

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická



Bakalářská práce

2018

Jiří Bím

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta Elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

**Kvalita pájených a lepených spojů
v elektrotechnice**

Květen 2018

Bakalant: Jiří Bím

Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová, Ph.D

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce. Dále prohlašuji, že jsem uvedl veškeré informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při psaní vysokoškolských prací.

20. 5. 2018

.....

Podpis Bakalanta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bím** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **456896**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací 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:

Kvalita pájených a lepených vodivých spojů v elektrotechnice

Název bakalářské práce anglicky:

The Quality of Solder and Adhesive Conductive Joints

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s metodami pájení a elektricky vodivého lepení
2. Připravte vzorky pájených a lepených spojů a proměřte jejich parametry
3. Posuďte jednotlivé technologie z pohledu kvality, spolehlivosti spojů a následně vyhodnoťte v nákladech na zmetkovitost.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J. Montáž v elektronice, Praha: ČVUT, 2001, ISBN: 80-01-02392-3
- [2] Žalská, P.: Stárnutí spojů vytvořených elektricky vodivými lepidly, diplomová práce, ČVUT, Praha 2017
- [3] Ebnesajjad, S.: Handbook of Adhesives and Surface Preparation ? Technology, Applications and Manufacturing, 2011, ISBN: 978-1-4377-4461-3

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, 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

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce paní Ing. Ivaně Beshajové, Ph.D. za pedagogické a odborné vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Josefu Černohousovi za pomoc při tvoření ekonomické části. Mé poděkování patří také rodině, že mi umožnila studovat na této škole a vytvořila ideální podmínky pro psaní této práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá porovnáním spojů vytvořených pájecí pastou a elektricky vodivým lepidlem. Práce je rozdělena na technickou a ekonomickou část. Technická část se dále dělí na teoretickou a praktickou. Teoretická část popisuje různé technologie a základní odlišnosti v mnou vybraných dvou způsobech výroby plošných spojů. Praktická část se již zabývá konkrétní výrobou vzorků, proměření jejich parametrů a stanovením zmetkovitosti obou technologií. V ekonomické části se pak počítá nákladová cena pro obě metody. Výsledkem mé práce je informace o nákladové ceně a kvalitě obou porovnávaných technologií.

Klíčová slova

Pájení, lepení, pájecí pasta, elektricky vodivé lepidlo, náklady, porovnání, spolehlivost technologie.

Summary

Bachelor thesis deals with comparison of joints formed by soldering flux and electrically conductive adhesive. The thesis contains the technical and the economical part. Technical part is divided to the theoretical and practical parts. Theoretical part describes different technologies and basic differences between two ways of manufacturing printed circuit boards. In the practical part is described production of samples, measurement of their parameters and determination of the rejection of both technologies. In the economical part, there are calculations of the cost price for both methods. The result of my work is information about the cost price and quality of the two compared technologies.

Index terms

Soldering flux, electrically conductive glue, costs, comparison, reliability of technologies.

OBSAH

1	Úvod	3
2	Teoretická část	4
2.1	Pájené spoje	4
2.1.1	Pájecí slitiny.....	4
2.1.2	Pájecí pasty.....	4
2.1.3	Pájení za použití tavidla.....	4
2.1.4	Technologie pájení	6
2.1.5	Způsoby nanášení pájecí pasty.....	8
2.1.6	Osazování součástek	10
2.2	Lepené spoje	10
2.2.1	Složení elektricky vodivých lepidel.....	10
2.2.2	Použití a aplikace elektricky vodivých lepidel	12
2.3	Porovnání pájených a lepených spojů.....	13
2.3.1	Diagnostické metody pro hodnocení kvality spojů	14
2.3.2	Sledování tvarů a struktury spojů	14
3	Praktická část	16
3.1	Příprava vzorků	16
3.1.1	Použití DPS desky	16
3.1.2	Návrh Layoutu	16
3.1.3	Návrh šablony pro nanášení pájky a adheziva	17
3.1.4	Nanášení pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla.....	17
3.1.5	Osazení DPS součástkami.....	18
3.1.6	Nulový odpor.....	19
3.1.7	Přetavení pasty a vytvrzení elektricky vodivého lepidla	19
3.1.8	Použití látky pro tvorbu spojů	21
3.2	Měření elektrického odporu	21
3.2.1	Naměřené hodnoty odporu	23
3.3	Zmetkovitost	25
3.4	Vizuální kontrola vytvořených spojů.....	26
3.4.1	Kontrola lepených spojů	26
3.4.2	Kontrola pájených spojů.....	28
4	Ekonomické hodnocení projektu	30
4.1	Zavedení pojmů a potřebných údajů	30
4.1.1	Náklady.....	30

4.1.2	Zmetkovitost	30
4.1.3	Měnový kurz CZK/EUR.....	31
4.1.4	Počet vytvořených desek	31
4.1.5	Spotřeba materiálu	31
4.1.6	Cena pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla.....	32
4.1.7	Mzdy zaměstnancům	32
4.1.8	Odpisy zařízení	32
4.1.9	Cena zařízení	32
4.1.10	Cena elektrické energie.....	33
4.1.11	Revize a servis zařízení	33
4.1.12	Osobní ohodnocení	33
4.1.13	Nákladová cena referenční DPS	34
4.2	Tabulka celkových nákladů	34
5	Závěr.....	36
6	Seznam obrázků	38
7	Použitá literatura.....	39
8	Přílohy	41
8.1	Tabulka naměřených hodnot pro pájecí pastu	41
8.2	Tabulka naměřených hodnot pro elektricky vodivé lepidlo.....	42
8.3	Datasheet elektricky vodivé lepidlo	44
8.4	Datasheet pájecí pasta	46

1 Úvod

Hlavním tématem mé bakalářské práce je porovnání technologie pájení a elektricky vodivého lepení. Technologie budou porovnány z technického i ekonomického hlediska. Hlavním kritériem je funkčnost a spolehlivost, která musí být, ale podložena přiměřenou cenou, aby byl výrobek konkurenceschopný.

Praktická technická část bude zaměřena na výrobu vzorků pájených a lepených spojů a proměření jejich parametrů. Výsledkem bude změřený elektrický odpor a optická kontrola vytvořených spojů. V technice připojování je důležité, aby vytvořené spoje dokázaly nejenom vést elektrický proud, ale zabezpečit mechanické připevnění součástky nebo odvod přebytečného tepla.

V technologii pájení i lepení se klade velký důraz jak na kvalitu vzniklého spoje, tak i na cenu. Do hry vstoupily také jisté regulace, které omezují, nebo přímo zakazují používání olova v pájecích slitinách. Aktuální vývoj se tedy zaměřil na dva směry. Prvním z nich je pájení slitinami, které neobsahují olovo, a druhým je úplně jiná cesta elektro-vodivých lepidel. Postupně jsou tedy nahrazovány klasické pájky (PB37SN63) bezolovnatými pájkami nebo elektricky vodivými lepidly. Velmi dobrou náhradou se staly pájky SAC obsahující kromě cínu také stříbro a měď. Elektricky vodivá lepidla našla uplatnění především při kontaktování LCD displejů. Dokážeme je kontaktovat na folii nebo sklo. Tato technologie má oproti pájení ale stále plno nevýhod. Příkladem může být horší spolehlivost a odolnost a v neposlední řadě také vyšší cena. V rámci této práce bude řešena spolehlivost technologie, nikoliv spolehlivost v životním cyklu. Základní teorie a srovnání pájení a elektricky vodivého lepení bude popsána v první části této práce.

Druhým pohledem bude ekonomická stránka těchto dvou technologií. Na modelu malé firmy vyrábějící plošné spoje budou porovnány náklady obou variant. Pro investora, případně výrobce, bude důležitým kritériem v rozhodování nákladová cena vyrobené referenční desky. V ekonomické části bude proto stanovena referenční deska s definovanou velikostí, časovou náročností a spotřebou materiálu. Pro takto zvolenou desku bude vypočtena nákladová cena. Do jejího výpočtu budou zahrnuty náklady, které by měla malá firma na výrobu těchto plošných spojů. Ve výpočtu se projeví také se zmetkovitost dané technologie. Ta bude vypočtena ze změřených údajů v praktické části.

Výsledkem bude srovnání nákladových cen podložených technickými parametry spojů. Čtenář tak má možnost porovnat v jedné práci cenu i kvalitu dvou srovnávaných technologií.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 PÁJENÉ SPOJE

V elektrotechnické montáži se využívá měkké pájení, pro které jsou charakteristické teploty nepřesahující 450 °C. Pájení by se dalo charakterizovat jako metalurgické připojování různých součástek, při kterém se taví a poté opět tuhne pouze nově přidaný materiál. Zde se uplatní hned první výhoda pájení, kterou je fakt, že při pájení nepotřebujeme roztavit pájený materiál. Teplota tavení pájeného materiálu může být tedy nižší. Vlastnosti jednotlivých spojů jsou dány složením pájecí slitiny, nebo použitou technologií pájení. [1]

2.1.1 Pájecí slitiny

Ve velké většině se jedná o dvousložkové nebo tříložkové slitiny. Díky dnešním zákonům a směrnicím mohou hned na začátku pájky rozdělit do dvou kategorií. [1]

- Olovnaté pájky
- Bezolvnaté pájky

Z olovnatých pájek je nejznámější slitina Sn63Pb37 a jak název říká, skládá se z 63 % cínu a 37 % olova. Pájecí slitina může obsahovat i jiné příměsi. Může se jednat o měď, kadmium, železo, stříbro, nebo zlato. Každá z těchto příměsí má jiný vliv na vlastnosti slitiny. Například stříbro udělá povrch pájky tmavý a matný. Měď zase výrazně zhoršuje roztékavost slitiny, po ztuhnutí je však tvrdší. Jako příklad mohou uvést pájecí slitinu Sn60Pb38Cu2. [1] [11]

V roce 2003 byla vydána směrnice Evropské unie RoHS (The Restriction of Hazardous Substances), která zakazuje používání 6 hlavních látek. Směrnice je platná jak pro členské státy, tak i pro státy, které leží mimo Evropskou unii. Jedná se o těchto 6 látek (kadmium, olovo, rtuť, šestimocný chrom, polybromované difenylethy, bifenyly) Směrnice nezakazuje tyto látky úplně, ale stanovuje maximum procentního podílu kadmia na 0,01 % a 0,1 % u ostatních látek. Existují ovšem různé výjimky například pro armádu nebo lékařství. [1]

Druhou skupinu tvoří pájky bezolvnaté, které odpovídají nejnovějším směrnicím a legislativě. Nejznámější pájecí slitina SAC305 obsahuje 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Hlavní nevýhodou bezolvnatých pájek je jejich vyšší teplota tavení. [1]

2.1.2 Pájecí pasty

Pasty bychom mohli rozdělit do dvou skupin podle způsobu vytvrzení. V první skupině bychom našli pasty obsahující epoxidovou novolakovou pryskyřici, fenolitickou pryskyřici nebo polyesterovou pryskyřici. V druhé skupině nalezneme pryskyřice, které se vytvrdí pomocí UV záření. Může se jednat například o estery kyseliny akrylové, polyetery nebo uretany. Správnou pastu musíme vybrat podle toho, jakou potřebujeme pružnost, odolnost nebo přilnavost pájky. [1]

2.1.3 Pájení za použití tavidla

Velmi významnou součástí pájení tvoří tavidla. Jedná se o látky, které ovlivňují schopnosti pájek. Redukují oxidové vrstvy a čistí pájecí prostor i při pájení. Tavidla hodnotíme podle vlastností při pájení, i podle dalšího chování nebo ohrožení funkce daného spoje, respektive zařízení, které spoje obsahuje. Tavidla se také používají jako čisticí prostředek hrotů pájek.

Základní funkce tavidel můžeme shrnout do několika bodů. [1] [3]

- Čistící funkce pájeného povrchu neboli redukování oxidových vrstev
- Schopnost snížit povrchové napětí a tím tedy zlepšení roztékání pájky
- Zlepšují přenos tepla mezi hrotem pájky a pájeným povrchem

Důležité je, v jaké formě chceme anebo musíme dané tavidlo na povrch nanášet. Existuje proto několik forem tavidel. [1]

- Kapalina
- Pevná látka
- Prášek
- Pasta
- Gel

Tavidla můžeme rozdělit také do třech základních skupin podle složení. [1]

- Pryskyřičná
- Organická
- Anorganická

Základem pryskyřičných tavidel je pryskyřice, která může být buď ve formě kalafuny, nebo se může jednat o pryskyřici umělou. Nejrozšířenější jsou tavidla s kalafunou, jejichž základem je přírodní pryskyřice. Pryskyřice bývá většinou rozpuštěna v etylalkoholu nebo xylenu. Pokud bychom uvažovali pouze tuto látku, bylo by tavidlo velmi málo aktivní. Proto se přidávají k této látce ještě kyseliny nebo amin hydrochloridy, které určují míru aktivity těchto tavidel. Typickým příkladem může být kyselina salicylová nebo jantarová. [1]

- R – Rosin (neaktivovaná kalafuna)
- RMA – Rosin Midly Activated (středně aktivovaná kalafuna)
- RA – Rosin Activated (velmi aktivovaná kalafuna) [1]

Organická tavidla byla vyvinuta jako důsledek omezení některých chemických látek. Hlavním kritériem bylo, aby byly zbytky tavidla po procesu pájení jednoduše odstraněny. To znamená, aby se tyto látky daly odstranit vodou. Tato tavidla jsou velmi účinná, ovšem jejich korozivnost záběr použití omezuje. Zbytky pájky zůstávají po pájení tekuté a mohou vyvolat korozi. [1]

Anorganická tavidla se používají pouze ve speciálních případech. Jejich základem jsou například soli nebo kyseliny, které obsahují, stejně jako pryskyřičná tavidla, aktivátor. Tím je například čpavek, kyselina fosforečná nebo chlorid amonný. Právě z důvodu použití těchto agresivních rozpouštědel je práce s těmito látkami obtížnější a povrch po pájení musí být od těchto tavidel důkladně očištěn. Neочиštěné tavidlo by mohlo mít špatný vliv na okolní pájené spoje i na celý výrobek. [1]

V některých případech, například pokud to daná aplikace vyžaduje, je možné pájet i bez tavidla. V tomto případě je však nutné daný povrch očistit jiným adekvátně spolehlivým způsobem. Existuje například technologie čištění ultrazvukem či plasmou, oba tyto procesy včetně následného pájení musí probíhat v dusíkové atmosféře. Ta zabrání opětovné oxidaci povrchu. Se zvýšenou složitostí tohoto postupu se zvyšují i náklady. [1] [3]

2.1.4 Technologie pájení

K vytvoření kvalitního pájeného spoje je nutné vybrat odpovídající pracovní postup a technologii. Povrch pájky by měl být lesklý, hladký, na okrajích by měl být patrný ostrý úhel 15° až 20°. Kov, který pájíme, by měl být kompletně zapájen. V různých aplikacích je třeba odlišná technologie. Abychom dosáhli požadované kvality, je třeba dodržet určitá kritéria. [1] [11]

- Uvedení pájených částí do vhodné vzájemné polohy a její fixace
- Nanesení tavidla a jeho uvedení do aktivního stavu
- Ohřev na pracovní teplotu
- Přivedení pájky do spoje
- Ochlazení zapájeného spoje
- Očistění spoje [1]

Technologie můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin.

