



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA EKONOMIKY, MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH VĚD

Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev

Influence of reflow soldering temperature profile on the formation of intermetallic layer

Bakalářská práce

Studijní obor: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Autor práce: Jan Hintermüller

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

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hintermüller** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **456892**
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:

Vliv teplotního profilu u pájení přetavením na tvorbu intermetalických vrstev

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of reflow soldering temperature profile on the formation of intermetallic layer

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s technologií pájení přetavením s ohledem na teplotní profil (respektive na tzv. heating faktor) a s ohledem na vznik intermetalických vrstev.
- 2) Připravte si vzorky, na kterých provedete analýzu tloušťky intermetalických sloučenin s ohledem na heating faktor.
- 3) Výsledky vyhodnoťte, vyhodnocení proveďte i po ekonomické stránce.

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., Ďurišín J., Mach P.: Diagnostika a optimalizácia použitia ekologických materiálův 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: **26.01.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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 závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Jan Hintermüller

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Karlu Duškovi, Ph.D. za jeho ochotu, vstřícnost, připomínky a cenné rady po celou dobu realizace bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat Ing. Martinu Plačkovi a Ing. Petru Veselému za pomoc při vytvoření vzorků pro praktickou část mé bakalářské práce.

Anotace:

Tato práce se věnuje vlivu teplotního profilu na vznik a růst intermetalických vrstev. V teoretické části jsou popsány technologie pájení, zejména se zaměřením na pájení přetavením, teplotní profil a intermetalické sloučeniny. Experiment v praktické části je zaměřen na zkoumání tloušťky intermetalických vrstev v závislosti na různém nastavení teplotního profilu. Bakalářská práce dále obsahuje ekonomickou část, která se zabývá zhodnocením nákladů při použití různých pájecích past.

Klíčová slova:

Pájení, teplotní profil, růst intermetalických vrstev, náklady

Abstract:

This bachelor thesis deal with influence of temperature profile on growth of intermetallic layers. The theoretical part introduces soldering technologies, especially technology of reflow soldering, temperature profile and intermetallic layers. The practical part (experiment) is focused on influence of different temperature profiles on thickness of intermetallic layers. Thesis also includes economic part which compares cost calculation of use different solder paste in manufacturing process.

Key words:

Soldering, temperature profile, growth of intermetallic layers, cost

Obsah

1	Úvod	9
2	Základní pojmy	10
2.1	Deska plošných spojů-DPS.....	10
2.2	Povrchové úpravy DPS.....	10
2.2.1	HAL	10
2.2.2	OSP	10
2.2.3	ENIG	10
2.3	Pájka	11
2.4	Tavidlo	11
2.4.1	Dělení tavidel.....	11
2.5	Technologie osazování součástek na desku plošných spojů	13
2.5.1	THT technologie (Through-hole technology).....	13
2.5.2	SMT technologie (Surface mount Technology)	13
3	Typy pájení	14
3.1	Ruční pájení	14
3.2	Strojní pájení	15
3.3	Pájení vlnou	15
4	Pájení přetavením	16
4.1	Nanášení pájecí pasty.....	16
4.1.1	Nanášení dávkovačem.....	16
4.1.2	Tlakový dávkovač.....	17
4.1.3	Dávkovač se šroubovým vytlačováním.....	17
4.1.4	Nanášení šablonovým tiskem.....	17
4.2	Osazení součástek	18
4.3	Přetavení pájecí pasty	19
4.3.1	Pájení horkým plynem (konvekční pájení)	20
4.3.2	Pájení infračerveným zářením.....	21
4.3.3	Pájení v parách (kondenzační pájení).....	22
4.4	Teplotní profil	23
4.5	Základní parametry teplotního profilu	23
4.5.1	Přehřev a ustálení teploty	23
4.5.2	Teplota přetavení pasty.....	23
4.5.3	Chlazení	23
4.6	Heating factor.....	24

4.7	Pájecí pasty	25
4.7.1	Pájky SAC	26
4.7.2	Pájky BiSn.....	26
4.7.3	Pájky SC.....	26
5	Intermetalické sloučeniny	27
5.1	Intermetalické sloučeniny Sn – Cu	28
5.2	Intermetalické sloučeniny u ostatních povrchů	29
6	Praktická část.....	30
6.1	Popis použitých pomůcek a zařízení.....	30
6.2	Postup přípravy vzorků.....	33
6.3	Naměřené teplotní profily.....	34
6.3.1	Teplotní profil 1	34
6.3.2	Teplotní profil 2	35
6.3.3	Teplotní profil 3	36
6.4	Heating faktor.....	37
6.5	Další postup	37
6.6	Vyhodnocení vzorků	38
6.7	Naměřené hodnoty	40
7	Ekonomická část.....	43
7.1	Cena pájecí linky	43
7.1.1	Odpisy	44
7.2	Mzdové náklady.....	44
7.3	Cena a spotřeba materiálu	44
7.4	Cena el. energie.....	45
7.5	Celkové náklady.....	46
8	Závěr	48
9	Zdroje.....	49
10	Seznam obrázků	51
11	Seznam tabulek	52

Seznam použitých zkratk

DPS – deska plošného spoje

RoHS - Restriction of Hazardous Substances

HAL – Hot air Levelling

OSP - Organic Solder Protectives

THT - Through-hole technology

THD - Through-hole devices

SMT - Surface mount technology

SMD - Surface mount devices

IR – infrared, infračervené záření

SEM - rastrovací elektronový mikroskop

ENIG – Electroless Nickel Immersion Gold

1 Úvod

V dnešní době se spotřební elektrotechnický průmysl řadí mezi největší výrobní odvětví. Elektrická zařízení se stala běžnou součástí našeho každodenního života. Aby taková zařízení mohla vůbec vzniknout, je nutné je složit a pospojovat z jednotlivých součástí a komponentů. K nejvýznamnější metodě jejich spojování, a to zejména ve slaboproudé elektrotechnice, patří pájení.

Proces pájení je tedy velmi důležitý, protože pomocí pájení se spoj musí spojit jak mechanicky, tak elektricky. Je zde kladen velký důraz na kvalitu a spolehlivost vytvářeného spojení.

V posledních letech prochází pájení značnou řadou změn. Pájení pomocí pájky obsahující olovo, které bylo v minulosti preferováno z důvodu vyšší kvality, musí být v posledních letech nahrazeno pájkou bezolovnatou. Olovo bylo totiž zařazeno podle směrnice Evropské unie RoHS (Restriction of Hazardous Substances) mezi nebezpečné látky a nesmí se až na některé výjimky v pájkách používat. Bezolovnaté pájení prochází stále vývojem za účelem dosažení srovnatelných parametrů jako při pájení za použití olověných pájek.

V elektrotechnice je neustálá snaha o miniaturizaci součástek, a tím i o miniaturizaci pájecích ploch. Musí být zajištěna vyšší přesnost pájení. V pájení vznikají nové problémy, jako je např. větší proudové namáhání pájeného spoje, elektrochemická migrace či rychlejší růst intermetalických vrstev. Těmto problémům musíme věnovat značnou pozornost.

Ve své bakalářské práci se budu zabývat pájením, metodami pájení, a to zejména se zaměřením na pájení přetavením s ohledem na vliv teplotního profilu na vznik intermetalických sloučenin. Na tento problém se zaměří i praktická část práce.

2 Základní pojmy

2.1 Deska plošných spojů-DPS

Nejčastěji se jedná o destičku z materiálu FR4, která je pokryta Cu fólií. Námi požadovaný vzor se na této destičce vytvoří nejčastěji fotolitografií, kde je na destičku nanесena maska, přes kterou se vyleptá přebytečná měď. Vzniknou požadované vodivé cesty. Tím DPS zprostředkuje nosnou funkci a elektrické propojení následně osazovaných a pájených součástek. DPS se vyrábí v jednovrstvém, dvouvrstevném i vícevrstevném provedení. [2][3]

2.2 Povrchové úpravy DPS

Povrchové úpravy desek plošných spojů slouží především k ochraně před oxidací povrchu DPS. To umožňuje delší skladovatelnost DPS. Povrchové úpravy také zlepšují pájitelnost povrchu. Tyto faktory ovlivňují spolehlivost pájeného spoje. Úpravy povrchu se provádí pokovením nebo nanесením organického povlaku. K nejpoužívanějším metodám povrchové úpravy patří např.: HAL, OSP, ENIG. Tyto povrchové úpravy byly použity v praktické části bakalářské práce, a proto zde budou popsány podrobněji. [17]

2.2.1 HAL

HAL (Hot air Levelling) je jedna z nejpoužívanějších povrchových úprav DPS, kde se deska ponoří do roztavené pájky SnPb nebo v dnešní době používané bezolovnaté pájky. Na měděném povrchu tedy vznikne další vrstva, která chrání měď před oxidací. Přebytečná pájka bývá odstraněna proudem horkého vzduchu. Nevýhoda je, že pájka není nanесena rovnoměrně, vznikají tak nerovnosti na povrchu vrstvy. Dochází také k teplotnímu šoku DPS, a to především při použití bezolovnatých pájek z důvodu vyšší teploty potřebné pro roztavení pájky. [14]

2.2.2 OSP

OSP (Organic Solder Protectives) – na odhalený měděný povrch DPS se chemicky nanásí vrstva inhibitorů oxidace mědi často na bázi benzoimidazolů. Tato povrchová úprava se nejčastěji používá pro jednostranné desky. Dosahuje se zde mnohem lepší rovinnosti povrchu oproti úpravě HAL. Další výhodou oproti metodě HAL je, že DPS není vystavena tepelnému šoku, a také náklady na vytvoření této povrchové úpravy jsou nižší až o 40 %. K nevýhodám však patří krátká doba doporučené skladovatelnosti, která se pohybuje okolo šesti měsíců, a odlišné vlastnosti OSP od různých výrobců. [15] [17]

2.2.3 ENIG

ENIG (Electrolless Nikle Immersion Gold) vznikne nanесením niklu na měděný povrch DPS a následným chemickým nanесením zlata na vrstvičku niklu. Samotný nikl nelze použít, protože rychle oxiduje, proto se jako svrchní vrstva využívá zlato. Mezivrstva niklu zajišťuje dobrou pájitelnost a brání růstu intermetalických vrstev mezi Sn a Cu. ENIG disponuje velmi dobrou rovinností povrchu. [27]

2.3 Pájka

Pájka je slitina, kterou provádíme metalurgické spojení kovů. Teplota tání pájky musí být vždy nižší než teplota tání spojovaných materiálů. Pájku většinou tvoří dvou nebo tříslučková slitina kovů. Pro speciální případy jsou i pájky vícesložkové, či pájky z čistého kovu.

Dříve byly nejpoužívanější pájky na bázi cín-olovo, např. pájka Sn63Pb37 s teplotou tání 183 °C. Ač mají pájky s obsahem olova v mnoha ohledech lepší vlastnosti, jsou nahrazovány pájkami bezolovnatými, a to z důvodu, že olovo bylo v posledních letech zařazeno na seznam neekologických a negativně působících látek na lidský organismus a na životní prostředí. Téměř většina spotřební elektroniky se pájí bez olova. Mezi nejpoužívanější bezolovnaté slitiny patří tzv. SAC. Tedy slitina Sn, Ag, Cu. V odvětvích, kde je kladen velký důraz na kvalitu a spolehlivost, však existují výjimky a olověné pájky se zde stále používají. Jedná se např. o letectví, kosmonautiku, lékařství.

Pájky se vyrábějí v různých provedeních v závislosti na způsobu a formě pájení. Vyrábí se pájka ve tvaru ingotu pro pájecí lázně nebo pájka ve formě drátu, která se používá k ručnímu pájení (uvnitř můžeme najít jádro, ve kterém je tavidlo). Dalším typem jsou tzv. pájecí pasty, které se používají při pájení přetavením. Jedná se o kombinaci velmi malých kuliček pájecí slitiny a dalších komponentů, které dávají pastě specifické vlastnosti. Pájecím pastám se v kapitole 4.7. věnuji podrobněji. [2][4][5]

2.4 Tavidlo

Tavidla se při pájení používají z důvodu odstranění nečistot a zoxidovaných vrstev na povrchu pájených materiálů. Úkolem tavidel je také zabránit vzniku nových oxidačních vrstev při samotném pájení. Tavidlo též napomáhá k lepší smáčivosti a lepšímu roztékání pájky. Tavidlo však může negativně ovlivnit spolehlivost spoje. Zbytky tavidla na DPS mohou působit korozivně či vyvolávat elektrochemickou migraci. Tavidla jsou vyráběna ve formě tekuté, tuhé nebo ve formě gelu, který je obsažen např. v pájecích pastách. [4]

2.4.1 Dělení tavidel

Tavidla se dělí podle dvou nejdůležitějších norem:

- dle ČSN EN 9454-1
- dle IPC J-STD-004

Tabulka 1. Typy tavidel podle EN 9454-1 [2]

TYP TAVIDLA	ZÁKL.SLOŽKA	AKTIVÁTOR	FORMA TAVIDLA
1. pryskyřicové	1. kalafuna (přír.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 2. Typy tavidel podle normy IPC J-STD-004 [20]

Flux Composition	Flux/Flux Residue Activity Levels	% Halide ¹ (by weight)	Flux Type ²	Flux Designator
Rosin (RO)	Low	<0.05%	L0	ROLO
		<0.5%	L1	ROL1
	Moderate	<0.05%	M0	ROM0
		0.5-2.0%	M1	ROM1
	High	<0.05%	H0	ROH0
		>2.0%	H1	ROH1
Resin (RE)	Low	<0.05%	L0	RELO
		<0.5%	L1	REL1
	Moderate	<0.05%	M0	REM0
		0.5-2.0%	M1	REM1
	High	<0.05%	H0	REH0
		>2.0%	H1	REH1
Organic (OR)	Low	<0.05%	L0	ORLO
		<0.5%	L1	ORL1
	Moderate	<0.05%	M0	ORM0
		0.5-2.0%	M1	ORM1
	High	<0.05%	H0	ORH0
		>2.0%	H1	ORH1
Inorganic (IN)	Low	<0.05%	L0	INL0
		<0.5%	L1	INL1
	Moderate	<0.05%	M0	INM0
		0.5-2.0%	M1	INM1
	High	<0.05%	H0	INH0
		>2.0%	H1	INH1

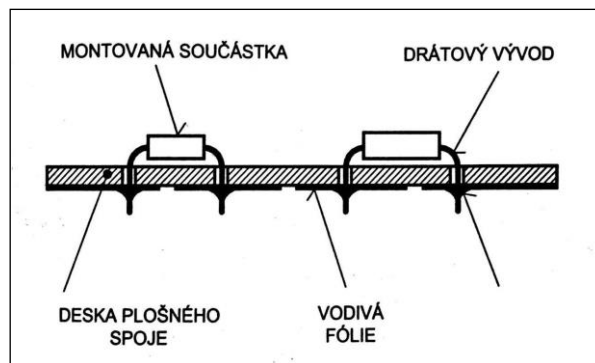
1. Halide measuring <0.05% by weight in flux solids and may be known as halide-free. This method determines the amount of ionic halide present (see Appendix B-10).

2. The 0 and 1 indicate the absence or presence of halides, respectively. See paragraph 3.3.1.2.2 for flux type nomenclature.

