

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



Dutiny v pájených spojích

Voids inside solder joints

Bakalářská práce

Autor práce: Marek Teringl

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

Praha 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Teríngl** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **474422**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Dutiny v pájených spojích

Název bakalářské práce anglicky:

Voids inside solder joints

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s pájenými spoji v elektrotechnice a s možnými chybami, které se zde mohou vyskytnout se zřetelem na dutiny v pájených spojích.
- 2) Připravte si vzorky, u kterých provedete rentgenovou diagnostiku s následnou analýzou dutin.
- 3) Výsledky analýzy vyhodnoťte s ohledem na parametry přípravy vzorků.
- 4) Navrhněte a ekonomicky zhodnoťte výměnu technologie pájení s ohledem na produkci a minimalizaci voidů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ABEL M., CIMBUREK V.: Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi, ABE.TEC, Pardubice 2005, ISBN 80-903597-0-1
- [2] MACH P., SKOČIL V., URBÁNEK J.: Montáž v elektrotechnice, ČVUT Praha, 2001
- [3] URBÁNEK J., KLABAČKA E.: Technologie elektronických zařízení, ČVUT Praha, 1997
- [4] Pietriková A., Ďurišin J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **13.01.2020** Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 22. 5. 2020

.....
Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady, přátelský přístup a odborné vedení mé práce.

Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Ježdíkovi, Ph.D. za pomoc s rentgenovou analýzou a vyhodnocením vzorků. Rád bych také poděkoval Ing. Lucii Leňkové a Ing. Tomáši Králíkovi, Ph.D. za odborné rady.

V neposlední řadě chci poděkovat své přítelkyni a rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

Abstrakt

Tato práce se zabývá tematikou vzniku voidů v pájených spojích. Teoretická část práce je zaměřena na teorii pájení, pájecí slitiny a pasty, výskyt a tvorbu dutin v pájených spojích. Praktická část se věnuje vytvoření vhodného návrhu testovaných DPS a odpovídajících šablon rozdílných tloušťek. Dále vyhodnocuje data získaná z rentgenové analýzy vzorků s ohledem na jejich parametry. V ekonomické části se navrhuje a vyhodnocuje varianta technologie pájení na minimalizaci tvorby dutin. Výsledkem práce je nalezení vhodné kombinace DPS a použité pájecí pasty v závislosti na tvorbě dutin a ekonomické zhodnocení nové přetavovací pece ke snížení voidovitosti.

Klíčová slova

pájení, pájený spoj, voidy, pájecí pasta, RTG, DPS, NPV, přetavovací pec

Abstract

This thesis includes information about creating the voids inside solder joints. The theoretical part is focused on the theory of soldering, soldering alloys and pastes, the occurrence and formation of voids in solder joints. The practical part is devoted to the finding of a suitable design of tested PCBs and corresponding templates of different thicknesses. It also evaluates the data obtained from the X-ray analysis of samples with respect to the parameters of the samples. In the economic part, an optimal soldering technology is designed and evaluated to minimize the formation of voids. The result of this thesis is finding a suitable combination of PCB and opted solder paste depending on the voids-formation and economic evaluation of a new reflow oven to reduce voidability.

Key words

soldering, solder joint, voids, solder paste, X-ray, PCB, NPV, reflow oven

OBSAH

Úvod	9
1. Teorie pájení	10
1.1 Pájení.....	10
1.2 Pájitelnost.....	10
1.2.1 Smáčení	11
1.2.2 Nesmáčení	11
1.2.3 Odsmačení	12
2. Pájecí slitiny a pasty	13
2.1 Pájecí slitiny	13
2.1.1 Olovnaté	13
2.1.2 Bezolovnaté	13
2.2 Pájecí pasty.....	15
2.2.1 Způsoby nanesení pájecí pasty na DPS	16
2.2.1.1 Nanášení pájecí pasty dávkováním (dispenze)	16
2.2.1.2 Sítotisk	16
2.2.1.3 Šablonový tisk.....	17
3. Dutiny v pájených spojích.....	18
3.1 Makro voidy	19
3.2 Mikro voidy.....	19
3.3 Shrinkage voidy	20
3.4 Mikrovia voidy.....	21
3.5 Kirkendallový voidy.....	22
3.6 Pinhole voidy	23
4. Praktická část.....	24
4.1 Návrh vzorku.....	24

4.2 Návrh šablon.....	24
4.3 Testované DPS	25
4.4 Pájecí pasty	25
4.5 Nanesení pájecí pasty a osazení DPS	26
4.6 Pájení přetavením	27
4.7 RTG analýza	28
4.8 Vyhodnocení.....	30
4.8.1 Statistické zpracování dat	31
4.8.2 Vyhodnocení vlivu různých typů DPS a šablon	32
4.8.3 Vyhodnocení vlivu použitých pájecích past	34
4.8.4 Vyhodnocení variability voidovitosti pájecích plošek na DPS.....	36
5. Ekonomická část	38
5.1 Varianty technologií	38
5.2 Hodnocení investice	39
5.3 Vstupní veličiny.....	40
5.3.1 Výrobní kapacita a cena výrobku	40
5.3.2 Investice a náklady.....	40
5.3.3 Odpisy	40
5.3.4 Inflace	41
5.3.5 Sazba daně	41
5.3.6 Diskont.....	41
5.4 Nákladový model klasické přetavovací pece.....	42
5.5 Vakuová přetavovací pec.....	43
5.6 Klasická přetavovací pec s novou pastou	45
5.7 Citlivostní analýza	47
5.8 Vyhodnocení ekonomické části.....	48
Závěr.....	49

Seznam použitých zkratek	50
Seznam tabulek	51
Seznam obrázků	52
Seznam grafů.....	53
Seznam rovnic	54
Seznam použité literatury	55
Přílohy.....	58

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou výskytu voidů v pájených spojích. Jedná se o dutiny, které mohou negativně ovlivnit mechanické a elektrické vlastnosti výsledného pájeného spoje. Chybovost pájených spojů způsobená tvorbou dutin se začala řešit s přechodem na bezolovnaté pájky. Do nedávna používané pájky na bázi olova tento problém nevykazovaly v takové míře jako dnes aplikované bezolovnaté pájecí slitiny.

Teoretická část je zaměřena na teorii pájení, pájecí slitiny a jejich dělení. Poté následuje popis všech známých typů voidů, jejich výskyt a možné příčiny jejich vzniku.

Praktická část se věnuje tvorbě voidů v závislosti na různých tvarech šablon při zachování stále stejného objemu nanášené pájecí pasty.

Ekonomická část se zabývá změnou technologie pájecí linky. Cílem práce je stanovit nejlepší možnou variantu investice do nového zařízení a následně zhodnotit ekonomickou efektivnost tohoto investičního projektu.

1. Teorie pájení

1.1 Pájení

Pojmem pájení se rozumí metalurgické spojení kovových částí za pomoci lehce tavitelné pájecí slitiny (pájky). Spojované části se netaví, jsou pouze smáčeny pájkou v tekutém stavu, která po ztuhnutí tyto části spojuje. Pájecí slitina musí mít nižší teplotu tavení, než mají spojované kovové části. Během tohoto procesu dochází k vytvoření metalurgického spoje vlivem difúze atomů pájecí slitiny do spojovaných kovových částí. [1],[2],[3]

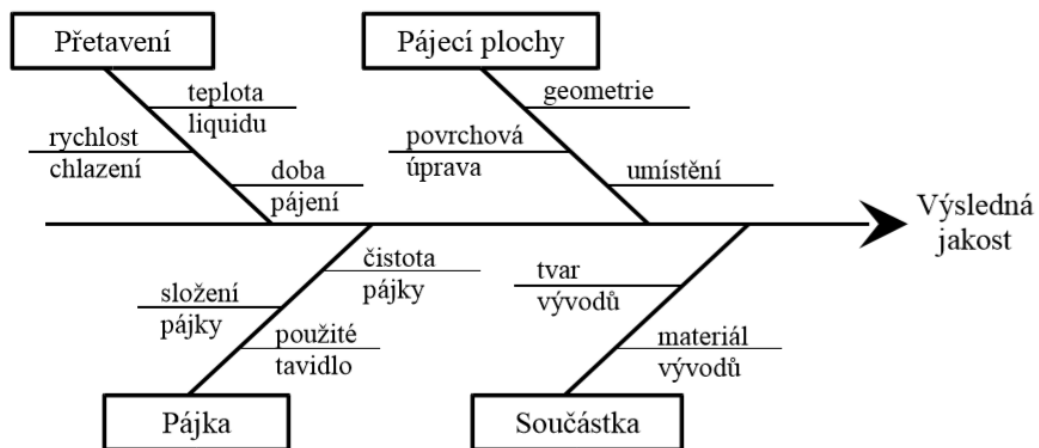
Podle požadované teploty tavení pájecí slitiny můžeme pájení rozdělit na dvě skupiny. V elektrotechnickém průmyslu se nejčastěji vyskytuje měkké pájení (teplota tavení pájecí slitiny do 450 °C), například na spojení elektronických součástek. Druhou skupinou, která se využívá jako náhrada sváření na tvorbu mechanicky odolných spojů, je tvrdé pájení (teplota tavení pájecí slitiny nad 450 °C). [1]

1.2 Pájitelnost

Pájitelnost lze definovat jako schopnost povrchu kovu být rovnoměrně na celé ploše smáčen pájkou během pájení. Mezi nejdůležitější parametry pro pájitelnost patří chemické složení pájecí slitiny a kvalita povrchu pájeného materiálu. Pájitelnost se může měnit na základě typu skladování, stáří materiálu a také jako důsledek korozních změn povrchu pájeného materiálu. Výsledný pájený spoj by měl vykazovat pevnost proti mechanickému namáhání, odolnost proti korozi, oxidaci a být elektricky vodivý. [1],[4]

Na výslednou kvalitu pájeného spoje má vliv velké množství faktorů, jak vyplývá z následujícího obrázku (Obr. 1). Mezi ty základní můžeme zařadit:

- složení pájky
- složení tavidla
- pájecí proces
- materiál pájecích ploch [1],[7]



Obrázek 1 – Ishikawův diagram pro proces pájení [7]

Během procesu pájení mohou nastat různé situace smáčení povrchu materiálu:

- smáčení
- nesmáčení
- odsmáčení

1.2.1 Smáčení

Při smáčení dochází k roztékání roztavené pájky po povrchu pájeného materiálu. Pokud je splněna podmínka, že je povrchová energie čistého pájeného povrchu vyšší než povrchová energie roztavené pájecí slitiny, dochází ke smáčení povrchu materiálu pájkou a k difúzi atomů pájecí slitiny do mřížky tuhého povrchu materiálu, která má za výsledek vytvoření metalurgické vazby na rozhraní. [1],[4],[6]

1.2.2 Nesmáčení

Kvůli přítomnosti kyslíku všude kolem nás dochází k oxidaci povrchu pájeného materiálu a to negativně ovlivňuje celý proces pájení. Tato skutečnost se dá vyřešit pomocí tavidla, které slouží jako čisticí prostředek oxidčních vrstev pájených kovů. Pokud je vrstva oxidů příliš silná nebo tavidlo nemá dostatečnou aktivitu, nastává nesmáčení. Při této situaci nedochází k vytvoření metalurgické vazby a rozhraní mezi pájkou a pájeným materiálem se stává zcela zřetelné. [8],[9]

1.2.3 Odsmačeni

Proces odsmačeni nastáva, pokud pájka nejprve pokryje celý povrch pájeného materiálu, následně ustupuje a zanechává za sebou shluky pájecí slitiny nepravidelného tvaru, které jsou od sebe odděleny oblastmi s tenkou vrstvou pájky. [1],[9]

2. Pájecí slitiny a pasty

2.1 Pájecí slitiny

V oblasti elektrotechniky se pájecí slitiny pro měkké pájení skládají z kovů s nízkou teplotou tavení. Jedná se převážně o cín, zinek a olovo. Dnes můžeme pájecí slitiny jednoduše rozdělit podle obsahu olova na olovnaté a bezolovnaté pájecí slitiny. Od roku 2006 se pájky na bázi olova nesmí používat vzhledem k velké toxicitě olova a negativním dopadům na životní prostředí. Tyto pájecí slitiny mají ovšem velkou spolehlivost, proto je umožněno v některých průmyslových odvětvích (například letectví) olovnaté pájecí slitiny nadále používat. [2],[3],[5]

2.1.1 Olovnaté

Do nedávna se využívaly výhradně pájecí slitiny na bázi olova a cínu. Pájecí slitina s obsahem cínu 61,9 % a olova 38,1 % tvoří eutektickou slitinu, kde teplota tání dosahuje 183,3 °C. Olovo se používalo hlavně z důvodu jeho nízké ceny, zmenšení povrchového napětí čistého cínu, nízké teploty tání pájecí slitiny a zvýšení odolnosti pájecí slitiny vůči korozi. [1],[2],[3]

