGINEERING, MANUFACTURING: Q3
    - MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY: Q3
- Ctibor, P.; Sedláček, J.; Hudec, T.; Veselý, P.: *Dielectric Properties of Lithium Silicate Fired by Spark Plasma Sintering*. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2020, 9(7), 1-6. ISSN 2162-8769.
  - Podíly: shodně 25 %
  - Bibliometrické indikátory časopisu: JCR 2019 - IF 2,14
    - PHYSICS, APPLIED: Q3
    - MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY: Q3

### 8.2.2 Publikace – ostatní

- Froš, D.; Veselý, P.: *Comparative Study Focused on Mechanical Properties of Solder Joints Considering Solder Pad Surface Finish*. In: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2021. p. 1-6. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-6654-1477-7.
- Klímová, M.; Veselý, P.: *Evaluation of Anisotropy of Additively Manufactured Structures*. In: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2021. p. 1-6. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-6654-1477-7.
- Minář, J.; Půlpán, J.; Veselý, P.; Šefl, O.; Dušek, K.: *Electrical Properties of Photopolymers for 3D Printing*. In: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2021. p. 1-5. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-6654-1477-7.
- Králová, I.; Kadlecová, A.; Veselý, P.; Dušek, K.: *Influence of Added Phosphorus and Gallium in Lead-free Bismuth-Tin Alloys on Wetting and Intermetallic Compounds*. In: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2021. p. 1-6. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-6654-1477-7.
- Kadlecová, A.; Králová, I.; Veselý, P.: *Mechanical and Thermal Consequences of Added Phosphorus and Gallium in Lead-free Alloy Based on Bismuth and Tin*. In: 2021 44th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2021. p. 1-5. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-6654-1477-7.
- Dousek, D.; Komanec, M.; Zhong, A.; Suslov, D.; Zvánovec, S.; Veselý, P.; Chen, Y.; Bradley, T.-D. et al.: *Long-term stability of hollow core to standard optical fiber interconnection*. In: Micro-structured and Specialty Optical Fibres VII. Bellingham (stát Washington): SPIE, 2021. p. 1-6. ISSN 0277-786X. ISBN 9781510643802.
- Dušek, K.; Hrzina, P.; Tichý, T.; Reichl, T.; Veselý, P.; Dušek, J.; Neruda, M.; Vojtěch, L.: *Evaluation of Electrical Properties of Metalized Woven and Non-woven Polymer-Based Textiles*. In: 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2020. p. 1-5. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-6773-2.
- Šefl, O.; Veselý, P.; Minář, J.; Dušek, K.: *Novel Electrical Insulation Materials - Photodegradation Endurance of 3D Printed Polylactic Acid*. In: 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2020. ISBN 978-1-7281-5879-2.

- Veselý, P.; Minář, J.; Pražanová, A.; Šefl, O.; Dušek, K.: *Novel Electrical Insulation Materials - Mechanical Performance of 3D Printed Polylactic Acid*. In: 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics). Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2020. ISBN 978-1-7281-5879-2.
- Veselý, P.; Kozák, M.: *Accelerated Aging of Bismuth-Tin Solder Joints on Various Substrates*. In: 2020 43rd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2020. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-6773-2.
- 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). New York: IEEE Press, 2020. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-6773-2.
- Dušek, K.; Bortel, R.; Veselý, P.; Hospodka, J.; Bušek, D.; Sedláček, J.: *Ruční dávkovač pájecí pasty s velmi nízkými výrobními náklady*. In: SMT info 10/19 Bulletin anotací. Brno: SMT Info, 2019. p. 29-30. ISSN 1211-6947.
- Veselý, P.; Dušek, K.; Bušek, D.; Sedláček, J.; Bortel, R.; Hospodka, J.: *Development of Low-Cost Solder Paste Hand Dispenser*. ElectroScope. 2019, 2019(2), ISSN 1802-4564.
- Dušek, K.; Zahradník, V.; Veselý, P.; Bušek, D.; Plaček, M.: *Released of Latent Heat from Solder Joints to Surrounding during Solidification of Solder Alloy - Experimental Study*. In: 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2019. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-1874-1.
- Bušek, D.; Dušek, K.; Beran, T.; Veselý, P.: *Thermo-Mechanical Test of SnBi and SnCu Solder Joints on Different Surface Finishes*. In: 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2019. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-1874-1.
- Tichý, T.; Šefl, O.; Veselý, P.; Čápal, T.: *Application Possibilities of Fused Filament Fabrication Technology for High-Voltage and Medium-Voltage Insulation Systems*. In: 2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). New York: IEEE Press, 2019. International Spring Seminar on Electronics Technology ISSE. ISSN 2161-2536. ISBN 978-1-7281-1874-1.
- Veselý, P.: *Nozzle Temperature Effect on 3D Printed Structure Properties*. In: Zborník príspevkov z medzinárodnej konferencie ELEKTROTECHNOLÓGIA 2019. Žilina: Združenie elektrotechnikov Slovenska, 2019. p. 126-131. ISBN 978-80-969729-1-3.
- Veselý, P.; Tichý, T.; Šefl, O.; Horynová, E.: *Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, 461(1), ISSN 1757-899X.

- Veselý, P.; Horynová, E.; Tichý, T.; Šefl, O.: *Study of Electrical Properties of 3D Printed Objects*. In: Proceedings of the International Student Scientific Conference Poster – 22/2018. Praha: Czech Technical University in Prague, 2018. p. 326-330. ISBN 978-80-01-06428-3.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Skupiny pájecích slitin a jejich teploty tání (převzato z [2])	18
Obrázek 2. Rovnovážený stav povrchových napětí	20
Obrázek 3. Intermetalická vrstva mezi BiSn pájkou a mědi (snímek pájeného spoje v řezu)	25
Obrázek 4. Ukázka čipu využívající vnitřní propojení pomocí pájky (převzato z [43])	29
Obrázek 5. Povrch pájecí plošky s úpravou ENIG – snímek z elektronového mikroskopu; tmavší místa odpovídají oxidové vrstvičce niklu	39
Obrázek 6. Ukázka povrchové montáže – pasivní dvou-vývodová SMD součástka	42
Obrázek 7. Schéma průběžné konvekční pájecí pece s dusíkovou atmosférou (převzato z [107])	43
Obrázek 8. Typický teplotní profil pro pájení přetavením (převzato z [105])	45
Obrázek 9. Teplotní profily pro pájení přetavením – RSS a RTS (převzato z [113])	46
Obrázek 10. Grafické vyjádření heating factoru v rámci teplotního profilu	47
Obrázek 11. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na heating faktoru – pájka typu SAC305 a povrchové úpravy mědi OSP a ENIG a dále výsledky ze studie [119]	48
Obrázek 12. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na heating faktoru – pájka typu Bi/Sn, výsledky vlastní studie [126]	49
Obrázek 13. Ishakawa diagram pro obecný defekt pájeného spoje	50
Obrázek 14. Přípravek pro měření malých odporů	51
Obrázek 15. Mechanická zkouška ve smyku pro dvou-terminálové součástky	52
Obrázek 16. Možné výsledky mechanické zkoušky ve stříhu pro dvou-terminálové součástky podle standardu JEITA ET-7409/103 [130]	53
Obrázek 17. Obrazové zpracování SEM snímku intermetalické vrstvy	54
Obrázek 18. Tombstone efekt – princip (převzato z [137])	56
Obrázek 19. Ukázka efektu náhrobního kamene u reálného výrobku	56
Obrázek 20. Ilustrace warpage efektu – možné důsledky (převzato z [142])	57
Obrázek 21. Head in Pillow efekt (převzato z [150])	58
Obrázek 22. Black Pad efekt (převzato z [161])	59
Obrázek 23. Cínové whiskery na vývodovém rámu součástek typu SOIC po třech letech uskladnění v normálních podmínkách (převzato z [166])	60
Obrázek 24. Dendritická struktura (obrázek z elektronového mikroskopu)	62
Obrázek 25. Elektrochemická migrace na standardním testovacím motivu (migrace mědi)	62
Obrázek 26. Analýza elektrochemické migrace – keramické kondenzátory v plastovém pouzdru – řez	62
Obrázek 27. EDX analýza oblasti mezi vývody keramického kondenzátoru: Ba (zelená), Ti (modrá) a Ag (růžová)	62
Obrázek 28. Typy dutin v pájeném spoji (převzato z [184])	64
Obrázek 29. Prskání tavidla – teorie koalescence (převzato z [195])	67
Obrázek 30. Kontaminace zlatého konektoru tavidlovými zbytky – příklad z praxe	69
Obrázek 31. Tavidlový zbytek na plošce pro in-circuit test (převzato z [193])	70
Obrázek 32. SEM a EDX analýza tavidlového zbytku (bod 1) a jeho okolí (bod 2) na reálném komerčním produktu	70
Obrázek 33. Různý design pájecí plošky - copper-defined (a), solder mask-defined (b)	71
Obrázek 34. Design testovací DPS v experimentu 1 (kótováno v mm)	73
Obrázek 35. Ilustrace testovacích DPS – HASL/černá maska (nalevo), ENIG/bílá maska (napravo)	73
Obrázek 36. Teplotní profil měřený na pájecích ploškách během průchodu pecí v experimentu 1	74
Obrázek 37. Příklad obrazového zpracování snímku hodnoceného vzorku (nalevo – původní snímek, napravo – výsledek zpracování)	75
Obrázek 38. Příklad profilů naměřených kontaktním profilometrem pro lesklou masku (nalevo) a matnou masku (napravo)	76
Obrázek 39. Závislost plochy tavidla rozteklého okolo pájecí plošky na povrchové úpravě, typu použitého tavidla a typu nepájivé masky	76
Obrázek 40. Celkový počet tavidlových zbytků na vyhodnocované ploše DPS v závislosti na povrchové úpravě pájecí plošky, typu tavidla a typu nepájivé masky	77
Obrázek 41. Průměrná velikost tavidlového zbytku na DPS v závislosti na povrchové úpravě pájecí plošky, typu tavidla a typu nepájivé masky	78
Obrázek 42. Celková kontaminovaná plocha na DPS v závislosti na povrchové úpravě pájecí plošky, typu tavidla a typu nepájivé masky	79
Obrázek 43. Původní design testovací DPS – plošky definované měděnou ploškou; odstup nepájivé masky od pájecí plošky je 200 $\mu\text{m}$	83

