

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



Studie vzniku voidů u bezolovnatého pájení

Study of void formation in lead-free soldering

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Technologické systémy

Autor práce: Bc. Marek Teringl

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

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Teringsl** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **474422**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Technologické systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Studie vzniku voidů u bezolovnatého pájení

Název diplomové práce anglicky:

Study of void formation in lead-free soldering

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s možnými chybami u technologie pájení se zaměřením na voidy a příčiny jejich vzniku
- 2) Připravte si vzorky pájených spojů s ohledem na sledování vlivu vybraného technologického parametru na výskyt voidů.
- 3) Takto připravené vzorky analyzujte pomocí RTG a výsledky analýz vyhodnoťte.

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] Pietriková A., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálov pre vodivé spájanie v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Košice 2010, ISBN: 978-80-553-0447-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **26.01.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2023**

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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 20. 5. 2022

.....
Podpis

Poděkování

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

Dále bych rád poděkoval Ing. Petrovi Veselému, Ph.D. za pomoc s přípravou vzorků a také bych rád poděkoval Jaromíru Šebestovi za konzultace, cenné rady a pomoc při analýze vzorků.

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

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na vznik dutin v bezolovnatých pájených spojích. Teoretická část práce se zabývá teorií pájení, složením a vlastnostmi bezolovnatých pájecích slitin. Dále je probrán výskyt a tvorba dutin v pájených spojích. Praktická část se zabývá vytvořením návrhu DPS a šablon. Vytvořené vzorky jsou podrobeny RTG kontrole a vyhodnoceny s ohledem na jejich technologické parametry. Výsledkem práce je zhodnocení kombinací DPS a použitých pájecích past v závislosti na tvorbě dutin.

Klíčová slova

pájení, pájený spoj, DPS, voidy, bezolovnatá pájecí pasta, RTG

Abstract

This master thesis is focused on the creating the voids in lead-free solder joints. The theoretical part deals with the theory of soldering, composition and properties of lead-free solder alloys. The occurrence and formation of voids in solder joints is also discussed. The practical part deals with the creation of PCB design and templates. The created samples are subjected to X-ray inspection and evaluated with respect to the technological parameters of the samples. The result of this thesis is the evaluation of PCB combinations and opted solder pastes depending on the formation of voids.

Key words

soldering, solder joint, PCB, voids, lead-free solder paste, X-ray

OBSAH

Úvod	9
1. Pájení	10
1.1. Pájitelnost.....	12
1.1.1. Smáčení.....	13
1.1.2. Nesmáčení.....	13
1.1.3. Odsmásnění	13
1.2. Problémy pájitelnosti	14
1.2.1. Oxidace	14
1.2.2. Znečištění.....	14
1.2.3. Porézní povrch pájky	14
1.2.4. Nesprávné spojovací metalurgie	15
2. Typy součástek.....	16
2.1. SMD	16
2.2. THD.....	17
3. Pájecí slitiny a pasty	18
3.1. Pájecí slitiny	18
3.1.1. Bezolovnaté pájky.....	18
3.2. Pájecí pasty.....	21
3.2.1. Tavidla v pájecí pastě	23
3.2.2. Nanášení pájecích past.....	25
3.2.2.1. Nanášení pasty dávkováním	25
3.2.2.2. Sítotisk.....	26
3.2.2.3. Tisk přes šablonu	27
4. Voidy.....	28
4.1. Makro voidy	29

4.2. Mikro voidy	30
4.3. Shrinkage voidy	30
4.4. Mikrovia voidy	31
4.5. Kirkendallov (IMC) voidy	32
4.6. Pinhole voidy	33
5. Praktická část	34
5.1. Návrh DPS	34
5.2. Návrh šablon	35
5.3. Vyrobené DPS	35
5.4. Pájecí pasty	36
5.5. Šablonový tisk a osazení vytvořených DPS	38
5.6. Zapájení vzorků	40
5.7. RTG kontrola	41
5.8. Vyhodnocení	44
5.8.1. Vliv použitých kombinací DPS a šablon	46
5.8.2. Vliv pájecích past	48
5.8.3. Shrnutí	51
Závěr	52
Seznam použitých zkratk	54
Seznam tabulek	55
Seznam obrázků	56
Seznam grafů	58
Seznam použité literatury	59
Přílohy	62

Úvod

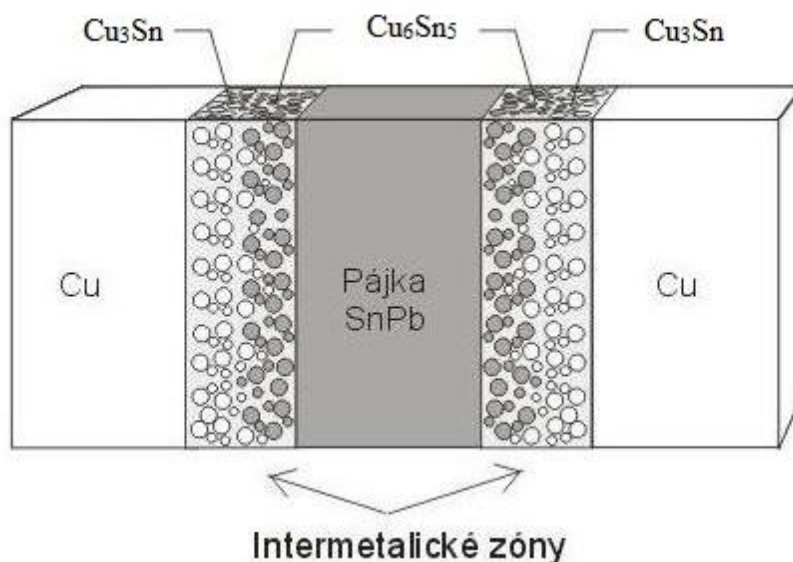
V této práci se zkoumala aktuální problematika u bezolovnatého pájení, tedy vznik a výskyt voidů. Právě pro výslednou kvalitu pájeného spoje představují voidy značný problém, neboť voidy jsou v podstatě dutiny zhoršující mechanické i elektrické vlastnosti pájeného spoje. Dříve používané olovené pájecí slitiny byly v tomto ohledu lepší a chybovost pájených spojů způsobená voidy nedosahovala takové míry. S přechodem na bezolovnaté pájky se z této problematiky stalo velice aktuální téma, protože zákazník je často ochoten si připlatit, pokud bude u výsledných pájených spojů voidovitost omezena na požadovanou výši.

Teoretická část se nejprve věnuje samotné technologii pájení a její problematice, kde následuje rozbor jednotlivých typů voidů a příčin jejich vzniku.

V praktické části práce bylo v první řadě zapotřebí vytvořit návrh DPS pro vybranou součástku a následně různé typy šablon, které mají rozdílné tvary, ale objem nanášené pájecí pasty zůstává zachován. Následovalo osazení DPS součástkami a zapájení v přetavovací peci. Poté byly všechny vzorky podrobeny nedestruktivní RTG kontrole a následně vyhodnoceny.

1. Pájení

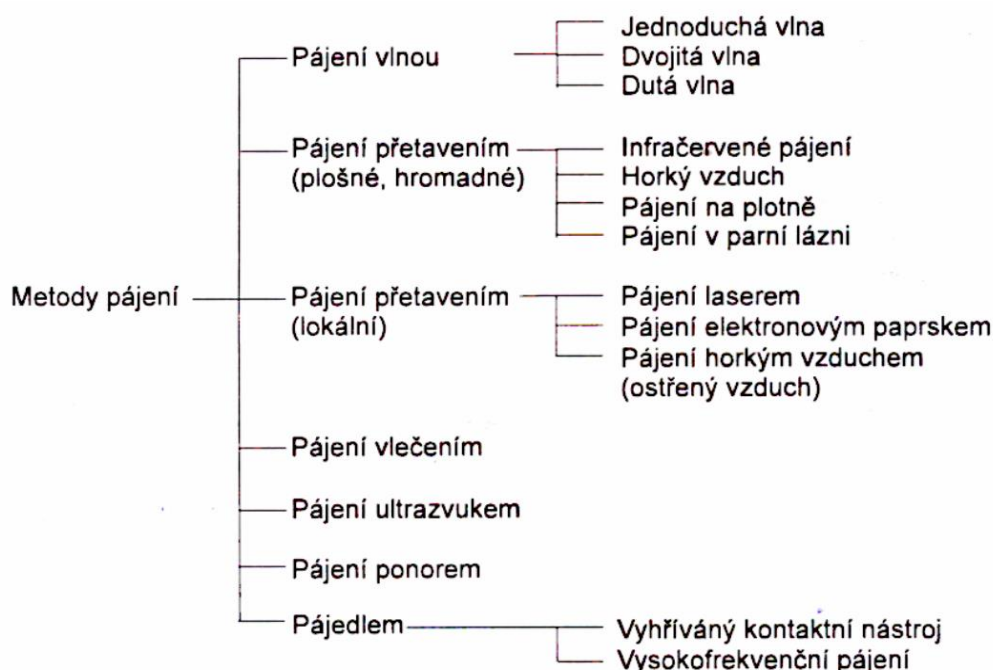
Pojem pájení je definován jako metalurgický způsob spojování kovových částí prostřednictvím roztaveného přídavného kovového materiálu neboli pájecí slitiny (pájky). Na rozdíl od svařování se zde spojované kovové části netaví, jsou pouze smáčeny roztavenou pájecí slitinou, která tedy musí mít teplotu tavení vždy nižší, než má spojovaný materiál. Během tohoto procesu se vytvářejí podmínky pro účinek adhezních a kohezních sil a následně dochází k difúzi atomů roztavené pájecí slitiny do spojovaného materiálu. Z tohoto důvodu vzniká mezi těmito dvěma kovy mezifázové rozhraní a výsledkem je intermetalický spoj. [1], [2], [3]



Obrázek 1 - Intermetalický spoj mezi SnPb pájkou a Cu substrátem [4]

Standartně se pájení rozděljuje na měkké a tvrdé. Tyto dva základní typy pájení se rozlišují na základě teploty tavení pájecí slitiny, kdy pro měkké pájení jsou brány teploty tavení do $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pro teploty tavení nad $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ se jedná o pájení tvrdé. Tvrdé pájení se používá často jako náhrada za sváření, tudíž na vytvoření mechanicky odolných pájených spojů. Měkké pájení se naopak využívá na výrobu elektromechanických pájených spojů, a proto se s tímto typem pájení setkáme především v oblasti elektrotechniky. [1], [3], [4]

Vývoj samotné technologie pájení v elektrotechnice byl doprovázený mnohými přeměnami, což vedlo ke vzniku velkého množství pájecích technik. Ovšem ze všeho nejdříve se používalo ruční pájení, kde se pájelo prostřednictvím pájedla. Následujícím milníkem se stalo hromadné pájení vlnou nebo vlečením, které bylo zapotřebí z důvodu vzniku výroby desek plošných spojů. S nárůstem popularity těchto technologií došlo k jejich významnému růstu a postupné automatizaci. Se stále vzrůstající poptávkou po pájení nových materiálů vznikala celá řada pájecích technik, kde jejich základní výčet je vidět na následujícím obrázku (Obr. 2). [1], [3]



Obrázek 2 - Metody pájení [1]

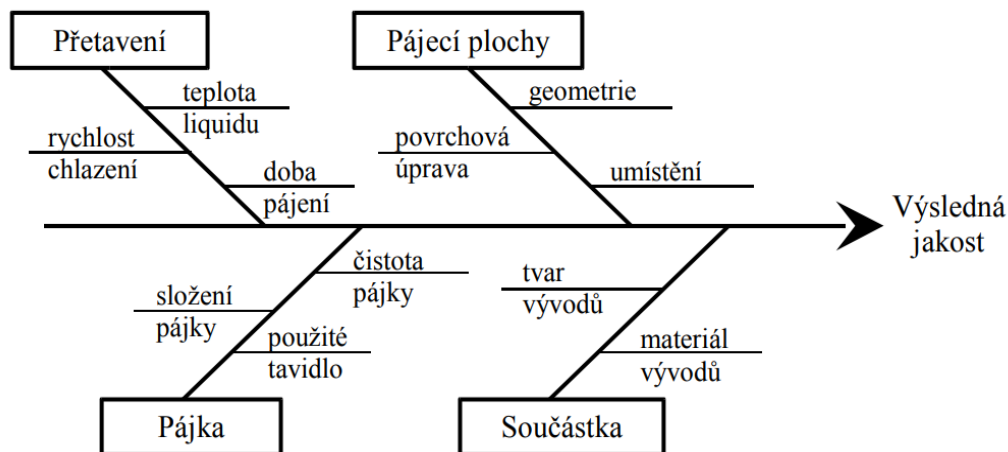
Uvedené metody pájení se mezi sebou liší především ve způsobu, jakým je pájka aplikována do pájeného spoje a dále typem přenosu tepla. Například u dříve zmíněného pájení vlnou dochází k aplikaci pájky z roztavené lázně pájecí slitiny. Naproti tomu u metody pájení přetavením dochází k nanesení pájky už před samotným procesem pájení. Právě tyto dvě metody jsou společně s pájením pájedlem nejvíce používané v praxi, protože vyhovují takřka všem požadavkům v oblasti elektrotechniky. [1]

1.1. Pájitelnost

Během procesu pájení není dostačující pouze na spojované materiály dodat roztavenou pájecí slitinu, ale je potřeba, aby spojované komponenty měly vhodnou pájitelnost. Pájitelnost je definována jako schopnost kovového povrchu být smáčen rovnoměrně a po celé ploše pájecí slitinou. Pájitelnost se tedy může lišit při aplikaci stejného spojovaného materiálu při různých použitých procesech. Pro pájitelnost je rozhodujícím kritériem kvalita povrchu spojovaného materiálu a použitá pájecí slitina, respektive její chemické složení. [3], [5]

Základní vlastnosti výsledného pájeného spoje jsou pak pevnost proti mechanickému namáhání, elektrická vodivost, odolnost proti korozi a oxidaci. Technologických faktorů, které budou ovlivňovat výslednou jakost pájeného spoje, je celá řada, jak je znázorněno na následujícím diagramu (Obr. 3), ale mezi základní faktory se řadí právě:

- pájecí slitina
- materiál pájecích ploch
- vývody součástek
- pájecí proces [3], [6]



Obrázek 3 - Ishikawův diagram pro proces pájení přetavením [6]

Při procesu pájení mohou nastat následující situace smáčení:

- smáčení
- nesmáčení
- odsmáčení

1.1.1. Smáčení

Pokud je splněna základní podmínka, že čistý kovový povrch má vyšší povrchovou energii, než je povrchová energie roztavené pájky, dojde ke smočení kovového povrchu pájecí slitinou, což má za následek vytvoření metalurgické vazby na rozhraní. Při postupujícím smáčení dochází na rozhraní k růstu tenké mezikovové vrstvy a vytváří se základ pro spolehlivý pájený spoj. [5]

1.1.2. Nesmáčení

Tato situace nastává, pokud použité tavidlo k podpoře pájení nemá dostatečnou aktivitu nebo pokud je vrstva oxidů na povrchu pájeného materiálu příliš silná. Nedochází tedy k vytvoření metalurgické vazby a rozhraní mezi pájecí slitinou a pájeným povrchem zůstává jasně zřetelné. [5]