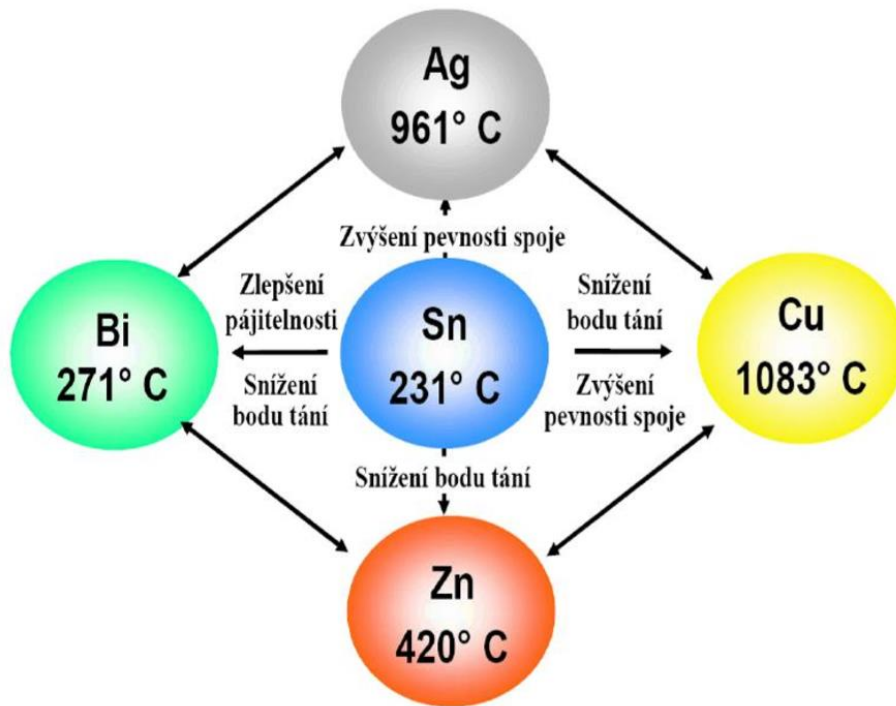
2.1.2 Bezolovnaté

Od zákazu užívání pájecích slitin na bázi olova jsou hledány nové alternativy. Ve většině případů se jedná o pájky složené ze dvou až čtyř slitin prvků. Nejčastěji používanou bezolovnatou pájecí slitinou je dnes SnAgCu (například Sn96,5Ag,3,8Cu0,7), kvůli téměř srovnatelným vlastnostem jako má pájecí slitina SnPbAg. Mimo vyšší cenu je důležitým rozdílem teplota tání pájecí slitiny, ta se u slitiny Sn96,5Ag,3,8Cu0,7 pohybuje okolo 217 °C. Největším problémem bezolovnatých pájecích slitin je tedy ve většině případů jejich vyšší teplota tání, která může zapříčinit zničení součástek při pájení. [1],[2],[4],[9]

Na bezolovnaté pájecí slitiny se kladou následující základní požadavky:

- nesmí být toxická
- teplota tání se musí nacházet v intervalu (150 – 250) °C
- materiálová dostupnost a cenová přijatelnost
- dostatečné smáčení
- zhotovení spolehlivého spoje [1],[10]

Na následujícím obrázku (Obr. 2) jsou uvedeny nejčastěji používané kovy na bezolovnaté pájecí slitiny s jejich teplotou tavení a vlivem na vlastnosti pájky.



Obrázek 2 – Základní kombinace slitin, teploty tavení jednotlivých prvků a vliv na vlastnosti pájky [10]

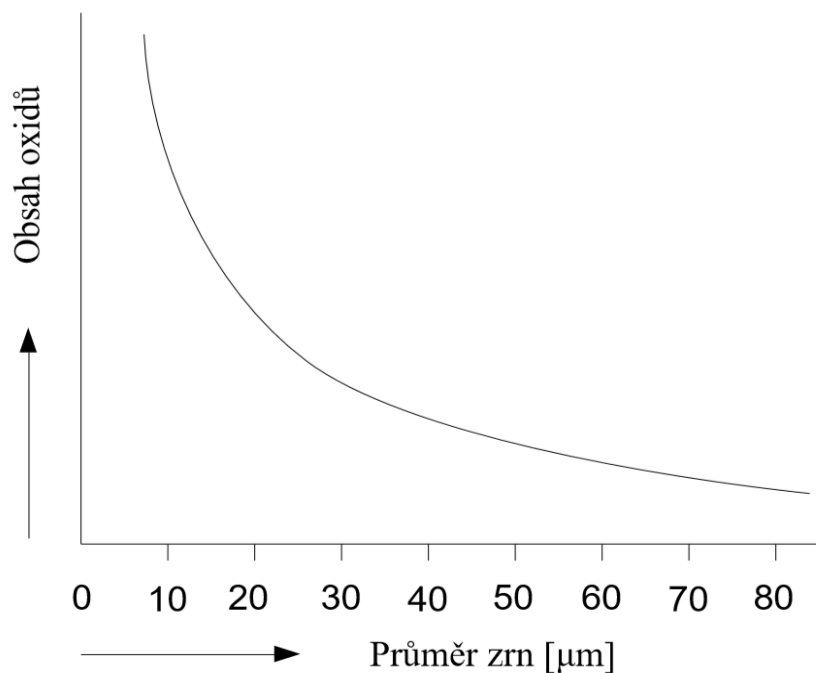
Rozdělení několika základních bezolovnatých pájecích slitin na trhu podle teploty tání:

- 1) Pájecí slitiny s bodem tání vyšším než 210 °C
 SnCu, SnAg, SnAgCu, SnAgCuSb, SnInAg, SnAgCuZn, SnAgBiCu,
 SnAgBiCuGe
- 2) Pájecí slitiny s bodem tání v intervalu (180 – 210) °C
 SnAgBiX, SnAgBi, SnZn
- 3) Pájecí slitiny s bodem tání nižším než 180 °C
 SnBiZn, SnBi [7],[10]

2.2 Pájecí pasty

Pájení pomocí pájecí pasty se užívá zejména při pájení přetavením na osazení DPS součástkami SMD. Pájecí pasta představuje homogenní směs, která se skládá z pájecích zrn (kuličky pájecí slitiny), tavidla a reologických modifikátorů na docílení potřebné tekutosti, lepivosti a viskozity. Většinou se kovový podíl v pastě pohybuje v rozmezí (65 – 96) hmotnostních procent. Tavidla musí být vhodně zvolená, jinak by mohlo docházet k reakcím mezi pájecí slitinou a tavidlem. To by mohlo vést ke krátké životnosti výsledného spoje. [1],[2]

Pájecí zrna by měla mít stejný tvar a shodné rozměry, v opačném případě by mohly nastat komplikace při aplikaci pasty. Velikost pájecích zrn hraje velkou roli, protože s nižším průměrem pájecích zrn roste množství oxidů v pájecí pastě. Tato skutečnost nepříznivě ovlivňuje pájitelnost, proto se výroba pájecích zrn odehrává v komoře vyplněné dusíkem, aby se zamezilo oxidaci. [1],[11]



Obrázek 3 – Závislost podílu oxidů na průměru zrn [11]

Na Obr. 3 vidíme, že čím je průměr zrn menší, tím se zvyšuje podíl oxidů. Velikost zrn a adekvátní tavidlo pájecí pasty se volí podle dané aplikace a typu pájení. [1],[11]

Následující tabulka č. 1 nám udává rozdělení pájecích past dle normy ANSI J-STD-005.

Tabulka 1 – Rozdělení pájecích past dle normy ANSI J-STD-005 [2]

Typ	80% částic [μm]	Max 10% částic [μm]	Žádná větší než [μm]
1	150 – 75	menší než 20	160
2	75 – 45	menší než 20	80
3	45 – 25	menší než 20	50
Typ	90% částic [μm]	Max 10% částic [μm]	Žádná větší než [μm]
4	38 – 20	menší než 20	40
5	25 – 15	menší než 15	30
6	5 – 15	menší než 5	20

2.2.1 Způsoby nanesení pájecí pasty na DPS

Existují tři základní způsoby nanesení pájecí pasty na DPS:

- dávkováním
- sítotisk
- šablonový tisk

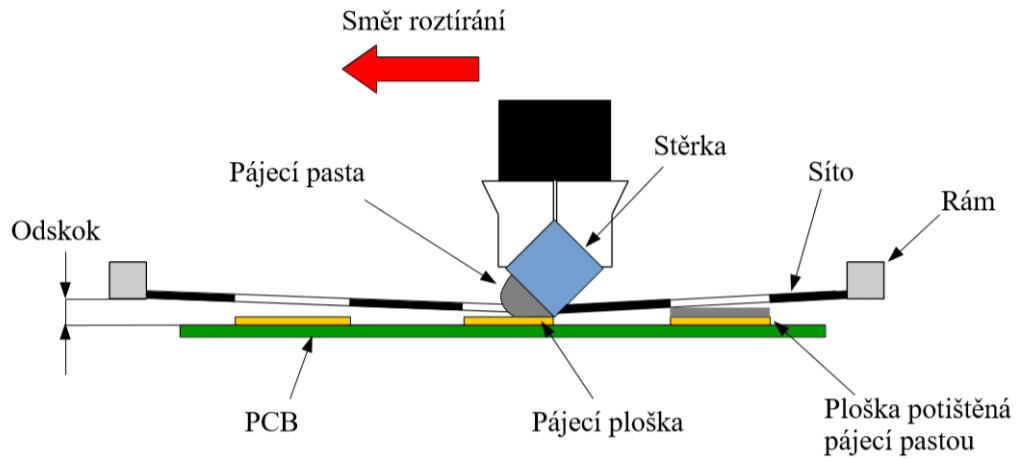
2.2.1.1 Nanášení pájecí pasty dávkováním (dispenze)

Tento způsob nanášení pájecí pasty se nejvíce hodí pro malé objemy pájení nebo opravy, kdy je možno využít ruční dávkování. Tak můžeme poměrně snadno nanést pájecí pastu do míst, kde je potřeba. [11]

Dále lze použít strojní dávkovač jako náhradu šablonového tisku. To se zdá ekonomicky výhodné tam, kde je výroba s velkým počtem typů DPS po malých dávkách a byla by neefektivní výroba nových šablon. [3],[11]

2.2.1.2 Sítotisk

Při této metodě dochází k protlačování pájecí pasty skrz síto, které je vyrobeno z vláken nerezové oceli nebo polyesteru a rámu. Na síto je dále umístěn fotocitlivý materiál a místa, kde se má nacházet pájecí pasta, jsou ozářena UV světlem. Z těchto míst se osvětlený materiál vyleptá a na zbylých se naopak vytvrdí. Poté se síto umístí do výšky (0,8 – 1) mm nad DPS a následně dojde k protlačení pájecí pasty skrz síto pomocí stěrky. Po nanesení pájecí pasty se síto nadzvedává až do vzdálenosti zvané odskok, jak je vidět na následujícím obrázku (Obr. 4). [3],[11]



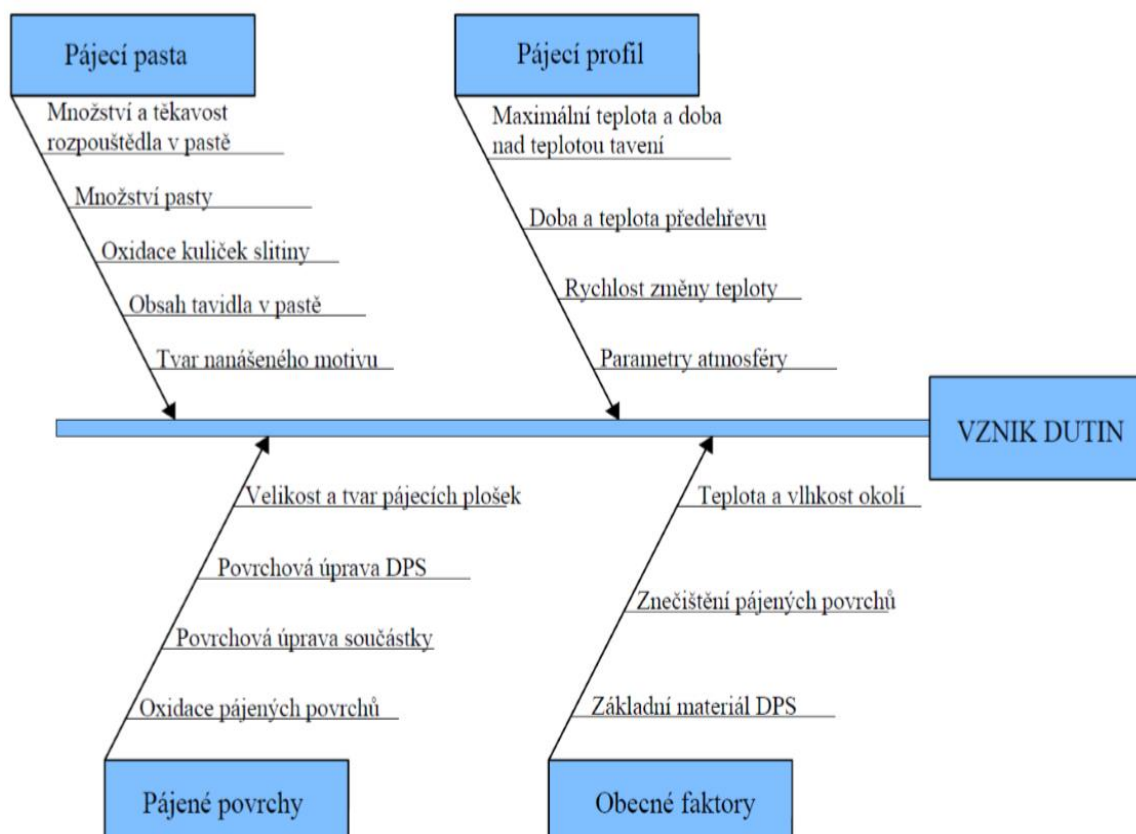
Obrázek 4 – Princip tisku sítotiskem [11]

2.2.1.3 Šablonový tisk

Oproti předchozímu způsobu nanesení pasty na DPS se zde jedná o kovovou šablonu, přes kterou se stěrkou protlačuje pájecí pasta a šablona se při nanášení pasty nachází přímo na DPS. V šabloně jsou otvory vytvořené leptáním, laserem nebo galvanoplastikou. [3],[11]