Obrázek 44. Původní design testovací DPS – plošky definované nepájivou maskou; překryv pájecí plošky maskou je 200 $\mu\text{m}$	83
Obrázek 45. Vyrobené testovací DPS: A – Board 1, B – Board 2, C – Board 3, D – Board 4	84
Obrázek 46. Výsledný design testovací DPS v experimentu 2 (kótováno v mm) – pájecí plošky definované měděnou ploškou; odstup nepájivé masky od pájecí plošky je 200 $\mu\text{m}$	84
Obrázek 47. Výsledný design testovací DPS v experimentu 2 (kótováno v mm) – pájecí plošky definované nepájivou maskou; přesah nepájivé masky je 200 $\mu\text{m}$	84
Obrázek 48. Testovací DPS po nanesení pájecí pasty a vložení vyhodnocovacího sklíčka – snímek z konfokálního mikroskopu	86
Obrázek 49. Teplotní profil procesu přetavení v experimentu 2	86
Obrázek 50. DPS pro experiment 2 s nakontaktovanými termočládky	87
Obrázek 51. Původní snímek kontaminovaného sklíčka z konfokálního mikroskopu – příklad	87
Obrázek 52. Snímek kontaminovaného sklíčka s vyznačenými tavidlovými zbytky – příklad	87
Obrázek 53. Výřez ze snímku kontaminovaného sklíčka – detail tavidlových zbytků	88
Obrázek 54. Pájecí ploška s červeně vyznačenou vyhodnocovanou plochou rozteklého tavidla	88
Obrázek 55. Design pájecích plošek v experimentu 2 – kombinovaný optický a laserový snímek z konfokálního mikroskopu	89
Obrázek 56. Design pájecích plošek v experimentu 2 – výškové mapy z dat laserového snímku z konfokálního mikroskopu	90
Obrázek 57. Liniové skeny povrchových profilů na pájecích ploškách v experimentu 2	90
Obrázek 58. Box-plotový graf parametru drsnosti $R_a$ a $S_a$ v závislosti na typu nepájivé masky v experimentu 2	92
Obrázek 59. Box-plotový graf parametru drsnosti $R_z$ a $S_z$ v závislosti na typu nepájivé masky v experimentu 2	92
Obrázek 60. Box-plotový graf parametru drsnosti $R_{L0}$ v závislosti na typu nepájivé masky v experimentu 2	93
Obrázek 61. Laserový snímek z konfokálního mikroskopu – tištěná nepájivá maska se zvětšením 50x	94
Obrázek 62. Laserový snímek z konfokálního mikroskopu – klasická nepájivá maska se zvětšením 50x	94
Obrázek 63. Výsledky analýzy roztékání tavidla po povrchu nepájivé masky v závislosti na designu testovací DPS v experimentu 2	94
Obrázek 64. Celkový počet tavidlových zbytků na vyhodnocovacím sklíčku v závislosti na pájecí pastě a designu testovací DPS v experimentu 2	96
Obrázek 65. Průměrná velikost tavidlového zbytku na vyhodnocovacím sklíčku v závislosti na pájecí pastě a designu testovací DPS	97
Obrázek 66. Celková kontaminovaná plocha na vyhodnocovacím sklíčku v závislosti na pájecí pastě a designu testovací DPS v experimentu 2	98
Obrázek 67. Design testovací DPS pro experiment na kinetiku intermetalických sloučenin (kótováno v mm)	103
Obrázek 68. Proces montáže součástek na DPS: nanesená pájecí pasta (a), osazená součástka (b), přetavená pájecí pasta (c)	104
Obrázek 69. Teplotní profily (A-D) použité v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin	104
Obrázek 70. Umístění termočládků při měření profilů v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin	105
Obrázek 71. Klimatické komory použité pro experiment na kinetiku intermetalických sloučenin. Zleva šoková komora a teplotně-vlhkostní komora	105
Obrázek 72. Analýza intermetalické vrstvy v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin	106
Obrázek 73. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na čase degradace vlhkým teplem pro teplotní profily A-D	108
Obrázek 74. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na odmocnině z času degradace vlhkým teplem pro teplotní profily A-D	108
Obrázek 75. Mocninné proložení dat z měření intermetalických vrstev v závislosti na čase degradace	110
Obrázek 76. Výsledky měření elektrického odporu pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání	112
Obrázek 77. Výsledky mechanické zkoušky ve stříhu pro pájené spoje během teplotně-vlhkostního namáhání	113
Obrázek 78. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na počtu cyklů v šokové komoře pro teplotní profily A-D	115
Obrázek 79. Závislost tloušťky intermetalické vrstvy na odmocnině z času degradace při namáhání teplotními šoky pro teplotní profily A-D	115
Obrázek 80. Výsledky měření elektrického odporu pájených spojů během namáhání teplotními šoky	117

Obrázek 81. Výsledky mechanické zkoušky ve střihu pro pájené spoje během namáhání teplotními šoky

118



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Vybrané pájecí slitiny SAC a jejich vlastnosti [25]	27
Tabulka 2. Kinetika intermetalických sloučenin pro slitiny SAC – rešeršní přehled	28
Tabulka 3. Vybrané nízko-teplotní slitiny na bázi Sn-Bi a Sn-In a jejich vlastnosti [25], [44]–[48]	30
Tabulka 4. Kinetika intermetalických sloučenin pro slitiny Sn-Bi – rešeršní přehled	31
Tabulka 5. Rozdělení tavidel podle normy MIL-F-14256F [68]	35
Tabulka 6. Rozdělení tavidel podle normy IPC-J-STD-004B [69]	35
Tabulka 7. Rozdělení tavidel podle normy ISO 9454-1:2016 [71]	36
Tabulka 8. Koeficient teplotní roztažnosti pro materiály využívané v povrchové montáži	58
Tabulka 9. Pájecí pasty použité v experimentu 1	73
Tabulka 10. Značení vzorků v experimentu 1	73
Tabulka 11. Výsledky měření drsnosti povrchu nepájevých masek v experimentu 1	75
Tabulka 12. Průměrné hodnoty plochy roztečení tavidla okolo pájecí plošky, počtu tavidlových zbytků, velikosti jednoho tavidlového zbytku a celkové kontaminované plochy DPS v experimentu 1	80
Tabulka 13. Značení vzorků v experimentu 2	83
Tabulka 14. Informace o pájecích pastách použitých v experimentu 2	85
Tabulka 15. Měření rozměrů pájecích plošek a rozhraní mezi ploškou a nepájevou maskou v experimentu 2	91
Tabulka 16. Výsledky měření drsnosti nepájevých masek v experimentu 2	93
Tabulka 17. Průměrné hodnoty plochy roztečení tavidla okolo pájecí plošky, počtu tavidlových zbytků, velikosti jednoho tavidlového zbytku a celkové kontaminované plochy na vyhodnocovacím sklíčku v experimentu 2	98
Tabulka 18. Informace o pájecí pastě použité v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin	103
Tabulka 19. Teplotní profily použité v experimentu na kinetiku intermetalických sloučenin – teploty přehřevu a vypočtený Heating Faktor	105
Tabulka 20. Vypočtené difúzní koeficienty pro spoje pájené teplotními profily A-D namáhané vlhkým teplem	109
Tabulka 21. Parametry prokladové mocninné funkce pro růst intermetalických vrstev během teplotně-vlhkostní degradace pro teplotní profily A-D	110
Tabulka 22. Vyhodnocení místa odtrhu při stříhové zkoušce pájených spojů během teplotně-vlhkostního namáhání	113
Tabulka 23. Vypočtené difúzní koeficienty pro spoje pájené teplotními profily A-D namáhané teplotními šoky	114
Tabulka 24. Vyhodnocení místa odtrhu při stříhové zkoušce pájených spojů během namáhání teplotními šoky	118