2.5 Technologie osazování součástek na desku plošných spojů

2.5.1 THT technologie (Through-hole technology)

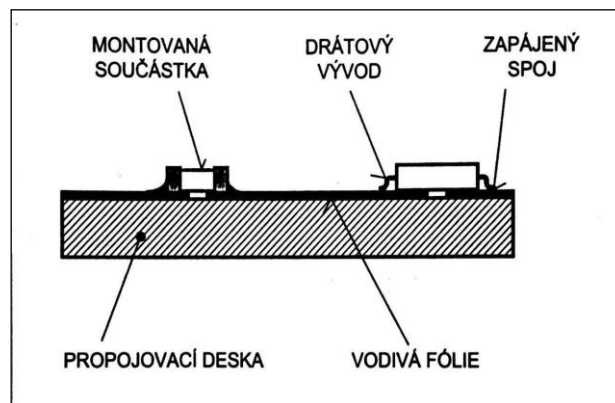
V češtině tzv. „vsazovaná montáž“. Jednalo se o první typ technologie osazování desky plošného spoje (DPS). Tato technologie se používá pro součástky s drátovými vývody. Tyto vývody se vkládají do předem vyvrtaných otvorů na desce plošného spoje. Součástky jsou k desce plošných spojů pájeny z druhé strany, než kde se nachází samotné pouzdro součástky, protože na druhé straně se také nachází propojovací fólie (vodivé cesty na DPS). Hlavní nevýhodou při neustálé snaze o miniaturizaci jsou rozměry této technologie, proto je méně používána než technologie SMT. [1] [2]



Obrázek 1. Příklad technologie THT [1]

2.5.2 SMT technologie (Surface mount Technology)

Jedná se o povrchovou montáž, kde jsou součástky pájeny ze strany pouzdra součástky, a proto není třeba do DPS vyvrtávat otvory pro vložení vývodů součástek. Vývody součástek pro technologii SMT se značně liší od technologie THT. Nejčastěji je vývod tvořen páskem. Příklad takového vývodu vidíme na obrázku č. 2 vpravo. Vývody mohou být také vytvořeny např. na těle součástky, což označujeme jako tzv. „bezvývodové provedení“. To můžeme vidět na obrázku č. 2 vlevo. Díky svým malým rozměrům, kde může být ze součástky vyvedeno mnohem více vývodů na stejné ploše, je míra použití této technologie mnohem vyšší než technologie THT. [1] [2]



Obrázek 2. Příklad technologie SMT [1]

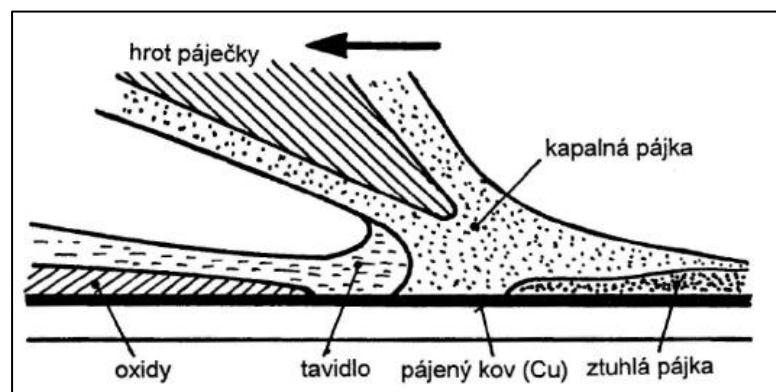
3 Typy pájení

Pájení lze rozdělit na dva základní typy, a to pájení měkké a pájení tvrdé. Toto dělení je z hlediska použité teploty při pájení. Teploty použité pro měkké pájení jsou do 450 °C a slouží k spojování vodičů a vývodů součástek, např. na DPS. Tvrdé pájení se využívá především pro mechanické spojování konstrukcí, používají se zde vyšší teploty než u měkkého pájení. Tato práce bude tedy zaměřena na jednotlivé typy měkkého pájení a jejich postupy. [4]

3.1 Ruční pájení

Dříve nejrozšířenější metoda pájení, která postupem času ztrácí na významu z důvodu nepřesnosti, nižší kvality a menší rychlosti v porovnání se strojním pájením. Manuální pájení za pomoci páječky slouží v dnešní době převážně k opravám a kusové výrobě. Vnesením lidského faktoru do pájecího procesu nedokážeme pokaždé zajistit stejné podmínky při pájení jednotlivých spojů. Vždy se bude lišit doba prohřátí spoje, množství naneseného tavidla či množství pájky. Rychlost pájecího procesu je také pro sériovou výrobu nevyhovující. [4] [8]

Tavidlo se na pájený povrch nanáší před ohřevem nebo při něm uvolněním z dutinky v trubičce pájky. Následuje ohřívání spoje ruční páječkou, která v dnešní době disponuje elektronicky nastavitelnou teplotou. Optimální teplota hrotu se pohybuje mezi 320 °C a 350 °C. Pájka se do pájené oblasti přidá až po dostatečném prohřátí, aby se rychle tavila a smáčela pájenou plochu. Čas samotného pájení je přibližně 1 až 4 sekundy. Po oddálení páječky nastává proces chladnutí. Do doby ztuhnutí pájky by se mělo zabránit jakémukoli pohybu s pájeným spojem. Tvorbu takového spoje můžeme vidět na obrázku 3. [4] [8]



Obrázek 3. Tvorba ručně pájeného spoje [4]

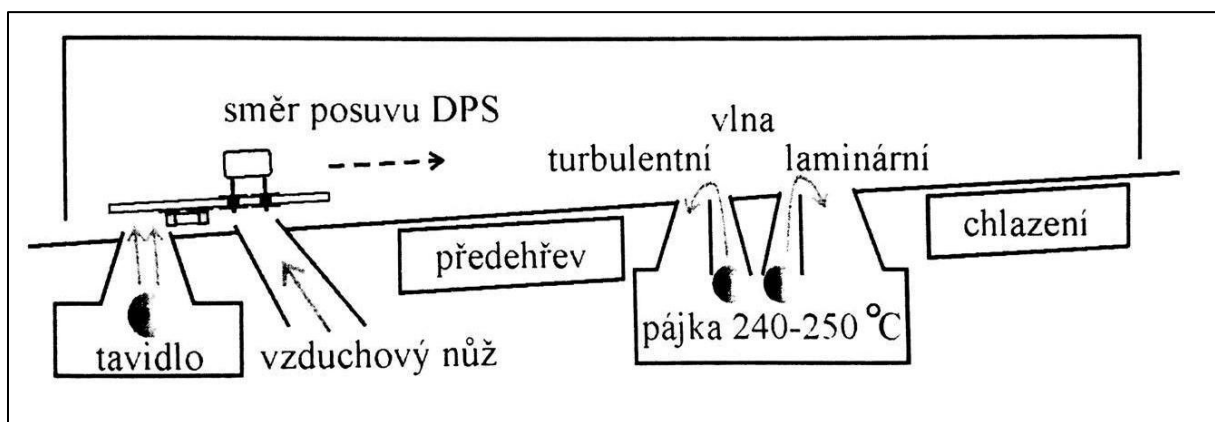
3.2 Strojní pájení

Pájené spoje vytvořené pomocí strojového pájení nejsou ovlivněny lidským faktorem. Při tomto pájení tedy dosahujeme vyšší přesnosti a dokážeme velice přesně opakovat jednotlivé kroky pracovního postupu, což zajistí odpovídající kvalitu u všech produkovaných spojů v sériové výrobě. Z ekonomického hlediska je také strojní pájení mnohem efektivnější, protože dosahujeme značné úspory materiálu, energie a též zrychlení výrobního procesu. Všechny tyto faktory snižují celkové výrobní náklady.

Mezi nejpoužívanější způsoby strojního pájení v praxi patří pájení přetavením a pájení vlnou, proto se těmto metodám budu věnovat podrobněji. Jiné metody se používají téměř výhradně pro speciální aplikace. Jedná se například o pájení vlečením, ultrazvukem či ponorem. [8]

3.3 Pájení vlnou

Pájení vlnou se při hromadné výrobě používá už mnoho let. Jedná se o tzv. FLOW pájení, což je pájení tekutou pájkou. Mezi jeho hlavní výhody patří to, že je možné pájet součástky pro technologii vsazované montáže a zároveň také součástky pro technologii povrchové montáže. Pájení vlnou se využívá především u technologie THD součástek, kde jsou součástky pájeny na opačné straně, než je umístěno jejich pouzdro. Princip pájení vlnou můžeme vidět na obrázku 4. [6]



Obrázek 4. Princip vlny [6]

Pájitelné plochy, které nejsou určeny k pájení, jsou většinou pokryty nepájkivou ochrannou vrstvou, tzv. nepájkivou maskou. Prvním krokem před pájením je osazení součástek osazovacím automatem. V případě součástek SMD se musí součástky k DPS přilepit speciálním lepidlem. Lepidlo musí splňovat požadované parametry jako např.:

- malá roztékavost
- dostatečná adheze a pevnost spoje
- nesmí chemicky reagovat s DPS ani součástkami
- nesmí být vodivé

V dalším kroku se nanese tavidlo. To se provádí pomocí nanášení napěněného tavidla nebo pomocí tavidla nanášeného nástřikem. Potom následuje předeřev, který slouží k aktivaci tavidla a napomáhá k snížení teplotního šoku pro součástky i DPS před samotným pájením. Po předeřátí přichází DPS po dopravníku k samotné vlně. Jedná se o roztavenou pájku, nacházející se v kontejneru. Pájka je vytlačována čerpadlem kolmou tryskou. DPS touto vlnou prochází, a tím dochází k vytvoření pájeného spoje.

Existuje několik typů vln v závislosti na druhu pájených součástek. Prvním typem je vlna jednoduchá, která je vhodná pro pájení součástek THD. Pro pájení DPS se součástkami SMD se používá vlna dvojí. Lze ji tedy použít pro THD i SMD. DPS tedy prochází dvěma dílčími vlnami, jak je naznačeno na obrázku 4. První vlna smáčí DPS turbulentně. Tato vlna podporuje funkci tavidla, zajišťuje dokonalé prohřátí a smáčení všech pájených povrchů. Druhá vlna se nazývá laminární a jejím úkolem je vytvořit dokonalý homogenní spoj (kužel pájky na spoji). V některých případech ještě DPS prochází nad proudem horkého vzduchu, který odstraní přebytečné množství pájky. Mezi další typy patří například omega vlna nebo vlna dutá. [2] [6] [7]

4 Pájení přetavením

Pájení přetavením (anglicky reflow soldering nebo jenom reflow) představuje trend dnešní doby pro pájení SMD součástek. Postup pájecího procesu se při pájení přetavením značně liší od ostatních technologií. Nanesení pájky, osazení součástek a ohřev jsou od sebe časově odděleny.

Pájka se nanáší před pájením na neosazenou desku DPS. Pájka je ve formě pájecí pasty, která již obsahuje potřebné tavidlo a další příměsi. Teprve potom následuje osazení vývodů součástek do pájecí pasty. Následuje dodání dostatečného množství tepelné energie, které způsobí přetavení pájecí pasty. Pájené součástky se samy vycentrují na pájené plošky a jsou zapájeny. To je způsobeno povrchovým napětím. Existuje mnoho způsobů dodání tepla, které jsou podrobně popsány v kapitole 4.3. [8] [9]

4.1 Nanášení pájecí pasty

4.1.1 Nanášení dávkovačem

Jedná se o injekční nanášení bod po bodu. Dávkovače jsou vyráběny v ručním i strojovém provedení. Tato metoda nanášení je velice flexibilní, a proto vyhovuje požadavkům pro opravy, kusovou či vzorkovou výrobu. Pro delší časy nanášení a menší přesnosti není vhodná pro velkosériovou produkci. Při ručním provedení se jedná o injekční stříkačku naplněnou pájecí pastou. Pro vytlačení hutné pasty je však nutné vyvinout dostatečnou sílu, proto přesnost a rychlost nanesení pasty není oproti strojovému provedení moc vysoká. [2] [8]

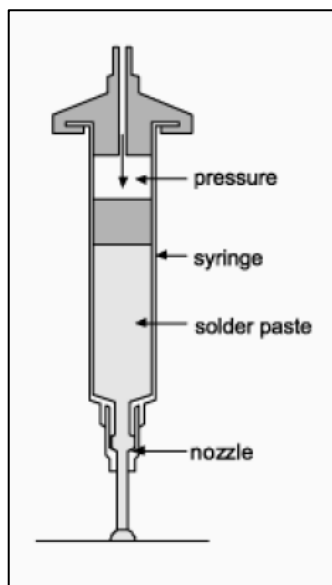
4.1.2 Tlakový dávkovač

Tlakový dávkovač, který můžeme vidět na obrázku č.5, nanáší pájecí pastu po určitý nastavený čas přes dávkovací hlavici. Do dávkovače přivádíme tlak, který působí na píst a ten vytlačuje definované množství pájecí pasty ven z tuby. Nanášení na jednotlivá místa můžeme provádět při ručním provedení dávkovače stisknutím tlačítka na dávkovači nebo připojeným pedálem. Pro plně automatickou variantu se poloha nanesení řídí programem v počítači. [2] [8]

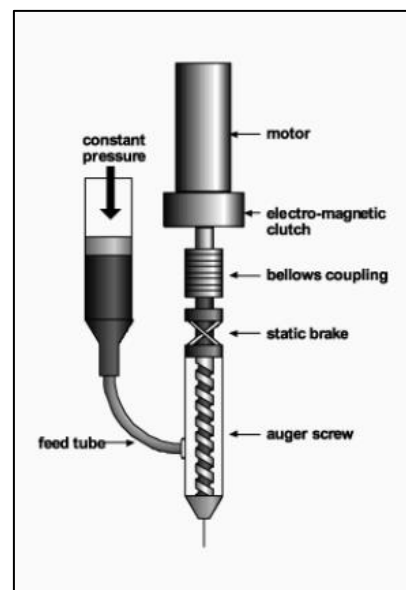
4.1.3 Dávkovač se šroubovým vytlačováním

Na zásobník s pájecí pastou neustále působí tlak. To zajišťuje dodání pasty do dávkovací hlavice. Vytlačení pasty z hlavice zajistí otáčení šroubu (vřetene). Pasta projde přes trysku na požadovanou plochu. Množství pájky lze regulovat nastavením doby a rychlosti otáčení šroubu. Tento typ dávkovače je zobrazen na obrázku č.6. [2][8]

Existují další varianty provedení dávkovačů, jako je např. Jetting. Pasta je zde nanášena po kapkách, které ovlivňuje řízené elektrické pole. To zajistí, že dopadnou na požadované místo. [2]



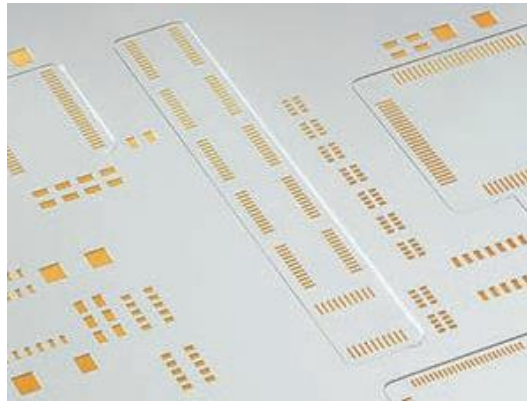
Obrázek 5. Tlakový dávkovač [2]



Obrázek 6. Dávkovač se šroubovým vytlačováním [2]

4.1.4 Nanášení šablonovým tiskem

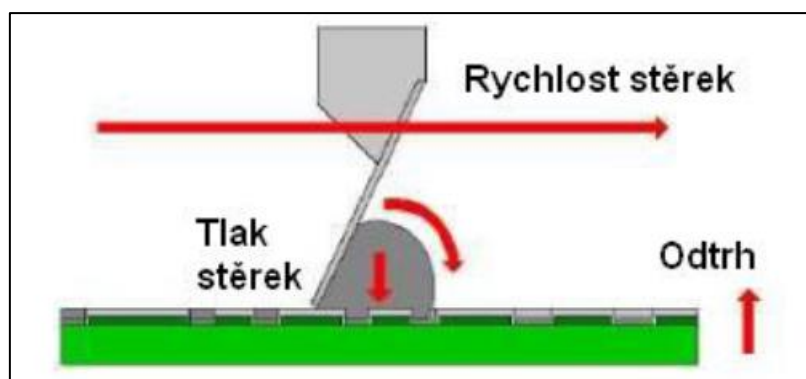
Nejpoužívanější metoda tisku pasty pro velkosériovou výrobu. Její výhoda je především v rychlosti nanesení a kontrole množství nanesené pasty. Pasta se zde nanáší přes šablonu (tzv. masku). Většinou se jedná o kovový plát (folii), do kterého se vytvoří motiv pro natištění pasty. Každá šablona je vyrobena pro konkrétní DPS. Motiv na šabloně se může vytvořit několika způsoby, např. řezáním laserem nebo chemickým leptáním. Příklad šablony s motivem vidíme na obrázku č. 7. [2] [10]



Obrázek 7. Detail šablony [11]

Před nanesením pasty je důležité, aby byla šablona dobře zarovnána s DPS. To se zajistí pomocí kontrolních značek, které jsou na DPS i na šabloně. U plně automatických strojů tyto značky snímají kamery, které kontrolují správnost zarovnání. Pasta se nanese pomocí stěrky, která přejede povrch šablony a pastou vyplní otvory v šabloně. Důležitá je rychlost a tlak stěrky. Po přejetí stěrky následuje odtrh šablony. Na požadovaných místech DPS zůstává naneseo potřebné množství pasty.