3. Dutiny v pájených spojích

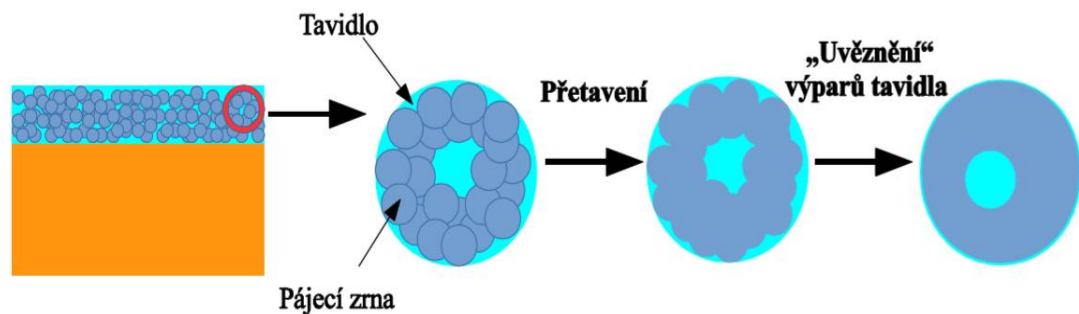
Dutiny nebo dutinky v pájených spojích se definují jako tzv. voidy. Přítomnost voidů nám negativně ovlivňuje spolehlivost pájených spojů. Největší problémy pro pájený spoj mohou nastat při provozu obvodu, protože voidy ovlivňují jeho mechanické, elektrické a tepelné vlastnosti. Například se stále rostoucím trendem zmenšování součástek může docházet vlivem voidů k přehřívání a následnému zničení dané součástky. Proto se výrobci snaží minimalizovat množství voidů v pájených spojích různými moderními výrobními technologiemi. Tato problematika se začala řešit s přechodem na bezolovnaté pájky, neboť výskyt voidů v pájeném spoji u olovnatých pájek nebyl tak markantní. Voidy v pájených spojích vznikají z různých důvodů a v různých velikostech, podle kterých je můžeme dále dělit. Na následujícím obrázku (Obr. 5) můžeme vidět faktory, které mají vliv na vznik voidů v pájených spojích. [4],[10],[12],[14]



Obrázek 5 – Faktory ovlivňující vznik dutin [10]

3.1 Makro voidy

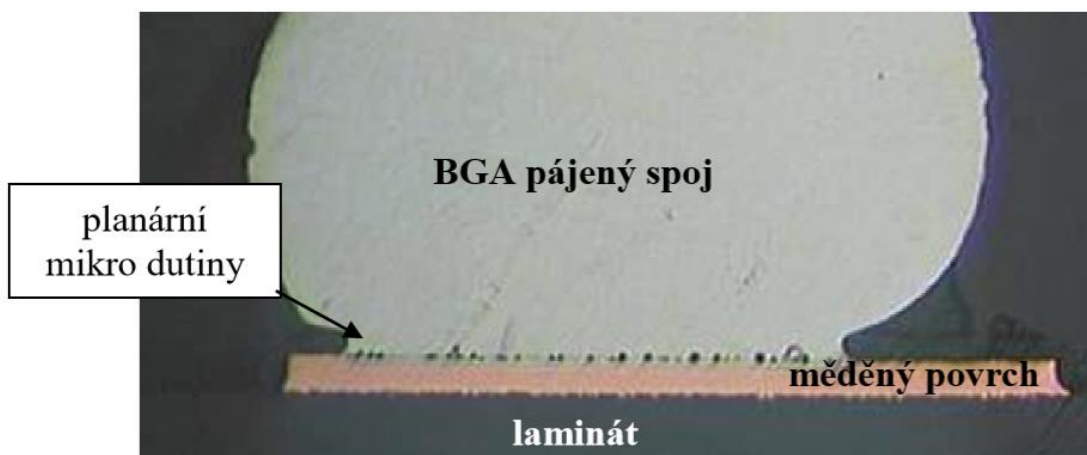
Jedná se o charakteristické dutiny vznikající během procesu přetavení, s průměrem v rozmezí (100 – 300) μm , tudíž při RTG kontrole jsou snadno viditelné. Nejčastější příčinou jejich vzniku je nedostatečný čas k úniku těkavých látek z tavidla, které vytvoří plynné útvary setrvávající v pájce po jejím přetavení a možnost jejich výskytu je tak kdekoliv uvnitř pájeného spoje. Průběh vzniku těchto dutin představuje následující obrázek (Obr. 6). [11],[12],[14]



Obrázek 6 – Vznik voidu [11]

3.2 Mikro voidy

Tyto dutiny se zpravidla vyskytují v jedné rovině na rozhraní pájeného povrchu a pájky. Průměr mikro voidů se převážně pohybuje v rozmezí (25 – 50) μm . Jejich velikost způsobuje poměrně velký problém, neboť je ani RTG kontrola nedokáže zachytit, jsou-li překryty většími makro voidy. Pro výslednou kvalitu spoje je velice problematický jejich výskyt v souvislé vrstvě na rozhraní pájeného povrchu a pájky, protože dochází k závažnému snížení mechanické pevnosti pájeného spoje. Výskyt těchto dutin na rozhraní je patrný na následujícím obrázku (Obr. 7). [12],[13],[14]



Obrázek 7 – Mikro dutiny v BGA spoji [13]

3.3 Shrinkage voidy

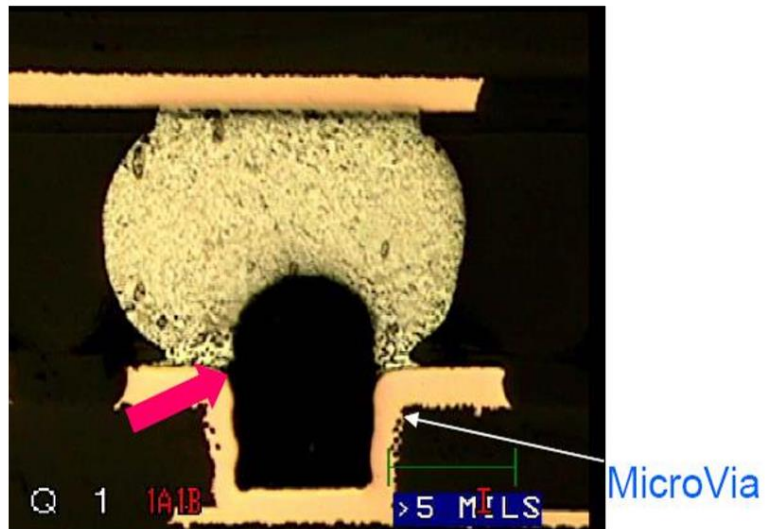
Jedná se o protáhlé dutiny, které vytvářejí stromovitě se větvící strukturu vycházející z povrchu pájeného spoje. Vznik těchto dutin je způsoben objemovým smrštěním pájky při jejím chladnutí, respektive tuhnutí. Tento typ voidů se nevyskytoval u olovnatých pájecích slitin, ale poměrně často se vyskytuje u bezolvnatých pájek typu SAC a můžeme jej vidět na následujícím obrázku (Obr. 8). [13],[14]



Obrázek 8 – Shrinkage voidy [14]

3.4 Mikrovia voidy

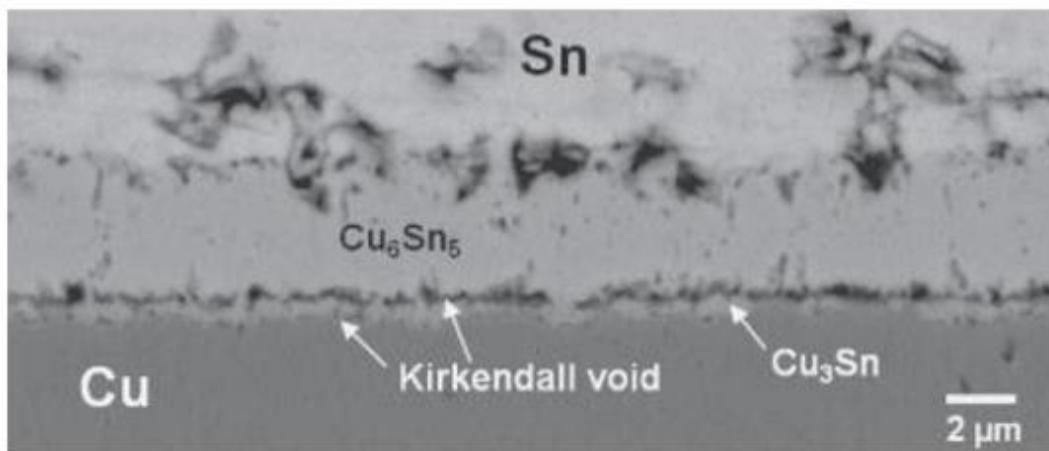
Příčinou jejich vzniku jsou mikrovia (typ mnohvrstvého plošného spoje) na DPS. Tento druh plošného spoje je využíván na propojení jednotlivých vrstev vodivými cestami u vícevrstevných DPS. Jedná se o pokovené otvory, s průměrem menším než 150 μm , které vodivě spojují jednotlivé vrstvy DPS. Tyto dutiny vznikají nejčastěji z důvodu nevyplnění mikrovia pájkou a jsou vidět na následujícím obrázku (Obr. 9). [2],[14]



Obrázek 9 – Mikrovia void [14]

3.5 Kirkendallové dutiny

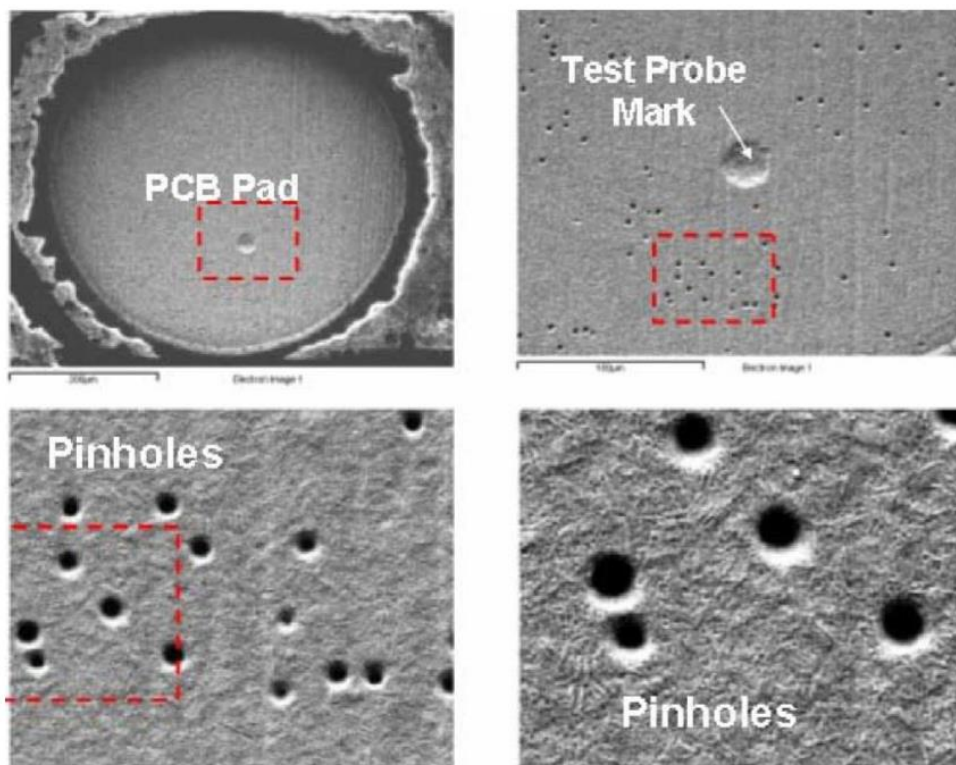
Někdy se též označují jako intermetalické dutiny, protože vznikají na rozhraní intermetalické vrstvy a měděné plošky DPS. Je poměrně složité je odhalit, neboť nevznikají při výrobě, ale při dlouhodobém tepelném namáhání pájeného spoje. Vlivem rozdílného difúzního koeficientu mědi a cínu dochází k difúzi atomů mědi do cínu daleko rychleji než atomů cínu do mědi. Z tohoto důvodu se v krystalové mřížce mědi objevují volná místa, která se spojují ve větší celky a tím vznikají intermetalické dutiny. Tyto intermetalické dutiny lze pozorovat na následujícím obrázku (Obr. 10). [10],[13]



Obrázek 10 – Výskyt Kirkendallových voidů [13]

3.6 Pinhole voids

Výskyt těchto dutin je podobný jako u předešlého typu voidů. Můžeme je nalézt na rozhraní intermetalické vrstvy a měděné plošky DPS. Ovšem původ jejich vzniku spočívá v nesprávném pokovení pájecích plošek DPS při výrobě. Tyto dutiny mají průměr v rozmezí (1 – 3) μm , proto se často označují jako špendlíkové dutiny. I když mají relativně malou velikost, představují značný problém pro výslednou kvalitu pájeného spoje, jelikož mohou způsobovat vznik trhlin na rozhraní a jejich následný růst. Tyto dutiny můžeme vidět na následujícím obrázku (Obr. 11). [11],[12]

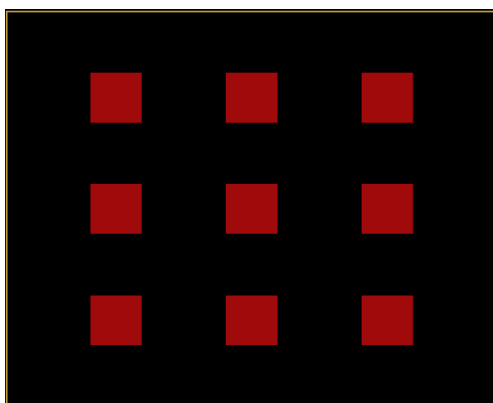


Obrázek 11 – Pinhole voidy na DPS [12]

4. Praktická část

4.1 Návrh vzorku

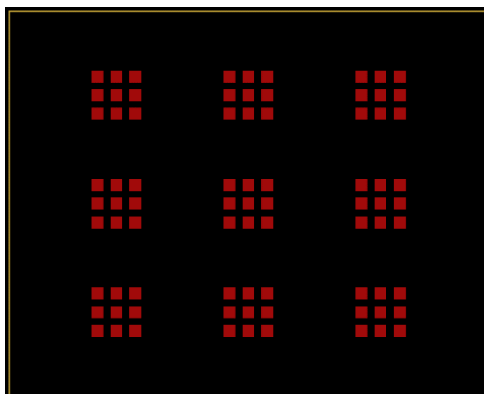
Nejprve byla navržena testovací deska plošného spoje, na kterou byl vytvořen motiv pro připájení devíti thermal padů stabilizátoru napětí o velikosti $6,3 \text{ mm} \times 6,1 \text{ mm}$. Návrh se uskutečnil v softwaru EAGLE ve verzi 9.5.0, který je volně dostupný. Tento návrh je vidět na následujícím obrázku (Obr. 12).