- Ruční pájení
- Strojní pájení

Ruční pájení jakožto nejstarší druh pájení se v dnešní době používá pouze pro opravy, vývoj. Člověk nedokáže přesně opakovat jednotlivé kroky. Nedokáže zaručit stejnou dobu pájení, stejné množství nanesené pájky nebo tepelné zatížení. První věc, kterou bychom při ručním pájení měli provést je příprava požadovaného hrotu pájky a požadované pájecí slitiny ve správné formě. Je důležité mít hrot pájky očištěn od předchozí pájecí slitiny, to se zpravidla provádí pomocí vlhké houbičky. Při samotném pájení je důležité správně osadit desku součástkami, abychom je mohli kvalitně zapájet. Před samotným pájením musíme místo budoucího spoje očistit a nanést vybrané tavidlo. Při ručním pájení je těžké, ale velmi důležité, dodržet správné množství pájecí slitiny, aby hrot vedl dobře teplo a nepřipájeli jsme okolní součástky. Samotné pájení je už velice rychlý proces v řádu maximálně několika sekund. [1] [3]

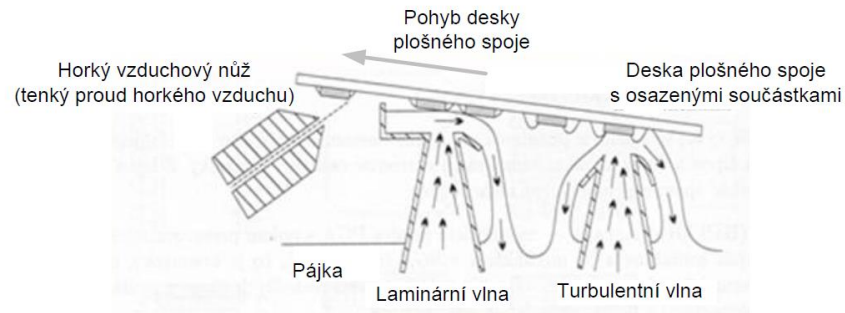
Strojní pájení člověk vynalezl proto, aby si usnadnil práci, čas a tím i peníze. Tímto způsobem dokážeme zapájet spoustu součástek najednou s velkou úsporou materiálu, pokud například použijeme nepájivou masku. Strojní pájení jsou v přesném sledu opakované operace, do kterých člověk zasahuje pouze skrze obslužný pult nebo počítač. Strojní pájení můžeme rozdělit na pájení vlnou nebo pájení přetavením. [1]



Obr. 1 Automatická pájecí linka [19]

Pájení vlnou je typickým příkladem strojního pájení. Před samotným pájením je třeba na desku plošných spojů nanést tavidlo. To můžeme nanášet různými způsoby, vždy je ale důležité, aby byla deska tavidlem pokrytá tam, kde je třeba a nebylo spotřebováno velké množství tavidla. Ve většině případů je používán postup, kdy deska jede nad nádobou s tavidlem a pomocí čerpadla nebo rozprašovače je zespoda omývána tavidlem. Následuje předeřev, při kterém tavidlo

aktivujeme. Provádí se zpravidla infračervenými zářiči. V tomto dílčím kroku se teplota desky plošných spojů ohřeje na 130 °C až 150 °C. Dalším důvodem předeřevu je také zamezení nebo snížení tepelného šoku desky při samotném pájení. Pájecí vlna je tvořena proudem pájky hnaným čerpadlem. Díky kapilárnímu vztlínání a hydrostatickému tlaku se vyplní všechny oblasti spoje. Lepších výsledků můžeme dosáhnout při pájení vlnou dvojitou. Celý proces je ukončen chlazením desky plošných spojů. Desky se mohou ofukovat chlazeným vzduchem. [1] [2]



Obr. 2 Schéma technologie pájení vlnou [1]

Druhým typickým způsobem strojního pájení je pájení přetavením. Pro tento druh pájení je charakteristická pájka ve formě pasty. Samotný proces je rozdělen do dvou částí, první je nanášení pájky a tou druhou přetavení. U tohoto způsobu může být tavidlo nanášen jako první před pájecí pastou, nebo může být součástí pájecí pasty. Samotné nanášení je asi nejsložitějším dějem tohoto druhu pájení a bude podrobně popsáno níže. Pájení přetavením se skládá ze čtyř hlavních stádií. [1]

- Tavidlo, které je nebo není součástí pájecí pasty, je aktivováno.
- Kovové součásti pájecí pasty se začínají tavit. Můžou to být kuličky nebo šupinky.
- Roztavený kov se smáčí a spojuje pájené součástky dohromady.
- Tekutá pájka se postupně schladí.

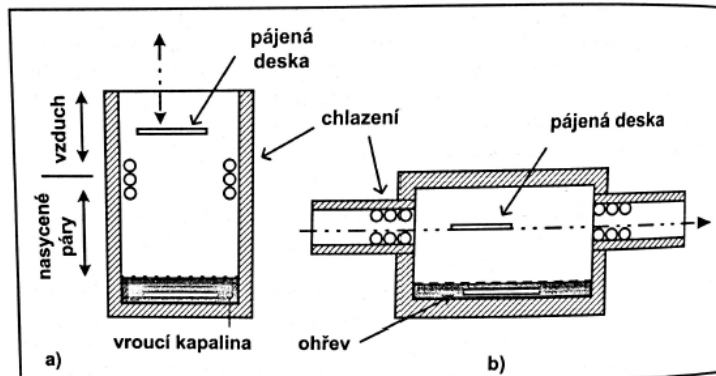
Princip všech těchto druhů pájení přetavením je v zásadě stejný a byl popsán již na začátku této kapitoly. Pájka se musí vždy nějakým způsobem ohřát, roztavit a kvalitně zapájet dané spoje. Využíváme tyto možnosti. [1]

- Pájení laserem
- Pájení kondenzační
- Pájení ohřevem horkou deskou nebo pásem
- Pájení proudem horkého plynu
- Konvenční ohřev

Výběr správné varianty přetavení závisí na mnoha aspektech. Důležitým parametrem je výsledná cena, velikost pájených součástí, výsledná kvalita nebo tepelná kapacita desek plošných spojů.

Mezi pájení přetavením bychom mohli zařadit i pájení v parách. Tato metoda využívá k předání energie kondenzaci nasycených par. Používají se speciální kapaliny jako například galden. Tato metoda je velmi účinná a hlavní výhodou je rovnoměrnost ohřevu a stabilizace teploty. Teplota varu použité kapaliny je právě teplota zahřátí tělesa. Regulaci pájení můžeme také ovlivnit vzdáleností DPS od hladiny vroucí kapaliny. Typická doba pro pájení v parách je 20 až 40 sekund,

závisí však na použité pájce a velikosti spojů. Nevýhodou této metody je nemožnost regulace teploty při daném procesu a také vyšší cena. [1]

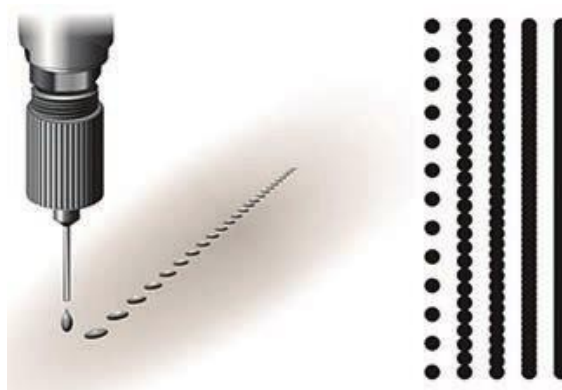


Obr. 3 Schéma technologie pájení v parách [1]

2.1.5 Způsoby nanášení pájecí pasty

Jak bylo psáno výše, jedná se o velmi náročnou část, při které je pájka nanášena jako pasta sítotiskem nebo šablonovým tiskem. Při ručním pájení může být pasta nanášena pouze speciální jehlou. V dnešní době se také objevují metody, kdy je nanesená kompaktní pájka. V tomto procesu je velmi důležitá viskozita pájecí pasty. Hodně viskózní pastu můžeme mít problém přes síto nebo šablonu protlačit tak aby byla na všech požadovaných plochách. Naopak málo viskózní pasta může při protlačování těrkou zatéct pod šablonu i mimo určená místa. To může vést k poškození materiálu, nebo dokonce spojování vodivých cest. [1]

Jako první uvádím nanášení jehlou, jakožto nejjednodušší způsob nanášení. Tohoto postupu je využíváno při vývoji nebo opravě. Nanášet pastu můžeme jehlou, do které si pastu ručně nabereme. Existují i moderní dávkovače, kdy jehlu držíme v ruce, ale množství pájky si regulujeme na dávkovací stanici. [1]



Obr. 4 Nanášení pájecí pasty jehlou [10]

Nanášení pájky šablonovým tiskem, je společně se sítotiskem velmi častý způsob. U této metody nanášíme pastu na desku plošných spojů přes šablonu, která nám dovoluje přesnější vytváření obrazců nebo lepší stabilitu.

Pro výrobu folií se používají především tyto materiály.

- měď
- mosaz
- molybden
- plasty

Pro výrobu těchto šablon se využívá především leptání, nebo řezání laserem. Otvory by měly být užší než tloušťka šablony plus 50 %. Při nejčastějším tloušťce šablony 0,15 mm by neměl být průměr menší než 0,225 mm. Proto jsou tyto šablony nevhodné pro použití u součástek s roztečí menší než 0,4 mm.

Technika řezání laserem je v dnešní době stále více aktuální. Především díky velmi vysoké přesnosti. Dokážeme s ní tedy vyrobit i otvory pro součástky s roztečí menší než 0,5 mm. Nevýhodou tohoto technologického postupu je cena. Obě technologie se také dají zkombinovat a tím snížit náklady.

Na obr. 5 je vidět zařízení pro nanášení pájecí pasty. Toto zařízení budu využívat ve své praktické části. V hromadné výrobě jsou tato zařízení podobná, ale plně automatizovaná. Šablona, pájecí pasta i těrka jsou stejné. S takovým automatickým zařízením budu počítat v ekonomické části. [1]

Nezbytným nástrojem u této metody je těrka, kterou můžeme popsat jako desku s břitem na spodní straně. Pohybuje se nad sítím nebo šablonou, a je přitlačována přesně předepsanou silou. Úkolem těrky je rozetřít a zatlačit pastu rovnoměrně do všech míst šablony nebo síta. Existují kovové nebo pryžové. Kovové těrky jsou spolehlivější, avšak mají vyšší pořizovací cenu a rychleji opotřebují šablonu a tím také zvyšují cenu. Na obr. 6 je těrka gumová těrka. [1]



Obr. 6 Zařízení pro šablonový tisk [14]



Obr. 5 Těrka [16]

2.1.6 Osazování součástek

Po nanesení pájky je třeba desku osadit součástkami. Pro menší série, případně vývoj můžeme použít SMD manipulátor, který jsem používal ve své praktické části. Jedná se o vakuovou jehlu, se kterou manuálně mohu pohybovat ve směrech x, y, z a otáčet jí kolem své osy.

Ve velkých sériích se používají osazovací automaty. Osazovací automat bývá nejpomalejším místem celé linky. V praxi jich tak může být několik vedle sebe. Na obr. 7 je osazovací automat P1.



Obr. 7 Osazovací automat [17]

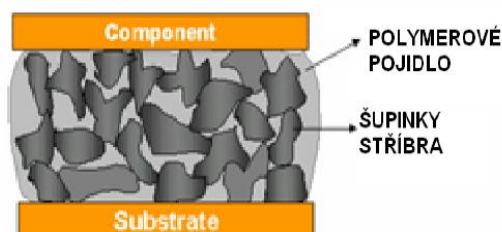
2.2 LEPENÉ SPOJE

Rozmach elektricky vodivých lepidel odstartoval v roce 1965 prof. J. Moris v USA. Vývoj tohoto směru spojování se začal nejvíce rozvíjet v době kdy různé vlády a instituce zakazovaly používání pájek obsahujících olovo. První výhodou elektricky vodivých lepidel je tedy absence olova. Druhou výhodou je nízká teplota vytvrzení lepidla. Ta se pohybuje v rozmezí 100 °C až 120 °C, v některých případech je vytvrzení možné i při normální teplotě. Výhodou může být také možnost spojovat součástky s roztečí až do 0,1 mm. [6] [1]

2.2.1 Složení elektricky vodivých lepidel

Lepidla se skládají ze dvou hlavních složek.

- Vazební složka (binder)
- Vodivá složka (filler)



Obr. 8 Složení elektricky vodivého lepidla [5]

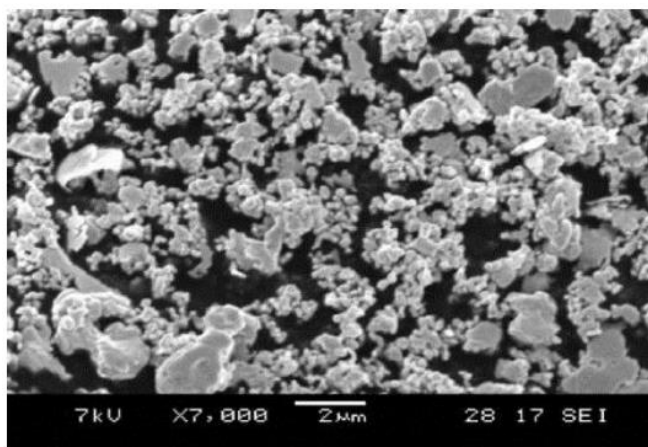
Vazební složka plní funkci pojiva a její funkcí je také zajišťovat pevnost, klimatickou odolnost a adhezi spoje. Pojivem v této složce je epoxidová nebo silikonová pryskyřice. Jejím složením můžeme měnit také teplotu a celkovou dobu vytvrzení. Například vytvrzení lepidel při normální teplotě může trvat i 140 hodin. Lepidla můžeme rozdělit podle jejich složení do dvou skupin.[1]

- Jednosložková
- Dvousložková

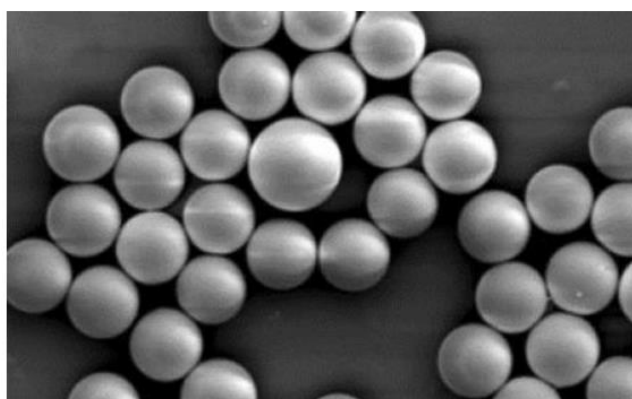
Jednosložková lepidla jsou lepidla, která se vytvrzují již při pokojové teplotě. Tento fakt je podmíněn jejich vyšší cenou a také obtížnějším skladováním. Tato lepidla můžeme nalézt také pod názvem RT (room temperature) lepidla. Skladují se zmražená, ve zvláštních případech pouze v chladničce. Dvousložková lepidla mohou být skladována při pokojové teplotě, musíme však zajistit kvalitní uzavřené nádoby, abychom zabránili odpařování nižších molekul složek. [10]

Druhou složkou je složka vodivá. V zásadě rozlišujeme 2 druhy vodivé složky. Záleží především na tvaru vodivých částic. Částičky mohou být v pastě obsaženy jako šupinky (flakes) nebo kuličky (balls)

Tyto částice jsou nejčastěji stříbrné, niklové nebo i paladiové. Kromě složení, jejich vlastnosti určují právě tvar a také velikost. [1]



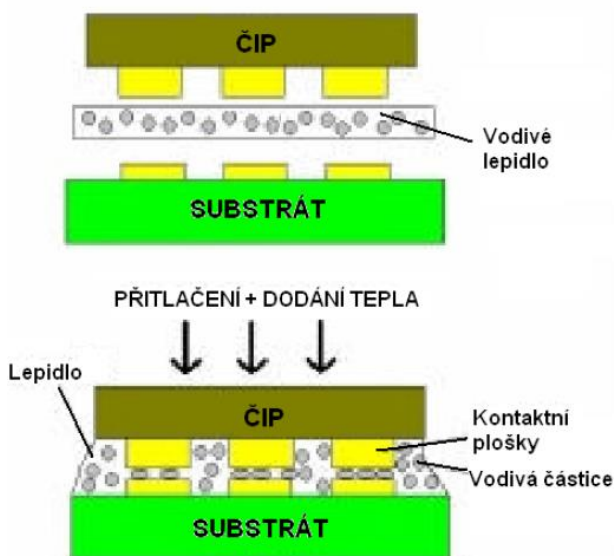
Obr. 9 Elektricky vodivé lepidlo – šupinky [6]



Obr. 10 Elektricky vodivé lepidlo – kuličky [6]

Izotropní lepidla jsou lepidla, která jsou elektricky vodivá ve všech směrech. Zpravidla bývají tvořeny kuličkami stejné velikosti. Koncentrace vodivých částic může být až 80 % celkového objemu lepidla.