1.1.3. Odsmáčení

Jedná se o případ, kdy pájecí slitina zpočátku pokryje celý pájený povrch, ale poté dojde k ustoupení pájky z již dříve smáčených oblastí. Pájecí slitina za sebou zanechává nepravidelné ostrůvky pájky, mezi kterými jsou oblasti s velmi tenkou vrstvou pájecí slitiny. Tato situace se nazývá odsmáčení. K této situaci může dojít, pokud je pájen povrch z drahých kovů, které se rychle a snadno rozpouští v pájecí slitině. [3], [5]

1.2. Problémy pájitelnosti

Pro zajištění dobré pájitelnosti základního materiálu se používají různé povrchové úpravy. Příkladem může být ponoření desky plošných spojů do roztavené pájky nebo galvanické pokovování. Pájený povrch by pak měl díky povrchové úpravě mít vyhovující pájitelnost po celou dobu skladování materiálu. Při procesu pájení se mohou objevit problémy s pájitelností z odlišných důvodů. V následujících podkapitolách jsou popsány typické příklady těchto problémů. [1]

1.2.1. Oxidace

U většiny případů je problém s pájitelností způsoben zoxidováním povrchu pájeného materiálu. Na podporu pájení se užívá tavidlo, které má za úkol vrstvu oxidu rozbít a odstranit. Ovšem pokud bude vytvořená vrstva oxidu příliš silná, tavidlo nemusí mít dostatečnou aktivitu a nedokáže oxid odstranit. Použitím povrchové úpravy tedy nelze ještě zaručit dobrou pájitelnost pájeného materiálu. Například před pokovovací úpravou základního materiálu je nezbytně nutné zkontrolovat, jestli základní materiál nemá na sobě vrstvu oxidu. Jinak by nastala situace, že sice by došlo k elektrochemickému pokovení stále pájitelných vrcholků dané vrstvy a po vizuální kontrole by byl tento povrch vyhovující. Avšak během pájení by se povrchová úprava na vrstvě oxidu odsmáčela a výsledkem by byl nesmáčený spoj. [1]

1.2.2. Znečištění

Veškeré znečištění, které se objeví na povrchu pájeného materiálu, velmi snižuje schopnost pájení. Na povrchu mohou být například zanechány zbytky a částičky nečistot z balícího materiálu či otisky prstů způsobené neopatrnou manipulací. [1]

1.2.3. Porézní povrch pájky

Pórovitost zvyšuje nárůst oxidace na spodní vrstvě povrchu, což má za následek nesmáčení na rozhraní mezi vrstvami. Tímto problémem trpí zejména nestejnoroadě povrchové úpravy, jako je tomu u elektropokovování. Pájitelnost se snižuje s narůstajícím výskytem oxidů. [1]

1.2.4. Nesprávné spojovací metalurgie

Kontakty vývodů součástek nebo pájecí plošky na DPS bývají často pokoveny zlatem, aby se zabránilo oxidaci. Ovšem pokud vrstva zlata bude příliš silná a dojde k rozpuštění její velké části do pájecí slitiny, zlato způsobí podstatné zkřehnutí a výsledný pájený spoj nebude mít odpovídající pevnost, i když vizuálně bude vypadat v pořádku.

[1]

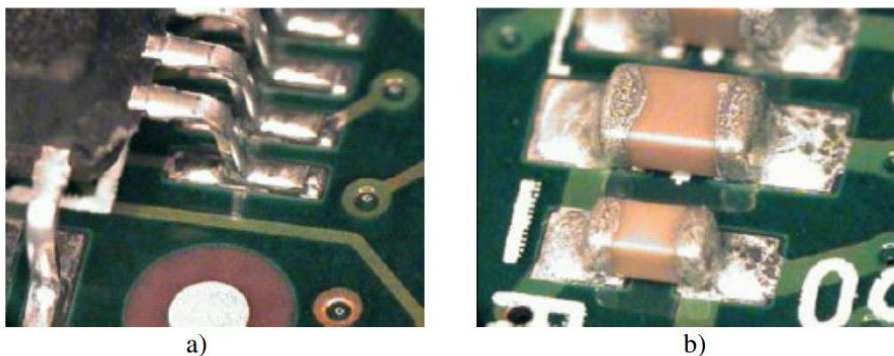
2. Typy součástek

Podle typu montáže na DPS se rozlišují dva základní druhy používaných součástek:

- Součástky pro povrchovou montáž (SMD)
- Součástky s drátovými vývody pro montáž do otvorů (THD) [3]

2.1. SMD

Součástky pro povrchovou montáž se dále rozdělují na typ vývodový a bezvývodový. Ovšem oba typy SMD se osazují přímo na pájecí plošky DPS a pájí se ze strany pouzdra součástky, průchozí otvory nejsou tedy zapotřebí. Vývodový typ je v porovnání se součástkami s drátovými vývody THD výrazně menší a vývody má zahnuté do rovnoběžné roviny s dolní plochou pouzdra, kde starší typy je mají zahnuté pod pouzdro (vývody ve tvaru písmene J) a novější ve směru od pouzdra (vývody ve tvaru písmene L). Bezvývodové součástky mají kontaktní plošky přímo na pouzdře. Příklady těchto součástek jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obr. 4). [3], [7]

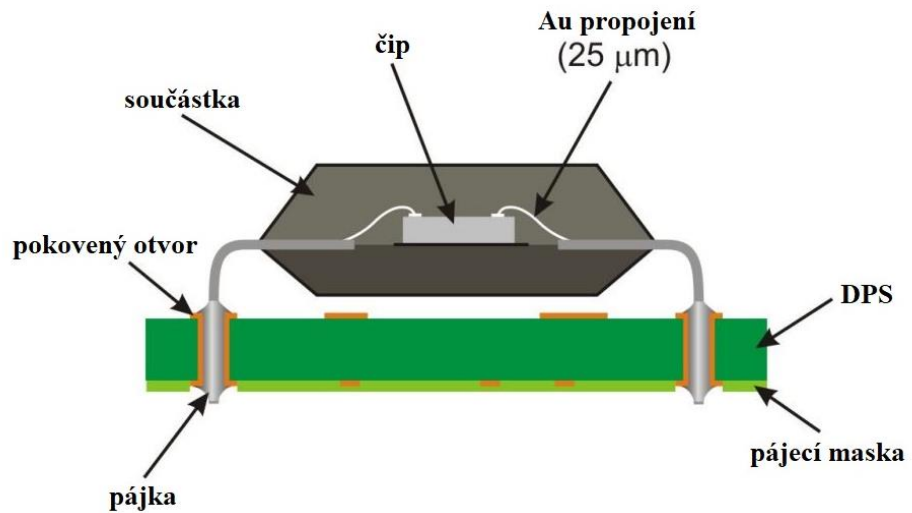


Obrázek 4 - SMD součástky a) vývodové b) bezvývodové [3]

Jejich velkou výhodou je, že se osadí a zapájí pouze z jedné strany DPS a z druhé strany zůstává volné místo na další součástky, čímž se dosáhne velké hustoty osazení. Oproti THD jsou tyto součástky navíc rozměrově efektivnější, levnější a též doba osazení je kratší. V praxi se SMD používají daleko více jak THD. [3], [8]

2.2. THD

Součástky s drátovými vývody se osazují do předem připravených otvorů na DPS, proto musí mít vývody dostatečně dlouhé a tvarovatelné. K zapájení dochází z druhé strany, než je samotné pouzdro součástky. [3], [8]



Obrázek 5 - Montáž součástky s drátovými vývody do otvorů [3]

3. Pájecí slitiny a pasty

3.1. Pájecí slitiny

Pojmem pájka či pájecí slitina se rozumí řada kovů a slitin kovů (většinou dvou nebo tří), jejichž teplota tání musí být nižší než teplota tání spojovaných částí. V elektrotechnickém průmyslu byly donedávna nejvíce používané pájecí slitiny na bázi olova a cínu (SnPb pájka). Tou byla například nejpoužívanější olovnatá pájka Sn63Pb37 (s obsahem 63% cínu a 37% olova), jejíž teplota tavení je 183 °C. Avšak z důvodu ekologické závadnosti olova byly v roce 2003 evropskými zeměmi přijaty dvě směrnice (WEEE a RoHS), které od 1. července 2006 nařizují, že na trhu nesmí být elektronické výrobky, které obsahují větší než povolené množství olova a dalších nebezpečných látek (například rtuť a kadmium). Výjimkou jsou pouze případy, kdy tyto látky nejde s ohledem na spolehlivost zařízení nahradit jinou alternativou, jako je tomu v leteckém průmyslu či lékařství. Od té doby dochází k základnímu dělení pájek na olovnaté a bezolovnaté. [8], [9], [10]

3.1.1. Bezolovnaté pájky

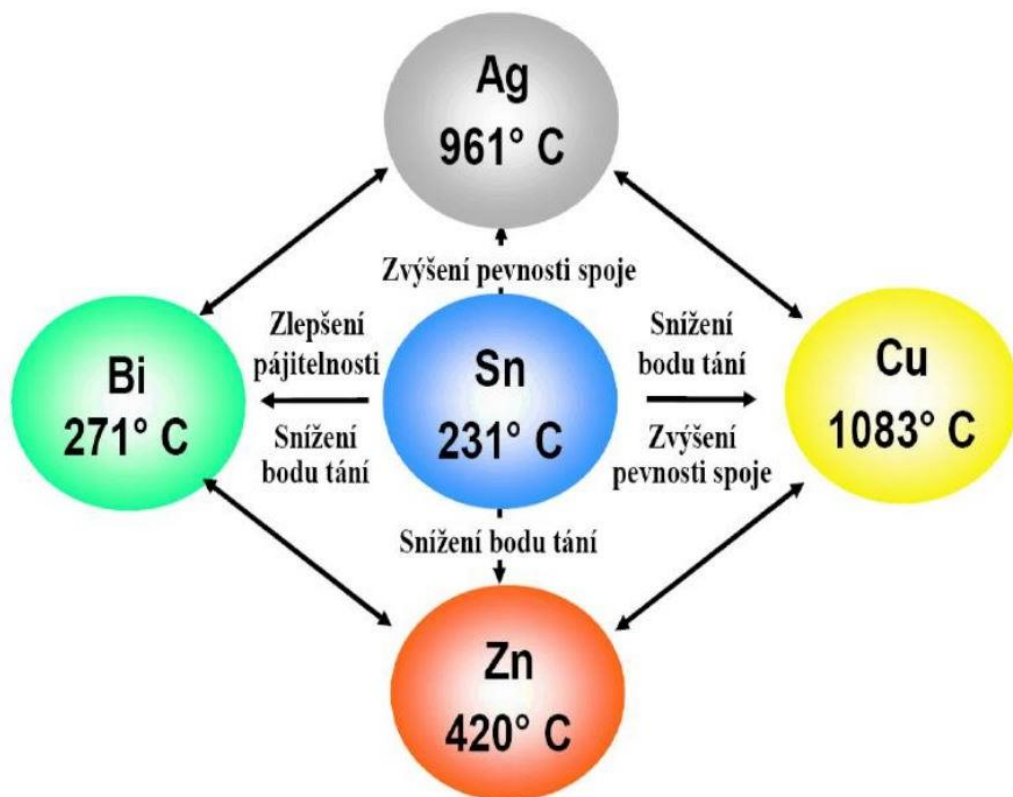
Po zákazu používání olovnatých pájek bylo potřeba nalézt ekologicky nezávadné slitiny, které by měly mít srovnatelné mechanické, elektrické a ekonomické vlastnosti jako pájecí slitiny s olovem. Hlavní alternativou jsou tedy slitiny, kde je základem zastoupen cín a jako příměsi na snížení teploty jsou přidávány stříbro, měď, zinek, bismut nebo antimon. Podle počtu prvků v pájecí slitině se dnes většinou setkáváme s dvousložkovou až čtyřsložkovou bezolovnatou pájkou. Avšak všechny alternativy se odlišují od olovnatých pájek především vyšší teplotou tání, která by mohla způsobit destrukci osazených součástí při pájení. [3], [11]

Dnes nejvíce používané jsou bezolovnaté pájecí slitiny typu SAC, kde lze už z jejich názvu poznat, že se jedná o pájky na bázi cínu (Sn), stříbra (Ag) a mědi (Cu). Tyto pájky se vyznačují dobrými mechanickými vlastnostmi a relativně vysokou spolehlivostí. Například slitina Sn95,5Ag3,8Cu0,7 má vyšší pevnost oproti SnPb pájce, ale její teplota tání je 217 °C. Nevýhodou těchto pájek také je, že mají větší náchylnost k vytvoření dutin neboli voidů ve výsledném spoji. [8], [11], [12]

Při nahrazení dříve používaných pájecích slitin na bázi olova by jejich bezolovnaté alternativy měly splňovat následující požadavky:

- nízká teplota tání
- dostupnost a cenová přijatelnost
- materiálově vyrobitelné
- přijatelné smáčení
- úzký teplotní rozsah plasticity
- odolnost proti korozi
- přijatelné mechanické a elektrické vlastnosti
- netoxické a recyklovatelné [13]

Základní kovy, které se nejčastěji používají do bezolovnatých pájek, jsou zobrazeny včetně jejich teplot tání a vlivů na výsledné vlastnosti pájecí slitiny na následujícím obrázku (Obr. 6).



Obrázek 6 - Alternativy kovů do bezolovnatých pájek včetně teplot tání a vlivů na vlastnosti pájky [12]

Následuje základní rozdělení používaných bezolovnatých pájecích slitin dle teploty tání. V závorkách jsou definovány přibližné teploty tání.

1. Slitiny s teplotou tání vyšší než 210 °C
SnCu (227 °C), SnAg (221 °C), SnAgCu (217 °C), SnAgCuSb, SnInAg,
SnAgCuZn, SnAgBiCu, SnAgBiCuGe
2. Slitiny s teplotou tání v rozsahu (180 - 210) °C
SnAgBiX (206 °C - 213 °C), SnAgBi (206 °C - 213 °C), SnZn (199 °C)
3. Slitiny s teplotou tání nižší než 180 °C
SnBiZn, SnBi (138 °C) [12]

3.2. Pájecí pasty

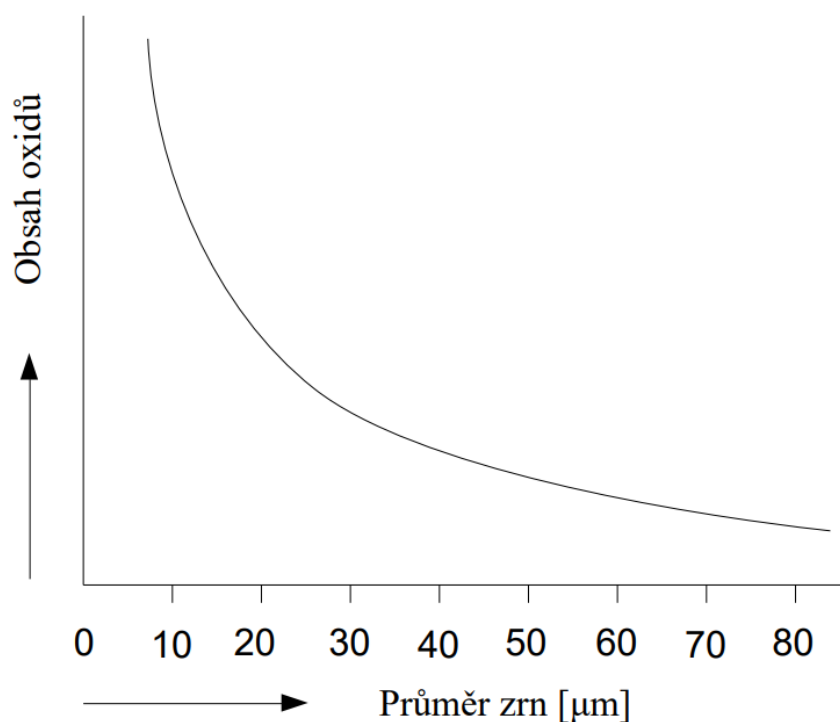
V elektrotechnickém průmyslu se pájecí pasty užívají při pájení přetavením SMD součástek. Zde se využívá charakteristických vlastností pájecích past, jimiž jsou tekutost a lepivost, které pomáhají při osazování DPS součástky uchytit. Pájecí pasty jsou tedy homogenní směsi pastovité konzistence, které se skládají z pájecích zrn neboli kuliček pájecí slitiny a tavidel ve formě gelu. Případně ve směsi mohou být obsaženy ještě reologické modifikátory sloužící k úpravě vlastností pájecí pasty. Schéma složení pájecí pasty je vyobrazeno na následujícím obrázku (Obr. 7). [1], [8], [14]



Obrázek 7 - Schéma složení pájecí pasty [1]

V pájecí pastě bývá kovový podíl v intervalu (65 – 96) hmotnostních procent a složení kovového prášku pasty je dnes nejčastěji na bázi pájecí slitiny typu SAC. Kuličky pájecí slitiny by měly být tvarově a rozměrově stejné, jinak by mohly nastat problémy při aplikaci pájecí pasty. Ovšem zásadní je velikost kuliček, protože s jejich menší velikostí narůstá podíl oxidů. To by mělo negativní vliv na pájitelnost, a proto se na výrobu pájecích zrn používá technologie rozprašování a odstředování v ochranném plynu, čímž se dosáhne nízké oxidace na povrchu zrn. Velice důležitý je také správný výběr tavidla, protože jinak by hrozila možnost reakcí mezi pájecí slitinou a tavidlem, což by vedlo ke špatné kvalitě a krátké životnosti výsledného pájeného spoje. [1], [3], [8]

Na následujícím grafickém vyjádření (Obr. 8) je poté znázorněno, jak se snižujícím průměrem pájecích zrn dochází k rapidnímu nárůstu podílu oxidů.