Obrázek 12 – Návrh DPS

4.2 Návrh šablon

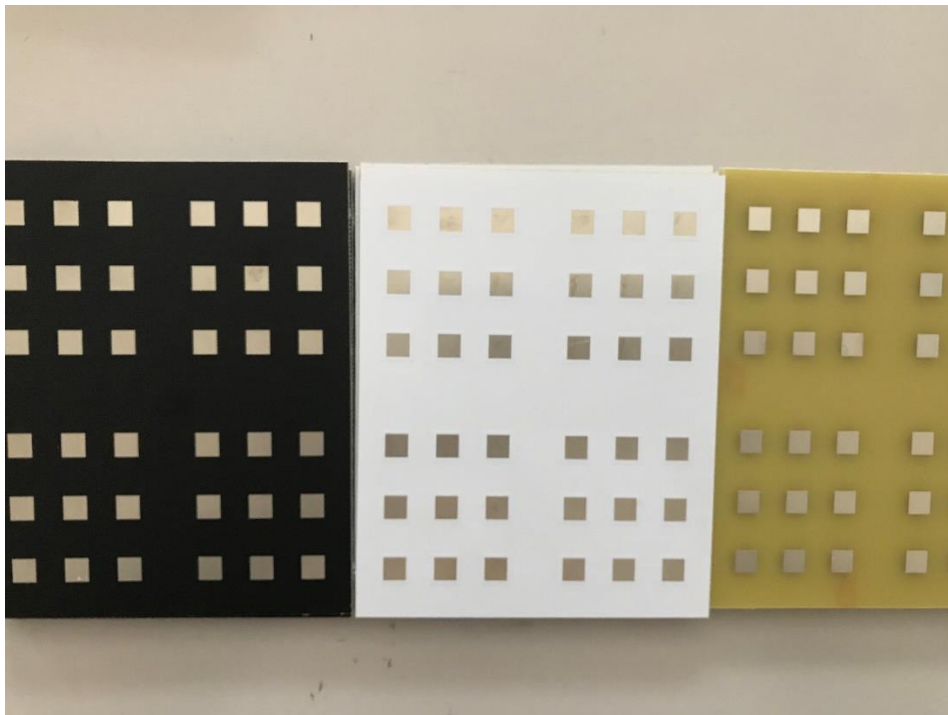
Pro zajištění minimalizace tvorby voidů během pájení přetavením bylo rozhodnuto vyzkoušet šablony s různým tvarem a velikostí podmíněné stále stejným množstvím nanesené pájecí pasty. Rozdělení pájecí pasty na menší části by mělo vést k rovnoměrnějšímu rozlití a snížení počtu voidů. Tloušťka jednotlivých šablon je $100 \mu\text{m}$, $125 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$. Návrh šablony s tloušťkou $200 \mu\text{m}$ je vyobrazen na následujícím obrázku (Obr 13).



Obrázek 13 – Návrh šablony s tloušťkou $200 \mu\text{m}$

4.3 Testované DPS

Na základě vytvořeného návrhu firma 'Semach – plošné spoje' vyrobila 3 typy základních DPS z materiálu FR4 o tloušťce 1,5 mm. První typ má černou nepájkivou masku a povrchovou úpravu chemický cín Ormecon, která má zajistit naprosto rovný povrch pro technologii SMD a zamezuje oxidaci pájeného povrchu. Druhý typ má bílou nepájkivou masku a též povrchovou úpravu ve formě chemického cínu Ormecon. Třetí typ je bez masky a má také povrchovou úpravu chemický cín Ormecon. Všechny typy můžeme vidět na následujícím obrázku (Obr. 14). Na pájecí plošky nosných DPS se namísto čipů osazovaly celoplátované DPS bez povrchové úpravy, tedy povrchová úprava byla měď.



Obrázek 14 – 3 typy testovaných DPS

4.4 Pájecí pasty

V rámci této práce byly vybrány dvě bezolovnaté pájecí pasty typu SAC305 obsahující slitinu tvořenou 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Jedná se o pasty SAC305 M8 a SAC305 NC257-2. Tyto uvedené bezolovnaté pájecí pasty mají stejné složení pájecí slitiny, avšak liší se procentuálním množstvím halogenidu v tavidle. Bližší specifikace udává následující tabulka č. 2.

Tabulka 2 – Specifikace použitých past [18],[19]

Výrobce	AIM	AIM
Typ	Bezolovnatá	Bezolovnatá
Složení	SAC305	SAC305
Označení	NC257-2	M8
Obsah kovových částic	88,5 %	88,5 %
Velikost kovových částic	T4: (20 - 38) μm	T4: (20 - 38) μm
Typ tavidla	ROL0	ROL1
Teplota přetavení	(230 - 245) °C	(230 - 245) °C
Viskozita	500 - 900 Kcps	400 - 1000 Kcps

4.5 Nanesení pájecí pasty a osazení DPS

Pájecí pasta byla nanášena na nosnou DPS pomocí metody šablonového tisku. Podle návrhu šablon firma ‘Semach – plošné spoje‘ dodala odpovídající šablony, které jsou zachyceny na obrázku č. 15. K nanesení pájecí pasty na nosnou DPS docházelo díky protlačení pasty přes šablonu za pomoci třerky. Následovalo osazení nosné desky plošného spoje protikusy, kterými byly celoplátované DPS s povrchem z čisté mědi. Rozměr osazených DPS byl shodný s rozměrem pájecích plošek nosné DPS. Osazení nosné DPS bylo umožněno SMD manipulátorem, který funguje na principu vakuové jehly.



Obrázek 15 – Použité šablony s různým motivem a tloušťkou

4.6 Pájení přetavením

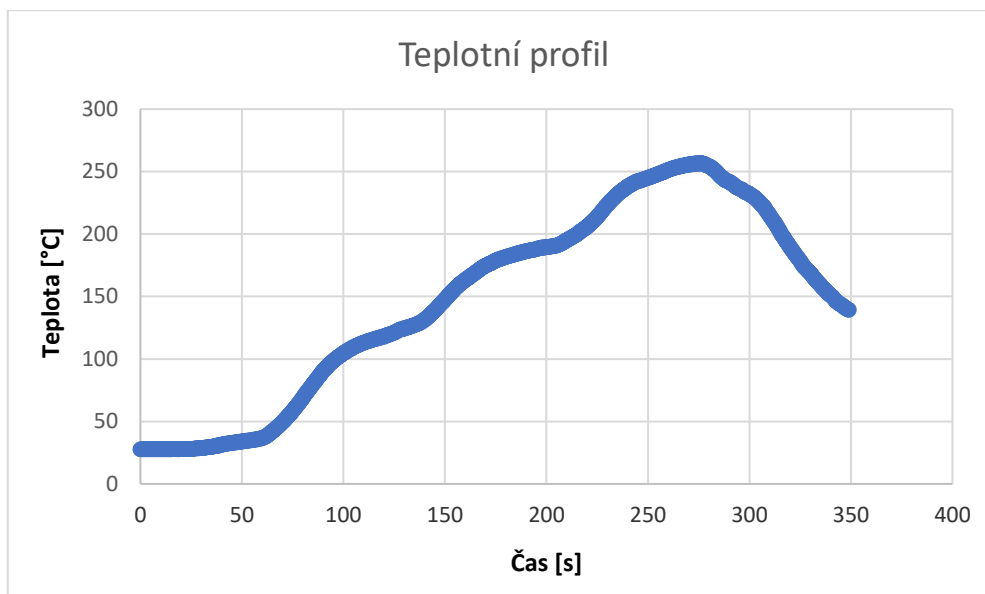
Přetavení vytvořených vzorků proběhlo za využití průběžné pece s konvekčním ohřevem Mistral 260, která je vidět na obrázku č. 16. Tato pec se skládá ze tří nastavitelných teplotních zón, chladicí zóny a dopravníkového pásu. Pomocí dotykového displeje na peci lze nastavit teploty jednotlivých zón pro teplotní profil. Teplotní zóny byly pro všechny vzorky nastaveny dle následující tabulky č. 3. Naměřený teplotní profil pak můžeme vidět na grafu č. 1.



Obrázek 16 – Pec Mistral 260

Tabulka 3 – Nastavení teplotních zón pece Mistral 260

Nastavená teplota [°C]	Zóna 1	Zóna 2	Zóna 3
	140 °C	200 °C	260 °C



Graf 1 – Použitý teplotní profil pro přetavení

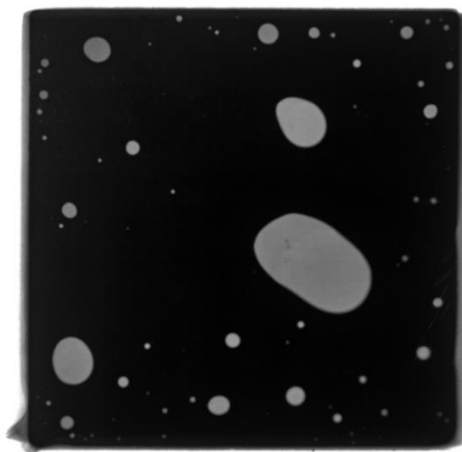
4.7 RTG analýza

Pomocí zařízení GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T byla realizována rentgenová analýza všech zapájených vzorků. Jedná se o nedestruktivní metodu kontroly, která umožňuje odhalit voidy uvnitř pájených spojů. Na následujícím obrázku (Obr. 17) lze pozorovat toto zařízení v procesu rentgenové analýzy vzorku.

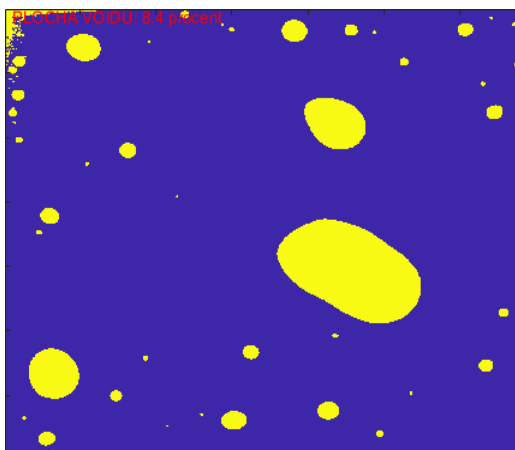


Obrázek 17 – GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T

Rentgenově analyzováno bylo všech 648 vzorků. Výstupem byly RTG snímky (Obr. 18), na kterých světlá místa představují voidy v pájených spojích. Získané snímky byly dále vyhodnoceny s použitím softwaru Matlab. Nejprve byla vybrána vyhodnocovací oblast snímku a následně vyčíslena procentuální plocha voidů uvnitř pájeného spoje (Obr. 19).



Obrázek 18 – Pořízený RTG snímek



Obrázek 19 – RTG snímek s vyznačenými voidy

4.8 Vyhodnocení

Jak již bylo řečeno, získaná data ze softwaru Matlab byla dále zpracována a vyhodnocena. V praktické části byly použity 3 typy DPS, které se od sebe lišily nepájivou maskou. Při nanášení pájecí pasty byly rovněž využity 3 typy šablon s různým tvarem a tloušťkou. Na zapájení zhotovených vzorků byly aplikovány 2 pájecí pasty typu SAC305. Výsledky experimentu udává tabulka č. 4 a na grafech (č. 2 – 6) v následujících podkapitolách lze vidět procentuální plochu voidů k celkové ploše spoje pro jednotlivé DPS, použité šablony (kap. 4.7.2) a pájecí pasty (kap. 4.7.3). Jelikož jsou na jedné DPS 4 skupiny pájecích plošek rozdělené po 9, byla dále zkoumána jejich variabilita voidovitosti v rámci jednotlivých pozic na desce (kap. 4.7.4).