## SEZNAM ZKRATEK

- **AOI** – automatic optical inspection (automatická optická kontrola)
- **BGA** – ball grid array (typ pouzdra součástky s kuličkovými vývody na spodní straně)
- **μBGA** – micro ball grid array (typ pouzdra součástky s kuličkovými vývody na spodní straně – menší než BGA)
- **CFC** – chlorofluorocarbons (chlor-fluorované uhlovodíky)
- **CTE** – coefficient of thermal expansion (koeficient teplotní roztažnosti)
- **DPS** – deska plošných spojů
- **EDS** – energy dispersive spectroscopy (energieově disperzní spektroskopie)
- **ENEPIG** – electroless nickel-electroless palladium-immersion gold (chemická povrchová úprava desky plošných spojů založená na niklu, paladiu a zlatě)
- **ENIG** – electroless nickel-immersion gold (chemická 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** – gass chromatography-mass spektrometry (plynová chromatografie s hmotnostním spektrometrem)
- **HASL** – hot air solder leveling (povrchová úprava desky plošných spojů ponorem do cínové lázně)
- **IMC** – intermetallic compounds (intermetalické sloučeniny)
- **IML** – intermetallic layer (intermetalická vrstva)
- **LCP** – liquid crystal polymer
- **MTTF** – mean time to failure (střední čas do poruchy)
- **OSP** – organic solder preservative (organická povrchová úprava desky plošných spojů)
- **PCB** – printed circuit board (deska plošných spojů)
- **PoP** – pouzdro typu package on package
- **QFN** – quad flat no-lead (typ pouzdra pro povrchovou montáž s vývody ze čtyř stran)
- **RMA** – rosin mildly activated (označení pro středně aktivované pryskyřicové tavidlo)
- **RSS** – typ teplotního profilu ramp-soak-spike
- **RTS** – typ teplotního profilu ramp-to-spike
- **SAC** – pájecí slitina založená na cínu, stříbru a mědi
- **SEM** – scanning electron microscope (skenovací elektronový mikroskop)
- **SMD** – surface mount device (součástka v pouzdru pro povrchovou montáž)
- **SMT** – surface mount technology (technologie povrchové montáže)
- **TAL** – time above liquidus (čas setrvání slitiny v roztaveném stavu během pájení)
- **THT** – through hole technology (technologie montáže skrz díru)
- **VOC** – volatile organic compounds (těkavé organické látky)
- **VPS** – vapor phase soldering (pájení v parách)
- **WOA** – weak organic acid (slabá organická kyselina)

## REFERENCE

- [1] A. Pietriková, J. Ďurišin, a P. Mach, *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010.
- [2] G. Humpston a D. M. Jacobson, *Principles of Soldering*. ASM International, 2004.
- [3] R. Strauss, *SMT Soldering Handbook*, 2nd edition. Oxford ; Boston: Newnes, 1998.
- [4] A. I. Timofeev, „To the theory of wetting“, *Russ. J. Inorg. Chem.*, roč. 58, č. 7, s. 813–816, čvc. 2013, doi: 10.1134/S0036023613070231.
- [5] M. M. Schwartz, *Brazing*, 2nd edition. Materials Park, Ohio: ASM International, 2003.
- [6] J. Urbanek a K. Dusek, „Measurements of the solders surface tension values“, in *EuroSime 2006 - 7th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems*, dub. 2006, s. 1–4. doi: 10.1109/ESIME.2006.1643983.
- [7] C. Gonçalves *et al.*, „Wetting behaviour of SAC305 solder on different substrates in high vacuum and inert atmosphere“, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, roč. 26, č. 7, s. 5106–5112, čvc. 2015, doi: 10.1007/s10854-015-3037-9.
- [8] R. N. Wenzel, „RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER“, *Ind. Eng. Chem.*, roč. 28, č. 8, s. 988–994, srp. 1936, doi: 10.1021/ie50320a024.
- [9] G. Whyman, E. Bormashenko, a T. Stein, „The rigorous derivation of Young, Cassie–Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon“, *Chem. Phys. Lett.*, roč. 450, č. 4, s. 355–359, led. 2008, doi: 10.1016/j.cplett.2007.11.033.
- [10] K. J. Kubiak, M. C. T. Wilson, T. G. Mathia, a Ph. Carval, „Wettability versus roughness of engineering surfaces“, *Wear*, roč. 271, č. 3, s. 523–528, čer. 2011, doi: 10.1016/j.wear.2010.03.029.
- [11] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa, a H. H. Soliman, „Roughness parameters“, *J. Mater. Process. Technol.*, roč. 123, č. 1, s. 133–145, dub. 2002, doi: 10.1016/S0924-0136(02)00060-2.
- [12] G. Leonida, *Handbook of printed circuit design, manufacture, components & assembly*, Reprint. Ayr: Electrochemical Publ, 1989.
- [13] R. J. Fields, S. R. Low, a G. K. Lucey, „Physical And Mechanical Properties Of Intermetallic Compounds Commonly Found In Solder Joints“, *Material Measurement Laboratory*, 1991. [https://www.metallurgy.nist.gov/mechanical\\_properties/solder\\_paper.html](https://www.metallurgy.nist.gov/mechanical_properties/solder_paper.html) (viděno úno. 26, 2021).
- [14] R. R. Chromik, R. P. Vinci, S. L. Allen, a M. R. Notis, „Measuring the mechanical properties of Pb-free solder and Sn-based intermetallics by nanoindentation“, *JOM*, roč. 55, č. 6, s. 66–69, čer. 2003, doi: 10.1007/s11837-003-0144-5.
- [15] R. R. Chromik, D. N. Wang, A. Shugar, L. Limata, M. R. Notis, a R. P. Vinci, „Mechanical properties of intermetallic compounds in the Au–Sn system“, *J. Mater. Res.*, roč. 20, č. 8, s. 2161–2172, srp. 2005, doi: 10.1557/JMR.2005.0269.
- [16] P. K. Bernasko, S. Mallik, a G. Takyi, „Effect of intermetallic compound layer thickness on the shear strength of 1206 chip resistor solder joint“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 27, č. 1, s. 52–58, 2015, doi: 10.1108/SSMT-07-2013-0019.
- [17] G. Zeng, S. Xue, L. Zhang, L. Gao, W. Dai, a J. Luo, „A review on the interfacial intermetallic compounds between Sn–Ag–Cu based solders and substrates“, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, roč. 21, č. 5, s. 421–440, kvě. 2010, doi: 10.1007/s10854-010-0086-y.
- [18] A. Leineweber, C. Wieser, a W. Hügel, „Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> intermetallic: Reconciling composition and crystal structure“, *Scr. Mater.*, roč. 183, s. 66–70, čvc. 2020, doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.020.
- [19] Collaboration: Authors and Editors of the LB Volumes III/17A-22A-41A1b, „Grey tin (alpha-Sn), crystal structure, lattice parameter (pure Sn, Sn-IV alloys), thermal expansion“, in *Group IV Elements, IV-IV and III-V Compounds. Part b - Electronic, Transport, Optical and Other Properties*, roč. b, O. Madelung, U. Rössler, a M. Schulz, Ed. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2002, s. 1–6. doi: 10.1007/10832182\_543.
- [20] X. Hu, Y. Li, Y. Liu, Y. Liu, a Z. Min, „Microstructure and shear strength of Sn37Pb/Cu solder joints subjected to isothermal aging“, *Microelectron. Reliab.*, roč. 54, č. 8, s. 1575–1582, srp. 2014, doi: 10.1016/j.microrel.2014.04.003.
- [21] S. Chada, W. Laub, R. A. Fournelle, a D. Shanguan, „An improved numerical method for predicting intermetallic layer thickness developed during the formation of solder joints on Cu substrates“, *J. Electron. Mater.*, roč. 28, č. 11, s. 1194–1202, lis. 1999, doi: 10.1007/s11664-999-0157-0.
- [22] J.-W. Yoon, C.-Y. Lee, C.-B. Lee, C.-S. Yoo, a S.-B. Jung, „Investigation of interfacial reactions between Sn–Ag–Bi–in solder and (Cu, electroless Ni–P/Cu) substrate“, *Z. Für Met.*, roč. 94, č. 4, s. 453–457, 2003.