Proces nanášení pomocí stěrky vidíme na obrázku č.8. [10]



Obrázek 8. Nanesení pájecí pasty stěrkou [10]

4.2 Osazení součástek

Po nanesení pájecí pasty na DPS následuje osazení součástkami. K tomuto účelu slouží osazovací systémy. Všechny osazovací stroje fungují na stejném principu, kde se součástka uchopí pomocí osazovací hlavy, vystředí se do potřebné polohy a je osazena do pájecí pasty na DPS (tzv. pick and place).

Součástky, které se nachází v zásobnících, jsou uchopeny podtlakem pomocí osazovací trysky umístěné na osazovací hlavě. Osazovací systém má často několik druhů osazovacích trysek pro různé velikosti a typy součástek.

V sériové výrobě se používají osazovací automaty, které jsou řízeny programem a mohou být propojeny s celou výrobní linkou. Správnost osazení je zajištěna pomocí značek (Fiducials) na DPS, pomocí kterých se opticky zaměří správná poloha desky. [2][8]

4.3 Přetavení pájecí pasty

Pro přetavení pájecí pasty je potřebné dodat dostatečné množství tepla, aby došlo k zahřátí pasty nad její bod tání. K přetavení dochází v pájecích pecích, které se liší podle použité metody. Dnešní technologie umožňují použití všech druhů přenosu tepla. [9]

Druhy přenosu tepla:

- vedením
- prouděním
- zářením

Metody pájení přetavením:

- pájení horkým plynem (konvekční pájení)
- pájení zářením (infraohřev, světelným)
- pájení v parách (kondenzační pájení)
- pájení laserem
- pájení impulzní (pájení vyhřátým nástrojem)
- pájení ohřevem horkou deskou nebo pásem

Následně popíši tři nejpoužívanější metody přetavení pájecí pasty. V tabulce č.3 je uvedeno základní porovnání jejich vlastností.

Tabulka 3. Porovnání vlastností metod pájení přetavením [9]

<i>Faktor / Metoda pájení přetavením</i>	<i>Infraohřev</i>	<i>Kondenzace</i>	<i>Konvekce</i>
Řízení procesu	dobré	výborné	Velmi dobré
Pracovní teplota	regulovatelná	pevná	regulovatelná
Homogenita pracovní teploty	špatná	velmi dobrá	dobrá
Maximální teplota	špatně definovatelná	pevná	špatně definovatelná
Univerzálnost	ucházející	velmi dobrá	dobrá
Citlivost na barvu materiálu	velká	žádná	malá

4.3.1 Pájení horkým plynem (konvekční pájení)

Konvekční pájení může být realizováno pomocí centrálního ohřevu plynu nebo pomocí trysek. Jako plyn se nejčastěji využívá vzduch nebo dusík. Dusík se v technické praxi používá pro zamezení oxidace pájky. Potřebná teplota plynu se zajistí průchodem ohřivacím zařízením. Horký plyn je pomocí trysky přiváděn na potřebný pájený bod. Dodané teplo se reguluje pomocí teploty a také rychlostí proudění tepla. Teplota plynu vycházejícího z trysky se pohybuje okolo 350 °C až 400 °C a jeho průtok mezi 1 až 5 l/min. Problém může nastat při pájení velmi malých součástek (např. velikost 0201), které mají velice malou hmotnost a malou plochu vývodů (menší adheze k pájecí pastě). Hrozí, že proud plynu „odfoukne“ součástky z povrchu DPS, a proto je nutné při pájení takových součástek snížit rychlost proudění plynu. Pájení tryskou s horkým plynem je vhodné pro opravy, kde není tryskou ohřívána celá deska, ale jen požadované lokální body. [1]

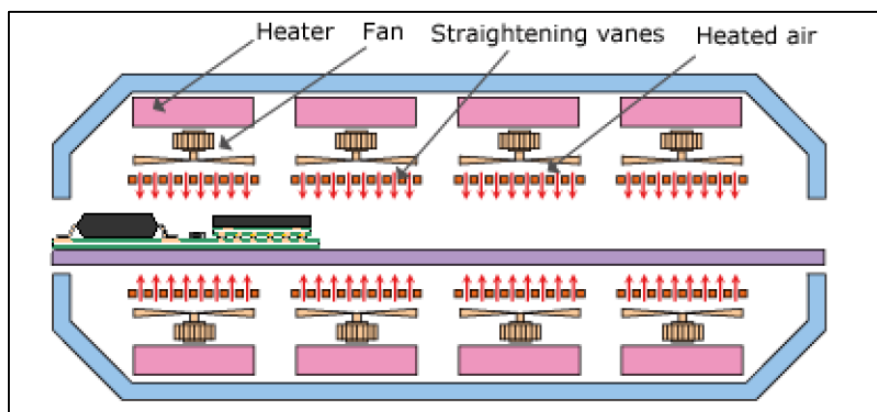
Pro sériovou výrobu se používá konvekční pec. Jedná se o systém topení a ventilátorů. Topné články ohřejí plyn na potřebnou teplotu. Ventilátory zajistí rozvod a cirkulaci plynu po peci. V peci se nachází několik tepelně regulovatelných zón a pohyblivý dopravník s nastavitelnou rychlostí posuvu. Jednotlivé zóny mají různou teplotu. Pomocí nich a rychlostí posuvu se dá nastavit požadovaný teplotní profil. Nejdříve dochází k přehřátí DPS, potom následuje přetavení pájecí pasty. Posledním krokem je v některých případech chlazení po zapájení pomocí ventilátorů. Nákres konvekční pece můžeme vidět na obrázku č.9. [9]

Výhody:

- relativně homogenní teplota
- oproti infraohřevu nezáleží na barvě součástek

Nevýhody:

- při použití vzduchu možná oxidace spojů, pro zamezení oxidace se používá dusík, což má za následek zvýšení nákladů na výrobu
- energetická náročnost a menší účinnost



Obrázek 9. Konvekční pec [2]

4.3.2 Pájení infračerveným zářením

K pájení infračerveným zářením není zapotřebí žádné médium. Pájený objekt s nižší teplotou absorbuje záření od zdroje, a tím jeho teplota roste. Jako zdroj záření se nejčastěji používá IR zářičů. Nejčastěji se jedná o wolframové žárovky. Míra absorpce záření závisí na vlnové délce λ [μm]. Problémem při pájení záření je, že dochází k nerovnoměrnému prohřátí jednotlivých míst na DPS. Ozařovaný materiál část záření pohltí a část odrazí. Míra pohlcení či odrazu záření se u jednotlivých materiálů na DPS značně liší. To popisují koeficienty odrazu a absorpce, které jsou ovlivněny mnoha faktory, jako např. barvou povrchu a drsností. Povrchy s tmavšími barvami budou pohlcovat větší množství záření a budou mít tedy vyšší teplotu než povrchy světlé a lesklé. Negativní vliv na ohřev mohou mít také rozměrnější součástky, které mohou stínit a zabránit tak dopadu záření na DPS. Všechny tyto faktory negativně ovlivňují kvalitu pájení. Může docházet k nadměrnému tepelnému namáhání povrchů a součástek nebo naopak k nezapájení spojů. [1][7][9]

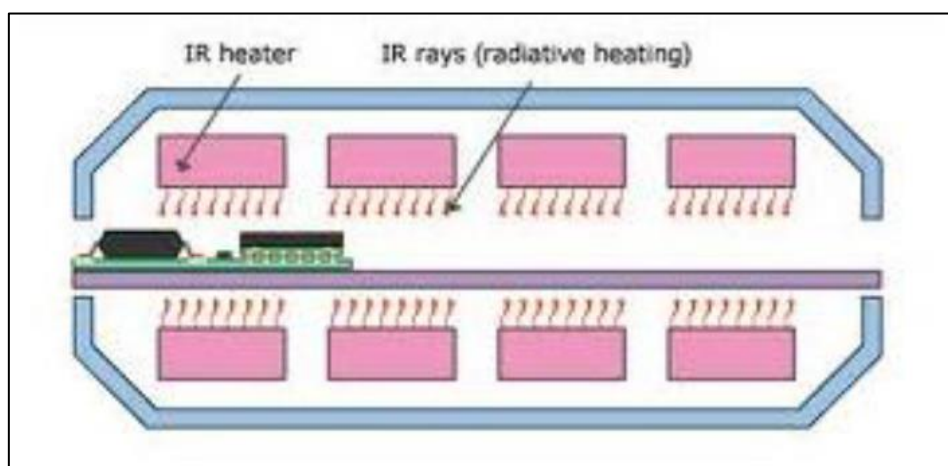
V sériové výrobě pájení probíhá v průběžných infračervených pecích. DPS se pecí pohybují po pásovém dopravníku. IR zářiče jsou instalovány nad i pod dopravníkem, záření na DPS dopadá z obou stran. V peci se opět nachází několik oddělených tepelně regulovatelných zón pro přesnější nastavení teplotního profilu. Nákres průběžné infračervené pece můžeme vidět na obrázku č.10. V praxi se často vyskytují zařízení, která kombinují ohřev zářením a ohřev prouděním horkého plynu. To napomáhá k rovnoměrnému ohřevu DPS. [1][9]

Výhody:

- vysoká účinnost

Nevýhody:

- nerovnoměrný ohřev vlivem rozdílné míry absorpce
- možné stínění větších součástek



Obrázek 10. IR pec [2]

4.3.3 Pájení v parách (kondenzační pájení)

Pájení probíhá v parách speciální pájecí kapaliny (Galden). DPS, součástky a jejich vývody jsou zahřívány teplem, které se uvolní při kondenzaci par na chladném povrchu DPS. Celý proces se odehrává v parní komoře. Tyto parní komory (pájecí pece) lze rozdělit na průběžné a dávkové. Nákres komory pro dávkové pájení je uveden na obrázku č.11. Bod varu pracovní kapaliny (Galdenu) určuje pájecí teplotu, což zajistí konstantní teplotu. Bod varu pracovní kapaliny se pohybuje od 55 °C do 270 °C dle složení kapaliny. Páry pracovní kapaliny zároveň vytváří ochrannou atmosféru, protože jsou velmi těžké, a tím vytlačí lehčí plyny a zamezí tak oxidaci pájených spojů. [9] [12]

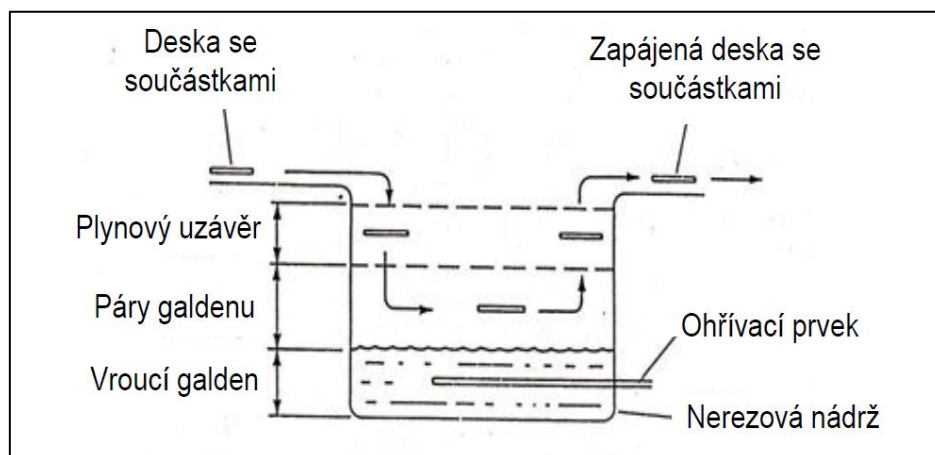
Deska se součástkami se nejprve předejde a následně se umístí do par Galdenu. Galden se odpařuje ze dna nádrže ohřátím topným článkem na bod varu. Páry kondenzují na DPS, vlivem teploty par dojde k přetavení pájecí pasty. Pára má tendenci více kondenzovat na chladnějším místech. Tím je zajištěna rovnoměrná teplota na DPS. Zkondenzovaný Galden skapává do dolní části nádrže. Zde je opět uveden do varu a odpaří se. [7] [12]

Výhody:

- velká účinnost
- rovnoměrná, definovaná pracovní teplota
- zabránění oxidace
- nedochází k přehřátí nebo naopak k nezapájení součástek

Nevýhody:

- vysoké náklady na provoz (vysoká cena pracovní kapaliny, která ubývá)
- častý výskyt Tombstoning efektu (zvednutí součástky)



Obrázek 11. Zařízení pro pájení v parách [7]

4.4 Teplotní profil

Teplotní profil popisuje průběh teplot v čase při průchodu pájeného spoje pájecí pecí. Optimální nastavení teplotního profilu je velmi důležité, protože se od něj odvíjí následná životnost a kvalita vytvořených spojů. Důležitým faktorem při přetavení pájecí pasty není jen maximální teplota (peak temperature), ale také předehtátí DPS a chladnutí po zapájení. Tyto faktory závisí na druhu a složení použité pájecí pasty. Vhodný teplotní profil bývá uváděn v technické dokumentaci výrobcem pájecí pasty. Nastavení teplotního profilu probíhá změnou parametrů pece, např. rychlosti posuvu dopravníku a teploty v jednotlivých zónách pece. Profil se měří pomocí tzv. profilometru. Jedná se o několik termočlánků, které jsou připájeny na kontrolní DPS a které projíždějí pecí. Teplota je snímána po krátkých časových úsecích a je ukládána do paměti. Naměřená data jsou následně zpracována pomocí počítače. [12]