Tabulka 4 – Získaná a zpracovaná data

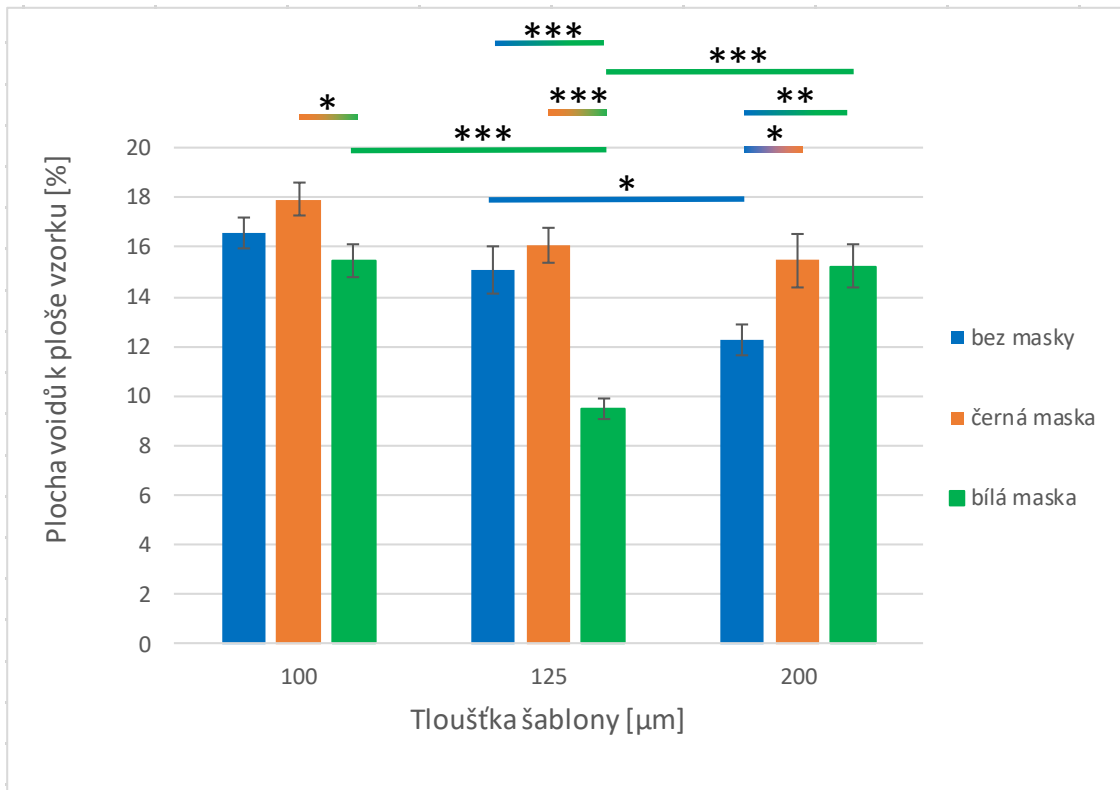
Tloušťka šablony [μm]	Typ DPS	Pájecí pasta	Průměrná plocha voidů k celkové ploše spoje		SE [%]
			[mm ²]	[%]	
100	bez masky	M8	6,37	16,57	0,61
		NC257-2	4,98	12,96	0,53
	černá maska	M8	6,89	17,92	0,65
		NC257-2	5,06	13,16	0,51
	bílá maska	M8	5,94	15,45	0,67
		NC257-2	3,95	10,28	0,43
125	bez masky	M8	5,80	15,09	0,92
		NC257-2	4,02	10,45	0,66
	černá maska	M8	6,19	16,09	0,69
		NC257-2	4,93	12,84	0,52
	bílá maska	M8	3,66	9,51	0,41
		NC257-2	4,10	10,67	0,41
200	bez masky	M8	4,72	12,27	0,60
		NC257-2	6,06	15,76	0,82
	černá maska	M8	5,95	15,48	1,06
		NC257-2	7,15	18,60	0,68
	bílá maska	M8	5,85	15,22	0,86
		NC257-2	6,94	18,06	0,68

4.8.1 Statistické zpracování dat

Pro datovou analýzu byl použit oboustranný dvouvýběrový t-test pro nezávislé průměry na hladině významnosti 95 % ($\alpha = 0,05$). Využit byl online dostupný software Social Science Statistics [20]. Symbol * na grafech (č. 2 – 6) v následujících podkapitolách (kap. 4.7.2 a 4.7.3) udává míru signifikance (* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$) daného srovnání.

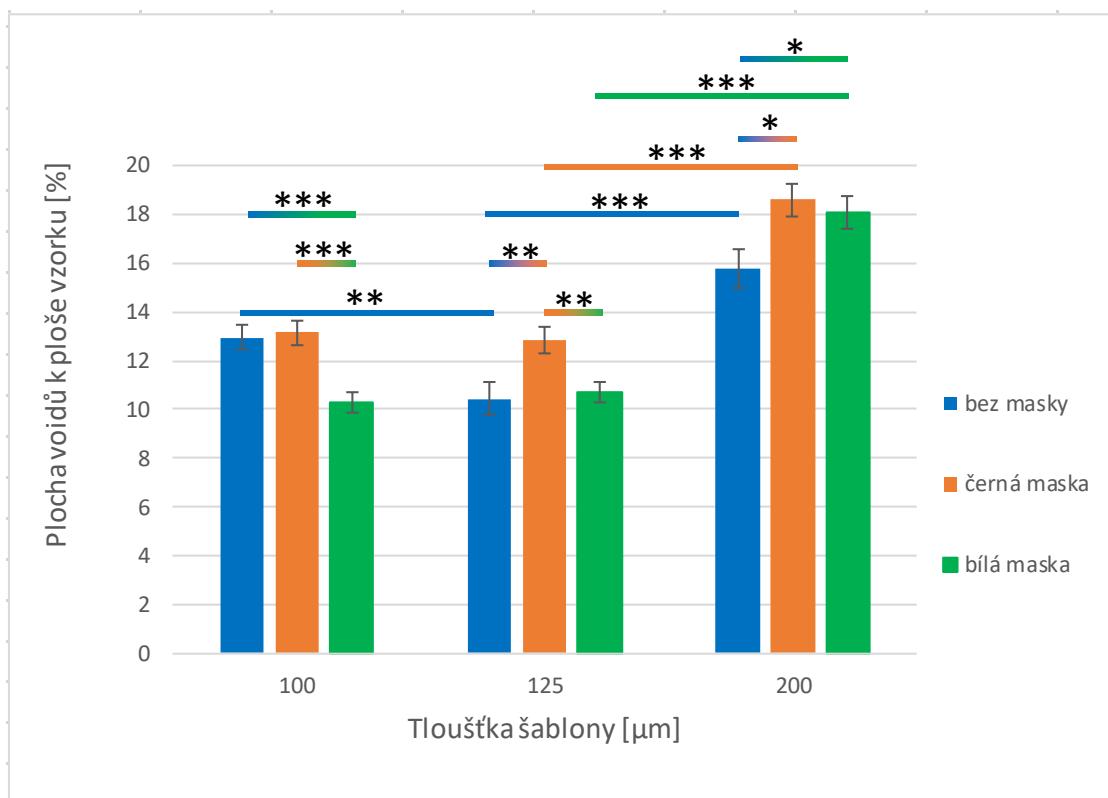
Variabilita pozic pájecích plošek na DPS byla testovaná metodou ANOVA (FDR = 0,05) a vizualizována pomocí heatmapy (kap. 4.7.4, Obr. 20) s využitím online dostupného softwaru MetaboAnalyst [21].

4.8.2 Vyhodnocení vlivu různých typů DPS a šablon



Graf 2 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u použité pájecí pasty SAC305 M8 s ohledem na použitý typ DPS a šablony pro nanesení pájecí pasty

Jak je patrné z grafu č. 2, při rozdělení nanášené pájecí pasty na menší části dochází k rovnoměrnějšímu rozlití a zmenšení plochy voidů ve vzorku. Tento trend se potvrdil u DPS bez nepájecí masky a též u DPS s černou nepájecí maskou. Naopak u DPS s bílou nepájecí maskou se při použití šablony s tloušťkou 200 μm objevil signifikantní nárůst plochy voidů ve vzorku. Avšak u tohoto typu DPS bylo dosaženo nejmenší plochy dutin v pájeném spoji za využití šablony 125 μm.

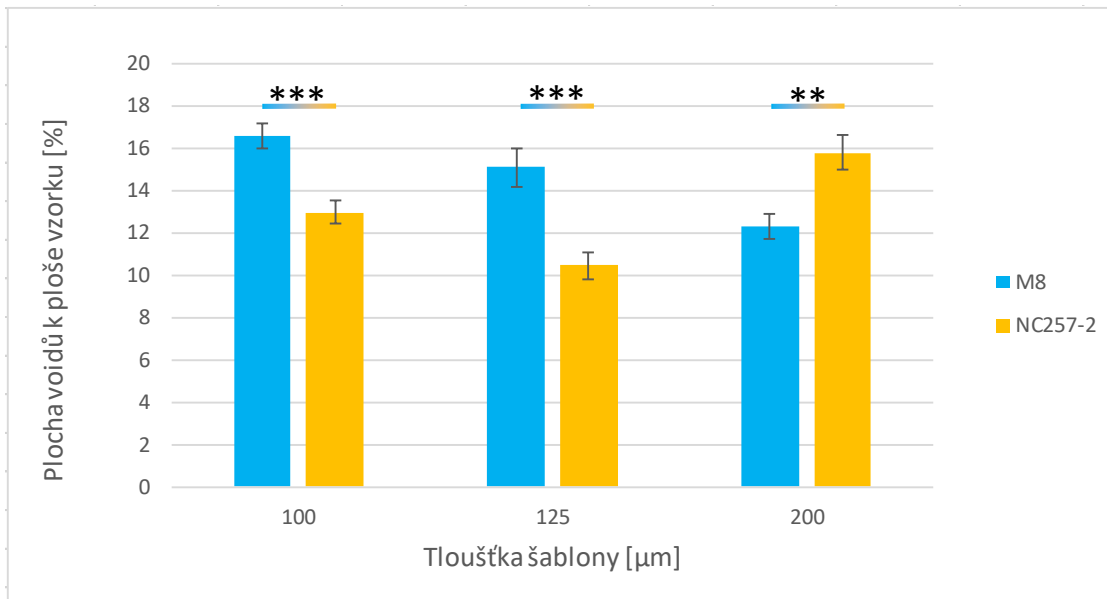


Graf 3 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u použité pájecí pasty SAC305 NC257-2 s ohledem na použitý typ DPS a šablony pro nanesení pájecí pasty

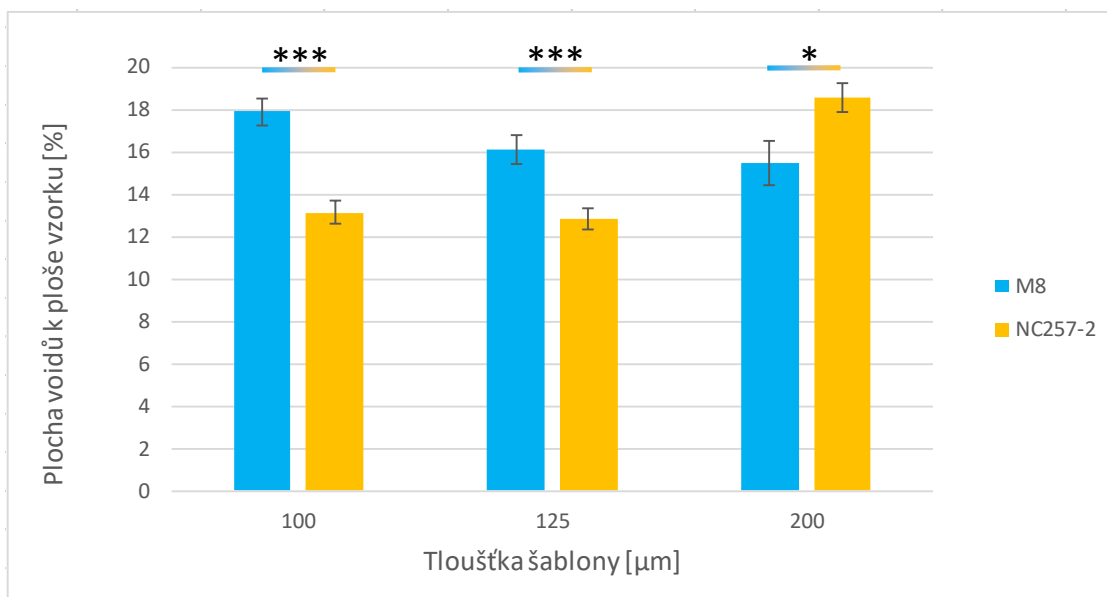
U grafu č. 3 je na první pohled viditelné, že při použití šablony s tloušťkou 200 μm se u všech použitých typů DPS signifikantně zvýšila plocha voidů ve vzorku. Největší nárůst je vidět u DPS s černou nepájkivou. Ovšem u tohoto typu DPS a též u DPS bez nepájkivé masky se za využití šablony s tloušťkou 125 μm zachovává trend poklesu plochy voidů ve vzorku. Opačně je tomu u DPS s bílou nepájkivou maskou, kde plocha voidů postupně narůstá, i když rozdíl při použití šablon s tloušťkou 100 μm a 125 μm není signifikantně odlišný.

Podle použitého typu DPS docházelo před procesem přetavení k odlišnému roztékání tavidla. Jelikož méně tavidla ve spoji při přetavení ústí ve snížení počtu voidů, měnila se s použitým povrchem nepájkivé masky voidovitost. Nejlepší roztékavost tavidla byla na bílé nepájkivé masce. Tento výsledek je v souladu se závěry studie od P. Veselý a kol. z roku 2020 [22]. Nárůst voidovitosti při použití šablony s tloušťkou 200 μm může být předmětem dalšího zkoumání.