- [23] „Fundamental Physical Constants from NIST”. <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html> (viděno dub. 25, 2021).
- [24] K. Sukanuma, „Advances in lead-free electronics soldering”, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, roč. 5, č. 1, s. 55–64, led. 2001, doi: 10.1016/S1359-0286(00)00036-X.
- [25] T.-K. Lee, *Fundamentals of lead-free solder interconnect technology: from microstructures to reliability*. New York: Springer, 2014.
- [26] N.-C. Lee, *Lead-free soldering-where the world is going*. Citeseer, 2000.
- [27] K. Nimmo, „Alloy Selections”, in *Lead-Free Soldering in Electronics—Science, Technology and Environmental Impact*, CRC Press, 2004, s. 49–90.
- [28] S. Ganesan a M. G. Pecht, Ed., *Lead-free Electronics*, 1st edition. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2006.
- [29] K. J. Puttlitz a K. A. Stalter, *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. CRC Press, 2004.
- [30] K. N. Tu a K. Zeng, „Tin–lead (SnPb) solder reaction in flip chip technology”, *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, roč. 34, č. 1, s. 1–58, čvc. 2001, doi: 10.1016/S0927-796X(01)00029-8.
- [31] F.-J. Wang, F. Gao, X. Ma, a Y.-Y. Qian, „Depressing effect of 0.2wt.%Zn addition into Sn-3.0Ag-0.5Cu solder alloy on the intermetallic growth with Cu substrate during isothermal aging”, *J. Electron. Mater.*, roč. 35, č. 10, s. 1818–1824, říj. 2006, doi: 10.1007/s11664-006-0163-4.
- [32] Y. M. Kim, H.-R. Roh, S. Kim, a Y.-H. Kim, „Kinetics of Intermetallic Compound Formation at the Interface Between Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder and Cu-Zn Alloy Substrates”, *J. Electron. Mater.*, roč. 39, č. 12, s. 2504–2512, pro. 2010, doi: 10.1007/s11664-010-1379-x.
- [33] Y. Huang *et al.*, „Improving shear strength of Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu joints and suppressing intermetallic compounds layer growth by adding graphene nanosheets”, *Mater. Lett.*, roč. 169, s. 262–264, dub. 2016, doi: 10.1016/j.matlet.2016.01.125.
- [34] J.-W. Yoon, B.-I. Noh, B.-K. Kim, C.-C. Shur, a S.-B. Jung, „Wettability and interfacial reactions of Sn–Ag–Cu/Cu and Sn–Ag–Ni/Cu solder joints”, *J. Alloys Compd.*, roč. 486, č. 1, s. 142–147, lis. 2009, doi: 10.1016/j.jallcom.2009.06.159.
- [35] L. Zhang, S. B. Xue, G. Zeng, L. L. Gao, a H. Ye, „Interface reaction between SnAgCu/SnAgCuCe solders and Cu substrate subjected to thermal cycling and isothermal aging”, *J. Alloys Compd.*, roč. 510, č. 1, s. 38–45, led. 2012, doi: 10.1016/j.jallcom.2011.08.044.
- [36] T. Y. Lee *et al.*, „Morphology, kinetics, and thermodynamics of solid-state aging of eutectic SnPb and Pb-free solders (Sn-3.5Ag, Sn-3.8Ag-0.7Cu and Sn-0.7Cu) on Cu”, *J. Mater. Res.*, roč. 17, č. 2, s. 291–301, 2002, doi: 10.1557/JMR.2002.0042.
- [37] L. Zhang, X. Fan, C. He, a Y. Guo, „Intermetallic compound layer growth between SnAgCu solder and Cu substrate in electronic packaging”, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, roč. 24, č. 9, s. 3249–3254, zář. 2013, doi: 10.1007/s10854-013-1236-9.
- [38] N. Mookam a K. Kanlayasiri, „Evolution of Intermetallic Compounds between Sn-0.3Ag-0.7Cu Low-silver Lead-free Solder and Cu Substrate during Thermal Aging”, *J. Mater. Sci. Technol.*, roč. 28, č. 1, s. 53–59, led. 2012, doi: 10.1016/S1005-0302(12)60023-1.
- [39] O. Krammer a T. Garami, „Reliability investigation of low silver content micro-alloyed SAC solders”, in *2012 35th International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2012, s. 149–154. doi: 10.1109/ISSE.2012.6273126.
- [40] O. Krammer, T. Garami, B. Horváth, T. Hurtony, B. Medgyes, a L. Jakab, „Investigating the thermomechanical properties and intermetallic layer formation of Bi micro-alloyed low-Ag content solders”, *J. Alloys Compd.*, roč. 634, s. 156–162, čer. 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.02.092.
- [41] O. Krammer, T. Hurtony, a Á. Hadarits, „Investigating the activation energy of intermetallic layer growth in SAC305 and Innolot alloys”, in *2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, říj. 2017, s. 73–77. doi: 10.1109/SIITME.2017.8259860.
- [42] Y. Fukuda a S. Ganesan, „Lead-free Alloys: Overview”, in *Lead-free Electronics*, John Wiley & Sons, Ltd, 2006, s. 81–100. doi: 10.1002/047000780X.ch3.
- [43] Y. Liu a K. N. Tu, „Low melting point solders based on Sn, Bi, and In elements”, *Mater. Today Adv.*, roč. 8, s. 100115, pro. 2020, doi: 10.1016/j.mtadv.2020.100115.
- [44] Z. Mei, H. A. Holder, a H. A. Vander Plas, „Low-temperature solders”, *Hewlett Packard J.*, roč. 47, s. 91–98, 1996.
- [45] T. Siewert, S. Liu, D. R. Smith, a J. C. Madeni, „Properties of lead-free solders”, *Database Solder Prop. Emphas. New Lead-Free Solders Release*, roč. 4, 2002.
- [46] S. Amares, M. N. Ervina Efan, a T. C. Yap, „Characterizations of Physical Properties of Sn-Bi Solder Alloy”, *Adv. Mater. Res.*, roč. 845, s. 261–265, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.845.261.
- [47] M. Ribas *et al.*, „Low temperature soldering using Sn-Bi alloys”, 2017.

- [48] J. Glazer, „Microstructure and mechanical properties of Pb-free solder alloys for low-cost electronic assembly: a review“, *J. Electron. Mater.*, roč. 23, č. 8, s. 693–700, 1994.
- [49] Z. Mei, F. Hua, a J. Glazer, „Thermal reliability of 58 Bi-42 Sn solder joints on Pb-containing surfaces“, *Des. Reliab. Solders Solder Interconnect.*, s. 229–239, 1997.
- [50] M. McCormack, H. S. Chen, G. W. Kammlott, a S. Jin, „Significantly Improved Mechanical Properties of Bi- Sn Solder Alloys by Ag- Doping“, *J. Electron. Mater.*, roč. 26, č. 8, s. 954–958, srp. 1997, doi: 10.1007/s11664-997-0281-7.
- [51] S. Sahasrabudhe *et al.*, „Low Temperature Solder - A Breakthrough Technology for Surface Mounted Devices“, in *2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, kvě. 2018, s. 1455–1464. doi: 10.1109/ECTC.2018.00222.
- [52] P. T. Vianco, A. C. Kilgo, a R. Grant, „Intermetallic compound layer growth by solid state reactions between 58Bi-42Sn solder and copper“, *J. Electron. Mater.*, roč. 24, č. 10, s. 1493–1505, říj. 1995, doi: 10.1007/BF02655468.
- [53] J.-W. Yoon, C.-B. Lee, a S.-B. Jung, „Interfacial Reactions Between Sn-58 mass%Bi Eutectic Solder and (Cu, Electroless Ni-P/Cu) Substrate“, *Mater. Trans.*, roč. 43, č. 8, s. 1821–1826, 2002, doi: 10.2320/matertrans.43.1821.
- [54] C. Chen, C. E. Ho, A. H. Lin, G. L. Luo, a C. R. Kao, „Long-term aging study on the solid-state reaction between 58Bi42Sn solder and Ni substrate“, *J. Electron. Mater.*, roč. 29, č. 10, s. 1200–1206, říj. 2000, doi: 10.1007/s11664-000-0013-8.
- [55] J.-C. Liu, G. Zhang, Z.-H. Wang, J.-S. Ma, a K. Sukanuma, „Thermal property, wettability and interfacial characterization of novel Sn–Zn–Bi–In alloys as low-temperature lead-free solders“, *Mater. Des.*, roč. 84, s. 331–339, lis. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.148.
- [56] K. Sukanuma, S.-J. Kim, a K.-S. Kim, „High-temperature lead-free solders: Properties and possibilities“, *JOM J. Miner. Met. Mater. Soc.*, roč. 61, č. 1, s. 64, 2009.
- [57] D. Grivas, D. Frear, L. Quan, a J. W. Morris, „The formation of Cu<sub>3</sub>Sn intermetallic on the reaction of cu with 95Pb-5Sn solder“, *J. Electron. Mater.*, roč. 15, č. 6, s. 355–359, lis. 1986, doi: 10.1007/BF02661885.
- [58] C. C. Chang, H. Y. Chung, Y. S. Lai, a C. R. Kao, „Interaction Between Ni and Cu Across 95Pb-5Sn High-Lead Layer“, *J. Electron. Mater.*, roč. 39, č. 12, s. 2662–2668, pro. 2010, doi: 10.1007/s11664-010-1272-7.
- [59] fct solder, „Solder Paste: Type 3 vs. Type 4 vs. Type 5“, *Solder Paste, Solder Flux - FCT Solder*, led. 10, 2018. <https://fct solder.com/solder-paste-type-3-vs-type-4-vs-type-5/> (viděno čer. 08, 2021).
- [60] „Solder Paste Types and Powder Sizes for SMT and Dispensing“, *Production Automation Station*, bř. 13, 2020. <https://blog.gotopac.com/2020/03/13/solder-paste-types-powder-sizes-for-smt-dispensing/> (viděno čer. 08, 2021).
- [61] B. Bauer a R. Lathrop, *An Introduction to Solder Materials*. Online][Citace: 26. 01 2017.] [http://www.smtnet.com/library/files/upload ...](http://www.smtnet.com/library/files/upload...), 2003.
- [62] D. Lu a C. P. Wong, *Materials for advanced packaging*, roč. 181. Springer, 2009.
- [63] M. Nasta a H. C. Peebles, „A model of the solder flux reaction; reactions at the metal/metal oxide/electrolyte solution interface“, *Circuit World*, 1995.
- [64] E. Efzan a A. Marini, „A review of solder evolution in electronic application“, *Int. J. Eng.*, roč. 1, č. 1, s. 2305–8269, 2012.
- [65] V. Verdingovas, M. S. Jellesen, R. Rizzo, H. Conseil, a R. Ambat, „Impact of hygroscopicity and composition of solder flux residue on the reliability of PCBA under corrosive conditions“, 2013.
- [66] P. Mach, V. Skočil, a J. Urbánek, *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*, Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [67] „Solder Flux Market Size and Share | Industry Analysis - 2026“, *Global Market Insights, Inc.*, kvě. 2020. <https://www.gminsights.com/industry-analysis/solder-flux-market> (viděno čer. 18, 2021).
- [68] „MIL F 14256:F – Flux, Soldering, Liquid, Paste Flux, Solder Paste and Solder-Paste Flux, (for Electronic/Electrical Use), General Specification for (Superseded by J-STD-004, J-STD-005 and J-STD-006)“, US Military Specs/Standards/Handbooks, USA, dub. 1993.
- [69] „IPC J-STD-004B with Amendment 1 – Requirements for Soldering Fluxes“, IPC, USA, 2011.
- [70] „ČSN EN 61190-1-1 – Připojovací materiály pro elektronickou montáž - Část 1-2: Požadavky na pájecí pasty pro vysoce kvalitní propojování v elektronické montáži“, Český normalizační institut, Praha, Česká republika, 2003.
- [71] „ISO 9454-1:2016 – Soft soldering fluxes — Classification and requirements — Part 1: Classification, labelling and packaging“, International Organization for Standardization, Ženeva, Švýcarsko, 2016.
- [72] U. N. Environment, „About Montreal Protocol“, *Ozonaction*, říj. 29, 2018. <http://www.unep.org/ozonaction/who-we-are/about-montreal-protocol> (viděno čer. 18, 2021).
- [73] M. L. Minges, *Electronic Materials Handbook: Packaging, Volume I*. 1989.