Obrázek 8 – Podíl oxidů v závislosti na velikosti zrn [1]

Rozdělení pájecích past podle normy ANSI J-STD-005 pak udává následující tabulka č. 1.

Tabulka 1- Rozdělení pájecích past podle normy ANSI J-STD-005 [8]

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

3.2.1. Tavidla v pájecí pastě

Tavidlo v pájecí pastě představuje (10 – 15) % hmotnostních procent. Ovšem jedná se o nepostradatelnou součást pasty, neboť pro vytvoření spolehlivého pájeného spoje musí být pájené povrchy čisté a bez vrstvy oxidů. Hlavním úkolem tavidla tedy je odstranění oxidů z pájeného povrchu a zabránění jejich dalšímu vzniku během pájení. Konkrétně z jednotlivých složek tavidla k odstranění oxidů slouží aktivátory, které bývají nejčastěji ve formě halogenidů nebo organických kyselin. Další složkou tavidla je pryskyřice, která způsobuje těstovitou konzistenci pájecí pasty a též zamezuje pohybu osazených součástek na DPS díky své lepkavosti. V tavidle jsou také obsaženy tixotropní činidla, kterými jsou například celulóza a akrylová pryskyřice. Tyto látky slouží k zachování a případné obnově viskozity pájecí pasty. To je důležité především při tisku přes šablonu, kdy je potřeba vysoká viskozita, aby se zachovaly přesnosti obrysů při nanášení pasty. Poslední složkou tavidla jsou rozpouštědla a ty velkou mírou ovlivňují dobu, po kterou může být pájecí pasta nanesená na šabloně, aniž by ztrácela své uvedené vlastnosti. [1], [3], [8]

Tavidlo se tedy přímo neúčastní pájecí reakce, ale usnadňuje ji tím, že snižuje povrchové napětí roztavené pájky, díky čemuž v podstatě zajišťuje dobré smáčení. [1], [3]

Následuje tabulka č. 2, kde je uvedena klasifikace tavidel podle jejich složení dle uvedené normy.

Tabulka 2 - Dělení tavidel podle normy ČSN EN ISO 9454-1 [8]

TYP TAVIDLA	ZÁKL.SLOŽKA	AKTIVÁTOR	FORMA TAVIDLA
1. pryskyřicové	1. kalafuna (přir.prysk.) 2. bez kalafuny syntetická pryskyřice	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
2. organické	1. rozpustné ve vodě 2. nerozpustné ve vodě	1. bez aktivátoru 2. aktivováno halogenidy 3. aktivováno bez halogenidů	A tekuté B tuhé C pasta
3. anorganické	1. soli 2. kyseliny 3. zásady	1. NH ₄ Cl 2. bez NH ₄ Cl 1. kys. fosforečná 2. jiné kyseliny 1. aminy nebo amoniak	A tekuté B tuhé C pasta

Tabulka č. 3 udává další klasifikaci podle uvedené normy, která vychází z chemického složení a úrovně aktivity tavidel.

Tabulka 3 - Dělení tavidel podle normy DIN EN 61190-1-1 [3]

Složení	Aktivita tavidla (% halogenidu)	Označení aktivity tavidla	Klasifikace tavidla podle IEC	Klasifikace tavidla podle ISO
Přírodní pryskyřice (Rosin-RO)	nízká (0%)	L0	ROL0	1.1.1
	nízká (<0,5%)	L1	ROL1	1.1.2.W, 1.1.2.X
	mírná (0%)	M0	ROM0	1.1.3
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	ROM1	1.1.2.Y, 1.1.2.X
	vysoká (0%)	H0	ROH0	1.1.3.X
	vysoká (>2%)	H1	ROH1	1.2.2.Z
Pryskyřice (Resin-RE)	nízká (0%)	L0	REL0	1.2.1
	nízká (<0,5%)	L1	REL1	1.2.2.W, 1.1.2.X
	mírná (0%)	M0	REM0	1.2.3
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	REM1	1.2.2.Y, 1.1.2.X
	vysoká (0%)	H0	REH0	1.2.3.X
	vysoká (>2%)	H1	REH1	1.2.2.Z
Organické (Organic-OR)	nízká (0%)	L0	ORL0	2.2.1., 2.2.3.E
	nízká (<0,5%)	L1	ORL1	-
	mírná (0%)	M0	ORM0	-
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	ORM1	2.1.2, 2.2.2
	vysoká (0%)	H0	ORH0	2.2.3.0
	vysoká (>2%)	H1	ORH1	2.2.2
Anorganické (Inorganic-IN)	nízká (0%)	L0	INL0	Neaplikovatelné
	nízká (<0,5%)	L1	INL1	
	mírná (0%)	M0	INM0	
	mírná (0,2%-2,0%)	M1	INM1	
	vysoká (0%)	H0	INH0	
	vysoká (>2%)	H1	INH1	

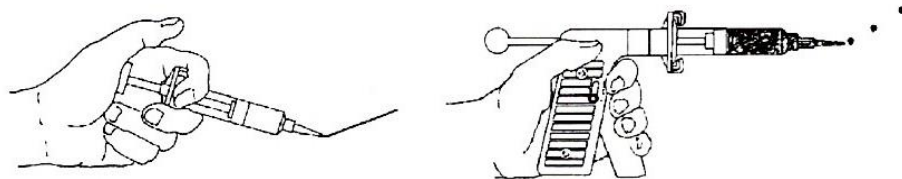
3.2.2. Nanášení pájecích past

Pájecí pastu lze nanést na DPS třemi možnými způsoby:

- dávkováním (dispenzerem)
- sítotisk
- tisk přes šablonu

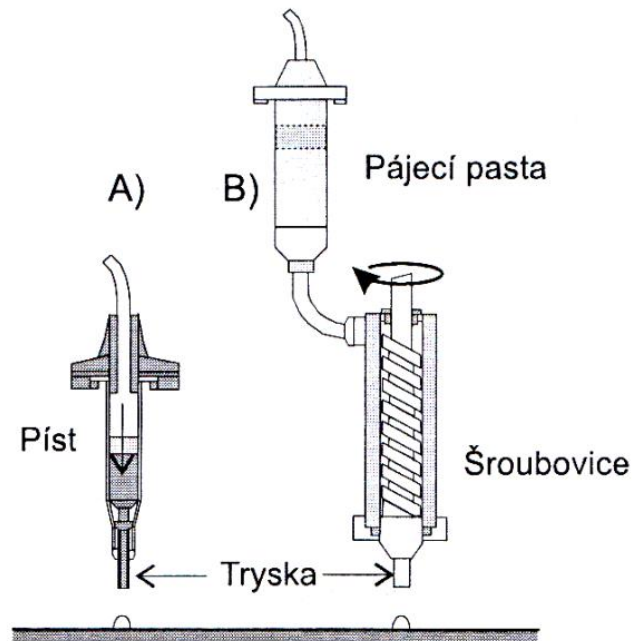
3.2.2.1. Nanášení pasty dávkováním

Tento způsob v podobě ručního dávkování se používá převážně pro nízké objemy pájení nebo opravy. Je to poměrně rychlý a efektivní způsob, jak aplikovat pájecí pastu na požadované místo. Velkou výhodou u tohoto způsobu je, že pasta se nanese opravdu jen do bodů, kde je to potřeba. Následující obrázek zobrazuje příklad ručního dávkování pájecí pasty (Obr. 9). [1]



Obrázek 9 - Ruční způsob dávkování pasty [1]

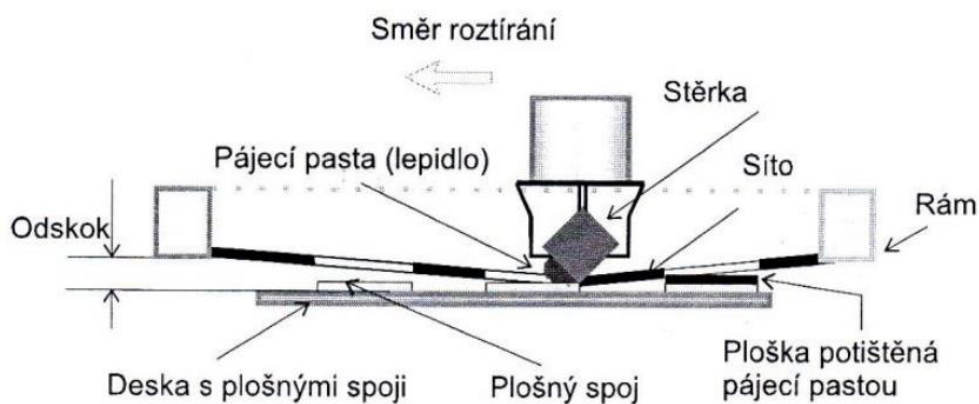
U situací, kde je velké množství různých typů desek a bylo by finančně nákladné vyrábět takové množství šablon, se používá jako alternativa strojní dávkování pasty. Jak lze pozorovat na následujícím obrázku (Obr. 10), tak u případu A se jedná o stejný způsob jako u ručního dávkování, avšak na píst tlačí vzduch. U případu B tlak vzduchu nejprve posune pastu do šroubovice, z které je následně pasta vytlačována na DPS, čímž dochází k přesnému dávkování, tudíž se snižuje spotřeba pájecí pasty. [1]



Obrázek 10 - Strojní způsob dávkování A) píst B) šroubovice [1]

3.2.2.2. Sítotisk

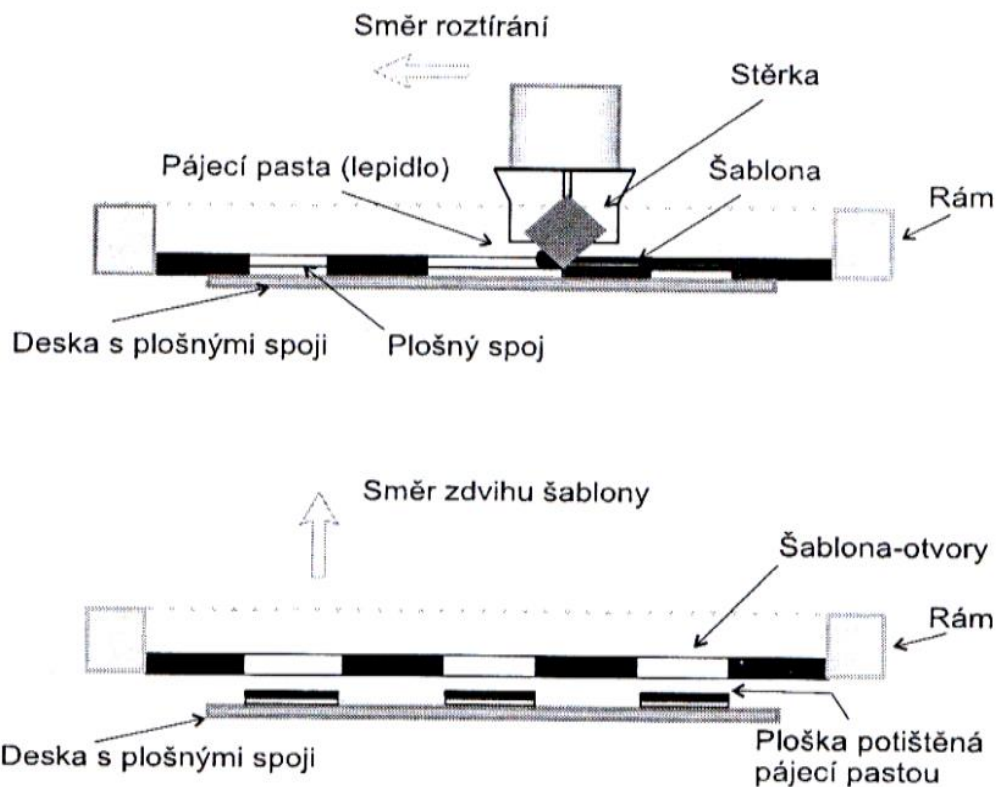
U tohoto způsobu je pájecí pasta nanášena skrz síto, což je síťka z vláken nylonu, polyesteru či případně kovu. Síto je připevněno k vnějšímu rámu. Důležité je, aby síto mělo stejný motiv jako je na DPS, nad kterou se umístí do výšky (0,8 - 1) mm. Potom dochází k protlačování pasty za pomoci těrky přes síto, které se prohýbá. Síto se po protlačení pasty vždy nadzvedává do maximální výšky, které se nazývá odskok. Na následujícím obrázku je znázorněn princip sítotisku (Obr. 11). [1]



Obrázek 11 - Princip sítotisku [1]

3.2.2.3. Tisk přes šablonu

Při tomto způsobu je pájecí pasta protlačována pomocí třerky skrz kovovou šablonu, která je upevněna do rámu a obsahuje obrazec shodný s motivem na DPS. Materiálem pro kovové šablony nejčastěji bývá nerezová ocel, mosaz, niklová mosaz nebo bronz. Samotné šablony se pak vyrobí buď chemickým leptáním, řezáním laserem či galvanickou cestou. Oproti předchozímu způsobu sítotisku zde nedochází k průhybu šablony. Princip tisku přes šablonu je pak vyobrazen na následujícím obrázku (Obr. 12), kde se nejprve kovová šablona přiloží na DPS, poté dochází k nanesení pasty rovnoměrným průchodem třerky a šablona se zvedne. Při šetrném zacházení se šablonou se počítá s její životností v řádu několik desítek tisíc použití. [1]