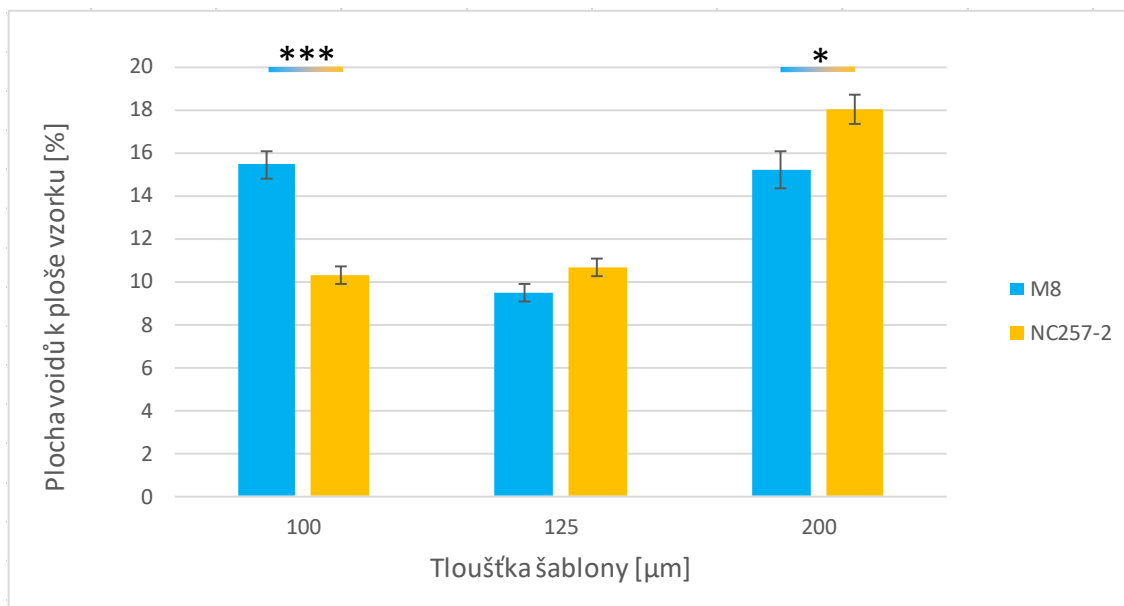
4.8.3 Vyhodnocení vlivu použitých pájecích past



Graf 4 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u DPS bez nepájkivé masky s povrchovou úpravou chemický cín Ormecon s ohledem na použité pájecí pasty a šablony pro nanesení pájecí pasty



Graf 5 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u DPS s černou nepájkivou maskou a povrchovou úpravou chemický cín Ormecon s ohledem na použité pájecí pasty a šablony pro nanesení pájecí pasty

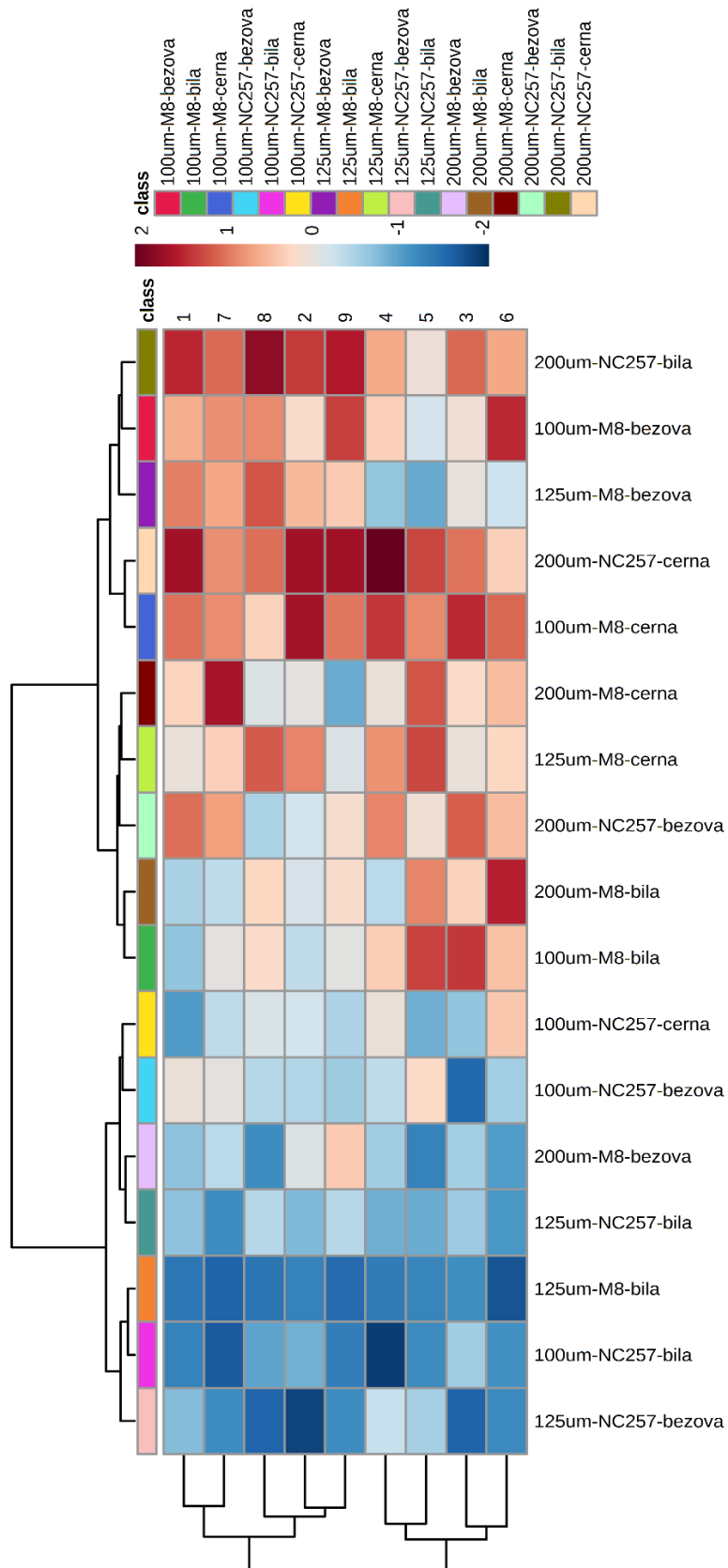


Graf 6 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u DPS s bílou nepájivou maskou a povrchovou úpravou chemický cín Ormecon s ohledem na použité pájecí pasty a šablony pro nanesení pájecí pasty

Z grafů č. 4, č. 5 a č. 6 vyplývá, že výběr odpovídající pájecí pasty má na tvorbu voidů v pájeném spoji zásadní vliv. I když se námi zvolené pájecí pasty liší pouze typem tavidla, rozdíl je zcela signifikantní. Jak je z grafů zřejmé, při použití šablony o tloušťce 200 μm dochází k signifikantnímu nárůstu plochy voidů u pájecí pasty SAC305 NC257-2 u všech vzorků. Avšak téměř ve všech zbylých případech je při použití této pájecí pasty plocha voidů k ploše vzorku o několik procent menší než při zapájení pastou SAC305 M8. Výjimkou je DPS s bílou nepájivou maskou za využití šablony o tloušťce 125 μm, kde je hodnota plochy voidů k celkové ploše spoje nejmenší z celého experimentu.

Teoretický předpoklad, že rozdělení pájecí pasty na menší části povede k rovnoměrnějšímu rozlití a snížení plochy voidů, se potvrdil pouze u části testovaných vzorků. To bylo pravděpodobně způsobeno odlišnou roztékavostí tavidel obsažených v použitých pastách. Neboť množství tavidla, které zůstane ve spoji před přetavením pájecí pasty má vliv na voidovitost výsledného plošného spoje.

4.8.4 Vyhodnocení variability voidovitosti pájecích plošek na DPS



Obrázek 20 – Heatmapa zobrazující variabilitu voidovitosti pájecích plošek na DPS [21]

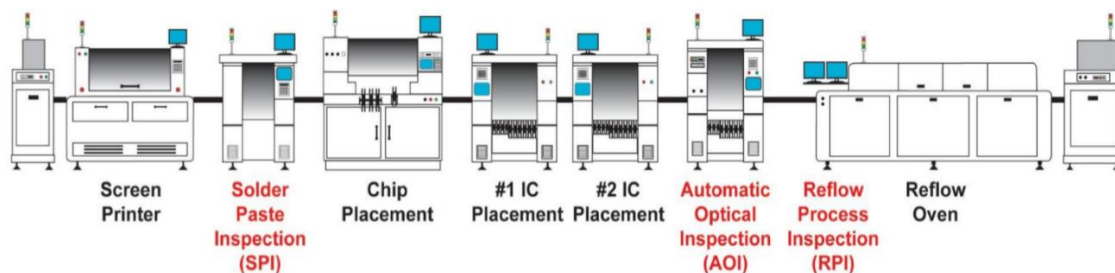
Z heatmapy na obrázku č. 20 vyplývá, že se voidovitost jednotlivých pozic pájecích plošek mezi sebou liší. Minimální voidovitost dané pozice pájecí plošky ve skupině na DPS je reprezentována tmavě modrou barvou, maximální voidovitost tmavě červenou. Při pohledu na heatmapu je patrné, že u některých testovaných kombinací je variabilita výraznější. Tyto kombinace nejsou vhodné. Z hlediska snížení voidovitosti nás zajímají především kombinace, kde je variabilita pozic pájecích plošek co nejnižší, a tedy uniformní. Takovou kombinací je DPS s bílou nepájkivou maskou a povrchovou úpravou chemický cín Ormecon při použití šablony tloušťky 125 μm a zapájení pastou SAC305 M8 (125um-M8-bila). Tato kombinace dosáhla nejnižší voidovitosti ze všech testovaných pájecích plošek a současně nejnižší variability pozic.

5. Ekonomická část

Cílem technickoekonomické studie je navrhnout a posléze správně vyhodnotit potenciální varianty technologie nebo technologického procesu, které lze uvažovat jako možnost pro realizaci daného investičního projektu a následně určit optimální variantu. [15]

Změna technologie pájecí linky by měla snížit chybovost vyráběných produktů z důvodu tvorby voidů. Ačkoliv by nově pořízený stroj dokázal minimalizovat chyby během procesu pájení, jedná se o poměrně velkou investici. V této části práce bude ekonomicky zhodnocena tato změna výrobního procesu.

Příklad pájecí linky a technologický proces na vytvoření výsledného pájeného spoje je zobrazen na následujícím obrázku (Obr. 21).



Obrázek 21 – Příklad pájecí linky [2]

5.1 Varianty technologií

Vzhledem k tomu, že bude zvažováno pořízení výrobní technologie na minimalizaci tvorby voidů, objektem zájmu je z celého procesu pájecí linky pouze pájení přetavením pájecí pasty, tedy reflow proces. Klasické přetavovací pece lze pořídit v rozmezí 1 300 000 Kč až 5 600 000 Kč podle speciálních požadavků zákazníka (délky topných tunelů, počet topných zón, počet chladících zón).

Pro minimalizaci tvorby voidů v pájených spojích lze uvažovat investici do přetavovací pece s dusíkovou atmosférou. Cenová relace takové pece začíná přibližně na 2 300 000 Kč. Avšak z ekonomického hlediska je provoz pece s dusíkovou atmosférou příliš drahý, protože se spotřeba dusíku pohybuje okolo 25 m³/hod. Cena za metr krychlový dusíku je 1 300 Kč. Takovou technologii je možné nalézt u firem,

kde si koncový zákazník připlatí, nebo u výrobků, které to vyžadují a mají současně vysokou přidanou hodnotu.

Jako další možnost se jeví pájení ve vakuu. Použití vakua během tekuté fáze přetavené pájecí slitiny sníží objem voidů v ploše pod 1 %. Nejlevnější varianty těchto offline strojů stojí přibližně 2 400 000 Kč, ale výkonnější inline varianty strojů vychází až na 8 500 000 Kč.

5.2 Hodnocení investice

Na hodnocení investice do technologie pájecí linky byla vybrána metoda čisté současné hodnoty (NPV). Jedná se o jednu z nejpoužívanějších a nejvhodnějších metod pro hodnocení ekonomické efektivnosti investičních projektů. Tato metoda bere v úvahu faktor času, protože hodnota dnešních financí je větší než hodnota stejné částky v budoucnosti. Podstatou této metody je rozdíl mezi současnou hodnotou očekávaných výnosů (cash flow) a počátečními náklady na investici. [16]

Vzorec pro výpočet je následující:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - IN$$

Rovnice 1 – Vzorec čisté současné hodnoty [16]

NPV - čistá současná hodnota investice
IN - počáteční investice
i - diskont
t - období 1 až n
n - životnost projektu [16]

Investice se nám vyplatí, pokud nám vyjde čistá současná hodnota kladná. Při vybírání z více alternativ se stejnou životností upřednostníme tu, u které nám vyjde čistá současná hodnota nejvyšší.

Nejprve byl vytvořen nákladový model klasické přetavovací pece a z této základní varianty se následně vypočítala změna výnosů pro uvažované alternativy na základě jejich zmetkovitosti způsobené voidy.

5.3 Vstupní veličiny

5.3.1 Výrobní kapacita a cena výrobku

Cena výrobku se z větší části skládá z ceny základní desky, pájecí pasty a osazených součástek. Z tohoto důvodu spolu výrobní kapacita a cena výrobku zásadně souvisí, neboť podle náročnosti a množství součástek, které je třeba osadit na základní desku, se bude odvíjet čas výroby a též cena výrobku. Na základě konzultace u firmy ‘Continental‘ se pro výrobek s prodejní cenou 1 000 Kč stanovila výrobní produkce na 5 000 kusů za den. Ročně se vyrábí 250 pracovních dní.

5.3.2 Investice a náklady

Pod položkou údržby modelové přetavovací pece byly zvažovány různé typy kalibrací, servisních kontrol a rovněž opravy zařízení. Jako provozní náklady jsou zahrnuty chemikálie na čištění, maziva, korekce středové osy a filtry. Ovšem největším provozním nákladem, který byl u modelové přetavovací pece uvažován zvláště, je cena za spotřebu elektrické energie, která byla stanovena na základě předpokládaného příkonu 70 kW a tarifu pro firmy s vyšší spotřebou od společnosti ČEZ. Následující tabulka udává počáteční investici a roční náklady modelové přetavovací pece.