- [74] S. Wakeel, A. S. M. A. Haseeb, M. A. Afifi, S. Bingol, a K. L. Hoon, „Constituents and performance of no-clean flux for electronic solder“, *Microelectron. Reliab.*, roč. 123, s. 114177, srp. 2021, doi: 10.1016/j.microrel.2021.114177.
- [75] V. Verdingovas, M. S. Jellesen, a R. Ambat, „Solder Flux Residues and Humidity-Related Failures in Electronics: Relative Effects of Weak Organic Acids Used in No-Clean Flux Systems“, *J. Electron. Mater.*, roč. 44, č. 4, s. 1116–1127, dub. 2015, doi: 10.1007/s11664-014-3609-0.
- [76] H. Conseil, V. Verdingovas, M. S. Jellesen, a R. Ambat, „Decomposition of no-clean solder flux systems and their effects on the corrosion reliability of electronics“, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, roč. 27, č. 1, s. 23–32, 2016.
- [77] S. Zhan, M. H. Azarian, a M. G. Pecht, „Surface Insulation Resistance of Conformally Coated Printed Circuit Boards Processed With No-Clean Flux“, *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.*, roč. 29, č. 3, s. 217–223, čvc. 2006, doi: 10.1109/TEPM.2006.882496.
- [78] S. Zhan, M. H. Azarian, a M. Pecht, „Reliability of printed circuit boards processed using no-clean flux technology in temperature–humidity–bias conditions“, *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, roč. 8, č. 2, s. 426–434, 2008.
- [79] U. Rathinavelu, M. S. Jellesen, P. Moller, a R. Ambat, „Effect of No-Clean Flux Residues on the Performance of Acrylic Conformal Coating in Aggressive Environments“, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, roč. 2, č. 4, s. 719–728, dub. 2012, doi: 10.1109/TCPMT.2012.2186456.
- [80] C. Coombs a H. Holden, *Printed Circuits Handbook*, 6 edition. New York: McGraw-Hill Education, 2007.
- [81] G. Brist a G. Long, „Advanced Print Circuit Board Materials“, in *Materials for Advanced Packaging*, D. Lu a C. P. Wong, Ed. Boston, MA: Springer US, 2009, s. 273–306. doi: 10.1007/978-0-387-78219-5\_8.
- [82] B. Sood a M. Pecht, „Printed Circuit Board Laminates“, in *Wiley Encyclopedia of Composites*, American Cancer Society, 2011, s. 1–11. doi: 10.1002/9781118097298.weoc197.
- [83] A. Rudajevová a K. Dušek, „Influence of Manufacturing Mechanical and Thermal Histories on Dimensional Stabilities of FR4 Laminate and FR4/Cu-Plated Holes“, *Materials*, roč. 11, č. 11, Art. č. 11, lis. 2018, doi: 10.3390/ma11112114.
- [84] G. Koziol, A. Arazna, W. Steplewski, K. Janeczek, a J. Bielinski, „Investigation of Tin Whisker Formation“.
- [85] D. Chang, F. Bai, Y. P. Wang, a 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)*, pro. 2004, s. 149–153. doi: 10.1109/EPTC.2004.1396594.
- [86] „Technologie > Pájení bez olova > OSP | PRINTED s.r.o.“ <https://www.printed.cz/rs/osp-947> (viděno čvc. 22, 2021).
- [87] C. K. Meng, T. S. Selvamuniandy, a C. Gurumurthy, „Discoloration related failure mechanism and its root cause in electroless nickel immersion gold (ENIG) pad metallurgical surface finish“, in *Proceedings of the 11th International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits. IPFA 2004 (IEEE Cat. No.04TH8743)*, čvc. 2004, s. 229–233. doi: 10.1109/IPFA.2004.1345605.
- [88] G. Milad, „Surface finishes in a lead-free world“, *Circuit World*, roč. 34, č. 4, s. 4–7, led. 2008, doi: 10.1108/03056120810918051.
- [89] M. Ratzker, A. Pearl, M. Osterman, M. Pecht, a G. Milad, „Review of Capabilities of the ENEPIG Surface Finish“, *J. Electron. Mater.*, roč. 43, č. 11, s. 3885–3897, lis. 2014, doi: 10.1007/s11664-014-3322-z.
- [90] A. Kumar a Z. Chen, „Interdependent Intermetallic Compound Growth in an Electroless Ni-P/Sn-3.5Ag Reaction Couple“, *J. Electron. Mater.*, roč. 40, č. 2, s. 213–223, úno. 2011, doi: 10.1007/s11664-010-1447-2.
- [91] M. Arra, D. Shanguan, D. Xie, J. Sundelin, T. Lepistö, a E. Ristolainen, „Study of immersion silver and tin printed-circuit-board surface finishes in lead-free solder applications“, *J. Electron. Mater.*, roč. 33, č. 9, s. 977–990, zář. 2004, doi: 10.1007/s11664-004-0025-x.
- [92] Y. Zhou, P. Yang, C. Yuan, a Y. Huo, „Electrochemical Migration Failure of the Copper Trace on Printed Circuit Board Driven by Immersion Silver Finish“, *Chem. Eng. Trans.*, roč. 33, s. 559–564, čvc. 2013, doi: 10.3303/CET1333094.
- [93] X. He, M. H. Azarian, a M. G. Pecht, „Effects of solder mask on electrochemical migration of tin-lead and lead-free boards“, *IPC Print. Circuit Expo APEX Des. Summit Proc.*, 2010.
- [94] „Technologie > Linka nepájivé masky | PRINTED s.r.o.“ <http://www.printed.cz/article/linka-nepajive-masky-549> (viděno čer. 29, 2021).
- [95] P. Johnston, „Printed Circuit Board Design Guidelines for Ball Grid Array Packages“, *J. Surf. Mt. Technol.*, roč. 9, s. 12–18, 1996.
- [96] T.-N. Tsai, „Modeling and optimization of stencil printing operations: A comparison study“, *Comput. Ind. Eng.*, roč. 54, č. 3, s. 374–389, 2008.