Anizotropní lepidla jsou vodivá pouze ve směru kolmém na rovinu základní desky a nevodivá ve směru rovnoběžném. Vodivou složkou bývají ve většině případů šupinky, které se smrštěním při vytvrzení natočí do požadovaného směru. Těto vlastnosti jsme dosud žádnou klasickou pájkou nedosáhli. I to je důvod stále větší obliby vodivých lepidel. Koncentrace vodivých částí je v tomto případě menší a to přibližně 30 % celkového objemu lepidla. Anizotropní vodivá lepidla existují ve speciální formě, jedná se o folie, které se poté vytvrzují. [6] [1] [4]



Obr. 11 Schéma aplikace anizotropního lepidla [6]

2.2.2 Použití a aplikace elektricky vodivých lepidel

V základních aplikacích jsou klasické pájky svými vlastnostmi v mnohém lepší. Lepidla jsou totiž méně pevná a také mají horší elektrickou vodivost, což je u těchto spojů zásadní. Tato lepidla ale neobsahují olovo, tudíž vyhovují legislativě Evropské unie, což je první výhoda. Další výhody byly zmíněny již v úvodu této části. Jedná se hlavně o možnost vytvoření anizotropního vodivého lepidla, což je lepidlo, které vede pouze v jednom daném směru. Těto vlastnosti u klasické pájky nikdy nedosáhneme. Druhou výhodou je možnost vytvrzení tohoto lepidla při nízké teplotě, můžeme tedy na desky plošných spojů přilepit i součástky, které by se při klasické teplotě pájky zničily. Tyto přednosti však ještě nebyly vyzkoušeny v celém životním cyklu výrobku, není proto zatím jejich aplikace možná například v lékařství či letectví, kde spolehlivost a bezpečnost je na prvním místě. V běžné spotřební elektronice se ale tato vodivá lepidla dnes hojně využívají. Například většina LCD monitorů používá pro plošné spoje folii, na kterou je možné použít pouze elektricky vodivé lepidlo. [4]

Stejně jako u nanášení pastovitých pájek, i zde se jedná o síťotisk, šablonový tisk, nanášení jehlou. Novinkou oproti pájecím pastám je forma folie, která se využívá při aplikaci anizotropního vodivého lepidla. [4]

Šablonový tisk je obdobný jako nanášení pájecí pasty. Metoda byla popsána v kapitole 2.1.5. Důležitým parametrem je také viskozita daného lepidla.

U elektricky vodivých lepidel se můžeme setkat také s nanášením lepidla hrotem. Tento způsob není technicky náročný, je ale časově náročný. Hrot, případně hroty se smočí v lepidle a dotykem s pájenou deskou se lepidlo přenesse na desku. Ve velkých sériích je lepší používat například šablonový tisk. [7]

Zásadní odlišností ve způsobech nanášení je u elektricky vodivých lepidel anizotropní folie. Hlavní roli zde hraje anizotropní folie, což je folie vyrobená z vodivých lepidel. Po jejím vyrobení je již aplikace velmi jednoduchá a přesná. Tuto metodu můžeme využívat v případech při připojování součástek s malou nebo velmi malou roztečí vývodů. [7]

Jak již bylo řečeno, hlavní výhodou lepidel je možnost vytvrdit lepidlo při běžné pokojové teplotě, vyžadují-li to použité součástky. Toto je možné pouze při použití dvousložkových lepidel. Běžně používaná lepidla mají teplotní rozsah tavení od 100 °C do 200 °C. Je třeba dbát na správný čas vytvrzování, pokud bychom lepidlo vytvrzovali déle, než je nutné, přispívají bychom k stárnutí a poničení vnitřní struktury desek z epoxidové pryskyřice. Speciální lepidla ve formě anizotropních folií potřebují i speciální vytvrzení. Za potřebí je kromě dané teploty, která bývá 180 °C, také tlak. Po dodržení těchto dvou podmínek vznikne opravdu kvalitní spoj, který dokáže vést pouze v jednom směru. [5]

2.3 POROVNÁNÍ PÁJENÝCH A LEPENÝCH SPOJŮ

Spoje hodnotíme podle jejich vlastností. Obecně lze říci, že každá metoda má své klady i zápory. Například u lepidel je cena ve většině případů vyšší, ale pokud chceme spoje vytvořit za nízké teploty nebo vytvořit anizotropní vodivost, musíme lepidla použít. Pokud chceme realizovat běžné spoje, u kterých nás neomezuje teplota, je lepší využít například pájení vlnou, které bude levnější a takto vytvořený spoj bude mít i delší životnost. [1]

Vlastnosti	Pájecí pasta	Elektricky vodivé lepidlo
Vodivost	izotropní	izotropní, anizotropní
Odpor	nižší	vyšší
Šum	nižší	vyšší
Stabilita	vyšší	nižší
Odolnost proti navlhání	vyšší	nižší
Cena	nižší	vyšší
Spolehlivost	vyšší	nižší
Doba životnosti	vyšší	nižší
Teplota vytvrzení	vyšší	nižší
Mechanická pevnost	vyšší	nižší

Tab. 1 Porovnání vlastností pájených a lepených spojů

Zeleně zvýrazněná slova ukazují, v čem je porovnávaná látka lepší. Jak je patrné z tabulky, pájecí pasta je ve většině hodnocených parametrů lepší, ovšem nedokážeme u ní nikdy vytvořit anizotropní vodivost, nebo jí vytvrdit při pokojové teplotě. Právě to jsou výhody elektricky vodivého lepidla. Za zvýšené teploty a tlaku můžeme docílit anizotropní vodivosti viz. 2.2.1. Elektrický odpor jsem měřil ve své praktické části, v průměru byl odpor lepených spojů 10krát vyšší než pájených spojů. Vyšší šum lepených spojů je dán nehomogenitou materiálu. Při vyšších frekvencích se může této rozdílu projevit. S nehomogenitou, tedy i obsahem epoxidové pryskyřice v lepených spojích

souvisí nižší odolnost proti navlhání i doba životnosti, jelikož epoxidová pryskyřice degraduje například působením slunce rychleji než pájka. Vysoká cena lepených spojů je dána především vysokým obsahem stříbra. Při izotropní vodivosti se obsah stříbra pohybuje okolo 70 %. Mechanická pevnost je lepší u pájených spojů, jelikož pájecí pasta při přetavení lépe přilne k pájeným plochám.

2.3.1 Diagnostické metody pro hodnocení kvality spojů

Mezi základní metody, kterými dokážeme posoudit kvalitu vytvořených spojů, patří: [1]

- Sledování tvaru spojů
- Sledování struktury vytvořených spojů
- Sledování odolnosti proti odtržení součástky
- Sledování elektrochemické migrace
- Sledování elektrických vlastností (odpor)
- Sledování adheze spojů
- Sledování působení prostředí

První dvě metody se v praxi většinou sledují pomocí optické mikroskopie nebo elektronové mikroskopie. Při velkém přiblížení dokážeme přesně posoudit strukturu povrchu spoje a vyhodnotit, jestli jsme použili pro naši aplikaci to správné lepidlo. Migrace iontů je nebezpečný děj převážně u lepených spojů. Pokud bychom měli dva spoje příliš blízko u sebe, mohlo by dojít k migraci, tedy ke zkratu. Adheze vytvořených spojů je experimentálně měřena mechanickým testem. Součástka je danou silou vytržena kolmo z desky. [1]

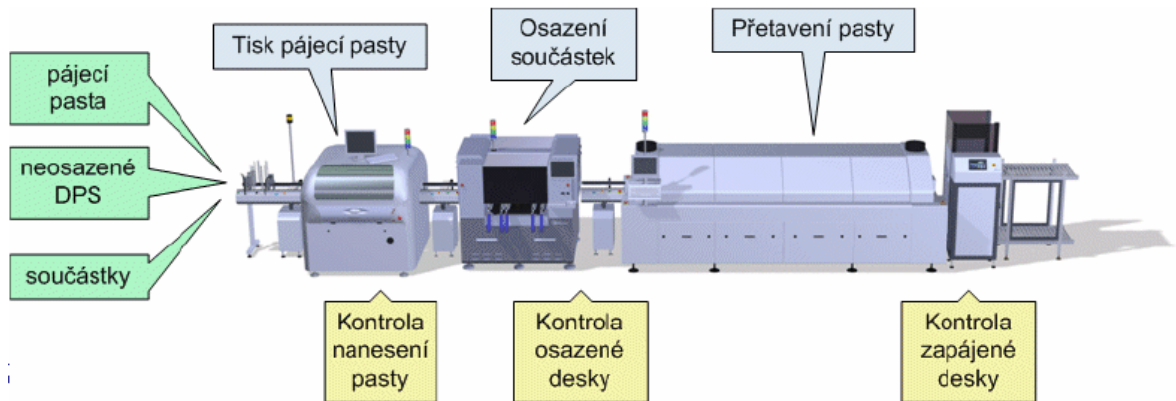
2.3.2 Sledování tvarů a struktury spojů

Jedná se o nedestruktivní diagnostickou metodu. Sledování optických vlastností se provádí před i po vytvrzení daného lepidla. Hodnotí se například rovnost distribuce materiálu, konzistence, nebo pokrytí povrchu DPS. Tuto metodu můžeme rozdělit na tři základní postupy. [4]

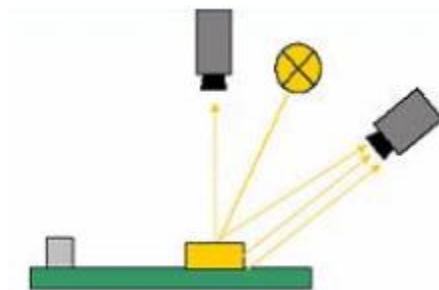
- Lidský zrak
- Dílenská lupa (mikroskop)
- Automatická optické inspekce

V poslední metodě, již práci za člověka převzal počítač, a člověk pouze zadává pokyny a vyhodnocuje výsledky. Díky této kontrole dokážeme v průmyslu zkontrolovat mnohem více součástek najednou, a navíc i součástky, které jsou tak malé, že kontrola dílenskou lupou by byla nemožná. Princip je založen na porovnávání správně vytvořené referenční desky s právě vyráběnou deskou. V samotném zařízení je vždy konkrétní součástka snímána několika kamery najednou z různých úhlů.

Tato metoda je vhodná pouze pro montáž SMD součástek. Pokud bychom desku osazovali BGA, museli bychom použít rentgenovou kontrolu. Vývody jsou pod součástkou a ani správné umístění součástky by nemuselo znamenat, že všechny spoje pod ní jsou v pořádku. [8] [18]



Obr. 12 Schéma automatické linky [18]



Obr. 13 Automatická optická kontrola spoje [18]

Mezi možné chyby odhalitelné vizuální kontrolou patří

- Lepící materiál, který zasahuje na vrchní povrch zařízení
- Trhliny v lepidle a délce větší než 5 mm
- Lepící řetězce, jejichž průměr je v místě připojení menší jak 50 % maximální tloušťky řetězce
- Přílnavé zbytky na podložce
- Odlupování, zvedání, nebo odtržení materiálu

3 PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci praktické části budu porovnávat pájecí pastu a elektricky vodivé lepidlo. Konkrétně se zaměřím na měření elektrického odporu a vizuální kontrolu vytvořených plošných spojů.

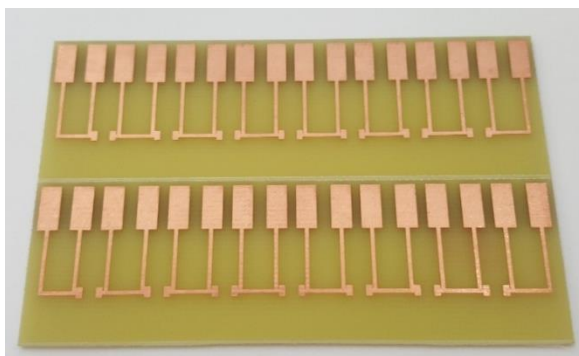
Pájecí pastu a elektricky vodivé lepidlo budu porovnávat každé na 28 DPS. Na každé desce udělám 7 plošných spojů, osadím jí tedy 7 nulovými odpory. Celkem tedy vytvořím 168 plošných spojů pájecí pastou a stejný počet elektricky vodivým lepidlem.

3.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ

V této části budu kontinuálně popisovat výrobu pájených a lepených spojů, tak jsem je v laboratoři zhotovil. Pro lepší názornost bude slovní popis doplněn obrázky, které byly pořizeny při výrobě vzorků.

3.1.1 Použité DPS desky

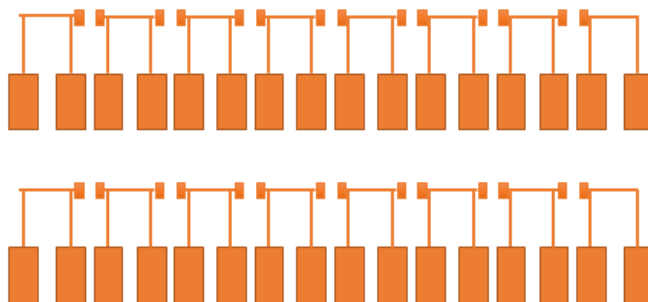
Použil jsem velmi často používané desky FR4 o tloušťce 1,55 mm. Tloušťka měděného plátování je 18 μm .



Obr. 14 FR4 deska

3.1.2 Návrh Layoutu

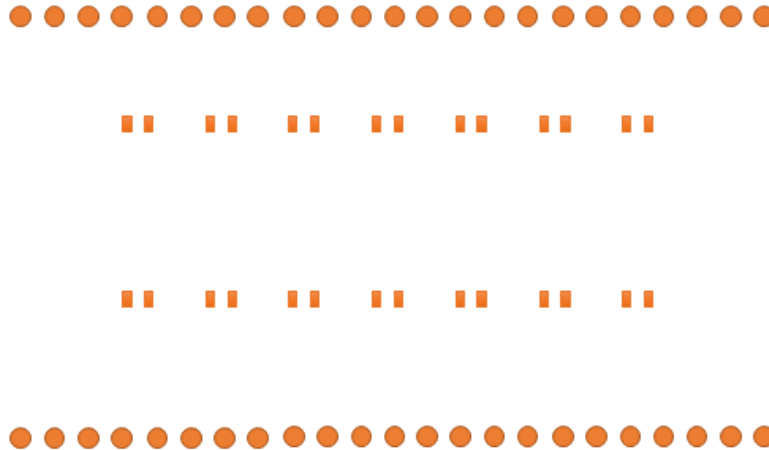
Ve své práci používám již navržený layout, který jsem dostal od fakulty k dispozici. Mým hlavním úkolem je hodnocení a porovnání pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla, přesná struktura desky proto není rozhodující. Vzhledem k jednoduchosti jsem vytvořil náčrt v běžných kancelářských programech.



Obr. 15 Návrh layoutu FR4 desky

3.1.3 Návrh šablony pro nanášení pájky a adheziva

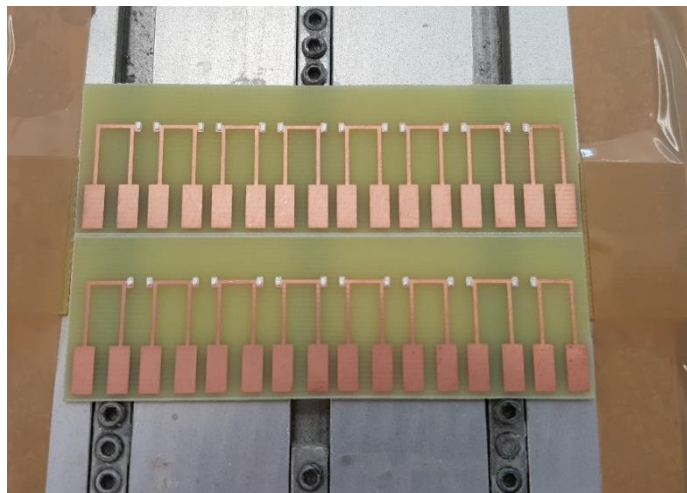
Pájecí pastu i elektricky vodivé lepidlo budu nanášet pomocí šablonového tisku. Návrh šablony je vidět na obr. 16. Tato šablona měla rozměry 195 x 300 mm, tak aby se vešla do používaného zařízení. Nahoře a dole jsou patrné kruhové otvory, kterými se šablona zachytí a poté napne pomocí šroubových závitů tak abychom mohli nanášet pájecí pastu. Používal jsem šablonu o tloušťce 150 μm , z plechu CuSn₄.