Tabulka 5 – Náklady modelové přetavovací pece

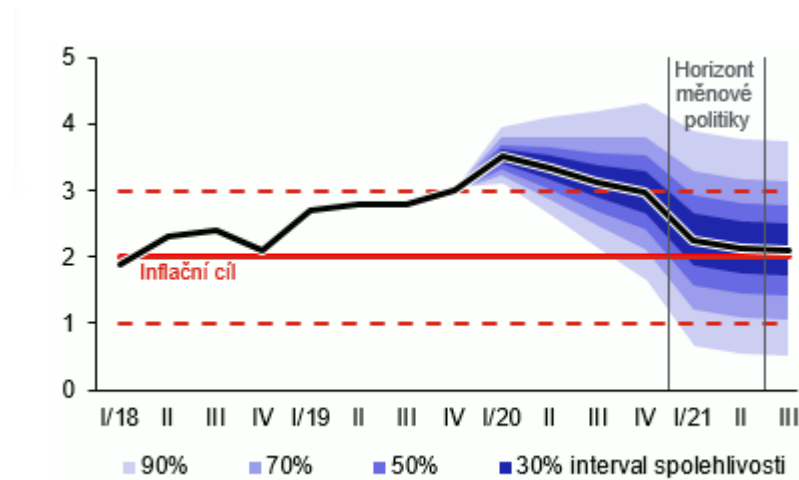
Investice	5 000 000 Kč
Náklady na el. energii	500 000 Kč
Provozní náklady	300 000 Kč
Údržba	70 000 Kč

5.3.3 Odpisy

Odpisy vyjadřují opotřebení dlouhodobého majetku a dle zákona č. 586/1992Sb., o daních z příjmů, se dlouhodobý majetek dělí do odpisových tříd. Uvažovaná modelová přetavovací pec spadá do druhé třídy, tudíž bylo použito rovnoměrné odepisování po dobu 5 let. V rámci zjednodušení je každý rok odepisována stejná částka.

5.3.4 Inflace

V dnešní době je velice obtížné stanovit míru inflace na příští rok, potažmo na několik let dopředu. Proto byl přejat inflační cíl ČNB celkové inflace ve výši 2 %.



Obrázek 22- Prognóza inflace [17]

5.3.5 Sazba daně

Za předpokladu, že vlastnictví přetavovací pece bude náležet právnické osobě, sazba daně z příjmů činí 19 %.

5.3.6 Diskont

Diskont byl zvolen ve výši 10 %. Tato hodnota odpovídá průměrné ceně kapitálu v daném odvětví a pokrývá inflaci, bezrizikový výnos a příplatek za riziko.

5.4 Nákladový model klasické přetavovací pece

Jak už bylo uvedeno, z celého procesu pájecí linky je zapotřebí změn pouze v procesu přetavení pájecí slitiny. Vzhledem k této skutečnosti byly nejprve vyčísleny náklady klasické přetavovací pece během její životnosti, neboť výměna technologie či technologického procesu nezmění základní provozní náklady a náklady na údržbu. S výměnou technologie bude docházet k úspoře financí se sníženou zmetkovitostí.

Životnost uvažované přetavovací pece je po konzultaci stanovena na 10 let s vysokou pravděpodobností prodloužení provozuschopnosti na další období. Bylo rozhodnuto o rovnoměrném odepisování po dobu 5 let. O míru inflace, která činí 2 %, se bude každý rok navyšovat cena elektrické energie a provozní náklady. Náklady na údržbu porostou následující rok vždy o 5 %, neboť s mírou inflace je zde zohledněna zvyšující se poruchovost zařízení. Zmetkovitost způsobená voidy byla u modelové přetavovací pece stanovena ve výši 2 %.

Tabulka 6 – Nákladový model přetavovací pece

Roky	0	1	2	3	4	5
Odpisy [Kč]		1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000
El. energie [Kč]		500 000	510 000	520 200	530 604	541 216
Údržba [Kč]		70 000	73 500	77 175	81 034	85 085
Provozní náklady [Kč]		300 000	306 000	312 120	318 362	324 730
Změna výnosů [Kč]		25 000 000	25 000 000	25 000 000	25 000 000	25 000 000
Investice [Kč]	5 000 000					

Tabulka 6 pokračování – Nákladový model přetavovací pece

Roky	6	7	8	9	10
Odpisy [Kč]					
El. energie [Kč]	552 040	563 081	574 343	585 830	597 546
Údržba [Kč]	89 340	93 807	98 497	103 422	108 593
Provozní náklady [Kč]	331 224	337 849	344 606	351 498	358 528
Změna výnosů [Kč]	25 000 000	25 000 000	25 000 000	25 000 000	25 000 000
Investice [Kč]					

Z tabulky č. 6 vyplývá, že roční změna výnosů způsobená voidy je 25 000 000 Kč. Takto vysoká částka je dána poměrně velkou výrobou, tudíž i malé snížení zmetkovitosti by mělo vést k velké úspoře.

5.5 Vakuová přetavovací pec

Nejlepší variantou nové technologie na minimalizaci tvorby voidů se jeví vakuová přetavovací pec. Použití vakua by mělo spolehlivě snížit chybovost způsobenou voidy. Tato pec navíc dokáže zajistit požadovaný teplotní profil i přes vysoké teplotní rozdíly mezi jednotlivými topnými zónami. Díky aktivnímu ochlazování se zajišťuje teplotní odolnost mezi zónami s vyšší a nižší teplotou, aby nedocházelo k přenosu tepla do sousední zóny.

K výpočtu NPV tohoto investičního projektu byl použit nákladový model klasické přetavovací pece z předchozího bodu, ve kterém bylo nutné provést několik změn. Počáteční investice do zařízení činí 8 000 000 Kč. Z tohoto důvodu je potřeba upravit výši odpisů, jelikož je zachováno rovnoměrné odepisování po dobu 5 let. V závislosti na složitější technologii této pece vzrostly náklady za rok o 120 000 Kč, které se navyšují každým rokem o míru inflace. Zmetkovitost této pece je stanovena na 0,9 %.

Tabulka 7 – Výpočet NPV vakuové přetavovací pece

Roky	0	1	2	3	4	5
Odpisy [Kč]		1 600 000	1 600 000	1 600 000	1 600 000	1 600 000
El. energie [Kč]		500 000	510 000	520 200	530 604	541 216
Údržba [Kč]		70 000	73 500	77 175	81 034	85 085
Provozní náklady [Kč]		300 000	306 000	312 120	318 362	324 730
Investice [Kč]	8 000 000					
Zvýšené náklady [Kč]		120 000	122 400	132 400	142 400	152 400
Změna výnosů [Kč]		11 250 000	11 250 000	11 250 000	11 250 000	11 250 000
Úspora [Kč]		13 750 000	13 750 000	13 750 000	13 750 000	13 750 000
CF budoucí	-8 000 000	11 344 300	11 342 356	11 334 256	11 326 156	11 318 056
CF diskontované	-8 000 000	10 313 000	9 373 848	8 515 594	7 735 917	7 027 622
NPV [Kč]	60 837 073					

Tabulka 7 pokračování – Výpočet NPV vakuové přetavovací pece

Roky	6	7	8	9	10
Odpisy [Kč]					
El. energie [Kč]	552 040	563 081	574 343	585 830	597 546
Údržba [Kč]	89 340	93 807	98 497	103 422	108 593
Provozní náklady [Kč]	331 224	337 849	344 606	351 498	358 528
Investice [Kč]					
Zvýšené náklady [Kč]	162 400	172 400	182 400	192 400	202 400
Změna výnosů [Kč]	11 250 000	11 250 000	11 250 000	11 250 000	11 250 000
Úspora [Kč]	13 750 000	13 750 000	13 750 000	13 750 000	13 750 000
CF budoucí	11 005 956	10 997 856	10 989 756	10 981 656	10 973 556
CF diskontované	6 212 575	5 643 639	5 126 802	4 657 294	4 230 781
NPV [Kč]					

Vypočtené NPV z tabulky č. 7 jasně dokazuje, že při daných podmínkách výroby se investice do vakuové přetavovací pece vyplatí. Jedná se ovšem o poměrně velkou investici a je otázkou, zda by firma chtěla potenciálně investovat do nové vakuové pece, když vlastní klasickou přetavovací pec v zánovním stavu.

5.6 Klasická přetavovací pec s novou pastou

Pro firmy, které již vlastní klasickou přetavovací pec, by bylo dobré navrhnout řešení ke snížení voidovitosti bez nutné výměny přetavovacího zařízení. Na základě výsledků experimentu z praktické části a konzultace u firmy ‘Continental’ se potvrdilo, že správný výběr pájecí pasty má na tvorbu voidů velký vliv. Tímto odladěním pájecí pasty by došlo ke snížení zmetkovitosti klasické přetavovací pece a nebylo by třeba uvažovat o investici do nové technologie.

Aby bylo možné provést výpočet NPV, bylo potřeba nejprve stanovit výši nákladů spojených s použitím nové pasty. Ty byly spočítány podle spotřeby pájecí pasty (4 g na jeden výrobek) a rozdílu cen oproti užití předchozí pasty. Jako původní pasta je uvažována pájecí pasta SAC305 M8 od společnosti ‘AIM Solder’, kde 500g balení stojí 2 500 Kč. Z důvodu snížení voidovitosti byla nově vybrána pasta SAC305 NC258 od téže firmy s cenou 3 000 Kč za 500g balení. Z této kalkulace vyplývá, že se náklady na jeden výrobek v závislosti na změně pasty zvýšily o 4 Kč. Tyto náklady spojené s použitím nové pasty na minimalizaci voidů rostou každým rokem o míru inflace. Zmetkovitost klasické přetavovací pece s novou pastou byla stanovena na 1,3 %.

Tabulka 8 – Výpočet NPV klasické přetavovací pece s novou pastou

Roky	0	1	2	3	4	5
Odpisy [Kč]		1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000	1 000 000
El. energie [Kč]		500 000	510 000	520 200	530 604	541 216
Údržba [Kč]		70 000	73 500	77 175	81 034	85 085
Provozní náklady [Kč]		300 000	306 000	312 120	318 362	324 730
Investice [Kč]	5 000 000					
Nová pasta [Kč]		5 000 000	5 100 000	5 202 000	5 306 040	5 412 161
Změna výnosů [Kč]		16 250 000	16 250 000	16 250 000	16 250 000	16 250 000
Úspora [Kč]		8 750 000	8 750 000	8 750 000	8 750 000	8 750 000
CF budoucí	-5 000 000	3 227 500	3 146 500	3 063 880	2 979 608	2 893 650
CF diskontované	-5 000 000	2 934 091	2 600 413	2 301 938	2 035 112	1 796 729
NPV [Kč]	12 437 359					

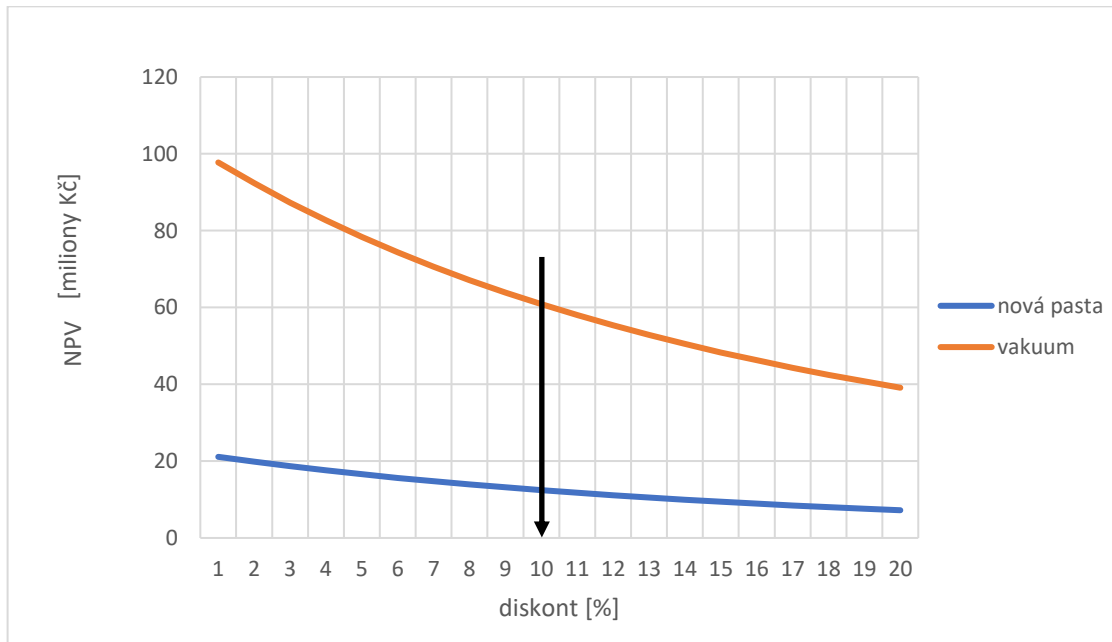
Tabulka 8 pokračování – Výpočet NPV klasické přetavovací pece s novou pastou

Roky	6	7	8	9	10
Odpisy [Kč]					
El. energie [Kč]	552 040	563 081	574 343	585 830	597 546
Údržba [Kč]	89 340	93 807	98 497	103 422	108 593
Provozní náklady [Kč]	331 224	337 849	344 606	351 498	358 528
Investice [Kč]					
Nová pasta [Kč]	5 520 404	5 630 812	5 743 428	5 858 297	5 975 463
Změna výnosů [Kč]	16 250 000	16 250 000	16 250 000	16 250 000	16 250 000
Úspora [Kč]	8 750 000	8 750 000	8 750 000	8 750 000	8 750 000
CF budoucí	2 615 973	2 526 542	2 435 323	2 342 280	2 247 375
CF diskontované	1 476 648	1 296 516	1 136 096	993 355	866 460
NPV [Kč]					

Vypočtené NPV z tabulky č. 8 ukazuje, jak je správná volba pájecí pasty u klasické přetavovací pece důležitá z hlediska chybovosti způsobené tvorbou voidů. Při daných podmínkách výroby dochází odladěním pájecí pasty k úspoře financí a vypočtená hodnota NPV udává, že se investování do nové pasty vyplatí.