- [97] M. Hirman a F. Steiner, „Optimization of solder paste quantity considering the properties of solder joints”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 29, č. 1, s. 15–22, úno. 2017, doi: 10.1108/SSMT-10-2016-0025.
- [98] S. S. Sriperumbudur, M. Meilunas, a M. Anselm, „Solder paste volume effects on assembly yield and reliability for bottom terminated components”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 2017.
- [99] J. Pan, G. L. Tonkay, R. H. Storer, R. M. Sallade, a D. J. Leandri, „Critical variables of solder paste stencil printing for micro-BGA and fine-pitch QFP”, *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.*, roč. 27, č. 2, s. 125–132, dub. 2004, doi: 10.1109/TEPM.2004.837965.
- [100] O. Krammer, L. Jakab, B. Illes, D. Bušek, a I. B. Pelikánová, „Investigating the attack angle of squeegees with different geometries”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 2018.
- [101] C. Huang, Y. Lin, K. Ying, a C. Ku, „The solder paste printing process: critical parameters, defect scenarios, specifications, and cost reduction”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 23, č. 4, s. 211–223, led. 2011, doi: 10.1108/09540911111169057.
- [102] J. F. Bard, R. W. Clayton, a T. A. Feo, „Machine setup and component placement in printed circuit board assembly”, *Int. J. Flex. Manuf. Syst.*, roč. 6, č. 1, s. 5–31, led. 1994, doi: 10.1007/BF01324873.
- [103] R. De Souza a W. Lijun, „Intelligent optimization of component onsertion in multi-head concurrent operation PCBA machines”, *J. Intell. Manuf.*, roč. 6, č. 4, s. 235–243, 1995.
- [104] S. Chen a Y. Shen, „An integrated mathematical model for optimizing the component placement process with a multi-heads placement machine”, in *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, čvc. 2010, s. 1839–1842.
- [105] B. Illés, O. Krammer, a A. Geczy, *Reflow Soldering: Apparatus and Heat Transfer Processes*, 1st edition. Elsevier, 2020.
- [106] N. T. Jaya, S. R. A. Idris, a M. Ishak, „A Review on Mechanical Properties of SnAgCu/Cu Joint Using Laser Soldering”, in *The Advances in Joining Technology*, Singapore, 2019, s. 97–107. doi: 10.1007/978-981-10-9041-7\_8.
- [107] „Inert Gas Blanketing in Solder Reflow Ovens”, *Cambridge Sensotec*, lis. 24, 2015. <https://www.cambridge-sensotec.co.uk/blog/2015/11/24/inert-gas-blanketing-solder-reflow-ovens/> (viděno kvě. 28, 2019).
- [108] S. M. Yeo, A. Mahmood, a S. H. Ishak, „Vacuum Reflow Process Characterization for Void-Less Soldering Process in Semiconductor Package”, in *2018 IEEE 38th International Electronics Manufacturing Technology Conference (IEMT)*, zář. 2018, s. 1–7. doi: 10.1109/IEMT.2018.8511767.
- [109] B. Illés, A. Geczy, B. Medgyes, a G. Harsányi, „Vapour phase soldering (VPS) technology: a review”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, pro. 2018, doi: 10.1108/SSMT-10-2018-0042.
- [110] A. Pietrikova, L. Livovsky, J. Urbancik, a R. Bucko, „Optimisation of Lead Free Solders Reflow Profile”, in *2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2006, s. 459–464. doi: 10.1109/ISSE.2006.365149.
- [111] M. Pecht, *Soldering Processes and Equipment*. John Wiley & Sons, 1993.
- [112] N. Lee, „Optimizing the reflow profile via defect mechanism analysis”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 11, č. 1, s. 13–20, led. 1999, doi: 10.1108/09540919910254642.
- [113] B. Salam, C. Virseda, H. Da, N. N. Ekere, a R. Durairaj, „Reflow profile study of the Sn-Ag-Cu solder”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 16, č. 1, s. 27–34, led. 2004, doi: 10.1108/09540910410517022.
- [114] N.-C. Lee, „4 - Surface Mount Assembly Processes”, in *Reflow Soldering Processes*, N.-C. Lee, Ed. Burlington: Newnes, 2001, s. 57–89. doi: 10.1016/B978-075067218-4/50004-X.
- [115] J. Gao, Y. Wu, a H. Ding, „Optimization of a reflow soldering process based on the heating factor”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 19, č. 1, s. 28–33, úno. 2007, doi: 10.1108/09540910710748131.
- [116] J. Gang Gao, Y. Ping Wu, H. Ding, a N. Hong Wan, „Thermal profiling: a reflow process based on the heating factor”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 20, č. 4, s. 20–27, zář. 2008, doi: 10.1108/09540910810902679.
- [117] H. R. Ma, Y. P. Wang, J. Chen, H. T. Ma, a N. Zhao, „The effect of reflow temperature on IMC growth in Sn/Cu and Sn0.7Cu/Cu solder bumps during multiple reflows”, in *2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, srp. 2017, s. 1402–1405. doi: 10.1109/ICEPT.2017.8046697.
- [118] J. Pan, B. J. Toleno, T. Chou, a W. J. Dee, „The effect of reflow profile on SnPb and SnAgCu solder joint shear strength”, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 18, č. 4, s. 48–56, led. 2006, doi: 10.1108/09540910610717901.
- [119] B. Tao, Y. Wu, H. Ding, a Y. L. Xiong, „A quantitative method of reliability estimation for surface mount solder joints based on heating factor  $Q\eta$ ”, *Microelectron. Reliab.*, roč. 46, č. 5–6, s. 864–872, kvě. 2006, doi: 10.1016/j.microrel.2005.04.013.
- [120] Tao Bo, Yin Zhouping, Ding Han, a Wu Yiping, „Mechanical reliability estimation for  $\mu$ BGA solder joints based on heating factor  $Q$ ”, čvc. 2008, s. 1–4. doi: 10.1109/ICEPT.2008.4607120.

- [121] V. Wirth, K. Rendl, a F. Steiner, „Effect of Multiple Reflow Cycles on Intermetallic Compound Creation“, kvě. 2015. doi: 10.1109/ISSE.2015.7247995.
- [122] M. Arra, D. Shangguan, E. Ristolainen, a T. Lepistö, „Effect of reflow profile on wetting and intermetallic formation between Sn/Ag/Cu solder components and printed circuit boards“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 14, č. 2, s. 18–25, led. 2002, doi: 10.1108/09540910210427781.
- [123] J. Pan, T. Chou, J. Bath, D. Willie, a B. J. Toleno, „Effects of reflow profile and thermal conditioning on intermetallic compound thickness for SnAgCu soldered joints“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 21, č. 4, s. 32–37, led. 2009, doi: 10.1108/09540910910989411.
- [124] M. Hirman, K. Rendl, F. Steiner, a V. Wirth, „Influence of reflow soldering profiles on creation of IMC at the interface of SnBi/Cu“, in *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2014, s. 147–151. doi: 10.1109/ISSE.2014.6887582.
- [125] F. Steiner, V. Wirth, a M. Hirman, „Relationship of Soldering Profile, Voids Formation and Strength of Soldered Joints“, in *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2019, s. 1–6. doi: 10.1109/ISSE.2019.8810303.
- [126] P. Veselý, K. Dušek, a A. Staňková, „Evaluation of Bismuth/Tin Solder Intermetallic Layers Based on Heating Factor“, in *2019 42nd International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2019, s. 1–6. doi: 10.1109/ISSE.2019.8810306.
- [127] L. Liliana, „A new model of Ishikawa diagram for quality assessment“, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, roč. 161, s. 012099, lis. 2016, doi: 10.1088/1757-899X/161/1/012099.
- [128] M. Klauz, „Elektrický test osazených desek metodou Flying Probe“, *DPS - Elektronika od A do Z*, bř. 2016. <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:26117/elektricky-test-osazenych-desek-metodou-flying-probe> (viděno kvě. 24, 2019).
- [129] J. H. Lau a N.-C. Lee, *Assembly and Reliability of Lead-Free Solder Joints*. Springer Singapore, 2020. doi: 10.1007/978-981-15-3920-6.
- [130] „JEITA ET-7409/103 – Surface mount technology - Environmental and endurance test methods for solder joint of surface mount device Part 103: Torque shear strength test“, Japan Electronics and Information Technology Industries Association, Tokio, Japonsko, 2008.
- [131] „Why perform cross-sectional evaluation of circuit boards (PCB)?“, *Element*. <https://www.element.com/nucleus/2016/cross-sectional-circuit-board-analysis> (viděno srp. 04, 2021).
- [132] P. E. J. Flewitt a R. K. Wild, *Physical Methods for Materials Characterisation*, 3rd edition. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017.
- [133] J. R. Ellis a G. Y. Masada, „Dynamic behavior of SMT chip capacitors during solder reflow“, *IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol.*, roč. 13, č. 3, s. 545–552, 1990.
- [134] Ip Kee Huit a B. Ralph, „A study of the initiation of the tombstoning effect on leadless chips“, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, roč. 35, č. 9, s. 1251–1268, zář. 1995, doi: 10.1016/0890-6955(94)00110-6.
- [135] X. Wu, X. Dou, C.-P. Yeh, a K. Waytt, „Solder Joint Formation Simulation and Component Tombstoning Prediction During Reflow“, *J. Electron. Packag.*, roč. 120, č. 2, s. 141–144, čer. 1998, doi: 10.1115/1.2792601.
- [136] A. Takaki, R. Kato, T. Taguchi, a R. H. Suzuki, „Protection of tombstone problems for small chip devices“, in *1999 Proceedings. 49th Electronic Components and Technology Conference (Cat. No. 99CH36299)*, čer. 1999, s. 1036–1041. doi: 10.1109/ECTC.1999.776314.
- [137] K. Dušek, D. Bušek, a P. Veselý, *Overview of Selected Issues Related to Soldering*. IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.91023.
- [138] K. Dušek, D. Bušek, M. Plaček, A. Géczy, O. Krammer, a B. Illés, „Influence of vapor phase soldering fluid Galden on wetting forces (tombstone effect)“, *J. Mater. Process. Technol.*, roč. 251, s. 20–25, led. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.08.006.
- [139] K. Dušek, V. Straka, M. Brejcha, a I. Beshajová Pelikánová, „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*, kvě. 2013, s. 132–135. doi: 10.1109/ISSE.2013.6648229.
- [140] N. Raravikar, R. Panat, a S. Jadhav, „Tombstone Initiation Model for Small Form-Factor Surface Mount Passives“, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, roč. 2, č. 9, s. 1486–1491, zář. 2012, doi: 10.1109/TCPMT.2012.2204436.
- [141] P. Veselý, „Risk analýza pájení čipů“, Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Praha, 2015. Viděno: srp. 06, 2021. [Online]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61996>
- [142] Y. Bin, W. Xiaofeng, a Z. Yabing, „The Study of Thermally Induced Warpage of BGA Package during Reflow Soldering“, in *2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, srp. 2018, s. 1411–1414. doi: 10.1109/ICEPT.2018.8480530.
- [143] „Solder bridges on SMD/HMD components“. <https://www.technolab.de/en/solder-dictionary/smd-hmd/solder-bridges.php> (viděno srp. 06, 2021).