4.5 Základní parametry teplotního profilu

4.5.1 Předehtév a ustálení teploty

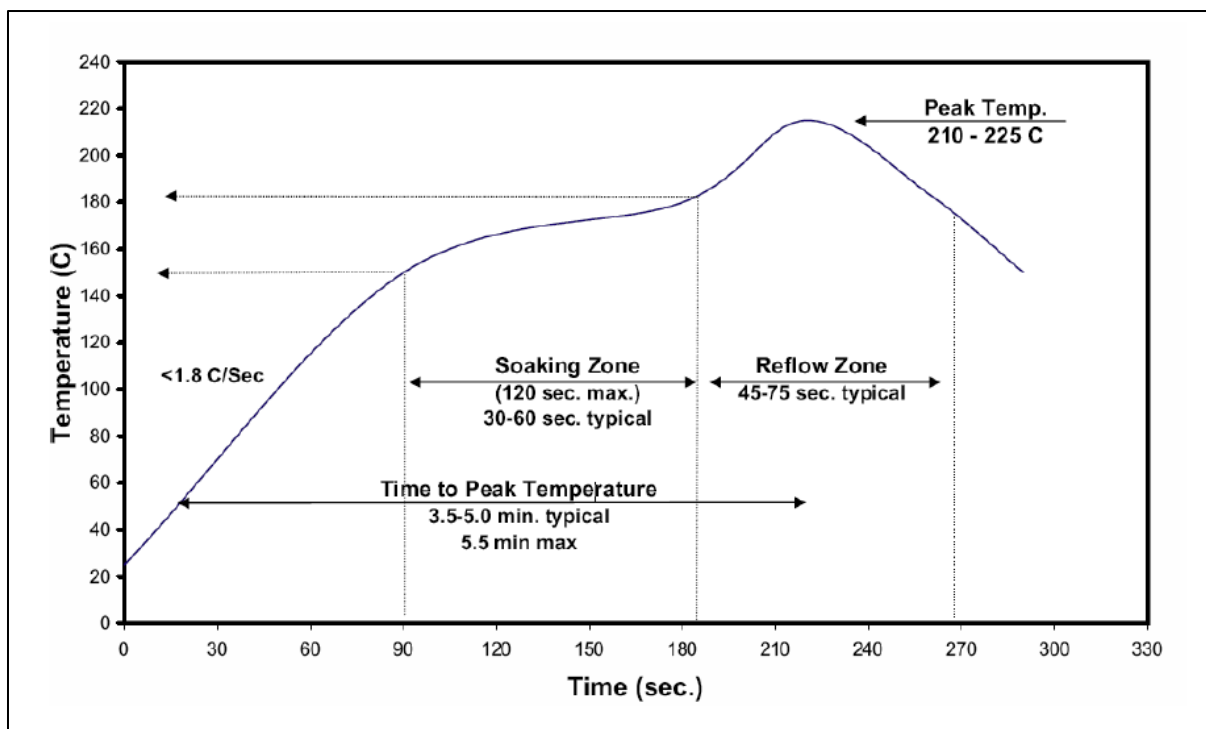
S rostoucí teplotou postupně dochází k odpařování rozpouštědla a aktivaci tavidla obsaženého v pájecí pastě. To má za následek očištění pájených povrchů od nečistot a zlepšení smáčivosti. Teplotní nárůst nesmí být příliš rychlý. Jinak dochází k změkčení pevných látek, ale v pastě stále zůstává množství tavidla, které nestihlo prodifundovat pastou. To způsobuje zvodnatění pasty a může docházet k sesuvu součástek či tvorbě můstků a kuliček. [12]

4.5.2 Teplota přetavení pasty

Časový usek, při kterém dochází k přetavení, se nazývá čas nad liquidem. Tato doba se pohybuje mezi 30-90 sekundami. V této oblasti profilu je velmi důležitá maximální teplota (peak temperature). Při nastavení příliš nízké teploty nemusí dojít k správnému přetavení pasty. Naopak při příliš vysoké teplotě může docházet k poškození součástek, deformaci DPS, hnědnutí okrajů DPS a u vícevrstvých desek k praskání prokovů. Maximální hodnota teploty se pohybuje mezi 220–230 °C. [9] [12]

4.5.3 Chlazení

Velmi důležitý je také proces chlazení po zapájení. V pájecích pecích se k chlazení používají ventilátory nebo odsávací trysky. Teplota by měla klesat rychlostí 4–6 °C s⁻¹, aby se vytvořila jemnozrnná struktura pájky. Při nesprávném chlazení dochází k růstu krystalů pájky, k zvětšování tloušťky intermetalických vrstev a k nárůstu křehkosti spoje, což ovlivňuje jeho životnost a kvalitu. [9] [12]



Obrázek 12. Příklad teplotního profilu [13]

4.6 Heating factor

Anglický výraz „heating factor“ lze přeložit jako integrál teploty a času. Značí se Q_η a jedná se o plochu zespolu ohraničenou teplotou tavení pájky (teplota liquidu) a shora křivkou teplotního profilu. Jednotkou heating factoru je s·K, případně s·°C. Příklad teplotního profilu s vyznačeným heating factorem je na obrázku č.13. Q_η lze matematicky popsat takto: [21]

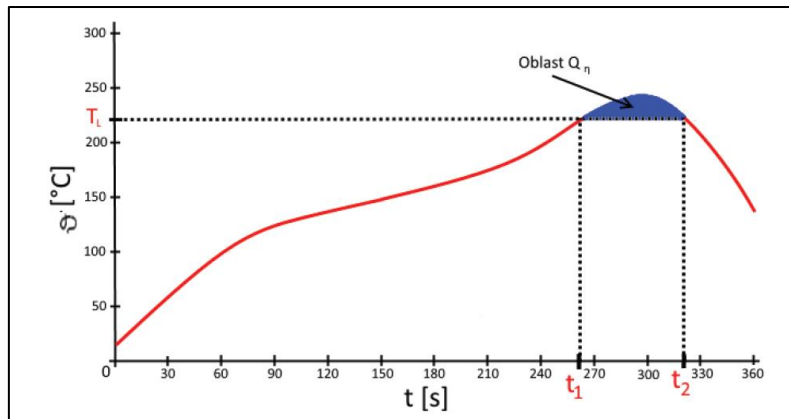
$$Q_\eta = \int_{t_1}^{t_2} (T(t) - T_L) dt \quad (1)$$

Kde: Q_η – heating faktor [s·K]

T – měřená teplota [K]

T_L – teplota liquidu [K]

t_1, t_2 – časy průsečíků T_L [s]

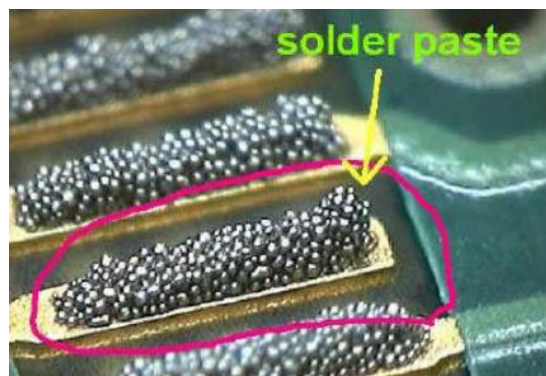


Obrázek 13. Příklad teplotního profilu s vyznačeným heating factorem [21]

Heating factor má velký vliv na růst a strukturu intermetalických vrstev. Pokud je hodnota heating factoru příliš malá, nelze vytvořit spolehlivý pájený spoj, a to i v případě vysoké teploty v pájecí peci. Dále bylo experimentálně zjištěno, že s rostoucím heating factorem se také téměř lineárně zvětšuje tloušťka intermetalických vrstev až do dosažení saturace. Z toho vyplývá, že lze vhodnou volbou heating factoru řídit tvorbu intermetalických sloučenin. [21]

4.7 Pájecí pasty

Jedná se o směs používající se při pájení přetavením, která obsahuje několik složek. Pastu tvoří pájka ve formě malých zrn (prášek), tavidla a další složky, které upravují její vlastnosti, jako je např. lepivost, viskozita. Použití pájecích past je výhodné zejména díky tomu, že můžeme nanést definované množství pájky a tavidla na pájený spoj. Zároveň nám pájecí pasta slouží k přidržení součástek na DPS před samotným zapájením. Pasta se nanáší např. dávkovačem, tiskem přes šablonu. O metodách nanášení pájecí pasty je napsáno více v kapitole 4.1. [1] [9]



Obrázek 14. Detail pájecí pasty [13]

Zrna pájky tvoří přibližně 90 % hmotnosti pájecí pasty a mají kulovitý tvar. Velikost zrn se pohybuje mezi 5 μm až 160 μm . Volba pájky souvisí s hustotou osazení DPS a s velikostí součástek.

Uplatňuje se zde pravidlo, které říká, že do nejmenšího otvoru šablony by se mělo vejít minimálně 5 zrn pájky o největším průměru. Podle toho jsou pájky děleny do tříd dle ANSI/J-STD-006. [1] [9]

Tabulka 4. Dělení částic pájky dle normy ANSI/J-STD-006 [1]

Třída	Průměr částic (μm)				
	největších	větších než, nejvýše 1 % obsahu	alespoň 80 % obsahu	alespoň 90 % obsahu	menších než, nejvýše 10 % obsahu
1	160	150	150 až 75	150 až 20	20
2	80	75	75 až 45	75 až 20	20
3	50	45	45 až 25	45 až 20	20
4	40	38		38 až 20	20
5	28	25		25 až 15	15
6	18	15		15 až 5	5

Rozhodující vliv na vlastnosti spoje má složení pájecí slitiny. Slitina je hodnocena podle mnoha parametrů, např. podle teploty tavení, vodivosti (elektrická, tepelná), mechanické pevnosti. Dříve tyto slitiny obsahovaly olovo, které však bylo zařazeno do kategorie škodlivých a nebezpečných látek ohrožujících životní prostředí, a proto, až na některé výjimky, bylo nahrazeno jinými prvky. V běžné výrobě se tedy používají bezolovnaté pájky, které mají v mnoha ohledech horší vlastnosti. [5][9]

4.7.1 Pájky SAC

Typickým představitelem je pájka SAC 305. Jedná se o třísloužkovou slitinu s obsahem 96,5 % cínu (Sn), 3 % stříbra (Ag), 0,5 % mědi (Cu). Z toho je odvozen název slitiny. Tato slitina má nízkou eutektickou teplotu tavení. Ta se pohybuje mezi 217 °C - 218 °C. Dá se kombinovat se všemi typy tavidel a má velmi dobrou smáčivost a spolehlivost. Svými vlastnosti je vhodná jako náhrada za olovnatou pájku 63Sn37Pb. [14]

4.7.2 Pájky BiSn

Jsou pájky vhodné při aplikaci, kde je maximální přípustná teplota pájení okolo 160 °C. Tato dvousložková slitina obsahující obvykle 58 % bizmutu (Bi) a 42 % cínu (Sn) má velice nízkou teplotu tavení, která se pohybuje okolo 138 °C. Při použití této pájky docílíme značné úspory energie na provoz reflow pece. [15]

4.7.3 Pájky SC

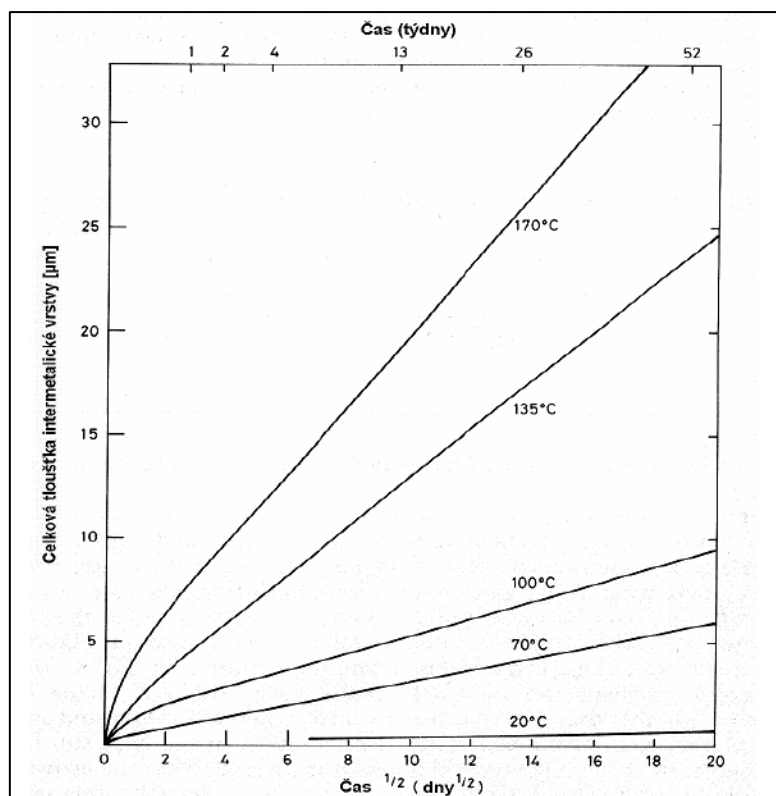
Jedná se o alternativu k pájce SAC, která však neobsahuje stříbro, a proto má nižší cenu. Typicky obsahuje 99,3 % cínu (Sn) a 0,7 mědi (Cu). Nevýhodou u této slitiny je, že má vysokou teplotu tavení 227 °C. Liší se tedy pouze o 5 °C od teploty tavení cínu. [15]

Další složkou pasty je tavidlo, které zajišťuje lepší smáčivost povrchu a výrazně tak ovlivňuje kvalitu a spolehlivost spoje. Používají se zde tavidla různých typů, např. přírodní pryskyřice (RO), syntetické pryskyřice (RE) nebo organické kyseliny (OR). Dále je udáván stupeň aktivace tavidla. Dle stupně aktivace se označují vzestupně písmeny L (nízká), M (střední), H (vysoká). Tavidlo se také označuje číslem 0 či 1. Podle toho, jestli se jedná o aktivaci bez či s použitím halogenidů. Součástí gelových tavidel jsou také rozpouštědla, která mají vliv na zasychání pasty. [9]

5 Intermetalické sloučeniny

Při každém pájecím procesu dochází k chemickým reakcím a k tvorbě intermetalických sloučenin v oblasti povrchu DPS a pájky. Dochází zde k difúzi jedné slitiny do druhé v důsledku vzájemné interakce, a to především když se pájka nachází v kapalně fázi. Tyto sloučeniny značně ovlivňují životnost a spolehlivost vytvořeného spoje. Intermetalické vrstvy zajistí vyšší pevnost vytvářeného spoje, ale ostatní vlastnosti intermetalických vrstev se liší od vlastností pájky i povrchu DPS. Tyto vlastnosti jsou většinou nežádoucí. Intermetalické sloučeniny mají větší rezistivitu, jsou křehčí a mají horší teplotní vodivost, proto se ve větší míře jedná o nežádoucí jev. [14] [17]

Tloušťka intermetalických vrstev závisí na teplotě pájeného spoje a s časem roste. Nejedná se pouze o vysoké teploty v pájecí peci, malý růst těchto vrstev můžeme pozorovat i při pokojové teplotě. Průběh růstu intermetalických vrstev při rozdílných teplotách v závislosti na čase můžeme vidět na obrázku č. 15. [14] [17]



Obrázek 15. Růst intermetalických vrstev při různých teplotách v závislosti na čase [14]