5.7 Citlivostní analýza

Pro doplnění studie byla sestrojena následující citlivostní analýza (Graf č. 7), pomocí které je možné sledovat změny výsledků jednotlivých variant v závislosti na nastavení určitého parametru. Zde se ukázalo, jak se diskont projeví na ekonomické efektivnosti daného investičního projektu.



Graf 7 – Závislost NPV jednotlivých variant na diskontu

V závislosti na měnícím se diskontu se pořadí jednotlivých variant z hlediska ekonomické efektivnosti nemění. Varianta vakuové pece je z ekonomického pohledu výhodnější pro všechny uvažované hodnoty diskontu, i když trend poklesu je výraznější než u varianty klasické přetavovací pece s novou pastou. Veškeré výpočty NPV v předchozích kapitolách byly provedeny pro diskont 10 %.

5.8 Vyhodnocení ekonomické části

Cílem studie bylo navrhnout ekonomicky výhodnou variantu na snížení voidovitosti novým zařízením nebo technologickým procesem během fáze přetavení. Jako vyhodnocovací kritérium byla použita metoda NPV. Z vypočtených hodnot NPV se jako optimální varianta jeví vakuová přetavovací pec. Použití vakua během procesu přetavení dokáže výrazně snížit zmetkovitost pájecí pece. Avšak investice do nového zařízení je poměrně nákladná a je otázkou, zda by firma investovala do nové pece, pokud již vlastní klasickou přetavovací pec. Proto může varianta klasické přetavovací pece s novou pastou na snížení počtu voidů této potenciální firmě vyhovovat.

Závěr

Voidy snižují celkovou jakost výsledného plošného spoje a mohou zapříčinit jeho zmetkovitost. Tato práce se proto zabývala problematikou výskytu voidů v pájených spojích. Teoretická část práce poskytla informace o pájení, pájecích slitinách a pastách. Též zde byla rozebrána problematika výskytu a tvorby voidů.

V praktické části byly nejprve navrženy virtuální modely DPS a šablon, které byly zapotřebí k experimentu. Následovalo osazení a zapájení jednotlivých typů DPS s pomocí dvou různých pájecích past typu SAC305. Vzorky, v celkovém počtu 648, byly podrobeny RTG analýze a následně vyhodnoceny s ohledem na voidovitost. Z výsledků analýzy je patrné, že v závislosti na použitém typu DPS docházelo k odlišnému roztékání tavidla, které má vliv na celkovou voidovitost výsledného spoje. Jako nejvhodnější varianta vyšla, z provedené analýzy, DPS s bílou nepájívou maskou a povrchovou úpravou chemický cín Ormecon. Vybrané pájecí pasty se lišily pouze typem tavidla, avšak tento rozdíl je z hlediska naměřené voidovitosti vzorků významný. Z provedeného experimentu vychází jako lepší varianta pájecí pasta SAC305 NC257-2. Z pohledu tloušťky šablony došlo k nárůstu voidovitosti při tloušťce šablony 200 μm . To mohlo být způsobeno motivem šablony s širšími mezerami, kde zřejmě došlo k roztečení tavidla do mezer mezi nanesenou pastou před jejím přetavením. Větší množství tavidla při přetavení by poté pravděpodobně způsobilo nárůst voidovitosti. Tuto hypotézu je však nutné dále ověřit navazujícími experimenty.

V závěrečné části této práce bylo provedeno ekonomické zhodnocení investice do pájecího zařízení za účelem snížení voidovitosti výrobků. Na základě dat od firmy 'Continental' bylo pro dané výrobní podmínky vypočteno NPV vakuové přetavovací pece. Z vypočtených hodnot vyplývá, že investice do této pece se vyplatí. Ovšem pro firmy, které již vlastní klasickou přetavovací pec, je vhodné upravit výrobní proces změnou pájecí pasty na snížení počtu voidů. Vypočtené NPV tuto skutečnost dokazuje.

Seznam použitých zkratk

- **DPS** – deska plošného spoje
- **SMD** – Surface Mount Device – součástky pro povrchovou montáž
- **UV** – Ultra Violete – ultrafialové
- **RTG** – rentgen, rentgenové
- **BGA** – Ball Grid Array – typ pouzdra integrovaného obvodu pro povrchovou montáž
- **SAC pájky** – SnAgCu pájky
- **FR4** – materiál pro výrobu DPS – tkanina ze skelných vláken sycená epoxidovou pryskyřicí
- **ČNB** – Česká národní banka
- **NPV** – Net Present Value – čistá současná hodnota
- **SE** – Standard Error – střední chyba průměru
- **ANOVA** – Analysis Of Variance – analýza rozptylu
- **FDR** – False Discovery Rate – korekce falešně pozitivních výsledků

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 – Rozdělení pájecích past dle normy ANSI J-STD-005 [2]</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 2 – Specifikace použitých past [18],[19]</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 3 – Nastavení teplotních zón pece Mistral 260.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 4 – Získaná a zpracovaná data</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 5 – Náklady modelové přetavovací pece</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 6 – Nákladový model přetavovací pece</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 6 pokračování – Nákladový model přetavovací pece</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 7 – Výpočet NPV vakuové přetavovací pece.....</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 7 pokračování – Výpočet NPV vakuové přetavovací pece.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 8 – Výpočet NPV klasické přetavovací pece s novou pastou.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 8 pokračování – Výpočet NPV klasické přetavovací pece s novou pastou.....</i>	<i>46</i>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 – Ishikawův diagram pro proces pájení [7]</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2 – Základní kombinace slitin, teploty tavení jednotlivých prvků a vliv na vlastnosti pájky [10].....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 3 – Závislost podílu oxidů na průměru zrn [11]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 4 – Princip tisku sítotiskem [11].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5 – Faktory ovlivňující vznik dutin [10]</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 6 – Vznik voidu [11]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 7 – Mikro dutiny v BGA spoji [13]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 8 – Shrinkage voidy [14]</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 9 – Mikrovia void [14].....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 10 – Výskyt Kirkendallových voidů [13]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 11 – Pinhole voidy na DPS [12].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 12 – Návrh DPS.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 13 – Návrh šablony s tloušťkou 200 μm</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 14 – 3 typy testovaných DPS</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 15 – Použité šablony s různým motivem a tloušťkou</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 16 – Pec Mistral 260.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 17 – GE PHOENIX X-RAY NANOMEX 180T.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 18 – Pořízený RTG snímek</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 19 – RTG snímek s vyznačenými voidy</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 20 – Heatmapa zobrazující variabilitu voidovitosti pájecích plošek na DPS [21].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 21 – Příklad pájecí linky [2].....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 22- Prognóza inflace [17]</i>	<i>41</i>

Seznam grafů

<i>Graf 1 – Použitý teplotní profil pro přetavení</i>	<i>28</i>
<i>Graf 2 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u použité pájecí pasty SAC305 M8 s ohledem na použitý typ DPS a šablony pro nanesení pájecí pasty.....</i>	<i>32</i>
<i>Graf 3 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u použité pájecí pasty SAC305 NC257-2 s ohledem na použitý typ DPS a šablony pro nanesení pájecí pasty</i>	<i>33</i>
<i>Graf 4 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u DPS bez nepájivé masky s povrchovou úpravou chemický cín Ormecon s ohledem na použité pájecí pasty a šablony pro nanesení pájecí pasty</i>	<i>34</i>
<i>Graf 5 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u DPS s černou nepájivou maskou a povrchovou úpravou chemický cín Ormecon s ohledem na použité pájecí pasty a šablony pro nanesení pájecí pasty.....</i>	<i>34</i>
<i>Graf 6 – Procentuální plocha voidů k celkové ploše spoje u DPS s bílou nepájivou maskou a povrchovou úpravou chemický cín Ormecon s ohledem na použité pájecí pasty a šablony pro nanesení pájecí pasty.....</i>	<i>35</i>
<i>Graf 7 – Závislost NPV jednotlivých variant na diskontu</i>	<i>47</i>

Seznam rovnic

Rovnice 1 – Vzorec čisté současné hodnoty [16].....39

Seznam použité literatury

- [1] PIETRIKOVÁ A., ĎURIŠIN J., MACH P.: *Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike*. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2
- [2] DUŠEK K.: *Pájení* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2019. Přednášky z předmětu Svařování a pájení v elektrotechnice BVB13SPE – Přednášky, Studijní materiály - 11.Přednáška PÁJENÍ ÚVOD I [cit. 28.11.2019]
Dostupné z:
<https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=121847>
- [3] MIKEŠOVÁ B.: *Klasické a moderní metody pájení v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Martin Hirman. [cit. 28.11.2019]
Dostupné z:
https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27807/1/BP_Mikesova.pdf
- [4] MATRAS J.: *Vliv povrchových úprav DPS na pájitelnost při pájení v parách* [online]. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D. [cit. 28.11.2019]
Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=129491
- [5] NOVOTNÝ J.: *Testování pájitelnosti pomocí Concoat MUST SYSTEM II* [online]. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Tomáš Novák. [cit. 28.11.2019]
Dostupné z:
https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/4751/1/Novotny_Jan_Testovani_pajitelnosti_pomoci_Concoat_MUST_SYSTEM_II.pdf
- [6] ABEL M.: *SMT Technologie povrchové montáže*. Vyd. 1. Pardubice: Platan, 2000, ISBN: 80-902733-1-9
- [7] SZENDIUCH I.: *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. [cit. 28.11.2019]
Dostupné z:
<https://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>

- [8] NOVÁK T.: *Testování pájitelnosti v inertní atmosféře* [online]. Západočeská univerzita v Plzni. Katedra technologií a měření. [cit. 27.12.2019]
Dostupné z:
<https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/498/1/novak.pdf>
- [9] LABAJ R.: *Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje* [online]. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. [cit. 27.12.2019]
Dostupné z:
<https://core.ac.uk/download/pdf/30297738.pdf>
- [10] WIRTH V.: *Vliv intermetalických sloučenin na kvalitu bezolovnatého pájeného spoje* [online]. Plzeň, 2017. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Školitel doc. Ing. František Steiner, Ph.D. [cit. 28.12.2019]
Dostupné z:
https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27034/1/disertacni%20prace_Wirth.pdf
- [11] STUNA J.: *Pájecí pasty pro bezolovnaté pájení a jejich vliv na spolehlivost* [online]. Plzeň, 2016. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce doc. Ing. František Steiner, Ph.D. [cit. 28.12.2019]
Dostupné z:
https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/22917/1/Pajeci_pasty_pro_bezolovnate_pajeni_a_jejich_vliv_na_spolehlivost.pdf
- [12] ŠIMON V.: *Mechanismy vzniku dutin u bezolovnatých pájených spojů a vliv na spolehlivost* [online]. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. [cit. 30.12.2019]
Dostupné i online z:
<https://core.ac.uk/download/pdf/30282916.pdf>
- [13] KOUBA O.: *Dutiny v pájených spojích* [online]. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. František Wirth. [cit. 30.12.2019]
Dostupné z:
https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/23125/1/BP_Dutiny%20v%20pajenych%20spojich_Ondrej%20Kouba.pdf

- [14] DUŠEK K.: *Pájení* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2019. Přednášky z předmětu Svařování a pájení v elektrotechnice BVB13SPE – Přednášky, Studijní materiály - 12.Přednáška PÁJENÍ ÚVOD 2 [cit. 30.12.2019]
Dostupné z:
<https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=121848>
- [15] Doc. Ing. Jiří Fotr, CSc.: *Jak připravit optimální podnikatelský projekt*. Praha: EUROVIA, Top Management Consultants, ISBN: 80-901186-0-7
- [16] KENTON W.: Net Present Value. In: *Investopedia.com* [online]. [cit. 30.12.2019]
Dostupné z:
<https://www.investopedia.com/terms/n/npv.asp>
- [17] Aktuální prognóza inflace ČNB [online]. [cit. 25.3.2020]
Dostupné z:
<https://www.cnb.cz/cs/menova-politika/prognoza/>
- [18] M8 NO CLEAN SOLDER PASTE: Technical datasheet. In: *aimsolder.com* [online]. [cit. 15.4.2020]
Dostupné z:
https://aimsolder.com/sites/default/files/m8_solder_paste_tds.pdf
- [19] NC257-2 NO CLEAN SOLDER PASTE: Technical datasheet. In: *aimsolder.com* [online]. [cit. 15.4.2020]
Dostupné z:
https://aimsolder.com/sites/default/files/nc257-2_solder_paste_tds.pdf
- [20] T-Test Calculator for 2 Independent Means, Social Science Statistics. In: *socscistatistics.com* [online]. [cit. 10.5.2020]
Dostupné z:
<https://www.socscistatistics.com/cite.aspx>
- [21] MetaboAnalyst – statistical, functional and integrative analysis of metabolomics data. In: *metaboanalyst.ca* [online]. [cit. 10.5.2020]
Dostupné z:
<https://www.metaboanalyst.ca/docs/About.xhtml>
- [22] VESELÝ P., BUŠEK D., KRAMMER O. a DUŠEK K.: Analysis of no-clean flux spatter during the soldering process. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. Elsevier. January 2020, Vol: 275. ISSN: 0924-0136 [cit. 13.5.2020]
Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619302614>

Přílohy

Příloha 1. – CD s podklady k této bakalářské práci

Obsah CD:

- Skript použitý pro vyhodnocování vzorků v softwaru Matlab
- Návrhy DPS a šablon v programu Eagle
- Data v tabulkách a grafy ve formátu XLSX