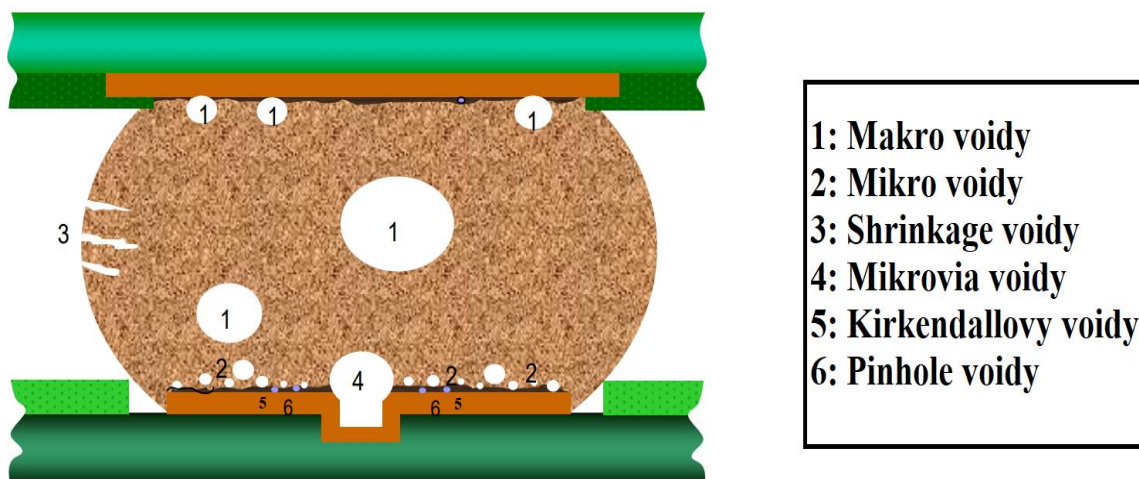
Obrázek 12 - Princip tisku přes šablonu [1]

4. Voids

S přechodem na bezolovnaté pájky se začala řešit problematika spojená s voidy, neboť u donedávna používaných olovnatých pájek nebyl výskyt voidů v takové míře. Voids lze charakterizovat jako dutiny nebo dutinky vytvořené v pájených spojích. Jejich přítomnost je jedním ze základních faktorů, které ovlivňují výslednou jakost pájeného spoje, protože voidy mají negativní vliv na jeho mechanické a elektrické vlastnosti. Při větší ploše dutin pak může docházet i ke snížení tepelné vodivosti spoje, což může zapříčinit přehřívání a následnou destrukci součástí. [15], [16]

Následuje základní rozdělení jednotlivých typů voidů s označením, které odpovídá jejich znázornění na obrázku č. 13. Zde je zakresleno jejich charakteristické umístění v pájeném spoji. Všechny uvedené typy dutin budou detailně probrány v následujících podkapitolách.

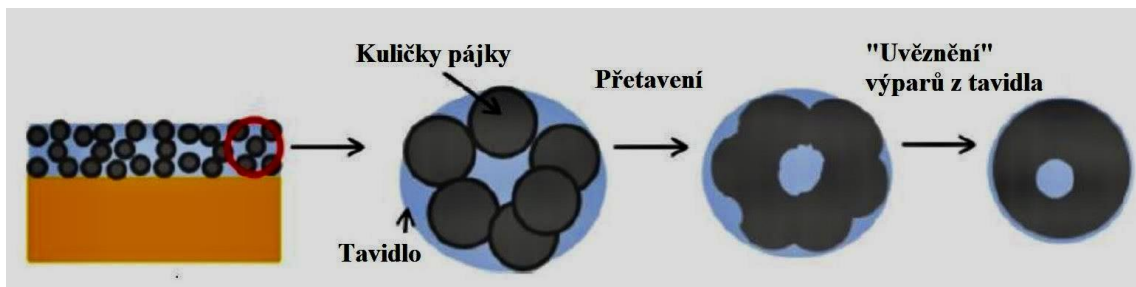
1. Makro voidy
2. Mikro voidy
3. Shrinkage voidy
4. Mikrovia voidy
5. Kirkendallový (IMC) voidy
6. Pinhole (špendlíkové) voidy [17]



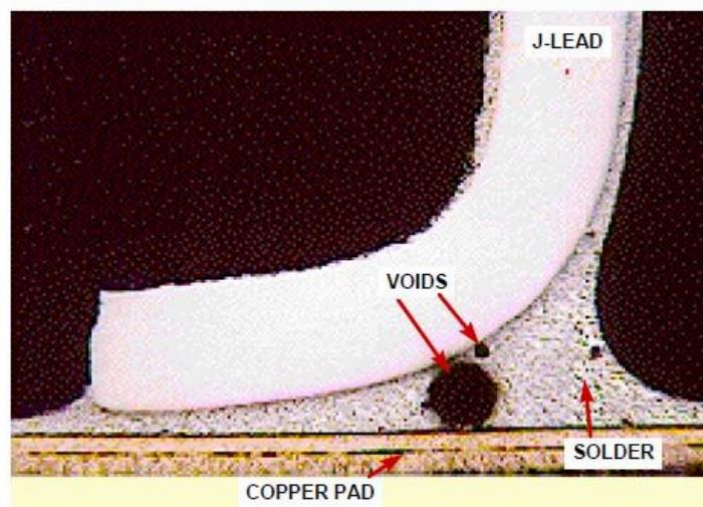
Obrázek 13 – Výskyt voidů v BGA spoji [18]

4.1. Makro voidy

Jedná se o typickou skupinu voidů, které se generují vypařováním plynů z tavidel a pájecích past během procesu pájení přetavením. Příčinou jejich vzniku je právě nedostatečný čas, aby mohly tyto plyny uniknout z pájecí pasty. Někdy se též nazývají jako „Process voids“ neboli procesní voidy. Tyto dutiny se mohou vyskytovat kdekoli v pájeném spoji a jejich průměr je v rozmezí (100 – 300) μm . Průběh vzniku těchto voidů je zachycen na obrázku č. 14 a samotné voidy jsou poté na obrázku č. 15. [15], [19]



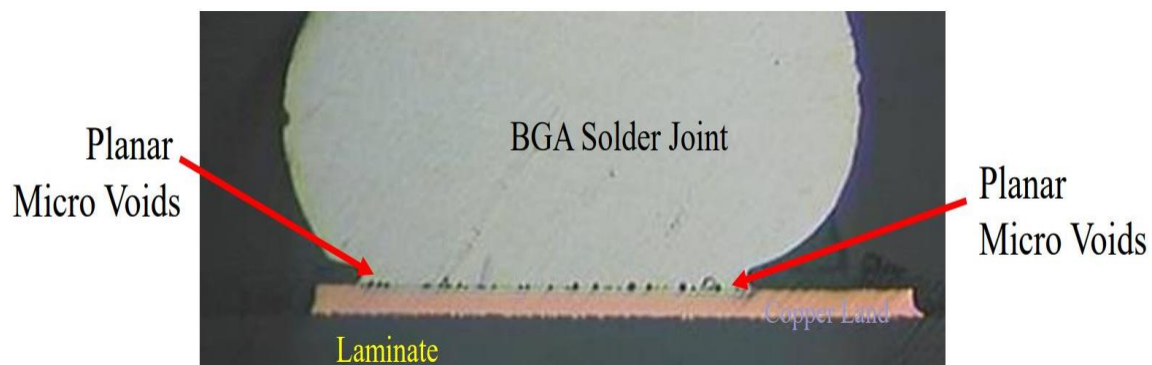
Obrázek 14 - Průběh vzniku makrovoidů [19]



Obrázek 15 - Příklad makrovoidu [15]

4.2. Mikro voidy

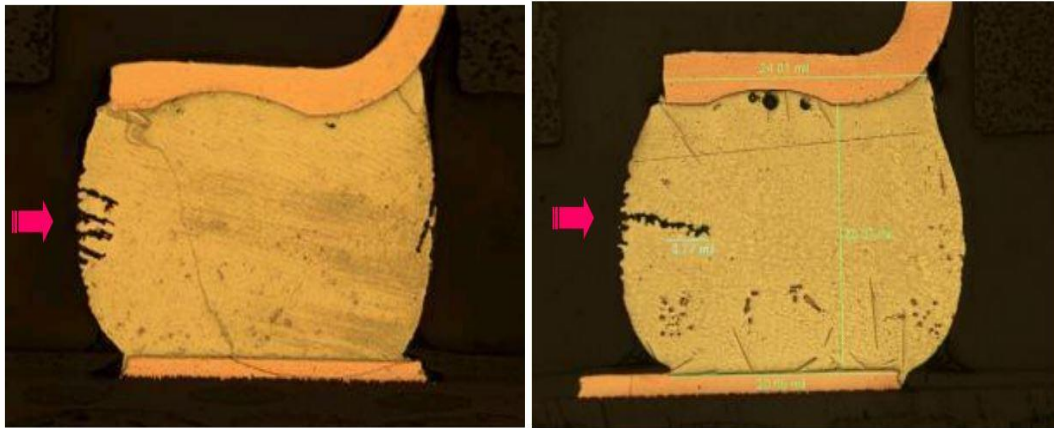
Jedná se o dutinky s průměrem menším než 25 μm , které se vyskytují na rozhraní pájecí plošky a pájecí slitiny nad intermetalickou vrstvou. Jejich nebezpečí spočívá v tom, že se jich vždy nachází více pohromadě a vytváří se v jedné rovině na rozhraní spoje, tzv. planární mikro voidy. To má za následek, že velmi negativně ovlivňují mechanickou pevnost pájeného spoje. Přesná příčina vzniku těchto dutinek není dodnes známa. Tento typ voidů je také známý jako „Champaigne voids“ a jsou vyobrazeny na následujícím obrázku (Obr.16). [15], [17], [20]



Obrázek 16 - Mikro voidy v BGA spoji [17]

4.3. Shrinkage voidy

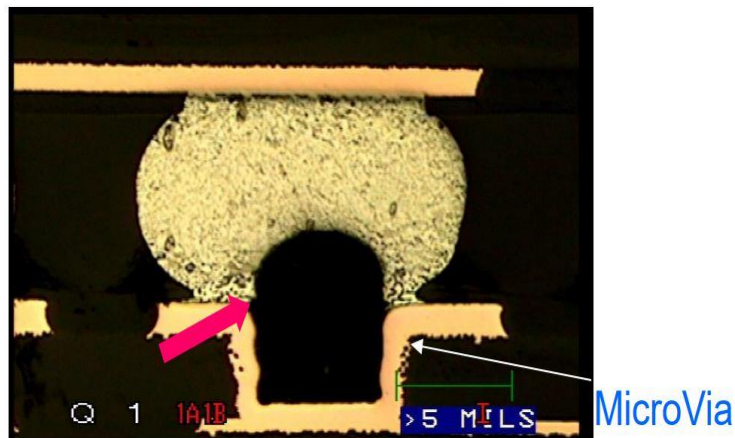
Tento typ voidů je specifický v tom, že se jedná o protáhlé dutiny dendriticky se větvící z povrchu do pájeného spoje. Při RTG kontrole tak může dojít k jejich záměně za praskliny. Vytváří se převážně při pájení pájkou typu SAC a vznikají během jejího tuhnutí, kdy dochází k objemovému smršťování pájky. Příklad těchto voidů je na následujícím obrázku č. 17. [17], [19]



Obrázek 17 - Shrinkage voidy [17]

4.4. Mikrovia voidy

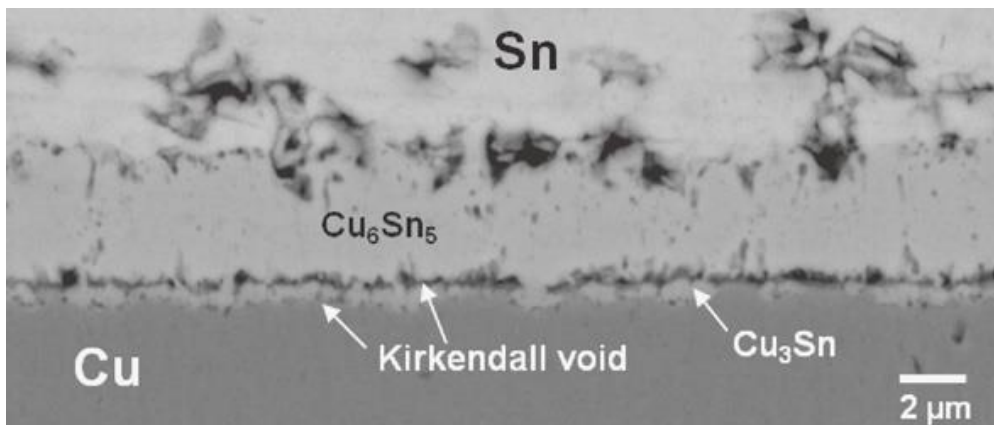
Tyto voidy vznikají pouze za podmínky, jsou-li na DPS přítomny mikrovia. Jedná se o pokovené otvory, které se používají pro vodivé propojení jednotlivých vrstev u vícevrstvých DPS. Nejčastější příčinou jejich vzniku je, že pájka nepronikne dovnitř mikrovia, což má za následek, že během přetavení uniká z otevřených nebo překrytých mikropropojů plyn a tím vznikají mikrovia voidy, které lze pozorovat na obrázku č. 18. [15], [19], [18]



Obrázek 18 - Mikrovia void [17]

4.5. Kirkendallový (IMC) voidy

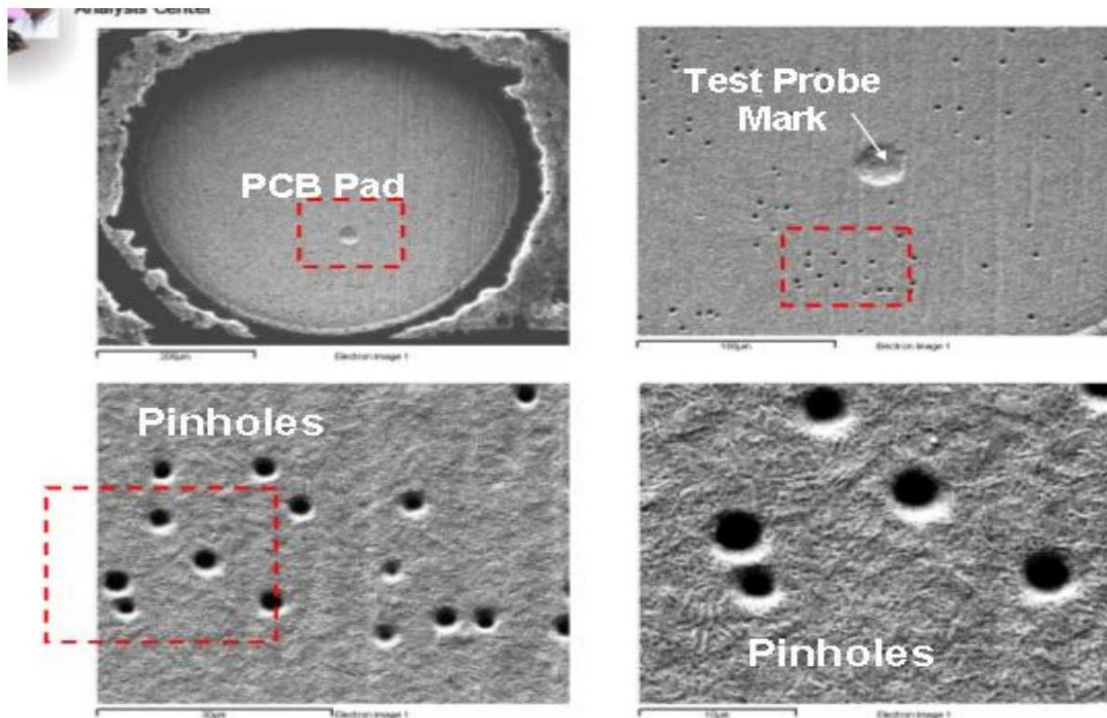
Kirkendallové voidy nebo též intermetalické dutiny se nachází mezi intermetalickou vrstvou a pájecí ploškou DPS. Tyto voidy nevznikají během pájení, ale narůstají během tepelného dlouhodobého namáhání pájeného spoje. To je dáno rozdílnými difúzními koeficienty pájecí slitiny a pájecí plošky. Na obrázku (Obr. 19) je znázorněn příklad na rozhraní mědi a cínu, kdy měď difunduje do cínu daleko rychleji, a tak vznikají na straně mědi dutinky, které se nezaplní cínem, protože nemá tak velkou difúzní rychlost a dochází ke vzniku Kirkendallových voidů. Ty pak zhoršují spolehlivost pájeného spoje, jak se rozhraní stává postupně křehčím. [15], [19]