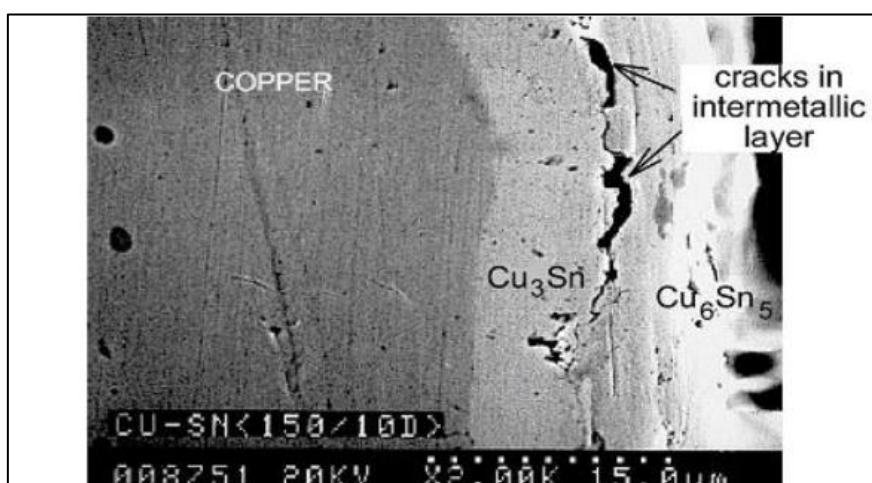
V některých případech, kdy je vrstva pájky velmi tenká, může intermetalická vrstva celou vrstvu nahradit. Povrch intermetalických vrstev je matně šedý, což může způsobit problém při optické kontrole pájených spojů. Intermetalické vrstvy mají vyšší teplotu tání a rozdílný součinitel délkové tepelní roztažnosti v porovnání s mědí a substrátem DPS. To může vyvolat mechanické namáhání spoje při změnách teploty. [14]

5.1 Intermetalické sloučeniny Sn – Cu

Nejčastěji se tvoří intermetalická vrstva mezi mědí na substrátu DPS a cínem obsaženým v pájce. Jedná se o sloučeninu Cu_6Sn_5 , jejíž tenká vrstva (desetiny mikrometru) se vytváří velice rychle po smáčení pájeného povrchu a je nezbytná pro pevnou vazbu mezi pájkou a kovem. Cu_6Sn_5 má světle šedou barvu a teplotu tavení okolo $415\text{ }^\circ\text{C}$. Sloučenina se v menší míře tvoří i při nižších teplotách, kdy se pájka nachází v tuhém stavu. Způsobuje to difúze mezi atomy mědi a cínu. Tato vrstva velmi často oxiduje a stává se nesmáčivou. [17]

Mezi mědí a intermetalickou sloučeninou může dojít ke vzniku další intermetalické sloučeniny Cu_3Sn , která vzniká, když je bráněno difúzi cínu do mědi a je podpořena difúze mědi do cínu. Podíl mědi v této sloučenině je vyšší než v Cu_6Sn_5 a pro pájku je nesmáčivá. Cu_3Sn je zbarvena tmavě šedě a její teplota tání dosahuje $670\text{ }^\circ\text{C}$. V případě opakovaného tepelného namáhání při provozu či při opravách proroste Cu_3Sn přes vrstvu sloučeniny Cu_6Sn_5 a může dojít k tzv. odsmáčení. V tomto případě se pájka shromažďuje do nepravidelných kapek. Pro obnovení pájitelnosti povrchu s touto vrstvou je zapotřebí tuto vrstvu mechanicky či chemicky odstranit. [17]

Na obrázku č.16 můžeme vidět 2000x přiblížený detail intermetalických sloučenin. Porovnání vybraných vlastností těchto intermetalických sloučenin se nachází v tabulce č.5.



Obrázek 16. Detail intermetalických vrstev [18]

Tloušťka intermetalických sloučenin Sn – Cu lze popsat vztahem [17]:

$$\delta = 10^3 * \exp \frac{-5 \cdot 10^3}{T} \sqrt{t} \quad (2)$$

Kde: δ – tloušťka intermetalických sloučenin v [μm]

T – teplota v [K]

t – čas v [s]

Tabulka 5. Porovnání vlastností intermetalických sloučenin Sn – Cu [17]

	Cu ₆ Sn ₅	Cu ₃ Sn	Cu
Tvrdost podle Vickerse	378	343	50
Mechanický charakter	Křehký	Křehký	Houževnatý
Poissonovo číslo	0,309	0,299	0,340
Tepelná roztažnost	16,3	19,0	16,0
Tepelná vodivost	34,1	70,4	385
Rezistivita	17,5	8,93	1,7
Hustota	8,3	8,9	8,9

5.2 Intermetalické sloučeniny u ostatních povrchů

Intermetalické sloučeniny se při pájení mohou tvořit i za použití jiných materiálů. Podobné sloučeniny s cínem vznikají při použití zlata, stříbra a niklu. Vytvořené sloučeniny mají podobný charakter jako sloučeniny Sn – Cu a disponují podobnými vlastnostmi, např. větší náchylností na mechanické narušení. [17]

6 Praktická část

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na analýzu tloušťky intermetalických sloučenin, které vznikly mezi pájkou a DPS při pájení přetavením. Analyzované vzorky se liší povrchovou úpravou, použitým tavidlem v pájecí pastě a nastavením teplotního profilu pájecí pece. Snímky vzorků byly zachyceny pomocí elektronového mikroskopu a vyhodnoceny pomocí programů v počítači.

6.1 Popis použitých pomůcek a zařízení

Pájecí pasty

Jedná se o bezolovnaté pájecí pasty SAC 305 od výrobce NeVo. Složení pájecí slitiny v pastě Cín- 96,5 %, Stříbro- 3,0 %, Měď- 0,5 %. Obsah pájky v pastě je 89 %. Zrníčka pájky mají rozměr mezi 20-45 μm . Teplota tání pasty se pohybuje mezi 217-219°C. Liší se pouze v druhu použitého tavidla. V prvním případě pasta obsahuje tavidlo ROL0 (přírodní pryskyřice s nízkou úrovní aktivace bez použití halogenidů). V druhém obsahuje tavidlo ROL1 (přírodní pryskyřice s nízkou úrovní aktivace s použitím halogenidů). [22] [23]

Tabulka 6. Parametry použitých pájecích past [22] [23]

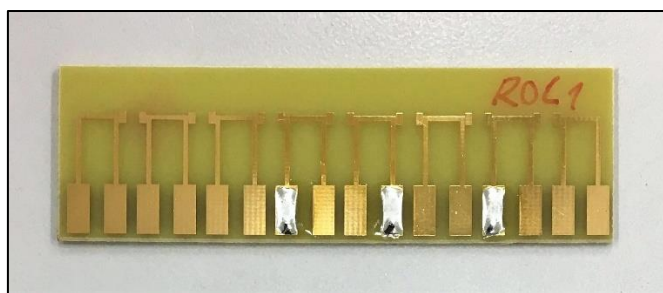
Pasta	PF606-P30	PF606-P
Složení pájky (%)	Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5	Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5
Teplota tání	217-219 °C	217-219 °C
Zrníčka pájky	20-45 μm	20-45 μm
Označení tavidla	ROL0	ROL1
Obsah tavidla	11, 5 % \pm 1 %	11, 5 % \pm 1 %
Obsah halogenidů	0 % v tavidle	0, 5 % v tavidle

Deska plošných spojů

K přípravě vzorků byly použity jednovrstvé laboratorní desky plošných spojů. Základní materiál pro výrobu těchto desek je FR4. Použil jsem tři typy povrchových úprav, a to:

- povrchovou úpravu HAL
- desku se základní vrstvou mědi - OSP
- povrchovou úpravu s vrstvičkou zlata - ENIG

Příklad takové desky plošných spojů můžeme vidět na obrázku č.17.



Obrázek 17. DPS se ENIG povrchovou úpravou s již přetavenou pájecí pastou (vzorek)

Profilometr KIC Explorer

Toto zařízení slouží k měření teplotních profilů při pájení přetavením. K tomuto profilometru lze připojit až sedm termočlánků, které snímají teplotu na problémových místech DPS při průchodu pájecí pecí. Měřicí zařízení je propojeno s PC pomocí datového kabelu. Profilometr zaznamenává teplotu v krátkých časových intervalech. Tato data lze snadno zpracovat v programu KIC 2000, který nám vykreslí naměřený teplotní profil. Data je možné následně exportovat a vyhodnotit v jiném programu, např. v Microsoft Excelu.



Obrázek 18. Profilometr KIC EXPLORER

Pájecí pec Mistral 260

Jde o malou průběžnou pájecí pec využívající pro ohřev proudění horkého vzduchu. Díky proudění vzduchu je zajištěno rovnoměrné rozložení teploty a nevzniká tzv. stínový efekt. Pec se dělí na tři zóny, ve kterých lze nastavit rozdílnou teplotu. První a druhá zóna slouží k předehřevu pasty a DPS. Třetí zóna s nejvyšší teplotou slouží k přetavení pasty. Maximální dosažitelná teplota je 300 °C. Dále lze nastavit rychlost posuvu pásového dopravníku v rozmezí od 15 cm/min do 60 cm/min. Na peci se nachází dotykový displej, pomocí kterého je možné tyto parametry přetavení nastavit. [24]



Obrázek 19. Pájecí pec Mistral 260 [16]

Mikroskop PHENOM ProX

Jedná se o stolní rastrovací elektronový mikroskop (SEM), který pomocí svého zvětšení umožňuje provést analýzu struktury vzorů. Celý systém je speciálním softwarem propojen s počítačem. Software umožňuje snadné zachycení obrazů z mikroskopu ve zvolené kvalitě. Zařízení má také ovládací otočný knoflík pro snadnější ovládaní. Pomocí otočného knoflíku lze snadno měnit jas, kontrast nebo ostrost obrazu. [19]

Parametry elektronového mikroskopu PHENOM ProX:

- optické zvětšení: 20-135 x
- zvětšení SEM: 80-130000 x
- rozlišení: <14 nm
- urychlovací napětí: 5 kV, 10 kV a 15kV
- velikost vzorku: až 32 mm (\varnothing)
- výška vzorku: až 100 mm
- zdroj elektronů (elektronové dělo): CeB_6



Obrázek 20. Elektronový mikroskop PHENOM ProX [19]

6.2 Postup přípravy vzorků

Na desky plošného spoje byla vždy nanášena pájecí pasta typu SAC 305. Bylo použito dvou druhů past se stejným složením pájky-Sn96,5/Ag3,0/Cu0,5. Pasty se liší v použití různých druhů tavidel (ROLO a ROL1), aby se dalo posoudit, zda mají různé druhy tavidla vliv na intermetalické sloučeniny. Pasta se vždy nanášela na tři typy povrchových úprav DPS. Jednalo se o desky s OSP, HAL a ENIG povrchovou úpravou. Pro každý typ povrchové úpravy DPS byly vytvořeny dva vzorky s pájecí pastou obsahující ROLO a také dva vzorky s pájecí pastou obsahující ROL1. Vzorky byly vytvořeny dvakrát z důvodu možného poškození při vytváření výbrusů pro následnou analýzu. Pro každý teplotní profil bylo tedy připraveno dvanáct vzorků, na kterých byly vždy nanášeny tři ostrůvky s pájecí pastou, jak je vidět na obrázku č. 17.

Přetavení pájecí pasty probíhalo při třech různých nastaveních teplotního profilu. Bylo tedy vytvořeno 36 kusů vzorků. Nejdříve bylo nutné tyto teplotní profily vhodně nastavit, aby odpovídaly požadavku výrobce pro správné přetavení pájecí pasty. Nastavení probíhalo pomocí nastavení optimální teploty v jednotlivých zónách pájecí pece a rychlosti posuvu pásového dopravníku, po kterém putovaly vzorky jednotlivými teplotními zónami pece. K vhodnému nastavení a k měření průběhu teplotního profilu se užívá profilometr. Součástí profilometru jsou připojené termočlánky, které jsou připájeny k pomocné DPS pájkou o vyšší teplotě tání (cca. 320 °C), než je teplota v peci. Tato deska prochází po pásovém dopravníku pecí a termočlánky zaznamenávají teplotu v peci. Teplota je zaznamenávána profilometrem po velmi krátkých časových intervalech (pětikrát za sekundu). Naměřená data lze zpracovat pomocí programu KIC 2000 v počítači, se kterým je profilometr propojen datovým kabelem. Po nalezení vhodných teplotních profilů byly připravené vzorky DPS s pájecí pastou přetaveny v pájecí peci dle příslušného teplotního profilu.

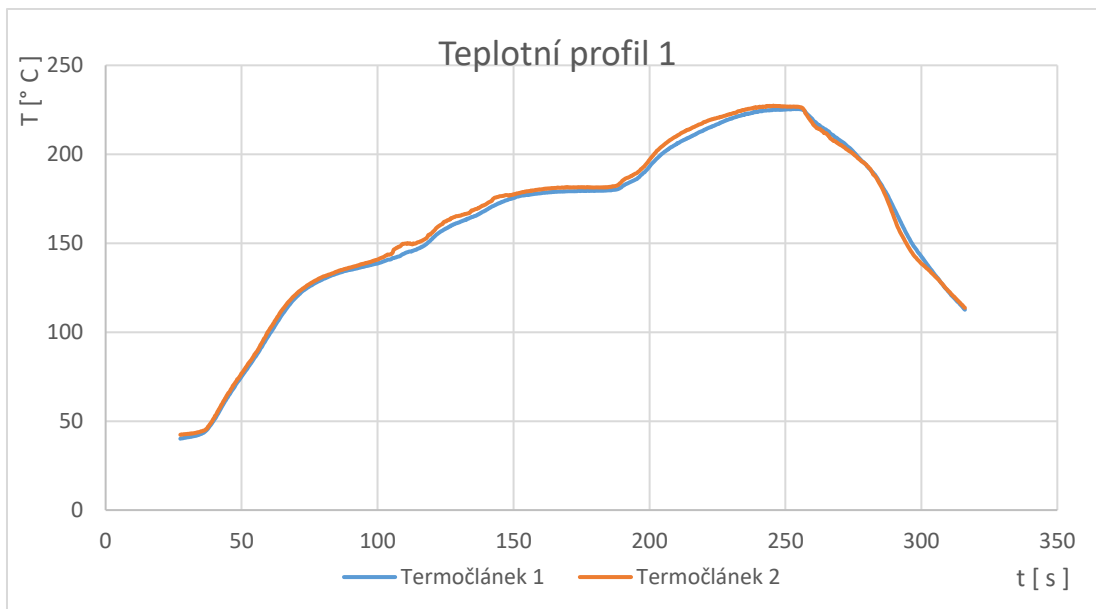
6.3 Naměřené teplotní profily

6.3.1 Teplotní profil 1

Z grafu teplotního profilu můžeme vidět, že při porovnání s ostatními teplotními profily zde dosahujeme nejnižší maximální teploty v pájecí peci. Pásový dopravník se posouval nejnižší možnou rychlostí.