Obr. 16 Návrh šablony pro šablonový tisk

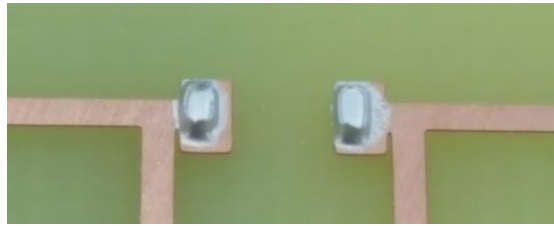
3.1.4 Nanášení pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla

Pájecí pastu a elektricky vodivé lepidlo jsem nanášel na DPS pomocí manuálního zařízení pro šablonový tisk. V samotném experimentu jsem měl vždy dvě desky spojené k sobě a nanášel pastu na obě současně. Na obr. 17 je vidět ukotvení desky pomocí posuvných kovových obdélníků s třemi šroubky. Krajním obdélník připevním na místě, opačný slouží jako zarážka pro desku. Svoji dvoudesku jsem upevnil i ze strany pomocí jiných DPS desek a izolační pásky. K samotnému uložení jsem použil fix, kterým jsem zjistil přesnou polohu šablony nad deskou. Všechny další dvoudesky jsem pouze vkládal do připraveného obdélníku. Pastu jsem přes šablonu nanášel pomocí třerky.



Obr. 17 Vytištěné kontakty na FR4 desku

Na obr. 18 je vidět detail již vytištěných spojů.



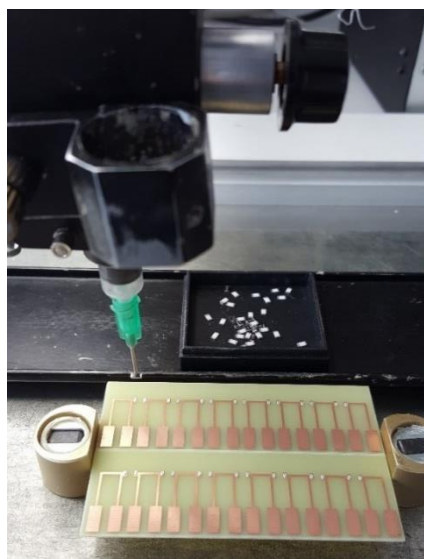
Obr. 18 Detail vytvořených kontaktů

3.1.5 Osazení DPS součástkami

SMD manipulátor je zařízení, pomocí kterého můžeme jednoduše osadit desky plošných spojů. Tento přístroj funguje na principu vakuové jehly. Je to dutá jehla, ze které je vysáván vzduch, a my jsme tak schopni uchopit SMD součástku. Pomocí modrého kolečka vpravo viditelného na obr. 19 můžeme se součástkou libovolně otáčet kolem osy jehly. Po dotyku součástky s vrstvou lepidla se na chvíli pomocí čidla přerušuje odsávání a součástka je na svém místě.



Obr. 19 SMT manipulátor [11]

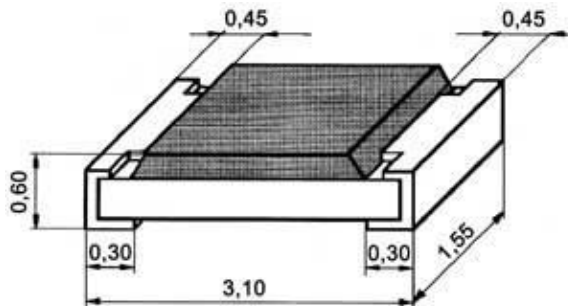


Obr. 20 Detail osazování desek součástkami

3.1.6 Nulový odpor

Testovací desku jsem osazoval nulovými SMD rezistory s pouzdry typu CRCW1206 0R0. Na nákresu níže jsou vidět přesné rozměry použitých rezistorů. Jak je patrné ze štítku na obalu těchto rezistorů, i tyto rezistory vyhovují směrnici RoHS a neobsahují žádné olovo. Nulové odpory mají

ve skutečnosti odpor přibližně 8 mΩ. Experimentálně jsem tuto metodu zkoušel pomocí dvou spojených sond na stejném měřícím přístroji, kde jsem měřil odpor vytvořených spojů. Při opakovaném měření se pohyboval odpor v těsné blízkosti hodnoty 8 mΩ. Velikost odporů je schematicky popsána na obr. 21.



Obr. 21 Schéma SMD rezistoru [14]

3.1.7 Přetavení pasty a vytvrzení elektricky vodivého lepidla

Ve své praktické části využiji pro pájecí pasty konvenčního ohřevu. Pec Mistral 260 má ohřev zajištěn pomocí ohřívaného tělesa. Proudění vzduchu zajišťují ventilátory. Tato pec má tři nastavitelné zóny. V prvních dvou zónách probíhá předehřev a v poslední zóně pak samotné pájení. Pomocí těchto jednotlivě nastavitelných zón může obsluha dodržet výrobcem předepsaný teplotní profil vytvrzování.

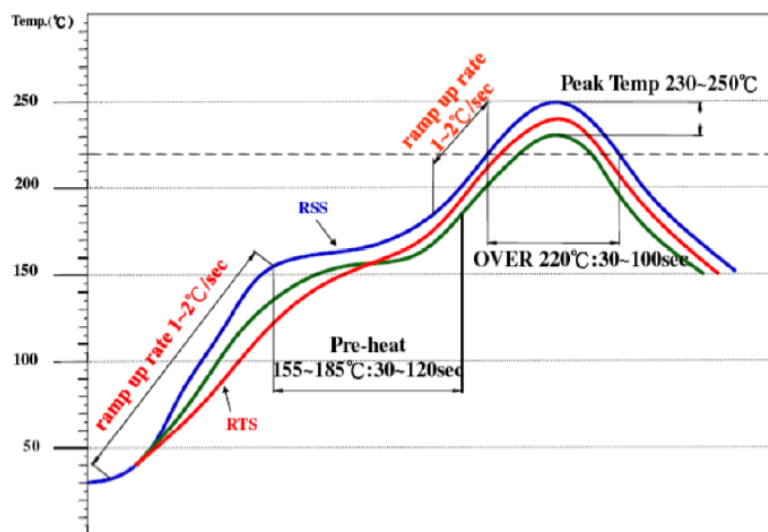
Vzorky vytvořené pájecí pastou jsem vytvrzoval v peci Mistral 260. Toto zařízení jsem podrobněji popsal v teoretické části. Použil jsem teplotní profil doporučený pro tuto pájecí pastu. Přetavení neboli „Reflow“ proběhlo v pořádku a po vizuální kontrole vypadaly spoje kvalitně.



Obr. 22 Pec Mistral 260 pro pájení přetavením [11]



Obr. 23 Osazená FR4 deska v peci
Mistral 260

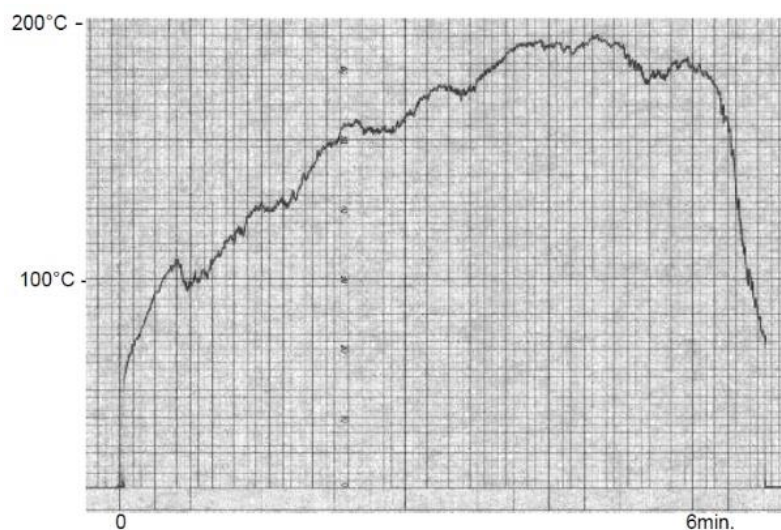


Obr. 24 Teplotní profil použité pájecí pasty

Elektricky vodivá lepidla jsem vytvrzoval v dávkové peci. Ohřev byl zajištěn elektrickými topnými tělesy a vytvrzování probíhalo sálavým teplem.

Výhodou pájecí pasty je efekt samo-narovnání. Při vytvrzování pájecí pasty v horkovzdušné peci působí v tavicí se pastě síly, které pomáhají srovnat součástku. Tento efekt funguje pouze do určitého úhlu natočení součástky. Pokud tuto hranici překročíme, nenarovná se.

Elektricky vodivé lepidlo jsem vytvrzoval v klasické peci. Snažil jsem se také dodržet teplotní profil doporučený výrobcem. Na obr. 25 je vidět teplotní profil doporučený výrobcem. Po kontrole jsem musel prodloužit dobu vytvrzování na téměř trojnásobek, aby bylo lepidlo kvalitně vytvrzené.



Obr. 25 Teplotní profil použitého lepidla

3.1.8 Použité látky pro tvorbu spojů

Pro praktickou část jsem zvolil jednu pájecí pastu a jedno elektricky vodivé lepidlo.

Označení	Počet složek	Barva	Konzistence	Podmínky vytvrzení	Rezistivita	Viskozita	Vodivá složka
Lepidlo ECO SOLDER AX70MN	1	Světle šedá	pasta	180 °C 10 min.	1 – 2,5 *E-6	530 000 – 560 000 cps	70 ±1% Ag
Pájka LEAD FREE SOLDER PASTE PF 606-P30	1	šedá	pasta	217 – 219 °C	0 Ωm	-	96,5 % Sn, 3% Ag, 0,5 % Cu

Tab. 2 Porovnání použitých látek

Elektricky vodivé lepidlo ECO SOLDER ELPOX AX 70MN je jednosložkové lepidlo. Jak je z názvu patrné, jedná se o ekologickou variantu lepidla, které by mělo kompletně nahradit dobře známou olovnatou pájku PbSn. Lepidlo by mělo být šetrné pro pracovníky, zákazníky i životní prostředí.

Pájecí pasta PF 606-P30 je bezolovnatá sloučenina cínu, stříbra a mědi. Tuto pájku bychom našli i pod označením SAC 305, což odpovídá poměrnému zastoupení jednotlivých prvků. Pasta obsahuje 96,5 % Sn, 3% Ag a 0,5 % Cu. Tato pasta tedy vyhovuje směrnici RoHS, která zakazuje používání klasické olovnaté pájky PbSn. Jak je patrné z tabulky, má tato sloučenina teplotu tání mezi 217 až 219 °C. Cože je o téměř 35 °C více než PbSn.

3.2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO ODPORU

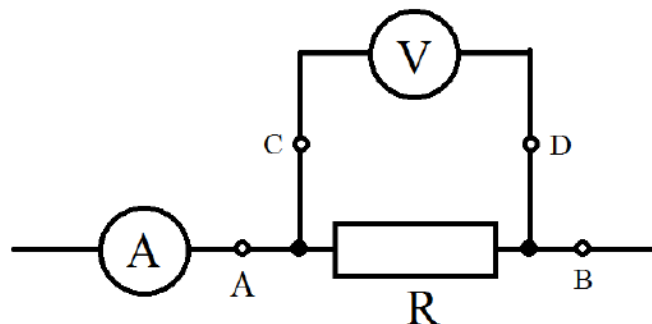
Teoreticky jsem tuto metodu popsal v teoretické části. Při samotném měření jsem změřil všech 168 vzorků pájecí pasty a 168 vzorků elektricky vodivého lepidla. Měl jsem k dispozici přípravek se čtyřmi sondami, ovšem s jinou roztečí, než byly mé desky. Jako proudové sondy jsem tedy použil klasické krokodýlky. Na následujících fotografiích bude měření patrné. Napěťové sondy na speciálním přípravku byly mechanicky posuvné, což zajišťovalo dobrý dotek s měděnou plochou.



Obr. 26 Miliohmometr HP – měření odporu

Před samotným měřením jsem všechny sondy zkratoval a přístroj pomocí tlačítka zkalibroval. Měření odporu touto metodou bylo velmi přesné. Při opakovaném měření stejného spoje se hodnota nelišila o více jak 0,2 mΩ, což je pro mé měření velmi dostačující.

Pro svojí praktickou část jsem zvolil pro měření elektrického odporu čtyřbodovou metodu, jejíž schéma je vidět na následujícím obr. 26. Použil jsem miliohmometr značky Hewlett Packard označení 4338B. U čtyřbodové metody jsou dvě sondy proudové, na obrázku A, B a dvě sondy napěťové, na obrázku C, D. Tento přístroj a tato metoda jsou vhodné pro měření odporu řádu mΩ. Já jsem očekával výsledky v desítkách mΩ pro pájecí pastu a stovkách mΩ pro elektricky vodivé lepidlo. Odpor tohoto voltmetru v tomto přístroji je tak velký, že jím neprotéká skoro žádný proud. Měření je tedy velmi přesné. [16]



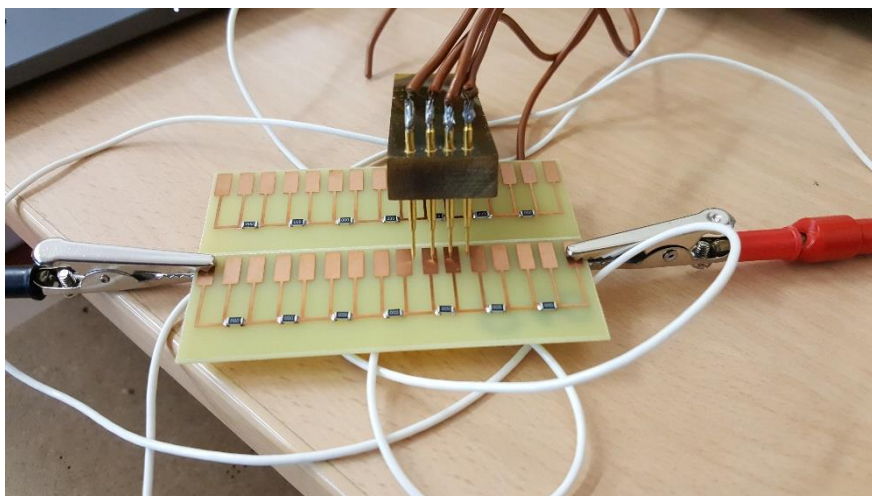
Obr. 27 Schéma čtyřbodové metody měření odporu [14]

$$R = \frac{U}{I}$$

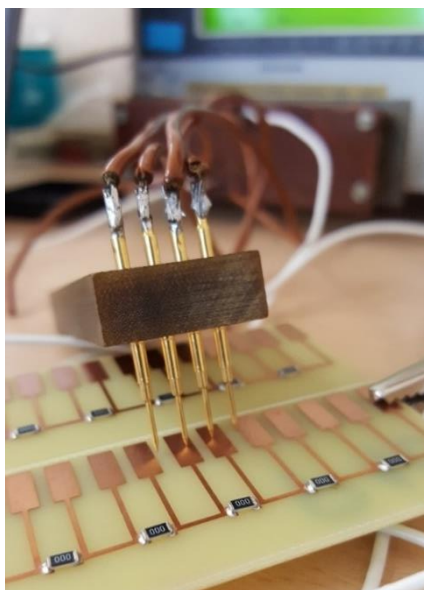
R = měřený (vypočtený přístrojem) odpor [Ω]

I = měřený proud [A]

U = měřené napětí [V]



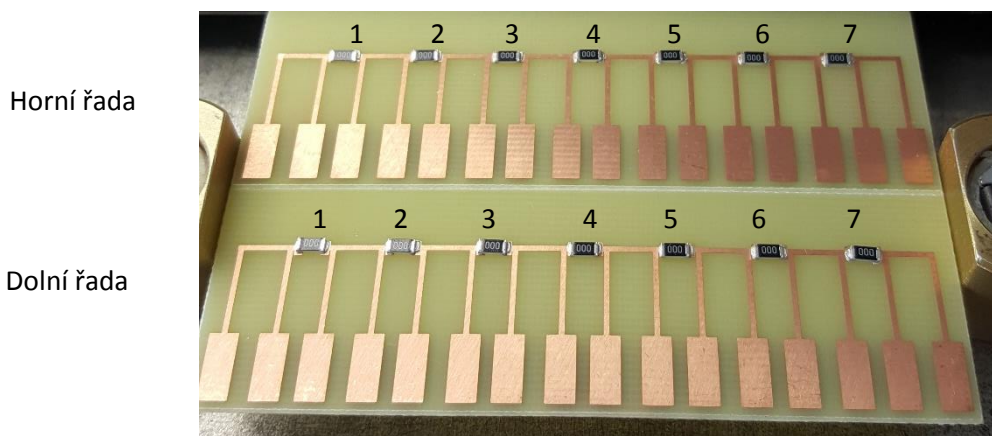
Obr. 28 Měření odporu čtyřbodovou metodou



Obr. 29 Detail přípravku pro čtyřbodovou metodu

3.2.1 Naměřené hodnoty odporu

Tabulku naměřených hodnot jsem uvedl v příloze. Každý spoj jsem měl označen viz. obr. 30. Každá deska potom má číslo od 1 do 12. Označení P platí pro pájené spoje, označení L pro lepené spoje. Při vyhodnocování výsledků, použiji například označení P7(H4), což značí sedmou testovanou desku s pájecí pastou se čtvrtým spojem v horní řadě.