Obrázek 19 - Kirkendallový (IMC) voidy [21]

4.6. Pinhole voidy

Někdy též nazývané jako špendlíkové voidy se nachází na rozhraní intermetalické vrstvy a pájecí plošky DPS, podobně jako tomu bylo u přechozích Kirkendallových voidů. Avšak příčina jejich vzniku spočívá v galvanické mědi, kde se během výroby DPS usadí použité chemické látky, které se při procesu přetavení odpaří z pokovení pájecích ploch, čímž dochází ke vzniku pinhole voidů, které jsou na následujícím obrázku (Obr. 20). Jejich průměr bývá v rozmezí (1 – 3) μm . [17], [19]



Obrázek 20 - Pinhole voidy [17]

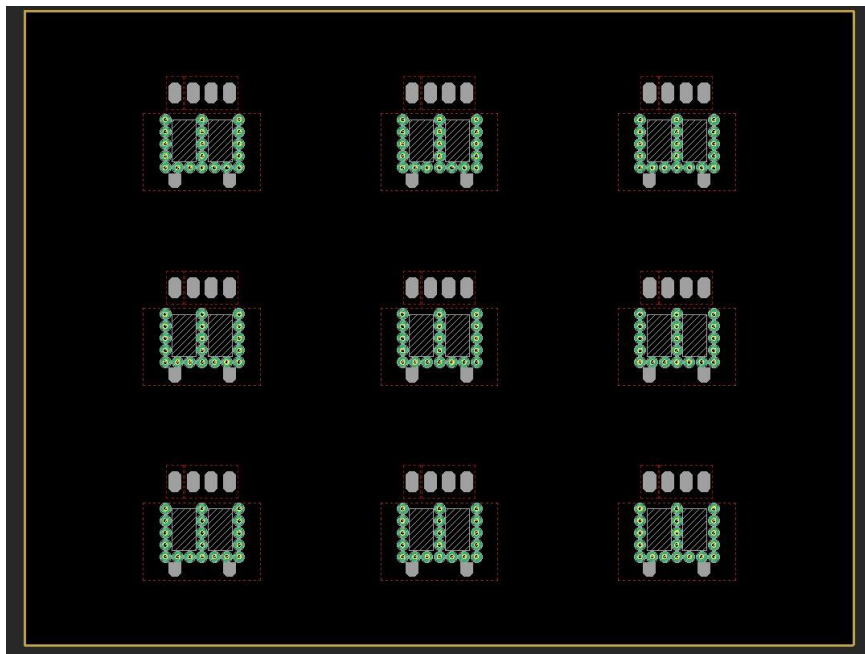
5. Praktická část

Motivací k experimentu v této práci byla konzultace v nejmenované firmě, které zajišťuje výrobu komponentů pro automobilový průmysl. Během návštěvy ve firmě byla identifikována komponenta, u které se při RTG kontrole pozorovala vyšší voidovitost, a tak se stala předmětem zkoumání v experimentální části této práce.

Jedná se o výkonový tranzistor MOSFET od firmy Onsemi [22]. Ovšem s ohledem na voidovitost byla pro tuto práci důležitá především pájecí ploška této součástky určená pro chlazení a použitá pájecí pasta.

5.1. Návrh DPS

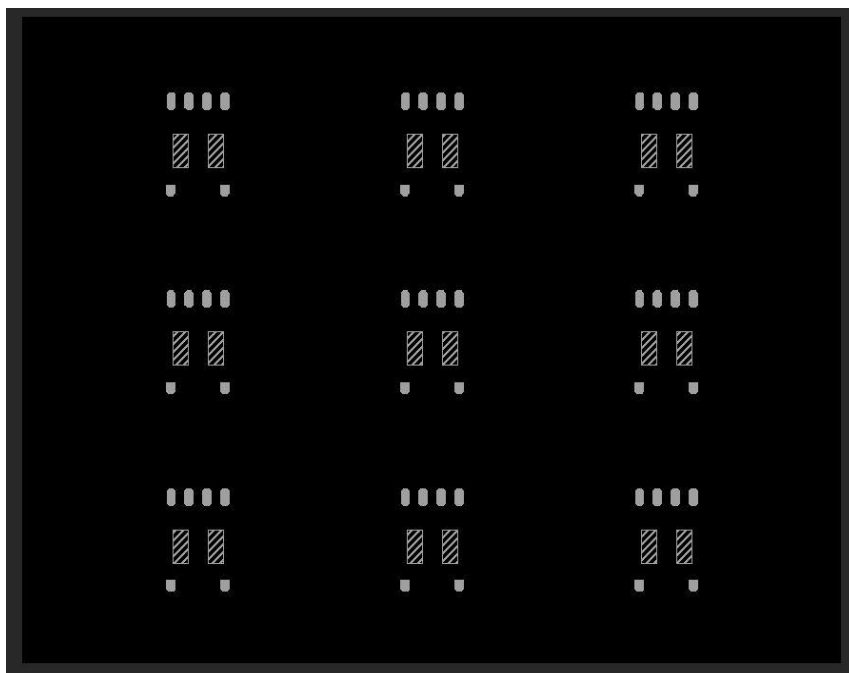
Ve volně dostupném programu Eagle ve verzi 9.6.2. byly vytvořeny dva návrhy desek plošných spojů. Návrhy jsou naprosto totožné až na vias (prokovy) kolem pájecích plošek u jedné DPS. Vias se normálně konstruuje kvůli propojení jednotlivých vrstev DPS, ale zde slouží k podpoře chlazení součástky.



Obrázek 21 - Návrh DPS s vias v programu Eagle

5.2. Návrh šablon

Dále byly v programu Eagle vytvořeny k DPS vhodné návrhy pro 4 různé typy šablon. Jednotlivé šablony se tvarově liší, ale stále je zachován stejný objem nanášené pasty. Rozdělením pájecí pasty by mělo dojít k rovnoměrnějšímu rozlití a teoreticky též k lepšímu úniku plynů před přetavením, čímž by došlo ke snížení voidovitosti. Tloušťka všech šablon byla dle konzultace zvolena na 150 μm .



Obrázek 22 - Příklad návrhu jednoho typu šablony v programu Eagle

5.3. Vyrobené DPS

Po vytvoření návrhu testovacích desek plošných spojů firma ‘Printed s.r.o.’ vyrobila tyto navržené DPS z materiálu FR4 o tloušťce 1,55 mm a se základním plátováním mědi o šířce 18 μm . Každý ze dvou návrhů DPS byl navíc vyrobený ve variantě s černou a bílou nepájecí maskou. U všech těchto kombinací DPS byla galvanickým způsobem nanášení vytvořena na pájecích ploškách povrchová úprava Ni/Au.

Tato povrchová úprava zajišťuje dokonale rovné pájecí plochy pro technologii SMT (technologie povrchové montáže) a výrobky mohou být skladovány po velice dlouhou dobu. Vrstva niklu se nanáší o síle 5 μm a na ní následně vrstva zlata o tloušťce 0,05 μm . Zlato zde zabraňuje oxidaci niklu, ale jeho vrstva musí být velmi slabá,

protože je v podstatě v pájených spojích nežádoucí. Tato slabá vrstva se rozpustí v pájecí slitině, ale pokud by byla silnější, tak by výsledný pájený spoj byl o dost křehčí a nebyl by kvalitní. Zároveň se ale zlato nenanáší přímo na měď. Dostatečně silná vrstva niklu zajišťuje, aby nedocházelo k difúzi mědi do zlata, což by zapříčinilo oxidaci pájeného povrchu. [23]



Obrázek 23 - Vyrobená DPS s vias a bílou nepájkivou maskou

5.4. Pájecí pasty

Na zapájení vyrobených vzorků byly použity dvě pájecí pasty typu SAC. První použitou pájecí pastou byla M31-GRN360-K1MK-V4 od výrobce Senju, přesné složení pájecí slitiny této pasty je 95,75 % cínu, 3,5 % stříbra, 0,75 % mědi. Druhou aplikovanou pastou byla Indium 8.9HF od výrobce Indium, která obsahuje pájecí slitinu tvořenou 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Použité pasty se liší také ve velikosti kovových částic, kde pasta od výrobce Senju má zrnitost T3 a pasta od výrobce Indium T4. Obě pájecí pasty mají stejný typ tavidla ROL0, tedy tavidlo s nízkou aktivitou. Avšak přesné složení zjistit nelze, protože se jedná o výrobní tajemství. Kompletní popis pájecích past je v následující tabulce č. 4.

Tabulka 4 - Parametry pájecích past [24] [25]

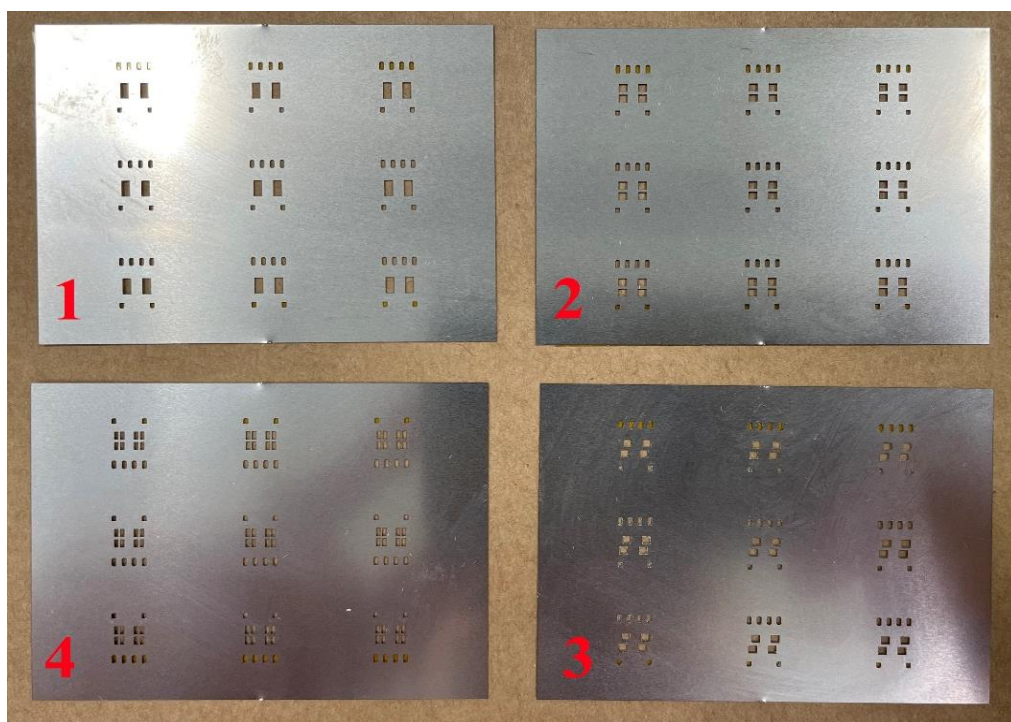
Výrobce	Senju	Indium
Typ	Bezolovnatá	Bezolovnatá
Složení	95,75Sn/3,5Ag/0,75Cu	96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu
Označení	M31-GRN360-K1MK-V4	Indium8.9HF
Velikost kovových částic	T3: (25 - 45) μm	T4: (20 - 38) μm
Typ tavidla	ROL0	ROL0
Teplota přetavení	(230 - 250) $^{\circ}\text{C}$	(230 - 260) $^{\circ}\text{C}$
Viskozita	180 Pa.s	170 Pa.s



Obrázek 24 – Použité pájecí pasty - vlevo pasta od výrobce Indium a vpravo od výrobce Senju

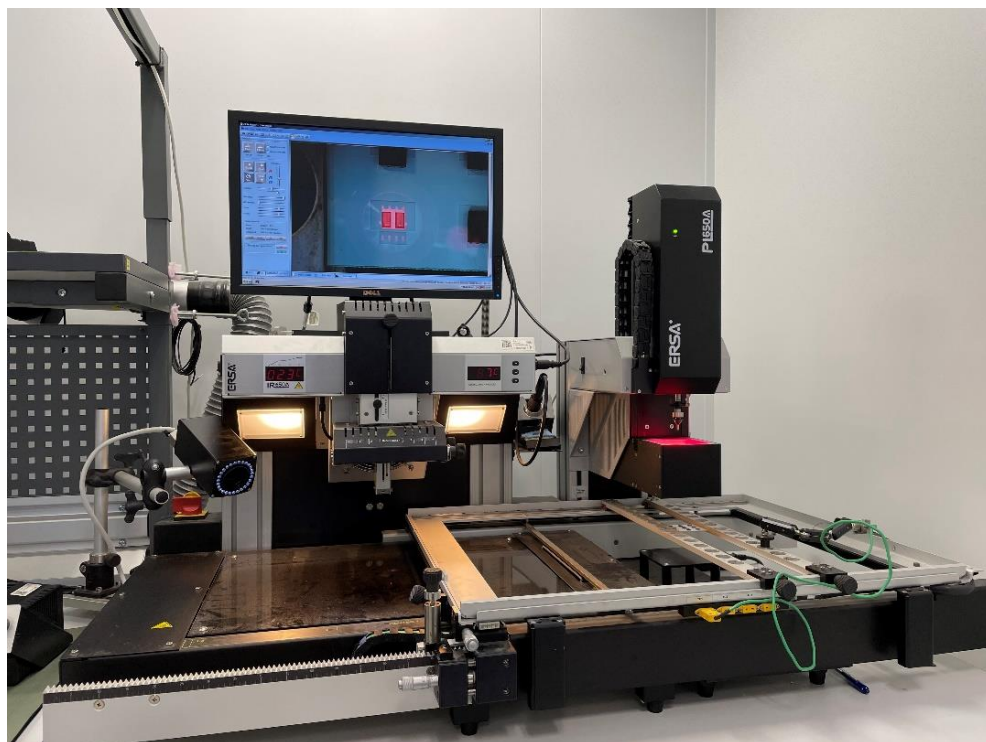
5.5. Šablonový tisk a osazení vytvořených DPS

Šablony stejně jako DPS vyrobila též firma 'Printed s.r.o.' a společně s jejich jednotlivým označením jsou vidět na následujícím obrázku (Obr. 25). Pro nanesení pájecí pasty na zhotovené DPS bylo využito tisku přes šablonu, kdy pájecí pasta byla nanášena na DPS těrkou přímo přes šablonu.