Nastavení pece:

- preheat (předehřev) 1: 155 °C
- preheat (předehřev) 2: 188 °C
- reflow (přetavení): 232 °C
- speed: 15 cm/min
- maximální naměřená teplota (Peak): 227,28 °C



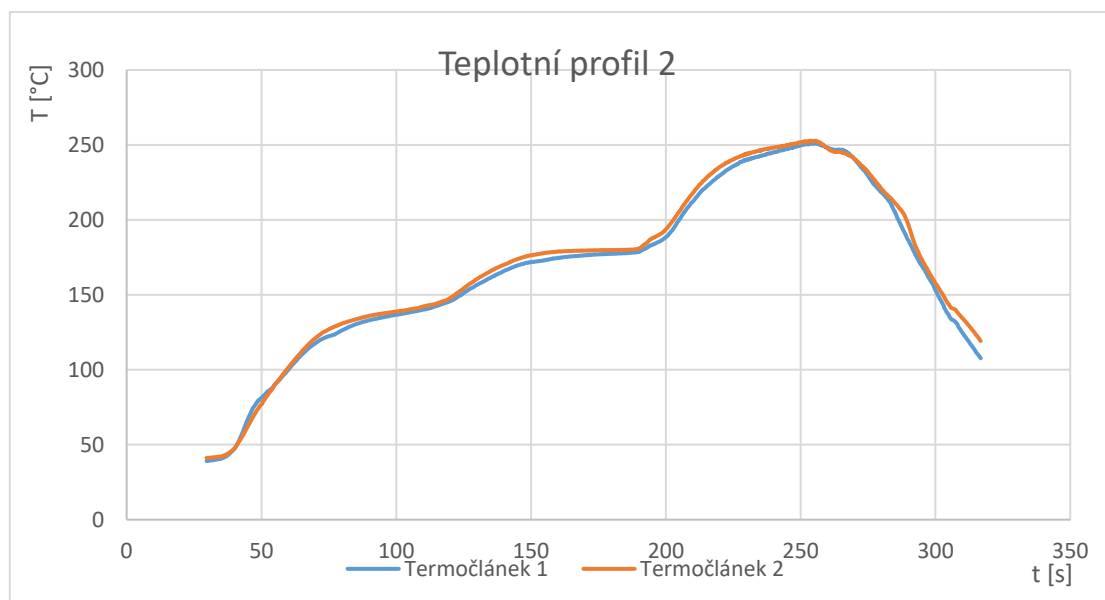
Obrázek 21. Průběh teplotního profilu 1

6.3.2 Teplotní profil 2

Rychlost dopravníku je zde stejná jako v případě prvního teplotního profilu, a to 15 cm/min. Je zde však značně vyšší teplota v poslední zóně pájecí pece (o 30 °C). Dosahujeme tedy značně vyšší teploty při přetavení, což by dle předpokladů z teoretické části mělo mít vliv na růst intermetalických vrstev.

Nastavení pece:

- preheat (předehřev) 1: 155 °C
- preheat (předehřev) 2: 188 °C
- reflow (přetavení): 262 °C
- speed: 15 cm/min
- maximální naměřená teplota (Peak): 252,84 °C



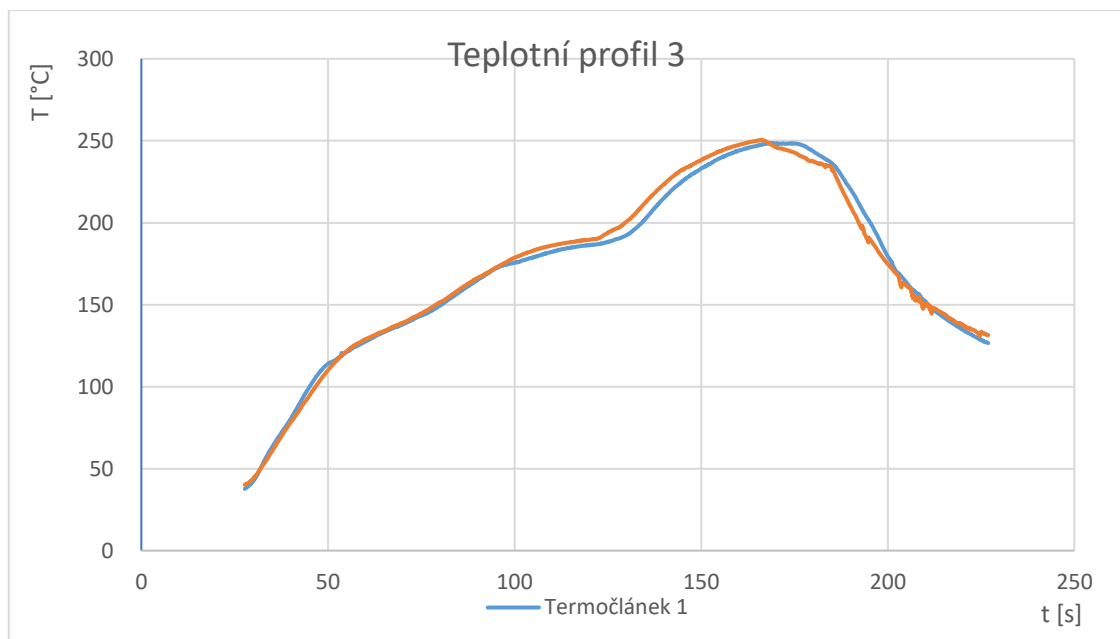
Obrázek 22. Průběh teplotního profilu 2

6.3.3 Teplotní profil 3

Nastavené teploty v jednotlivých zónách průběžné pece jsou u tohoto teplotního profilu nejvyšší. Od předchozích dvou profilů se liší kratším časovým průběhem, protože pásový dopravník má dvakrát vyšší rychlost.

Nastavení pece:

- preheat (předehřev) 1: 180 °C
- preheat (předehřev) 2: 210 °C
- reflow (přetavení): 270 °C
- speed: 30 cm/min
- maximální naměřená teplota (Peak): 250,51 °C



Obrázek 23. Průběh teplotního profilu 3

6.4 Heating faktor

Z naměřených dat z profilometru se dále pro každý teplotní profil stanovil heating faktor. K výpočtu heating faktoru jsem využil program Microsoft Excel, ve kterém jsem z naměřených dat vypočetl plochu pod křivkou teplotního profilu omezenou zdola teplotou tání pájky (218 °C). Heating faktory jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka 7. Naměřené heating faktory

	Nastavení teplotních zón peci [°C]	Maximální naměřená teplota [°C]	Heating faktor [s·K]
Teplotní profil 1	155-188-232	227,28	242
Teplotní profil 2	155-188-262	252,84	1652
Teplotní profil 3	180-210-270	250,51	1061

6.5 Další postup

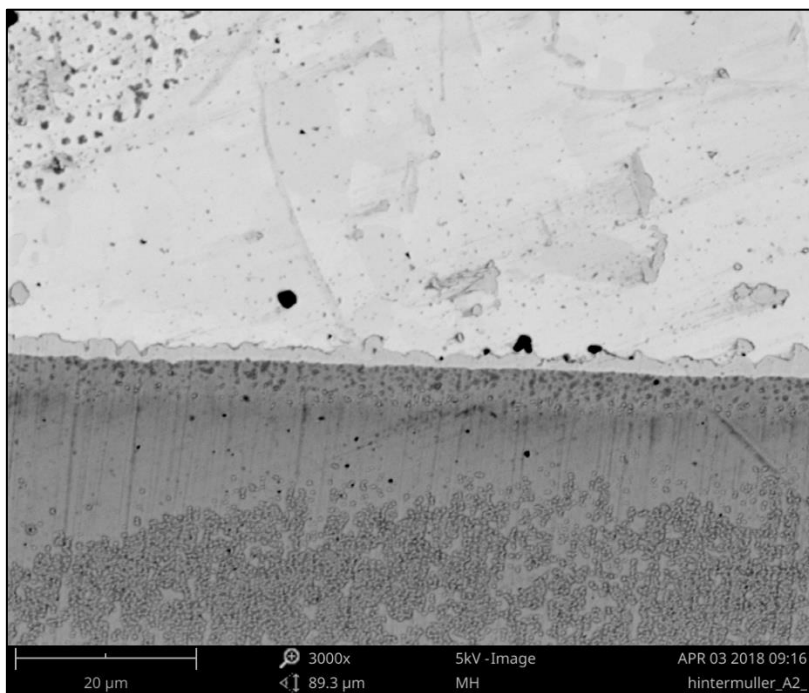
Dalším krokem bylo vytvoření výbrusů vzorků. Jedná se o zalití vzorků do speciální pryskyřice, která se skládá z tekuté a práškové formy. Po zalití a vytvrzení následuje broušení. Finální úpravou je pak vyleštění povrchu vzorku. Výsledný vzorek, vhodný k analýze na elektronovém mikroskopu, můžeme vidět na obrázku č. 24.



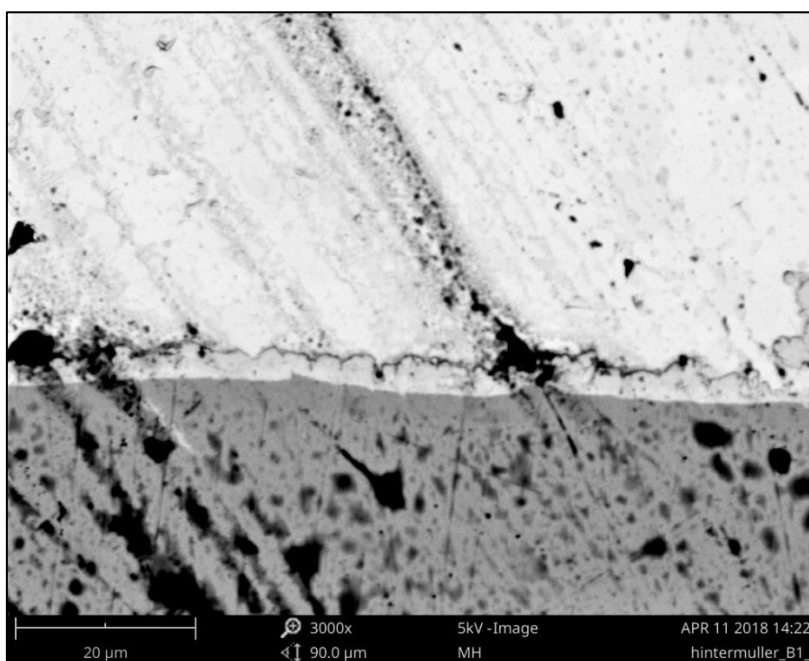
Obrázek 24. Vzorky zalité v pryskyřici vhodné pro analýzu intermetalických vrstev

6.6 Vyhodnocení vzorků

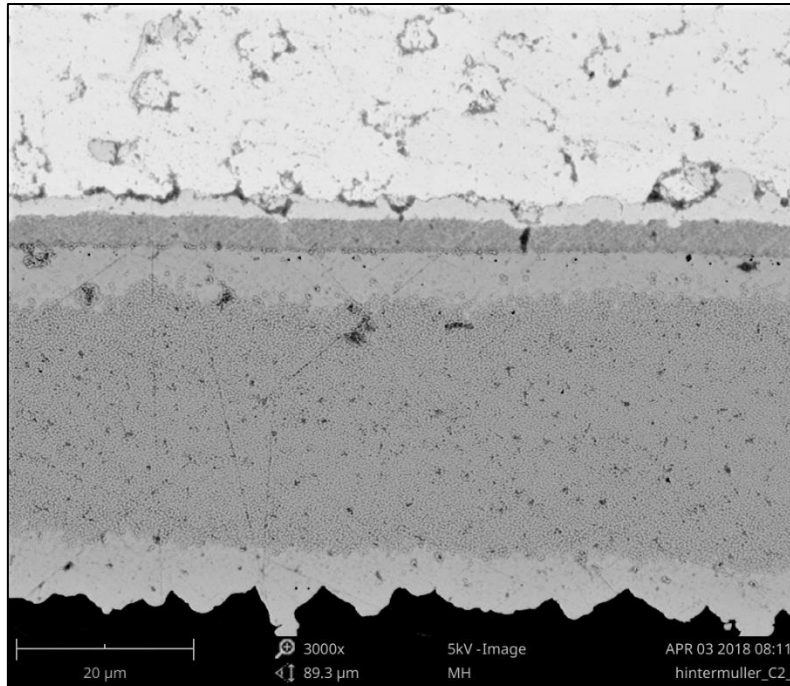
Vzorky byly sledovány pomocí elektronového mikroskopu PHENOM ProX. Pomocí tohoto mikroskopu se speciálním softwarem lze vzorky pozorovat, přibližovat a například ostřit na obrazovce počítače, který je s mikroskopem propojen. Snímky vzorků byly pořízeny se zvětšením 3000x. Příklady pořízených snímků můžeme vidět na obrázcích č. 25, 26, 27.



Obrázek 25. Intermetalická vrstva, vzorek: teplotní profil 1, tavidlo ROL1, povrch. úprava ENIG



Obrázek 26. Intermetalická vrstva, vzorek: teplotní profil 2, tavidlo ROL1, povrch. úprava ENIG

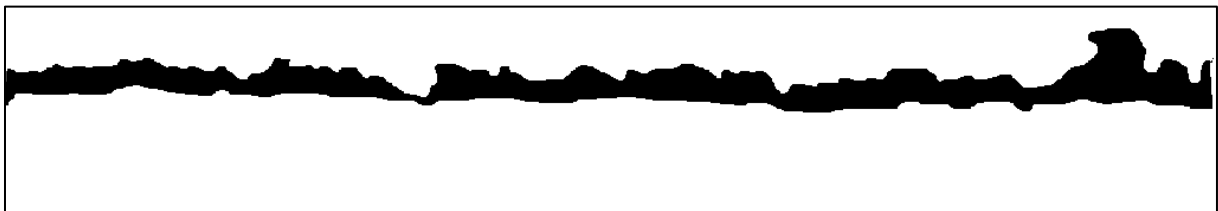


Obrázek 27. Intermetalická vrstva, vzorek: teplotní profil 3, tavidlo ROL1, povrch. úprava ENIG

Již z těchto obrázků je patrné, že se tloušťka intermetalické sloučeniny mění v závislosti na zvoleném teplotním profilu.

Následně byl zjištěn přepočítaný poměr mezi pixely a μm , který byl určen pomocí volně dostupného programu ImageJ. K určení bylo využito přesné pravítka 20 μm , které je u každého snímku pořízeného elektronovým mikroskopem vlevo dole. Přepočítaný poměr vyšel 1 $\mu\text{m}/11,4$ pixelů.

Dalším krokem byla úprava snímků. Nejdříve byly snímky oříznuty a následně zpracovány v programu ImageJ. Pomocí ImageJ byla většinou ručně vybrána intermetalická vrstva. Dále bylo nezbytné intermetalickou vrstvu vyznačit černou barvou a zbytek obrázku přebarvit na barvu bílou. Tímto postupem byly snímky připraveny k samotnému měření, k němuž byl využit program Matlab, který z černobílého („binárního“) obrázku vypočetl průměrnou tloušťku intermetalické vrstvy. Příklad upraveného snímku je na obrázku č.28.