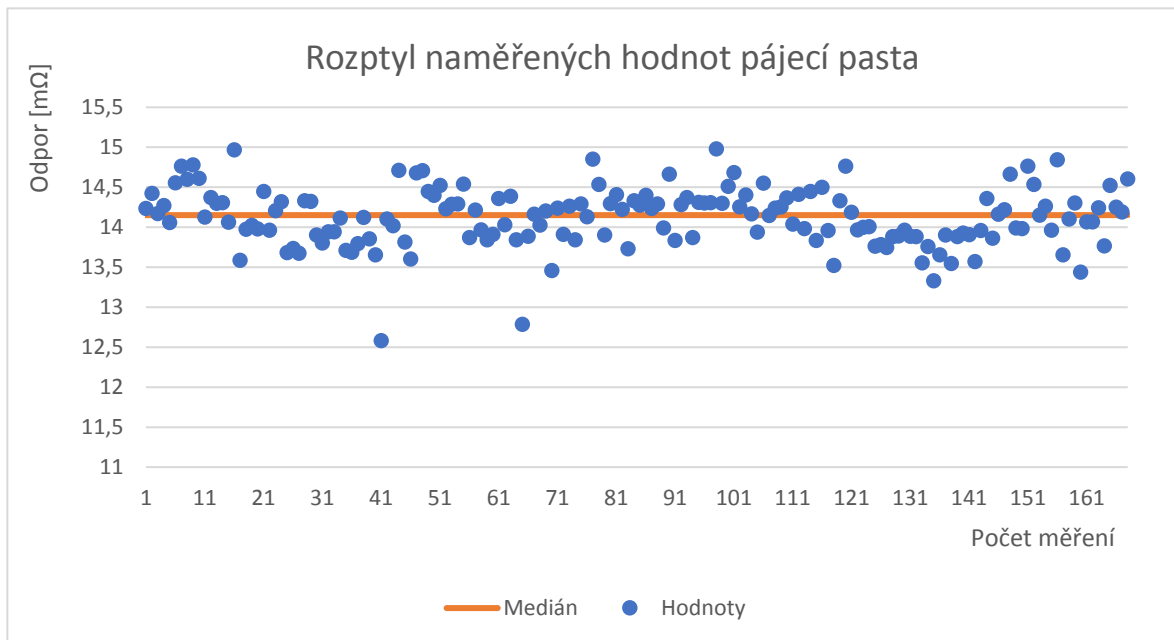


Obr. 30 Hotová deska osazena spoji – očíslování spojiů

Jako metodu pro zobrazení výsledků jsem použil rozptyl. Na grafu níže jsou modrou barvou vyznačeny naměřené hodnoty a oranžovou barvou medián hodnot. Vzhledem k několika hodnotám, které vysoce přesahovali dovolenou hodnotu odporu, jsem se rozhodl použít medián. Medián se od průměru v tomto případě lišil o více než 80 mΩ.

Naměřené hodnoty odporu se u pájecí pasty pohybovaly v řádu jednotek mΩ. Minimální hodnotu jsem naměřil 12,58 mΩ, naopak maximální hodnota dosahovala 14,98 mΩ. U pájecí pasty jsem použil jako referenční hodnotu medián.

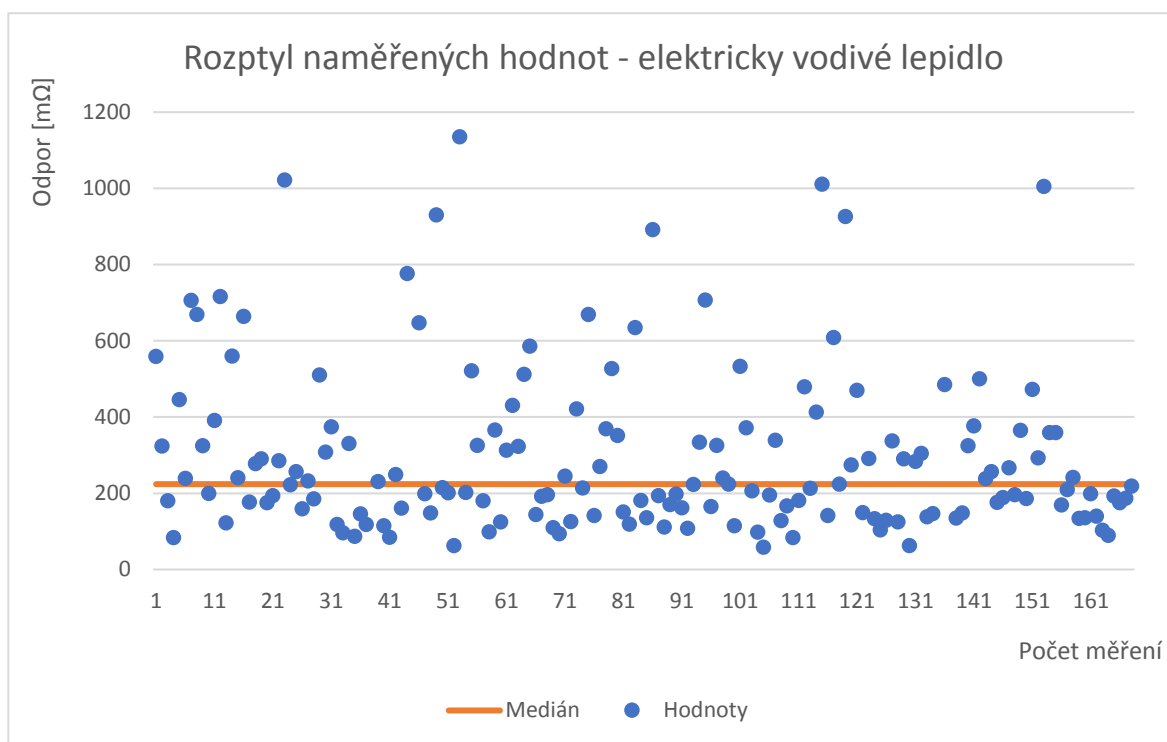
	Odpor [mΩ]
Průměr	14,13
Medián	14,15



Z grafu je patrné, že rozdíl maximální a minimální naměřené hodnoty je 2,39 mΩ. Tato technologie výroby plošných spojů je velmi spolehlivá. Je to dáno také tím, že pájecí pasta má schopnost tzv. samo narovnání. Pokud tedy umístím odpor na desku šikmo, při přetavení se natočí do správné polohy. To je způsobeno lepším smáčením pájecí pastou pouze ploch k tomu k tomu určených.

Naměřené hodnoty odporu se u elektricky vodivého lepidla pohybovaly v řádu stovek mΩ. Minimální hodnotu jsem naměřil 58,30 mΩ, naopak maximální hodnota dosahovala 1135 mΩ.

	Odpor [mΩ]
Průměr	299,94
Medián	222,50



U grafu elektricky vodivého lepidla jsem použil místo průměru medián. Medián byl o téměř 77 mΩ nižší než průměr, poskytoval tedy přesnější zobrazení. Rozdíl maximální a minimální naměřené hodnoty u elektricky vodivého lepidla byl 1076,7 mΩ. U lepidla neexistuje žádné samo narovnání, naopak pokud lepidlo nanese mimo určené plochy, zůstane tam viz obr. 32. Jako hranici odporu, který ještě vyhovuje, jsem po dohodě s vedoucí práce stanovil hodnotu 600 mΩ. Touto hranicí se budu řídit v další kapitole o zmetkovitosti.

3.3 ZMETKOVITOST

Pro svou ekonomickou část jsem potřeboval hodnotu zmetkovitosti obou technologií, pro správné vyčíslení nákladů. Zmetkovitost jsem vypočítal zavedením hranice maximálního možného odporu spoje. Všechny součástky pod touto hranicí vyhovely, ostatní by bylo nutné vyřadit a udělat nové.

Elektricky vodivé lepidlo je i pouze podle naměřeného odporu méně spolehlivou technologií. Z měřených 168 spojů nevyhovělo 16 spojů. Podíl špatných kusů u lepidla vyšel na 9,5 %. U obou technologií pro ekonomickou část přidávám 1 % navíc jako rezervu.

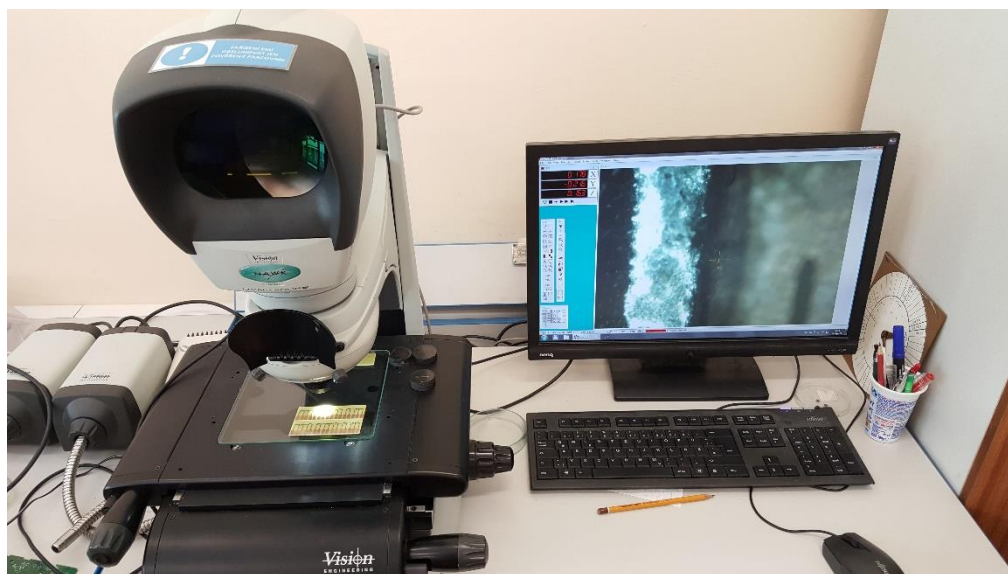
V sériové výrobě bude zmetkovitost menší. V praktické části jsem do výsledků zanesl chybu svojí prací, například při špatně umístěných nulových odporech. V ekonomické části tedy počítám s hodnotou 4,5 %. Snížil jsem tedy vypočtenou hodnotu zmetkovitosti o 6 %, což považuji za zmetkovitost způsobenou mojí prací.

Hranice odporu [mΩ]	Počet špatných spojů	Zmetkovitost [%]
800	7	4,34
600	17	10,5
400	34	21,11

Tab. 3 Zmetkovitost v závislosti na hranici dovoleného odporu

3.4 VIZUÁLNÍ KONTROLA VYTVOŘENÝCH SPOJŮ

Pro vizuální kontrolu jsem použil elektronickou lupu Vision Engineering Dynascope, pomocí které jsem obraz přenášel rovnou do počítače. V daném SW jsem si mohl tedy vyfotit potřebné vzorky. Vizuálně mě zajímaly hlavně ty vzorky, u kterých byl naměřený odpor největší. Pájení pomocí pájecí pasty bylo prakticky bezproblémové. U elektricky vodivého lepidla překračovaly některé vzorky povolenou hranici odporu více než 10x. Na tyto spoje jsem se tedy zaměřil.

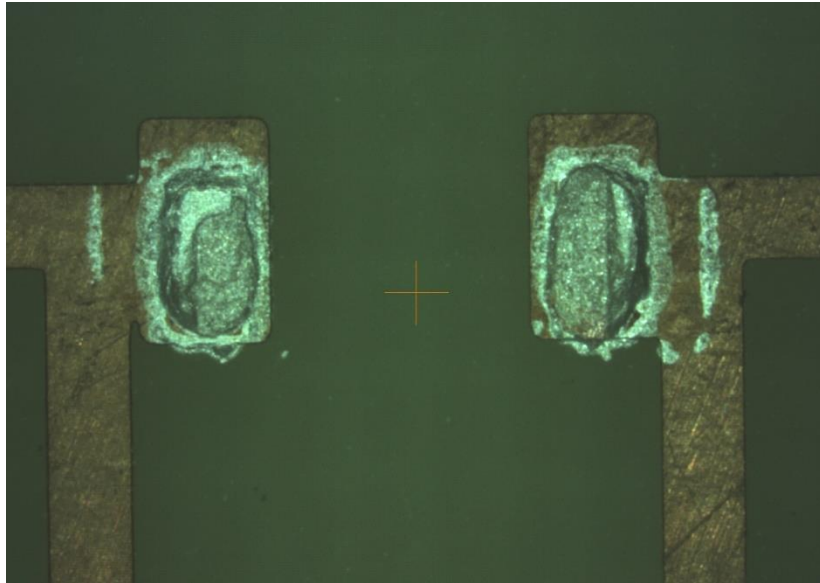


Obr. 31 Lupa pro vizuální kontrolu spojů

3.4.1 Kontrola lepených spojů

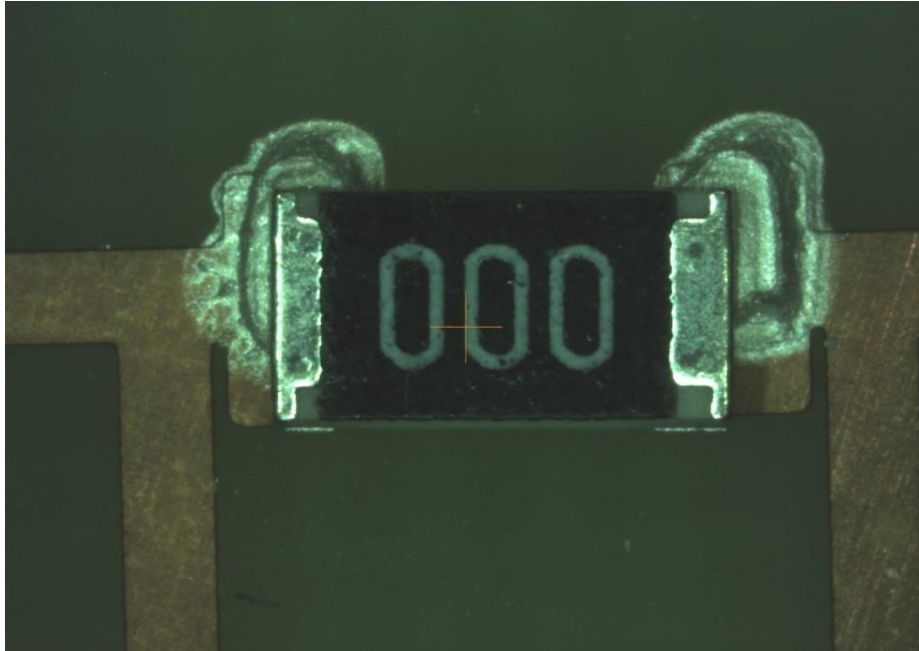
Při výběru spojů pro vizuální optickou kontrolu mě zajímaly spoje s nejvyšším změřeným odporem. Bylo zřejmé, že právě u těchto spojů došlo k nesprávnému připojení součástky.

První testovaný spoj elektricky vodivého lepidla na obr. 32 se utřhl již při manipulaci a upevnění pod lupu. Problém vysokého odporu byl tedy objasněn a zkoumal jsem pouze zbytky lepidla, které zůstali na DPS. Odpor byl 1135 mΩ. Příčinnou byla slabá mechanická pevnost. Velmi malá mechanická pevnost, a tedy malá vodivá plocha byli příčinou vysokého odporu.



Obr. 32 Detail spoje – L8(H6)

Další testovaný spoj jsem vybral, kvůli již okem viditelnému špatně nanesenému lepidlu na obr. 33. Kromě křivě naneseného elektricky vodivého lepidla na něj byl poté špatně umístěn i nulový odpor. Změřený odpor tohoto spoje byl 1022 m Ω . Přestože držel lépe mechanicky, vodivá plocha byla malá a odpor vysoký.