Obrázek 25 - Vyrobené šablony

Poté došlo k osazení všech vyrobených typů DPS součástkami, které probíhalo na stanici Ersu IR/PL 650A zachycené na obrázku č. 26. Osazování probíhalo na principu vakuové trysky a na částečné automatické manipulaci se součástkami, kdy nejprve bylo potřeba přesně zaměřit umístění pomocí optického hranolu pro pohled na pájecí plošky na DPS a spodní stranu osazované součástky. Nakonec byla součástka přesně umístěna a detail osazení je poté vidět na obrázku č. 27.



Obrázek 26 - Stanice Ersas IR/PL 650A



Obrázek 27 - Detail osazení součástky

5.6. Zapájení vzorků

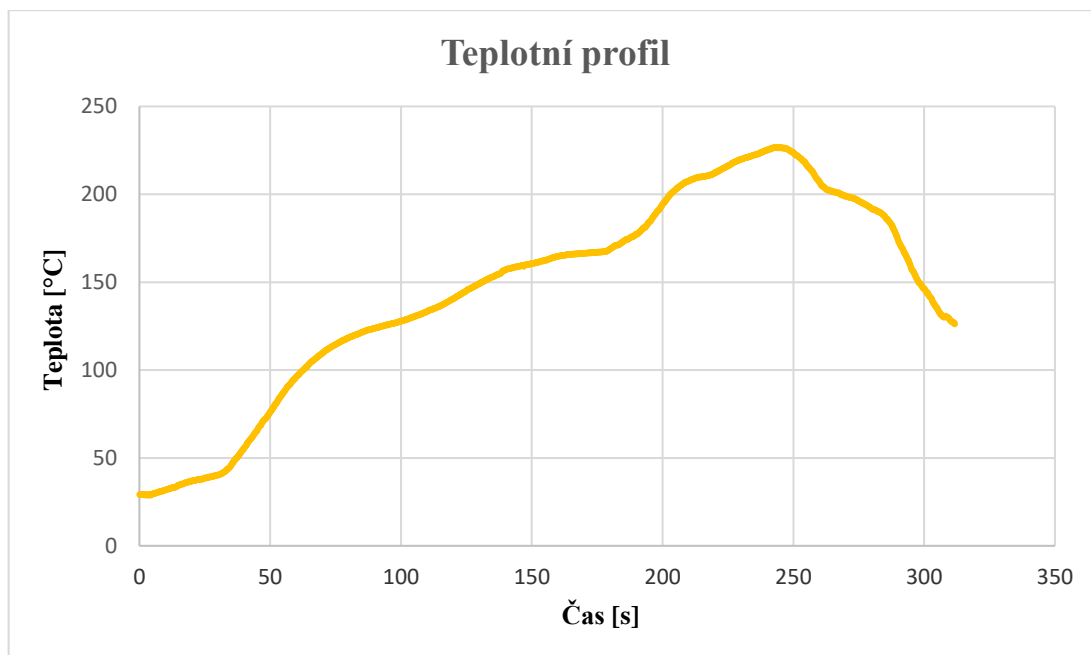
Pro zapájení připravených vzorků byla použita přetavovací pec s konvekčním ohřevem Mistral 260, která je složena ze třech nezávislých teplotních zón, chladicí zóny a dopravníkového pásu. Topná tělesa se starají o zahřívání atmosféry a k cirkulaci tepla v peci slouží vnitřní ventilátory. K nastavení teploty jednotlivých topných zón i rychlosti dopravníkového pásu slouží dotykový displej. Následuje obrázek č. 28, kde je tato pec zachycena, poté je uvedena tabulka č. 5 s nastavením teplot pro jednotlivé zóny přetavovací pece. Nakonec je vykreslen grafický průběh naměřeného teplotního profilu na grafu č. 1.



Obrázek 28 - Přetavovací pec Mistral 260

Tabulka 5 - Nastavení jednotlivých zón pece Mistral 260

Nastavená teplota [°C]	Zóna 1	Zóna 2	Zóna 3
		150 °C	170 °C



Graf 1 - Naměřený teplotní profil

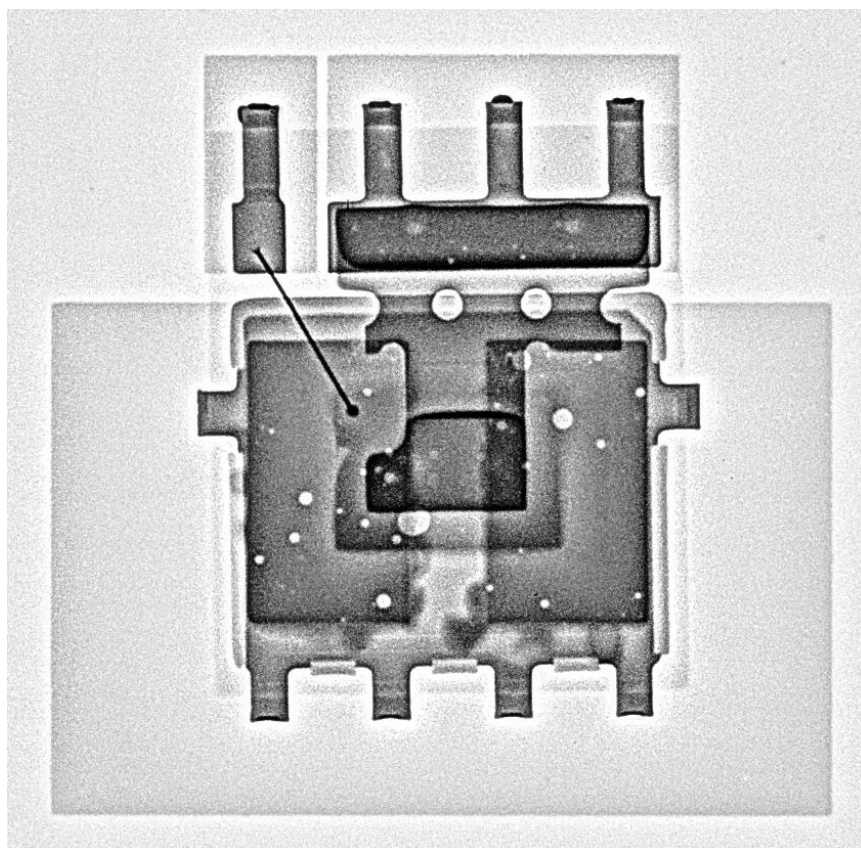
5.7. RTG kontrola

Všechny vytvořené vzorky byly podrobeny RTG kontrole na zařízení GE PHOENIX X-RAY MICROMEX, které je vidět na následujícím obrázku (Obr. 29). Touto nedestruktivní metodou kontroly bylo možno nalézt voidy v pájených spojkách.

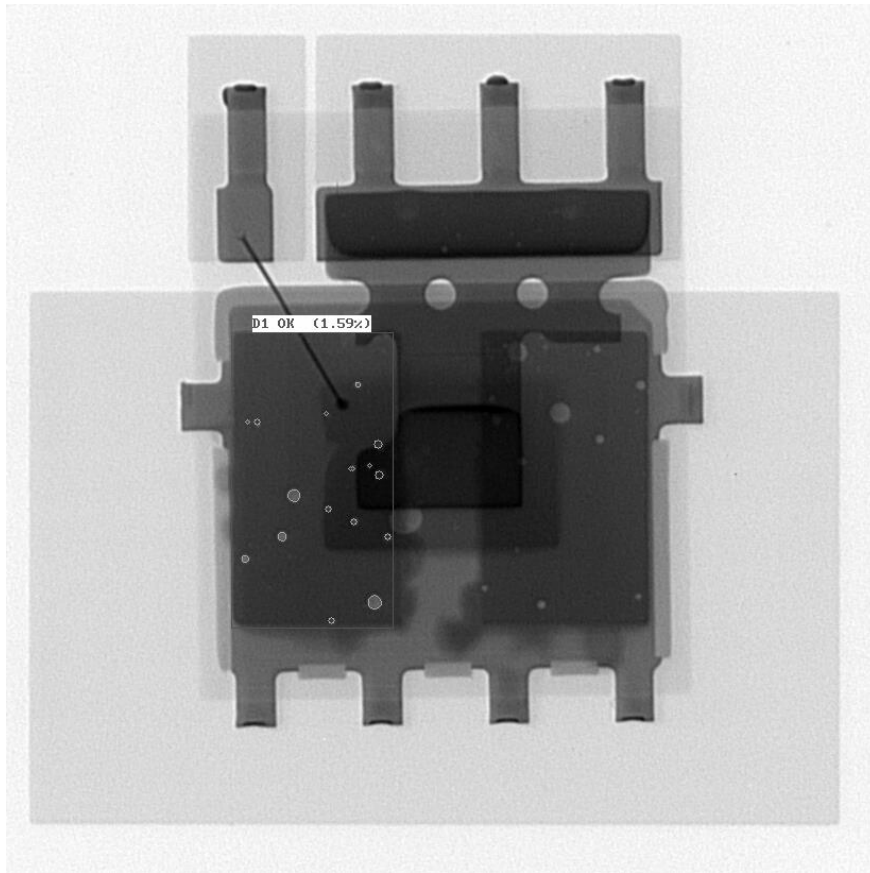


Obrázek 29 - GE PHOENIX X-RAY MICROMEX [26]

Na následujícím obrázku (Obr. 30) je příklad výstupu rentgenové kontroly, kterou prošly všechny vytvořené vzorky v celkovém počtu 288. Světla místa na snímcích reprezentují dutiny a pomocí softwaru na rentgenovém zařízení byla spočítána procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti. Vzhledem k návrhu DPS a použité součástce byly jako vyhodnocovací oblasti brány jednotlivé pájecí plošky, tedy dvě pájecí plošky na součástku. Po pořízení RTG snímku byla tedy vybrána vyhodnocovací oblast (jedna pájecí ploška) a následně v ní vypočtena procentuální plocha tvořená dutinami (Obr. 31). U každého vzorku též proběhla individuální korekce.



Obrázek 30 – Příklad rentgenové kontroly vzorku



Obrázek 31 – Příklad procentuální plochy voidů u vzorku

5.8. Vyhodnocení

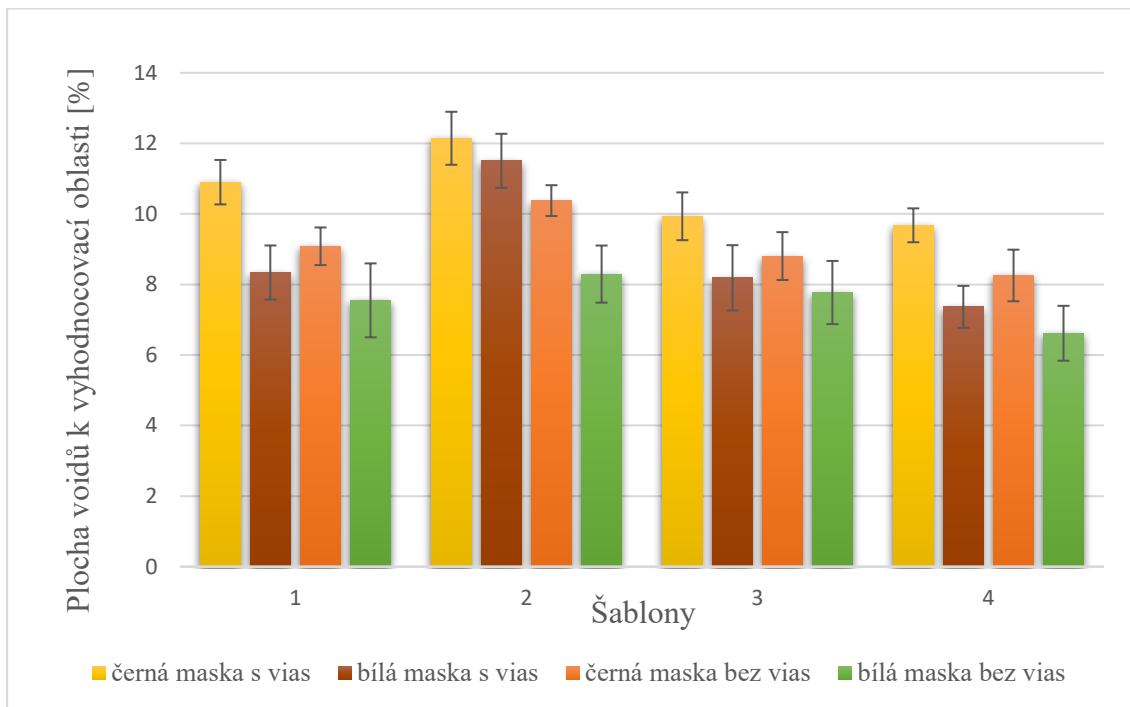
Data získaná rentgenovou kontrolou ze všech vzorků byla dále zpracována. V experimentální části této práce byly použity dva typy DPS (s vias a bez vias), kdy se každý typ navíc doplnil o kombinaci dvou nepájivých masek. Dále byly na zapájení aplikovány 2 pájecí pasty, které se nanášely metodou šablonového tisku, při které se využily 4 odlišné typy šablon. Pro každou použitou kombinaci jednotlivých typů DPS, šablon a pájecích past byly spočteny průměrné hodnoty procentuální plochy voidů vzhledem k zadané vyhodnocovací oblasti. Výsledky všech kombinací pak udává tabulka č. 6.

Následující podkapitoly poté zobrazují grafické vyjádření výsledků experimentu pro použité kombinace. V podkapitole 5.8.1. jsou vykresleny grafy, na kterých jsou zobrazeny závislosti průměrné procentuální plochy voidů pro jednotlivé typy DPS a aplikovaných šablon. V další podkapitole 5.8.2. následují grafy pro závislosti průměrné procentuální plochy tvořené dutinami na použitých bezolovnatých pájecích pastách, kde pro lepší znázornění má každá kombinace DPS vlastní graf.