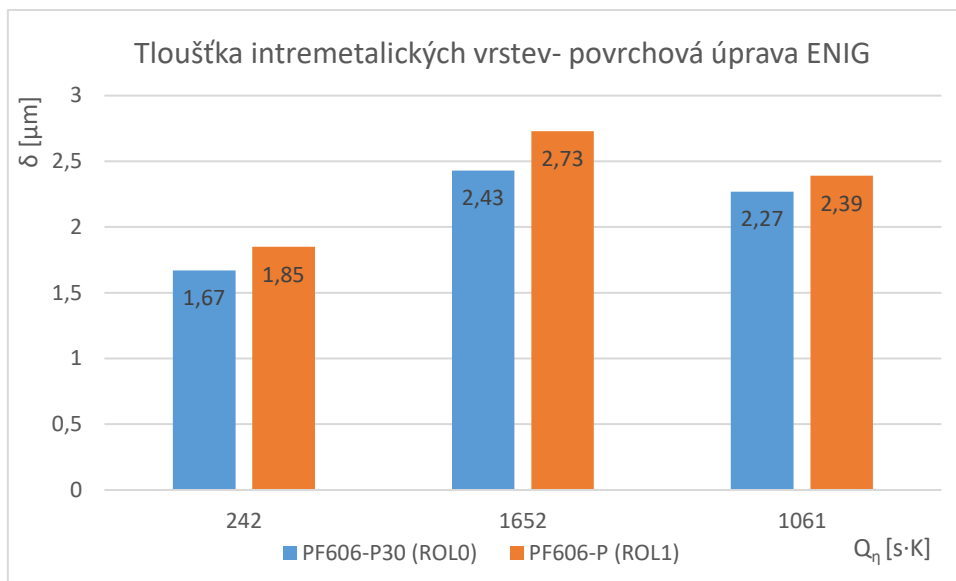
Obrázek 28. Upravený snímek intermetalické sloučeniny

6.7 Naměřené hodnoty

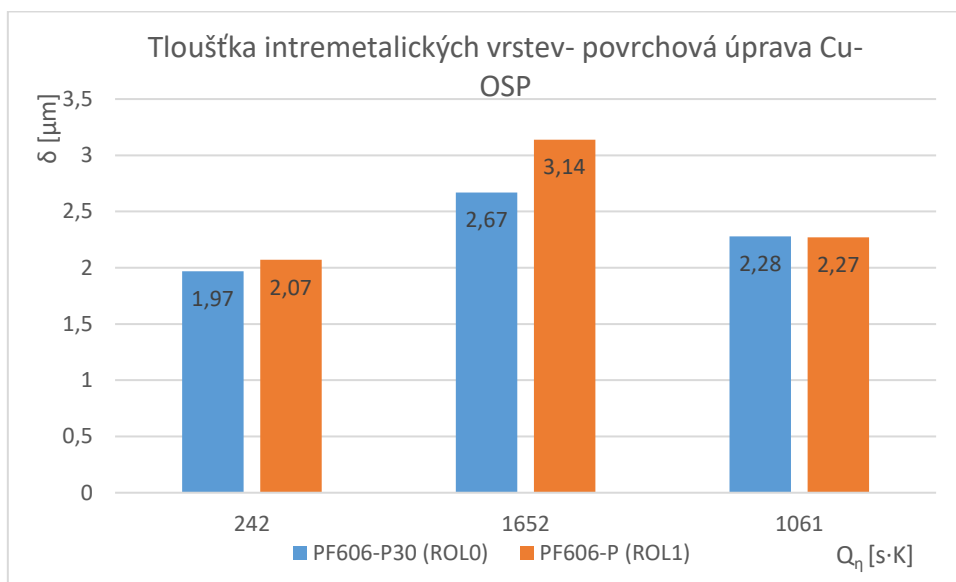
V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty tloušťky intermetalických vrstev jednotlivých vzorků. U každého vzorku byla intermetalická vrstva měřena na třech místech, kde byl nanesen ostrůvek pájky (Ize viděl na obrázku č. 17). Z těchto hodnot byla vytvořena průměrná hodnota. Na následujících dvou stranách jsou tloušťky intermetalických vrstev pro jednotlivé povrchové úpravy zobrazeny pomocí sloupcových grafů.

Tabulka 8. Naměřené hodnoty intermetalických vrstev

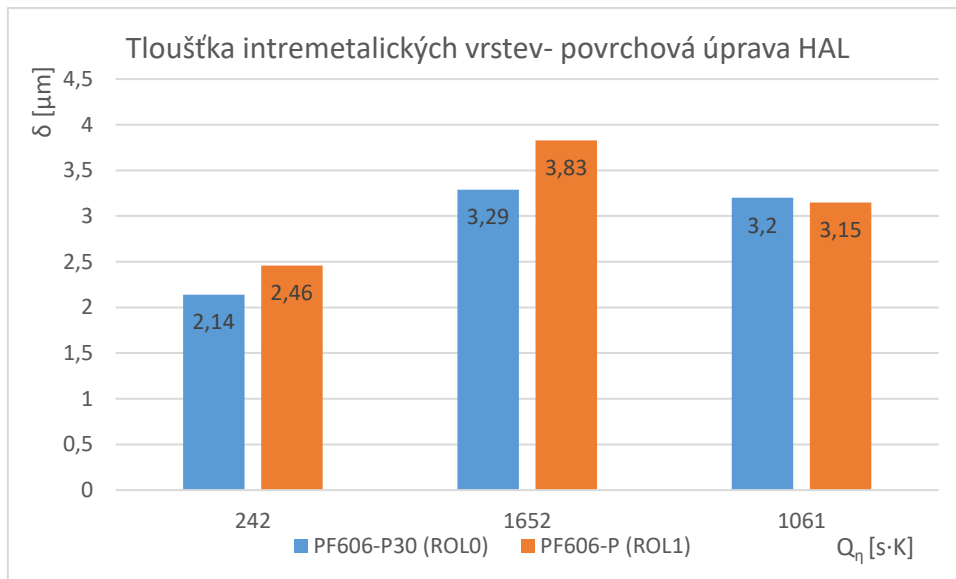
vzorek	Teplotní profil	Pájecí pasta	Povrchová úprava vzorků	Průměr. tloušťka intermet. vrstvy Q_1 [μm]
A1	Teplotní profil 1 155-188-232[°C] posuv: 15 cm/ min heating faktor 242[s·K]	PF606-P30 (ROL0)	ENIG	1,67
A2			Cu - OSP	1,97
A3			HAL	2,14
A4		PF606-P (ROL1)	ENIG	1,85
A5			Cu - OSP	2,07
A6			HAL	2,46
B1	Teplotní profil 2 155-188-262 [°C] posuv: 15 cm/ min heating faktor 1652[s·K]	PF606-P30 (ROL0)	ENIG	2,43
B2			Cu - OSP	2,67
B3			HAL	3,29
B4		PF606-P (ROL1)	ENIG	2,73
B5			Cu - OSP	3,14
B6			HAL	3,83
C1	Teplotní profil 3 180-210-270 [°C] posuv: 30 cm/ min heating faktor 1061[s·K]	PF606-P30 (ROL0)	ENIG	2,27
C2			Cu - OSP	2,27
C3			HAL	3,20
C4		PF606-P (ROL1)	ENIG	2,39
C5			Cu - OSP	2,27
C6			HAL	3,15



Obrázek 29. Porovnání intermetalických vrstev u povrchové úpravy ENIG



Obrázek 30. Porovnání intermetalických vrstev u povrchové úpravy Cu-OSP



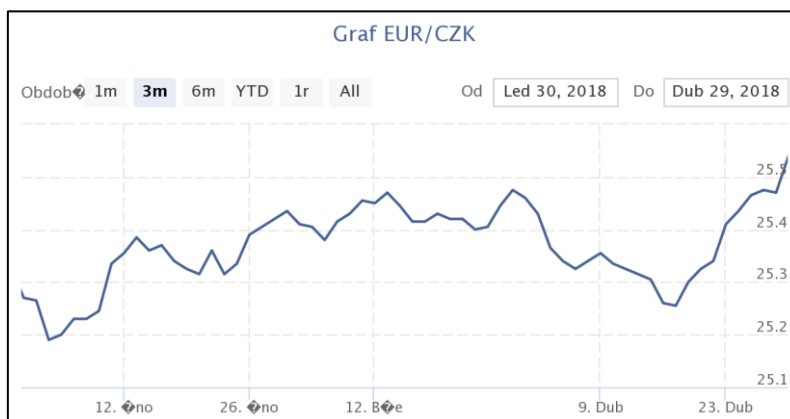
Obrázek 31. Porovnání intermetalických vrstev u povrchové úpravy HAL

7 Ekonomická část

V ekonomické části se zaměřím na vyčíslení nákladů na proces pájení přetavením, se kterým je tato bakalářská práce spjata. Konkrétně se bude jednat o vyčíslení nákladů na roční provoz automatické pájecí linky, která pájení přetavením využívá. Porovnam zde, jak se změny náklady při použití různých typů pájecích past. Bude se jednat o pájecí pastu SAC 305 (Sn/Ag3.0/Cu0.5), která byla využita v praktické části této bakalářské práce, a také o pájecí pastu Sn42Bi58.

7.1 Cena pájecí linky

Linka je složena z několika zařízení, jako např. ze zařízení pro šablonový tisk pájecí pasty, z pájecí pece atd. Seznam všech zařízení je uveden v tabulce č. 9, a to včetně cen bez DPH. Orientační ceny zařízení jsem získal od společnosti AMTECH, s.r.o., která se zabývá prodejem těchto zařízení. Ceny těchto strojů jsou prodejcem uvedeny v eurech, proto bylo nezbytné definovat měnový kurz EUR/Kč. Ten se v první polovině roku 2018 pohybuje okolo 25,50 Kč za 1 EUR, viz příložený graf. [25]



Obrázek 32. Měnový kurz EUR/Kč [25]

Tabulka 9. Ceny zařízení pro pájecí linku

Názvy zařízení	ceny v EUR	ceny v CZK
zařízení pro šablonový tisk	55 000,00 €	1 402 500,00 Kč
osazovací automat	250 000,00 €	6 375 000,00 Kč
automatická optická kontrola SPI a AOI	170 000,00 €	4 335 000,00 Kč
pájecí pec	80 000,00 €	2 040 000,00 Kč
skříň na skladování a sušení	13 000,00 €	331 500,00 Kč
odsávání zplodin (filtrace)	15 000,00 €	382 500,00 Kč
Celkem	583 000,00 €	14 866 500,00 Kč

7.1.1 Odpisy

Odpisy vyjadřují opotřebení dlouhodobého majetku a jedná se o náklady. Odpisy dělíme na dva druhy, účetní a daňové, které se mohou navzájem lišit. Daňové slouží k snížení základu daně z příjmů a jsou upraveny zákonem. Účetní odpisy vyjadřují skutečnou dobu používání dlouhodobého majetku. Předpokládaná životnost této linky je 10 let, proto budou tyto stroje v účetnictví odepisovány také po dobu 10 let.

7.2 Mzdové náklady

Pájecí linku budou obsluhovat dva zaměstnanci, u kterých bude předpokládána 8 hodinová pracovní doba a 250 pracovních dní v roce. Zaměstnanci jsou ohodnoceni ve stejné výši, a to průměrnou měsíční mzdou v České republice, která ve čtvrtém čtvrtletí roku 2017 činila 31 646 Kč hrubého. Superhrubá mzda je tedy ve výši 42 406 Kč měsíčně. [26]

Tabulka 10. Náklady na zaměstnance

Náklady na zaměstnance	
počet zaměstnanců	2
hrubá mzda na jednoho zaměstnance	31 646,00 Kč
superhrubá mzda na jednoho zaměstnance	42 406,00 Kč
měsíční náklady na zaměstnance	84 812,00 Kč
roční náklady na zaměstnance	1 017 744,00 Kč

7.3 Cena a spotřeba materiálu

Spotřebním materiálem budou dvě bezolovnaté pájecí pasty, které se liší cenou i teplotou potřebnou k přetavení pájecí pasty. Energie a vstupní materiál budou tedy dvě položky, ve kterých se budou výsledné náklady pro jednotlivé pasty lišit. Ceny uvedených past jsem získal od výrobce NeVo a jsou uvedeny bez DPH. Pájecí pasty SAC 305 od toho výrobce jsem použil i v praktické části bakalářské práce.

Tabulka 11. Ceny pájecích past

Cena materiálu (ceny za 1Kg)	cena v EUR	cena v CZK
pájecí pasta SAC305 (Sn/Ag3.0/Cu0.5)	100,00 €	2 550,00 Kč
pájecí pasta Sn42/Bi58	80,00 €	2 040,00 Kč

Roční spotřeba materiálu se odvíjí od množství vyrobených DPS. Limitujícím článkem výrobní linky je osazovací automat, který zvládne osadit 10 tisíc součástek za hodinu. Vyráběná referenční deska má 500 součástek. Při předpokládané 8 hodinové pracovní době a 250 pracovních dnech lze tedy vyrobit 40 tisíc desek ročně.

Tabulka 12. Počet osazených desek

Osazovací automat	
počet osazených součástek za h	10000
počet součástek na DPS	500
počet osazených desek/ hodina	20
počet osazených desek/8hodin	160
počet pracovních dní	250
počet osazených desek/rok	40000

Na desku obsahující 500 součástek byla odhadnuta spotřeba pájecí pasty přibližně 2 gramy/deska. Dále je zapotřebí čtyř šablon pro nanášení pasty (životnost šablony je 10 tisíc desek), které byly vyhotoveny firmou PragoBoard, s.r.o., za 9000 Kč bez DPH.

Tabulka 13. Roční náklady na spotřebovaný materiál

spotřeba pasty na jednu DPS (v gramech)	2	
spotřebované množství pájky/rok (v kg)	80	
Celkové náklady na materiál	cena v EUR	cena v CZK
roční náklady na SAC305	8 000,00 €	204 000,00 Kč
roční náklady na Sn42/Bi58	6 400,00 €	163 200,00 Kč
šablony na tisk pasty		9 000,00 Kč

7.4 Cena el. energie

Dodavatelem energie je společnost ČEZ Prodej, s.r.o., která nabízí tarif pro podnikatele a firmy. Firma má jistič velikosti 3*32-3*40 A a nachází se v Plzeňském kraji. Cena za MWh je 2 603 Kč a fixní platba 3 698 Kč měsíčně. Ceny jsou uvedeny bez DPH. Spotřeba jednotlivých strojů je odhadnuta z jejich příkonů. Spotřeba pece při zahřátí na pracovní teplotu je odhadem 60 % příkonu pece, což už je zohledněno v tabulce spotřeby uvedené níže.

Při použití různých druhů pájecí pasty dochází také k rozdílu ve spotřebě pájecí pece. Teplota tavení pájecí pasty SAC 305 se pohybuje okolo 218 °C. U pájky Sn42Bi58 je tato teplota výrazně nižší, a to okolo 140 °C. Je tedy patrné, že při použití pájky Sn42Bi58 dochází k úspoře energie využitě na provoz pájecí pece. Při výpočtu a porovnání ploch teplotních profilů obou past vyšlo, že spotřeba pece při použití pájky Sn42Bi58 je přibližně 58,4 % spotřeby pece při použití pasty SAC 305.

Tabulka 14. Spotřeba elektrické energie

Spotřeba el. energie při použití pasty SAC 305			
Název spotřebiče	Příkon[W]	kWh/rok	Cena v CZK
Osvětlení	700	1400	3 644,20 Kč
pájecí pec při použití SAC305	6300	12600	32 797,80 Kč
klimatizace	3000	6000	15 618,00 Kč
ostatní stroje	13000	26000	67 678,00 Kč
fixní poplatky			44 376,00 Kč
Celkem	23000	46000	164 114,00 Kč
Spotřeba el. energie při použití pasty Sn42Bi58			
Název spotřebiče	Příkon[W]	kWh/rok	Cena v CZK
Osvětlení	700	1400	3 644,20 Kč
pájecí pec při použití Sn42Bi58	3679,2	7358	19 153,92 Kč
klimatizace	3000	6000	15 618,00 Kč
ostatní stroje	13000	26000	67 678,00 Kč
fixní poplatky			44 376,00 Kč
Celkem	20379	40758	150 470,12 Kč

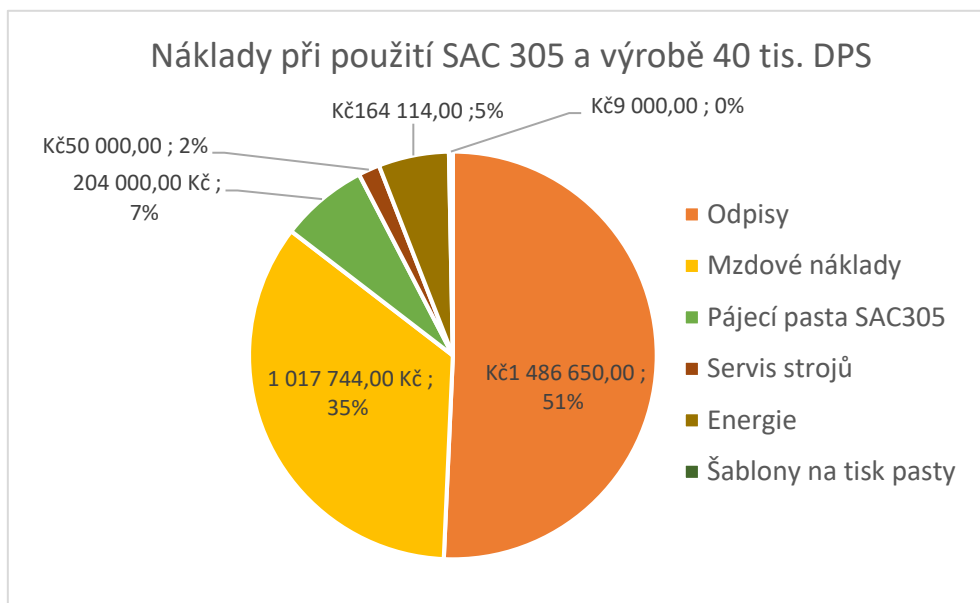
7.5 Celkové náklady

Celkové náklady na provoz pájecí linky při výrobě 40 tisíc kusů DPS pro oba druhy past jsou uvedeny v následujících tabulkách. Do výsledných nákladů byl ještě zařazen pravidelný servis strojů, který ročně stojí 50 tisíc Kč.