Obr. 33 Detail spoje – L12(H1)

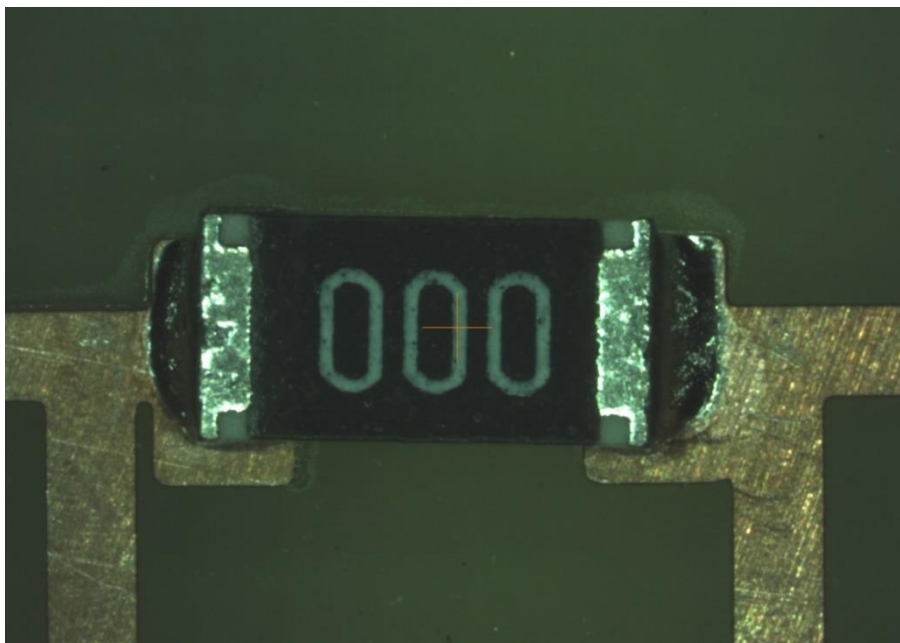
Jako poslední jsem pro kontrolu vybral spoj na obr. 34 s evidentně křivě nasazeným nulovým odporem, ovšem tento vzorek měl odpor 133 m Ω . Je vidět, že je umístěn nepřesně, ale lepidlo přesto dobře smáčelo styčné plochy, odpor byl tedy malý.



Obr. 34 Detail spoje – L2(D6)

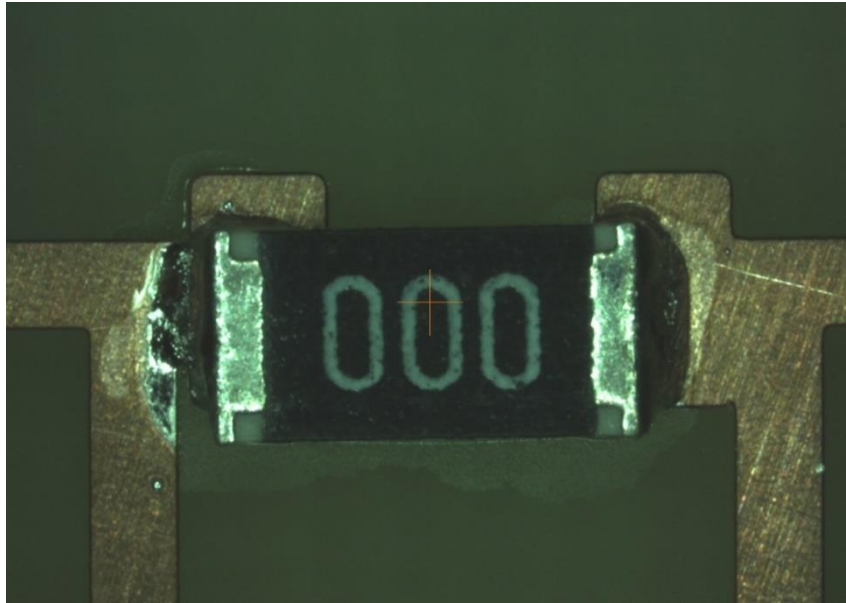
3.4.2 Kontrola pájených spojů

U pájených spojů nebyly žádné hodně odlišné vzorky. Vybral proto náhodně některé spoje na kontrolu. Odpor tohoto spoje na obr. 35 je 14,208 m Ω . Pájecí pasta při vytvrzení výborně smáčí měděné plochy určené pro kontakty. Přestože je spoj umístěn o trochu výš, než by měl, odpor je v pořádku.



Obr. 35 Detail spoje – P12(H1)

Na obr. 36 je spoj s odporem 14,322 mΩ. Tento spoj nebyl dobře vytištěn, obzvláště pravá část byla natištěna moc vlevo. Přes šablonu se vytisklo málo pájecí pasty, proto byl kontakt menší. Přesto pájka dokázala všechny důležité plochy smáčet a nulový odpor narovnat. Výsledný změřený odpor je tedy srovnatelný s odporem na předchozím obrázku. Při pozorování samotného procesu přetavení pájecí pasty byl pouhým okem viditelný efekt samo narovnání. Některé křivě umístěné odpory se opravdu srovnali do lepší pozice.



Obr. 36 Detail spoje – P12(D1)

4 EKONOMICKÉ HODNOCENÍ PROJEKTU

Důležitou součástí mé bakalářské práce je kromě technického, také ekonomické zhodnocení. Budu porovnávat dvě provedení velmi podobné technologie, ale používat budu dvě odlišné látky. Porovnáám technologii kontaktování pomocí pájecí pasty a pomocí elektricky vodivého lepidla. Mým cílem bylo spočítat nákladovou cenu spojů vytvořených z těchto látek v závislosti na zmetkovitosti. Pro co nejpřesnější zhodnocení jsem si vybral pájecí pastu a elektricky vodivé lepidlo, které mohou nanášet a osazovat na stejném zařízení. Tepelné vytvrzení potom provádím v cenově i technicky srovnatelných zařízeních. Největší odlišnost bude tedy právě ve dvou srovnávaných látkách.

Ekonomické hodnocení se může lehce lišit od reálné situace. Model bude počítat pouze s jednou linkou na tvorbu plošných spojů. V reálném světě bývá tato linka součástí velké firmy, která vyrábí celá elektrotechnická zařízení a plošné spoje jsou jenom její malou součástí. Stroje, které uvažuji v mém modelu, jsou automatické, nikdo tedy nebude ručně osazovat DPS rezistory tak, jako já v praktické části. Druhá odlišnost může nastat v nákupní ceně materiálu. Jelikož bude firma nakupovat velké množství pájecí pasty, respektive elektricky vodivého lepidla, dosáhne u dodavatelů na lepší ceny než ty, které jsou veřejně dostupné. Všechny uvedené ceny budou bez DPH, tím se v práci nebudu zabývat. Výpočet budu provádět pouze pro zjištění nákladů na jednotlivé technologie. Budu počítat s tím, že dodavatel mi dodá FR4 desky a součástky. Já si nechám vyrobiť šablonu a desky osadím na lince.

Součástí linky bude Osazovací automat, dávkovač, zařízení pro technologii nanášení past, pájecí pec, automatické čistící zařízení, sušící a skladovací skříň, filtrační stanice a automatická optická inspekce. Budu také uvažovat náklady na vybavení laboratoře prostředky ESD, chladícím zařízením nebo pracovištěm pro ruční optickou kontrolu.

4.1 ZAVEDENÍ POJMŮ A POTŘEBNÝCH ÚDAJŮ

V této části jsem zavedl pojmy, se kterými se budu zabývat v ekonomické části. Kromě zavedení pojmů jsem zde uvedl tabulky jednotlivých nákladů na energie, mzdy, odpisy a ostatní.

4.1.1 Náklady

Náklady, anglicky „costs“ představují hodnotově vyjádřené vstupy výroby produktů. Máme dva hlavní druhy nákladů, náklady stálé (fixní) a náklady proměnné (variabilní). Z anglického překladu se u nás vžily zkratky FC a VC. Fixní náklady jsou nezávislé na výrobě. Jsou to například odpisy, pronájmy prostor nebo úroky z úvěru. Variabilní náklady naopak souvisí s výrobou. Jedná se například o náklady na materiál, energie nebo mzdy zaměstnanců. Pro úplnost, dohromady můžeme náklady označit jako celkové, a tedy zkratkou TC. (total costs) [12]

4.1.2 Zmetkovitost

Tento pojem označuje počet špatně vyrobených (nefunkčních) výrobků za určitý čas nebo vztahovaný na určitý počet správně (kvalitně) vyrobených výrobků. Ve své práci budu konkrétně zjišťovat, kolik plošných spojů musím vytvořit, abych dostal 100 kvalitních. Podle naměřených hodnot navýším náklady na použitou látku. V mém případě se jedná o pájecí pastu nebo elektricky vodivé lepidlo.

4.1.3 Měnový kurz CZK/EUR

Ve své práci z důvodu nákupu materiálu od zahraničních firem uvádím vývoj měnového kurzu. V březnu 2017 Česká národní banka ukončila intervence. Od té doby koruna mírně posílila a ustálila se na hodnotě v průměru 25,5 Kč /1 EUR. Budu tedy ve výpočtech počítat s touto hodnotou.



Obr. 37 Vývoj měnového kurzu CZK/EUR [9]

4.1.4 Počet vytvořených desek

Pro vytvoření ekonomického modelu automatické linky musím nejprve definovat výrobek, ke kterému budu vztahovat náklady. Pro lepší počítání si zvolím desku s průměrným množstvím osazených součástek. Ve svých výpočtech budu počítat s touto referenční deskou, i když ve skutečnosti některá bude osazena více, jiná zase méně.

Při výpočtu této referenční desky jsem vycházel z již osazených desek, většinou z počítačů. Na konkrétní desce jsem si vždy definoval určitou oblast a v ní spočítal počet vytvořených spojů. Po srovnání několika různých desek jsem jako svoji referenční desku zvolil desku o velikosti 100x100 mm. Podle této desky jsem poté určil spotřebu past a rychlost osazování.

Omezením v počtu vytvořených desek je na automatické lince osazovací stroj. V průměru dokáže osadit 5 referenčních desek za hodinu. V tomto výpočtu jsem uvažoval 8-hodinové pracovní směny a 250 pracovních dní v roce. Roční počet vytvořených osazených desek bude tedy v mém modelu 10 000.

4.1.5 Spotřeba materiálu

Pro výpočet nákladové ceny jednotkové desky je třeba vypočítat spotřebu pájecí pasty nebo lepidla. Také budu počítat s dalším spotřebním materiálem, který je k provozu automatické linky potřeba.

Největší spotřeba bude u pájecí pasty, respektive u elektricky vodivého lepidla. Důležitým kritériem pro ekonomické zhodnocení je správně definovat množství pájky spotřebované na jednu referenční desku. Při tomto výpočtu jsem vycházel z průměrné velikosti jednoho spoje a hustoty používané látky. Jelikož v pájecí pastě převládá cín, používal jsem jeho hustotu, spotřeba mi vyšla 1 g na referenční desku. U elektricky vodivého lepidla je dominantní stříbro (70 %) společně s epoxidovou pryskyřicí (30 %). Po sečtení hustot těchto látek v daném poměru se blížíme také hodnotě 1 g na referenční desku. Každý den na konci pracovního cyklu automatické linky zůstane

zbytek pasty na šabloně, případně těrce. Budu proto každý den počítat u obou variant 1 g materiálu navíc.

Ve svém výpočtu budu také uvažovat další spotřební materiál, jako jsou šablony na tisk nebo přípravek na mytí desek. Součástí automatické linky je zařízení na mytí desek, musím proto do nákladů započítat také de-ionizovanou vodu. Náklady na de-ionizovanou vodu pro 10 000 desek jsem stanovil na 65 000 Kč. Jako další spotřební materiál budu považovat šablony, které budou vždy zhotoveny podle přání zákazníka. Budu počítat také s drobnými výdaji na prostředky na čištění automatické linky.

Podle zakázky si vždy nechám zhotovit šablonu pro každý typ desky. Vycházím z nabídky firmy PragoBoard s.r.o. Tato firma nabízí desku do 200x300 mm za cenu 900 Kč. V daném roce budu počítat s 30 zakázkami, pro které bude třeba vyrobit odlišnou šablonu. Náklady na šablony budou tedy 27 000 Kč. [15] [13]

4.1.6 Cena pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla

Cena vstupního materiálu je v mé práci zásadní položka. Vstupní materiál, tedy pájecí pastu a elektricky vodivé lepidlo porovnávám v praktické části. Také v ekonomické části je rozdíl nákladů těchto položek největší. Pájecí pasta je zavedený a známý materiál, oproti lepidlu, které neznáme tak dlouho. Nutno podotknout, že ve své práci používám pájecí pastu vyhovující legislativě RoHS, tedy neobsahující olovo. Cena této pájecí pasty a její aplikace je vyšší než klasická pájecí pasta obsahující olovo. I přesto je lepidlo pro své jiné vlastnosti podstatně dražší.

Materiál	Hmotnost	Cena [Kč]
Pájecí pasta SAC	500 g	2 500
El. vodivé lepidlo ELPOX	500 g	25 410

Tab. 4 Cena použitých materiálů

4.1.7 Mzdy zaměstnancům

Automatickou linku budou obsluhovat dva zaměstnanci. Jeden kvalifikovaný, druhý pouze na manuální plnění zadaných úkolů. Budu počítat s tím, že kvalifikovaný pracovník v mém provozu bude dostávat 400 Kč za hodinu a nekvalifikovaný pracovník, který bude pouze po zaškolení provádět zadané úkony 200 Kč za hodinu. [12]

4.1.8 Odpisy zařízení

Pojem odpis nám vyjadřuje náklady vzniklé opotřebením fixního (stálého) majetku. Jak bylo řečeno, odpis je náklad a odečítá se od příjmů spolu s dalšími náklady a snižuje daňový základ. Podle zákona č. 586/1992 se fixní majetek třídí do odpisových tříd. Ve své práci použiji odpis podle třídy 2-28 29.24.40 (Stroje, přístroje a laboratorní zařízení jinde neuvedené ke zpracování materiálů, postupy spočívajícími ve změně teploty) a podle třídy 2-40 29.56 (Ostatní účelové stroje (kromě strojů pro domácnost) zejména – stroje jinde neuvedené) Stroje budu tedy odepisovat po dobu 5 let. Protože počítám pouze nákladovou cenu, zajímají mě odpisy účetní, které rozložím do celých 10 let, tedy po dobu životnosti zařízení. [12]

4.1.9 Cena zařízení

Zařízení, na kterém bych vyráběl pájené a lepené spoje je velmi dobře srovnatelné. Následující tabulka obsahuje soupis zařízení, které je nutné koupit pro sestavení linky. Uvedené

ceny se mohou v současnosti pohybovat o něco výše. Vycházel jsem z cenové nabídky zařízení pro obdobný provoz.

Zařízení	Cena [Kč]
Osazovací automat + dávkovač	4 125 000
Zařízení pro technologii nanášení past	993 000
Pájecí pec	1 433 200
Automatické čisticí zařízení	868 000
Sušící a skladovací skříň	264 000
Prostředky ESD	694 000
Filtrační stanice	95 900
Chladící zařízení, Klimatizace	73 600
Automatická optická inspekce	1 828 000
Ruční optická kontrola	382 300
Celkem	10 757 000
Cena/rok	1 075 700

Tab. 5 Náklady na pořízení automatické linky

4.1.10 Cena elektrické energie

Pro výpočet ceny energie jsem nejprve zvolil místo podnikání, které by se nacházelo v severní části střeďočeského kraje. Na internetu jsem si našel dodavatele společnost INNOGY a její tarif pro firmy se střední spotřebou přibližně 32 MWh ročně. Spotřebovanou energii jsem odhadl z předpokládaného příkonu použitých strojů. V tabulce jsem uvedl spotřebu pro 250 pracovních dní a 8-hodinovou pracovní směnu.

Zařízení	Příkon [W]	kWh za rok	Cena/rok [Kč]
Osvětlení	150	300	1 584
Stroje	12 000	24 000	63 360
Topení	4 000	8 000	42 240
Výpočetní technika	211	422	2 228
Chladící zařízení (lednice)	75	150	792
Celkem			110 204

Tab. 6 Náklady na elektrickou energii

4.1.11 Revize a servis zařízení

Do nákladů musím zahrnout i finance vynaložené na revizi, případně servis používaných strojů. Jeden zaměstnanec bude kvalifikovaný, na revizi bude potřeba odborník z jiné firmy. Ve svém modelu budu počítat s náklady 19 000 Kč za rok.

4.1.12 Osobní ohodnocení

Firmu musí někdo řídit, sjednávat nové zakázky, starat se o majetek a zaměstnance. Proto budu počítat v nákladech i s osobním ohodnocením. Tyto náklady jsem stanovil na 360 000 Kč za rok.

4.1.13 Nákladová cena referenční DPS

Nákladová cena jedné referenční desky bude vhodným údajem pro management nějaké firmy při rozhodování jakou zvolit technologii výroby.