Tabulka 6 – Naměřená a zpracovaná data

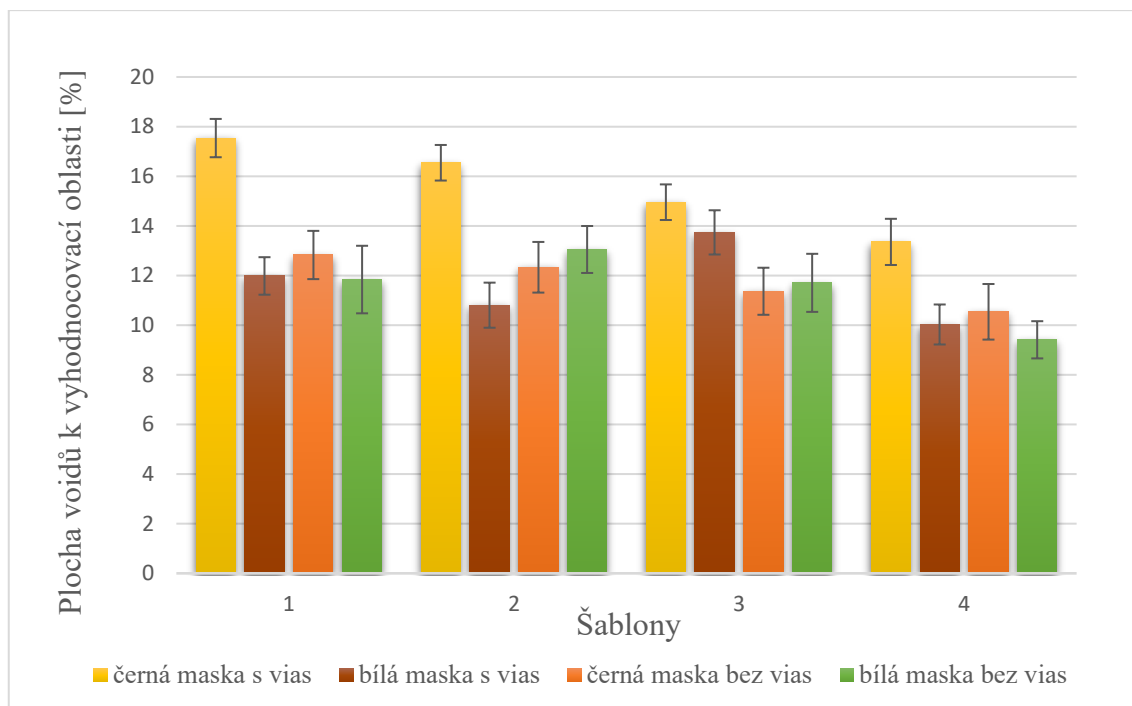
Označení šablony	DPS	Pájecí pasta	Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti [%]	SE [%]
1	černá maska bez vlas	Indium	9,08	0,53
		Senju	12,83	0,97
	černá maska s vlas	Indium	10,90	0,63
		Senju	17,54	0,77
	bílá maska bez vlas	Indium	7,55	1,05
		Senju	11,84	1,36
	bílá maska s vlas	Indium	8,34	0,77
		Senju	11,98	0,76
2	černá maska bez vlas	Indium	10,38	0,44
		Senju	12,33	1,02
	černá maska s vlas	Indium	12,14	0,75
		Senju	16,54	0,72
	bílá maska bez vlas	Indium	8,29	0,81
		Senju	13,05	0,95
	bílá maska s vlas	Indium	11,51	0,77
		Senju	10,81	0,91
3	černá maska bez vlas	Indium	8,81	0,68
		Senju	11,37	0,95
	černá maska s vlas	Indium	9,93	0,68
		Senju	14,96	0,72
	bílá maska bez vlas	Indium	7,77	0,90
		Senju	11,71	1,17
	bílá maska s vlas	Indium	8,19	0,93
		Senju	13,74	0,89
4	černá maska bez vlas	Indium	8,26	0,73
		Senju	10,54	1,12
	černá maska s vlas	Indium	9,68	0,48
		Senju	13,36	0,93
	bílá maska bez vlas	Indium	6,62	0,78
		Senju	9,41	0,75
	bílá maska s vlas	Indium	7,37	0,59
		Senju	10,03	0,81

5.8.1. Vliv použitých kombinací DPS a šablon



Graf 2 – Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro všechny kombinace DPS a šablon zapájených pastou od výrobce Indium

Na grafu lze pozorovat závislost procentuální voidovitosti pájecích plošek na všech aplikovaných šablonách a typech DPS, které byly zapájeny pájecí pastou od výrobce Indium. Z grafu je patrné, že se voidovitost měnila s použitým typem DPS i šablonou. Z pohledu šablon, které se tvarově lišily, aby se zajistilo rovnoměrnější rozlití, skutečně došlo k poklesu voidovitosti. Ovšem tento trendový pokles je patrný z grafu pouze pro šablony s označením 3 a 4. U šablony 2 naopak došlo k nárůstu plochy tvořené dutinami a varianta DPS s vias a černou nepájivou maskou pak dosáhla nejvyšší voidovitosti v tomto grafu. Naproti tomu nejnižší voidovitosti bylo dosaženo u DPS bez vias v kombinaci s bílou nepájivou maskou při aplikaci šablony 4, jak je vidět z grafu.

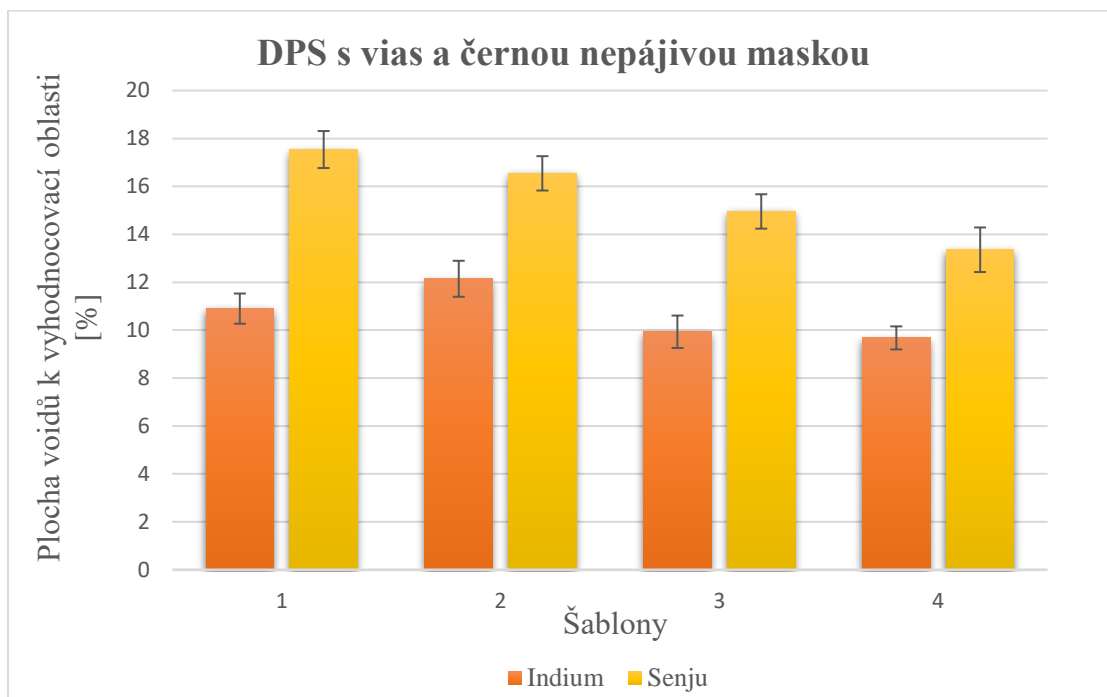


Graf 3 – Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro všechny kombinace DPS a šablon zapájených pastou od výrobce Senju

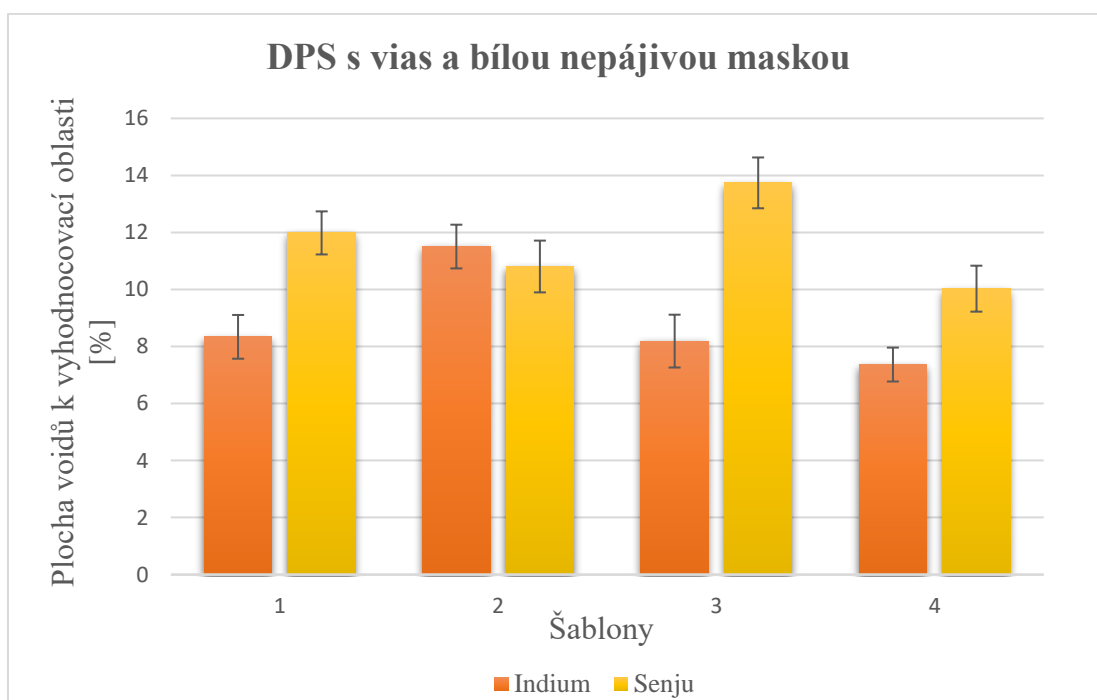
Zde se jedná o stejnou grafickou závislost jako na předchozím grafu (č. 2), avšak pro kombinace zapájené pájecí pastou od výrobce Senju. Z tohoto grafu lze pozorovat trendový pokles voidovitosti při aplikování jednotlivých šablon (1 - 4) u obou typů DPS s černou nepájevou maskou. Ovšem přes pokles voidovitosti bylo, stejně jako v předchozím případě, u DPS s vias a černou nepájevou maskou dosaženo nejvyšších hodnot plochy tvořené dutinami. Pro DPS s vias a bílou nepájevou maskou je z grafu též viditelný pokles voidovitosti až na případ, kdy byla aplikována šablona s označením 3, neboť zde došlo naopak k nárůstu. U DPS bez vias s bílou nepájevou maskou je taktéž jako na předchozím grafu viditelný nárůst plochy voidů pro kombinaci se šablonou 2, ale naopak se šablonou 4 je opět dosaženo nejnižší voidovitosti.

5.8.2. Vliv pájecích past

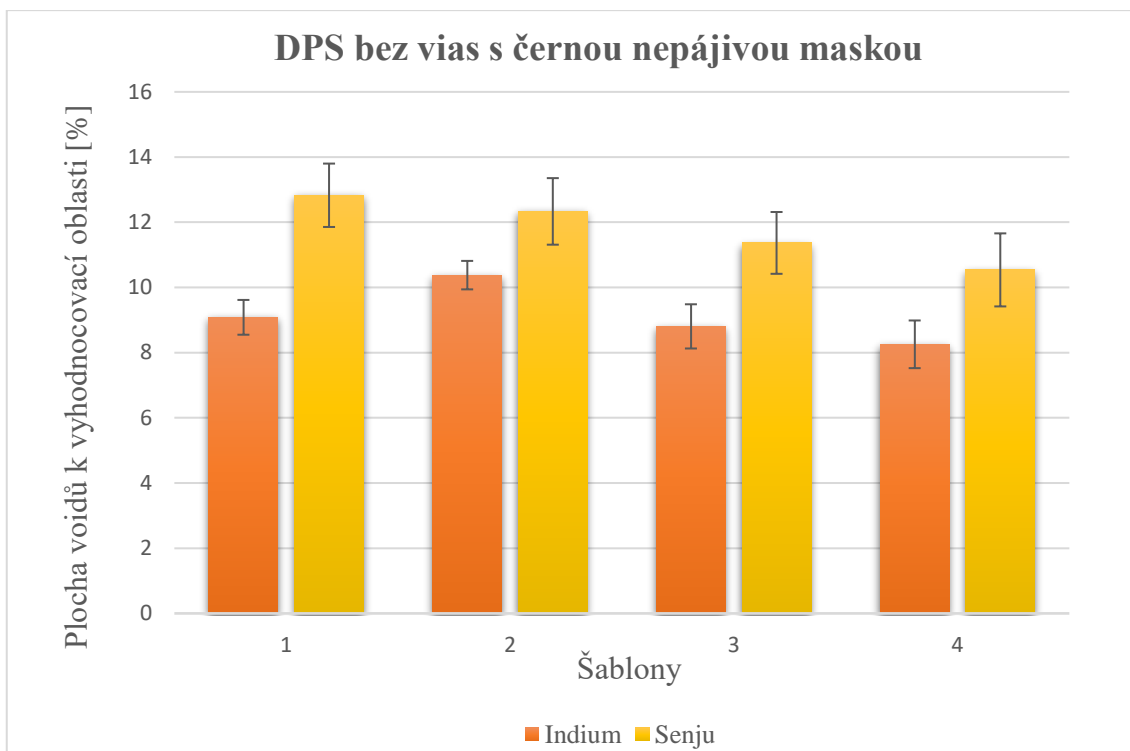
Následující grafy (č. 4 – 7) představují závislosti průměrné procentuální voidovitosti vyhodnocovací oblasti na použitých pájecích pastách během přetavení. Každý graf udává voidovitost na aplikovaných pastách pro jeden typ DPS.



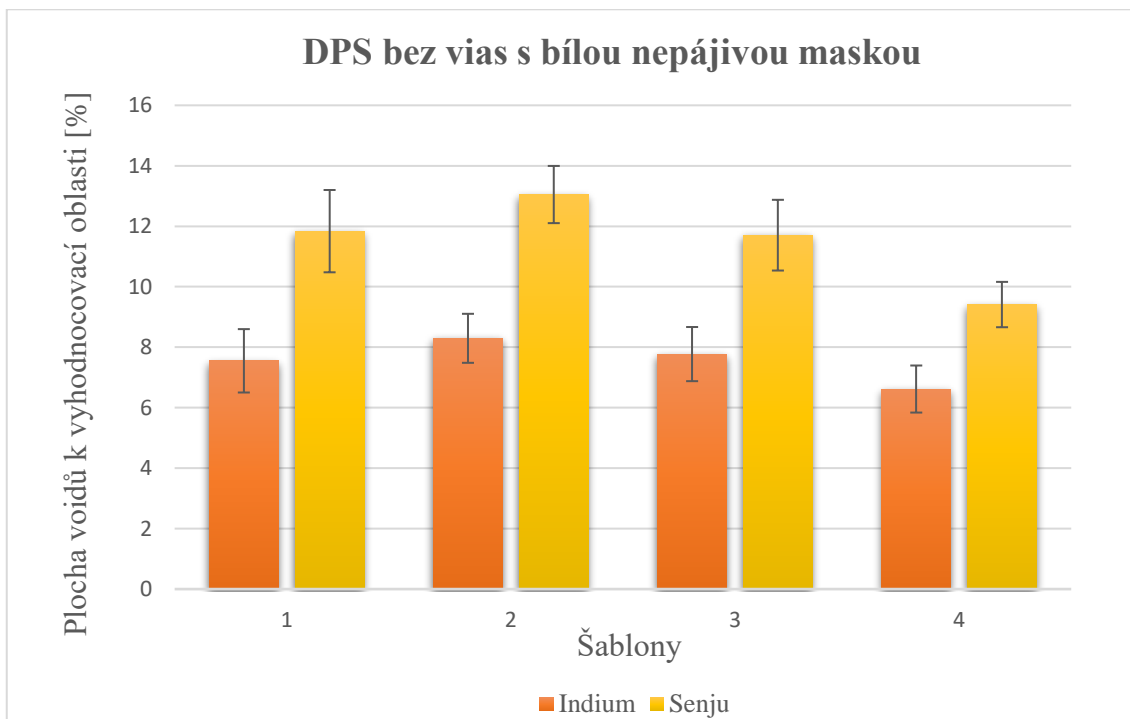
Graf 4 – Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro DPS s vias a černou nepájivou maskou v závislosti na použitých šablonách a pájecí pastě



Graf 5 - Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro DPS s vias a bílou nepájivou maskou v závislosti na použitých šablonách a pájecí pastě



Graf 6 - Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro DPS bez vias s černou nepájivou maskou v závislosti na použitých šablonách a pájecí pastě



Graf 7 - Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro DPS bez vias s bílou nepájivou maskou v závislosti na použitých šablonách a pájecí pastě

Z výše uvedených grafů je patrné, že se pouhým výběrem vhodné pasty dokáže voidovitost výrazně snížit. V experimentu použité pájecí pasty byly obě typu SAC, ale měly odlišné přesné složení pájecí slitiny a dále také velikost kovových částic. Ovšem kromě případu pro DPS s vlnou a bílou nepájkovou maskou, kde při aplikaci šablony s označením 2 byla voidovitost nižší pro pastu od výrobce Senju, tak ve všech ostatních kombinacích byla menší plocha tvořená voidy naměřena při použití pájecí pasty od výrobce Indium.