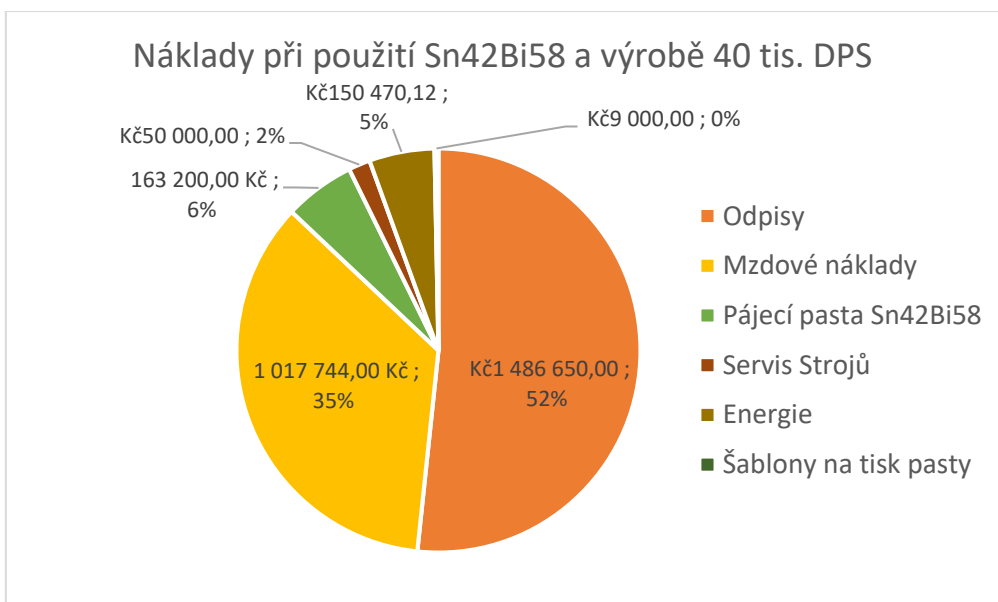
Tabulka 15. Celkové náklady

Výsledné náklady pro SAC305	
Odpisy	1 486 650,00 Kč
Mzdové náklady	1 017 744,00 Kč
Pájecí pasta SAC305	204 000,00 Kč
Servis strojů	50 000,00 Kč
Energie	164 114,00 Kč
Šablony na tisk pasty	9 000,00 Kč
Celkem	2 931 508,00 Kč

Výsledné náklady pro Sn42Bi58	
Odpisy	1 486 650,00 Kč
Mzdové náklady	1 017 744,00 Kč
Pájecí pasta Sn42Bi58	163 200,00 Kč
Servis Strojů	50 000,00 Kč
Energie	150 470,12 Kč
Šablony na tisk pasty	9 000,00 Kč
Celkem	2 877 064,12 Kč



Obrázek 33. Graf nákladů při použití pájecí pasty SAC 305



Obrázek 34. Graf nákladů při použití pájecí pasty Sn42Bi58

Při produkci 40 tisíc DPS ročně je rozdíl v nákladech na pájecí proces při použití různých past 54 444 Kč. Náklady na zapájení jedné desky při použití pájecí pasty SAC 305 jsou 73,29 Kč. Při použití pájecí pasty Sn42Bi58 jsou náklady na zapájení 71,93 Kč.

Při použití pasty Sn42Bi58 tedy dochází k 20 % úspoře na vstupním materiálu. Dále také dochází k úspoře energie při přetavení v pájecí peci, protože pasta Sn42Bi58 má výrazně nižší teplotu tavení a celý teplotní profil. Toho lze také využít v případě použití tepelně citlivých součástek, které by mohly být při vysokých teplotách v pájecí peci poškozeny (např. při použití SAC 305). Pájku Sn42Bi58 je také vhodné využít v případech, kdy používáme tenký substrát (desku), u které při vysokých teplotách hrozí kroucení a prohýbání. Bizmutová pasta (Sn42Bi58) zlepšuje nebo eliminuje zmetkovitost způsobenou tepelným namáháním, má však rozdílné mechanické vlastnosti.

8 Závěr

Cílem této práce bylo podat základní informace o problematice teplotního profilu a o jeho vlivu na intermetalické sloučeniny u metody pájení přetavením. Dále jsem chtěl přiblížit metody a technologie měkkého pájení v elektrotechnice.

V teoretické části jsou popsány základní pojmy z oblastí pájení a desek plošných spojů. Tato práce také podává základní informace o ručním a strojním pájení, zejména se zaměřuje na technologii pájení přetavením. Jsou zde popsány pájecí pasty, metody přetavení pasty, teplotní profil, heating faktor a také vlastnosti a vznik intermetalických vrstev.

V praktické části popisují přípravu vzorků pro následné zkoumání tloušťky intermetalických vrstev v závislosti na teplotním profilu, případně na heating faktoru. Jsou zde uvedeny použité pomůcky a zařízení, které jsem k vytvoření a analýze vzorků použil. Praktická část také obsahuje informace o třech různých teplotních profilech, při kterých vznikaly analyzované vzorky. Vzorky byly vytvořeny na třech povrchových úpravách pájecích plošek DPS s použitím dvou pájecích past. Použité pájecí pasty se lišily pouze v tavidle, aby bylo možné porovnat, zda má také tavidlo vliv na tvorbu intermetalických sloučenin. Naměřené tloušťky intermetalických vrstev jsou uvedeny v tabulce a v příložených sloupcových grafech.

Naměřené hodnoty ukazují, že tloušťka intermetalických vrstev roste se zvětšujícím se heating faktorem, což potvrzuje poznatky popsané v teoretické části. Nejnižší hodnota byla naměřena u vzorku A1 s heating faktorem 242 s·K. Naopak nejvyšší byla naměřena u vzorku B6 s heating faktorem 1652 s·K.

Jak můžeme vidět z naměřených hodnot, na tloušťku intermetalických vrstev má také vliv použité tavidlo. Vzorky, které byly vytvořeny pomocí pájecí pasty PF606-P30 (ROL0), měly ve většině případů menší tloušťku intermetalické vrstvy než při použití pájecí pasty PF606-P (ROL1). Dalším faktorem, který ovlivňoval tloušťku intermetalické vrstvy, byla použitá povrchová úprava. Naměřené hodnoty ukazují, že největší tloušťka intermetalických vrstev byla naměřena u povrchové úpravy HAL.

Závěrečnou částí této bakalářské práce je ekonomická část, ve které jsem provedl kalkulaci nákladů na proces pájení přetavením a porovnal výši nákladů při použití dvou druhů pájecích past s rozdílnou pořizovací cenou a s odlišnou teplotou přetavení. Při použití pájecí pasty Sn42Bi58 dochází k 20 % úspoře na vstupním materiálu a také k úspoře energie při provozu pájecí pece.

9 Zdroje

[1] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. Montáž v elektronice: pouzřzení aktivních součástek, plošné spoje. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.

[2] DUŠEK, Karel. Pájení Úvod 1 [online]. [cit. 2017-11-20]. Dostupné z:

https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/53549/mod_resource/content/1/pajeni_uvod1.pdf

[3] MACH, Pavel. Fotolitografie [online]. [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/68229/mod_resource/content/1/Fotolitografie2.pdf

[4] KOBLÍŽEK, Vilém. Měkké pájení v elektronice [online]. [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: http://martin2.feld.cvut.cz/~koblizek/X13TEP_soubory/uloha_2.pdf

[5] MACH, Pavel. Bezolovnaté pájení v elektrotechnice [online]. [cit. 2017-11-20]. Dostupné z:

https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34501/mod_resource/content/2/Bezolovnate_pajeni_v_elektrotechnice.pdf

[6] ZÁHLAVA, Vít a České vysoké učení technické v Praze. Elektrotechnická fakulta. Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Vyd. 1. V Praze: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 9788001033517;8001033511;.

[7] MACH, Pavel. Pájení v elektrotechnice [online]. [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/68264/mod_resource/content/1/Pajeni.pdf

[8] FILÁKOVÁ, Denisa. *Technologie pájení přetavením*. Zlín, 2010. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Ústav elektroniky a měření. Vedoucí práce Petr Neumann.

[9] UHLÁŘ, Vít. *Tavidlové zbytky po pájení přetavením*. Brno, 2012. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.

[10] ŠIMEČEK, Ondřej. *Problematika šablonového tisku pájecí pasty pro součástky s malou roztečí vývodů*. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Jiří Starý.

[11] Christian Koenen GmbH ve spolupráci s IMAPS Česká a Slovenská sekce. Od sítotisku k přesnému tisku pájecí pasty na DPS [online]. [cit. 2017-12-08]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:27804/od-sitotisku-k-presnemu-tisku-pajeci-pasty-na-dps>

[12] HUSÁK, Jiří. *Měření pájitelnosti metodou smáčecích vah při tenzi par*. Praha, 2014. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrotechnologie. Vedoucí Karel Dušek.

[13] DUŠEK, Karel. Pájení Úvod 2 [online]. [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/101470/mod_resource/content/1/pajeni_uvod_2.pdf

[14] MELIŠ, Josef. *Mechanické vlastnosti pájeného spoje*. Brno, 2010. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Stejskal.

- [15] PÍCHA, Jan. *Studium spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů*. Brno, 2010. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ivan Szeniuch.
- [16] Fotka pájecí pece mistral 260 [online] Dostupné z: <http://www.bernierelectronik.fr/pages/bernier-electronik/circuit-imprime/materiel/four-de-refusion/four-de-refusion-ha08.html>
- [17] PAŠKO, Martin. *Analýza změn v Pájených spojích vzniklých vlivem stárnutí*. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Stejskal.
- [18] Snímek intermetalické vrstvy při znětšení 2000x [online]. [cit. 2018-01-02]. Dostupné z: http://www.timron-inc.com/teknote_Mar2007.html
- [19] Parametry elektronového mikroskopu [online]. [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.phenom-world.com/microscopes/phenom-prox>
- [20] Norma IPC J-STD-004 [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.ipc.org/toc/ipc-j-std-004b.pdf>
- [21] JEŽEK, Vladimír. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného spoje* Brno, 2015. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Jiří Starý.
- [22] Štítek k pájecí paste PF606-P30 [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.nevo-solder.com/wp-content/uploads/PF606-P30TDS-V02-01.pdf>
- [23] Štítek k pájecí paste PF606-P [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.nevo-solder.com/wp-content/uploads/PF606-PTDS-V02-01.pdf>
- [24] Parametry pájecí pece mistral 260 [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://www.p2jtechnology.cz/produkty/smt-montaz/pajeci-pece-pajeni-vlnou/prubezna-pajeci-pec-mistral-260/>
- [25] Kurz EUR/ CZK [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/grafy/CZK-EUR/>
- [26] Průměrná mzda v ČR [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/cri/prumerne-mzdy-4-ctvrtleti-2017>
- [27] HOCH, Petr. *Vliv povrchových úprav DPS na pájitelnost*. Plzeň, 2015. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra technologií a měření. Vedoucí práce Martin Hirman.

10 Seznam obrázků

1. Obrázek 1. Příklad technologie THT [1]
2. Obrázek 2. Příklad technologie SMT [1]
3. Obrázek 3. Tvorba ručně pájeného spoje [4]
4. Obrázek 4. Princip vlny [6]
5. Obrázek 5. Tlakový dávkovač [2]
6. Obrázek 6. Dávkovač se šroubovým vytlačováním [2]
7. Obrázek 7. Detail šablony [11]
8. Obrázek 8. Nanesení pájecí pasty stěrkou [10]
9. Obrázek 9. Konvekční pec [2]
10. Obrázek 10. IR pec [2]
11. Obrázek 11. Zařízení pro pájení v parách [7]
12. Obrázek 12. Příklad teplotního profilu [13]
13. Obrázek 13. Příklad teplotního profilu s vyznačeným heating factorem [21]
14. Obrázek 14. Detail pájecí pasty [13]
15. Obrázek 15. Růst intermetalických vrstev při různých teplotách v závislosti na čase [14]
16. Obrázek 16. Detail intermetalických vrstev [18]
17. Obrázek 17. DPS s ENIG povrchovou úpravou s již s přetavenou pájecí pastou (vzorek)
18. Obrázek 18. Profilometr KIC EXPLORER
19. Obrázek 19. Pájecí pec Mistral 260 [16]
20. Obrázek 20. Elektronový mikroskop PHENOM ProX [19]
21. Obrázek 21. Průběh teplotního profilu 1
22. Obrázek 22. Průběh teplotního profilu 2
23. Obrázek 23. Průběh teplotního profilu 3
24. Obrázek 24. Vzorky zalité v pryskyřici vhodné pro analýzu intermetalických vrstev
25. Obrázek 25. Intermetalická vrstva, vzorek: teplotní profil 1, tavidlo ROL1, povrch. úprava ENIG
26. Obrázek 26. Intermetalická vrstva, vzorek: teplotní profil 2, tavidlo ROL1, povrch. úprava ENIG
27. Obrázek 27. Intermetalická vrstva, vzorek: teplotní profil 3, tavidlo ROL1, povrch. úprava ENIG
28. Obrázek 28. Upravený snímek intermetalické sloučeniny
29. Obrázek 29. Porovnání intermetalických vrstev u povrchové úpravy ENIG
30. Obrázek 30. Porovnání intermetalických vrstev u povrchové úpravy Cu - OSP
31. Obrázek 31. Porovnání intermetalických vrstev u povrchové úpravy HAL
32. Obrázek 32. Měnový kurz EUR/Kč [25]
33. Obrázek 33. Graf nákladů při použití pájecí pasty SAC 305
34. Obrázek 34. Graf nákladů při použití pájecí pasty Sn42Bi58

11 Seznam tabulek

1. Tabulka 1. Typy tavidel podle EN 9454-1 [2]
2. Tabulka 2. Typy tavidel podle normy IPC J-STD-004 [20]
3. Tabulka 3. Porovnání vlastností metod pájení přetavením [9]
4. Tabulka 4. Dělení částic pájky dle normy ANSI/J-STD-006 [1]
5. Tabulka 5. Porovnání vlastností intermetalických sloučenin Sn - Cu [17]
6. Tabulka 6. Parametry použitých pájecích past [22] [23]
7. Tabulka 7. Naměřené heating faktory
8. Tabulka 8. Naměřené hodnoty intermetalických vrstev
9. Tabulka 9. Ceny zařízení pro pájecí linku
10. Tabulka 10. Náklady na zaměstnance
11. Tabulka 11. Ceny pájecích past
12. Tabulka 12. Počet osazených desek
13. Tabulka 13. Roční náklady na spotřebovaný materiál
14. Tabulka 14. Spotřeba elektrické energie
15. Tabulka 15. Celkové náklady