Celkové roční náklady pro pájecí pastu budou dle mých výpočtů 1 448 599 Kč. U pájecí pasty budu počítat jako rezervu 1 %. Zmetkovitost této technologie byla 0 %. Z 10 000 vytvořených desek bude tedy bezchybných 9900. Náklady na 1 desku budou 228,02 Kč.

Celkové roční náklady pro elektricky vodivé lepidlo budou 1 906 799 Kč. U elektricky vodivého lepidla budu počítat jako rezervu také 1 %. Zmetkovitost činila 4,5 %. Z 10 000 vytvořených desek bude tedy bezchybných 9550. Náklady na 1 desku pak vycházejí 286,15 Kč.

4.2 TABULKA CELKOVÝCH NÁKLADŮ

Celkové náklady všech položek sečtených za jeden rok. Počítal jsem s cenami, které odpovídají současnosti, vypočtená nákladová cena tedy odpovídá roku 2018.

Zásadní odlišností v nákladech na obě technologie je položka materiálu. Zatímco u pájecí pasty jsou náklady na pastu 2 % z celkových nákladů, u elektricky vodivého lepidla je to 19 %.

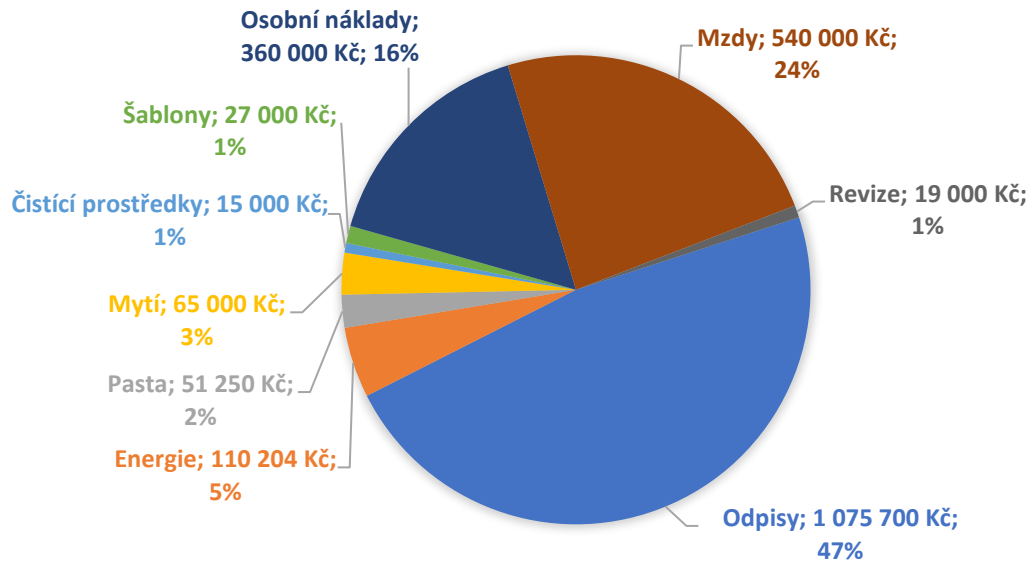
Pájecí pasta		
Položka	Poznámka	Náklady/rok [Kč]
Stroje	Kompletní linka	1 075 700
Energie	32 MWh	110 204
Pájecí pasta	10 kg	51 250
Prostředek na mytí		65 000
Čistící prostředky		15 000
Šablony	30 kusů	27 000
Osobní ohodnocení		360 000
Mzdy zaměstnancům	2 zaměstnanci	540 000
Servis		19 000
Celkem		2 257 423

Tab. 7 Celkové náklady pro pájecí pastu

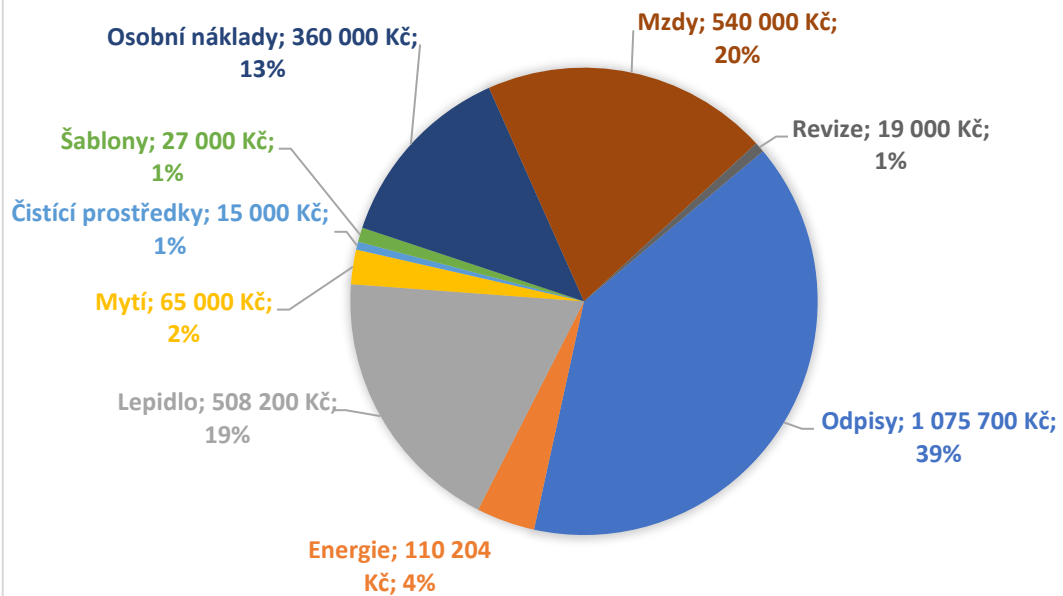
Elektricky vodivé lepidlo		
Položka	Poznámka	Náklady/rok [Kč]
Stroje	Kompletní linka	1 075 700
Energie	32 MWh	110 204
Lepidlo	10 kg	520 905
Prostředek na mytí		65 000
Čistící prostředky		15 000
Šablony	30 kusů	27 000
Osobní ohodnocení		360 000
Mzdy zaměstnancům	2 zaměstnanci	540 000
Servis		19 000
Celkem		2 732 809

Tab. 8 Celkové náklady pro elektricky vodivé lepidlo

STRUKTURA NÁKLADŮ ZA 1 ROK PRO PÁJECÍ PASTU



STRUKTURA NÁKLADŮ ZA 1 ROK - ELEKTRICKY VODIVÉ LEPIDLO



5 ZÁVĚR

Bakalářská práce v teoretické části popisuje metody pájení a elektricky vodivého lepení v celém jejich pracovním cyklu. Pájka i elektricky vodivé lepidlo jsou sloučeniny několika látek. Po projití několika cyklů, se z látky stane spoj, který spojuje součástku s podložkou. Spoj neplní pouze funkci elektricky vodivého spoje. Plní také funkci mechanického připevnění nebo odvádějí přebytečné teplo ze součástky. Jednotlivé sloučeniny se začaly měnit s nařízením RoHS o zákazu používání olova. Vzhledem k praktické části se práce zaměřuje na pájky a lepidla ve formě pasty. Popisuje způsoby nanášení pasty a způsoby vytvrzení pájecí pasty.

V praktické části je popsána výroba plošných spojů pomocí pájecí pasty a elektricky vodivého lepidla. Jako pájecí pasta byl použit typ SAC 305, který neobsahuje olovo, je tedy vyhovující směrnici RoHS. Na druhé straně bylo použito lepidlo Elpox AX 70. Oba materiály byly na desku nanášeny pomocí šablonového tisku. Vzorky byly osazeny nulovými odpory pomocí ručního osazovacího zařízení. Pájecí pasta se vytvrzovala v horkovzdušné peci. Pájecí pasta má oproti lepidlu výhodu tzv. samo narovnání. Některé odpory byly úmyslně umístěny špatně, aby se prokázalo, že se opravdu samy srovnají. Jelikož pájka dokonale smáčí měděný povrch, dokáže i vychýlenou součástku srovnat. U elektricky vodivého lepidla tento efekt nenastane a když je odpor umístěn špatně, zůstane ve stejné pozici.

Pro určení zmetkovitosti byla u dané technologie stanovena maximální vyhovující hodnota elektrického odporu a všechny hodnoty nad ní byly považovány za nevyhovující. U pájecí pasty byly všechny vzorky v rozmezí 2 miliohmů. Dané hranici všechny vzorky vyhověly. U elektricky vodivého lepidla se hodnoty pohybovaly v řádech stovek miliohmů. Rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší naměřenou hodnotou byl více než 1 ohm. Hranice pro ještě vyhovující spoj byla stanovena na 0,6 ohmu. Zmetkovitost této technologie proto byla 9,5 %. V praktické části se potvrdil předpoklad větší spolehlivosti technologie pájení pomocí pájecí pasty před elektricky vodivým lepidlem.

Z časových důvodů nebylo možné spoje porovnat znovu po působení klimatických jevů. Může to být námět na další pokračování této práce. Pravděpodobně by se však potvrdily předpoklady a elektricky vodivé lepidlo by bylo horší i v životnosti spoje.

V ekonomické části byly definovány základní pojmy pro co nejpřesnější výpočet nákladové ceny dvou srovnávaných technologií. Ekonomická část, velmi úzce souvisí s částí technickou. V této části se vyskytují témata použitých strojů, spotřeby elektrické energie, použitého materiálu, nebo zmetkovitosti. Ve výpočtu se kromě technických záležitostí počítá také s náklady na zaměstnance, osobní ohodnocení nebo opotřebení strojů. K výpočtům byl použit model malé společnosti vyrábějící plošné spoje. Stroje uvažované pro tento model mají životnost deset let. Účetní odpisy jsou rozděleny tedy do celé životnosti zařízení. Pro stanovení nákladové ceny se všechny ostatní údaje počítaly za jeden rok. Výstupem ekonomické části je tedy tabulka veškerých nákladů provozu firmy na jeden rok. Je pravděpodobné, že v budoucích letech používání zařízení se budou zvyšovat náklady na mzdy, materiál nebo energie. Ve stejném poměru by se tedy zvedala i nákladová cena vytvořené desky. Pro samotný výpočet nákladové ceny bylo nutné definovat referenční desku, spotřebu materiálu na tuto desku a počet takto vyrobených desek. Technicky-ekonomické srovnání dává přesnější informace budoucímu výrobcí nebo investorovi, který bude muset prodat tyto desky za stejnou částku ve srovnatelné kvalitě. Nákladová cena referenční desky při použití pájecí pasty byla o téměř 60 Kč nižší než u elektricky vodivého lepidla. Pokud se uvažuje roční objem 10 000 vyrobených desek, nebude to vůbec zanedbatelná částka.

Je nutné říci, že použité elektricky vodivé lepidlo nemá žádné z lepších vlastností, které jsou v práci popsány. Nedá se vytvrdit při pokojové teplotě a nemá anizotropní vodivost. Přesto jsou zde tyto výhody zmíněny, protože jich lze v současnosti již dosáhnout, pouze nebylo možné je vyzkoušet v rámci této bakalářské práce.

V současné době se vyplatí použít technologii elektricky vodivého lepení pouze v případech, kde není možné například z teplotních důvodů použít pájecí pastu. Lepidla jsou díky svému téměř sedmdesátiprocentnímu zastoupení stříbra velmi drahá. Pokud je však potřeba zajistit anizotropní vodivost, lze toho dosáhnout pouze použitím elektricky vodivého lepidla.

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Automatická pájecí linka [19].....	6
Obr. 2 Schéma technologie pájení vlnou [1].....	7
Obr. 3 Schéma technologie pájení v parách [1].....	8
Obr. 4 Nanášení pájecí pasty jehlou [10].....	8
Obr. 6 Těrka [16].....	9
Obr. 5 Zařízení pro šablonový tisk [14].....	9
Obr. 7 Osazovací automat [17].....	10
Obr. 8 Složení elektricky vodivého lepidla [5].....	10
Obr. 9 Elektricky vodivé lepidlo – šupinky [6].....	11
Obr. 10 Elektricky vodivé lepidlo – kuličky [6].....	11
Obr. 11 Schéma aplikace anizotropního lepidla [6].....	12
Obr. 12 Schéma automatické linky [18].....	15
Obr. 13 Automatická optická kontrola spoje [18].....	15
Obr. 14 FR4 deska.....	16
Obr. 15 Návrh layoutu FR4 desky.....	16
Obr. 16 Návrh šablony pro šablonový tisk.....	17
Obr. 17 Vytisknuté kontakty na FR4 desku.....	17
Obr. 18 Detail vytvořených kontaktů.....	18
Obr. 19 SMT manipulátor [11].....	18
Obr. 20 Detail osazování desek součástkami.....	18
Obr. 21 Schéma SMD resistoru [14].....	19
Obr. 22 Pec Mistral 260 pro pájení přetavením [11].....	19
Obr. 23 Osazená FR4 deska v peci Mistral 260.....	20
Obr. 24 Teplotní profil použité pájecí pasty.....	20
Obr. 25 Teplotní profil použitého lepidla.....	20
Obr. 26 Miliohmometr HP – měření odporu.....	21
Obr. 27 Schéma čtyřbodové metody měření odporu [14].....	22
Obr. 28 Měření odporu čtyřbodovou metodou.....	22
Obr. 29 Detail přípravku pro čtyřbodovou metodu.....	23
Obr. 30 Hotová deska osazena spoji – očíslování spojů.....	23
Obr. 31 Lupa pro vizuální kontrolu spojů.....	26
Obr. 32 Detail spoje – L8(H6).....	27
Obr. 33 Detail spoje – L12(H1).....	27
Obr. 34 Detail spoje – L2(D6).....	28
Obr. 35 Detail spoje – P12(H1).....	28
Obr. 36 Detail spoje – P12(D1).....	29
Obr. 37 Vývoj měnového kurzu CZK/EUR [9].....	31

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] FRANKO, Jaroslav. *Technologie pájení a vodivého lepení v elektrotechnice* [online]. Plzeň, 2016 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/23130/1/Konecna_Prace_Se_Zadanim.pdf. Bakalářská práce.
- [3] EBNESAJJAD, Sina. *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*. Amsterdam: William Andrew/Elsevier, 2011. PDL handbook series. ISBN 978-1-4377-4461-3.
- [4] LICARI, James J. a Dale W. SWANSON. *Adhesives technology for electronic applications: materials, processing, reliability*. 2nd ed. Boston: William Andrew Pub., 2011. ISBN 978-1-4377-7889-2.
- [5] BARTÁK, Karel. *Vliv podmínek elektricky vodivých lepidel na jejich vlastnosti* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/69515/F3-BP-2017-Bartak-Karel-Vliv_podminek_vytvrzovani_elektricky_vodivych_lepidel_na_jejich_vlastnosti.pdf+&cd=2&hl=cs&ct=clnk&gl=cz. Bakalářská práce. ČVUT FEL.
- [6] MACH, Pavel. *Elektricky vodivé lepení v elektrotechnice* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34502/mod_resource/content/1/Elektricky_vodive_lepeni_v_elektrotechnice.pdf. Přednáška. ČVUT FEL.
- [7] POŘÍZEK, Michal. *Elektricky vodivá lepidla* [online]. Zlín, 2016 [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/38309/po%C5%99%C3%ADzek_2016_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce.
- [8] LOMBERSKÝ, Filip. *Spolehlivost pájených spojů* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2017-12-17]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/10504/1/Bakalarska_Prace_Filip_Lomersky.pdf. Bakalářská práce. ZČU Plzeň.
- [9] *Kurzy.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/kurzy-men/grafy/CZK-EUR/>
- [10] *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:46150/z-aktualniho-vydani-casopisu-zdvojene-aplikatory-zlepsuji-konformni-lakovani-v-hromadne-vyrobe>
- [11] NOVÁK, Ondřej. *Pájené spoje, růst dendritů* [online]. Praha, 2016 [cit. 2017-12-31]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64829/F3-DP-2016-Novak-Ondrej-NovakOndrejDendrityDP_2016.pdf. Diplomová práce. ČVUT FEL. Vedoucí práce Ing. Karel Dušek, Ph.D.
- [12] FIALOVÁ, Helena a Jan FIALA. *Ekonomický slovník s odborným výkladem česky a anglicky. 2., dopl. a aktualiz. vyd.* Praha: A plus, 2009. ISBN 978-809-0380-448.