- [144] D. Bušek, K. Dušek, M. Plaček, J. Urbánek, J. Horník, a J. Holec, „Determination of BGA solder joint detachment cause - warpage effect”, in *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2015, s. 306–309. doi: 10.1109/ISSE.2015.7248011.
- [145] Y. Sawada, K. Harada, a H. Fujioka, „Study of package warp behavior for high-performance flip-chip BGA”, *Microelectron. Reliab.*, roč. 43, č. 3, s. 465–471, bř. 2003, doi: 10.1016/S0026-2714(02)00294-9.
- [146] W. K. Loh, R. Kulterman, H. Fu, a M. Tsuriya, „Recent trends of package warpage and measurement metrologies”, in *2016 International Conference on Electronics Packaging (ICEP)*, 2016, s. 89–93.
- [147] M. A. Korhonen, D. D. Brown, C.-Y. Li, a J. E. Steinwall, „Mechanical Properties of Plated Copper”, *MRS Online Proc. Libr. OPL*, roč. 323, ed 1993, doi: 10.1557/PROC-323-103.
- [148] G. Ventura a M. Perfetti, *Thermal properties of solids at room and cryogenic temperatures*. Springer, 2014.
- [149] M. Hasnine a M. J. Bozack, „Effects of Isothermal Aging on the Thermal Expansion of Several Sn-Based Lead-Free Solder Alloys”, *J. Mater. Eng. Perform.*, roč. 27, č. 3, s. 1274–1280, bř. 2018, doi: 10.1007/s11665-018-3235-8.
- [150] T. E. Wong a A. H. Matsunaga, „Ceramic ball grid array solder joint thermal fatigue life enhancement”, in *NEPCON WEST*, 2000, roč. 2, s. 1066–1080.
- [151] W. Zhang, D. Wu, B. Su, S. A. Hareb, Y. C. Lee, a B. P. Masterson, „The effect of underfill epoxy on warpage in flip-chip assemblies”, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. Part A*, roč. 21, č. 2, s. 323–329, čer. 1998, doi: 10.1109/95.705481.
- [152] J. Zhao, Y. Luo, Z. Huang, a R. Ma, „Effects of package design on top PoP package warpage”, in *2008 58th Electronic Components and Technology Conference*, kvě. 2008, s. 1082–1088. doi: 10.1109/ECTC.2008.4550109.
- [153] T. H. Wang, C.-I. Tsai, C.-C. Lee, a Y.-S. Lai, „Study of factors affecting warpage of HFCBGA subjected to reflow soldering-liked profile”, *Microelectron. Reliab.*, roč. 53, č. 2, s. 297–302, úno. 2013, doi: 10.1016/j.microrel.2012.08.006.
- [154] R. Pandher, R. Raut, M. Liberatore, N. Jodhan, a K. Tellefsen, „A Procedure To Determine Head-In-Pillow Defect And Analysis Of Contributing Factors”, *Proc. SMTAI*, roč. 10, č. 10, 2010.
- [155] D. Amir, R. Aspandiar, S. Buttars, W. W. Chin, a P. Gill, „Head-and-pillow SMT failure modes”, *Proc. SMTAI*, s. 409–421, 2009.
- [156] M. Scalzo, „Addressing the challenge of head-in-pillow defects in electronics assembly”, *Indium Corp. Tech. Libr.*, 2009.
- [157] Y. Liu, P. Fiacco, a N.-C. Lee, „Testing and prevention of head-in-pillow”, in *2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, čer. 2010, s. 451–455. doi: 10.1109/ECTC.2010.5490931.
- [158] Z. Zhao *et al.*, „Effects of Package Warpage on Head-in-Pillow Defect”, *Mater. Trans.*, roč. 56, č. 7, s. 1037–1042, 2015, doi: 10.2320/matertrans.MI201404.
- [159] R. Schmidt, P. Alpern, K. Plecher, a R. Tilgner, „Investigation of the adhesion strength between molding compound and leadframe at higher temperatures”, *Proc. 2nd Electron. Packag. Technol. Conf. Cat No98EX235*, 1998, doi: 10.1109/EPTC.1998.756028.
- [160] I. Fukuzawa, S. Ishiguro, a S. Nanbu, „Moisture Resistance Degradation of Plastic LSIs by Reflow Soldering”, in *23rd International Reliability Physics Symposium*, bř. 1985, s. 192–197. doi: 10.1109/IRPS.1985.362097.
- [161] P. Alpern, K. C. Lee, R. Dudek, a R. Tilgner, „A simple model for the mode I popcorn effect for IC packages”, *Microelectron. Reliab.*, roč. 40, č. 8, s. 1503–1508, srp. 2000, doi: 10.1016/S0026-2714(00)00116-5.
- [162] Y. Chen a 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*, čer. 2011, s. 482–485. doi: 10.1109/ICQR2MSE.2011.5976658.
- [163] F. J. A. Rebollo, „SAM Capabilities and Scan Modes”, *ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD / Web Project Office*, úno. 06, 2019. <https://wpo-altertechnology.com/sam-capabilities-and-scan-modes/> (viděno srp. 11, 2021).
- [164] P. Snugovsky, P. Arrowsmith, a M. Romansky, „Electroless Ni/Immersion Au interconnects: Investigation of black pad in wire bonds and solder joints”, *J. Electron. Mater.*, roč. 30, č. 9, s. 1262–1270, zář. 2001, doi: 10.1007/s11664-001-0159-z.
- [165] K. Johal a S. Lamprecht, „Study of the mechanism responsible for “Black pad” defect on PWB’s using electroless nickel/immersion gold as final finish”, 2001.
- [166] K. Saganuma a K.-S. Kim, „The root causes of the “Black pad” phenomenon and avoidance tactics”, *JOM*, roč. 60, č. 6, s. 61–65, čer. 2008, doi: 10.1007/s11837-008-0074-3.