5.8.3. Shrnutí

Ze zpracovaných hodnot v tabulce č. 6 a grafů (č. 2 - 7) v přechozích kapitolách vyplývá, že z použitých dvou pájecích past v experimentu byla výrazně lepší pasta od výrobce Indium, u které byla až na jednu výjimku voidovitost u všech vzorků nižší oproti druhé pastě. Z testovaných typů DPS jako nejlepší vyšla DPS bez vias s bílou nepájjivou maskou, na kterou byla nanесena pasta pomocí šablony s označením 4. Tato kombinace DPS a šablony měla nejnižší hodnoty voidovitosti, ať při porovnávání vzorků zapájené pastou od výrobce Indium nebo Senju. Nejmenší plochy tvořené dutinami bylo dosaženo u této kombinace DPS a šablony po zapájení pastou od výrobce Indium. Při porovnávání jednoho základního návrhu DPS, například tedy DPS s vias v jednotlivých kombinacích, tak z grafů v předchozích podkapitolách je zřejmé, že nižší hodnoty voidovitosti byly dosaženy u kombinací s bílou nepájjivou maskou. Celkově tedy z naměřených hodnot vyplývá, že nižší voidovitost vykazovaly kombinace pro návrhy DPS s bílou nepájjivou maskou. Tato skutečnost byla pravděpodobně dána tím, že v závislosti na nepájjivé masce vzorku se měnila roztékavost tavidla, a protože množství tavidla v pájeném spoji před přetavením ovlivňuje výslednou voidovitost, tak lepší roztékavostí bylo docíleno zmenšení plochy tvořené dutinami. U kombinací DPS s bílou nepájjivou maskou bylo dosaženo nižší voidovitosti, a tedy i lepší roztékavosti. Tento závěr by bylo potřeba ověřit analýzou roztékavosti na mikroskopu pro všechny kombinace DPS, ale výsledná hypotéza odpovídá výsledkům zkoumání studie od P. Veselý a kol. z roku 2020 [27].

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo studium přítomnosti voidů v pájených spojích s ohledem na kombinace připravených vzorků a použité pájecí pasty. Problematika spojená s voidy se začala řešit s přechodem na bezolovnaté pájky, protože vykazují větší míru tvorby dutin než pájky na bázi olova. Teoretická část této práce se věnovala technologii pájení, pájecím slitinám a pastám se zaměřením na ty bezolovnaté. Dále pokračovalo rozdělení voidů do jednotlivých kategorií a popsání příčin jejich vzniku.

Praktická část se následně zabývala přípravou, měřením a vyhodnocením vzorků, kde hodnotícím kritériem byl výskyt voidů. Po konzultaci ve firmě byly vytvořeny návrhy dvou základních typů DPS (s vias a bez vias), které se pro vybranou součástku dají použít. Vytvořeny byly i návrhy pro různé motivy šablon. Po výrobě potřebných komponent došlo k osazení vyrobených DPS a následnému zapájení, kde každá kombinace DPS a jednotlivé šablony byla zapájena dvěma pájecími pastami od různých výrobců. Celkově tak bylo vytvořeno 288 vzorků, které byly následně podrobeny nedestruktivní rentgenové kontrole. Pořízené snímky z rentgenového zařízení byly dále vyhodnoceny, kdy se u každého vzorku vybraly dvě vyhodnocovací oblasti (pájecí plošky) a byla vypočítána procentuální plocha tvořená voidy vzhledem k vyhodnocovací oblasti. Ze zpracovaných výsledků vyplývá, že zásadní vliv na voidovitost má použitá pájecí pasta. V provedeném experimentu vyšla lépe pájecí pasta od výrobce Indium, kdy až na jeden případ vykazovala nižší voidovitost pro všechny kombinace vzorků. Dalším důležitým faktorem ovlivňující voidovitost byl použitý typ DPS, kde lépe vycházely kombinace s bílou nepájivou maskou, respektive jako nejlepší se jeví kombinace DPS bez vias a bílé nepájivé masky. Nejnižší voidovitosti v celém experimentu bylo dosaženo při použití této kombinace DPS a aplikování šablony s označením 4 při nanášení pájecí pasty od firmy Indium. Právě použitím šablon s různým tvarem se mělo docílit rozdělení pájecí pasty na menší díly, čímž mělo dojít k rovnoměrnějšímu rozlití a k lepšímu úniku plynů z tavidel, což by vedlo ke snížení plochy tvořené dutinami. Tuto hypotézu se ovšem nepodařilo potvrdit pro všechny vzorky. Především při použití šablony s označením 2 pro nanášení pasty od výrobce Indium došlo u všech kombinací DPS k výraznému nárůstu voidovitosti. To mohlo být dáno tím, že u této šablony byly největší mezery mezi částmi nanášené pájecí pasty, čímž mohlo dojít k roztečení tavidla do těchto mezer a následnému

uvěznění plynu z tavidla během přetavení. Ovšem tento předpoklad by bylo zapotřebí podrobit dalšímu výzkumu pro ověření.

Výsledky této práce tak mohou sloužit jako základ pro další experimenty technologických faktorů na výskyt voidů.

Seznam použitých zkratek

- **DPS** – deska plošného spoje
- **SMD** – Surface Mount Device – součástky pro povrchovou montáž
- **SMT** – Surface Mount Technology – technologie povrchové montáže
- **THD** – Through Hole Device – součástky s drátovými vývody pro montáž do otvorů
- **RoHS** – Restriction of Hazardous Substances – směrnice zakazující používání některých nebezpečných látek při výrobě elektrických a elektronických zařízení
- **WEEE** – Waste Electrical and Electronic Equipment – směrnice o odpadních elektrických a elektronických zařízeních
- **NH₄Cl** – chlorid amonný
- **IMC** – Intermetallic Compound – intermetalická sloučenina
- **RTG** – rentgen
- **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
- **SE** – Standard Error – střední chyba průměru

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Rozdělení pájecích past podle normy ANSI J-STD-005 [8].....</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 2 - Dělení tavidel podle normy ČSN EN ISO 9454-1 [8]</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka 3 - Dělení tavidel podle normy DIN EN 61190-1-1 [3].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 4 - Parametry pájecích past [24] [25]</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 5 - Nastavení jednotlivých zón pece Mistral 260.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 6 – Naměřená a zpracovaná data</i>	<i>45</i>

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 - Intermetalický spoj mezi SnPb pájkou a Cu substrátem [4]</i>	<i>10</i>
<i>Obrázek 2 - Metody pájení [1]</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 3 - Ishikawův diagram pro proces pájení přetavením [6]</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 4 - SMD součástky a) vývodové b) bezvývodové [3]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 5 - Montáž součástky s drátovými vývody do otvorů [3]</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 6 - Alternativy kovů do bezolovnatých pájek včetně teplot tání a vlivů na vlastnosti pájky [12]</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 7 - Schéma složení pájecí pasty [1]</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 8 – Podíl oxidů v závislosti na velikosti zrn [1]</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 9 - Ruční způsob dávkování pasty [1]</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 10 - Strojní způsob dávkování A) píst B) šroubovice [1]</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 11 - Princip sítotisku [1]</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 12 - Princip tisku přes šablonu [1]</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 13 – Výskyt voidů v BGA spoji [18]</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 14 - Průběh vzniku makrovoidů [19]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 15 - Příklad makrovoidu [15]</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 16 - Mikro voidy v BGA spoji [17]</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 17 - Shrinkage voidy [17]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 18 - Mikrovia void [17]</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 19 - Kirkendallový (IMC) voidy [21]</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 20 - Pinhole voidy [17]</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 21 - Návrh DPS s vias v programu Eagle</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 22 - Příklad návrhu jednoho typu šablony v programu Eagle</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 23 - Vyrobená DPS s vias a bílou nepájkivou maskou</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 24 – Použité pájecí pasty - vlevo pasta od výrobce Indium a vpravo od výrobce Senju</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 25 - Vyrobené šablony</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 26 - Stanice Ersas IR/PL 650A</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 27 - Detail osazení součástky</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 28 - Přetavovací pec Mistral 260</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 29 - GE PHOENIX X-RAY MICROMEX [26]</i>	<i>41</i>

<i>Obrázek 30 – Příklad rentgenové kontroly vzorku</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 31 – Příklad procentuální plochy voidů u vzorku</i>	<i>43</i>

Seznam grafů

<i>Graf 1 - Naměřený teplotní profil</i>	<i>41</i>
<i>Graf 2 – Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro všechny kombinace DPS a šablon zapájených pastou od výrobce Indium</i>	<i>46</i>
<i>Graf 3 – Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro všechny kombinace DPS a šablon zapájených pastou od výrobce Senju</i>	<i>47</i>
<i>Graf 4 – Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro DPS s vias a černou nepáživou maskou v závislosti na použitých šablonách a pájecí pastě</i>	<i>48</i>
<i>Graf 5 - Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro DPS s vias a bílou nepáživou maskou v závislosti na použitých šablonách a pájecí pastě</i>	<i>48</i>
<i>Graf 6 - Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro DPS bez vias s černou nepáživou maskou v závislosti na použitých šablonách a pájecí pastě.....</i>	<i>49</i>
<i>Graf 7 - Průměrná procentuální plocha voidů k vyhodnocovací oblasti pro DPS bez vias s bílou nepáživou maskou v závislosti na použitých šablonách a pájecí pastě</i>	<i>49</i>

Seznam použité literatury

- [1] ABEL, Martin a Vladimír CIMBUREK. *Bezolovnaté pájení v legislativě i praxi*. Pardubice: ABE.TEC, 2005. ISBN 80-903-5970-1.
- [2] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: Pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2392-3.
- [3] PIETRIKOVÁ, A., 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. ISBN 978-80-553-0447-2.
- [4] Pájený spoj. In: *SMT centrum* [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.smtcentrum.cz/pajeny-spoj-pajitelnost/pajeny-spoj/>
- [5] ABEL, Martin. *SMT Technologie povrchové montáže*. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 80-902-7331-9.
- [6] SZENDIUCH, Ivan. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. In: . [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [7] ABEL, Martin. *Plošné spoje se SMD, návrh a konstrukce*. Pardubice: Platan, 2000. ISBN 80-902-7332-7.
- [8] DUŠEK, Karel. *Pájení* [online]. In: . České vysoké učení technické v Praze: Přednášky z předmětu Svařování a pájení v elektrotechnice BVB13SPE – Přednášky, Studijní materiály - 11.Přednáška PÁJENÍ ÚVOD I [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=208998>
- [9] MACH, Pavel. *Bezolovnaté pájení v elektrotechnice* [online]. In: . České vysoké učení technické v Praze: Přednášky z předmětu Materiály pro výkonovou elektrotechniku B1B13MVE – Přednášky – Přednáška 2 Bezolovnaté pájky v elektrotechnice [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=81660>
- [10] SUBRAMANIAN, K.N. *Lead-Free Electronic Solders: A Special Issue of the Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Springer New York, 2007. ISBN 978-0387-48431-0.

- [11] SZENDIUCH, Ivan. *Mikroelektronika a technologie součástek* [online]. In: . Vysoké učení technické v Brně, 2011 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10413686-Doc-ing-ivan-szendiuch-csc-mikroelektronika-a-technologie-soucastek.html>
- [12] SZENDIUCH, Ivan. *Propojování v elektronice – elektrické spoje a jejich realizace* [online]. In: . Vysoké Učení Technické v Brně [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11738657-Propojovani-v-elektronice-elektricke-spoje-a-jejich-realizace.html>
- [13] GANESAN, Sanka a Michael PECHT. *Lead-free Electronics*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. ISBN 978-0-471-78617-7.
- [14] STARÝ, Jiří. *Plošné spoje a povrchová montáž: Laboratorní cvičení* [online]. In: . Vysoké učení technické v Brně, 2011 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10656988-Plosne-spoje-a-povrchova-montaz.html>
- [15] DUŠEK, Karel. *Pájení* [online]. In: . České vysoké učení technické v Praze: Přednášky z předmětu Svařování a pájení v elektrotechnice BVB13SPE – Přednášky, Studijní materiály - 12. Přednáška PÁJENÍ ÚVOD 2 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=208999>
- [16] YUNUS, Mohammad, K. SRIHARI, J.M. PITARRESI a Anthony PRIMAVERA. Effect of voids on the reliability of BGA/CSP solder joints. *Microelectronics Reliability* [online]. 2003, **43**(12), 2077-2086 [cit. 2022-05-09]. ISSN 00262714. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-2714(03)00124-0
- [17] ASPANDIAR, Raiyo. VOIDS IN SOLDER JOINTS. In: *SMTnet* [online]. SMTnet: Intel Corporation, 2019 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://smtnet.com/library/files/upload/Voids-in-Solder-Joints.pdf>
- [18] *Voids in Solder Joints* [online]. In: . Indium Corporation, 2010 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.indium.com/blog/voids-in-solder-joints-i.php>
- [19] STARÝ, Jiří. *Dutiny – voidy v pájených spojích, druhy, mechanismy vzniku a vliv na spolehlivost* [online]. Brno: SMT-info konsorcium, (76) [cit. 2022-05-09]. ISSN 1211-6947. Dostupné z: http://www.smtinfo.cz/download/bulletiny/SMT_bulletin1410.pdf
- [20] *Avoiding Microvoids* [online]. In: . ASSEMBLY Magazine [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/articles/84024-avoiding-microvoids>

- [21] PARK, Jong-Myeong, Seung-Hyun KIM, Myeong-Hyeok JEONG a Young-Bae PARK. Effect of Cu–Sn intermetallic compound reactions on the Kirkendall void growth characteristics in Cu/Sn/Cu microbumps. *Japanese Journal of Applied Physics* [online]. 2014, **53**(53) [cit. 2022-05-09]. ISSN 0021-4922. Dostupné z: doi:10.7567/JJAP.53.05HA06
- [22] NVMFS5C460N-Single N-Channel Power MOSFET: Datasheet. In: *Onsemi.com* [online]. [cit. 2022-05-14]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/nvmfs5c460nl-d.pdf>
- [23] *BEZ OLOVA* [online]. In: . Printed [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.printed.cz/article/bez-olova-493>
- [24] Indium8.9HF: Datasheet. In: *Indium.com* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.indium.com/products/solders/solder-paste/lead-free/no-clean/#indium8.9hf>
- [25] M31-GRN360-K1MK-V4: Datasheet. In: *Assys.ch* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: https://www.assys.ch/products/solderpaste/senju_lotpasten_main.html
- [26] GE Phoenix Micromex 180 PCB X-ray 2011. In: *Pfpcb.com* [online]. pfpcb.com [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://pfpcb.com/products/ge-phoenix-micromex-180-pcb-xray-2011-windows-10>
- [27] VESELÝ, P., D. BUŠEK, O. KRAMMER a K. DUŠEK. Analysis of no-clean flux spatter during the soldering process. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2020, **275** [cit. 2022-05-14]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.116289

Přílohy

Příloha 1. – CD s podklady k této diplomové práci

Obsah CD:

- Návrhy DPS a šablon v programu Eagle
- Data v tabulkách a grafy ve formátu XLSX