- [13] FROŠ, Denis. *Zhodnocení mycího procesu u technologie pájení přetavením* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/70012>. Bakalářská práce. FEL ČVUT. Vedoucí práce Karel Dušek.
- [14] ŽALSKÁ, Pavlína. *Stárnutí spojů vytvořených elektricky vodivými lepidly* [online]. Praha, 2017 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/68445>. Diplomová práce. FEL ČVUT. Vedoucí práce Pavel Mach.
- [15] Pragoboard. *Pragoboard* [online]. 2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: https://www.pragoboard.cz/stencil_pool
- [16] Polyprint store [online]. 2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <http://shop.polyprint.cz/sitotiskova-terka-hlinikova-25cm-70sh>
- [17] P2J Technology. *P2J Technology* [online]. 2018 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://www.p2jtechnology.cz/produkty/smt-montaz/osazovaci-automaty/osazovaci-automat-p1/>
- [18] *Zkoušení a testování v el. výrobě přepracování, opravy* [online]. Praha [cit. 2018-05-09]. Prezentace. ČVUT FEL.
- [19] Mikroelektronika. *Mikroelektronika* [online]. 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.mikroelektronika.com/povrchova-montaz-smd>

8 PŘÍLOHY

8.1 TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO PÁJECÍ PASTU

P1	1	2	3	4	5	6	7	
Horní řada	14,235	13,685	14,45	14,263	14,31	14,189	13,865	mΩ
Dolní řada	14,425	13,735	14,402	13,844	14,982	13,97	14,166	mΩ
P2	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,173	13,676	14,525	14,293	14,3	13,999	14,222	mΩ
D. ř.	14,271	14,331	14,234	14,131	14,512	14,01	14,664	mΩ
P3	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,061	14,325	14,288	14,855	14,685	13,766	13,993	mΩ
D. ř.	14,557	13,905	14,291	14,536	14,256	13,784	13,985	mΩ
P4	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,765	13,805	14,541	13,903	14,404	13,75	14,765	mΩ
D. ř.	14,602	13,945	13,873	14,295	14,168	13,886	14,536	mΩ
P5	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,782	13,945	14,215	14,409	13,942	13,891	14,154	mΩ
D. ř.	14,615	14,118	13,97	14,223	14,554	13,964	14,265	mΩ
P6	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,129	13,713	13,845	13,734	14,149	13,89	13,965	mΩ
D. ř.	14,374	13,69	13,911	14,331	14,239	13,885	14,846	mΩ
P7	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,299	13,795	14,36	14,277	14,255	13,556	13,656	mΩ
D. ř.	14,308	14,124	14,032	14,4	14,37	13,76	14,104	mΩ
P8	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,063	13,856	14,39	14,236	14,04	13,33	14,306	mΩ
D. ř.	14,97	13,655	13,845	14,291	14,411	13,656	13,44	mΩ
P9	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	13,59	12,583	12,789	13,993	13,985	13,906	14,07	mΩ
D. ř.	13,977	14,103	13,889	14,664	14,449	13,55	14,068	mΩ
P10	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,026	14,022	14,166	13,835	13,838	13,886	14,245	mΩ
D. ř.	13,981	14,714	14,029	14,285	14,503	13,929	13,769	mΩ

P11	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,449	13,815	14,204	14,372	13,962	13,91	14,524	mΩ
D. ř.	13,963	13,605	13,46	13,872	13,526	13,573	14,252	mΩ
P12	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	14,208	14,68	14,24	14,311	14,333	13,96	14,194	mΩ
D. ř.	14,322	14,709	13,912	14,303	14,764	14,36	14,607	mΩ

8.2 TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO ELEKTRICKY VODIVÉ LEPIDLO

L1	1	2	3	4	5	6	7	
Horní řada	559	257	930	421	326	470	176	mΩ
Dolní řada	324	159	215	214	240	149	189	mΩ
L2	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	180	232	201	669	224	291	267	mΩ
D. ř.	84,05	185	62,6	142	115	133	196	mΩ
L3	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	446	510	1135	270	533	104	365	mΩ
D. ř.	239	308	202	369	372	129	186	mΩ
L4	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	706	374	521	527	206	337	473	mΩ
D. ř.	669	118	326	352	98,03	125	293	mΩ
L5	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	325	96,1	180	151	58,3	290	1005	mΩ
D. ř.	200	331	98,7	119	195	62,9	359	mΩ
L6	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	391	87,3	366	635	339	284	359	mΩ
D. ř.	716	146	125	181	128	305	169	mΩ
L7	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	122	118	313	136	167	138	210	mΩ
D. ř.	560	2940	431	892	83,6	147	242	mΩ
L8	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	241	231	323	194	181	2121	134	mΩ
D. ř.	664	115	512	111	479	485	136	mΩ

L9	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	177	84,6	586	170	213	1234	199	mΩ
D. ř.	278	249	144	198	413	135	140	mΩ
L10	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	290	161	192	162	1011	148	103	mΩ
D. ř.	175	777	196	108	142	325	89,2	mΩ
L11	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	194	1389	110	223	609	377	193	mΩ
D. ř.	285	647	93,8	334	224	500	175	mΩ
L12	1	2	3	4	5	6	7	
H. ř.	1022	199	245	707	926	238	187	mΩ
D. ř.	222	148	126	165	274	257	219	mΩ

8.3 DATASHEET ELEKTRICKY VODIVÉ LEPIDLO



ECO SOLDER AX 70_{MIN}

POLYMER BASE, SOLDER REPLACEMENT PASTE

- * ELECTRICALLY CONDUCTIVE
- * HIGH TEMPERATURE RESISTIVE FORMULATION
- * EPOXY-PHENOLIC HYBRIDE TYPE BINDER
- * HARMLESS & SAFE TO USE (NO LEAD; NO CFC; NO VOC)
- * USES REGULAR ON LINE EQUIPMENT
- * STABLE TECHNOLOGICAL PROPERTIES.

GENERAL DESCRIPTIONS:

AMEPOX MC product, trade name ECO-SOLDER™ represents new generation of single component, electrically conductive formulation designed for replacement of traditionally tin-lead solder pastes. Technology with our new ECO-SOLDER™ materials eliminates all type of solvents used for pre- or post-cleaning, like it is in conventional tin-lead solder technology.

One of the biggest advantages of ECO-SOLDER™ is, that it contains no lead or any other dangerous ingredients. It may be used with standard dispensing, SMD stenciling (10/20 mil pitches with excellent resolution) or screen printing application. ECO-SOLDER™ doesn't dry out on open screens or stencils for up to 2 weeks and refrigeration during storage of this material is not necessary.

ECO-SOLDER™ has extremely short curing time (especially with IR heating tunnel) and quite pleasant odor. This is 100% solids formulation without any volatile thinners so, is no fear about safety conditions for work. CFC solvent's attack ozone layer in the stratosphere is widely known. Aqueous cleaning solvents usually contain alcohol such a methanol, ethanol or isopropyl which are VOC (volatile organic compounds). VOC's are photochemically active and cause smog and ozone in the lower atmosphere. The use of ECO-SOLDER™ requires no fluxes and therefore no solvent cleaning of the PCB is needed.

E-S AX 70MN has high and stable electrical conductivity. This type is mostly for high-speed technological process. It doesn't change viscosity even on open area with thin layer.

SPECIFICATIONS:

Number of components	One
Consistency	Floable paste
Color	Bright silver
Percentage of silver (inside ready paste)	70 ± 1%
Specific gravity	2.1 – 2.4 g/cm ³
Viscosity	530 000 – 560 000 cps (*)
Drying time before curing process	Not necessary
Recommended curing schedule with air-circulated oven	180°C – (6 - 10) min. 200°C – (3 - 4) min.
Recommended curing schedule with heating tunnel	200°C in peak – 3 min. total time inside tunnel
Shelf life	6 months (when storage at 10°C – unopened)

(*) - Brookfield DVII; SSA#14; 1 rpm; 25°C.

TECHNICAL PROPERTIES (*):

Electrical resistivity	(1.0 – 2.5) x E(-6) Ωm
Pencil hardness	9H pencil hardness (one day after curing)
Range of service for continuous temperature	(-55)°C - (+200)°C
Max. operating temperature	300°C for abt 1.5 h.

(*) - Typical value for number of tests.

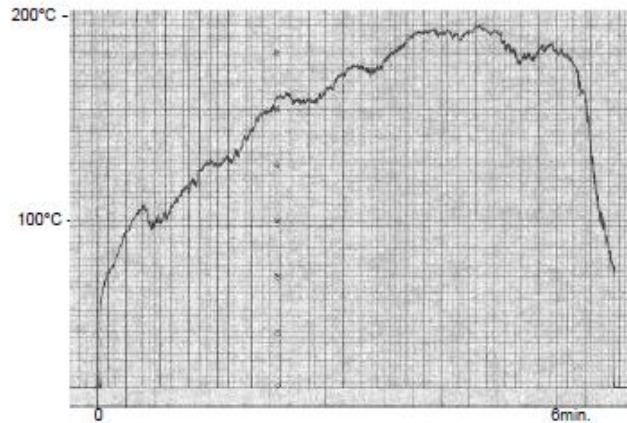


Fig. 1. Example of heating tunnel profile for curing E-S AX 70MN

ATTENTION:

1. Product is ready for use, but should be mixed very thoroughly before use using wood or plastic spatula. Mix smoothly from the bottom of the container. Mix carefully - not to whip air into the product. **INSURE E-S AX 70MN IS AT ROOM TEMPERATURE WHEN YOU WILL START WORKING WITH. Refrigeration during shelf time is not necessary.**
2. Prepare consistency before use according your SPECIFICATION.
3. If you need, use AXMC 70EM thinner. Thinner will change paste resistivity. Pls, do not exceed 1% of weight. After first tests pls let us know about your viscosity requirements – we will be able to change it for you.
4. Low conductivity and poor adhesion performance are symptomatic that paste is under curing conditions.
5. Refrigeration during shelf time not necessary, but useful. Keep container with lacquer in temp. no less 10 C. Before use, increase paste temperature very slowly.
6. Use paste with adequate ventilation.
7. Avoid skin and eye contact. If ingested, consult a physician immediately.
8. Clean by MEK or other suitable solvents. Allow screen to completely dry before using again.
9. Temperature during printing process must be kept between 20°C and 25°C, with relative humidity (RH) between 40% and 65%. This condition reduces static charges on the substrate.
10. When stored – keep container closed.

This information is based on data and tests believed to be accurate. AMEPOX MC makes no warranties (expressed or implied) as to its accuracy and assumes no liability in connection with the use or inability to use this product. (es-ax70mn)

8.4 DATASHEET PÁJECÍ PASTA

Partnership in Solder Technology Innovation



Lead-Free Solder Paste

PF 606-P30

version 1, 13.7.2015

BASIC OVERVIEW



SnAg3.0Cu0.5X Solder Paste
Halide Free
No Clean
Low Voiding

APPLICATIONS

Universal Lead-Free SMD Solder Paste
Wide Range of Applications and PCB designs

FEATURES

Appearance	Gray paste w/o visible foreign and clusters		
Alloy Composition	Sn/Ag3.0/Cu0.5/x		JIS-Z-3282
Melting Point	217~219 °C		
Particle Size	(Type 3)	+45µm < 1% , - 20µm < 10%	IPC-TM-650, 2.2.14
	(Type 4)	+38µm < 1% , - 20µm < 10%	
	(Type 5)	+25µm < 1% , - 15µm < 10%	
	(Type 6)	+15µm < 1% , - 5µm < 10%	
Powder Shape	Spherical		
Flux Content	11.5 ± 1.0 wt%		JIS-Z-3197, 8.1.2
Halide Content	< 0.0 wt% (in flux)		J-STD-004
Viscosity	200 ± 30 Pa . S (25±1°C, 10rpm, Malcom)		JIS-Z-3284 Annex 6
Flux Type	ROLO		J-STD-004

Alloy Detail Composition

(Sn)	(Ag)	(Cu)	(Ni)	(Ge)	(Zn)	(Al)	(Sb)	(Fe)	(As)	(Bi)	(Cd)	(Au)	(In)	(Pb)
REM.	2.8~ 3.2	0.3~ 0.7	0~ 0.01	0~ 0.01	0.001 MAX	0.001 MAX	0.05 MAX	0.02 MAX	0.03 MAX	0.10 MAX	0.002 MAX	0.05 MAX	0.10 MAX	0.05 MAX

Patent No.: Japanese Patent No. 3296289, U.S Patent No. 6179935B1, Germany Patent No.19816671C2

(wt%)

Scan Code for Solder
Paste Documents



www.nevo-solder.com



Lead-Free Solder Paste

PF 606-P30

version 1, 13.7.2015

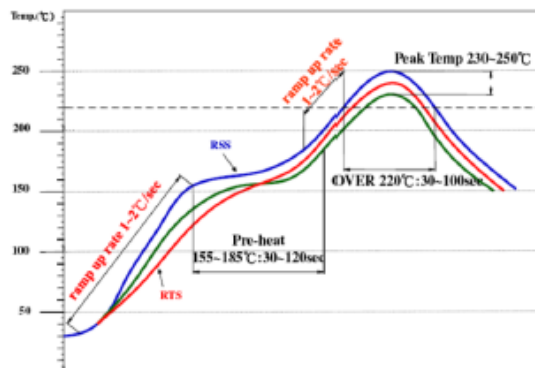
PERFORMANCE & RELIABILITY

Copper Plate Corrosion Test	Pass	JIS-Z-3197, 8.4.1
Spreading Test	> 70%	JIS-Z-3197, 8.3.1.1
Ion Chromatology Test	0.0 wt%	IPC-TM-650 Method 2.3.28.1
Copper Mirror Test	Pass	IPC-TM-650, 2.3.32
Viscosity Test (25°C, 10 rpm)	200 ± 30 Pa · S	JIS-Z-3284, Annex 6
Tackiness Test (gf)	> 130 (8hr)	JIS-Z-3284, Annex 9
Slump Test	Pass	JIS-Z-3284, Annex 7,8
Solder Ball Test	Pass	JIS-Z-3284, Annex 11

S.I.R. Test	▲	> 1 × 10 ⁹ Ω, Pass	IPC-TM-650, 2.6.3.3
Electro Migration Test	◆	Pass	IPC-TM-650, 2.6.14.1

▲ Test Conditions : 85 °C, 85% RH for 168 hrs ◆ Test Conditions : 65 °C, 88.5% RH for 596 hrs

RECOMMENDED REFLOW PROFILE



Ramp Up Rate (30~150°C): 1.0~2.0 °C/sec

Pre-heating Time (155~185°C): 30~120 sec

Time Period Above 220°C: 30~100 sec

Ramp Up Heating Rate: 1.0~2.0 °C/sec

Peak Temperature: 230~250 °C

Ramp Down Cooling Rate: 1.0~6.0 °C/sec

Note: The recommended reflow profile is provided as a guideline. Optimal profile may differ due to oven type, assembly layout or other process variables.



Lead-Free Solder Paste

PF 606-P30

version 1, 13.7.2015

STORAGE & HANDLING:

- Refrigerate the solder paste at 0-10°C. Shelf life is 6 months from production date (sealed package).
- Keep away of direct sunlight.
- Allow the paste to reach defined printing temperature (room temperature) for 3-4 hrs. Do not heat up the solder paste rapidly.
- For jars packaging, mix the solder paste before use for 1-3 mins by plastic spatula.
- It is recommended to finish fresh paste within 24 hrs. Do not store used paste and fresh paste in the same jar.
- If printing process was interrupted for more than 1 hour, remove the remained paste from stencil and seal in the jar.
- Recommended printing environment is 22-28°C and RH 30-60% .

Note: For more information, please refer to solder paste application guideline sheet

HOW TO ORDER

PF606 – P30 – T3 – 500

Solder Alloy	Flux	Particle Size	Weight / Packaging
PF 606 = SnAg3Cu0.5	P30 = ROLO	T3 = 45µm	30 = syringe 30g
		T4 = 38µm	100 = syringe 100g
		T5 = 25µm	150 = syringe 150g
		T6 = 15µm	250 = plastic jar 250g
			500 = plastic jar 500g
			600 = small cartridge 600g
			1200 = large cartridge 1200g



CONTACTS

Tel.: +49-152-5106-5427


support@nevo-solder.com

www.nevo-solder.com

NOTICE: Specifications are subject to change without notice. Contact NeVo® for the latest specifications. All statements, information and data given herein are believed to be accurate and reliable, but are presented without guarantee, warranty, or responsibility of any kind, expressed or implied. Statements or suggestions concerning possible use of our product are made without responsibility or warranty that any such use is free of patent infringement and are not recommendations to infringe any patent. The user should not assume that all safety measures are indicated or that other measures are indicated or that measures may not be required. Specifications are typical and may not apply to all applications.

NeVo®, Škrobářenská 506/2, 617 00 BRNO, CZECH REPUBLIC