- [167] R. Ramanauskas, A. Selskis, J. Juodkazyte, a V. Jasulaitiene, „PCB failure analysis related to the ENIG black pad problem“, *Circuit World*, roč. 39, č. 3, s. 124–132, led. 2013, doi: 10.1108/CW-05-2013-0013.
- [168] G. Milad, „Is “black pad” still an issue for ENIG?“, *Circuit World*, 2010.
- [169] P. Zhang, Y. Zhang, a Z. Sun, „Spontaneous Growth of Metal Whiskers on Surfaces of Solids: A Review“, *J. Mater. Sci. Technol.*, roč. 31, č. 7, s. 675–698, čvc. 2015, doi: 10.1016/j.jmst.2015.04.001.
- [170] „NASA Goddard Tin Whisker Homepage“. <https://nepp.nasa.gov/whisker/> (viděno srp. 25, 2021).
- [171] E. Chason, N. Jadhav, F. Pei, E. Buchovecky, a A. Bower, „Growth of whiskers from Sn surfaces: Driving forces and growth mechanisms“, *Prog. Surf. Sci.*, roč. 88, č. 2, s. 103–131, kvě. 2013, doi: 10.1016/j.progsurf.2013.02.002.
- [172] A. N. Hashim a M. A. A. Mohd Salleh, „Spontaneous Tin (Sn) Whisker Growth from Electroplated Tin and Lead-Free Tin Alloys Coatings: A Short Review“, *Solid State Phenom.*, roč. 280, s. 151–156, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.280.151.
- [173] D. Bunyan, M. A. Ashworth, G. D. Wilcox, R. L. Higginson, R. J. Heath, a C. Liu, „Tin whisker growth from electroplated finishes – a review“, *Trans. IMF*, roč. 91, č. 5, s. 249–259, zář. 2013, doi: 10.1179/0020296713Z.000000000119.
- [174] P. Jagtap a P. Kumar, „Whisker Growth in Sn Coatings: A Review of Current Status and Future Prospects“, *J. Electron. Mater.*, roč. 50, č. 3, s. 735–766, bře. 2021, doi: 10.1007/s11664-020-08440-z.
- [175] B. Illés, B. Horváth, A. Géczy, O. Krammer, a K. Dušek, „Corrosion-induced tin whisker growth in electronic devices: a review“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 29, č. 1, s. 59–68, led. 2017, doi: 10.1108/SSMT-10-2016-0023.
- [176] X. Zhong, L. Chen, B. Medgyes, Z. Zhang, S. Gao, a L. Jakab, „Electrochemical migration of Sn and Sn solder alloys: a review“, *RSC Adv.*, roč. 7, č. 45, s. 28186–28206, kvě. 2017, doi: 10.1039/C7RA04368F.
- [177] C. Dominkovics a G. Harsanyi, „Effects of flux residues on surface insulation resistance and electrochemical migration“, in *2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology*, St. Marienthal, Germany, 2006, s. 206–210. doi: 10.1109/ISSE.2006.365387.
- [178] D. Q. Yu, W. Jillek, a E. Schmitt, „Electrochemical migration of Sn-Pb and lead free solder alloys under distilled water“, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, roč. 17, č. 3, s. 219–227, bře. 2006, doi: 10.1007/s10854-006-6764-0.
- [179] Y. R. Yoo a Y. S. Kim, „Elucidation of the relationship between the electrochemical migration susceptibility of SnPb solders for PCBs and the composition of the resulting dendrites“, *Met. Mater. Int.*, roč. 16, č. 4, s. 613–619, srp. 2010, doi: 10.1007/s12540-010-0814-0.
- [180] C. K. Chung, Y. J. Chen, C. C. Li, a C. R. Kao, „The critical oxide thickness for Pb-free reflow soldering on Cu substrate“, *Thin Solid Films*, roč. 520, č. 16, s. 5346–5352, čer. 2012, doi: 10.1016/j.tsf.2012.03.034.
- [181] K. Dušek, M. Plaček, D. Bušek, K. Dvořáková, a A. Rudajevová, „Study of influence of thermal capacity and flux activity on the solderability“, in *Proceedings of the 2014 37th International Spring Seminar on Electronics Technology*, kvě. 2014, s. 185–188. doi: 10.1109/ISSE.2014.6887589.
- [182] J. M. R. Salamania, „Nonwetting Effects of Si Contamination on Cu Bumps of a Flip Chip Package—A Case Study“, *lis. 2016*, s. 635–637. doi: 10.31399/asm.cp.istfa2016p0635.
- [183] A. Raffalovich, „Corrosive Effects of Solder Flux on Printed-Circuit Boards“, *IEEE Trans. Parts Hybrids Packag.*, roč. 7, č. 4, s. 155–162, pro. 1971, doi: 10.1109/TPHP.1971.1136427.
- [184] R. Aspandiar, „Voids in solder joints“, *Surf. Mt. Technol. Assoc. J.*, roč. 19, č. 4, 2018.
- [185] T. D. Ewald, N. Holle, a K.-J. Wolter, „Void formation on PCB surface finish during reflow soldering“, in *Proceedings of the 2011 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2011, s. 153–161. doi: 10.1109/ISSE.2011.6053569.
- [186] M. Yunus, K. Srihari, J. M. Pitarresi, a A. Primavera, „Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints“, *Microelectron. Reliab.*, roč. 43, č. 12, s. 2077–2086, pro. 2003, doi: 10.1016/S0026-2714(03)00124-0.
- [187] H. Li, C. Wang, M. Yang, N. Wang, R. An, a Y. Xu, „The effect of voids on thermal conductivity of solder joints“, in *2012 13th International Conference on Electronic Packaging Technology High Density Packaging*, srp. 2012, s. 1061–1064. doi: 10.1109/ICEPT-HDP.2012.6474790.
- [188] D. Bušek *et al.*, „Flux effect on void quantity and size in soldered joints“, *Microelectron. Reliab.*, roč. 60, s. 135–140, kvě. 2016, doi: 10.1016/j.microrel.2016.03.009.
- [189] R. Diehm, M. Nowottnick, a U. Pape, „Reduction of voids in solder joints an alternative to vacuum soldering“, *Proc. IPC APEX EXPO*, 2012.
- [190] Y.-H. Yau, K. Wengenroth, a J. Abys, „A study of planar microvoiding in Pb-free solder joints“, *Hong Kong Print Circuit Assoc.*, č. 22, s. 1–14, 2007.

- [191] G. S. Wable, S. Chada, B. Neal, a R. A. Fournelle, „Solidification shrinkage defects in electronic solders“, *JOM*, roč. 57, č. 6, s. 38–42, 2005.
- [192] F. Grano, F. Bruno, D. Korf, E. O’Keeffe, C. Kelley, a N. H. Salem, „Impact of microvia-in-pad design on void formation“, 2003.
- [193] L. Yin a P. Borgesen, „On the root cause of Kirkendall voiding in Cu3Sn“, *J. Mater. Res.*, roč. 26, č. 3, s. 455–466, úno. 2011, doi: 10.1557/jmr.2010.47.
- [194] D. Kim, J. Chang, J. Park, a J. J. Pak, „Formation and behavior of Kirkendall voids within intermetallic layers of solder joints“, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, roč. 22, č. 7, s. 703–716, čvc. 2011, doi: 10.1007/s10854-011-0357-2.
- [195] R. B. Berntson, D. Sbiroli, a J. J. Anweiler, „Minimizing solder spatter impact“, *Surf. Mt. Technol.*, roč. 14, s. 51–58, dub. 2000.
- [196] D. Manjunath, S. Iyer, S. Eckel, P. Damodaran, a K. Srihari, „Minimizing flux spatter during lead-free reflow assembly“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 18, č. 3, s. 19–23, 2006.
- [197] K. Dušek, D. Bušek, M. Slavata, a A. Rudajevová, „Surface finish influence on PCB contamination by flux spattering effect“, in *2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, kvě. 2015, s. 241–244. doi: 10.1109/ISSE.2015.7247998.
- [198] K. Dušek a D. Bušek, „Problem with no-clean flux spattering on in-circuit testing pads diagnosed by EDS analysis“, *Microelectron. Reliab.*, roč. 56, s. 162–169, led. 2016, doi: 10.1016/j.microrel.2015.10.020.
- [199] K. Kim, Y. Lee, a K. Sukanuma, „The effect of micro via-in pad design on surface-mount assembly defects: part II – voiding and spattering“, *Solder. Surf. Mt. Technol.*, roč. 25, č. 1, s. 4–14, úno. 2013, doi: 10.1108/09540911311294551.
- [200] M.-Y. Tan, M.-B. Zhou, J.-Q. Huang, F.-Q. Ma, X. Ma, a X.-P. Zhang, „Dynamic wetting behavior and solder ball spattering formation of Sn-Bi solder pastes during reflow soldering process“, in *2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*, srp. 2016, s. 974–978. doi: 10.1109/ICEPT.2016.7583290.
- [201] C. Chansa-ngavej a J. Kasemsomporn, „Optimization of reflow-thermal profile by design of experiments with response surface methodology for minimizing solder-ball defects“, in *2008 4th IEEE International Conference on Management of Innovation and Technology*, zář. 2008, s. 412–417. doi: 10.1109/ICMIT.2008.4654400.
- [202] A. Buckroyd, *In-Circuit Testing*. Butterworth-Heinemann, 2015.
- [203] K. Vijayamadhavan, N. Kini, K. Srihari, a R. Iyer, „Systematic analysis towards the minimization/elimination of flux spatter on gold finger contacts“, in *PAN PACIFIC MICROELECTRONICS SYMPOSIUM, 2001, PROCEEDINGS*, ISL KAUAI, HI, 2001, s. 515–520.
- [204] A. Géczy, „Investigating heat transfer coefficient differences on printed circuit boards during vapour phase reflow soldering“, *Int. J. Heat Mass Transf.*, roč. 109, s. 167–174, čer. 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.091.
- [205] „Technical Data Sheets“, *AIM Solder*, dub. 10, 2013. <https://aimsolder.com/technical-data-sheets> (viděno čer. 29, 2021).
- [206] „JEDEC JESD 22-A101 – Steady-State Temperature-Humidity Bias Life Test“, JEDEC Solid State Technology Association, USA, 2015.
- [207] „JEDEC JESD22-A104-B – Temperature Cycling“, JEDEC Solid State Technology Association, USA, 2000.
- [208] B. Illés a B. Horváth, „Tin whisker growth from micro-alloyed SAC solders in corrosive climate“, *J. Alloys Compd.*, roč. 616, s. 116–121, pro. 2014, doi: 10.1016/j.jallcom.2014.07.103.
- [209] A. Sharma, S. Kumar, D.-H. Jung, a J. P. Jung, „Effect of high temperature high humidity and thermal shock test on interfacial intermetallic compounds (IMCs) growth of low alpha solders“, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, roč. 28, č. 11, s. 8116–8129, čer. 2017, doi: 10.1007/s10854-017-6518-1.
- [210] J.-W. Yoon, B.-I. Noh, Y.-H. Lee, H.-S. Lee, a S.-B. Jung, „Effects of isothermal aging and temperature–humidity treatment of substrate on joint reliability of Sn–3.0Ag–0.5Cu/OSP-finished Cu CSP solder joint“, *Microelectron. Reliab.*, roč. 48, č. 11, s. 1864–1874, lis. 2008, doi: 10.1016/j.microrel.2008.07.065.
- [211] M. Dusek, J. Nottay, a C. Hunt, „The use of shear testing and thermal cycling for assessment of solder joint reliability.“, 2000.